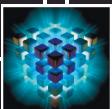


Макаренко С.И.



Противодействие беспилотным летательным аппаратам



Монография

С. И. Макаренко

**Противодействие
беспилотным летательным
аппаратам**

Монография

Санкт-Петербург
Наукоемкие технологии
2020

УДК 623.76
ББК 68.8
М15

Рецензенты:

*Ананьев Александр Владиславович, доктор технических наук;
Газизов Тальгат Рашитович, доктор технических наук, профессор;
Гончаренко Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор;
Тимошенко Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор;
Шишкин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент.*

М15 Макаренко С. И.

Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 204 с.

ISBN 978-5-6044793-6-0

В монографии представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), а также формирования общих направлений повышения эффективности такого противодействия. Проведен анализ возможностей по обнаружению БПЛА средствами радиолокационной, радио- и радиотехнической, оптико-электронной и акустической разведок. Подробно исследованы преимущества и недостатки следующих основных способов и средств противодействия БПЛА: огневое поражение БПЛА артиллерийским и ракетным вооружением комплексов противовоздушной обороны; радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи БПЛА; функциональное поражение БПЛА сверхвысокочастотным электромагнитным излучением; поражение БПЛА лазерным излучением. Кроме того, рассмотрены другие, менее распространенные, способы противодействия БПЛА.

Материалы работы предназначены для научных сотрудников, соискателей ученых степеней, военных и технических специалистов, занимающихся вопросами противодействия БПЛА.

Отдельные результаты, представленные в данной монографии, получены в рамках госбюджетной темы НИР СПИИРАН № 0073-2019-0004.

УДК 623.76
ББК 68.8

Напечатано с оригинал-макета, подготовленного автором.

ISBN 978-5-6044793-6-0

© Макаренко С. И., 2020

© Издательство «Наукоемкие технологии», 2020

С чувством глубокой благодарности посвящаю свою работу моим учителям:

*учителю математики гимназии № 25
г. Ставрополя
Юлии Марковне Кудриной;*

*кандидату технических наук доценту
Александру Васильевичу Кихтенко;*

*кандидату технических наук профессору
Анатолию Вячеславовичу Баженову;*

*доктору технических наук профессору
Владимиру Ильичу Владимирову;*

*доктору технических наук профессору
Александру Григорьевичу Ломако;*

*доктору военных наук профессору
Юрию Ивановичу Стародубцеву;*

*доктору технических наук профессору
Валерию Игоревичу Курносову.*

C.I. Макаренко

Оглавление

Введение	8
1. Назначение и классификация БПЛА. Особенности функционирования БПЛА, значимые для его обнаружения и поражения	13
1.1. Назначение, преимущества и недостатки БПЛА	13
1.2. Классификация БПЛА.....	16
1.3. Оценка целесообразности боевого применения БПЛА по показателю эффективность/стоимость	20
1.4. Малые БПЛА как наиболее сложные объекты для противодействия.....	21
1.5. Краткая характеристика бортового оборудования БПЛА	24
1.5.1. Двигательная установка.....	25
1.5.2. Система управления	26
1.5.3. Навигационная система	30
1.5.4. Система радиосвязи	32
1.6. Групповое применение БПЛА как основное направление повышения эффективности их использования	33
2. Обнаружение БПЛА	36
2.1. Малые БПЛА как наиболее сложные объекты для обнаружения.....	36
2.2. Обнаружение БПЛА средствами радиолокационной разведки	37
2.3. Обнаружение БПЛА средствами радио- и радиотехнической разведки	40
2.4. Обнаружение БПЛА средствами оптико-электронной разведки	41
2.5. Обнаружение БПЛА средствами акустической разведки.....	44
3. Противодействие БПЛА средствами огневого поражения ПВО	47
3.1. Тактико-технические характеристики средств ПВО, ориентированных на противодействие БПЛА	47
3.1.1. Отечественные средства ПВО.....	47
3.1.2. Зарубежные средства ПВО.....	49
3.2. Результаты испытаний и реального боевого применения средств ПВО при решении задач противодействия БПЛА.....	56
3.2.1. Результаты испытаний отечественных средств ПВО.....	56
3.2.2. Результаты боевого применения отечественных средств ПВО	59
3.2.2.1. Война в Сирии	59

3.2.2.2. Война в Ливии	62
3.2.2.3. Война в Нагорном Карабахе	63
3.2.3. Результаты испытаний и реального боевого применения зарубежных средств ПВО	66
3.3. Анализ основных причин низкой эффективности средств ПВО против БПЛА	69
3.3.1. Анализ стандартной номенклатуры целей средств ПВО	69
3.3.2. Анализ экономической целесообразности применения средств поражения комплексов ПВО против БПЛА	71
3.3.3. Анализ средств поражения комплексов ПВО	72
3.3.3.1. Артиллерийские средства поражения БПЛА	72
3.3.3.2. Ракетные средства поражения БПЛА	74
3.3.4. Анализ эффективности комплексов ПВО в условиях групповой атаки БПЛА.....	77
3.4. Предложения по повышению эффективности средств ПВО при их применении против БПЛА	81
3.4.1. Создание многофункциональной системы ПВО, включающей функции противодействия БПЛА.....	82
3.4.2. Модернизация существующих средств ПВО.....	85
3.4.3. Интеграция существующих комплексов ПВО со средствами РЭП.....	87
3.4.4. Разработка нового комплекса ПВО, ориентированного на противодействие именно БПЛА	88
4. Противодействие БПЛА средствами РЭП	91
4.1. Особенности противодействия БПЛА средствами РЭП	91
4.2. Тактико-технические характеристики типовых комплексов РЭП.....	94
4.2.1. Боевые комплексы РЭП.....	95
4.2.2. Коммерческие комплексы РЭП	99
4.2.3. Малогабаритные носимые средства РЭП	102
4.3. Радиоэлектронное подавление навигационной системы БПЛА	105
4.3.1. Проблемные вопросы радиоэлектронного подавления навигационной системы БПЛА	105
4.3.2. Особенности радиоэлектронного подавления навигационной системы БПЛА, основанной на приеме сигналов СРНС	107

4.3.3. Особенности радиоэлектронного подавления интегрированной навигационной системы БПЛА, основанной на комплексировании данных микромеханических инерциальных систем и сигналов СРНС	110
4.3.4. Возможности акустического подавления автономной навигационной системы БПЛА, основанной на микромеханических инерциальных системах.....	115
4.4. Радиоэлектронное подавление радиолиний управления и передачи данных БПЛА.....	116
4.4.1. Проблемные вопросы радиоэлектронного подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА	116
4.4.2. Особенности организации связи в командной радиолинии управления БПЛА.....	119
4.4.2.1. Специальные и военные БПЛА	119
4.4.2.2. Коммерческие БПЛА	121
4.4.3. Особенности организации связи в радиолиниях передачи данных с БПЛА.....	123
4.4.3.1. Специальные и военные БПЛА	124
4.4.3.2. Коммерческие БПЛА	125
4.4.4. Особенности радиоэлектронного подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА	126
4.5. Особенности информационно-технического воздействия с целью вмешательства в процесс функционирования систем БПЛА или перехвата управления	134
5. Противодействие БПЛА средствами функционального поражения СВЧ излучением	139
5.1. Особенности функционального поражения радиоэлектронных средств СВЧ излучением	139
5.2. Тактико-технические характеристики типовых средств функционального поражения СВЧ излучением, ориентированных на противодействие БПЛА	144
5.3. Эффективность функционального поражения БПЛА СВЧ излучением.....	148
6. Противодействие БПЛА средствами лазерного излучения	151
6.1. Особенности поражения объектов лазерным излучением.....	151
6.2. Анализ средств поражения БПЛА лазерным излучением	153
6.3. Эффективность поражения БПЛА лазерным излучением	160

7. Другие средства и способы противодействия БПЛА.....	163
7.1. Противодействие БПЛА с использованием специальных БПЛА- перехватчиков.....	163
7.2. Противодействие БПЛА с использованием горючих аэрозолей.....	165
7.3. Противодействие БПЛА с использованием специальных клейких и вязких аэрозолей	166
7.4. Противодействие БПЛА с использованием сетей	166
7.5. Противодействие БПЛА с использованием специально трениро- ванных птиц	167
7.6. Вывод БПЛА из положения устойчивого полёта в закритические условия путём накрытия спутным следом от пролетающего летаю- щего аппарата	167
7.7. Мероприятия, направленные на повышение скрытности собствен- ных объектов, а также на снижение эффективности применения БПЛА	168
Заключение	169
Список сокращений	170
Литература	178

Введение

«Стоит залезть на eBay и купить как можно больше этих 300-долларовых квадрокоптеров, чтобы израсходовать весь имеющийся у них боезапас» – такими словами охарактеризовал ход мысли потенциальных противников США руководитель Командования боевой подготовки американской армии, генерал Д. Перкинс, после того, как один из союзников НАТО применил ракету комплекса Patriot стоимостью 3 млн долларов для уничтожения гражданского дрона...

*из новостной ленты «Рамблер»
от 15 марта 2017 г.*

С появлением средних и малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) задачи противодействия их применению в особо контролируемых зонах существенно актуализировались. Начиная с середины 2000-х годов в средствах массовой информации стали регулярно появляться сообщения об опасном использовании малых БПЛА в районах аэропортов, а с середины 2010-х – о применении малых БПЛА для ведения несанкционированного наблюдения важных объектов, проведения терактов и диверсий, переноски запрещенных грузов (оружия, наркотиков) и широком использовании БПЛА в военном деле. В связи с этим на Западе началась активная научная разработка данного направления исследований, о чем можно судить по работам [1-9]. При этом данная проблематика является относительно новой, так как самая ранняя из работ по тематике противодействия БПЛА [3] относится к 2008 г., а начало активных научных публикаций по этой тематике относится к 2016-2017 гг. В результате к 2020 г. в Западной научной печати были введены относительно устоявшиеся термины, а также определены основные направления исследований в этой предметной области: «противодействие БПЛА» – используются такие термины как «C-UAV», «CUAV», «C-UAVs», «CUAVs» (Counter Unmanned Aerial Vehicles); «системы противодействия БПЛА» – используются такие термины как «C-UAS», «CUAS» (Counter Unmanned Aircraft Systems), «C-UAV system», «CUAV-system», «AUDS» (Anti-UAV Defense System), Counter-Drone Systems; «технологии противодействия БПЛА» – используются такие термины как «Anti-Drone Technologies» и «Counter-UAVs Technologies».

При этом, если на начальном этапе появления задачи противодействия БПЛА (в начале 2000-х гг.), эта задача решалась исключительно средствами поражения (ракетами и снарядами) зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) противовоздушной обороны (ПВО), то в настоящее время специалисты осознали, что прямое отражение массированного налета БПЛА средствами ЗРК ПВО, впервых, неоправданно экономически из-за использования дорогостоящих ракет

по большому числу относительно дешевых БПЛА, а во-вторых, это ведет к быстрому исчерпанию боевого ресурса ЗРК и последующей их неспособности отразить удар уже пилотируемой авиации, а также крылатых ракет высокоточного оружия (ВТО). В связи с этим, в настоящее время широко исследуются новые способы противодействия БПЛА, в том числе такие как применение средств радиоэлектронного подавления (РЭП), а также средств направленного излучения энергии – лазерного оружия. При этом, если применение лазерного оружия является еще относительно экспериментальной технологией, то способы противодействия БПЛА на основе совместного использования комплексов РЭП и ЗРК уже активно используются в практике локальных боевых действий (например, для обороны базы Войск Воздушно-космической обороны (ВКО) Российской Федерации (РФ) в Сирии), а также для формирования периметра защиты особо охраняемых объектов (например, специальных объектов РФ – объектов МО, МВД, ФСО, ФСИН и т.д.).

Анализ публикаций в области противодействия БПЛА, показывает, что серьезных работ по данной тематике довольно мало, а в подавляющем числе исследований в этой области преобладают излишне оптимистические выводы относительно успешности поражения всех видов БПЛА существующими отечественными средствами ПВО или же глубокое убеждение авторов в поистине «фантастических» возможностях средств РЭП. При этом многие авторы, не вполне понимают сложность задачи противодействия БПЛА, рассматривают исключительно отдельные, частные аспекты этой проблематики, а также не обладают сведениями о реальных возможностях существующих комплексов ПВО и РЭП. Вместе с тем, проблема противодействия БПЛА, и, в особенности, малым БПЛА, является чрезвычайно сложной, многогранной, и до сих пор эффективно не решенной. Автор, имея определенный конструкторский опыт разработки подобных систем, хотел бы отразить в данной работе всю сложность и многоаспектность проблематики разработки действительно эффективных систем противодействия БПЛА, а также неприемлемость «поверхностных» и «однобоких» подходов к построению таких систем.

Обобщая вышесказанное, целью работы является систематизация и анализ различных способов и средств противодействия БПЛА, а также формирование общих направлений эффективного решения данной проблемы.

Актуальность рассмотрения задачи противодействия БПЛА (и особенно малым БПЛА), подтверждается большим числом соответствующих работ по этой тематике [10-51].

Данная работа обобщает и развивает предыдущие исследования автора, опубликованные по данной тематике, а именно – работы [52-57].

В 1-й главе монографии «Назначение и классификация БПЛА. Особенности функционирования БПЛА, значимые для его обнаружения и поражения» введена классификация БПЛА, представлены основные их задачи в боевой обстановке и возможности противоправного использования. Показано что наиболее сложными, с точки зрения обнаружения и противодействия, являются малые БПЛА. Данна краткая характеристика основных систем БПЛА, значимых для его обнаружения и противодействия: двигательной установке, системе

управления, навигационной системе, системе радиосвязи. Показано, что основным эволюционным направлением развития способов применения БПЛА, существенно затрудняющим противодействие им, является групповое применение БПЛА в виде, так называемых, «стай» или «роев».

Во 2-й главе монографии «Обнаружение БПЛА» показано, что наиболее сложными объектами обнаружения, для современных средств разведки и контроля воздушного пространства, являются малые БПЛА. Проведен анализ возможностей по обнаружению БПЛА средствами радиолокационной, радио- и радиотехнической, оптико-электронной и акустической разведок. Сделаны выводы об эффективности данных средств для своевременного обнаружения БПЛА, в интересах формирования по ним целевказания для средств поражения.

В 3-й главе монографии «Противодействие БПЛА средствами огневого поражения ПВО» представлены тактико-технические характеристики (ТТХ) отечественных и зарубежных ЗРК ПВО, предназначенных для огневого поражения БПЛА. Показана низкая эффективность ЗРК при решении данной задачи в боевых условиях и на полигонных испытаниях. Проведен анализ основных причин низкой эффективности ЗРК ПВО при их применении против БПЛА. Сформированы предложения по устранению типовых недостатков ЗРК и повышению их эффективности при поражении таких целей как БПЛА, в том числе и в условиях группового применения БПЛА.

В 4-й главе монографии «Противодействие БПЛА средствами РЭП» представлены ТТХ военных и «комерческих» комплексов РЭП, ориентированных на противодействие БПЛА. Обоснованно, что задача противодействия БПЛА средствами РЭП может решаться одним из трех способов, или их комбинацией: 1) подавления системы навигации БПЛА, за счет формирования ложных навигационных полей; 2) подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА 3) информационно-технического воздействие на БПЛА с целью дестабилизирующего вмешательства в процесс функционирования его подсистем или перехвата управления. Подробно рассмотрены данные способы подавления, их преимущества и недостатки. Сформированы предложения по повышению эффективности радиоэлектронного подавления таких объектов как БПЛА.

В 5-й главе монографии «Противодействие БПЛА средствами функционального поражения СВЧ излучением» представлены ТТХ комплексов функционального поражения электромагнитным излучением (ФП ЭМИ). Проведен анализ особенностей поражения СВЧ излучением БПЛА как интегрированного радиоэлектронного средства. Оценена эффективность функционального поражения БПЛА при применении современных экспериментальных средств ФП ЭМИ.

В 6-й главе монографии «Противодействие БПЛА средствами лазерного излучения» проведен анализ экспериментальных средств лазерного излучения. Проведен анализ особенностей поражения БПЛА лазерным излучением. Оценена эффективность поражения БПЛА при применении современных экспериментальных средств лазерного излучения.

В 7-й главе монографии «Другие средства и способы противодействия БПЛА» приведены различные способы и средства противодействия БПЛА ко-

торые не были подробно рассмотрены в главах 1-6, ввиду своей малой распространенности. В частности, в данной главе рассмотрено противодействие БПЛА с использованием: специальных БПЛА-перехватчиков; горючих и клейких аэрозолей; сетей; специально тренированных птиц; путем накрытия спутным следом от пролетающего летающего аппарата. Кроме того, рассмотрены мероприятия, направленные на повышение скрытности собственных объектов, а также на снижение эффективности применения БПЛА-разведчиков.

Монография не претендует на окончательную верность и полноту изложения всей затронутой проблематики. Данную работу стоит рассматривать, прежде всего, как « отправную точку » в таком актуальном на малоразвитом направлении исследований как противодействие БПЛА.

Материал монографии ориентирован на подготовленного читателя, имеющего базовые знания в области вооружения и военной техники, а также владеющего методами аэродинамики, боевой эффективности, радиоэлектроники и информатики. Работа может быть полезна техническим специалистам, научным работникам, соискателям ученой степени. Автор надеется, что его труд найдет своего читателя, а для кого-то, возможно, окажется своеобразной отправной точкой в дальнейших исследованиях.

Благодарности

Автор выражает благодарность рецензентам: доктору технических наук А.В. Ананьеву, доктору технических наук профессору В.И. Гончаренко, доктору технических наук профессору А.В. Тимошенко, доктору технических наук доценту С.В. Шишкову за поиск ошибок и неточностей при рецензировании монографии, за ценные предложения и советы, которые способствовали значительному улучшению качества работы, ее полноты и ясности, а также ориентированности на широкого читателя. Отдельно автор благодарит доктора технических наук профессора Т.Р. Газизова за глубокое погружение в данную тематику, скрупулезное рецензирование и кропотливый редакторский труд при подготовке монографии к изданию.

В том виде, в котором представлена данная монография, она бы не состоялась без помощи кандидата технических наук В.В. Ростопчина. Автор благодарит В.В. Ростопчина за предоставление им своих оригинальных авторских материалов [10-14, 21], которые были использованы в монографии и позволили глубже раскрыть отдельные аспекты проблемы противодействия БПЛА, а также за ценные советы и критические замечания, которые в значительной степени способствовали повышению качества работы на этапе ее подготовки к публикации.

Автор благодарит кандидата технических наук профессора А.В. Баженова, кандидата технических наук доцента А.В. Кихтенко, доктора технических наук профессора В.И. Владимириова, доктора технических наук профессора А.Г. Ломако, доктора военных наук профессора Ю.И. Стародубцева, доктора технических наук профессора В.И. Курносова за то, что именно они способствовали становлению автора как ученого, и я безмерно горжусь тем, что имел возможность работать рядом с такими людьми, и особенно – учиться у них.

Плодотворные исследования в области противодействия БПЛА стали возможными благодаря тем людям, которые помогали, поддерживали, направляли, критиковали и всячески способствовали автору в его исследованиях. Автор выражает благодарность за доброжелательную критику, научную и организационную поддержку, а также за плодотворное общение всем тем, с кем он обсуждал вопросы своих исследований на встречах, семинарах, конференциях, а также в процессе выполнения совместных НИОКР. Кроме того, автор считает своим долгом поблагодарить всех тех специалистов, которые внесли свой научный и исторический вклад в развитие этого направления исследований.

Особую признательность хочется выразить тем неординарным людям, с которыми автору посчастливилось совместно служить и работать: коллективу кафедры прикладной информатики и математики Ставропольского филиала МГГУ им М.А. Шолохова; коллективу кафедры эксплуатации и ремонта бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (радионавигации и радиосвязи) Ставропольского ВВАИУ им. маршала авиации В.А. Судца; коллективу кафедры радионавигации и радиолокации ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»; коллективу кафедры сетей и систем связи космических комплексов ВКА им. А.Ф. Можайского; коллективам НТЦ-7 и НИО-77 в НИИ «Вектор»; коллективу НТЦ-21 в НИИ «Рубин»; коллективу Корпорации «Интел групп»; коллективу кафедры информационной безопасности СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); коллективу кафедры информационных и вычислительных систем ПГУПС им. Императора Александра I; коллективам лаборатории проблем компьютерной безопасности и лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПб ФИЦ РАН. Творческая атмосфера этих коллективов всегда способствовала плодотворной деятельности и определила области научных интересов и направления исследований автора.

Автор будет рад сотрудничеству в рассматриваемой области исследований, а также конструктивным замечаниям и предложениям. Замечания и предложения прошу направлять по адресу: mak-serg@yandex.ru.

С.И. Макаренко

1. Назначение и классификация БПЛА. Особенности функционирования БПЛА, значимые для его обнаружения и поражения

1.1. Назначение, преимущества и недостатки БПЛА

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – летательный аппарат самолетного или вертолетного типа без экипажа на борту, полет которого осуществляется либо по заранее заложенной на борт программе, либо путем удаленного управления по каналам связи.

На современном этапе развития БПЛА предназначены для решения широкого спектра задач: наблюдения (разведки), нанесения ударов, транспортировки грузов, целеуказания другим средствам поражения, ретрансляции данных и т.д. при их дистанционном управлении оператором, или путем автономных действий по заранее заложенной программе.

В большинстве случаев БПЛА решают следующие основные задачи [46, 48, 57]:

- ведение наблюдения и разведки, в том числе и в реальном масштабе времени;
- нанесения ударов по наземным/надводным целям, самостоятельно или носимыми средствами поражения;
- постановка радиоэлектронных помех;
- целеуказания для других средств поражения, а также корректировка их применения;
- транспортировка и доставка грузов и средств в заданный район;
- ретрансляция данных между удаленными абонентами сетей связи;
- отвлечение внимания или использование их в качестве ложных воздушных целей.

Террористические группировки и лица, ведущие противозаконную деятельность, применяют БПЛА (преимущественно – малые БПЛА) для решения следующих задач [20, 46, 47]:

- доступа за периметр охраняемых объектов и ведение там наблюдения;
- точечное уничтожение отдельных важных лиц;
- заброска самодельных средств поражения;
- нанесение повреждений зданиям, памятникам культуры, объектам инфраструктуры и транспортным средствам;
- транспортировка запрещенных средств или их заброска на охраняемую территорию;
- препятствование воздушному движению в аэропортах.

Рассмотрим основные особенности БПЛА.

Основными преимуществами БПЛА, затрудняющим задачу их обнаружения и противодействия, являются [21, 44, 45, 48]:

- возможность удаленного выполнения задач при безопасном удалении оператора, и при этом, обеспечение оператора информацией о ходе выполняемой задачи практически в реальном масштабе времени;
- применение широкого спектра малогабаритных целевых нагрузок на современной элементной базе (радиолокационных станций (РЛС), средств радиоэлектронной разведки (РЭР), боевых частей (БЧ) с направленным поражением и др.);
- возможность длительного нахождения над зоной боевых действий, а также возможность самостоятельного подавления или поражения средств ПВО;
- низкая заметность БПЛА в радиолокационном и оптическом диапазонах за счет более низких массогабаритных характеристик, по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами (ЛА), и широкого применения в конструкции БПЛА пластиковых и композитных материалов;
- возможность совершать маневры с высокими перегрузками и использовать режимы полета, приводящие к снижению эффективности существующих и перспективных средств ПВО – возможность полета на предельно малых высотах (до 50 м) с использованием защитных свойств рельефа местности, а также на низких скоростях полета (10-30 м/с). При этом большинство современных ЗРК имеют ограничения на обстрел воздушных целей при их минимальной высоте до 1 км и минимальной скорости до 100 м/с. Кроме того, при приеме отраженных сигналов РЛС от малоразмерных, малоскоростных БПЛА возможно их попадание в стробы защиты РЛС от пассивных помех и стационарных предметов (что делает БПЛА неразличимыми для РЛС на фоне местности или в облаке пассивных помех);
- малые геометрические размеры, обуславливающие низкие значения вероятностей поражения снарядами зенитной артиллерии, а также приводящие к несрабатыванию радиовзрывателей зенитных управляемых ракет (ЗУР) при их подлете в район малоразмерной цели;
- скрытность применения БПЛА, обеспечиваемая относительной бесшумностью их двигателей, а также за счет полета в режиме «радиомолчания» до выхода их в зону непосредственного боевого применения.

Специфика летно-технических характеристик БПЛА обуславливает ряд дополнительных, крайне важных, преимуществ их построения и эксплуатации [48]:

- применение классической аэродинамической схемы, которая обеспечивает устойчивость и простоту управления;
- возможность оснащения БПЛА электрическими двигателями, выгодно отличающимися простотой в эксплуатации;
- возможность использования нетрадиционных видов энергии для двигателей (солнечных батарей, криогенного топлива и др.), позволяющих применять БПЛА без ограничения их полета по времени;

- значительное снижение общего уровня затрат, связанных с переброской и временным базированием достаточно компактных подразделений БПЛА в районы боевого предназначения, ремонтом и обслуживанием БПЛА и обеспечивающей аппаратуры в полевых условиях;
- низкая стоимость разработки и эксплуатации БПЛА, которая меньше стоимости современных пилотируемых ЛА, выполняющих многие аналогичные боевые задачи. При этом сохраняются дорогостоящий летный состав, самолеты, вертолеты и др.

Перспективным направлением повышения эффективности БПЛА является групповое применение малых дешевых БПЛА в виде «стая» («роя»), когда они объединяются в группы и при условии четкого распределения ролей. Такие группы БПЛА за счет своей массовости могут эффективно преодолевать средства РЭП и ПВО и выполнять различные боевые задания [21, 44, 48].

Основными недостатками БПЛА являются [44, 48]:

- ограничения по применению в зависимости от времени суток и погодных условий для отдельных категорий БПЛА;
- низкая интеллектуальность действий в автономном режиме;
- низкая скрытность каналов радиоуправления (КРУ) и передачи данных;
- низкая живучесть конструкции;
- подверженность КРУ и канала спутниковой навигации БПЛА воздействию радиоэлектронных помех;
- сравнительно небольшая дальность действия дистанционного управления БПЛА с ПУ при отсутствии дополнительных средств ретрансляции;
- ограничения по массе и составу полезной нагрузки.

Рассмотрим некоторые из вышеуказанных недостатков БПЛА более подробно.

Наличие значительных ограничений применения БПЛА в зависимости от погодных условий. Использование БПЛА возможно лишь в благоприятных условиях, например, при скорости ветра менее 10 м/с. Применение малых БПЛА существенно затруднено при сильном дожде (ливне), в условиях высокой влажности воздуха, при среднем и сильном тумане [48].

Низкая живучесть и устойчивость БПЛА к физическому воздействию любого рода, от попадания осколка (пули) до сильного порыва ветра, приводящая к потерям пространственного ориентирования и срыву БПЛА в неконтролируемые режимы пролета. Каждое существенное внешнее возмущение (резкий порыв ветра, восходящий или нисходящий воздушный поток, попадание БПЛА в воздушную яму) может привести к потере ориентации БПЛА и последующей аварии [48].

Низкий уровень технической надежности и «интеллектуальности» действий БПЛА в автономном режиме. По опыту применения БПЛА в локальных войнах специалистами сделан вывод о том, что частота аварий БПЛА в 100 раз выше, чем пилотируемых ЛА. Основными причинами этого являются значительно меньшая надежность бортового радиоэлектронного оборудования (РЭО) на борту БПЛА и отсутствие дублирования функций основного РЭО ввиду ма-

лой грузоподъемности БПЛА, в отличие от пилотируемых ЛА. Традиционно БПЛА оснащается комплектом минимально необходимой аппаратуры. К перечню такой бортовой аппаратуры можно отнести [48]:

- навигационную систему (автономную или основанную на использовании сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС));
- систему связи, включающую в себя каналообразующую аппаратуру КРУ, по которой осуществляется управление БПЛА с ПУ и передаются телеметрические данные о состоянии оборудования БПЛА, а также каналообразующую аппаратуру передачи данных от целевой нагрузки;
- целевую нагрузку (аппаратуру разведки или средства поражения).

Кроме того, при сбоях в работе пилотируемого ЛА летчик в ряде случаев способен быстро диагностировать и исправлять случившуюся во время полета аварийную ситуацию, устраниТЬ неисправность, взять на себя ручное управление и т.д., а при эксплуатации БПЛА такие действия в полете провести невозможно. Высокая уязвимость БПЛА от различных факторов боевой обстановки и их низкая «интеллектуальность» в автономном режиме, ввиду отсутствия таких незаменимых человеческих качеств, как оперативное принятие решения, возможность переноса основных усилий на новые, более важные объекты, умение уклоняться от опасности и оперативно применять меры к обману противника, введению его в заблуждение и т.д. являются сегодня неразрешимыми проблемами, снижающими эффективность боевого применения современных БПЛА [48].

1.2. Классификация БПЛА

При рассмотрении задачи противодействия БПЛА следует классифицировать их по массогабаритным характеристикам и скорости, а также по назначению и применению.

По массогабаритным характеристикам и скорости для БПЛА в настоящее время введено несколько классификаций.

Американская классификация БПЛА представлена в таблице 1.1. Западноевропейская классификация БПЛА представлена в таблице 1.2. Российская классификация БПЛА представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.1 – Американская классификация БПЛА

Классификационный тип	Масса, кг	Высота полета, км	Скорость, км/ч	Примеры
I	0-9	до 0,365	до 185	RQ-11 Raven, RQ-20 Puma, Wasp III, RQ-16 T-Hawk
II	9,5-25	до 1,07	до 460	ScanEagle
III	более 600	до 5,5	Не определено	RQ-2 Pioneer, RQ-5 Hunter, RQ-7 Shadow, RQ-21 Blackjack
IV	более 600	до 5,5	Не определено	RQ-1/MQ-1 Predator, MQ-1C Grey Eagle, X-47, YMQ-18 Hummingbird, MQ-8 Fire Scout
V	более 600	свыше 5,5	Не определено	RQ-4 Global Hawk, MQ-9 Reaper

Таблица 1.2 – Западноевропейская классификация БПЛА

Классификационный тип	Средняя высота полета, км	Средний радиус действия, км	Средняя длительность полета, ч	Примеры
Micro-UAV (микро-БПЛА)	0,6	2	до 1	EMTAIadin (Германия)
Mini-UAV или Close-Range UAV (мини-БПЛА или БПЛА ближнего радиуса действия)	до 2	до 10	до 2	Bird Eye 400 (Израиль)
Short-range UAV (БПЛА малого радиуса)	до 3	50-150	до 6	Speiwer (Франция)
Medium-range UAV (БПЛА среднего радиуса)	до 6	100-300	до 12	Hermes 450 (Израиль)
MALE (Medium-altitude, long-endurance) (средневысотный БПЛА длительного полета)	5-15	200-500	до 24	Patroller (Франция)
HALE (High-altitude, long-endurance) (высотный БПЛА длительного полета)	свыше 9,1	глобальный	свыше 24	Global Hawk (США)

Примечание: классы Short-range UAV и Medium-range UAV часто объединяют в общий класс TUAV (Tactical unmanned aerial vehicle) – тактические БПЛА.

Таблица 1.3 – Российская классификация БПЛА

Классификационный тип	Взлетная масса, кг	Дальность действия, км
Нано-БПЛА ближнего радиуса действия	до 0,25	до 2
Микро- и мини- БПЛА ближнего радиуса	до 5	25-40
Легкие БПЛА малого радиуса действия	5-50	10-70
Легкие БПЛА среднего радиуса действия	50-100	70-150 (до 250)
Средние БПЛА	100-300	150-1000
Средне-тяжелые БПЛА	300-500	70-300
Тяжелые БПЛА среднего радиуса действия	500	70-300
Тяжелые БПЛА большой продолжительности полета	1500	1500
Беспилотные боевые самолеты (ББС)	500	1500

В таблице 1.4 представлена гармонизированная классификация БПЛА, объединяющая западноевропейский и российский подходы к классификации, в соответствии с предложениями, представленными в работе [58].

Таблица 1.4 – Гармонизированная классификация БПЛА [58]

Класс БПЛА	Категория	Международное обозначение	Обозначение	Наименование	Взлетный вес, кг	Радиус действия, км	Практический потолок, км	Продолжительность полета, ч
Малые	I	η	η	Нано	до 0,25	до 1	0,1	<1
		μ	μ	Микро	до 5	до 10	3	1
		Mini	Мини	Мини	до 25	10-40	3	<4
Легкие	II	CR	БлД	Ближнего действия класса 1	25-50	25-70	3	2-4
				Ближнего действия класса 2	50-150	50-100	3	<6
Средние	III	SR	МД	Малой дальности	до 200	до 150	4	6-8
		MR		Средней дальности	до 500	200	5	10-12
	IV	MRE	СД	Средней дальности с большой продолжительностью полета (СД-БПП)	500	500	8	10-18
		LADP		Маловысотный большой дальности (МБД)	до 250	более 250	до 4	1,5-2
Тяжелые	V	LALE	БД	Маловысотный большой дальности большой продолжительности полета (МБД-БПП)	до 250	более 500	4	18
	V-VI	MALE		Средневысотный большой дальности, большой продолжительности полета (СБД-БПП)	до 1000	более 1000	8	24
	VII	HALE		Высотный большой дальности, большой продолжительности полета (ВБД-БПП)	до 2500	более 4000	20	свыше 24
Боевые	VIII	UCAV	Б	Беспилотный ударный (Б-У)	более 1000	более 500	12	1,5-2
		DEC		Беспилотная ложная цель (Б-Л)	150-500	0-500	0,05-5	до 4
		TGT		Беспилотная мишень (Б-М)	10-10000	5-200	0,05-10	свыше 0,5
Смешанные	IX	OPA	ОП	Пилотируемый по выбору (опционно) ЛА	до 200			
		CMA		Переоборудованный пилотируемый ЛА				

Ввиду большого значения именно скорости БПЛА при его перехвате средствами ЗРК ПВО, в работе [21] предлагается различать следующие типы БПЛА в зависимости от их функциональной скорости полета:

- малоскоростные БПЛА – со скоростями полета до 200 км/ч (с максимальной скоростью полета в этом классе – 250 км/ч);
- среднескоростные БПЛА – со скоростями полета от 150 до 400 км/ч (с максимальной скоростью полета в этом классе – 450 км/ч);
- скоростные БПЛА – со скоростями полета от 350 до 800 км/ч (с максимальной скоростью полета в этом классе – 900-980 км/ч).

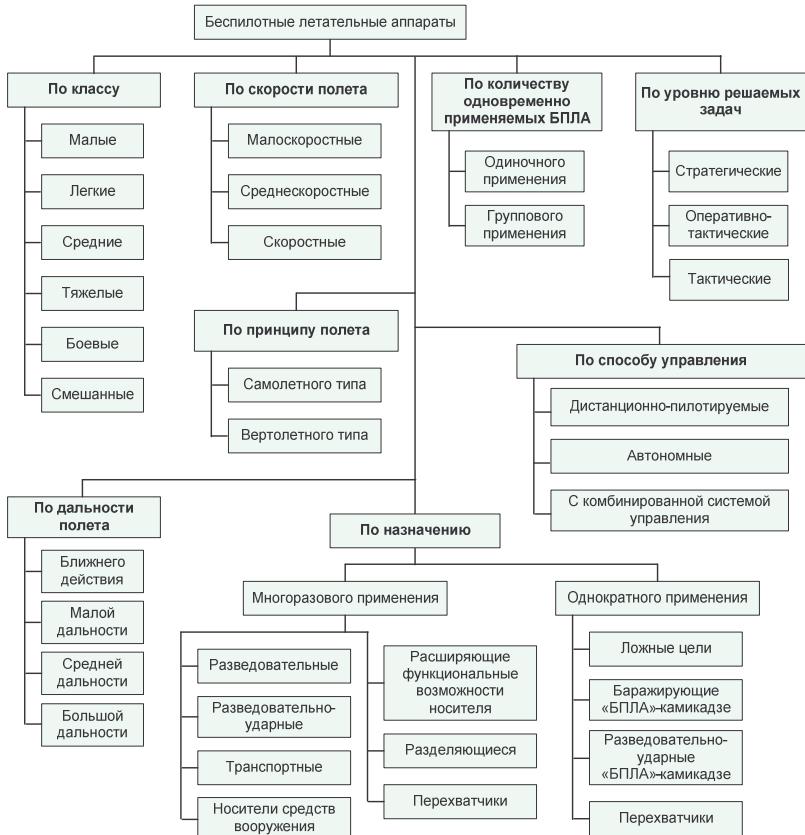


Рис. 1.1. Классификация БПЛА [21, 53].

По назначению следует различать следующие БПЛА [21]:

- БПЛА многоразового применения:
 - разведывательные БПЛА;
 - разведывательно-ударные БПЛА;
 - транспортные БПЛА;
 - БПЛА – носители средств вооружения;
 - БПЛА, расширяющие функциональные возможности носителя;
 - разделяющиеся БПЛА;
 - БПЛА – перехватчики.
- БПЛА одноразового применения:
 - БПЛА – ложные цели;
 - барражирующие «БПЛА-камикадзе»;
 - разведывательно-ударные «БПЛА-камикадзе»;
 - БПЛА – перехватчики.

В соответствии с количеством одновременно применяемых БПЛА следует различать [21]:

- БПЛА одиночного применения;
- БПЛА группового применения.

В соответствии с уровнем военного управления, в интересах которого БПЛА решает задачи, следует различать [21]:

- стратегические БПЛА;
- оперативно-тактические БПЛА;
- тактические БПЛА.

В соответствии с принципом полета БПЛА следует различать [21]:

- БПЛА самолетного типа;
- БПЛА вертолетного типа.

1.3. Оценка целесообразности боевого применения БПЛА по показателю эффективность/стоимость

Одним из основных критериев оценки целесообразности боевого применения БПЛА является показатель «эффективность/стоимость», а именно – приведенная стоимость выполнения боевой задачи $C_{\text{пр бз}}$ [21]:

$$C_{\text{пр бз}} = \frac{C_{бз}}{P_{\text{вып бз}}},$$

где: $C_{бз}$ – полная стоимость выполнения боевой задачи; $P_{\text{вып бз}}$ – вероятность выполнения боевой задачи.

Очевидно, что указанный критерий по своей природе является величиной, базирующейся на статистических данных. Полная стоимость выполнения боевой задачи $C_{бз}$ определяется как [21]:

$$C_{бз} = N_{\text{пот}} C_{1\text{БПЛА}} + C_{1\text{ч}} T_{\text{п}} (N_{\text{БПЛА}} - N_{\text{пот}}) + C_{\text{бл}} + C_{\text{об}},$$

где: $N_{\text{БПЛА}}$ – количество БПЛА в наряде, выполняющем боевую задачу; $N_{\text{пот}}$ – количество потерянных БПЛА; $C_{1\text{БПЛА}}$ – стоимость одного БПЛА; $C_{1\text{ч}}$ – стоимость одного часа полета БПЛА; $T_{\text{п}}$ – продолжительность полёта БПЛА при выполнении боевой задачи; $C_{\text{бл}}$ – стоимость израсходованных боеприпасов при выполнении боевой задачи; $C_{\text{об}}$ – стоимость обеспечения выполнения боевой задачи.

Вероятность выполнения боевой задачи $P_{\text{вып бз}}$ нарядом из $N_{\text{БПЛА}}$ однотипных БПЛА, определяется вероятностью $P_{\text{вып бз 1}}$ того, что хотя бы один БПЛА выполнит боевую задачу:

$$P_{\text{вып бз}} = 1 - (1 - P_{\text{вып бз 1}})^{N_{\text{БПЛА}}}.$$

В последнем выражении вероятность выполнения боевой задачи одним БПЛА $P_{\text{вып бз 1}}$ является сверткой частных вероятностей выполнения этим БПЛА отдельных этапов боевой задачи [59]:

$$P_{\text{вып бз 1}} = P_{\text{выл}} P_{\text{преод}} P_{\text{нав ц}} P_{\text{возд ц}},$$

где: $P_{\text{выл}}$ – вероятность своевременного вылета БПЛА, характеризует эффективность функционирования наземной системы управления и технических средств инженерно-авиационного и аэродромно-технического обеспечений; $P_{\text{преод}}$ – вероятность преодоления БПЛА зоны ПВО и зон РЭП, характеризует

маневренные свойства БПЛА, эффективность выбора маршрута полета, устойчивость БПЛА и его бортового оборудования к воздействию поражающих факторов средств ПВО и РЭП; $P_{\text{нав ц}}$ – вероятность успешного наведения на цель, которая характеризует эффективность функционирования бортовых средств БПЛА, прицельно-навигационного комплекса и наземной системы управления; $P_{\text{возд ц}}$ – вероятность успешного воздействия по цели: для разведывательных БПЛА – успешное вскрытие разведываемых параметров цели, для ударных БПЛА – успешное поражение цели.

Отметим, что вероятности в последнем выражении являются условными, и каждая следующая вероятность принимает свое некоторое значение, при условии, что вероятности предыдущих этапов уже равны единице.

Анализ выражения для $C_{\text{пр бз}}$ показывает, что современные тенденции применения БПЛА идут по пути уменьшения их массогабаритных параметров, удешевления конструкций и повышения маневренности ($C_{\text{БПЛА}} \downarrow$, $C_{\text{1ч}} \downarrow$, $C_{\text{бп}} \downarrow$, $C_{\text{об}} \downarrow$, $P_{\text{пресод}} \uparrow$), объединения их в группы ($N_{\text{БПЛА}} \uparrow$), что приводит к тому, что даже при увеличении количества потерянных БПЛА ($N_{\text{пот}} \uparrow$), они примерно на том же уровне выполняют свою боевую задачу ($P_{\text{вып бз}} \approx \text{const}$, $C_{\text{пр бз}} \approx \text{const}$).

Отметим, что вышеизложенный подход к оценке эффективности применения БПЛА не является единственным. Другая, альтернативная методика оценки эффективности применения БПЛА изложена в работе [60] и основана на учете таких факторов как живучесть БПЛА, возможности перераспределения функций в группе, особенностях решаемой задачи и т.д.

1.4. Малые БПЛА как наиболее сложные объекты для противодействия

Проведенный в работах [21, 44, 47-49] анализ показал, что наиболее сложными в отношении противодействия являются малые БПЛА – малогабаритные и малоскоростные. К дополнительным факторам, которые препятствуют эффективному противодействию таким БПЛА, относятся:

- использование высокоманевренных (например, «змейка») и «рваных» (с периодическим зависанием или резким снижением скорости) режимов полета;
- использование в конструкции БПЛА пластиковых и композиционных материалов, слабо отражающих электромагнитное излучение (ЭМИ);
- использование для управления БПЛА не выделенных КРУ на основе отдельных средств связи, а уже существующей связной инфраструктуры мобильных операторов связи и точек доступа Wi-Fi.

К малым БПЛА можно отнести (таблица 1.4):

- нано БПЛА – массой менее 0,25 кг, продолжительностью полета менее 1 ч, высотой полета до 300 м, радиусом действия до 1 км;
- микро БПЛА – массой до 5 кг, продолжительностью полета около 1 ч, высотой полета до 3 км, радиусом действия до 10 км;
- мини БПЛА – массой до 25 кг, продолжительностью полета менее 4 ч, высотой полета до 3 км, радиусом действия до 40 км.

Применение малых БПЛА прочно вошло в тактику действий как воинских подразделений, так и террористических группировок. По своему назначению малые БПЛА подразделяются на разведывательные и ударные (последние только одноразового применения) с массой полезной нагрузки до 20 кг.

Малые тактические БПЛА в воинских подразделениях решают следующие основные задачи [48, 57]:

- ведение воздушной разведки противника в реальном масштабе времени;
- слежение за наиболее важными объектами (мобильными пунктами управления, пусковыми установками ракетных формирований стратегического и оперативного предназначения и др.);
- «подсветки» целей для средств поражения ВТО;
- провоцирование расхода огневого ресурса и боеприпасов значимых средств поражения перед их атакой;
- заброска средств поражения;
- установка забрасываемых постановщиков помех (ЗПП);
- корректировка огня артиллерии;
- доставка экстренных грузов специального и медицинского назначения;
- ретрансляция данных между бойцами и группами тактических подразделений, при их совместных действиях в городских условиях или в местности со сложным рельефом;
- отвлечение внимания на демонстрационные полеты БПЛА и др.

Террористические группировки и лица, ведущие противозаконную деятельность, применяют малые БПЛА (рис. 1.2-1.5) для решения следующих задач [20, 46, 47]:

- доступа за периметр охраняемых объектов и ведение там наблюдения;
- точечное уничтожение отдельных важных лиц;
- заброска самодельных средств поражения;
- нанесение повреждений зданиям, памятникам культуры, объектам инфраструктуры и транспортным средствам;
- транспортировка запрещенных средств или их заброска на охраняемую территорию;
- препятствование воздушному движению в аэропортах;
- обмен сообщениями в условиях сохранения режима радиомолчания.

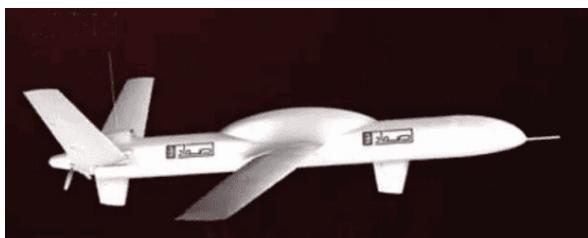


Рис. 1.2. БПЛА Qasif-K2, успешно атаковавший аэропорт г. Джизана (Саудовская Аравия) 8 июля 2020 г.



Рис. 1.3. Пример БПЛА Samad-3, успешно атаковавшего нефтеперерабатывающий завод в г. Абкейк (Саудовская Аравия) 14 сентября 2019 г.



а.



б.

Рис. 1.4. Примеры самодельных малых БПЛА самолетного типа, атаковавших российскую авиабазу в г. Хмеймим (Сирия) в 2019-2020 гг.



а. DJI M600



б. DJI Phantom 4

Рис. 1.5. Примеры малых БПЛА-квадрокоптеров, предположительно подобных тем, которые атаковали Президента Венесуэлы Н. Мадуро 4 августа 2018 г.

Образцы малоразмерных разведывательных БПЛА имеют взлетную массу от 2-3 кг (БПЛА «Пума», «Драгон Ай», «Скайлайт» и др.), до 15-30 кг («Интегратор», «Луна X-2000»). При этом полезная нагрузка этих БПЛА составляет от

0,2-0,4 до 2-3 кг, а радиус действия до 10-20 км. Эти БПЛА ведут оптико-электронную разведку (ОЭР) и находятся на вооружении штабных, мотопехотных (пехотных или танковых) батальонов, а также артиллерийских дивизионов механизированных (танковых, пехотных, воздушно-десантных или воздушно-штурмовых) бригад, дивизий и армейских корпусов. Они также применяются в составе армейской авиации и в силах специальных операций [48].

1.5. Краткая характеристика бортового оборудования БПЛА

В состав БПЛА входят следующие основные системы:

- планер (несущая конструкция);
- двигательная установка;
- система электроснабжения;
- система управления;
- навигационная система;
- телеметрическая система;
- система радиосвязи.

Взаимосвязь основных подсистем БПЛА представлена на рис. 1.6.

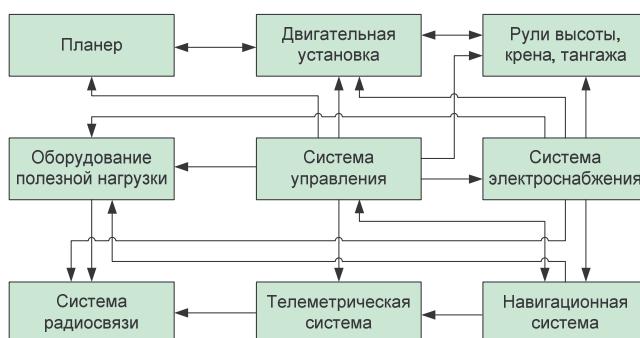


Рис. 1.6. Взаимосвязь основных подсистем БПЛА

В зависимости от перечня решаемых задач на борту БПЛА могут дополнительно устанавливаться следующие системы и устройства [48]:

- системы оптико-электронной, тепловизионной, радиолокационной, радио- и радиотехнической, радиационной, химической, бактериологической и других видов разведки с малогабаритным накопителем разведданных;
- средства постановки активных радиоэлектронных помех;
- устройства наведения и коррекции управляемого оружия («подсветки» целей);
- средства поражения, различных типов;
- средства управления и связи с наземным пунктом управления;
- ответчик системы госопознавания;

- аппаратура автономного полета и автоматической посадки;
- транспортные кассеты, отсеки, крепления и т.д.

1.5.1. Двигательная установка

Как правило, двигательная установка малых БПЛА самолетного типа, представляет собой турбовинтовой двигатель, который в общих принципах соответствует двигателю установке пилотируемых ЛА [61, 62].

Вместе с тем, в последнее время в качестве БПЛА получили широкое распространение малые БПЛА вертолетного типа, так называемые «мультикоптеры», «квадрокоптеры», «дроны». Для данных БПЛА характерно использование установки принципиально иного рода – на основе использования 4, 6 или большего количества двигателей.

В качестве двигателей малых БПЛА вертолетного типа применяют двигатели двух типов [63]:

- коллекторные – обмотки находятся на роторе (вращающейся части);
- бесколлекторные – обмотки находятся на статоре (неподвижной части).

Бесколлекторные двигатели (BLDC-двигатели) не используют щеток и коллекторов и при наличии хороших подшипников требуют минимального технического обслуживания. Ротор BLDC-двигателей изготавливается из постоянного магнита и не имеет обмоток. Статор содержит обмотки, переменное поле которых приводит к вращению ротора [63].

Управление двигателями осуществляется с помощью задания направления и скорости вращения винтов через подключаемые к ним электронные регуляторы скорости ESC (Electric Speed Controller). На вход регуляторов подается напряжение с аккумулятора и управляющие сигналы с микроконтроллера, на выход регулятор отдает напряжение для привода [63].

Увеличением числа оборотов винтов в единицу времени задается подъем, уменьшением – опускание. Увеличение оборотов двух боковых винтов задает крен, а передних или задних – тангаж с последующим движением в сторону или подъемом/снижением по косой соответственно, а винтов, расположенных на одной из косых осей, – разворот аппарата влево или вправо (рыскание). Для стабилизации движения одна пара винтов всегда вращается по часовой стрелке, другая – против (рис. 1.7), компенсируя этим крутящий момент [63].

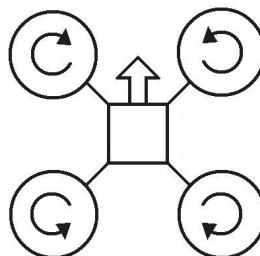


Рис. 1.7. Вращение винтов малых БПЛА вертолетного типа [63]

1.5.2. Система управления

По способам управления БПЛА декомпозируют на:

- автономные;
- полуавтономные;
- управляемые.

Выбор способа управления зависит от сложности и специфики выполнения, поставленных перед БПЛА задач. Как правило, система управления больших БПЛА самолетного типа в общих принципах соответствует пилотируемым ЛА [61, 62], а малые БПЛА имеют иерархическую трехуровневую компоновку системы управления [63]:

- 1) нижний уровень – уровень отдельных устройств, механизмов, датчиков и оборудования;
- 2) средний уровень – уровень управления процессами полета с помощью бортовых контроллеров, модулей ввода-вывода сигналов и коммутационного оборудования;
- 3) верхний уровень – уровень диспетчеризации и администрирования БПЛА, осуществляющий взаимодействие между оператором или программой полета через интерфейс с контроллерами среднего уровня.

1. Нижний уровень управления образуется, двигательной установкой, датчиками навигационной системы (подробно рассмотрены далее), оборудованием полезной нагрузки: оптико-электронные средства (ОЭС), радиолокационные станции (РЛС), различные другие радиоэлектронные средства (РЭС) и т.д. [63].

2. Средний уровень соответствует бортовым аппаратно-программным средствам управления. Бортовая система управления малыми БПЛА формируется на базе бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ), которые, как правило, управляются либо открытыми операционными системами (ОС), такими как Linux, Android и т.д., либо специализированными ОС реального времени, такими как QNX, VME, VxWorks, X Oberon и т.д. Кроме того, в последнее время появились различные проекты по созданию ОС и прикладного программного обеспечения (ПО) специально ориентированного на БПЛА.

В настоящее время получили широкое распространение схемотехнические решения, в которых БЦВМ, а также основные контроллеры устройств выполнены на единой плате и упакованы в защитный корпус. При этом БЦВМ, представляет собой RISC микропроцессор, как правило, ARM архитектуры, а отдельные контроллеры – микросхемы ПЛИС, которые могут быть запрограммированы с учетом особенностей функционирования конкретных образцов бортового РЭО [64]. Пример БЦВМ малого БПЛА на ПЛИС представлен на рис. 1.8.

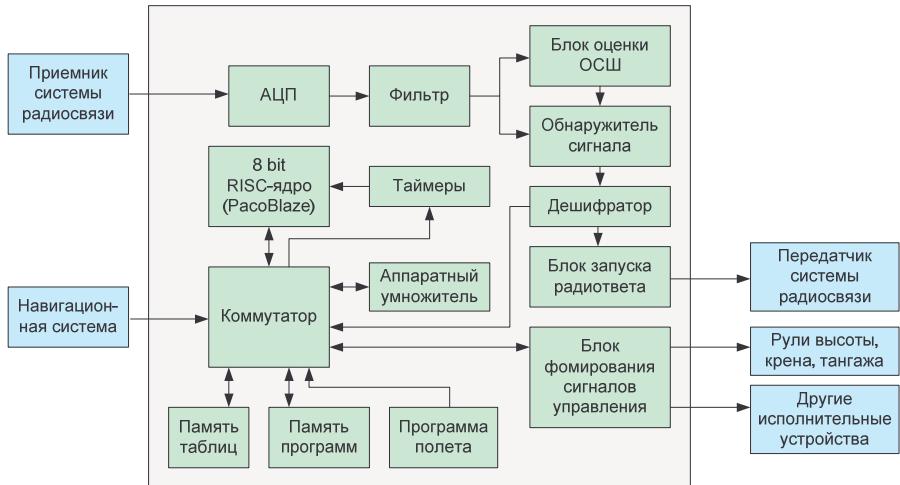


Рис. 1.8. БЦВМ малого БПЛА на основе ПЛИС фирмы Xilinx серии Spartan2 XC2S100 [64]

В качестве аппаратуры управления в малых БПЛА могут применяться цифровые сигнальные процессоры или микроконтроллеры (MicroPC), программируемые на языках высокого уровня, таких как C, C++, Модула-2, Оберон SA или Ада95, а также программные пакеты SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – диспетчерское управление и сбор данных), предназначенные для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем мониторинга или управления [63]. Кроме того, для управления малыми БПЛА могут использоваться специальные полетные контроллеры FCU (Flight Control Unit), которые формируют команды для микроконтроллеров управляющих двигателями и отдельными подсистемами БПЛА, в соответствии с данными, получаемыми по командной радиолинии управления (КРУ).

В последнее время три ведущих производителя микроэлектроники Qualcomm, Intel и Nvidia выпустили собственные типовые схемотехнические решения для систем управления БПЛА. Кроме того, аналогичное решение выпустил один из ведущих китайских производителей микроэлектроники – Leadcore. Каждый набор является типовым решением, включающим в себя [73]:

- центральный процессор управления CPU (Central Processing Unit);
- бортовую ОЭС;
- графический процессор GPU (Graphics Processing Unit) обработки видеоданных, поступающих от бортовой ОЭС;
- систему связи на основе технологии Wi-Fi.

Характеристики этих схемотехнических решений приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики типовых технических решений для БПЛА от компаний Qualcomm, Intel, Nvidia и Leadcore [73]

Производитель / тех. решение	Qualcomm Snapdragon Flight	Intel Edison for Arduino	Nvidia Jetson TX1	Leadcore LC1860
CPU	4xQualcomm Krait 400	22 нм dual-core Intel Atom	64-bit ARM A57 core	6-core Cortex A7
Частота CPU	2,5 ГГц	500 МГц	2 ГГц	2 ГГц
GPU	Qualcomm Adreno 330	Intel HD Graphic	Maxwell architecture, 256 CUDA cores	Dual-core Mali T628
Производительность GPU	167 GFLOPs	н/д	1 TeraFLOPs	н/д
Потребление энергии	н/д	35 мВт в статике	менее 10 Вт	н/д
Система связи Wi-Fi и Bluetooth	Да	Да	Да	Да
Бинокулярное стерео зрение	Да	Внешние датчики	Да	Да
Разрешающая способность камеры	4096×2160	не менее 1280×720	4096×2160	2048×1080
Размер	58 мм × 40 мм	127 мм × 72 мм	87 мм × 50 мм	41 мм × 61,5 мм
Преимущества	Сбалансированное решение по критерию «производительность / стоимость»	Сопряжение с внешними датчиками; Высокая точность и широкий диапазон применения	Высокая производительность в многопоточных задачах	Низкая цена
Недостатки	Относительно узкий диапазон применения	Высокое энергопотребление и цена	Высокое энергопотребление и цена	Относительно низкая производительность
Преимущества для применения на БПЛА	Энергоэффективное решение для управления БПЛА; поддержка групп БПЛА	Высокая производительность	Решения для управления БПЛА с использованием технологий машинного зрения и ИИ	Сбалансированное решение по критерию «эффективность / стоимость»

н/д – нет данных.

3. Верхний уровень управления соответствует архитекторе «БПЛА – ПУ» (или «группа БПЛА – ПУ») и образован телеметрической системой сбора данных о состоянии бортовых систем БПЛА, системой связи БПЛА и пункта управления (ПУ), а также оборудованием ПУ. Оборудование ПУ обрабатывает телеметрические данные о состоянии БПЛА и его местоположении, формирует программу полета и в соответствии с ней выдает команды на борт БПЛА [63].

Критически важным, для решения задачи противодействия БПЛА, на этом уровне являются ТТХ системы связи. Они подробно будут рассмотрены далее.

Отдельно отметим, что для подавляющего числа БПЛА основные функции по принятию решений реализуются не на борту, а на ПУ человеком-оператором. Это решения о профиле полета, альтернативных вариантах достижения целевой задачи, обработка данных, поступающих от бортового оборудования. Вместе с тем, развитие теории искусственного интеллекта (ИИ), теории управления группами БПЛА, повышение возможностей вычислительных средств, привело к тому, появились проекты, нацеленные на кардинальное по-

вышение автономности и «интеллектуальности» управления БПЛА [73]. Такие проекты нацелены на создание ПО и библиотек с открытым исходным кодом в области машинного зрения и искусственного интеллекта, которые напрямую определяют направления дальнейшего развития БПЛА. Краткая характеристика таких проектов представлена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Проекты по созданию ПО повышающего автономность и «интеллектуальности» управления БПЛА [73]

Проект	Область знаний	Компания-разработчик	ОС	Языки программирования	Краткая характеристика проекта	Web-сайт
Tensor Flow	Машинное обучение	Google	Linux; Windows; Mac	C++; Python	Высокопроизводительные вычисления на основе ИИ на основе на различных платформах (CPU, GPU, кластеры и т.д.)	www.tensorflow.org
Torch	Машинное обучение	Facebook	Linux; Mac	Lua; C; Cuda	Использование нестандартного языка разработки Lua; гибкость в реализации сложных топологий нейронных сетей (НС); возможность встраивания приложений в виде программ в ОС iOS и Android	torch.ch
MXNeT	Машинное обучение	DMLC / Baidu	Linux; Windows; Mac	C++; Python; Matlab	Акцент на ускорение разработки и развертывания больших глубоких НС; простота масштабирования вычислений с помощью нескольких GPU; оптимизированные предопределенные слои НС	mxnet.incubator.apache.org
Caffe	Глубокое машинное обучение	UC Berkeley	Linux; Mac	C++; Cuda	Распознавание изображений при машинном зрении; модели и оптимизация системы имеют мягкую адаптивную конфигурацию	caffe.berkeleyvision.org
CNTK	Глубокое машинное обучение	Microsoft	Linux; Windows	C++; Python	Поддержка CPU и GPU; параллелизм на кластерах GPU; простота реализации и объединения популярных моделей; хорошее распознавание речи	www.microsoft.com/en-us/cognitive-toolkit/
OpenCV	Системы искусственного зрения	Intel	Linux; Windows; Mac	C++; Python; Java; Matlab	Акцент на повышении вычислительной эффективности приложений реального времени; использование преимуществ гетерогенных вычислительных платформ	opencv.org
Git Hub	Software libraries	GitHub	Linux; Windows; Mac	Almost all	Большой массив исходного кода; массовые проекты, связанные с ИИ; качество кода сильно варьируется, и они нуждаются в доработке для коммерческого использования	github.com

1.5.3. Навигационная система

Навигационная система БПЛА может иметь различный уровень сложности и учитывать для определения местоположения БПЛА несколько сигналов, поступающих от датчиков различной физической природы.

На БПЛА в зависимости от его размера и сложности решаемых задач могут быть размещены следующие варианты навигационной системы:

- 1) навигационная система, основанная только на аппаратуре потребителей (АП) наиболее распространенных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) – такая система характерна для самых простых малых БПЛА-квадрокоптеров;
- 2) простая интегрированная навигационная система, на основе комплексирования данных микромеханических инерциальных навигационных систем (ИНС) и АП СРНС – такая навигационная система характерна для широкого класса малых БПЛА-квадрокоптеров для профессионального использования в различных целях;
- 3) интегрированная навигационная система, на основе комплексирования данных нескольких навигационных устройств: микромеханических ИНС, АП СРНС, барометрического высотомера, радио или лазерного высотомера – такая навигационная система характерна для профессиональных малых БПЛА, а также для БПЛА среднего класса;
- 4) интегрированная навигационная система, на основе комплексирования данных нескольких навигационных устройств: авиационных ИНС, АП СРНС, высотомеров (барометрического и радио), радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) VOR/DME (Very high frequency Omni directional radio Range / Distance Measuring Equipment), системы автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В) – такая навигационная система фактически полностью повторяет навигационную систему пилотируемого летательного аппарата (ЛА) и характерна для БПЛА тяжелого класса.

Система навигации 1-го типа устанавливается, на подавляющем числе малых БПЛА-квадрокоптеров. Такая навигационная система содержит АП одной или нескольких СРНС. К наиболее распространенным СРНС относятся системы: ГЛОНАСС (Россия), GPS/NAVSTAR (США), Beidou (Китай), Galileo (ЕС). Сигналы СРНС формируются на литературных частотах в диапазоне 1,1-1,6 ГГц. Как правило, простые навигационные системы, устанавливаемые на малые БПЛА, используют интегрированный режим обработки сигналов от нескольких СРНС, что обеспечивает точность навигации 1-2,5 м как в горизонтальной плоскости, так и по высоте.

Более сложные БПЛА для профессионального использования, как правило имеют навигационную систему 2-го или 3-го типа, в состав которой помимо АП СРНС дополнительно входят элементы автономной навигационной системы – микромеханические акселерометры и гироскопы. Однако, такая автономная ИНС, без ее коррекции по сигналам СРНС, не в состоянии осуществлять автономное счисление пройденного пути ввиду высоких скоростей дрейфа ги-

роскопических датчиков. Накапливаемая ошибка микромеханических ИНС, в условиях отсутствия корректирующих сигналов СРНС, за 1 мин составляет до 3 м по горизонтали и 2 м по вертикали. Таким образом эти ИНС способны без сигналов СРНС поддерживать приемлемую точность полета на уровне 100-150 м в течении не более 10 мин. При этом, как правило, имеется ввиду поддержание режима прямолинейного полета без ускорений и маневров [65]. Примерами таких образцов микромеханических ИНС могут являться устройства Geo-iNAV (масса порядка 3 кг) – рис. 1.9.



Рис. 1.9. Навигационная система Geo-iNAV для БПЛА на основе СРНС и микромеханических ИНС

Таким образом на современном этапе развития навигационных систем малых БПЛА для счисления пути с приемлемой точностью требуется использование сигналов СРНС. Дополнительными способами повышения автономности и точности навигационных систем БПЛА является установка барометра и лазерного высотомера. Это оборудование позволяет повысить точность определения координат за счет использования дополнительных каналов комплексирования навигационных данных, а также формировать профили автономного полета БПЛА по электронным картам местности содержащим барометрические данные или высотные профили [66].

В средних и тяжелых БПЛА, в подавляющем числе случаев, используются навигационные системы 4-го типа – авиационные ИНС на основе лазерных или волоконно-оптических гироскопов. Однако масса таких ИНС составляет от 8 кг, что делает проблематичным их использование на малых (и даже на средних) БПЛА. Подробно тактико-технические характеристики (ТТХ) таких ИНС рассмотрены в работе [67]. Данные ИНС в среднем обеспечивают ошибку счисления пути порядка 1,85 км за 1 ч полета. При этом информация, поступающая по другим каналам: от АП СРНС, от высотомеров, сигналы от РСБН и от АЗН-В, является вторичной и после верификации и комплексирования она используется только для коррекции показаний ИНС [65, 66].

Отметим, что быстрое развитие БПЛА приводит к усовершенствованию их навигационного обеспечения. К таким направлениям усовершенствования относятся следующие:

- 1) использование для повышения точности навигации многостанционных локальных РСБН или систем – имитаторов сигналов СРНС [66, 68],

при этом станции этих систем могут быть мобильными, находясь на автомобилях, и заблаговременно развертываться в зоне планируемого применения БПЛА;

- 2) использование для навигации электронных карт местности, полет по которым осуществляется в соответствии с данными радио- или лазерного высотомера, РЛС или ОЭС видимого диапазона [69, 70];
- 3) использование для навигации различных автономных систем технического зрения [69], а также технологии SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – технологии автоматического одновременного построения карты местности в неизвестном пространстве, контроля текущего местоположения БПЛА и пройденного пути [71, 72];
- 4) автономный прямолинейный полет БПЛА в направлении цели, подсвечиваемой внешним источником излучения.

Характеристики навигационной системы БПЛА являются важным фактором, при организации его радиоэлектронного подавления, поэтому более подробно возможности воздействия РЭП на навигационную систему БПЛА будут рассмотрены в подразделе 4.3.

1.5.4. Система радиосвязи

Система радиосвязи БПЛА представляет собой совокупность различных линий, в которых предаются данные принципиально различного типа, уровня важности, объема, уровня криптозащиты и т.д.

Для управления и обмена данными с БПЛА организуются следующие направления связи:

- направление «вверх» – организуется от ПУ к БПЛА и включает в себя:
 - направление «вверх» КРУ для передачи команд управления БПЛА, а также команд управления специальной аппаратурой и техническими средствами полезной нагрузки, размещенными на БПЛА;
- направление «вниз» – организуется от БПЛА к ПУ и включает в себя:
 - направление «вниз» КРУ для передачи телеметрической информации (ТМИ) о состоянии подсистем БПЛА, специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, а также квитанций о выполнении команд управления;
 - высокоскоростная линия передачи данных от специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, размещенных на БПЛА.

Вышеуказанные линии связи могут организовываться в различных частотных диапазонах, использовать различные режимы с ретрансляцией и без неё, использовать различные сигнально-кодовые конструкции, специально адаптированные под тип и важность передаваемых данных.

Для организации КРУ и высокоскоростной передачи телеметрии и данных на наземный ПУ используется УКВ (220-400 МГц), L (1,4-1,85 ГГц), S (2,2-2,5 ГГц), C (4,4-5,85 ГГц), и Ku (15,15-15,35 / 14,4-14,83 ГГц) диапазоны [74]. Связь организуется в пределах прямой видимости. Для связи на даль-

ние расстояние могут использоваться БПЛА-ретрансляторы, а также системы спутниковой связи (ССС). У простых малых БПЛА в качестве каналаобразующей аппаратуры КРУ могут использоваться средства доступа в сети мобильных операторов связи поколений 2G...4G, а также стандартные технологии радиосвязи:

- RC433: 433 МГц;
- сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
- сети CDMA: 850-894 МГц;
- RC868: 868-916 МГц;
- GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
- GSM1800: 1710-1880 МГц;
- сети 3G: 2110-2170 МГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
- сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц.

Если команды управления по КРУ не поступают, то БПЛА переходит в режим автономного полета. В данном режиме БПЛА могут реализовывать как простые программы, типа «возвращение», «прямолинейный полет», «барражирование», так и более сложные программы автономного полета, основанные на заранее заложенных электронных картах местности и данных от навигационной системы.

Характеристики систем радиосвязи БПЛА чрезвычайно важны для организации противодействия им путем радиоэлектронного подавления. Поэтому подробно ТТХ типовых систем радиосвязи БПЛА рассматриваются в подразделах 4.4.2 и 4.4.3.

1.6. Групповое применение БПЛА как основное направление повышения эффективности их использования

Одной из стратегий повышения эффективности применения БПЛА является переход к их групповому применению, в рамках реализации стратегии сецентрического управления. Разработка теоретических основ группового применения БПЛА являются логическим продолжением идей специализации БПЛА в группе, а также возможности достижения требуемых результатов малыми затратами сил и средств. Основными задачами применения групп БПЛА являются:

- повышение вероятности и эффективности выполнения целевой задачи за счет многократного дублирования функций и специализации ролей отдельных БПЛА в группе;
- истощение ресурсов средств поражения, за счёт принуждения её к противодействию большому количеству целей, в условиях, которые превышают их боевые возможности;
- маскировка направления и средств нанесения основного удара, дезорганизация систем управления, обнаружения и целераспределения,

за счет отвлечения средств поражения на множество второстепенных однотипных целей – группу БПЛА;

- имитация массированного применения основных средств вооружения, формирование «виртуальной воздушной обстановки»;
- деморализация и подрыв воли живой силы противника.

С целью отработки технологии применения групп БПЛА ведутся исследования на математических моделях и натурных макетах, проводятся натурные эксперименты [75] в модельных условиях [76] и в реальных боевых действиях [77, 78].

Группы БПЛА по принципу построения боевого порядка могут быть [21]:

- упорядоченными (стая, рой): боевой порядок строится на основе алгоритма управления группой, который реализуется внутри группы или по командам с наземного/воздушного ПУ;
- неупорядоченными: боевой порядок определяется последовательностью старта БПЛА и индивидуальными алгоритмами функционирования и программой полета каждого аппарата.

Упорядоченные группы могут быть [21]:

- автономными – после старта реализуют свой (заданный при старте или формируемый в процессе полёта) алгоритм функционирования
- связанными – после старта реализуется алгоритм, который формируется и контролируется извне – с наземного/воздушного ПУ.

По боевому составу группы БПЛА могут быть [21]:

- однородными: в состав группы входят БПЛА одного типа и одинакового функционального назначения;
- неоднородными: в состав группы входят БПЛА разного типа и функционального назначения.

По боевой специализации группы БПЛА могут быть [21]:

- целевыми: ударные, разведывательные, истребительные и т.д.;
- многоцелевыми: разведывательно-ударными, истребительно-ударными и т.п.

Основными объектами для реализации технологии группового применения могут быть (по хронологии и целесообразности развития) [21]:

- малоразмерные БПЛА различного назначения: разведывательные, ударные, постановщики помех, имитирующие и т.д.;
- ударные авиационные средства типа планирующих авиационных бомб и крылатых ракет;
- перспективные автономные БПЛА различного назначения.

Очевидно, что чем выше автономность и неоднородность группы БПЛА, тем более сложные задачи она может выполнять. Соответственно, тем более сложным будет ее алгоритм функционирования, а также бортовой комплекс управления каждого БПЛА. В ближайшем будущем, вероятнее всего, произойдет создание автономных смешанных целевых и многоцелевых групп БПЛА. При этом промежуточным этапом эволюции форм применения БПЛА может рассматриваться создание смешанных групп БПЛА и пилотируемых ЛА. При

этом принципиальным вопросом повышения эффективности применения группы БПЛА является наличие в контуре управления человека, которому свойственны объективные физиологические ограничения на количество одновременно контролируемых параметров и на скорость реакции. Зависимость качества управления от физиологического состояния и текущей нагрузки (физической, информационной и психической) человека в перспективе приведёт к полному исключению его из всех промежуточных этапов управления группой БПЛА, оставив ему одну функцию – функцию принятия решения на боевое применение группы БПЛА и первоначального формирования программы автономных действий для реализации группой оперативного замысла.

2. Обнаружение БПЛА

2.1. Малые БПЛА как наиболее сложные объекты для обнаружения

Обнаружение БПЛА является первым этапом противодействия ему. Без вскрытия факта полета БПЛА, траектории его движения, других значимых характеристик, важных для целеуказания средству противодействия, противодействие БПЛА невозможно.

Особенностью обнаружения БПЛА является то, что большие и средние БПЛА самолетного типа по своим демаскирующим признакам фактически соответствуют уже известным аэродинамическим целям – легким самолетам, крылатым ракетам, планерам и т.д. Такие цели могут обнаруживаться современными средствами разведки с использование существующих алгоритмов селекции целей. При этом, как показано в работах [21, 44, 47-49], для современных средств обнаружения наиболее сложными целями являются именно малогабаритные и малоскоростные БПЛА. К дополнительным факторам, которые препятствуют эффективному обнаружению таких БПЛА, относятся:

- использование высокоманевренных (например, «змейка») или «рваных» (с периодическим зависанием или резким снижением скорости) режимов полета;
- использование в конструкции БПЛА пластиковых и композиционных материалов, слабо отражающих ЭМИ;
- использование для управления БПЛА не выделенных КРУ на основе отдельных средств связи, а уже существующей связной инфраструктуры мобильных операторов связи и точек доступа Wi-Fi.

Достаточно полный анализ демаскирующих признаков малого БПЛА представлен в работе [79]. Средствами обнаружения БПЛА, которые используют соответствующие демаскирующие признаки, могут быть:

- средства радиолокационной разведки (РЛР) – различные РЛС;
- средства радио- и радиотехнической разведки (РРТР) разведки – станции контроля радиоизлучений, пеленгаторные посты;
- средства оптико-электронной разведки (ОЭР) – средства теле- и фотонаблюдения в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах;
- средства акустической разведки (АР) – микрофоны и звукоулавливатели.

Данные средства, как правило используются комплексно, взаимно дополняя друг друга, при этом основными средствами целеуказания для комплексов ПВО являются средства РЛР – РЛС, а для комплексов РЭП – средства РРТР.

В таблице 2.1 приведены сравнительные возможности вышеуказанных средств обнаружения БПЛА.

Далее подробно будет рассмотрено обнаружение БПЛА средствами РЛР, РРТР, ОЭР и АР.

Таблица 2.1 – Возможности различных типов средств разведки при решении задач, идентификации и сопровождения малых БПЛА [2, 21]

Характеристика	Радио		Оптические			Aкустические
	Средства РЛР (РЛС)	Средства РРТР	Средства ОЭР в видимом диапазоне	Средства ОЭР в ИК-диапазоне	Лазерные средства	Средства АР
Обнаружение в дневное время	+	+	+	–	+	+
Обнаружение в ночное время	+	+	–	+	+	+
Обнаружение в условиях естественных помех	+	+	+	+	+	+
Обнаружение БПЛА среди естественных объектов (прежде всего – птиц)	–	+	–	–	–	±
Обнаружение в сложных погодных условиях	±	+	–	–	–	–
Идентификация БПЛА	–	+	±	±	–	+
Селекция одиночных и групповых целей	+	(по различ. каналам)	+	+	+	(для БПЛА различ. типов)
Сопровождение и формирование траектории	+	(для многопоз. системы)	+	+	+	(для многопоз. системы)
Дальность действия	выс.	выс.	средн.	средн.	средн.	низк.

2.2. Обнаружение БПЛА средствами радиолокационной разведки

Контроль и ведение РЛР воздушного пространства с помощью РЛС является достаточно широко распространённым и традиционным способом обнаружения воздушных целей комплексами ПВО. Обнаружение средствами РЛР является эффективным в том случае, когда радиолокационная заметность цели соответствует разрешающей способности РЛС. Показателем радиолокационной заметности цели является ее эффективная площадь рассеяния (ЭПР) [80]

$$\sigma = (\xi P_{\text{отр}}) / E_1 = (\xi D_0 P_{\text{pac}}) / E_1 = \xi S D_0,$$

где: ξ – коэффициент деполяризации вторичного поля ($0 \leq \xi \leq 1$); $P_{\text{отр}}$ – мощность отражённого от цели сигнала; E_1 – плотность потока энергии радиолокационного сигнала на сфере радиусом равным дальности до цели; D_0 – значение диаграммы обратного рассеяния в направлении на РЛС; S – полная площадь рассеяния цели.

Несмотря на то, что показатель ЭПР имеет размерность m^2 он не является геометрической площадью, а является энергетической характеристикой, то есть представляет собой коэффициент, который учитывает отражающие свойства цели и зависит от пространственной конфигурации цели, электрических свойств её материала и отношения линейных размеров цели к длине волны. В радиолокационных задачах распознавания и классификации целей обычно

пользуются радиолокационным портретом воздушной цели (так называемой сигнатурой), который связан с геометрическими, физическими и кинематическими свойствами цели.

Как объекты РЛР малые БПЛА характеризуются значением ЭПР порядка 0,05-0,5 м². При этом, в большинстве работ для таких БПЛА принимается значение ЭПР равное 0,1 м², которое, как показано в работе [81], является вполне достаточным значением, характеризующим сигнатуры БПЛА, на которых не используются специальные средства снижения заметности, в том числе – коммерческих БПЛА типа «квадрокоптер».

В работе [48] указывается, что расчетные дальности для обнаружения малоразмерных БПЛА со стороны РЛС, находящимися на вооружении формирований ПВО, при различных значениях ЭПР БПЛА составляют:

- для РЛС МВ диапазона:
 - 8-14 км для БПЛА с ЭПР около 0,1 м²;
 - 0,1-1,5 км для БПЛА с ЭПР около 0,01 м²;
- для РЛС ДЦМВ диапазона:
 - 9-16 км для БПЛА с ЭПР около 0,1 м²;
 - 0,8-2 км для БПЛА с ЭПР около 0,01 м²;
- для РЛС СМВ диапазона:
 - 12-25 км для БПЛА с ЭПР около 0,1 м²;
 - 1,4-2,8 км для БПЛА с ЭПР около 0,01 м².

При этом в войсках помимо РЛС комплексов ПВО имеются другие РЛС, предназначенные для ведения разведки местности, наблюдения за передвижением солдат и техники, наведения автоматического оружия на цель в условиях ограниченной видимости, разведки артиллерийских позиций противника, корректировки огня собственной артиллерии (в том числе по координатам разрывов артиллерийских снарядов). Предполагаемые возможности таких РЛС по обнаружению малоразмерных БПЛА с ЭПР 0,01 м² могут составить от 3,5 до 12 км [48].

Однако, как отмечается в работе [48], если для БПЛА с ЭПР 0,1 м² расчетные данные и фактические результаты полигонных испытаний по дальности обнаружения практически совпадают, то для БПЛА с ЭПР 0,01 м² фактические дальности обнаружения приближаются к нулевым значениям.

К дополнительным факторам, снижающим уровень ЭПР БПЛА, нужно отнести возможности быстрого изменения скоростного режима, вплоть до «захвата», что приводит с срыву сопровождения БПЛА в связи с выходом значения скорости за границы стробирования по Доплеровскому сдвигу в алгоритмах селекции движущихся целей (СДЦ) РЛС, а также использование в конструкции большого количества радиопрозрачных пластиковых и композитных материалов [48, 81].

На рис. 2.1 показаны типовые рубежи обнаружения гипотетического БПЛА (массогабаритные характеристики БПЛА построены на основе результатов обработки статистических данных о них) для РЛС с длиной волны $\lambda=3$ см, представленные в работе [21]. При этом расчётные сигнатуры БПЛА под различными относительными углами пересчитаны на ЭПР плоской фигуры близ-

кой к прямоугольной с учётом рекомендаций [82, 83]. Диапазон ЭПР для используемых БПЛА составил 0,05-0,5 м².

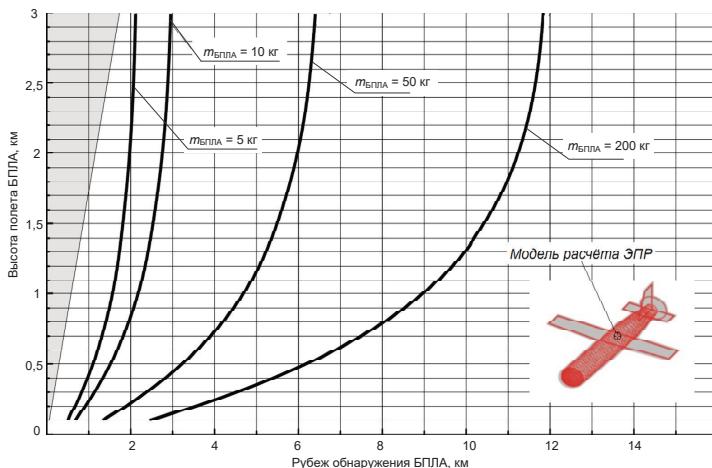


Рис. 2.1. Рубежи обнаружения БПЛА с различными массогабаритными параметрами для РЛС с $\lambda=3$ см [21]

Как показано на рис. 2.1, уменьшение массогабаритных параметров БПЛА до значений менее 5 кг приводит к существенному уменьшению рубежа их обнаружения, а при использовании высокой доли радиопрозрачных (пластиковых и композиционных) материалов в конструкции БПЛА делает их обнаружение с помощью РЛС фактически невозможным. Таким образом, несмотря на то, что РЛС является достаточно надёжным средством контроля воздушного пространства, задача обнаружения и идентификации малоразмерных малоскоростных БПЛА с малыми ЭПР остаётся для них до сих пор нерешённой [21].

Обобщая вышеуказанное, можно сделать следующий вывод. Имеющиеся сегодня на вооружении традиционные РЛС разведки воздушного пространства практически неспособны проводить эффективное обнаружение малоразмерных малоскоростных воздушных целей типа БПЛА даже в беспомеховой обстановке. В подавляющем большинстве РЛС ЗРК не будут обнаруживать БПЛА с ЭПР порядка 0,01 м² и меньше. Более того, в условиях применения противником различных помех средствам РЛР, окажется, что даже имеющиеся возможности РЛС значительно уменьшаются. Фактические дальности обнаружения не позволяют обеспечить участие ПУ в управлении огнем группировок ПВО при организации и ведении обстрела малоразмерных БПЛА. Разрабатываемые перспективные РЛС, предназначенные для решения задачи обнаружения малоразмерных БПЛА, предположительно будут способны обнаруживать их на дальностях, не превышающих 3-8 км на высотах полета 100-300 м, и на дальностях 10-20 км на высотах до 1000 м. Эти дальности обнаружения перспективных РЛС могут быть удовлетворительными для обеспечения своевременного от-

крытия огня и ведения эффективной стрельбы по БПЛА только в случае если время реакции ЗРК, не превышает нескольких секунд [48].

2.3. Обнаружение БПЛА средствами радио- и радиотехнической разведки

БПЛА могут быть обнаруженными средствами РРТР путем приема и анализа как радиосигналов КРУ, так и бортового РЭО – радиолокационных высотомеров, РЛС, излучателей помех и т.д. Применительно к БПЛА, основным объектом радиоразведки (РР) является КРУ БПЛА, а также параметры и предаваемые по ней данные, а объектом радиотехнической разведки (РРТР) – излучение бортовых РЛС, бортового РЭО, РЭС полезной нагрузки [84].

Преимуществом средств РРТР является то, что они позволяют однозначно идентифицировать БПЛА среди естественных объектов, со схожими характеристиками, прежде всего, птиц. Недостатком – то, что средства РРТР могут с достаточной точностью установить лишь общее направление (пеленг) на БПЛА, причем точность его определения повышается при увеличении времени наблюдения, а вот дальность и высоту до цели средства РРТР определяют со существенными погрешностями [79].

Анализ имеющихся наземных средств РРТР позволяет сделать вывод, что они обладают следующими типовыми ТТХ [57, 84-88]:

- функциональность: обнаружение источников радиоизлучения (ИРИ), распознавание типов функционирующих ИРИ, определение параметров средств радиосвязи и перехват передаваемых сообщений, высокоточное определение местоположения РЛС, радиостанций и постановщиков помех;
- диапазон частот ведения РР: с 3 МГц до 18 ГГц;
- диапазон частот ведения РРТР: 0,5-40 ГГц;
- мгновенная полоса обзора спектра: до 2,5 ГГц;
- разрешающая способность: не хуже 1 кГц;
- скорость поиска в разведываемом диапазоне: порядка 3000 ГГц/с;
- обнаружение и пеленгование радиосвязных РЭС, излучающих в режиме ППРЧ до 1000 скачков/с;
- чувствительность радиоприемников: не хуже 5 мкВ/м;
- точность пеленгования направления на ИРИ: 0,5°-1°;
- точность определения местоположения ИРИ: на расстоянии до 150 км – 50-150 м.

Дальность обнаружения малых БПЛА средствами РРТР существенно зависит от мощности средств радиосвязи БПЛА, утечки сигналов бортового РЭО, значений коэффициента усиления антенны БПЛА и чувствительности приемника средства РРТР [49].

Необходимость ведения постоянного интенсивного обмена данными БПЛА с ПУ требует наличия одного или даже нескольких широкополосных каналов радиосвязи, для которых очень сложно (в современных условиях практически невозможно) обеспечить требуемую скрытность функционирования. В

связи с этим, высокоинтенсивное излучение средств радиосвязи является основным демаскирующим признаком БПЛА, в том числе и малых БПЛА, относительно средств РР [49]. Например БПЛА RQ-1 Predator, не являющейся малым БПЛА, при функционировании формирует 3-и линии радиосвязи: широкополосную УКВ-радиолинию прямой видимости (3,9-6,2 ГГц) для прямой передачи данных на наземный ПУ с пропускной способностью 4-4,5 Мбит/с; спутниковую радиолинию УВЧ-диапазона (ширина 25 кГц с пропускной способностью 16,6 кбит/с) для передачи команд управления, программ автономного полета и телеметрии; широкополосную спутниковую радиолинию К-диапазона для передачи полезных данных со скоростью 1,54 Мбит/с [89].

По сравнению с излучением средств радиосвязи БПЛА, излучение другого бортового РЭО БПЛА имеет более низкую интенсивность. К сопоставимому, по своему демаскирующему значению, можно отнести излучение бортовой РЛС, если она установлена на БПЛА. Утечка же паразитных излучений другого РЭО БПЛА, по сравнению с интенсивностью излучения средств радиосвязи и бортовой РЛС – несопоставимо мала. Все это делает обнаружение малых БПЛА для РТР сложной в техническом отношении задачей [48].

В работе [48] представлены расчетные значения обнаружения для малоразмерных БПЛА. Указано, что в зависимости от применяемых типов бортовых средств радиосвязи, РЛС и другого РЭО дальности обнаружения БПЛА средствами РТР могут иметь значения от 4 до 50 км. Эти значения получены, при допущении о наличии на борту БПЛА активно работающей РЛС бокового обзора или непрерывно работающей КРУ. Однако, как указывается в [48], на практике эти значения для малоразмерных БПЛА будут еще более низкими, ввиду отсутствия режимов длительного непрерывного излучения, а полученные значения дальностей обнаружения на практике будут более соответствовать БПЛА среднего и крупного класса.

В работе [90] показывается, что многопозиционными системами РТР может производиться обнаружение БПЛА на дальностях порядка 250-400 км. Однако для достижения таких дальностей обнаружения требуется существенное разнесение постов РТР – на расстояние базы 20-40 км, что в реальных условиях может оказаться затруднительным. При этом погрешность определения координат БПЛА такой многопозиционной системы РТР составляет порядка 8-32% от измеряемого значения дальности (в зависимости от базы разнесения постов).

2.4. Обнаружение БПЛА средствами оптико-электронной разведки

Средства ОЭР видимого диапазона представляют собой достаточно надёжное средство обнаружения малоразмерных малоскоростных БПЛА, представляющих сложности для средств РЛР. Однако, эффективность оптического обнаружения БПЛА существенно зависит от факторов окружающей среды, прежде всего, от времени суток и погодных условий. Обнаружение БПЛА средствами ОЭР допустимо при возможности построения проекции его визуального

облика на картинную плоскость после использования всех возможных способов повышения контрастности и восстановления пропущенных элементов графического образа. Увеличение дальности обнаружения достигается за счет сужения поля зрения средства ОЭР, уменьшения зоны его обзора и увеличения времени поиска. Поэтому средства ОЭР в видимом диапазоне являются не очень эффективными устройствами для проведения поиска БПЛА. Однако, при поступлении внешних целеуказаний, например, от РЛС, эти средства могут быть эффективно использованы для сопровождения БПЛА. По сравнению с пилотируемым ЛА контрастность БПЛА, относительно фона в видимом диапазоне, является невысокой из-за меньших габаритов, отсутствия на БПЛА световых маяков, уменьшенного или отсутствующего факела двигателя и меньшей поверхности отражения [81]. Критерии обнаружения и распознавания типа БПЛА средствами ОЭР представлены в работе [91].

На рис. 2.2 показаны рубежи обнаружения БПЛА по данным из работы [21]. Эти рубежи рассчитаны для БПЛА с различными массогабаритными параметрами, для ОЭР оснащенном объективом с углом поля зрения 20° и фокусным расстоянием $f=230$ мм, при метеорологической дальности видимости не менее 100 км (коэффициент рассеяния в видимой области спектра $\gamma_v \leq 0,0392$).

С указанными на рис. 2.2 данными согласуется информация о расчетной дальности обнаружения БПЛА, представленная в работе [90]:

- нано, микро БПЛА: 300-500 м;
- средние БПЛА (типа «Тахион», «Орлан»): 500-5000 м.

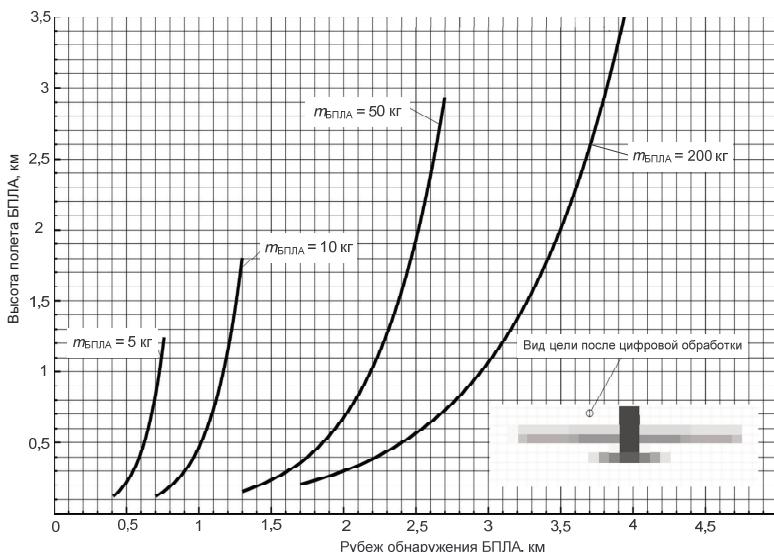


Рис. 2.2. Рубежи обнаружения БПЛА средствами ОЭР [21]

В работах [48, 50] показано, что по данным полигонных испытаний средняя дальность визуального обнаружения БПЛА имеющимися средствами ОЭР составляет:

- при наблюдении полета БПЛА во фронт: 100-400 м;
- при наблюдении с боковых ракурсов: 150-700 м.

Опыт полигонных испытаний показал, при фактических высотах полета малых БПЛА 300-1000 м даже при применении яркой окраски их визуальное обнаружение крайне затруднено [48, 50].

Применение оптического увеличения в средствах ОЭР, используемых в настоящее время в отечественных ЗРК и ЗАК в качестве дублер-прицелов, систем обнаружения и сопровождения воздушных целей, позволяет увеличить дальность обнаружения БПЛА в 4,5-14 раз, в частности [48]:

- при увеличении 4,5-крат – до 2,2 км;
- при увеличении 14-крат – до 6,7 км.

Однако очевидно, что при оптическом увеличении будет снижаться вероятность обнаружения БПЛА по причине сужения области обзора пространства [48].

При рассмотрении указанных значений необходимо учесть, что эти дальности получены для относительно идеальных погодных условий и отсутствия различных случайных помех или шумов, возникающих в ОЭС [48]. Уменьшение дальности обнаружения в конкретных условиях по отношению к дальности в идеальных условиях приближённо можно оценить по изменению силы оптического излучения (мощность излучения на единицу телесного угла) для приемника средства ОЭР. Дымка, влажность, осадки приводят к существенному снижению прозрачности атмосферы в областях спектра в которых работают приёмники ОЭР и делает их применение неэффективным [21].

Анализируя ТТХ средств ОЭР дополнительно необходимо отметить следующее. В средствах ОЭР с дискретным сканированием, время обзора рабочей области (зоны, сектора) пространства, как правило, измеряется единицами секунд. Так, средство ОЭР на зенитном ракетно-артиллерийском комплексе (ЗРАК) «Палаш/Пальма», при мгновенном поле зрения ТВ-системы $2^\circ \times 3^\circ$, обеспечивает обнаружение воздушных целей на дальности 6-10 км, требуемое время автоматического поиска в угловом поле – секторе $60^\circ \times 16^\circ$ составляет около 3 с. При азимутальном угле обзора 180° , время однократного просмотра пространства будет приближаться к 10 с, а при азимутальном угле 360° , необходимом, например, для отражения групповой атаки с различных направлений, время обзора становится недопустимо большим. Существующие тенденции развития средств ОЭР предполагают переход к многоканальному обнаружению БПЛА, однако на существующих комплексах противодействия БПЛА такие средства не получили широкого распространения [92].

Помимо средств ОЭР, работающих в видимом диапазоне, обнаружение БПЛА возможно средствами ОЭР, работающими в ИК-диапазоне. Средства ОЭР ИК-диапазона особенно эффективны в ночное время. Тепло от БПЛА выделяется, в основном, силовой установкой и, в меньшей мере, электронными компонентами, а также точками торможения на несущих краях крыльев, про-

пеллеров и винтов. Разработчики БПЛА стараются снизить излучение в ИК-диапазоне в направлении размещенных на земле приемников и перенаправить это излучение вверх. Кроме того, в конструкции БПЛА могут использоваться материалы с высокой теплопроводностью, такие как серебро и алюминий. В каждом конкретном случае возможность БПЛА быть обнаруженным в ИК диапазоне определяется его тепло-излучательной способностью, контрастом и площадью излучения [93].

Необходимо отметить, что эффективность ОЭР ИК-диапазона существенно зависит от погодных условий. В условиях дымки, влажности, осадков заметность БПЛА в ИК-диапазоне существенно снижается, особенно для длин волн $\lambda=0,76\dots5$ мкм. Это происходит потому, что за исключением полета БПЛА с воздушно-реактивным двигателем (ВРД) на форсированных режимах и БПЛА с ракетным двигателем твердого топлива (РДТТ), основным источником ИК-излучения являются элементы корпуса БПЛА, которые прикрывают отсеки с силовой установкой и детали выхлопной системы. Эти участки конструкции БПЛА, тем не менее, отличаются невысокими значениями тепловых потоков $q\leq25\dots50$ Вт/ср, и, соответственно, низкая сила их излучения с учётом снижения прозрачности атмосферы не позволяет использовать ОЭР ИК-диапазона для повышения вероятности обнаружения БПЛА. При этом БПЛА с электродвигателями принципиально отличаются предельно низкими уровнями ИК-заметности [21].

Дополнительно нужно отметить, что для снижения заметности БПЛА могут выбираться профили и направления их полета, снижающие эффективность средств ОЭР видимого и ИК-диапазона, например, заход на цель со стороны солнца или другого мощного источника видимого света и ИК-излучения.

2.5. Обнаружение БПЛА средствами акустической разведки

Акустическая заметность является важным дополняющим фактором, который позволяет повысить достоверность обнаружения БПЛА в условиях при которых «традиционные» средства: оптические и радиолокационные, не могут обеспечить требуемого уровня вероятности его обнаружения.

БПЛА в полёте генерирует акустические (звуковые) волны, принимаемые акустическими микрофонами, которые преобразуют акустическое давление в электрический сигнал. Источниками звуковых волн, обычно, являются двигательные установки и лопасти воздушных винтов. Частота генерируемого звука кратна частоте выхлопа горячих газов, количеству и частоте вращения лопастей воздушного винта. Интенсивность звука зависит от скорости обтекания лопастей [21].

В реальных средах звуковые волны затухают вследствие вязкости воздушной среды и молекулярного затухания. Звуковые волны дополнительно затухают при распространении вдоль поглощающей поверхности и, чем выше коэффициент поглощения этой поверхности, тем большее затухание она вносит в распространяющуюся волну. Однако еще более существенную роль в затуха-

нии звуковых волн играет турбулентность воздуха. В немалой степени этому способствует ветер и восходящие потоки воздуха. На низких частотах дополнительное затухание не зависит от расстояния до источника звука. А на дальних (более 4 км) расстояниях высокие частоты практически не принимаются [21].

Применение для обнаружения БПЛА средств АР обеспечивает [21]:

- определение пеленга на БПЛА;
- определение класса (типа) БПЛА.

Средства АР, использующие естественные поля, обладают следующими достоинствами [94]:

- обеспечивают устойчивое автоматическое обнаружение малоскоростных маловысотных БПЛА в любых погодных условиях, в условиях плохой оптической видимости и в условиях сложных рельефов местности;
- обеспечивают скрытность функционирования и сохранение работоспособности в условиях РЭП;
- имеют малые габариты, низкое энергопотребление и лучше других систем (в сравнении с радиолокационными, оптико-электронными) удовлетворяют критерию «эффективность – стоимость».

Акустические системы нашли своё применение в охранных системах, пограничных структурах и неплохо себя зарекомендовали при обнаружении одиночных БПЛА в относительно незашумлённых условиях [21].

Суммарный спектр акустического излучения тактического БПЛА обусловлен гармоническими и широкополосными составляющими. Он включает в себя гармонические оставляющие излучения двигателя, шума оборотов винта, излучение механической природы, а также высокочастотную и низкочастотную составляющие шума двигателя с непрерывными по частоте спектрами. В шуме силовой установки БПЛА, имеющей поршневой двигатель воздушного охлаждения, при отсутствии в его выхлопном тракте глушителя определяющим источником внешнего шума является поршневой двигатель. Подробное исследование возможностей обнаружения средствами АР представлено в работе [79]. Результаты этого исследования показали:

- что спектры БПЛА типа «квадрокоптер» и «моноплан» имеют ярко выраженные гармонические составляющие с частотами, кратными частоте вращения винта, при этом спектр акустического сигнала «квадрокоптера» шире, чем у моноплана, что объясняется некоторым различием режимов работы их двигателей в процессе полета или при работе системы компенсации ветровых возмущений;
- для акустических сигналов БПЛА, при их когерентном накоплении, в спектре наблюдаются гармоники с частотами до 8-10 кГц, при этом при наблюдении БПЛА самолетного типа под малыми углами к направлению его движения структура спектра изменяется незначительно, что дает возможность применять накопление акустических сигналов на длительных интервалах времени;

- одним из признаков для классификации БПЛА могут быть характерные изменения спектра акустического сигнала при изменении режимов работы двигателя БПЛА.

Основными недостатками, ограничивающими применение акустических систем при решении задач обнаружения БПЛА, являются [21]:

- низкая точность определения координат БПЛА;
- небольшие рубежи обнаружения БПЛА: до 1,5-2 км по дальности и до 1 км по высоте;
- низкая чувствительность.

В работе [90] представлены следующие значения дальностей обнаружения БПЛА средствами АР:

- планерный БПЛА с электрическим двигателем – 100-200 м;
- вертолетный БПЛА с электрическим двигателем – 200-300 м;
- БПЛА с поршневым двигателем – до 2 км.

Однако, как показано в работе [50] акустические характеристики силовых установок малых БПЛА позволяют осуществлять скрытое их применение с высот более 50-500 м. Эти выводы подтверждаются опытом применения Грузии в Южной Осетии мини-БПЛА «Скайларк» (израильского производства), которые вели разведку на высотах 700-2000 м. При этом, не отмечено ни одного случая их визуального обнаружения с земли по звуку.

Однако несмотря на изначально пессимистические прогнозы в отношении использования средств АР для обнаружения малых БПЛА работы в этом направлении продолжаются. Так, японская компания ALSOК представила рабочую систему обнаружения и распознавания «БПЛА-квадрокоптеров» по звуку, который они издают при полете. Система обнаружения состоит из акустических датчиков с дальностью действия 150 м, камер наблюдения и базы данных, в которой содержатся данные об уникальных акустических сигнатурах, наиболее распространенных БПЛА. Разработчики утверждают, что данная система может точно определить модель БПЛА и направление его движения [95].

Эти данные и другие значения характеристик БПЛА, а также основных составляющих комплекса боевого применения БПЛА могут быть использованы при разработке системы мер противодействия этим средствам.

3. Противодействие БПЛА средствами огневого поражения ПВО

В настоящее время спектр задач, стоящих перед средствами ПВО, значительно расширился из-за появления таких новых средства воздушного нападения (СВН) как крылатые ракеты комплексов высокоточного оружия (ВТО), гиперзвуковые средства поражения, воздушно-космические самолеты и т.д. [21]. Однако, вышеперечисленные СВН уже много лет являются классическими целями ЗРК ПВО, поэтому задачи противодействия им являются относительно проработанными и хорошо исследованными. А вот задача противодействия БПЛА для ЗРК является относительно новой. Рассмотрим основные особенности применения комплексов ПВО для решения задачи огневого поражения БПЛА.

3.1. Тактико-технические характеристики средств ПВО, ориентированных на противодействие БПЛА

3.1.1. Отечественные средства ПВО

Рассматривая отечественное вооружение необходимо остановиться на комплексах войсковой ПВО, которые, по заявлению их производителей, могут эффективно противодействовать БПЛА: ЗРК «Тор-М1» и «Тор-2Э», «Бук-М2Э» и «Бук-М3», «Морфей», «Витязь», зенитные ракетно-пушечные комплексы (ЗРПК) «Панцирь-С1» и «Сосна» и т.д. [45].



Рис. 3.1. ЗРК «Тор»

Так ЗРК «Тор» позиционируется как одно из наиболее эффективных отечественных средств борьбы с малозаметными целями (первоначально – с крылатыми ракетами ВТО). ЗРК «Тор-М1» может обнаруживать и обрабатывать до 48 воздушных целей с ЭПР порядка $0,1 \text{ м}^2$ на дальностях до 27 км, и поражать

их с вероятностью 0,56-0,98 на высотах 0,01-9 км и на дальности 1-12 км. Количество одновременно обстреливаемых воздушных целей – 2. Время реакции комплекса – 7,4 с. Модификация ЗРК «Тор-М2Э» может работать уже по 4-м воздушным целям одновременно. В варианте ЗРК «Тор-М2У» комплекс может также работать по 4-м воздушным целям, но при этом боекомплект ЗРК увеличен с 8 до 16 зенитных управляемых ракет (ЗУР) [45, 96].

ЗРК «Бук» также предназначен для борьбы с воздушными целями, обладающими малой ЭПР – крылатыми ракетами ВТО, противорадиолокационными ракетами, а также с БПЛА. По заявлению производителя данный ЗРК может работать по 6 БПЛА одновременно, поражая их с вероятностью 0,7-0,9, на дальности 3-42 км и на высотах 0,015-25 км. Время реакции комплекса 15-18 с [96].



Рис. 3.2. ЗРК «Бук»



Рис. 3.3. ЗРПК «Панцирь-С1»

Перспективным комплексом ПВО, который специально ориентирован на борьбу с БПЛА, является ЗРПК «Панцирь-С1» (ранее известный как «Тунгуска-3»). Данный комплекс способен обнаруживать воздушные цели с малым ЭПР на дальностях до 20 км и поражать их с использованием как ракетного, так и скорострельного пушечного вооружения. Дальность поражения ракетного вооружения 2,5-20 км на высотах 0,015-10 км. Дальность поражения пушечного вооружения 0-3 км на высотах 0,2-4 км. Количество одновременно обстреливаемых воздушных целей – 2. Время реакции 4-8 с [45, 96, 97]. В 2019 г. был представлен прототип новой версии этого ЗРПК – «Панцирь-СМ», при этом окончательная разработка комплекса должна быть завершена в 2021 г. ЗРПК «Панцирь-СМ» будет оснащен новой радиолокационной станцией (РЛС) на основе фазированной антенной решетки (ФАР) с повышенными показателями по дальности обнаружения целей (до 75 км), их селекции и помехозащищенности. Комплекс получит новую ЗУР со скоростью полета примерно 3000 м/с против 1300 м/с, у существующего «Панцирь-С1». Предполагается повышение возможностей по поражению целей: по дальности – до 40 км, по высоте – до 15 км

(для целей со скоростью не более 2 км/с). Возможно, комплекс будет представлен в двух вариантах исполнения – в оснащении только ЗУР и в варианте с ракетно-пушечным вооружением. В первом варианте боекомплект комплекса «Панцирь-СМ» составит 24 ЗУР, во втором – 12 ЗУР. Помимо этого, разработчиками рассматривается возможность создания небольших ЗУР, предназначенных для поражения микро БПЛА типа «квадрокоптер», а также минометных мин и снарядов реактивных систем залпового огня (РСЗО) [98].



Рис. 3.4. ЗРПК «Сосна»

Другим комплексом ПВО, специально ориентированным на борьбу с БПЛА, является ЗРПК «Сосна», который, по сути, представляет собой глубокую модернизацию одного из массовых армейских ЗРК «Стрела-10М3» [45]. Так ЗРК «Стрела-10М3» может поражать воздушные цели на высотах 0,01-3,5 км и на дальности 0,8-5 км (с вероятностью поражения одной ЗУР 0,3-0,6). Время реакции комплекса 7-10 с [96]. ЗРПК «Сосна» в качестве ракетного вооружения оснащена 12 высокоскоростными двухступенчатыми ЗУР малой массы, способных развивать скорость до 900 м/с и совершать маневры с перегрузкой до 40g. Наведение ЗУР осуществляется комбинированно – радио-командным способом на стартовом участке, в дальнейшем – телориентированное вторая ступени в лазерном луче. Дальность поражения этого ЗРПК ракетным вооружением – 1,3-10 км на высотах до 5 км. Дальность поражения артиллерийским вооружением – до 4 км, на высотах до 3 км, с вероятностью до 0,6 [45, 96, 99].

3.1.2. Зарубежные средства ПВО

Вышеуказанные отечественные ЗРК, специализирующиеся на противодействии БПЛА, фактически являются уникальными разработками, полнофункциональные аналоги которых в других странах отсутствуют. При этом в настоящее время ведущие зарубежные страны, в полной мере осознав необходимость противодействия БПЛА, только планируют создание подобных ЗРК.

Так ситуация в ПВО США такова, что после снятия с вооружения ЗРК малой дальности Chaparral (с ЗУР MIM-72) в 1997 г. и средней дальности Hawk (с ЗУР MIM-23) в 2002 г. единственными массовыми сухопутными средствами ПВО в вооруженных силах (ВС) США остались ЗРК большой дальности Patriot PAC-3 и ПЗРК Stinger. При этом, единственным средством ближнего действия были ракеты FIM-92 от ПЗРК Stinger, причём использовали их с различных платформ [100]:

- ПЗРК Stinger (MANPADS, Man-portable air-defense system).
- ЗРК малой дальности M1097 Avenger – гиростабилизированная платформа с 2 контейнерами по 4 ракеты в каждом и другим оборудованием на базе джипа M998 HMMWV;
- боевая машина пехоты (БМП) ПВО M2 Bradley – принята на вооружение ВС США в 1997 г., всего в этот вариант были переоборудованы 99 БМП. Но уже в 2005-2006 гг. они были сняты с вооружения, точнее возвращены назад в конфигурацию обычных БМП;
- универсальные пусковые установки MML (Multi-Mission Launcher) – проходят испытания с 2016 г [101].

Таким образом, на 2013 г. на вооружении ПВО ВС США из средств, которые можно рассматривать как массовые средства огневого поражения БПЛА, находились только ЗРК большой дальности Patriot (около 480 пусковых установок) и ЗРК малой дальности M1097 Avenger (примерно 700 пусковых установок), использующий ракеты Stinger [100]. В результате командованием США в 2016 г. было заявлено о необходимости создания аналогов российских ЗРК «Тор» и «Панцирь-С1» в рамках программы «Возможность защиты от огня с закрытых позиций» (Indirect Fire Protection Capability Increment 2 – Intercept, IFPC Inc 2-I). Одним из элементов этой программы является создание боевой машины Centurion C-RAM (Counter Rocket, Artillery and Mortar – противодействие ракетам, артиллерии и минометам) [102].

Рассмотрим ЗРК Patriot PAC-3, ЗРК M1097 Avenger и зенитно-артиллерийский комплекс (ЗАК) Centurion C-RAM более подробно.

Комплекс Patriot (рис. 3.5) – американский ЗРК, используемый ВС США в качестве основного средства ПВО от широкой номенклатуры воздушных целей на средних и больших высотах. В дополнение к этому, ЗРК Patriot играет роль средства перехвата баллистических ракет. В состав ЗРК Patriot входят ракеты воздушного перехвата и многофункциональная РЛС-подсистема. В настоящий момент эксплуатируется усовершенствованная версия этого ЗРК – Patriot PAC-3, принятая на вооружение в 2001 г. Многофункциональная РЛС AN/MPQ-53 используется в ЗРК Patriot PAC-3 для обнаружения, сопровождения и подсветки целей, слежения за ЗУР и передачи на них команд.

Основные ТТХ РЛС AN/MPQ-53 [103]:

- рабочая длина волн 5,5-6,7 см (4-6 ГГц);
- сектор обзора в режиме поиска:
 - по азимуту от $+45^\circ$ до -45° ;
 - по углу места 1° - 73° ;

- сектор сопровождения в режиме наведения через ЗУР:
 - о по азимуту от $+55^{\circ}$ до -55° ;
 - о по углу места 1° - 83° ;
- дальность обнаружения: при ЭПР цели:
 - о $0,1 \text{ м}^2$ (малоразмерные БПЛА или головная часть ракеты) – 70 км;
 - о $0,5 \text{ м}^2$ (средние БПЛА – ракета) – 100 км;
 - о $1,5 \text{ м}^2$ (большие БПЛА или истребитель) – 130 км;
 - о 10 м^2 (бомбардировщик) – 180 км;
- количество одновременно сопровождаемых целей – до 125;
- максимальная скорость сопровождаемых целей – 2200 м/с;
- время обнаружения цели – 8-10 с.

В 2017 г. ЗРК Patriot начал проходить масштабную программу модернизации по проекту PBD8 (Post-Deployment Build 8) и к 2019 г. модернизацию уже прошли 2/3 комплексов, стоящих на вооружении ВС США. Основные работы по модернизации предусматривают замену РЛС на новую многофункциональную станцию AN/MPQ-65A и переход на цифровую обработку сигналов. Это обеспечит повышение дальности обнаружения ЗРК до 230-240 км, а также повысит помехоустойчивость РЛС [103].



Рис. 3.5. ЗРК Patriot

Основным средством поражения ЗРК Patriot PAC-3 является ЗУР MIM-104. ТТХ данной ЗУР:

- дальность стрельбы:
 - о минимальная – 3 км;
 - о максимальная по баллистической цели – 20 км;
 - о максимальная по аэродинамической цели – 80 км;

- высота поражения цели:
 - минимальная – 0,6 км;
 - максимальная – 24-25 км;
- время полета – 8,3-17 с;
- максимальная скорость поражаемых воздушных целей – 1600 м/с;
- высота поражаемых воздушных целей – до 15 км;
- вероятность поражения одной ракетой в отсутствие помех:
 - самолёта – 0,8-0,9;
 - БПЛА или тактической ракеты – 0,6-0,8.

ЗРК малой дальности M1097 Avenger (рис. 3.6) предназначен для поражения воздушных целей на встречных курсах и вдогон на высотах 0,5-3,8 км и дальностях 0,5-5,5 км. Комплекс создан в 1990 г. компанией Boeing Aerospace Company с использованием ЗУР FIM-92 Stinger. В своем составе ЗРК имеет пусковую установку (2 пакета по 4-е ракеты FIM-92 Stinger в транспортно-пусковых контейнерах), 12,7-мм пулемет, систему обнаружения и сопровождения целей, ЭВМ, аппаратуру опознавания «свой-чужой» AN/PPX-3B, органы управления и индикации, связные радиостанции AN/PRC-77 и AN/VRC-47. Система целеуказания ЗРК способна автоматически сопровождать цель, определяя расстояние до цели, и производить обстрел целей в движении со скоростью до 35 км/ч. В комплексе M1097 Avenger используется ЗУР FIM-92B Stinger, с головками самонаведения (ГСН) инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) диапазона POST (Passive Optical Seeker Technology). Максимальная скорость полета ЗУР – $M=2,2$. Для перекрытия «мертвой зоны» ЗУР FIM-92 Stinger служит крупнокалиберный 12,7-мм пулемет М3Р, являющийся улучшенной версией AN-M3 MG со скорострельностью 1100 выстр./мин и боезапасом 300 патронов.



Рис. 3.6. ЗРК малой дальности M1097 Avenger

ЗАК Centurion C-RAM (рис. 3.7) является перспективным наземным вариантом известного американского корабельного ЗАК Mark 15 Phalanx CIWS.

Этот ЗАК оборудован шестиствольной 20-мм пушкой M61A1 со скорострельностью до 2000-2200 выстрелов/мин и эффективной дальностью стрельбы 1,47 км, стреляющей осколочно-фугасными снарядами для большей эффективности поражения, установленной на едином лафете с двумя РЛС обнаружения и сопровождения цели. В боекомплекте артиллерийской установки Centurion C-RAM используются осколочно-трассирующие снаряды M246 и осколочно-фугасные M940. Для безопасности людей, находящихся на земле, все снаряды снабжены самоликвидаторами, подрывающими их через заданный временной интервал. Общий боезапас составляет 1500 выстрелов.



Рис. 3.7. ЗАК Centurion C-RAM

При создании Centurion C-RAM специалисты компании Raytheon использовали наработки и боевой опыт, полученные при создании и эксплуатации ЗСУ M163 Vulcan на базе БТР M113 и последних модификаций морского ЗАК Phalanx CIWS. Так как сухопутная ЗАК Centurion C-RAM функционально сильно отличается от своего морского прототипа – Mark 15 Phalanx CIWS, в её составе использовалось несколько иное радиолокационное и оптоэлектронное оборудование, а также другой алгоритм функционирования. ЗАК Centurion C-RAM так же, как и корабельный ЗАК Mark 15 Phalanx CIWS, осуществляет поиск и поражение целей в автоматическом режиме. Функции оператора при несении боевого дежурства сводятся к контролю работоспособности ЗАК, подтверждение запроса на поражение цели, вошедшей в охраняемый периметр и пресечению нештатных ситуаций.

В отличие от морского ЗАК, для расчёта баллистической траектории цели и определения степени угрозы прикрываемому объекту и принятия решения о его поражении, в состав Centurion C-RAM включена выносная РЛС AN/TPQ-36 Firefinder. Эта компактная мобильная РЛС на основе ФАР AN/TPQ-36 Firefinder способна обнаруживать снаряды и ракеты РСЗО на дальности 18-24 км, одновременно сопровождать до 20 целей и на основе расчёта их траекторий с высокой точностью определять координаты артиллерийских позиций.

С 2009 г. в составе ЗАК для раннего обнаружения мин, ракет, снарядов и малогабаритных БПЛА на траектории используется выносная РЛС AN/TPQ-53 Target Acquisition Radar, с максимальной дальностью работы по 122-мм реактивным снарядам – 60 км. РЛС AN/TPQ-53 размещается на шасси 5-тонного бронированного грузовика FMTV, который способен двигаться со скоростью более 80 км/ч. Информация о целях, обнаруженных выносными РЛС в реальном режиме времени передаётся на ПУ ЗАК по радиорелейным или волоконно-оптическим линиям.

Помимо выносной РЛС на самом ЗАК Centurion C-RAM также используется РЛС обнаружения и наведения, штатно размещенная на платформе с артиллерийской установкой (рис. 3.7). В первом варианте ЗАК Centurion C-RAM для обнаружения миномётных мин и снарядов в непосредственной близости от защищаемой зоны использовалась РЛС AN/TPQ-48. Комплект аппаратуры РЛС весил 220 кг, дальность обнаружения 120-мм мины – 5 км. Однако после ряда инцидентов, когда РЛС AN/TPQ-48 пропустила несколько вражеских снарядов, она была заменена РЛС AN/TPQ-49. Фактически РЛС AN/TPQ-49 – это улучшенный вариант РЛС AN/TPQ-48, в котором помимо повышения надёжности, и снижения массы до 70 кг, дальность обнаружения 120-мм мины доведена до 10 км. Для применения в составе ЗАК Centurion C-RAM компания Raytheon разработала РЛС Ку-диапазона (10,7-12,75 ГГц) MFRFS (Multi-Function RF System) с сектором сканирования 360°. В настоящее время характеристики РЛС MFRFS в открытой печати не разглашаются, но, как отмечается в пресс-релизах по итогам испытаний, после введения РЛС MFRFS в состав аппаратной части ЗАК Centurion эффективность ЗАК существенно возросла. Помимо РЛС, для поиска и целеуказания воздушных и наземных целей предназначена оптоэлектронная аппаратура с тепловизионным каналом (FLIR), с автоматическим захватом и сопровождением движущихся объектов. Это даёт возможность помимо уничтожения артиллерийских снарядов в любое время суток и в сложных погодных условиях противодействовать крылатым ракетам, БПЛА, низколетящим самолётам и вертолётам, а также использовать ЗАК Centurion C-RAM для самообороны [102, 104].

ЗАК Centurion C-RAM предназначен для прикрытия важных наземных объектов (расквартированных армейских частей, военных баз, а также мест развертывания систем ПВО и ПРО большого радиуса действия) от средств воздушного нападения на предельно малых и малых высотах, ракет РСЗО, БПЛА, артиллерийских снарядов и миномётных мин, а также для поражения живой силы и легкобронированных целей противника в сложных условиях обстановки и в любое время суток [102, 104].

Перспективным направлением развития ЗРК, ориентированных против БПЛА, является проект Low-Cost Extended Range Air Defense (LOWER AD). Этот проект был анонсирован в 2018 г. командованием по развитию боевых возможностей ВС США – CCDC (Combat Capabilities Development Command), целью проекта является создание нового более простого и дешевого ЗРК, чем широко распространённый ЗРК Patriot. Новый комплекс будет нести большее число ракет с меньшей дальностью полета (рис. 3.8). Его задачей станет пора-

жение дозвуковых крылатых ракет и ударных БПЛА. Более сложные цели других типов предлагается оставить для ЗРК Patriot. Совместное применение Patriot и LOWER AD, как ожидается, позволит получить выгодное соотношение боевой эффективности и стоимости эксплуатации. На данный момент проект LOWER AD находится на ранних стадиях проектирования – определен облик будущего ЗРК, сформированы некоторые принципиальные тактико-технические решения. Более серьезные результаты появятся лишь в 2021 г. или позднее [105].



Рис. 3.8. Возможная пусковая установка LOWER AD

Отметим, что ведущие западные компании в инициативном порядке продолжают заниматься проблемой противодействия БПЛА. Так в 2012 г. компания Raytheon сообщила о получении контракта от армии США стоимостью 79,2 млн долларов на разработку ракеты-перехватчика AI3 (Accelerated Improved Intercept Initiative) для защиты личного состава от БПЛА, тактических ракет и минометных снарядов. Над подобным проектом EAPS с ракетой МНТК работала и компания Lockheed Martin совместно с научно-исследовательским центром авиации и ракетных систем США. Известно, что Raytheon и Lockheed Martin проводили контрольные тестовые пуски своих ракет еще в 2013 г. и планировали продолжить свои разработки в рамках вышеуказанной программы Intercept, IFPC Inc 2-I, однако до сих пор это не привело к созданию каких-либо демонстрационных образцов ЗРК, подобных отечественным «Панцирь-С1» и «Тор» [102].

3.2. Результаты испытаний и реального боевого применения средств ПВО при решении задач противодействия БПЛА

3.2.1. Результаты испытаний отечественных средств ПВО

Вместе с тем, несмотря на несомненные успехи отечественного военно-промышленного комплекса в области создания ЗРК противодействия БПЛА, указываемые разработчиками высокие ТТХ ЗРК не в полной мере подтверждаются на практике. При этом, если против средних и больших БПЛА вышеуказанные отечественные ЗРК демонстрируют заявленные показатели поражения, то с малыми БПЛА все обстоит не так однозначно.

Так, предполагается, что РЛС зенитных комплексов «Тор-М1», «Оса-АКМ» и т.д. способны обнаружить малоразмерные БПЛА на дальностях 3,3-7,4 км. Учитывая, что скорости таких БПЛА составляют порядка 50-250 км/ч, боевые расчеты этих ЗРК должны иметь достаточно времени на проведение предпусковых операций и обстрел цели [48].

Однако, результаты полигонных испытаний показали, что РЛС обнаружения целей ЗРК «Тор» обеспечивает обнаружение малоразмерных БПЛА на дальностях всего 3-4 км. Практический опыт экспериментальных стрельб по малоразмерным мишениям – аналогам БПЛА («Пчела», РУМ-2МБ и «Рейс»), свидетельствует о низкой эффективности их поражения. Основными причинами этого являются несовершенство системы управления подрывом боевой части ЗУР, а также большие ошибки сопровождения цели и наведения ЗУР на малоразмерные БПЛА [44, 48].

Результаты полигонных испытаний ЗРПК «Панцирь-С1» показывают, что стрельба ракетным вооружением по малоразмерным БПЛА практически невозможна. Причиной этому является малая дальность обнаружения малоразмерных БПЛА со стороны РЛС обнаружения и целеуказания, которая также, как и для ЗРК «Тор», составляет 3-5 км, что практически совпадает с ближней границей зоны поражения ЗУР. Применение пушечного вооружения этих ЗРК против малоразмерных БПЛА принципиально возможно, но по причине малых размеров БПЛА, вероятность их поражения невелика [44, 48].

Испытания ЗРК «Стрела-10М3» (рис. 3.9) показывают, что к этот комплекс способен поражать мини-БПЛА типа «Акила» только в дневных условиях. Возможность стрельбы ЗРК «Стрела-10М3» по этому типу цели определяется главным образом дальностью обнаружения цели оператором и дальностью захвата ГСН ЗУР. Средние дальности обнаружения мини-БЛА типа «Акила» оператором ЗРК «Стрела-10М3» составляют 1,3-4,5 км, что крайне мало для ведения эффективной стрельбы. Использование оператором встроенного оптического визира в ограниченном секторе поиска (при наличии точного целеуказания) позволяет увеличить дальность обнаружения малоразмерной цели в 1,5-2,1 раза. Расчетные дальности захвата ГСН ЗУР мини-БПЛА типа «Акила» фотоконтрастным каналом (ФК) по аналогичным причинам будут невысокими и составлять 2,8-3,5 км, а захват цели по ИК-каналу вообще невозможен из-за ее

крайне слабого теплового излучения. При этом, что БПЛА «Акила» является устаревшим мини-БЛА, снятым с вооружения, а современные мини-БЛА имеют меньшие в 1,5-2 раза размеры и тепловую контрастность. В связи с этим, эффективность стрельбы по таким целям (и без того невысокая) будет еще ниже. Результаты боевых пусков по мишениям – аналогам малоразмерных воздушных целей показали, что стрельба ЗРК «Стрела-10СВ» и «Стрела-10М» обеспечивается в ФК диапазоне в основном вдогон, а на встречном курсе – в ограниченной части зоны пуска. Дальности пуска ракеты составили для этих комплексов в среднем 1,5-2 км [44, 48].



Рис. 3.9. ЗРК «Стрела-10М3»

Результаты оценки возможности стрельбы ЗПРК «Тунгуска» (рис. 3.10) по мини-БПЛА показывают, что стрельба ракетным вооружением по этому типу цели практически невозможна. Это обусловлено тем, что дальность обнаружения мини-БПЛА в оптический визир составляет всего лишь 2-3 км, что практически равно значению дальности до ближней границы зоны поражения комплекса. Стрельба ЗПРК «Тунгуска» по БПЛА пушечным вооружением принципиально возможна, однако ввиду малых геометрических размеров БПЛА эффективность стрельбы по нему невелика. Практика показывает, что при обстреле мини-БПЛА типа «Акила» пушечным вооружением на дальности 3 км для достижения значения условной вероятности поражения цели равной 0,5, необходимо израсходовать от 4 до 13 тыс. снарядов (т.е. 2-6 б/комплекта), на дальности 1 км – от 0,5 до 1,5 тыс. снарядов (0,3-0,8 б/комплекта) [48].



Рис. 3.10. ЗПРК «Тунгуска»

При стрельбе по мини-БЛА из ПЗРК «Игла» сказываются сложности обнаружения малоразмерной малошумящей воздушной цели. Своевременное обнаружение и пуск ЗУР по такой цели для стрелка-зенитчика будут крайне затруднительными, что обусловлено следующими факторами:

- уменьшением контраста изображения цели при движении (перемещении) оптического прибора;
- быстроразвивающимся зрительным утомлением стрелка-зенитчика;
- низким уровнем акустического шума двигателя мини-БПЛА (около 50 дБ на дальности 1000 м, что ниже порога чувствительности органов слуха);
- сокращением времени на анализ обозреваемого пространства.

Более того, если даже малоразмерную цель удалось обнаружить, головка ГСН ЗУР ПЗРК может не захватить цель. Это обусловлено тем, что тепловая контрастность мини-БПЛА, имеющих в основном поршневые двигатели, на два порядка ниже пороговой чувствительности приемника ГСН ЗУР. Кроме того, малая эффективность стрельбы ПЗРК «Игла» по мини-БЛА объясняется также отсутствием системы дистанционного подрыва боевой части ЗУР. Однако в новых модификациях этого ПЗРК был введен неконтактный взрыватель, обеспечивающий подрыв боевой части ракеты при ее пролете относительно цели с некоторым промахом. Кроме того, повышение эффективности стрельбы комплекса по малоразмерным целям было достигнуто за счет увеличения мощности боевой части ЗУР, оптимизации ее точностных характеристик и др.

3.2.2. Результаты боевого применения отечественных средств ПВО

Интересен анализ опыта реального боевого применения отечественных ЗРК и ЗРПК против БПЛА в последних военных конфликтах в Сирии, в Ливии, и в Нагорном Карабахе.

3.2.2.1. Война в Сирии

Опыт боевого применения российского ЗРПК «Панцирь-С1», стоящего на вооружении войск Сирии, против турецких БПЛА Bayraktar TB2 и Anka в 2017-2019 г., представлен в работах [125, 126].

В работе [125] проведен анализ «дуэльного» боевого противоборства между ЗРПК «Панцирь-С1» и турецких БПЛА Bayraktar TB2 и БПЛА Anka. Указывается, что Bayraktar TB2 – это ударный БПЛА, несущей до 4 управляемых противотанковых ракет UMTAS, которые могут поражать цели на расстоянии до 8 км. Для визуального управления на этот БПЛА устанавливается либо ОЭС, оснащенная с ИК-сенсорами, несколькими камерами и лазерным дальномером, либо РЛС с активной ФАР (АФАР) с радиолокационным синтезированием апертуры. ЭПР данного БПЛА предположительно составляет 0,01-0,1 м².



Рис. 3.11. БПЛА Bayraktar TB2

Боевое применение БПЛА Bayraktar TB2 предполагает выполнение двух основных типов задач: разведывательную и ударную. При выполнении задачи разведки БПЛА ведет полет на высоте порядка 6 км. В этом случае РЛС «Панциря-С1» сможет обнаружить данный БПЛА на расстоянии по горизонтали минимально за 7 км. При наиболее удачном стечении обстоятельств – на расстоянии до 15,3 км. Дальность, на которой ЗРПК «Панцирь-С1» будет обнаружен ОЭС БПЛА Bayraktar TB2 зависит от различных параметров: степени освещенности, атмосферных помех, применения маскировки, конфигурации камер ОЭС и пр. В качестве ОЭС БПЛА Bayraktar TB2 используется американский военный модуль Wescam CMX-15D. Камеры этого ОЭС позволяют обнаружить цель типа «танк», по некоторым данным, на расстоянии до 80 км. На расстоянии 20 км разрешение этого ОЭС позволяет рассмотреть в кабине водителя. Очевидно, что для выполнения задачи разведки БПЛА Bayraktar TB2 может быть использовано и другое оборудование.

видно, что ОЭС БПЛА Bayraktar TB2 значительно превосходит возможности обнаружения ЗРПК «Панцирь-С1» в связи с чем БПЛА может вскрыть факт нахождения ЗРПК за пределами радиуса поражения его ЗУР. ОЭС Wescam CMX-15D также оснащена лазерными дальномерами с дальностью до 20 км. Таким образом, с дальности в 20 км, то есть на дальности сопоставимой с дальностью средств обнаружения ЗРПК, БПЛА имеет возможность точно определить его местоположение и выдать по нему целеуказание на применение ударных средств. Несомненно, эффективность ОЭС БПЛА зависит от атмосферных факторов, уровня маскировки ЗРПК и прочих факторов, но в целом, весьма вероятна ситуация что БПЛА вскроет местоположение ЗРПК первым и захватит инициативу в ведении противоборства. Дальнейший сценарий действий БПЛА предполагает маневр по входению в зону поражение ЗРПК, оперативное сближение на расстояние до 8 км (дальность пуска ракет UMTAS), пуск ракет по ЗРПК, выполнение маневра возврата. Кроме того, опыт применения турецкими военнослужащими БПЛА предполагает, что БПЛА будут применяться в группе, а поддержку их действий будут осуществлять комплексы РЭП KORAL и REDET EW. Воздействие помех приведет к снижению как дальности обнаружения БПЛА со стороны РЛС ЗРПК «Панцирь-С1», так и к снижению вероятности правильного целеуказания ЗУР. Это, в целом, снизит вероятность поражения БПЛА в момент его входа в зону поражения ЗРПК и пуска ракет. Опыт боевого применения ЗРПК «Панцирь-С1» в Ливии показал, что ЗРПК «Панцирь-С1», в силу определенных конструктивных недостатков его РЛС, в условиях помех обеспечивает высокую вероятность поражения БПЛА исключительно на относительно небольших дальностях – порядка 4-6 км [125].

Если рассматривать случай, когда БПЛА Bayraktar TB2 вместо ОЭС оснащен РЛС, то тут БПЛА получает ряд преимуществ. Так мини-РЛС с АФАР «Picosar» на БПЛА Bayraktar TB2 обеспечивает сканирование местности с разрешением в 1 м на дальности 20 км. На дальности 14 км эта РЛС обеспечивает разрешение 0,3 м, что позволит БПЛА гарантированно вскрыть местонахождение ЗРПК «Панцирь-С1» и обеспечить целеуказание своим управляемым ракетам [125].



Рис. 3.11. БПЛА Anka

Рассматривая вопрос противоборства ЗРПК «Панцирь-С1» и БПЛА Anka отметим следующее. БПЛА Anka по сравнению с БПЛА Bayraktar TB2 обладает

меньшей ЭПР, более эффективной РЛС на основе АФАР, большей высотой полета (до 12 км) и возможностью применять авиационные бомбы Jdam с дальностью пуска 28 км и крылатые ракеты с дальностью пуска до 250 км. Такие ТТХ позволяют БПЛА Anka успешно поражать ЗРПК «Панцирь-С1» не входя в зону действия его средств обнаружения и поражения [125].

В работе [126] проведен анализ влияния на эффективность ЗРПК «Панцирь-С1» слаженности и оперативности действия экипажа, а также боевой эффективности этого ЗРПК в условиях группового применения БПЛА в реальных боевых условиях. Показано, что, в целом, преимущество в зоне поражения, в «дуэльном» противоборстве ЗРПК «Панцирь-С1» – БПЛА Bayraktar TB2, на стороне «Панцирь-С1». Однако это преимущество может быть реализовано только если ЗРПК находится в режиме боевого дежурства, его РЛС успешно вскрыла факт полета БПЛА, взяла его на сопровождение, и готова выдать целевое указание ЗУР при входе БПЛА в зону поражения. Однако в практике боевых действий зачастую складывается ситуация, когда ЗРПК в момент обнаружения его БПЛА либо находится «на марше», либо один ЗРПК атакуется несколькими ударными БПЛА. В этих случаях резко возрастает роль человеческого фактора – способности боевого расчета ЗРПК оперативно и адекватно отреагировать на складывающиеся ситуации. Нормативное время боевого развертывания ЗРПК «Панцирь-С1» составляет 4,5 мин, однако в реальных боевых условиях оно может быть значительно дольше. За частую этого времени вполне достаточно для вхождения БПЛА Bayraktar TB2 в зону поражения ЗРПК (18 км) и выход на рубеж пуска своих ракет (ракеты UMTAS с дальностью поражения 8 км). Другим проблемным фактором, снижающим боевую эффективность ЗРПК, является то, что среднее число БПЛА одновременно атакующих ПЗРК в реальных боевых условиях составляет три и более, причем БПЛА атакуют ПЗРК одновременно и с разных направлений. В вышеуказанных условиях экипаж ЗРПК «Панцирь-С1», по опыту боевых действий в Ливии и Сирии, либо расходовал весь боезапас (12 ЗУР) при появлении «головных» БПЛА первого ударного эшелона, в то время как БПЛА второго эшелона успешно применяли свои ракеты по ПЗРК, либо ЗРПК «Панцирь-С1» попросту не был развернут в боевое положение [126].

В результате военного противостояния в Сирии, Турция вывела тактику применения своих БПЛА на новый уровень. Во-первых, ударные БПЛА стали на постоянной основе применяться против личного состава и средств вооружения регулярной армии – вооруженных сил Сирии, а не против иррегулярных воинских формирований. Во-вторых, была выработана тактика применения ударных БПЛА Bayraktar TB2 массированно, группами, под прикрытием более тяжелых разведывательных БПЛА Anka, оборудованных средствами РЛР, ОЭР и комплексами РЭП, в рамках решения задач поражения ЗРК и ЗРПК систем ПВО. По утверждению турецких средств массовой информации (СМИ), средствам РЭП, размещенным на БПЛА Anka почти всегда удавалось успешно подавлять РЛС ЗРПК «Панцирь-С1», что позволяло ударным БПЛА Bayraktar TB2 входить в зону поражения этих ЗРПК и успешно их атаковать [289].

По неподтвержденным данным, по информации СМИ противостоящих сторон, в ходе военной операции турецких войск в Сирии в период с сентября 2019 г. по сентябрь 2020 г. в дуэльных ситуациях «БПЛА – ЗРПК» было сбито порядка 20 БПЛА Bayraktar TB2 и Anka, при этом потеряно 8 ЗРПК «Панцирь-С1». Однако, можно предположить, что эти данные были завышены в пропагандистских целях. По сообщениям официальных лиц, а также по подтвержденным данным, за этот период было сбито 10 БПЛА Bayraktar TB2 и Anka и потеряно 2 ЗРПК «Панцирь-С1» [294, 295]. Вместе с тем, даже если ориентироваться на официально подверженные потери, размен 1 ЗРПК «Панцирь-С1» на 5 БПЛА подтверждает неадекватно низкий уровень боевой живучести ЗРПК, в условиях массированного применения БПЛА.

Таким образом, можно констатировать, что группы ударных БПЛА из объекта поражения ЗРК, наоборот, становятся эффективными средствами вскрытия и уничтожения системы ПВО противника. [289]. В дальнейшем тактические приемы применения БПЛА были развиты в ходе их боевого применения в Ливии и в Нагорном Карабахе.

3.2.2.2. Война в Ливии

Опыт боевого применения российских ЗРК и ЗРПК против турецких БПЛА Bayraktar TB2 и Anka в войне в Ливии в 2019 г., представлен в работе [289]. Первые турецкие ударные БПЛА Bayraktar TB2 летом 2019 г были поставлены Правительству национального согласия (ПНС) Ливии, ведущего борьбу с силами маршала Х. Хафтара, на вооружении которых, в свою очередь, имелись ЗРПК «Панцирь-С1». Массированное применение, как и в Сирии (группировка БПЛА могла насчитывать до 40 единиц), этих турецких БПЛА в Ливии предопределило исход решающего сражения за г. Триполи.

По неподтвержденным данным, с мая 2019 г. по июнь 2020 г. по сообщениям противостоящих сторон, силы Х. Хафтара потеряли 15 ЗРПК «Панцирь-С1», уничтоженных БПЛА Bayraktar TB2, которых, в свою очередь, было потеряно 78 единиц. При этом, нужно понимать, что эти данные могут быть завышены относительно реальных потерь. По по подтвержденным случаям, за тот же период, было сбито 22-26 БПЛА Bayraktar TB2 и потеряно 9-12 ЗРПК «Панцирь-С1» что, безусловно, гораздо больше, по сравнению с кампанией в Сирии [289, 295, 296].

Причина высоких потерь БПЛА Bayraktar TB2 в том, что, в отличие от Сирии, в Ливии они применялись без поддержки БПЛА Anka оборудованных комплексами РЭП и, в большинстве случаев, без поддержки наземных комплексов РЭП. Для снижения вероятности обнаружения БПЛА Bayraktar TB2 со стороны РЛС ЗРПК они отправлялись на задания по огневой поддержке войск и по прорыву системы ПВО на низких высотах. Результатом этого были большие потери БПЛА, так как лёгкие БПЛА, задействованные для нанесения ударов – это одна из наиболее уязвимых для средств ПВО категория целей. Вместе с тем, противодействие массированному налету таких БПЛА для системы ПВО является не тривиальной задачей. Лёгкие БПЛА, такие как Bayraktar TB2, при работе по переднему краю системы ПВО могут идти на низкой высоте (в несколько

сотен метров), оставаясь не обнаруживаемыми для большого числа РЛС ЗРК. Низковысотный полёт БПЛА – это риск, на которые необходимо идти для прорыва системы ПВО и потери в этом случае неизбежны. Но в случае применения БПЛА Bayraktar TB2 в Ливии, за неимением других вариантов такой риск был неизбежен и оправдан тем, что массированное применение групп БПЛА позволяет большей части группы успешно преодолеть зону ПВО и создав большой численный перевес уничтожить ЗРК предварительно заставив последние исчерпать свой боезапас [289].

Вместе с тем, если примерно ориентироваться на вышеуказанные подверженные потери, в Ливии был обеспечен размен 1 ЗРПК «Панцирь-С1» на 2,8 БПЛА, что подтверждает высокую эффективность одновременного массового применения БПЛА для уничтожения ЗРК системы ПВО. При этом БПЛА дешевле и их применение не подразумевает жертв среди личного состава. Основными причинами, по которым ЗРПК несут потери являются: низкая эффективность алгоритмов управления огнем для отражения массового налета БПЛА с нескольких сторон (этот аспект подробно рассмотрен в подразделе 3.3.4), слабая подготовка экипажей, нарушение правил эксплуатации и транспортировки, а также пренебрежение основами маскировки. Как отмечается в работе [295], подавляющая часть потерянных ЗРПК «Панцирь-С1» находилась либо на марше, либо они были уничтожены, когда у них закончился боекомплект и они уже не могли обеспечить как свою собственную защиту, так и осуществить прикрытие соседних позиционных районов ПВО от БПЛА противника.

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, боевое применение ЗРПК «Панцирь-С1» против БПЛА Bayraktar TB2 в Ливии следует, в целом, оценить как неэффективное, особенно с учётом того, что БПЛА Bayraktar TB2 – это лёгкий БПЛА с ограниченной дальностью применения вооружения, при этом, его использование в Ливии было лимитировано отсутствием возможности управления БПЛА по спутниковой связи [289]. Подавляющее число потерь ЗРПК произошло по причине успешной реализации против них атаки на исчерпание ресурса, проводимой путем массированного применения легких БПЛА [295].

3.2.2.3. Война в Нагорном Карабахе

Осенью 2020 г. начался военный конфликт между Арменией и Азербайджаном в Нагорном Карабахе. Характерной чертой данного конфликта являлось массированное применение со стороны Азербайджана БПЛА для уничтожения средств вооружения и живой силы Армении.

На вооружение Азербайджана непосредственно перед началом конфликта поступили турецкие БПЛА Bayraktar TB2, оснащённые управляемыми авиа-бомбами МАМ с лазерным наведением, а также израильские БПЛА Heron TP и Hermes 4507, барражирующие «БПЛА-камикадзе» Sky Striker и Nagor. Кроме того, в Азербайджане, на совместном с Израилем предприятии выпускались БПЛА Aerostar, а также «БПЛА-камикадзе» Orbiter-1K и Orbiter-3 [292].

Армения, в последние годы закупкой БПЛА не занималась. При этом она сама производит разведывательный БПЛА легкого класса «Крунк», который, однако, не предназначен для решения ударных задач. По состоянию на начало

конфликта, на вооружении ВС Армении стояли различные системы ПВО советского и российского производства, при этом прикрытие воздушного пространства непосредственно над территорией Нагорного Карабаха обеспечивали ЗРК «Оса» и «Стрела» [290]. Ранее Армения закупала у России ЗРК «Тор», которые можно было бы эффективно применять против БПЛА, однако на территории Нагорного Карабаха их не размещали [292].

Отметим, что ЗРК «Оса» (рис. 3.12) предназначены для перехвата стандартной номенклатуры воздушных целей на дальности 1,5-10 км, на высоте до от 25 м до 5 км. Дальность обнаружения цели – до 45 км. Боекомплект – 6 ЗУР. Вероятность поражения одной ЗУР воздушной цели типа «самолет» – 0,5-0,85. Время реакции – 16-26 с [291]. При этом, особенностью ЗРК «Оса», как показал опыт его боевого применения в войнах в Югославии и в Ливии, является низкая эффективность перехвата целей с низким ЭПР (в частности – БПЛА) и низколетящих целей на высоте до 50 м. ЗРК «Стрела-10» может поражать воздушные цели на высотах 0,01-3,5 км и на дальности 0,8-5 км (с вероятностью поражения одной ЗУР 0,3-0,6). Время реакции комплекса 7-10 с [96].

Оба этих ЗРК ориентированы, прежде всего, на поражение самолетов и вертолетов армейской авиации и не предназначены для борьбы с БПЛА. Несмотря на это, прошедшие в июне 2020 г. совместные армяно-российские учения войск ПВО, по мнению российских военных специалистов, позволили сделать вывод о высоких боевых качествах этих ЗРК по потенциальному противодействия азербайджанским БПЛА. Такой вывод был сделан на основании того, что ЗРК «Оса» успешно перехватила одиночный разведывательный БПЛА Hermes 900 [293].



Рис. 3.12. ЗРК «Оса»

С началом боевых действий в Нагорном Карабахе, как показано в работах [290, 292, 293], азербайджанские вооруженные силы, при поддержке турецких военных специалистов, развернули массовое групповое применение ударных БПЛА, с учетом опыта применения БПЛА в Сирии и Ливии. Если бы война в Нагорном Карабахе велась бы без БПЛА, армянские системы ПВО были бы

вполне адекватны задачам по сдерживанию азербайджанской авиации. Неслучайно, даже получив превосходство в воздухе, Азербайджан очень ограниченно использует свою пилотируемую авиацию так как остающиеся на вооружении Армении ЗРК до сих пор представляют для них серьезную угрозу. Однако, Армения оказалась совершенно не готова к войне с массовым использованием БПЛА, тактику которой хуситы отработали в Йемене, а турки – в Сирии и Ливии.

Результатом массированного применения групп БПЛА Bayraktar TB2, совместно с «БПЛА-камикадзе» Sky Striker, Harop и Orbiter стало практически полное уничтожение армянских ЗРК «Оса» и «Стрела-10» размещенных в Нагорном Карабахе в первые дни конфликта. Уже в первый день войны по позициям этих ЗРК был нанесен заранее подготовленный удар, который лишил оборону Нагорного Карабаха, по оценкам специалистов, до 80% комплексов ПВО – 6 ЗРК «Оса» и 3 ЗРК «Стрела-10» при потерях в 4 БПЛА [293, 297]. Таким образом, за счет массовости и внезапности применения обеспечив размен 2,25 ЗРК на 1 БПЛА! Завоевание превосходства в воздухе дало возможность Азербайджану с помощью БПЛА непрерывно, в круглосуточном режиме, и беспрепятственно атаковать армянские мотострелковые и механизированные части, нанося им существенные потери еще до того, как они вступали в бой с силами Азербайджана. Это значительно облегчило наступление азербайджанской армии и позволило добиться существенных тактических успехов. При этом, оставшиеся на вооружении Армении комплексы ПВО, такие как С-300ПС и С-300ПТ, в принципе не предназначены для борьбы с БПЛА в связи с чем они не могут быть эффективно использованы для обороны воздушного пространства Армении и Нагорного Карабаха от этого нового типа угроз. Более того, в результате грамотно спланированной операции силами БПЛА были уничтожены 2 пусковые установки и 2 РЛС из состава ЗРК С-300ПС (по состоянию на 16 октября 2020 г.).

Такое массовое эффективное применение БПЛА для вскрытия и уничтожения сначала системы ПВО, а в дальнейшем – живой силы и вооружения сухопутных войск, встречается в мировой практике впервые и получило в СМИ название «война дронов». Азербайджанская сторона широко растиражировала в СМИ видеозаписи высокоточных ударов БПЛА по армянским позициям. Основные цели ударов – это, прежде всего, средства ПВО, затем – бронетанковые колонны на марше, танки и артиллерия на позициях, реже – склады, хранилища и казармы [290, 292].

После уничтожения основных сил системы ПВО в Нагорном Карабахе армянская сторона оказалась неспособна быстро восполнить их ресурс за счет новых ЗРК. Она оказались в ситуации, когда противник завоевав превосходство в воздухе, использует его для достижения стратегического перевеса в войне. Это делает неизбежным рост количества потерь и нарастание проблем в обороне сухопутных войск от массированных ударов БПЛА в воздухе. Экстренные закупки ПЗРК, которые рассматриваются сейчас армянской стороной, являются частной, и не совсем удачной, попыткой решить системную проблему борьбы с БПЛА [290].

Независимо от того, как сложится дальнейшее развитие событий в войне за Нагорный Карабах, налицо тенденция повышения эффективности применения БПЛА для завоевания господства в воздухе и поражения основных сухопутных средств вооружения – бронетехники. Это позволяет сделать вывод о возможной близкой смене стратегии ведения войн, в части применения БПЛА. В войнах ближайшего будущего возможно массовое многоэтапное и многоэшелонированное применение групп легких разведывательных и разведывательно-ударных БПЛА, а также «БПЛА-камикадзе». На первом этапе – для разведки противника. На этапе нанесения первого удара – для вскрытия и уничтожения средств ПВО, а в дальнейшем – уничтожения самолетов и вертолетов пилотируемой авиации на земле и в воздухе. После завоевания превосходства в воздухе – уничтожения бронетехники и живой силы сухопутных войск, объектов тыла и критической государственной инфраструктуры.

3.2.3. Результаты испытаний и реального боевого применения зарубежных средств ПВО

Негативный опыт боевого применения ЗРК Patriot PAC-3 против БПЛА при их атаке 14 сентября 2019 г. нефтеперерабатывающих заводов в г. Абкейк (рис. 3.13) и г. Хурайс в Саудовской Аравии показал, что эти ЗРК имеют чрезвычайно низкую эффективность против малоразмерных низколетящих БПЛА [77].



Рис. 3.13. Результаты атаки БПЛА нефтеперерабатывающего завода в г. Абкейк 14 сентября 2019 г., защищаемого ЗРК Patriot PAC-3

Причиной такой низкой эффективности является то, что в военной стратегии США основная задача в обеспечении ПВО возложена на истребители, а ЗРК большой дальности Patriot PAC-3 должны обеспечивать защиту от вражеских бомбардировщиков и от оперативно-тактических ракет. В то же время характеристики РЛС данного ЗРК не позволяют с высокой достоверностью обна-

руживать и брать на сопровождение малоразмерные БПЛА на высокой дальности. Кроме того, применение по рассредоточенной «стай» БПЛА довольно дорогостоящих ЗУР MIM-104 является нецелесообразным и неэффективным.

Что касается перспективного американского ЗАК Centurion C-RAM, то в настоящее время достоверная информация об эффективности перехвата ЗАК Centurion C-RAM воздушных целей, подобных БПЛА, отсутствует, а имеющаяся информация о боевом применении этих ЗАК является противоречивой.

В ноябре 2004 г., комплексы Centurion C-RAM прошли цикл испытаний на полигоне Юма (шт. Аризона, США). В ходе тестовых стрельб, проводимых днём и ночью, было установлено, что данный ЗАК способен перехватывать одиночные 81-120 мм миномётные мины. Наибольшая эффективность достигалась, когда по одной цели вели огонь несколько артиллерийских установок. При этом, один ЗАК способен прикрыть территорию площадью 1,3 км². На боевое дежурство первые ЗАК Centurion C-RAM поступили в Ираке летом 2005 г. для защиты «зелёной зоны» в г. Багдад общей площадью около 10 км², территории в районе международного аэропорта, известной как «Camp Victory», авиабазы Балад и британских стационарных объектов в южном Ираке. Представитель корпорации Raytheon заявил, что в период боевой эксплуатации ЗАК их огнём было уничтожено 105 баллистических целей и примерно 2/3 из них – это миномётные мины. Однако в средствах массовой информации (СМИ) имелась информация, что Centurion C-RAM смогли сбить немногим более 30% целей, при том, что огонь зачастую велся по одиночным минам и 107-122-мм реактивным снарядам одновременно 2-3 артиллерийскими установками. Отразить одновременный удар 120-мм миномётной батареи или боевой машины БМ-21 с 40 направляющими ЗАК Centurion C-RAM не имел никакой возможности. Так в Афганистане был случай, когда ввиду несогласованных действий оператора РЛС дальнего обнаружения и офицера управления, а также неверной оценки ситуации, до дежурного расчёта ЗАК Centurion C-RAM не была доведена информация об обстреле 122-мм реактивными снарядами установки «Град», запущенными талибами с кустарных пусковых установок. В результате падения двух снарядов на территории, контролируемой ВС США, имелись убитые и раненые [104].

В 2019 г. в вооруженном конфликте в Ливии силы маршала Х. Хафтара активно применяли китайские БПЛА Wing Loong I/II (рис. 3.14) против вооруженных сил ПНС. Дальность действия этих БПЛА составляет до 1500 км, высота – до 9 км. Управление БПЛА сил маршала Х. Хафтара осуществлялось через ССС Объединенных Арабских Эмиратов (ОАЭ). БПЛА Wing Loong II могут нести на подвеске до 12 бомб и ракет общей массой до 480 кг, включая китайские «Jdam» Fei-Teng (FT), в частности, FT-7 с дальностью пуска до 90 км, а также противотанковые ракеты LJ-7. Кроме того, оглашались планы оснастить БПЛА Wing Loong II ракетами «воздух-воздух». Эти БПЛА активно применялись для огневой поддержки сухопутных войск работая с максимально возможных высот, недоступных для средств ПВО вооруженных сил ПНС Ливии, поэтому с 2016 г. по 2019 г. были сбиты только 2 таких БПЛА. Наиболее успеш-

ной операцией БПЛА Wing Loong II стало уничтожение ангаров с турецкими БПЛА летом 2019 г. [289].



Рис. 3.14. БПЛА Wing Loong I

Ситуация изменилось, только когда в вооружённые силы ПНС Ливии были поставлены ЗРК Hisar и Hawk, ЗСУ Korkut, а также и комплексы РЭП Koral турецкого производства. Эти комплексы были объединены в единую систему ПВО, при этом, по информации СМИ, ЗРК Hisar были доработаны с целью повышения их эффективности именно против БПЛА за счет установки на них лазерных генераторов и средств РЭП. Возможности системы по обнаружению БПЛА были дополнительно повышены путем информационной интеграции системы ПВО с самолетом E-7 – новейшим комплексом дальнего радиолокационного обнаружения и управления, оборудованного РЛС с АФАР и способного обнаруживать и сопровождать до 180 воздушных целей на дальности до 370 км. Только создание такой системы ПВО, интегрированной как по возможностям обнаружения, так и по возможностям поражения, позволило успешно противодействовать ударным БПЛА сил маршала Х. Хафтара. В результате силам ПВО ПНС Ливии удалось в короткие сроки сбить 2 БПЛА Wing Loong I и 4 БПЛА Wing Loong II [289].

По состоянию на сентябрь 2020 г. БПЛА Wing Loong I/II продолжают активно использоваться силами маршала Х. Хафтара для огневой поддержки действий сухопутных войск. Однако, развернутая система ПВО ПНС Ливии, фактически создала бесполетную зону, прикрывающую наиболее важные объекты на территории, контролируемой ПНС, и закрыла туда доступ для БПЛА противника [289]. Информация о случаях массированного использования групп БПЛА Wing Loong II для преодоления зоны ПВО ПНС Ливии и поражении ее элементов (ЗРК, САУ, комплексов РЭП), по аналогии с успешными действиями турецких БПЛА Bayraktar TB2 против ЗРПК «Панцирь-С1» в Сирии и Ливии, – отсутствует [289].

3.3. Анализ основных причин низкой эффективности средств ПВО против БПЛА

3.3.1. Анализ стандартной номенклатуры целей средств ПВО

Причины низкой эффективности средств ПВО против отдельных типов БПЛА, с развернутым теоретическим обоснованием, подробно разобраны в работе [21].

Как показано в работе [21] к настоящему времени сформировались следующие группы СВН, являющиеся воздушными целями для средств ПВО (рис. 3.15):

- 1) ударные, ударно-транспортные вертолёты, конвертопланы и БПЛА с вертолётным принципом полёта со скоростями 0-200 км/ч на высотах 0-4 км;
- 2) разведывательные, разведывательно-ударные БПЛА, БПЛА – постановщики помех, БПЛА – ретрансляторы связи, а также БПЛА другого функционального назначения со скоростями полёта 120-800 км/ч в диапазоне высот от 50 м до 3,5-7 км;
- 3) ударная авиация: штурмовики, фронтовые бомбардировщики, самолёты-разведчики и ударные БПЛА со скоростями полёта 400-800 км/ч на высотах от 50 м до 8-10 км;
- 4) перспективные многофункциональные боевые самолёты (5-го и последующих поколений) со сверхзвуковыми крейсерскими скоростями полёта. Эта номенклатура воздушных целей летает на скоростях 600-1800 км/ч и использует высоты от 50 м до 11-12 км;
- 5) самолёты – перехватчики ПВО, летающие на скоростях 1600-2600 км/ч в диапазоне высот 8-25 км;
- 6) сверхзвуковые крылатые ракеты, планирующие и кассетные авиабомбы, сбрасываемые в диапазоне скоростей 600-800 км/ч с высот 6-12 км и приходящие в зону наземной цели со скоростями 0,8-1 км/с;
- 7) дозвуковые крылатые ракеты большой дальности, со скоростью полета 600-850 км/ч в диапазоне высот от 50 м до 1 км;
- 8) пилотируемые ЛА и БПЛА оперативной и стратегической разведки типа МиГ-25Р, SR-71, GTD-21, перспективные СВН (гиперзвуковые БПЛА) и боевые блоки баллистических и оперативно-тактических ракет. Эта группа воздушных целей в силу значительных технических и материальных трудностей массового применения (за исключением боевых блоков баллистических и оперативно-тактических ракет) отличается низким номенклатурным насыщением, но при этом занимает достаточно обширный диапазон высот и скоростей – скорости от 2500-7000 км/ч (у земной поверхности) и высоты от 10 км до 30-40 км.

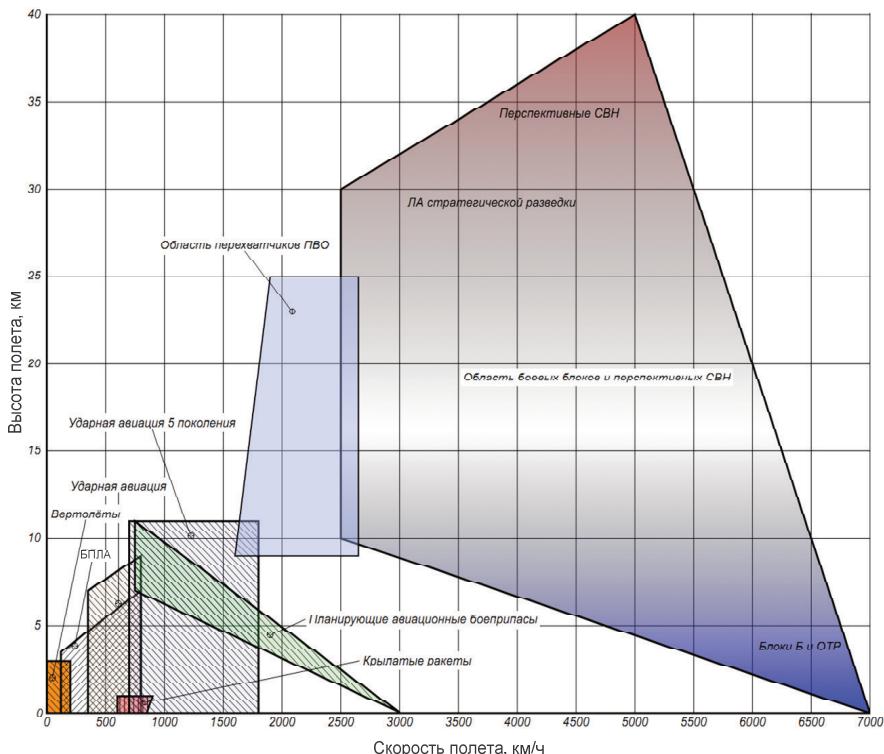


Рис. 3.15. Группы воздушных целей для средств ПВО [21]

Как видно на рис. 3.15 функциональные зоны СВН, различающихся по принципу применения, перекрываются как по высоте, так и по скорости до скоростей полета ≈ 1800 км/ч. Соответственно, наибольшая плотность образцов СВН приходится именно на эту зону и именно эта группа СВН представляет наибольшую трудность для противодействия средствам ПВО. БПЛА постепенно развиваясь занимают все зоны, ранее принадлежавшие пилотируемой авиации, до скоростей 1000 км/ч и в ближайшей перспективе уже претендуют на зону, относящуюся к авиации 5-го поколения.

Учитывая широкую номенклатуру БПЛА, существенно отличающихся по скорости полета и массогабаритным параметрам, можно утверждать, что они являются достаточно сложной целью для существующих и перспективных ЗРК ПВО. Это определяется тем, что [21]:

- до недавнего времени БПЛА различного назначения со стартовой массой до 300-400 кг вообще не входили в номенклатуру целей ЗРК ПВО;
- малые скорости полета БПЛА (до 10-30 м/с) не обеспечивают их надежный захват, селекцию и сопровождение современными РЛС, входящими в состав ЗРК;

- малоразмерные БПЛА имеют низкие значения тепловых и радиолокационных сигнатур (ЭПР 0,001-0,1 м²) и в этом же направлении идет развитие и усовершенствование БПЛА близких по своим характеристикам к пилотируемым ЛА;
- средства поражения современных и перспективных сухопутных (морских) и авиационных комплексов ПВО не позволяют обеспечивать гарантированное поражение БПЛА, особенно малоскоростных и малоразмерных;
- применение групп («стай», «роев») БПЛА одновременно и с различных направлений существенно снижает эффективность современных ЗРК;
- разработка теоретических основ и научных методов эффективного противодействия применению именно БПЛА в мирное время и в условиях городской инфраструктуры, а также борьбы с ними в военное время до сих пор не получила масштабного развития.

3.3.2. Анализ экономической целесообразности применения средств поражения комплексов ПВО против БПЛА

Критерием экономической целесообразности применения средства поражения ЗРК по воздушной цели типа БПЛА является соотношение стоимостей:

$$C_{\text{БПЛА}} + C_{\text{ущ}} \geq C_{\text{пор}},$$

где: $C_{\text{БПЛА}}$ – стоимость БПЛА и расходов на его эксплуатацию в процессе выполнения боевой задачи; $C_{\text{ущ}}$ – суммарная стоимость наносимого БПЛА ущерба; $C_{\text{пор}}$ – суммарная стоимость средств поражения, расходуемых комплексом ПВО, необходимых для поражения БПЛА с требуемой вероятностью $P_{\text{пор}}^{\text{треб}}$.

Если средством ПВО используются однотипные средства поражения (зенитно-управляемые ракеты, артиллерийские снаряды и т.д.), каждое из которых имеет стоимость C_1 и поражает БПЛА с вероятностью $P_{\text{пор}1}$, то для гарантированного поражения БПЛА с вероятностью $P_{\text{пор}}^{\text{треб}}$ требуется выполнить условие:

$$P_{\text{обн}} P_{\text{зап}} \left(1 - \left(1 - P_{\text{пор}1}\right)^{N_{\text{пор}}}\right) \geq P_{\text{пор}}^{\text{треб}},$$

где: $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения БПЛА средствами обнаружения комплекса ПВО; $P_{\text{зап}}$ – вероятность своевременного запуска средств поражения по БПЛА; $P_{\text{пор}1}$ – вероятность попадания средства поражения в сферу с радиусом r , в которой укладывается не менее 50% поражающих элементов, имеющих кинетическую энергию достаточную для нанесения критических повреждений БПЛА; $N_{\text{пор}}$ – количество средств поражения, необходимое для поражения БПЛА.

Откуда:

$$N_{\text{пор}} = \left\lceil \log_{\left(1-P_{\text{пор}1}\right)} \left(1 - \frac{P_{\text{пор}}^{\text{треб}}}{P_{\text{обн}} P_{\text{зап}}}\right) \right\rceil,$$

где: $\lceil \bullet \rceil$ – функция округления до наибольшего целого.

Учитывая вышеуказанное, суммарная стоимость средств поражения $C_{\text{пор}}$, расходуемых в интересах поражения одного БПЛА, будет равна:

$$C_{\text{пор}} = N_{\text{пор}} C_1.$$

Как видно из вышеуказанных функциональных зависимостей, процесс поражения БПЛА существенно зависит не только от стоимостных и вероятностно-боевых показателей средств поражения ЗРК, но и от характеристик комплекса ПВО в части своевременного обнаружения БПЛА, а соответственно – от своевременности применения средств поражения.

3.3.3. Анализ средств поражения комплексов ПВО

Основными средствами ПВО, используемыми для противодействия БПЛА, являются [21]:

- ЗРК средней дальности с дальностью перехвата до 100 км;
- ЗРК малой дальности с дальностью перехвата до 30 км;
- ЗРК ближнего действия с дальностью перехвата до 10 км;
- ЗРПК с дальностью перехвата до 10 км;
- ЗРПК с оптической станцией наведения с дальностью перехвата до 5 км;
- ПЗРК с дальностью перехвата до 7 км;
- ЗСАУ с дальностью перехвата до 2 км;
- ЗАУ с дальностью перехвата до 1,5 км;
- ЗПУ с дальностью перехвата до 1,5 км.

При этом, очевидно, что для каждого средства ПВО имеется своя цель.

Далее будут подробно рассмотрены особенности применения против БПЛА основных средств огневого поражения ПВО – зенитной артиллерии и управляемых ракет.

3.3.3.1. Артиллерийские средства поражения БПЛА

Рассмотрим вариант применения против БПЛА средств артиллерийского вооружения – ЗАУ и ЗПУ. Данные средства, в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные для борьбы с малогабаритными БПЛА, а также как средства перекрытия «мертвой зоны» ракетного вооружения ЗРК ПВО.

Правило знаков и определение промаха снаряда D_p при прохождении окрестности БПЛА показано на рис. 3.16. Исходя из конструктивных особенностей БПЛА можно выделить две зоны поражения, попадание снаряда в которые приводит к различным последствиям [21].

Первая зона – область гарантированного поражения. Это область, попадание снаряда в которую приводит к неизбежному разрушению конструкции БПЛА. Например, для многодвигательного БПЛА со взлётной массой 100-150 кг диаметр этой зоны составляет 0,95 м [21].

Вторая зона – область возможного поражения, которая обусловлена низкой конструктивной плотностью БПЛА, что существенно снижает вероятность попадания снаряда в какой-либо значимый элемент конструкции с последующим его разрушением.

При этом, надо иметь ввиду что разрушение периферийного элемента конструкции может привести к нарушению его целостности и потере функциональной работоспособности, но не всегда может привести к такому же эффекту для всего БПЛА. Например, поражение лопасти и её разрушение одного из воз-

душных винтов малого БПЛА (количество воздушных винтов – не менее 4) приведёт к полной утрате функциональной работоспособности одного винта, а для всего БПЛА это приведёт лишь к снижению его эксплуатационных возможностей [21].

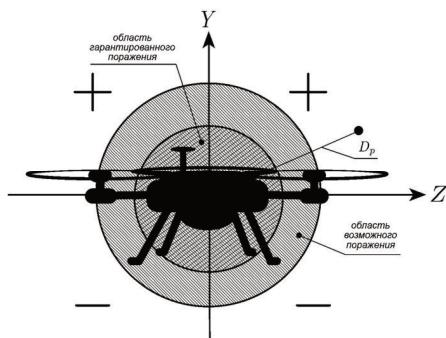


Рис. 3.16. К определению величины промаха снаряда и зон поражения [21]

Вероятность поражения БПЛА $P_{\text{пор}}$ артиллерийскими снарядами можно оценить в соответствии с выражением [51]:

$$P_{\text{пор}} = 1 - (1 - P_{\text{пор}1})^N,$$

где: $P_{\text{пор}}$ – вероятность попадания снаряда в область гарантированного поражения БПЛА; $P_{\text{пор}1}$ – вероятность поражения БПЛА одним снарядом; N – количество снарядов, выпущенных по БПЛА.

При этом, как показано в работе [51], вероятность поражения БПЛА для отечественных ЗАК и ЗРПК составляет $P_{\text{пор}} = 0,6 \dots 0,9$, для случаев, когда БПЛА с ЭПР не менее $0,5 \text{ м}^2$ оказывается в зоне поражения соответствующих комплексов.

На рис. 3.17 показаны результаты численного эксперимента из работы [21], по оценке величин промахов снарядов для различных дальностей стрельбы и скорости V_u полёта малого БПЛА. По оси абсцисс отложено время прохождения минимального значения D_p с начала стрельбы. По оси ординат отложены значения промахов D_p с учётом выбранного правила знаков.

Из результатов модельных исследований, представленных на рис. 3.17, следуют следующие выводы [21]:

- стрельба по многодвигательным малым БПЛА с малых дистанций более эффективна при их малых или околонулевых скоростях полёта;
- применение ЗАУ (ЗПУ) не может быть эффективным при стрельбе по малогабаритным БПЛА в любых условиях;
- точность прицеливания оказывает определяющее значение для эффективности стрельбы.

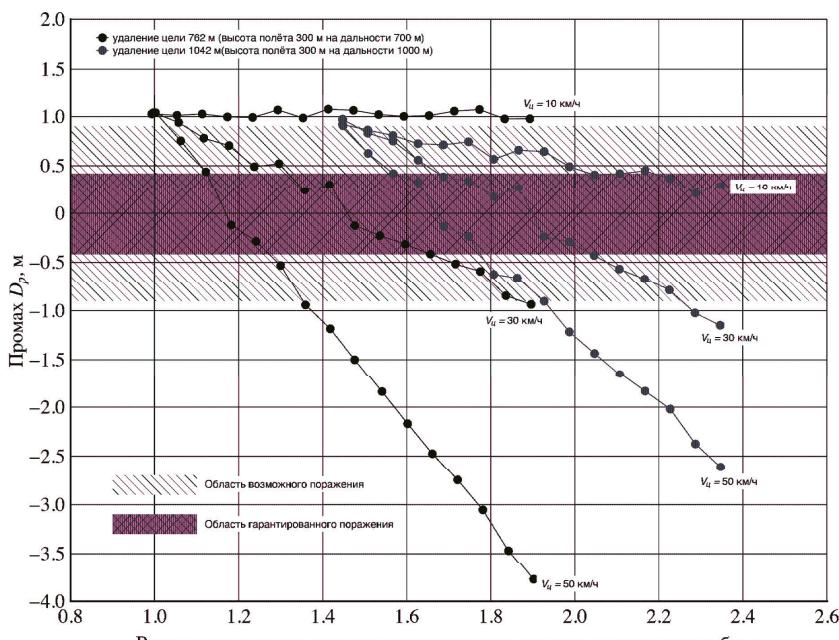


Рис. 3.17. Промахи снарядов в очереди из 16 снарядов для условий точного прицеливания с упреждением [21]

Таким образом, можно сделать вывод, что для повышения эффективности поражения БПЛА артиллерийским вооружением требуется использование инструментальных средств наведения и автоматического вычисления углов упреждения.

3.3.3.2. Ракетные средства поражения БПЛА

Оценка поражаемости БПЛА управляемым ракетным вооружением осуществлялась путём моделирования системы «ракета ПЗРК – воздушная цель». Ракеты ПЗРК были выбраны, т.к. именно они являются основным средством поражения против наиболее сложных целей – малогабаритных и маневренных БПЛА, как в составе ЗРК «Стрела» и «M1097 Avenger», так и самостоятельно. При этом моделировалось движение ракеты как твёрдого тела с учётом изменения во времени массы, экваториального момента инерции и тяги порохового двигателя.

Рассматриваемые типы ракеты ПЗРК представлены в таблице 3.1 [21, 106]. В качестве модельного образца использовалась гипотетическая ракета ПЗРК с усреднёнными характеристиками – таблица 3.2 [21].

Таблица 3.1 – Основные ТТХ ракет ПЗРК [21, 106]

Наименование	Наведение	Высота, км	Скорость, м/с	Дальность D , км
Javelin	ПА РК	0,01-3	578,5	0,3-5,5
Starburst	ПА РК	0,01-4	850	0,4-6
Starstreak	ПА ЛК	0,01-5	857	0,3-6
Стрела-2М	ИК, ФК	0,01-2,3	630	0,8-4,2
Стрела-2М	ИК, ФК	0,01-2,3	630	0,8-4,2
Стрела-3	ИК, ФК	0,015-3	470	0,5-4,5
Стрела-3	ИК, ФК	0,01-3,5	570	0,5-5
RBS-70	ПА ЛК	0,01-3	525	0,2-5

Таблица 3.2 – Основные ТТХ модельной ракеты ПЗРК [21]

Характеристика	Значение
Стартовая масса	12 кг
Начальная скорость полёта	28 м/с
Максимальная скорость полёта	600 м/с
Продолжительность полёта до самоликвидации	14 с
Дальность стрельбы	0,2-4 км
Высота полёта цели	0,2-3 км
Способ наведения	пропорц.
Тип ГСН	А, ИК, ФК
Максимальная поперечная перегрузка	24
Угол поля зрения ГСН	20°

Моделирование осуществлялось при следующих допущениях [21]:

- ветер отсутствует;
- характеристики ГСН идеальны и постоянны;
- атмосфера прозрачна, метеорологическая дальность видимости более 20 км;
- тяга двигателя постоянна от старта до самоликвидации;
- БПЛА движется с постоянной скоростью по заданной траектории.

Рассматривается задача построения траектории движения ракеты ПЗРК и принятых допущений для достижения критерия поражения БПЛА – промаха ракеты $D_p > 0,5$ м (см. рис. 3.16).

Оценка вероятности перехвата ракетой БПЛА по его тепловому следу не рассматривалась т.к. общий тепловой поток выхлопной системы через входной патрубок выхлопной системы диаметром 0,05 м составляет до 2 кВт/с, а через выхлопной коллектор специальной конструкции производится понижение до уровня 0,0029 кВт/ср. Потребное угловое разрешение оптико-электронных средств наведения ПЗРК для обнаружения малого БПЛА и последующего его сопровождения на дальности 3000 м должно быть не хуже 0,009° [21].

На рис. 3.18 показаны, в качестве примера, результаты моделирования движения ракеты ПЗРК при перехвате малогабаритного многодвижительного БПЛА [21]. Чёрным цветом показана траектория движения ракеты при точном определении координат БПЛА в момент пуска. Синим цветом – траектория ракеты при старте с начальной ошибкой наведения.

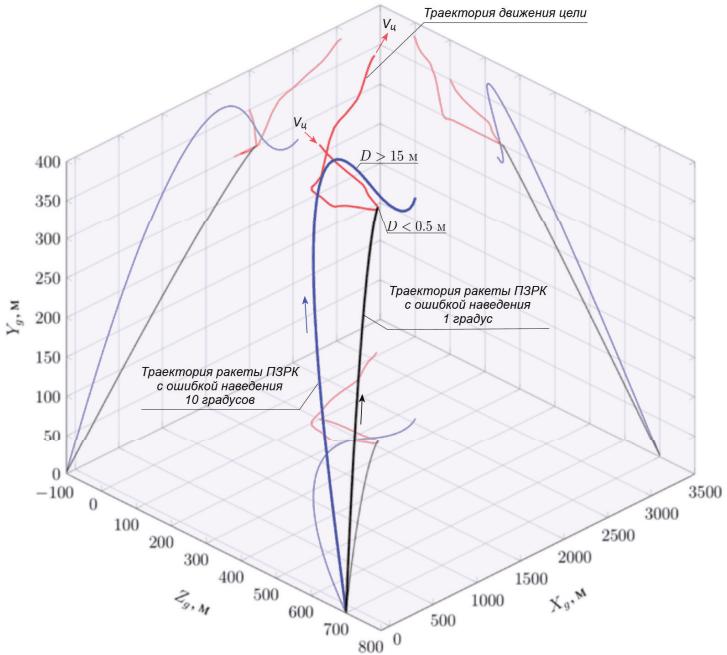


Рис. 3.18. Траектории ракеты ПЗРК и БПЛА при различных условиях [21]

Из рис. 3.18 видно, что высокая скорость полёты ракеты ПЗРК, даже при высокой располагаемой поперечной перегрузке, не позволяет исправить ошибку наведения, и ракета проходит на дистанции, которая не позволяет поразить цель [107]. При этом следует учитывать, что БПЛА на малых дальностях от ракеты может «выпасть» из поля захвата ГСН ракеты [108].

На рис. 3.19 показаны расчётные данные из результатов исследований по оценке эффективности использования штатных средств ПВО для поражения одиночной воздушной цели типа «БПЛА-квадрокоптер» одной очередью из ствольного оружия или одной ракетой для ПЗРК и ЗРК с учетом влияния маневрирования БПЛА. Под поражением здесь понимается событие, при котором БПЛА в результате внешнего воздействия лишается возможности продолжать полёт. Исследования проводились для условий отсутствия помех и вероятности обнаружения цели $P_{\text{обн}} = 1$. При этом тепловыделение цели отсутствует.

Несмотря на то, что приведенные на рис. 3.19 данные относятся к одному типу цели и предполагают достаточно идеальные условия, для БПЛА самолётного и вертолетного типа уровень эффективности штатных средств ЗРК ПВО не будет сильно отличаться. Наличие теплового следа для ракет ПЗРК позволяет несколько повысить вероятность поражения воздушной цели, однако её интенсивное маневрирование может свести «на нет» возможность использования фактора заметности [21].

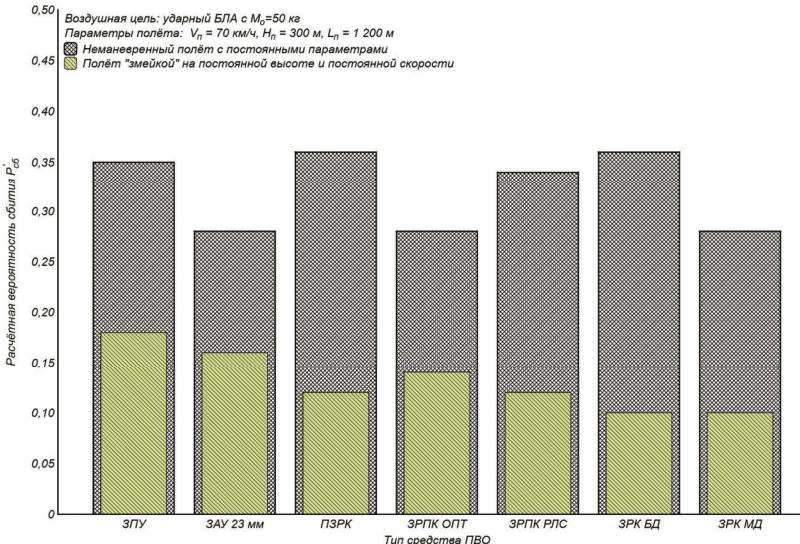


Рис. 3.19. Расчётные вероятности поражения цели типа «БПЛА-квадрокоптер» штатными средствами современной ПВО [21]

Обобщая вышеуказанное, можно сделать выводы, что основными причинами низкой эффективности средств ПВО при стрельбе по БПЛА являются [21]:

- для зенитных ракет: высокая скорость полёта средства поражения и невозможность управления ею при наведении на БПЛА;
- для зенитной артиллерии: низкая плотность средств поражения (снарядов, пуль) в объёме пространства, внутри которого находится БПЛА из-за рассеивания, обусловленного колебаниями ствола, платформы, на которой установлена установка, и зависимостью внутренней баллистики от состояния и температуры ствола.

В последнее время появляются разработки средств поражения с дробовым зарядом, размещаемым в снаряде, в котором момент подрыва программируется во время выстрела [109-112]. Анализ и исследования эффективности использования этих средств ПВО против БПЛА [21] показали, что особого эффекта вряд ли удастся достичь ввиду невозможности устранить вышеуказанные особенности, присущие ствольной артиллерией.

3.3.4. Анализ эффективности комплексов ПВО в условиях групповой атаки БПЛА

Для комплексов ПВО важно обеспечить надёжную защиту прикрываемого объекта путём минимизации количества СВН, в том числе и БПЛА, достигающих рубежа гарантированного нанесения ущерба прикрываемому объекту. С этой точки зрения групповое применение БПЛА представляет собой высоко-

эффективный способ преодоления зоны ПВО, и в настоящее время групповое применение БПЛА в виде «стай» или «рёб» является активно развивающимся направлением исследований [113-117]. При этом групповое применение БПЛА может применяться не только в интересах поражения прикрываемого объекта или самого комплекса ПВО (разведывательно-ударные «БПЛА-камикадзе»), но также и в интересах исчерпания ресурса системы ПВО, перед основным ударом.

Так один из первых эпизодов боевого применения БПЛА относится к 1982 г., когда Израиль использовал налет БПЛА для вскрытия системы ПВО Сирии, по которой второй волной был нанесен удар с использованием противорадиолокационных ракет и крылатых ракет ВТО, запускаемых с пилотируемых самолетов израильских BBC. В частности, в составе боевых средств ПВО Сирии находились самоходные ЗРК «Куб» и «Оса-АК». Как сообщается, против сирийских комплексов «Оса-АК», дислоцированных в Южном Ливане, Израиль применял, наряду со средствами РЭП, разнообразные тактические приемы, направленные на снижение боеспособности этого ЗРК, в частности, массовый пуск БПЛА, с прикрепленными уголковыми отражателями, за счет чего достигался эффект имитации ими боевых самолетов, с последующей атакой фронтовой авиации на позиции ЗРК уже израсходовавших свой боекомплект [45].

Из недавних случаев группового применения БПЛА отметим атаку террористами пункта материально-технического обеспечения российского ВМФ в г. Тартусе и авиабазы «Хмеймим» в Сирии в январе 2018 г. [78], атаку в сентябре 2019 г. нефтеперерабатывающих заводов в г. Абкейк и в г. Хурайс в Саудовской Аравии [77], атаку ЗРПК «Панцры-С1» в военном конфликте в Сирии и Ливии [289], а также атаку ЗРК «Оса» и «Стрела-10» в военном конфликте в Нагорном Карабахе [290, 292, 293].

Рассмотрим условную задачу отражения налёта группы БПЛА на прикрываемый ЗРПК объект. При этом, прикрываемый объект представляет собой участок местности, в центре которой находится ЗРПК. Задачей ЗРПК является поражение всех БПЛА, стремящихся войти в зону ответственности с радиусом 2 км (см. рис. 3.20), для применения своих средств поражения.

Моделирование данной тактической задачи представлено в работе [21], а результаты моделирования – на рис. 3.20.

На удалении 25 км от ЗРПК располагается 10 км зона (светло-зелёное кольцо) из которой одновременно стартует неупорядоченная однородная группа БПЛА. Каждый БПЛА имеет свой номер. Полёт каждого БПЛА осуществляется автономно в секторе 90° и не синхронизируется с другими членами группы. Рассматриваются БПЛА самолётного типа со стартовой массой 10 кг. Дальность обнаружения БПЛА с помощью средств оптико-электронной разведки (ОЭР) и РЛС, входящих в состав ЗРПК, в зависимости от высоты полёта составляет 1,5-2,5 км. Таким образом, наряд воздушных целей составлял 15 единиц, летящих со скоростями от 100 до 300 км/ч на высотах 200-800 м [21].

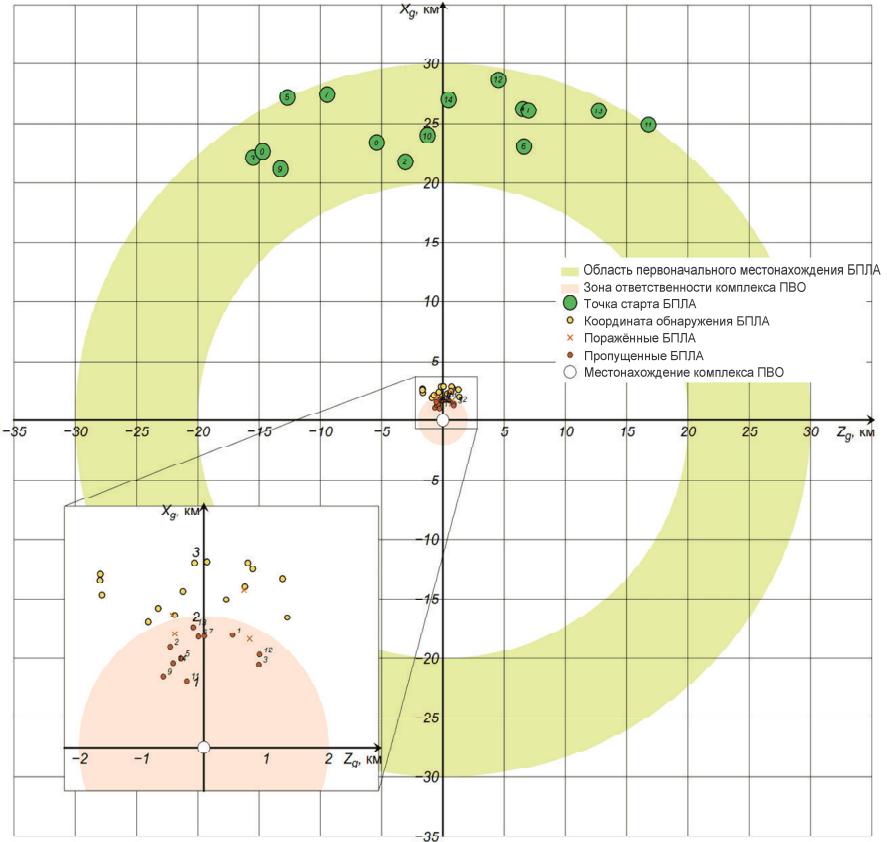


Рис. 3.20. Результаты моделирования налета группы БПЛА на ЗРПК [21]

Среднее значение вероятности поражения одиночной воздушной цели огневыми средствами ЗРПК $P_{\text{пор}} \approx 0,26$. Запас средств поражения ЗРПК составляет 16 единиц: 16 очередей по 100 снарядов или 16 зенитных ракет или их сочетания в разном соотношении. Приоритетность цели p определялось по критерию минимально располагаемого времени t для применения средств поражения ЗРПК [21]:

$$p = \min \left\{ t_i \left| t_i = \frac{D_i \cos \varphi_i}{V_i \cos \Theta_i \cos \psi_i} + \frac{\delta_i}{\omega_{\text{пов}}} \right. \right\},$$

где: D_i – наклонная дальность до i -го БПЛА; φ_i – угол места i -го БПЛА; V_i – скорость полёта i -го БПЛА; Θ_i – угол наклона траектории движения i -го БПЛА; ψ_i – относительный курс полёта i -го БПЛА; δ_i – угол рассогласования оси направленности средства поражения ЗРПК и азимута i -го БПЛА; $\omega_{\text{пов}}$ – угловая скорость поворота оси направленности средства поражения ЗРПК; i – номер БПЛА; p – приоритет воздействия по БПЛА.

Результаты ранжирования БПЛА по критерию приоритетности показаны на рис. 3.21, а на рис. 3.22 – потребные углыворота осей направленности средств поражения ЗРПК (стволов зенитных пушек или направляющих зенитных ракет) для стрельбы по БПЛА.

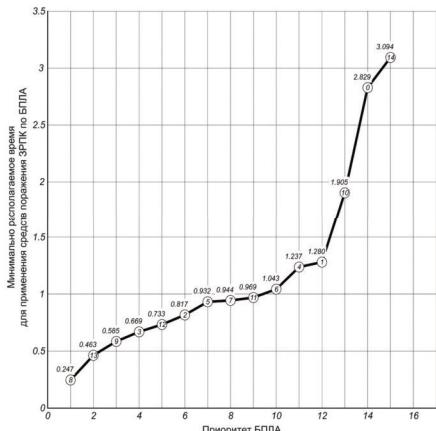


Рис. 3.21. Результаты распределения приоритетности целей в группе БПЛА [21]

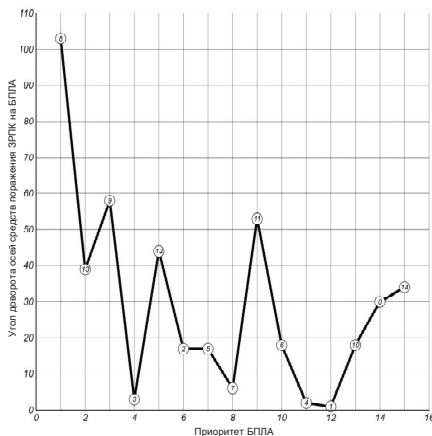


Рис. 3.22. Результаты определения угловворота осей средств поражения ЗРПК на БПЛА по их приоритетам [21]

Физическое время моделируемого налёта группы БПЛА на прикрываемый объект составило 10 мин.

В результате моделирования можно сделать следующие выводы [21]:

- ЗРПК не обеспечил прикрытие объекта: 10 из 15 БПЛА вошли в зону ответственности ЗРПК и смогли применить свои средства поражения;
- большие углыворота осей средств поражения ЗРПК на первые 10 БПЛА (рис. 3.22) привели к физической невозможности поражения этих целей;
- ЗРПК израсходовал весь свой боезапас, не выполнив поставленную задачу по прикрытию объекта.

Основной вывод – применение нескольких эшелонов налётов групп малых и относительно дешёвых БПЛА может парализовать любую ПВО [21].

Приведенные результаты, даже с учётом многих допущений, являются достаточно убедительной демонстрацией того, что групповое применение БПЛА уже сегодня является серьёзным фактором для достижения военного превосходства малыми затратами. Дальнейшее развитие технологии группового применения БПЛА существенно усложняет условия функционирования комплексов ПВО и потребует кардинального пересмотра идеологии создания систем ПВО [21].

При этом недостатком системы управления огнём этих ЗРК «Тор-М1/М2» и ЗРПК «Панцирь-С1/С2» является то, что их ракеты требуют управления на

всём протяжении полёта, а количество одновременно обстреливаемых целей ограничено 3-мя для ЗРПК «Панцирь-С2» и 4-мя для ЗРК «Тор-М2». При этом одновременно обстреливаемые цели должны находиться в зоне обзора РЛС наведения. В результате невозможна одновременная работа по целям, атакующим с разных направлений, а если учесть, что для поражения опасных или сложных целей могут потребоваться одновременно две ЗУР, то ситуация ещё более ухудшается. Данная проблема носит системный характер и увеличение боекомплекта ЗУР не будет являться выходом из ситуации, т.к. интенсивность работы ЗРК по целям все равно будет ограничена небольшим количеством каналов одновременного наведения ЗУР на цель. При этом, как отмечается в работе [119], это еще не учитываются возможности БПЛА нести аппаратуру РЭП и формировать ложные цели. В этом случае, вероятность поражения БПЛА в группе еще более снизится, а расход боеприпасов ЗРК – существенно возрастет.

Обобщая материалы данного подраздела, можно сделать вывод о том, что современные средства ПВО очень слабо приспособлены к борьбе против БПЛА, особенно малоскоростных и малоразмерных, способных осуществлять активное маневрирование и применяемых группами. Для гарантированного противодействия БПЛА требуются другие, интегральные, походы к решению данной проблемы.

3.4. Предложения по повышению эффективности средств ПВО при их применении против БПЛА

Низкие значения показателей эффективности поражения малоразмерных БПЛА средствами ПВО обусловливают необходимость разработки и проведения комплекса специальных мероприятий по организации противодействия БПЛА активными средствами, а именно [44, 49]:

- создание многофункциональной системы ПВО, в том числе, ориентированной на противодействие БПЛА, включающей в себя как разнотипные ЗРК, ЗАК, ЗПРК, ПЗРК, обладающие сравнительно высокими разведывательными и огневыми возможностями при обнаружении и стрельбе по малоразмерным целям, так и другие перспективные средства и способы борьбы с БПЛА;
- модернизацию существующих средств ПВО – ЗРК, ЗРПК и ЗАК, в интересах повышения эффективности борьбы с малоразмерными и малоскоростными воздушными целями;
- применение в составе перспективных образцов вооружения, предназначенных для противодействия БПЛА, средств РЭП, ориентированных на подавление командных радиолиний управления (КРУ) и сигналов, наиболее распространенных спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo и т.д.);
- разработку перспективных образцов вооружения, предназначенных для обнаружения и поражения именно БПЛА;
- выполнение комплекса инженерно-технических мероприятий, направленных на повышение скрытности собственных сил и средств, а также снижение эффективности применения БПЛА.

Рассмотрим эти варианты противодействия БПЛА более подробно, основываясь на материалах работ [49, 99].

3.4.1. Создание многофункциональной системы ПВО, включающей функции противодействия БПЛА

Основы создания такой системы ПВО, интегрированной в комплекс боевых задач, решаемых войсками, представлены в работе [49]. Технический облик единой многофункциональной системы ПВО, в том числе, ориентированной на противодействие БПЛА, представлен в работе [121] – рис. 3.23.

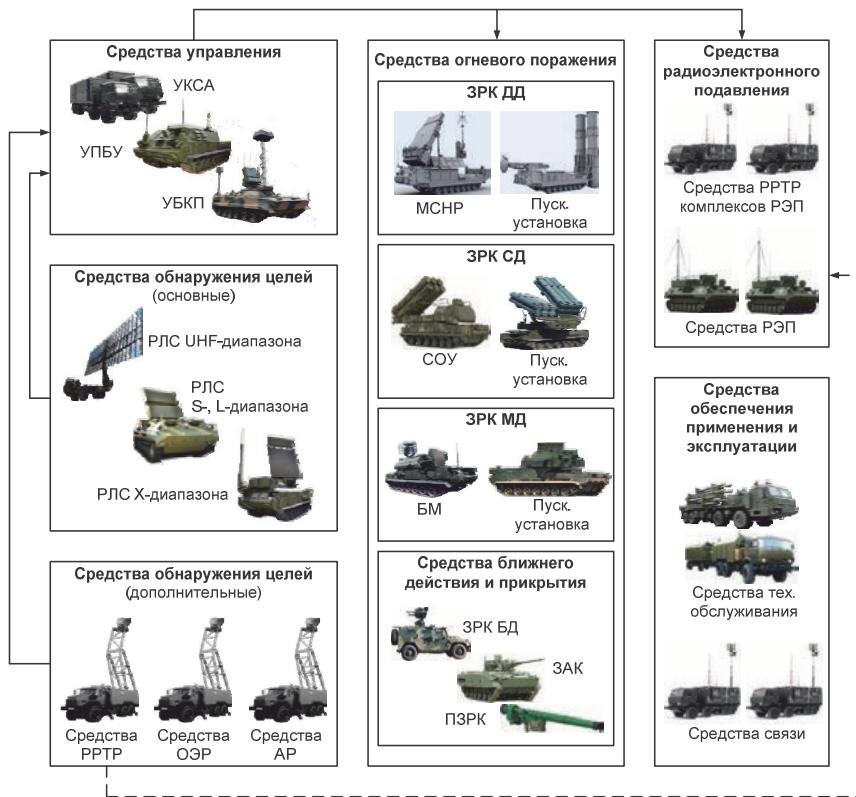


Рис. 3.23. Возможный облик перспективной многофункциональной системы ПВО [121]

Для ведения эффективного противодействия малоразмерным БПЛА необходимо создавать целенаправленную систему противодействия, включающую как «активную» огневую составляющую (поражение БПЛА огнем на земле и в воздухе), так и «пассивную» радиоэлектронную (неогневую) составляющую [49].

Поражение наземной инфраструктуры, предназначенней для подготовки и проведения пусков БПЛА, а также самих образцов БПЛА на площадках их запуска, может осуществляться огнем частей и подразделений ракетных войск и артиллерии, а также ударами тактической и армейской авиации. Так как площадки подготовки и запуска малоразмерных мини-, микро- и нано БПЛА вынуждены развертываться непосредственно в прифронтовой зоне и даже на поле боя, поэтому они могут и должны разведываться и уничтожаться огнем ракетных войск и артиллерии мотострелковых (танковых) бригад из состава группировок войск первого эшелона. Потенциальные дальности досягаемости средств армейской и тактической авиации (ударных вертолетов, штурмовиков, тактических истребителей и фронтовых бомбардировщиков) вполне обеспечивают возможность надежного уничтожения подразделений подготовки и запуска БПЛА на земле со всем имеющимся арсеналом БПЛА еще до начала их боевого применения. Уничтожение БПЛА на площадках базирования также может проводиться разведывательно-диверсионными группами. Крайне важной должна быть агентурная работа по выявлению мест базирования подразделений БПЛА, их боевого и численного состава, планов боевого применения, частотных диапазонов и других технических характеристиках систем наведения и управления БПЛА. Особенная актуальность задачи поражения БПЛА на земле обусловлена тем, что меры по уничтожению БПЛА с чрезвычайно малыми ЭПР в воздухе будут гораздо менее эффективными [49].

Реализация этих задач должна предусматриваться соответствующими планами и являться важной составной частью решения командира на организацию боевых действий. Для эффективного уничтожения и надежного подавления элементов системы боевого применения БПЛА должны выделяться соответствующий ресурс огня ракетных войск и артиллерии, необходимый наряд армейской и тактической авиации, а также требуемое количество диверсионных групп.

Следующим действенным противодействием БПЛА на траекториях их полета должна стать система зенитного ракетного огня, которая может быть эффективной только при проведении ряда специальных мероприятий в интересах повышения эффективности уничтожения малоразмерных малоскоростных воздушных целей. Для успешного уничтожения этих целей в рамках единой системы ПВО должна создаваться едва ли не специальная подсистема борьбы с малоразмерными БПЛА по аналогии с подсистемами борьбы с низколетящими СВН, крылатыми ракетами ВТО и т.п. Естественно, эти подсистемы должны быть структурно и функционально взаимоувязаны в составе единой системы ПВО войсковых формирований [49].

Такая целенаправленная подсистема борьбы с БПЛА должна включать элементы систем разведки и оповещения, управления системами зенитно-ракетного и зенитно-артиллерийского огня, совокупность специализированных зенитных средств со своим ракетно-техническим обеспечением и др.

Эта подсистема должна обеспечивать [49]:

- своевременное оповещение зенитных формирований, других «заинтегрованных» сил и средств о начале действий БПЛА, выдачу точных

- значений координат их полета, обмен разведывательной информацией между силами и средствами противодействия БПЛА;
- эффективное управление огнем зенитных формирований, выделенных для противодействия БПЛА, а также управление действиями других сил и средств, включенных в подсистему борьбы с БПЛА;
 - поражение БПЛА зенитным огнем ЗРК, ЗАК, ПЗРК, ЗПРК в пределах имеющихся разведывательных и огневых возможностей;
 - надежное радиоэлектронное подавление помехами каналов управления полетом БПЛА, передачи и обмена разведывательной информацией и др.

Для обнаружения БПЛА необходимо назначать специализированные средства разведки, обладающие лучшими разведывательными возможностями при работе по целям со сверхмалыми ЭПР, создавать специальные каналы первоочередной передачи и обмена разведывательной информацией о полетах БПЛА. Систему разведки БПЛА должны дополнять силы и средства артиллерийской разведки, а также сеть постов визуального наблюдения, которая достаточно эффективна при обнаружении низколетящих малоразмерных целей. В состав средств визуального наблюдения таких постов необходимо включить широкопанорамные средства ОЭР круглосуточного наблюдения, способные обнаруживать малоразмерные, малоконтрастные цели [49].

Аналогичным требованиям должна соответствовать и система зенитно-ракетного и артиллерийского огня. Она должна быть тщательно спланирована с учетом особенностей рельефа местности и необходимости построения беспровалкой сплошной зоны зенитного огня во всем диапазоне высот и с любых направлений полетов БПЛА [49].

Для этого необходимо [49]:

- спрогнозировать перечень наиболее вероятных маршрутов пролета и районов патрулирования БПЛА, исходя из особенностей построения боевых порядков своих группировок войск и связанных с этим боевых задач БПЛА;
- построить группировку сил и средств ПВО на местности, при этом выбрать наиболее подходящие стартовые и огневые позиции с учетом максимально возможной реализации разведывательных и огневых возможностей зенитных комплексов;
- создать систему эффективного зенитного огня применительно к задаче борьбы с малоразмерными БПЛА;
- обеспечить функционирование системы зенитного огня оперативным управлением, ракетно-техническим обеспечением и т. п.

Для ведения зенитного огня по малоразмерным БПЛА необходимо заблаговременно назначать огневые средства ПВО из числа ЗРК, ПЗРК, ЗАК, ЗПРК, способных эффективно обнаруживать и обстреливать воздушные цели с малыми и сверхмалыми ЭПР. Эти зенитные средства могут объединяться во временные специализированные зенитные ракетно-артиллерийские группы, по-прежнему находясь в составе штатных подразделений и частей ПВО. Отдельные средства в составе таких групп могут действовать на отдельных наиболее

вероятных (опасных) направлениях полетов БПЛА из зasad и в качестве передвижных огневых установок, групп боевых машин или в составе зенитных подразделений. Это позволит достичнуть внезапности применения средств ПВО в целях эффективности поражения малоразмерных БПЛА [49].

В системе огня группировки выделенных средств ПВО должны действовать заранее разработанные указания по ведению огня и взаимодействию при организации борьбы с БПЛА. Эти указания должны определять порядок ведения разведки и обстрела БПЛА, обмена информацией между зенитными средствами о координатах полета БПЛА, результатах боевой работы, способы со-средоточения и рассредоточения огня, назначение расхода ракет (боеприпасов), а также другие вопросы применительно к специфике боевой работы по малоразмерным целям [49].

Следует отметить, что активное поражение БПЛА существующими зенитными средствами возможно лишь с большими ограничениями по обнаружению и обстрелу целей с ЭПР не менее $0,01 \text{ м}^2$. Эффективная боевая работа по целям с меньшими ЭПР современными зенитными комплексами практически невозможна ввиду упомянутых выше ограничений. Для повышения эффективности поражения малоразмерных БПЛА зенитным огнем необходима разработка специализированных систем зенитного оружия, в том числе – основанного на новых физических принципах [49].

3.4.2. Модернизация существующих средств ПВО

Модернизация существующих средств ПВО (например, таких как ЗРК «Тор», «Стрела-10М3», ЗРПК «Панцирь-С1»), потребует существенной доработки РЛС обнаружения, а также БЧ ЗУР и артиллерийских снарядов в части увеличения площади и плотности осколочного поля.

В большинстве случаев, повышение вероятности обнаружения малоразмерных целей РЛС в комплексах ПВО, обеспечивается за счет модернизации программного обеспечения, в частности – путем снижения скоростного порога алгоритма СДЦ. При применении такого способа «доработки» с высокой степенью вероятности РЛС комплекса будет формировать большое количество ложных целей, вызванных переотражением импульсов РЛС от неподвижных и квазинеподвижных объектов – зданий, поверхности ландшафта, больших птиц и т.д.

Для решения задачи обнаружения малоразмерной цели в РЛС необходимо выполнить целый ряд противоречивых требований, а именно обеспечить [44]:

- широкий динамический диапазон приемных трактов (для отсутствия перегрузок в принимаемых сигналах);
- высокую чувствительность приемного тракта;
- высокую пространственную разрешающую способность;
- крайне низкий уровень боковых лепестков функции селекции;
- высокий темп обзора пространства;
- значительный уровень подавления фоновых отражений от зданий и поверхности.

При этом, нужно отметить, что два последних требования противоречат друг другу (требование высокого темпа обзора ограничивает время накопления сигнала). Без эффективной селекции фоновых отражений в традиционных алгоритмах обнаружения цели необходимо повышать уровень порогов обнаружения, что снижает вероятность обнаружения малоразмерных целей [81].

Другим способом повысить вероятность обнаружения малоразмерных БПЛА на приемлемой для ЗРК дальности является размещение существующих РЛС на летно-подъемных средствах – аэростатах, дирижаблях и даже БПЛА в составе ЗРК. Расчеты, представленные в работе [120] показывают, что минимальная высота размещения РЛС, для обнаружения низколетящих целей типа БПЛА (на высоте 50 м) на дальности, приемлемой для их своевременного обнаружения, для ЗРК малой дальности составит около 200 м, для ЗРК средней дальности – около 700 м.

Успешное повышение эффективности РЛС существующих комплексов ПВО по вышеуказанным направлениям теоретически возможно, пусть и со значительными финансовыми затратами, но увеличение плотности осколочного поля существующих ЗУР существенно снизит энергетику поражающих элементов, что, в свою очередь, снизит эффективность поражения крупноразмерных целей (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты) [44].

Применение смешанного боекомплекта, состоящего из разных типов ЗУР (штатных и измененных под задачи борьбы с малоразмерными БПЛА) снизит эффективность отражения комплексом ПВО массированных налетов средств воздушного нападения одного типа (крупная цель или малоразмерная цель). Также следует добавить, что себестоимость изготовления ЗУР с боевой частью, адаптированной под задачи борьбы с малоразмерными БПЛА может быть существенно дороже, чем сам БПЛА [44].

В работах [49, 119] предлагается адаптировать устаревшие образцы ЗАК и зенитных установок (ЗУ), например, таких как С-60, ЗУ-23-2 и КС-19, к борьбе с БПЛА за счет оснащения их современными средствами разведки, точного целеуказания, автоматизированного управления процессами подготовки и ведения стрельбы, более мощными боеприпасами с программируемым в процессе выстрела временем подрыва, адаптивной к параметрам движения цели областью разлета поражающих элементов и т.д. Современные достижения в микроЭлектронике позволяют реализовать управление темпом стрельбы вышеуказанных ЗАК и ЗУ по мере приближения воздушной цели к зенитному комплексу. На обновленные средствами разведки целей и автоматизации процессов подготовки и ведения стрельбы ЗАК и ЗУ могут устанавливаться ЗУР. Для этого на комплексах могут монтироваться ПЗРК «Игла-С», которые будут подключены к общей системе разведки и управления огнем [49].

Весьма перспективной является идея включения в состав ЗРК, оснащенных ЗУР с тепловыми ГСН, маломощных лазеров (до 1 кВт) для повышения ИК-сигнатуры малоразмерных БПЛА, то есть для их «подогрева» с целью повышения эффективности наведения ЗУР на них. Лазерные дальномеры-целеуказатели могут найти применение в автоматизированных системах обнаружения малоразмерных целей и наведения на них ЗУР. Для работы по мало-

размерным целям требуется постановка на ЗУР инфракрасных взрывателей или дополнение штатных (радиолокационных) взрывателей инфракрасными (оптическими), что приведет к устранению существенного недостатка существующих ЗУР – несрабатыванию радиолокационного взрывателя из-за малых размеров цели и высокой скорости ЗУР относительно малоскоростного БПЛА [59].

3.4.3. Интеграция существующих комплексов ПВО со средствами РЭП

Нужно отметить, что в некоторых случаях физическое уничтожение БПЛА не является самым лучшим вариантом противодействия. В отдельных случаях более целесообразным вариантом противодействия БПЛА является подавление его каналов управления и навигации средствами РЭП, а если подавление не привело к желаемому результату – уничтожение БПЛА.

В этом случае меры РЭП для противодействия БПЛА могут быть следующими:

- формирование заградительных помех на частотах используемых гражданскими средствами связи для управления БПЛА (типовые частоты сотовой и транкинговой связи, 3G, 4G, 5G, сети Wi-Fi, Wi-Max и т.д.) [122, 123];
- вскрытие параметров специализированных КРУ БПЛА и формирование радиоэлектронных помех прицельных по частоте и структуре сигнала КРУ (в том числе и для КРУ в режиме ППРЧ) [74];
- формирование шумовых помех прицельных по частотам наиболее распространенных спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo и т.д.);
- формирование имитационных помех прицельных по частоте и структуре «открытых» каналов, наиболее распространенных спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo и т.д.);

В настоящее время в качестве одного из самых перспективных направлений создания системы противодействия БПЛА рассматривается комплексирование ЗРК и ЗАК с комплексами РЭП и их последующее использование в качестве единой функциональной системы.

При противодействии БПЛА на основе совместного использования РЭП и ЗРК на комплексы РЭП возлагаются задачи:

- вскрытие средствами радио- и радиотехнической разведки (РРТР) мест дислокации ПУ БПЛА и траекторий полета БПЛА, а также параметров его КРУ;
- формирование средствами РЭП заградительной шумовой помехи для подавления КРУ БПЛА, а также навигационных каналов БПЛА;
- формирование имитирующей структурно-прицельной помехи для КРУ и для навигационного канала БПЛА в интересах перехвата управления им или навязывание БПЛА ложной траектории движения, в район их принудительной «посадки».

На ЗРК (ЗАК) возлагаются задачи:

- вскрытие РЛС комплекса факта налета БПЛА и формирование их траекторий;
- контроль результативности работы средств РЭП по изменению траекторий полета БПЛА;
- огневое поражение тех БПЛА, которые успешно преодолели воздействие средств РЭП.

При этом, при создании таких интегрированных систем необходимо решать задачи электромагнитной совместимости (ЭМС) средств РЭП, а также РЛС и радиоэлектронной аппаратуры ЗРК и ЗАК, ввиду того что средства РЭП могут негативно влиять на работу последних [44].

Подробно вопросы использования средств РЭП для противодействия БПЛА рассмотрены в главе 4.

3.4.4. Разработка нового комплекса ПВО, ориентированного на противодействие именно БПЛА

Как показано в работе [44], наиболее эффективным по соотношению «стоимость – эффективность» является разработка комплекса ПВО, специально ориентированного на решение задач обнаружения и поражения таких малоразмерных и малоскоростных воздушных целей, как малые БПЛА. Предложения по техническому облику такого комплекса ПВО также сформированы в работах [44, 49].

Радикальное решение проблемы борьбы с малоразмерными БПЛА возможно при создании принципиально новых средств обнаружения и комплексов поражения БПЛА. Для эффективного обнаружения БПЛА существующие РЛС должны реализовать новые режимы работы, а именно [44, 49]:

- многочастотную импульсную локацию, основанную на комбинациях зондирующих сигналов в дециметровых и сантиметровых диапазонах частот;
- маломощную сверхкороткоимпульсную (СКИ) локацию в X-диапазоне;
- специальные методы обработки сигналов ФАР;
- пассивный и полупассивный методы пеленгации;
- новые методы широкополосной радиолокации, основанные на обработке резонансных отражений, и т. п.

Так результаты экспериментов, представленные в работе [49], показывают, что применение новых методов широкополосной радиолокации позволяет получить приращения значений ЭПР малоразмерных БПЛА, как минимум, на порядок, что объясняется тем, что различные элементы БРЭО малоразмерных БПЛА отражают сигналы широкополосной РЛС, способной обнаруживать резонансные отражения с повышенными характеристиками. В работе [60], показано, что СКИ РЛС X-диапазона, обеспечивает обнаружение малоразмерных БПЛА с ЭПР от 0,001 до 0,1 м² на дальностях 3-5 км.

В работе [90] предложено для обнаружения и сопровождения малых и легких БПЛА использование пассивного когерентного накопления сигналов,

отраженных от искусственных территориально-распределенных ИРИ, например, от таких как ретрансляционные вышки, вешающие в стандарте цифрового телевидения DVB-T2. Показано, что такая пассивная система обнаружения позволяет обнаруживать малые и легкие БПЛА на дальностях от 9,5-24 км, в зависимости от типа БПЛА, выполняемых им маневров и ракурса наблюдения.

Для повышения дальностей обнаружения малоразмерных низколетящих БПЛА следует использовать различного рода вышки, аэростаты, вертолеты для размещения на них перспективных средств АР, применение которых позволит получить трехмерную «акустическую карту местности», в том числе информацию о движущихся воздушных целях. Такие средства АР способны обнаружить и определить местоположение ЛА и БПЛА с работающими двигателями с любых направлений. Соответствующие методы обработки полученных акустических сигналов, а также методы комплексирования этих данных с данными от других средств разведки позволят определить местоположение большого количества малоразмерных БПЛА, с точностью достаточной для наведения на них средств поражения [49].

Для обеспечения визуального контроля малоразмерных БПЛА и более точного наведения ЗУР в составе комплекса ПВО может быть применена оптико-электронная система слежения, имеющая в своем составе тепловизионный прибор, лазерный дальномер и сверхконтрастную камеру видимого диапазона, позволяющие получить максимальный объем информации о воздушной цели в оптическом диапазоне [44].

Для создания высокой плотности зенитного огня при стрельбе необходимо иметь скорострельные зенитные артиллерийские автоматы. Эту роль должны выполнять 4-8 зенитных стволов, размещенных на одной платформе (лафете, установке). Скорострельность зенитных автоматов должна достигать значений не менее 4000-4500 выстр./мин. Разведка малоразмерных БПЛА, обнаружение и выдача по ним точных целеуказаний должны вестись автономными РЛС и элементами системы управления зенитным огнем, желательно расположенными на отдельной платформе. Это необходимо для повышения точностных характеристик целеуказания и наведения орудий на цель за счет исключения отката, дрожи, вибрации орудийного основания при выстрелах [49].

Для отражения массированных налетов БПЛА, снаряды перспективного комплекса ПВО должны обладать повышенной пробивной и разрушающей способностью за счет резкого возрастания числа поражающих элементов (около 100-150 в каждом снаряде), адаптации области их разлета в районе цели с учетом ее размеров и параметров полета. Перспективными могут оказаться снаряды с поражающими элементами в виде вольфрамовых нитей (игл, осколков, сетки-паутины и др.) [49].

Серьезной модернизации должна быть подвергнута система подрыва боевой части зенитного снаряда. При стрельбе по малоразмерным БПЛА случай прямого попадания снаряда в такую цель будет маловероятным, поэтому обычная система подрыва снаряда ударным действием должна быть заменена на бесконтактную. Снаряд должен иметь систему дистанционного подрыва, которая обеспечит срабатывание заряда в районе цели. При этом облако осколков

должно формироваться с учетом размеров и параметров движения малоразмерной цели, обеспечивая ее гарантированное поражение [49].

Значительное повышение вероятности поражения цели может быть достигнуто путем автоматизации процесса введения поправок в ходе зенитной стрельбы, особенно – поправок на отклонение начальной скорости зенитного снаряда путем корректировки временных установок взрывателя. При этом на дульную часть ствола может устанавливаться устройство для измерения начальной скорости снаряда, а на самой пушке – множество температурных датчиков, которые измеряют температуру нагрева ее различных частей. Эта информация передается в ЭВМ комплекса, который рассчитывает точное время встречи снаряда с целью и определяет момент подрыва [49].

Разработки в этих направлениях уже выдуться. Так в рамках проекта «Деривация» для ВС РФ разработаны уникальные малокалиберные артиллерийские боеприпасы с интеллектуальной системой дистанционного подрыва – «интеллектуальная шрапнель». Такая «шрапнель» способна с одного выстрела сбить малоразмерный БПЛА, за счет того, что снаряды взрываются в районе цели, создают вокруг себя значительное по объему облако из маленьких кусочков металла или сверхпрочного пластика, которое выводит из строя БПЛА [124].

Эффективность применения разведывательной аппаратуры БПЛА можно снизить за счет применения новых зенитных артиллерийских снарядов, оснащенных неконтактными взрывателями с инфракрасными датчиками и снаряженных аэрозолем и углеводородными нитями. Такая начинка снарядов при подрыве образует облако вокруг БПЛА, затемняя оптические окна его разведывательной аппаратуры, тем самым создавая помехи каналам приема-передачи команд управления и развединформации [49].

В ближайшем будущем в арсенале комплексов ПВО должны найти свое место лазерные средства поражения воздушных целей, в том числе и малоразмерных БПЛА. Весьма перспективными представляются работы по созданию лазерных средств физического уничтожения БПЛА. Для этого необходимо решить первоочередные, неожиданно оказавшиеся сложными, задачи значительного повышения мощности лазерного генератора, а также удержания лазерного луча на корпусе малоразмерного БПЛА в полете в течение 2-5 с, позволяющих обеспечить требуемую для «прожигания» корпуса БПЛА плотность потока энергии на единицу площади [49]. Подробно лазерные средства поражения БПЛА рассмотрены в главе 6.

Также перспективным представляется создание оружия, основанного на применении СВЧ излучения, способного выводить из строя радиоэлектронную аппаратуру БПЛА. Такими средствами могут быть электромагнитные пушки (установки), боевые части ЗУР и зенитные артиллерийские снаряды с излучателями мощных электромагнитных СВЧ-импульсов и т.д. [49]. Подробно поражение БПЛА средствами СВЧ излучения рассмотрено в главе 5.

4. Противодействие БПЛА средствами РЭП

4.1. Особенности противодействия БПЛА средствами РЭП

Как показано в предыдущем разделе, поражение БПЛА средствами ЗРК ПВО, в большинстве случаев, является низкоэффективным, при этом приводит к высокому расходу боеприпасов – невосполнимого материального ресурса. В связи с этим перспективным направлением противодействия БПЛА считается применение средств РЭП, ресурс которых, при наличии внешнего питания, практически неограничен. При этом средства РЭП могут применяться одним из нескольких способов или их комбинацией:

- подавление или навязывание ложных режимов работы КРУ и радиолиниям передачи данных БПЛА;
- подавление или навязывание ложных режимов работы каналу навигации БПЛА, основанному на приеме и обработке сигналов одной или нескольких СРНС.

Этапу применения средств РЭП предшествует вскрытие средствами РТРР факта полета БПЛА как ИРИ, вскрытие сигнально-частотных параметров КРУ и сигналов СРНС, которые потенциально могут быть использованы для навигации БПЛА в данном районе. Эти сигнально-частотные параметры предаются средствам РЭП в качестве целеуказания. Особенности ведения РРТР против БПЛА рассмотрены в подразделе 2.3.

Применение средств РЭП против БПЛА по сравнению со средствами огневого поражения обладает следующими преимуществами:

- в процессе применения средства РЭП не расходуют каких-либо материальных средств поражения, а только возобновляемый ресурс электромагнитной энергии;
- современные средства РЭП могут формировать широкую номенклатуру радиоэлектронных помех (рис. 4.1), адаптивно выбирая те из них, которые в максимальной степени эффективны в отношении конкретных объектов подавления;
- средства РЭП обладают «площадным эффектом», позволяющим одновременно поражать большое количество БПЛА, имеющих сходное РЭО, единую КРУ, принципы навигации, основанные на использовании сигналов одних и тех же СРНС;
- при условии успешного разрешения целей, как отдельных ИРИ, средства РЭП могут быть избирательными, подавляя только ИРИ с определенными параметрами, например, ПУ БПЛА формирующий КРУ с определенной структурой сигналов, или сигналы определенной СРНС;
- в отдельных случаях, при условии успешного вскрытия структуры сигналов и формата передаваемых сообщений в КРУ и в канале навигации, средства РЭП позволяют перехватить управление БПЛА и навязать ему ложную траекторию полета.

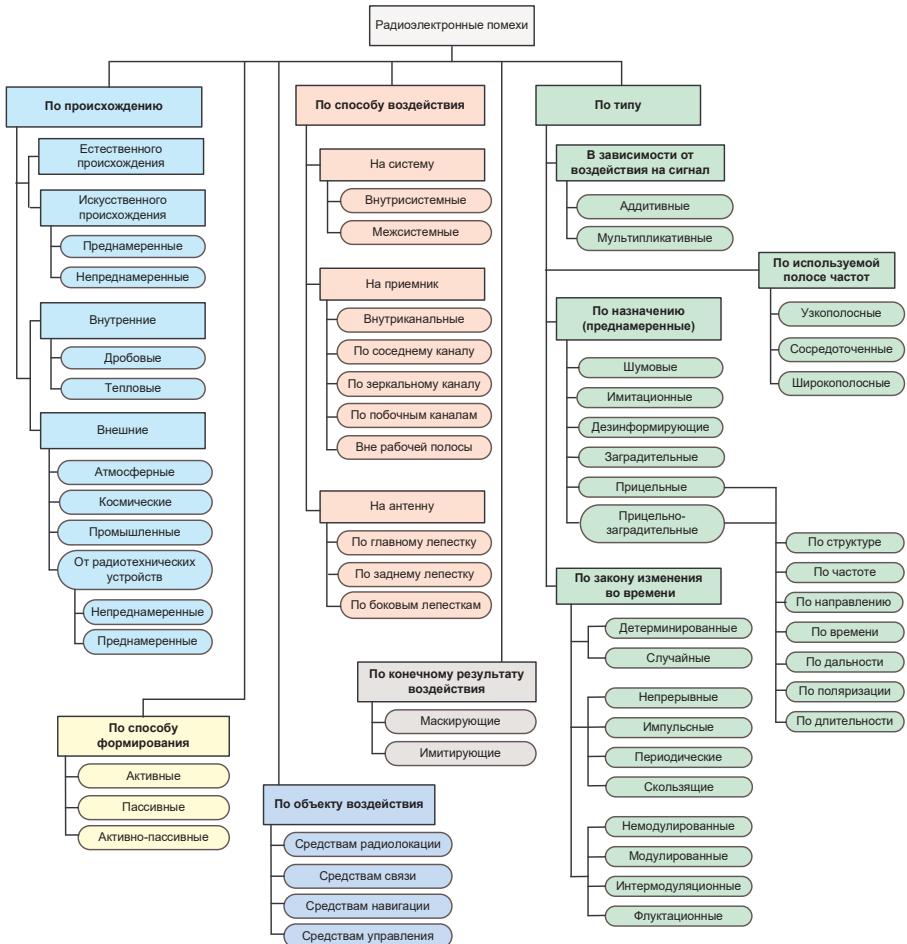


Рис. 4.1. Общая классификация радиоэлектронных помех [222]

Вместе с тем, одновременно с вышеуказанными достоинствами, средствам РЭП свойственны и определенные недостатки:

- воздействие средств РЭП возможно только при условии соблюдения электромагнитной доступности БПЛА;
- подавление канала управления и навигации БПЛА возможно только при условии активного дистанционного управления БПЛА, с использованием навигации по сигналам СРНС. Полет БПЛА в режиме «радиомолчания» по заблаговременно заложенной программе, как правило, не позволяет вскрыть факт полета такого БПЛА средствами РРТР и, соответственно, сформировать целеуказания средствам РЭП на противодействие таким БПЛА;

- применение средств РЭП против БПЛА в условиях мирного времени ограниченно относительно небольшой мощностью, вследствие необходимости выполнения требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими РЭС. Эти РЭС могут находиться как на защищаемом от БПЛА объекте, так и могут являться другими средствами противодействия БПЛА, которые, наряду со средствами РЭП, интегрированы в комплекс противодействия, например, РЛС или средства РТРР обнаружения БПЛА;
- энергетическая эффективность средств РЭП убывает пропорционально квадрату расстояния, вследствие этого средства РЭП являются средствами ближнего действия, причем их эффективность возрастает по мере приближения БПЛА к месту расположения средств РЭП (контролируемому рубежу);
- заградительные помехи, обладающие «площадным эффектом» и ориентированные на подавление нескольких каналов управления и навигации, одновременно с этим имеют и низкую энергетическую эффективность, особенно, в условиях использования для управления и навигации БПЛА широкополосных сигналов (ШПС) и сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ);
- помехи, прицельные по частоте и структуре сигналов КРУ и СРНС, которые являются наиболее эффективными для нарушения управления БПЛА, в том числе, путем навязывания ложных режимов полета. данный тип помех для своего формирования требует либо оперативного вскрытия средствами РРТР структуры сигналов и формата передаваемых сообщений в КРУ и в канале навигации, либо заблаговременного формирования баз данных (БД) соответствующих сигналов, используемых БПЛА. В результате, такие высокоэффективные помехи эффективно могут быть использованы только против ограниченного числа отдельных моделей БПЛА, а основанные на этих помехах способы подавления – как отдельные режимы, более пригодные для демонстрации возможностей средств РЭП, чем для реального противодействия налету группы БПЛА;
- эффективность средств РЭП существенно зависит от сценария применения БПЛА, профиля их полета, уровня автономности и т.д. Изучательный учет в сценарии применения БПЛА возможности использования против них средств РЭП, выбор профиля полета на низкой высоте, с учетом складок местности, заблаговременное формирование для навигационной системы профиля полета по электронной карте местности, соблюдение режима «радиомолчания», а также применение других способов радиоэлектронной защиты БПЛА, существенно снижает возможности средств РЭП.

Основным недостатком средств РЭП, основанных на подавлении каналов управления и навигации БПЛА радиоэлектронными помехами, является то, что излучение соответствующих помех никак не гарантирует требуемой реакции

БПЛА на подобное воздействие, а именно – прекращение полета в направлении защищаемого объекта. Действия БПЛА в результате воздействия могут варьироваться в широком диапазоне, от продолжения полета по заданной траектории (например, за счет использования лазерного высотомера и электронной карты местности) до включения «режима возврата» на свой ПУ.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что средства РЭП действительно являются высокоэффективным и перспективным средством противодействия БПЛА, однако на современном этапе своего развития они не позволяют самостоятельно гарантированно предотвратить полет БПЛА к контролируемому периметру, имеют ограничения по применимости, в связи с необходимостью обеспечения ЭМС с другими РЭС, не обладают высокой степенью избирательности в отношении поражаемых целей, и как следствие – могут быть использованы в составе комплекса противодействия БПЛА только в совокупности с другими средствами, прежде всего, со средствами физического и огневого поражения.

4.2. Тактико-технические характеристики типовых комплексов РЭП

Рост угрозы со стороны БПЛА, привел к резкому повышению предложений, со стороны производителей соответствующих средств. Анализ информации, доступной из открытых источников и на сайтах производителей [20, 48, 90, 127-131], показывает, что в настоящее время доступен широкий спектр комплексов РЭП, специально ориентированных на противодействие БПЛА. К таким комплексам можно отнести комплексы РЭП: Р-330Ж «Житель», «Шиповник-АЭРО», «Репеллент-1», «Серп», «Атака-DBS», «Заслон», «Кrona-2M», «Солярис-Н», «REX 1», «Пицаль-ПРО», «Таран-ПРО», «Stupor» и многие др. При этом данные комплексы можно четко разделить на три типа, каждый из которых имеет принципиально разные возможности и особенности применения:

- 1) «боевые» комплексы РЭП, имеющие относительно высокий энергетический потенциал и большую дальность действия, ориентированные на применение в условиях мирного и военного времени против БПЛА, в том числе, специального и военного назначения (к таким комплексам можно отнести: Р-330Ж «Житель», «Репеллент-1», «Шиповник-АЭРО»);
- 2) «коммерческие» комплексы РЭП, имеющие относительно невысокий энергетический потенциал и среднюю дальность действия, ориентированные на защиту периметра критических объектов от малых БПЛА-квадрокоптеров исключительно в мирное время (к таким комплексам можно отнести: «Серп», «Заслон», «Атака-DBS», «Кrona-2M», «Солярис-Н» и др.);
- 3) малогабаритные носимые средства РЭП, имеющие относительно низкий энергетический потенциал и малую дальность действия, ориентированные на использование одним человеком против одного или нескольких БПЛА, выполненные в формате «носимого орудия» (к таким

средствам можно отнести: «REX 1», «Пищаль-ПРО», «Таран-ПРО», «Stupor» и др.).

Рассмотрим возможности и особенности применения данных комплексов РЭП более подробно.

4.2.1. Боевые комплексы РЭП

Наземными комплексами РЭП комплектуются соответствующие батальоны мотопехотных и бронетанковых дивизий. Данные комплексы предназначены для выявления и радиоэлектронного подавления систем и средств КВ и УКВ радиосвязи, а также РЛС в тактическом звене управления в частях сухопутных войск, в армейской и фронтовой авиации на дальности до 100 км.

В работах [84, 132] рассмотрены такие наземные комплексы РЭП как: AN/TLQ-17A (V)1 Traffic Jam, AN/ALQ-151(V)2 Quick Fix II, IEWCS, EFVS, AN/MLQ-40 Prophet, P-378, P-330, P-325У, Р-939Б, МВША «Атлант». Принимая эти средства как прототипы, возможно сформировать обобщенные ТТХ типового комплекса РЭП.

Типовой комплекс РЭП выполняет следующие задачи:

- ведение РРТР;
- обработка разведывательных данных и формирование карты текущей радиоэлектронной обстановки;
- определение параметров и координат ИРИ для обеспечения целеуказания и оценки эффективности подавления;
- осуществление радиоэлектронного подавления средств связи и радиолокации в зоне своей ответственности.

Как правило, современные комплексы РЭП состоят из двух подсистем:

- 1) воздушная подсистема (на основе средств РРТР, размещенных на вертолетах армейской авиации и/или на тактических БПЛА);
- 2) наземная подсистема (на основе территориально-распределенной группировки средств РЭП).

Воздушная подсистема комплекса РЭП обеспечивает ведение РРТР, а также РЭП объектов, находящихся на удалении 15-30 км от мест размещения элементов наземной подсистемы комплекса РЭП. В качестве носителей средств воздушной подсистемы выступают вертолеты и тактические БПЛА. Воздушная подсистема способна обнаруживать, идентифицировать, определять местоположение, а также осуществлять радиоэлектронное подавление ИРИ.

Обобщенные ТТХ средств РРТР воздушной подсистемы комплекса РЭП [84]:

- диапазон частот, в котором ведется РРТР: 1,5-3000 МГц;
- зона ведения разведки: 150×50 км;
- точность пеленгования: 0,5°-1°;
- точность определения местоположения ИРИ: на расстоянии до 40 км – 150-500 м; на расстоянии 80-120 км – 450-1500 м;

ТТХ средств РЭП воздушной подсистемы комплекса РЭП [84]:

- диапазон частот, в котором ведется подавление: 20-450 МГц;
- мощность излучения помех: 40-150 Вт;
- ширина мгновенно подавляемой полосы частот: 10-25 кГц.

Радиоразведка и постановка радиопомех средствами воздушной подсистемы осуществляются с высоты полета 60-180 м в течение 2-2,5 ч на удалении 5-15 км от линии соприкосновения войск и на глубину до 30 км [84].

Наземная подсистема обеспечивает вскрытие радиоэлектронной обстановки и постановку помех для линий радиосвязи преимущественно в УКВ диапазоне, при координации совместных действий средств РРТР и РЭП наземной и воздушной подсистем.

Типовые ТТХ средств РРТР наземной подсистемы комплекса РЭП [84, 132]:

- диапазон частот, в котором ведется радиоразведка (РР): 20-15000 МГц;
- зона ведения разведки: 150×120 км;
- мгновенная полоса обзора: около 2,5 ГГц;
- разрешающая способность: не хуже 1 кГц;
- скорость поиска в разведываемом диапазоне: порядка 3000 ГГц/с;
- чувствительность (при отношении сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника не менее 10 дБ в полосе частот 20 кГц): не хуже 5 мкВ/м;
- вероятность распознавания вида сигнала и типа РЭС за время 0,2 с: не менее 0,8;
- точность пеленгования: 0,5°-1°.

Типовые ТТХ средств подавления наземной подсистемы комплекса РЭП [84, 132]:

- диапазон частот, в котором ведется подавление: 1,5-2500 МГц (в перспективных образцах – до 6 ГГц);
- мощность излучения помех: 0,5-1 кВт;
- высота антенн средств РЭП: 6-20 м;
- количество одновременно подавляемых целей: 5-300;
- ширина спектра помех: прицельных по частоте 3-50 кГц; заградительных 150-3000 кГц;
- время реакции при постановке помех: по неизвестной частоте 0,8 с; по известным частотам 0,04 с;
- обнаружение и подавление РЭС с режимом ППРЧ до 1000 скачков/с;
- дальность подавления: до 100 км.

Необходимо отметить, что вышеуказанные ТТХ относятся к комплексам РЭП общего назначения. Вместе с тем, в последние времена на вооружение активно поступают комплексы РЭБ, специально ориентированные на противодействие именно БПЛА.

Обобщая данные об отечественных комплексах Р-330Ж «Житель», «Шиповник-АЭРО», «Репеллент-1» (рис. 4.2) [127, 129, 130, 133], можно сформировать обобщенные ТТХ боевого комплекса РЭП, ориентированного на противодействие БПЛА.

ТТХ подсистемы РРТР:

- диапазон частот, в котором ведется РРТР: 200-6000 МГц;
- дальность разведки ПУ БПЛА: до 10-30 км;
- дальность разведки БПЛА: до 30-50 км;
- вероятность пеленгования сигналов типа ППРЧ со скоростью не менее 1000 скачков/с: не менее 0,85;
- среднеквадратическая ошибка (СКО) пеленгования ИРИ в диапазоне от 200 до 6000 МГц: не более 2°.

ТТХ подсистемы РЭП:

- диапазон частот, в котором ведется подавление: 200-6000 МГц;
- подавление литерных частот:
 - а) частоты типовых каналов нелицензированных средств радиосвязи: 20-80, 135-174, 400-470 МГц;
 - б) частоты типовых каналов авиационной радиосвязи в диапазоне 220-400 МГц;
 - в) частоты типовых каналов коммерческих систем связи: 430-460, 860-880, 902-928 МГц, CDMA800 (850-894 МГц), GSM900 (890-915, 935-960 МГц), GSM1800 (1710-1880 МГц), 3G (2110-2170 МГц), 4G (725-770, 780-960, 925-960 МГц; 1,7-2,2, 2,5-2,7 ГГц), Wi-Fi (2,4-2,5, 4,9-6,425 ГГц);
 - г) частоты каналов «вниз» спутниковых систем связи (ССС) L-диапазона: Инмарсат (1518-1660,5 МГц), Иридиум (1616-1626,5 МГц);
 - д) частоты каналов СРНС: GPS (L1 – 1575,42 МГц / L2 – 1227,6 МГц / L5 – 1176,45 МГц), ГЛОНАСС (L1 – 1602 МГц / L2 – 1246 МГц), BeiDou (B1 – 1561,098 МГц / B2 – 1207,14 МГц / B3 – 1268,52 МГц), Galileo (E1 – 1575,42 МГц / E6 – 1278,75 МГц / E5 – 1191,79 МГц);
- дальность подавления приемных трактов:
 - а) средств связи на ПУ: до 10-25 км;
 - б) средств связи на БПЛА: до 30-50 км;
 - в) канала СРНС на БПЛА: до 30-50 км;
- энергопотенциал воздействия:
 - а) на канал передачи данных «БПЛА – ПУ»: 300-500 Вт;
 - б) на канал управления «ПУ – БПЛА» и телеметрии «БПЛА – ПУ»: 500-1000 Вт;
 - в) на канал СРНС на БПЛА: 300-1000 Вт;
- тип формируемых помех:
 - а) для каналов связи и управления: прицельная и скользящая по частоте, заградительная по диапазону частот;
 - б) для канала навигации по СРНС: прицельная по частоте и структуре сигнала с целью формирования ложной навигационной информации (по открытым частотам СРНС); шумовая прицельная по частоте (по открытым или закрытым частотам СРНС).

Отметим, что в ТТХ некоторых комплексов указывается optionalная возможность формирования ложных режимов работы для каналов управления и навигации БПЛА, которая называется «перехват управления». Вместе с тем, производители данных комплексов, как правило, подробно не раскрывают механизмы такого «перехвата», и что конкретно под ним понимается. Более подробно возможность формирования ложных режимов работы для каналов управления и навигации БПЛА будет рассмотрена далее, здесь же необходимо отметить, что подобная функциональность может быть реализована в отношении исключительно отдельных типов БПЛА, принципы функционирования которых были заблаговременно изучены, и в соответствии с ними были сформированы соответствующие программы «перехвата управления».



а. Комплекс РЭП Р-330Ж «Житель»



б. Комплекс РЭП «Шиповник-АЭРО»



в. Комплекс РЭП «Репеллент-1»

Рис. 4.2. Боевые комплексы РЭП

В целом боевые комплексы РЭП противодействия БПЛА являются эффективным средством решения задач подавления каналов управления и навигации. Недостаточная «интеллектуальность» постановки помех в данных комплексах компенсируется их высокими энергетическими возможностями и универсальностью применения по отношению ко всем типам БПЛА. Недостатком данных комплексов является низкий уровень ЭМС по отношению к другим РЭС связи и навигации в зоне применения, что делает практически невозможным их широкое использование для противодействия БПЛА в условиях мирного времени.

4.2.2. Коммерческие комплексы РЭП

Необходимость обеспечения защиты критической инфраструктуры и важных объектов в мирное время, при обеспечении требований ЭМС со существующими связными и навигационными РЭС, привело к формированию отдельного направления в области противодействия БПЛА, заключающегося в создании, так называемых, коммерческих комплексов РЭП.

В настоящее время к таким коммерческим комплексам РЭП, предназначенным для противодействия БПЛА можно отнести: «Серп», «Заслон», «Атака-DBS», «Кrona-2M», «Солярис-Н» и др. [48, 90, 128, 131].

Отличительными чертами коммерческих комплексов РЭП, по сравнению с боевыми, являются:

- относительно невысокий энергопотенциал, в связи чем – меньшая дальность действия, при одновременном обеспечении требований ЭМС за пределами зоны подавления;
- использование направленных антенных систем, которые позволяют создавать модульные комплексы РЭП, со сложной конфигурацией подавляемых секторов и контролируемого периметра;
- использование для вскрытия факта полета БПЛА и контроля их траектории неизлучающих средств – как средств РРТР, так и пассивных РЛС, основанных на приеме отраженных сигналов от внешних источников радиоизлучения, например, от ретрансляционных телевизионных вышек;
- использование режимов подавления каналов управления БПЛА, основанных не на заградительных помехах, перекрывающих отдельный диапазон частот, а на помехах прицельных по частоте и структуре широко распространенных средств связи с малыми БПЛА-квадрокоптерами;
- использование режимов «вскрытия» каналов управления, основанных на автоматическом определении типа протокола, из числа наиболее широко используемых, с последующем использованием известных уязвимостей в них;
- использование режимов подавления и навязывания ложных режимов работы каналов навигации БПЛА, основанных на формировании шумовых помех, прицельных по частоте, для закрытых каналов СРНС,

при одновременном формировании ложных сигналов – имитирующих помех, прицельных по частоте и структуре сигнала, для открытых каналов СРНС (преимущественно по каналу L1 GPS), так называемый, «спуфинг» (от англ. spoofing – подмена) сигналов СРНС.

Анализ этих отличительных черт коммерческих комплексов РЭП относительно боевых позволяет сделать вывод о том, что, с одной стороны, данные комплексы реализуют более «интеллектуальные» режимы противодействия БПЛА, основанные на имитирующих помехах, прицельных по частоте и структуре широко распространённых полезных сигналов управления и навигации БПЛА-квадрокоптеров (рис. 4.3). С другой стороны, данные комплексы утратили существенную часть универсальности применения и ориентированы, прежде всего, на широко распространенные коммерчески доступные малые БПЛА, оборудованные исключительно стандартными средствами связи (на основе стандартов 2G...4G и Wi-Fi) и навигации по СРНС.

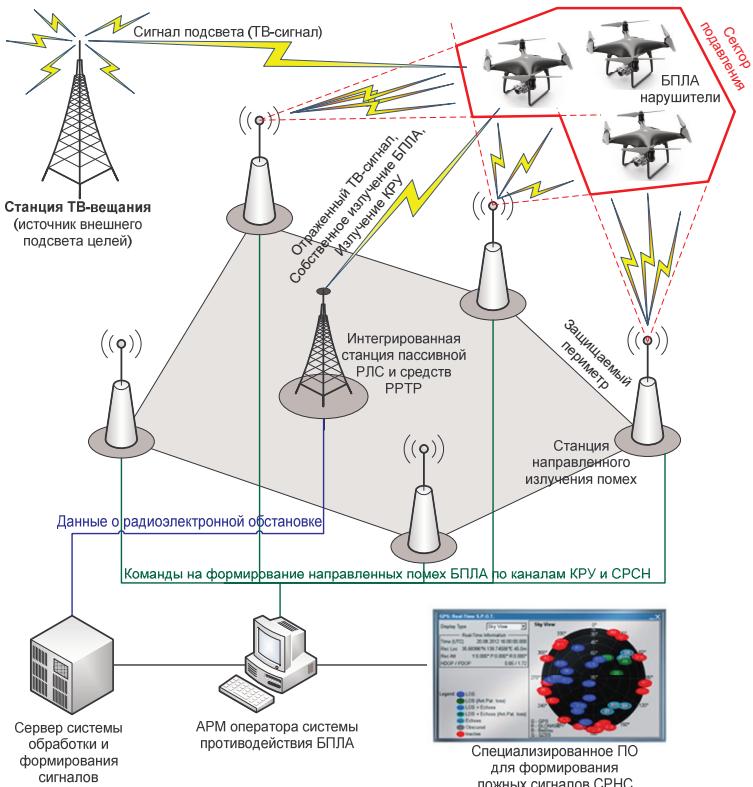


Рис. 4.3. Принцип функционирования системы противодействия БПЛА «Серп» [90]

Обобщая данные об отечественных комплексах «Серп», «Заслон», «Атака-DBS», «Крона-2М», «Тревога-Шит», «Blighter AUDS», «Drone Dome», «Falcon Shield» и др. [20, 46, 47, 90, 128, 131, 134-138], можно сформировать обобщенные ТТХ коммерческого комплекса РЭП, ориентированного на противодействие БПЛА.

ТТХ подсистемы разведки:

- ведение разведки БПЛА:
 - а) РРТР каналов связи и управления БПЛА;
 - б) использование РЛС с пассивным или активным принципом подсветки целей;
 - в) использование оптико-электронного средства (ОЭС) в видимом и ИК-диапазоне;
- дальность обнаружения БПЛА:
 - а) средствами РРТР: до 5-10 км;
 - б) путем использования РЛС: до 8-30 км;
 - в) путем использования ОЭС (в видимом диапазоне с оптическим увеличением): до 3-5 км;
- литературные частоты широко распространениях средств связи, на которых ведется РРТР каналов управления БПЛА:
 - а) RC433: 433 МГц;
 - б) сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
 - в) сети CDMA: 850- 894 МГц;
 - г) RC868: 868-916 МГц;
 - д) GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
 - е) GSM1800: 1710-1880 МГц;
 - ж) сети 3G: 2110-2170 МГц;
 - з) сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
 - и) сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
 - к) сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
 - л) сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц.

ТТХ подсистемы РЭП:

- литературные частоты широко распространениях средств связи, на которых ведется подавление:
 - а) частоты типовых каналов коммерческих систем связи:
 - о RC433: 433 МГц;
 - о сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
 - о сети CDMA: 850- 894 МГц;
 - о RC868: 868-916 МГц;
 - о GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
 - о GSM1800: 1710-1880 МГц;
 - о сети 3G: 2110-2170 МГц;
 - о сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
 - о сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
 - о сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
 - о сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц;

- 6) частоты каналов навигации по СРНС:
 - GPS (L1 – 1575,42 МГц / L2 – 1227,6 МГц);
 - ГЛОНАСС (L1 – 1602 МГц / L2 – 1246 МГц);
 - BeiDou (B1 – 1561,098 МГц / B2 – 1207,14 МГц);
 - Galileo (E1 – 1575,42 МГц / E5 – 1191,79 МГц);
- дальность подавления приемных трактов средств связи и средств навигации по СРНС на БПЛА: до 6 км;
- энергопотенциал воздействия: 5-10 Вт;
- направленность антенн: направленные антенны с шириной главного лепестка диаграммы направленности 45-90°;
- типы формируемых помех:
 - a) для «закрытых» каналов связи и управления, имеющих криптографическую защиту: шумовая помеха, прицельная по частоте;
 - b) для «открытых» каналов связи и управления или каналов, имеющих типовые уязвимости в протоколах шифрования: имитирующая помеха, прицельная по частоте и структуре полезного сигнала, с целью навязывания ложных режимов работы;
 - b) для «открытых» каналов навигации по СРНС: шумовая помеха, прицельная по частоте; имитирующая помеха, прицельная по частоте и структуре полезного сигнала, с целью навязывания ложных траекторий полета.

В целом коммерческие комплексы РЭП для противодействия БПЛА являются эффективным средством решения задач подавления каналов управления и навигации исключительно широко распространённых малых коммерческих БПЛА-квадрокоптеров. Наличие априорных данных о стандартах связи, используемых для управления БПЛА (в основном это каналы Wi-Fi на опорных частотах 2,4, 5,2 и 5,8 ГГц), а также об уязвимостях криптографических протоколов защиты, встроенные в эти стандарты (WEP, WPA и др.), позволяет производителям комплексов РЭБ реализовывать в них режимы автоматического «взлома» каналов управления, с последующем формированием для них помех, прицельных по частоте и структуре полезного сигнала, имитирующих команды управления «посадка» или «снижение». То же самое относится и к возможностям коммерческих комплексов РЭП в отношении подавления каналов навигации по СРНС. Однако такая строгая ориентированность комплексов на малые коммерческие БПЛА, существенно снижает возможности данных комплексов по противодействию БПЛА, имеющих другие, отличные от широко используемых, частоты и стандарты каналов управления.

4.2.3. Малогабаритные носимые средства РЭП

Малогабаритные носимые средства РЭП, в формате различного рода «электронных автоматов» или «электронных винтовок» с регулярным постоянством стали презентоваться начиная с 2015 г., когда проблеме противодействия БПЛА стали уделять повышенное внимание.

В настоящее время к таким малогабаритным носимым средствам РЭП, предназначенным для противодействия БПЛА, можно отнести: «REX 1»,

«REX 2», «Пищаль-ПРО», «Таран-ПРО», «Stupor», «DroneDefender», «UAV-D04JA», «DroneGun» и др. [20, 90, 128, 131].



Рис. 4.4. Носимые средства РЭП

Отличительными чертами этих носимых средств РЭП (рис. 4.4), по сравнению с боевыми и коммерческими комплексами, являются:

- отсутствие какой-либо разведывательной подсистемы, вскрывающей параметры каналов управления БПЛА;
- использование для подавления шумовых помех, прицельных по частоте широко распространенных каналов навигации СРНС и каналов связи с малыми БПЛА-квадрокоптерами;
- малый энергопотенциал, в связи чем – малая дальность действия;
- использование направленных антенных систем, совпадающих по ориентации с направлением самого устройства;
- использование в составе средств РЭП аккумуляторных батарей с ограниченным «боезапасом» – на несколько часов эпизодического применения;
- для некоторых мобильных средств РЭП указываются медицинские ограничения на длительность применения данных устройств человеком-оператором, ввиду негативного влияния ЭМИ.

Обобщая данные о малогабаритных носимых средствах РЭП «REX 1», «Пищаль-ПРО», «Таран-ПРО», «Stupor», «DroneDefender», «UAV-D04JA», «DroneGun» и др. [20, 90, 128, 131, 136, 139], можно сформировать обобщенные ТТХ таких средств, ориентированных на противодействие БПЛА:

- литерные частоты широко распространениях средств связи, на которых ведется подавление:
 - a) частоты типовых каналов коммерческих систем связи:
 - RC433: 433 МГц;
 - сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
 - сети CDMA: 850- 894 МГц;
 - RC868: 868-916 МГц;
 - GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
 - GSM1800: 1710-1880 МГц;
 - сети 3G: 2110-2170 МГц;
 - сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
 - сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
 - сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
 - сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц;
 - b) частоты каналов навигации по СРНС:
 - GPS (L1 – 1575,42 МГц, L2 – 1227,6 МГц);
 - ГЛОНАСС (L1 – 1602 МГц / L2 – 1246 МГц);
 - BeiDou (B1 – 1561,098 МГц / B2 – 1207,14 МГц);
 - Galileo (E1 – 1575,42 МГц / E5 – 1191,79 МГц);
- дальность подавления приемных трактов средств связи и средств навигации по СРНС на БПЛА: до 0,4-2 км;
- энергопотенциал воздействия: 5-10 Вт;
- тип формируемых помех: шумовая или скользящая помеха, прицельная по частотам каналов средств связи и каналов СРНС;
- масса: 2,5-6,5 кг;
- время непрерывной работы: 0,5-4,5 ч.

Анализ отличительных черт малогабаритных средств РЭП и их ТТХ, позволяет сделать вывод, что эти средства являются наименее «интеллектуальными» и наименее эффективными при решении задачи противодействия малым БПЛА. С одной стороны, простота и мобильность этих средств позволяет их применять отдельным людям-операторам без специализированного обучения, с другой стороны, данные средства могут применяться только эпизодически и ориентированы на самые простые малые БПЛА-квадрокоптеры. При этом отсутствие в функционале данных устройств режимов формирования имитирующих помех по каналу навигации СРНС, приводит к тому, что поведение БПЛА, в условиях «грубого» шумового подавления каналов управления и навигации, становится фактически непредсказуемым. Несмотря на декларирование производителями подобных устройств таких эффектов как «падение БПЛА», «приземление БПЛА» или «возврат БПЛА к ПУ», фактическое поведение БПЛА определяется исключительно программой их действий в случае отсутствия связи и может существенно отличаться от вышеуказанных, вплоть до продолжения полета в соответствии с заблаговременно заданной программой.

4.3. Радиоэлектронное подавление навигационной системы БПЛА

4.3.1. Проблемные вопросы радиоэлектронного подавления навигационной системы БПЛА

При рассмотрении вопросов подавления канала навигации БПЛА необходимо учитывать, что навигационная система БПЛА может иметь различный уровень сложности и учитывать для определения местоположения БПЛА несколько сигналов, поступающих от датчиков различной физической природы:

- 1) навигационная система, основанная только на аппаратуре потребителей (АП) наиболее распространенных СРНС – такая система характерна для самых простых малых БПЛА-квадрокоптеров;
- 2) простая интегрированная навигационная система, на основе комплексирования данных микромеханических инерциальных навигационных систем (ИНС) и АП СРНС – такая навигационная система характерна для широкого класса малых БПЛА-квадрокоптеров для профессионального использования в различных целях;
- 3) интегрированная навигационная система, на основе комплексирования данных нескольких навигационных устройств: микромеханических ИНС, АП СРНС, барометрического высотомера, радио или лазерного высотомера – такая навигационная система характерна для профессиональных малых БПЛА, а также для БПЛА среднего класса;
- 4) интегрированная навигационная система, на основе комплексирования данных нескольких навигационных устройств: авиационных ИНС, АП СРНС, высотомеров (барометрического и радио), РСБН VOR/DME (Very high frequency Omni directional radio Range / Distance Measuring Equipment), системы АЗН-В – такая навигационная система фактически полностью повторяет навигационную систему пилотируемого ЛА и характерна для БПЛА тяжелого класса.

Говоря о подавлении канала навигации БПЛА, необходимо четко понимать, что сам факт радиоэлектронного воздействия (подавления или навязывания ложных режимов работы) относится только к сигналам, принимаемым АП от одного или нескольких СРНС, что соответствуют только одному каналу из всего множества каналов поступления данных в навигационную систему БПЛА. Таким образом с использованием РЭП возможно обеспечить значимое нарушение работы только наиболее простых навигационных систем БПЛА (типы 1-3 из списка). Для БПЛА с полноценной интегрированной навигационной системой (тип 4 из списка), основанной на использовании нескольких каналов получения навигационных данных, нарушение спутникового канала (в том числе и поступление по нему ложных навигационных данных, вступающих в противоречие в данными других каналов), в большинстве случаев будет обнаружено, после чего навигационная система перестанет использовать спутниковый канал для определения местоположения БПЛА. Отметим, что в средних и тяжелых БПЛА, в подавляющем числе случаев, в качестве основного канала формирова-

ния навигационных данных используется информация именно от авиационных ИНС на основе лазерных или волоконно-оптических гироскопов. Подробно ТТХ таких ИНС рассмотрены в работе [67]. Данные ИНС в среднем обеспечивают ошибку счисления пути порядка 1,85 км за 1 ч полета. При этом информация по другим каналам (данные от АП СРНС, данные высотомеров, сигналы РСБН и АЗН-В) является вторичной и после верификации и комплексирования она используется только для коррекции показаний ИНС [65, 66]. Дополнительно отметим, что средние и большие БПЛА используемые для решения специальных и военных задач, при этом в них АП СРНС использует не «открытые», а «закрытый» сигналы СРНС, имеющие более высокую помехозащищенность и криптозащиту [140, 141]. При этом оборудование навигационных спутников может формировать отдельные помехозащищенные зоны. Например, функционал спутников GPS-III предусматривает возможность формирования отдельных зон с повышенной на 20 дБ энергетикой сигналов «закрытых каналов». Вследствие этого задача нарушения корректного функционирования навигационных систем таких БПЛА становится еще более затруднительной, фактически невозможной.

Быстрое развитие БПЛА приводит к усовершенствованию их навигационного обеспечения, в том числе, для применения в условиях плохого приема сигналов СРНС.

К таким направлениям усовершенствования относятся следующие:

- 1) использование для повышения точности навигации многостанционных локальных РСБН или систем – имитаторов сигналов СРНС [66, 68], при этом станции этих систем могут быть мобильными, находясь на автомобилях, и заблаговременно развертываться в зоне планируемого применения БПЛА. В частности, использование подобных систем позволяет повысить отношение сигнал/шум (ОСШ) на 35-50 дБ в зоне давления (или плохого приема) сигналов СРНС и обеспечить прием навигационных сигналов при мощностях активных шумовых и доплеровских (уводящих по скорости) помех в зоне действия РСБН до 100 Вт [68];
- 2) использование для навигации электронных карт местности, полет по которым осуществляется в соответствии с данными радио- или лазерного высотомера, РЛС или ОЭС видимого диапазона [69, 70];
- 3) использование для навигации различных автономных систем технического зрения [69], а также технологии SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – технологии автоматического одновременного построения карты местности в неизвестном пространстве, контроля текущего местоположения БПЛА и пройденного пути [71, 72];
- 4) автономный прямолинейный полет БПЛА в направлении цели, подсвечиваемой внешним источником излучения.

Таким образом, обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что применение средств РЭП, в том числе и путем формирования «интеллектуальных» помех, прицельных по частоте и структуре сигналов СРНС, с целью навязывания ложного местоопределения и траектории полета, ориентировано на малые

БПЛА с самыми простыми навигационными системами. При этом высокий темп развития БПЛА, а также возможность разработки в самом ближайшем будущем навигационных систем на основе электронных карт местности или систем технического зрения, сделает подавление каналов СРНС бесполезным даже против малых БПЛА.

Далее рассмотрим особенности подавления каналов навигации в БПЛА с навигационными системами на основе только АП СРНС, а также с простыми инерциальными системами на основе комплексирования данных микромеханических ИНС и сигналов СРНС, так как именно для таких БПЛА подавление канала спутниковой навигации может дать какой-либо значимый эффект.

4.3.2. Особенности радиоэлектронного подавления навигационной системы БПЛА, основанной на приеме сигналов СРНС

Систему навигации на подавляющем числе малых БПЛА составляет АП, принимающая сигналы одной или нескольких СРНС. К наиболее распространенным СРНС относятся системы: ГЛОНАСС (Россия), GPS/NAVSTAR (США), Beidou (Китай), Galileo (ЕС). Сигналы СРНС формируются на литерных частотах в диапазоне 1,1-1,6 ГГц. Как правило, простые навигационные системы, устанавливаемые на малые БПЛА, используют интегрированный режим обработки сигналов от нескольких СРНС, что обеспечивает точность навигации 1-2,5 м как в горизонтальной плоскости, так и по высоте.

Теоретические оценки помехоустойчивости сигналов СРНС и режимов их интегрированной обработки в АП рассмотрены в работах [140, 142-147]. Экспериментальные оценки помехоустойчивости сигналов СРНС и уровня помех, при котором навигационные устройства сохраняют приемлемую эффективность функционирования, рассмотрены в работах [148, 149]. Обобщая материал вышеуказанных работ можно сделать следующие выводы.

1. Среди помех, используемых для подавления каналов СРНС в наиболее широкой степени применяются [144, 145]:

- шумовая помеха – белый шум высокой мощности на частотах каналов СРНС;
- гармоническая (полигармоническая) помеха – одночастотное или модулированное гармоническое колебание на частоте (на частотах) полезного сигнала;
- прицельная имитирующая помеха – помеха имитирует структуру сигналов СРНС с частотным и временным рассогласованием, а также с фиксированным значением фазы огибающей манипулирующей функции;
- следящая имитирующая помеха – помеха имитирует структуру сигналов СРНС, но с переменной начальной фазой манипулирующей функции, закон изменения которой соответствует изменению расстояния от приемника до станции РЭП;

- заградительная имитирующая помеха – имитирует набор сигналов спутников СРНС с одинаковым частотным рассогласованием для всех компонентов и разным временным рассогласованием для каждого компонента.

Для организации имитирующих помех требуется разведка не только несущей частоты и фазы, но и амплитуды сигналов СРНС, а также манипулирующих функций, представляющих собой кодовую последовательность для разделения сигналов и навигационных данных. При этом для формирования следящей и прицельной имитирующих помех необходима разведка частотных, фазовых и временных параметров полезных сигналов СРНС. Более простой в реализации является заградительная имитирующая помеха, поскольку она не требует для формирования точных временных параметров сигнала [144].

2. Наиболее эффективными помехами для нарушения нормального функционирования АП СРНС являются имитирующие помехи, воспроизводящие структуру реального сигнала СРНС с частотными, фазовыми и временными параметрами, позволяющими навязать АП СРНС ложный режим работы и как следствие – ложное местоопределение БПЛА. Модификация значащих параметров имитирующей помехи позволяет управлять траекторией полета БПЛА. При этом значащие параметры помехи должны быть как можно более близкими к соответствующим параметрам реальных сигналов СРНС.

Постановка имитационных помех производится в два этапа:

- 1) постановка шумовой помехи, заградительной по каналам СРНС – вызывает «отвязку» АП от текущих сигналов СРНС, прерывание режима слежения и переход в режим обнаружения и поиска сигналов;
- 2) формирование имитирующей помехи с высоким энергетическим потенциалом – вызывает «привязку» АП СРНС к ложным сигналам, с последующим переходом в ложный режим работы.

Результаты теоретических исследований помехоустойчивости АП СРНС GPS, представленные в работе [142], обобщены в таблице 4.1.

Из приведённых в таблице 4.1 результатов следует, что из всех рассматриваемых помех наименьший энергетический потенциал станции РЭП требуется при постановке заградительной имитирующей помехи. При воздействии заградительной имитирующей помехи на канал обнаружения и канал слежения за задержкой вероятность подавления АП СРНС составит порядка 0,9. При постановке шумовой или гармонической помех с энергетическим потенциалом станции РЭП, равным 8,5 дБВт вероятность подавления АП СРНС составит порядка 0,5. С целью увеличения вероятности подавления АП РЭП необходимо при постановке шумовых помех иметь энергетический потенциал станции РЭП порядка 20 дБВт, а при постановке гармонических помех – порядка 25 дБВт [142].

Таблица 4.1 – Результаты исследований подавления каналов АП СРНС при использовании различных типов помех для ситуаций, когда АП функционирует автономно в штатном режиме [142]

Канал АП СРНС	Тип помехи	Вероятность успешного подавления канала АП	Требуемый энергопотенциал станции РЭП, $P_{\text{ПП}}G_{\text{ПП}}$, дБВт
Канал обнаружения	Шумовая	0,5	8,5
	Гармоническая	0,5	8,5
	Заградительная имитирующая	0,67	-3,6...-9,5
Канал слежения за частотой	Шумовая	0,32	19,5
	Гармоническая	0,32	24,4
Канал слежения за задержкой сигнала	Шумовая	0,5	10,4
	Гармоническая	0,5	54
	Заградительная имитирующая	0,67	-3,6...-9,5
Квадратичный детектор	Шумовая	0,1	18,7
	Гармоническая	0,1	18,7

Примечание: дальность между АП СРНС и станцией РЭП – 10 км.

В работах [149, 150] показано, что помехоустойчивость стандартных АП СРНС составляет 34-36 дБ для динамично движущихся АП и 38-40 дБ для слабо динамичных АП.

В работе [151] приведены оценки уровня мощности преднамеренных помех, которые могут быть созданы типовыми средствами РЭП на входе приемника АП СРНС авиационного базирования:

- при высоте полета летно-подъемного средства с АП СРНС 100 м:
 - от наземных средств РЭП: -78...-166 дБВт;
 - от авиационных средств РЭП: -82...-103 дБВт;
 - от тактического БПЛА со средствами РЭП: -94...-96 дБВт;
 - от малогабаритного забрасываемого передатчика помех (ЗПП): -81...-83 дБВт;
- при высоте полета летно-подъемного средства с АП СРНС 5 км:
 - от наземных средств РЭП: -81...-102 дБВт;
 - от авиационных средств РЭП: -82...-103 дБВт;
 - от тактического БПЛА со средствами РЭП: -97...-99 дБВт;
 - от малогабаритного ЗПП: -101...-103 дБВт.

Проведенные испытания АП СРНС отечественного производства «Грот-Н», «Бриз-КМИ», «МРК-32Р», «МРК-33» показали, что при реальной чувствительности приемного устройства -165 дБВт срыв сопровождения наступает при уровне помех на входе -120 дБВт, т.е. превышение помехи над сигналом составляет примерно 40-45 дБ. Это объясняется применением ШПС и их накоплением на интервале времени 1 мс. Результаты этих экспериментальных исследований, в части способности выполнения АП СРНС навигационных

задач в режимах обнаружения и слежения за сигналами СРНС в условиях шумовых и гармонических помех, по данным работ [148, 149, 150], представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значение ОСШ на входе АП СРНС, при котором отсутствует решение навигационной задачи [148, 149, 150]

Виды помехи	Режим работы АП СРНС	Значение ОСШ, дБ
Гармоническая	обнаружение	-36...-46
	слежение	-57...-60
Шумовая широкополосная	обнаружение	-41...-48
	слежение	-44...-49

Более полная информация о РЭП СРНС, а также о помехоустойчивости АП, представлена в работах [140, 142, 151].

Для повышения помехозащищенности АП СРНС в БПЛА могут быть использованы следующие способы и средства [145, 151, 152]:

- использование дальномерных кодов повышенной точности, поступающих по «закрытым» каналам СРНС;
- одновременный прием и обработка в АП сигналов от различных СРНС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo и т.д.);
- пространственная селекция сигналов СРНС;
- комплексирование АП с ИНС;
- предкорреляционная обработка смеси сигналов и помех;
- алгоритмическая посткорреляционная обработка сигналов;
- поляризационная селекция сигналов.

Из указанных способов, помимо комплексирования АП с ИНС (данный способ будет рассмотрен далее), наибольшее распространение получил способ пространственной селекции сигналов СРНС за счет установки на БПЛА фазированной антенной решетки (ФАР). Как показано в работе [153], наличие на БПЛА всего лишь 6 элементов в ФАР позволяет достаточно эффективно формировать «нули» диаграммы направленности антенны (ДНА) в направлении на наземные источники помех и «максимумы» ДНА ФАР – в направлении на космические аппараты СРНС, тем самым обеспечивая пространственную режекцию помех.

4.3.3. Особенности радиоэлектронного подавления интегрированной навигационной системы БПЛА, основанной на комплексировании данных микромеханических инерциальных систем и сигналов СРНС

Выше были рассмотрены навигационные системы самых простых малых БПЛА, основанные на приеме и обработке сигналов СРНС. На более сложных БПЛА устанавливаются элементы автономной навигационной системы – акселерометры, гироскопы, барометры, лазерные высотометры и т.д. Общепринятой

нормой точности авиационных инерциальных ИНС «средней точности» является ошибка счисления пути в 1,85 км за 1 ч полета. Такая точность достигается авиационными ИНС на основе лазерных или волоконно-оптических гироскопов. Однако масса таких ИНС составляет от 8 кг, что делает проблематичным их использование на малых и даже на средних БПЛА.

В результате на малых БПЛА устанавливается более простая ИНС, оснащённая микромеханическими датчиками движения – акселерометрами и гироскопами. Такая ИНС, без ее коррекции по сигналам СРНС, не в состоянии осуществлять автономное счисление пройденного пути ввиду высоких скоростей дрейфа гироскопических датчиков. Накапливаемая ошибка микромеханических ИНС, в условиях отсутствия корректирующих сигналов СРНС, за 1 мин составляет до 3 м по горизонтали и 2 м по вертикали. Таким образом, эти ИНС способны без сигналов СРНС поддерживать приемлемую точность полета на уровне 100-150 м в течении не более 10 мин. При этом, как правило, имеется ввиду поддержание режима прямолинейного полета без ускорений и маневров. Примерами таких образцов микромеханических ИНС могут являться устройства Geo-iNAV (масса порядка 3 кг). Таким образом на современном этапе развития навигационных систем малых БПЛА для счисления пути с приемлемой точностью требуется использование сигналов СРНС [65]. Дополнительными способами повышения автономности и точности навигационных систем БПЛА является установка барометра, радио- или лазерного высотомера. Приблизительный диапазон измерений простого барометрического высотомера для малых БПЛА до 9 км, точность 0,1 м. Диапазон измерений радиовысотомера до 700 м, точность по высоте 2-5%, точность по углу 0,25° [154]. Диапазон измерений лазерного высотомера 0,1-120 м (статические поверхности) и 2-40 м (движущиеся поверхности), разрешение 1 см, точность 0,1 м (объект с 70% светоотражением при 20° С) [159]. Это оборудование позволяет повысить точность определения координат за счет использования дополнительных каналов поступления навигационных данных, а также формировать профили автономного полета БПЛА по электронным картам местности содержащим барометрические данные или высотные профили подстилающей поверхности [66].

Особенности функционирования интегрированных навигационных систем БПЛА рассмотрены в работах [154-158].

В работе [154] показано, что стандартным режимом интегрированной навигационной системы БПЛА, является следующая иерархия обработки навигационных данных (по мере снижения значимости и приоритета источника навигационных данных): «ИНС – СРНС – ОЭС – барометр – радиовысотомер». В случае затрудненного приема сигналов СРНС навигационная система БПЛА переходит в режим «ИНС – ОЭС – барометр – радиовысотомер», причем в этом случае ОЭС может быть использовано как для автономного контроля полета по визуальным ориентирам, так и для организации прямого дистанционного управления оператором по визуальным данным от ОЭС. При отсутствии ОЭС на БПЛА навигационная система переходит в режим «ИНС – барометр – радиовысотомер», для полета по барометрической и электронной карте местности. При этом, как отмечается в работах [156, 160], в настоящее время наблюдается

уход от использования ОЭС для прямого управления БПЛА оператором, в направлении автономного использования ОЭС, а также других радиотехнических средств БПЛА, в режиме SLAM – режим автоматического одновременного построения карты местности в неизвестном пространстве и одновременного контроля текущего местоположения БПЛА, а также счисления пройденного пути.

В работе [157] исследуется функционирование интегрированных навигационных систем в режимах «ИНС – СРНС» и «ИНС – СРНС – АЗН-В», где наземные опорные станции (НОС) АЗН-В формируют своеобразную локальную РСБН. Показано, что в режиме «ИНС – СРНС» при полном созвездии навигационных спутников (4-е и более) обеспечивается погрешность местоопределения БПЛА на уровне 6-8 м. В случае, когда количество видимых навигационных спутников снижается до 2-3, погрешность квазилинейно растет (рис. 4.5) при этом ИНС способна без сигналов СРНС поддерживать приемлемую точность полета на уровне 30 м в течении не более 2-4 мин, на уровне 60 м – в течении 4-6 мин [157].

В режиме «ИНС – СРНС – АЗН-В» интегрированная инерциальная система корректирует показания ИНС как по сигналам СРНС, так и по сигналам наземных опорных станций системы АЗН-В с точно известными координатами. Использование подобного режима позволяет значительно снизить погрешность местоопределения БПЛА. Так, при видимости 2 навигационных спутников и 2 станций АЗН-В погрешность местоопределения снижается до 18-20 м (рис. 4.6). Фактически станции АЗН-В создают избыточность псевдодальномерных наблюдений и компенсируют отсутствие видимости полного созвездия спутников СРНС. В целом интегральные навигационные системы БПЛА в режиме «ИНС – СРНС – АЗН-В» обеспечивают точность навигации 16-18 м [157]. Такой подход к повышению точности интегрированных навигационных систем БПЛА за счет внешних источников псевдодальномерных сигналов схож с предложениями по созданию локальных РСБН, представленных в работах [66, 68].

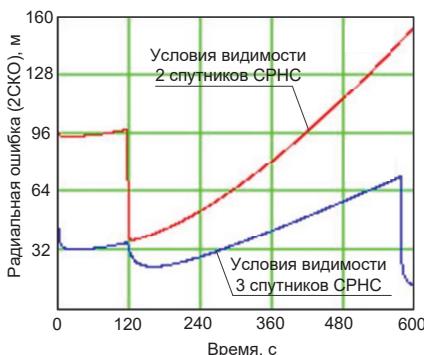


Рис. 4.5. Ошибка оценки координат в режиме «ИНС – СРНС» при видимости 2, 3 навигационных спутников СРНС [157]

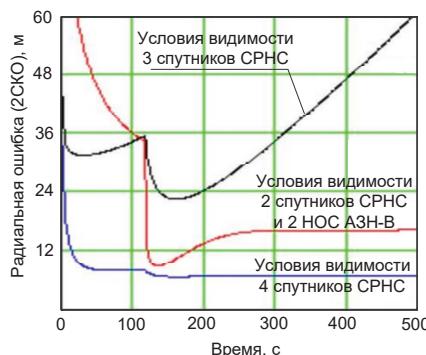


Рис. 4.6. Ошибка оценки координат в режиме «ИНС – СРНС – АЗН-В» при видимости 2, 3, 4 навигационных спутников СРНС и 2 НОС АЗН-В [157]

В работе [158] исследуется функционирование интегрированной навигационной системы «ИНС – СРНС» в зависимости от ОСШ сигналов СРНС на приемнике АП. Результаты этого исследования приведены на рис. 4.7.

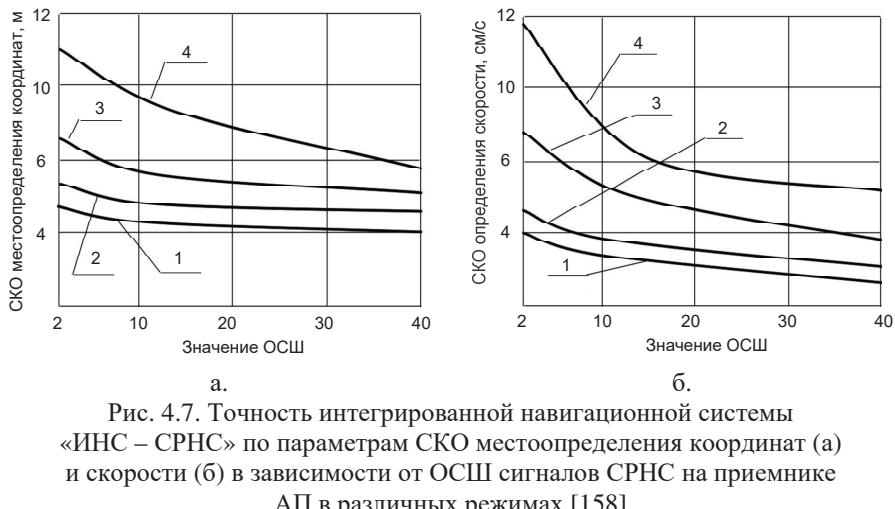


Рис. 4.7. Точность интегрированной навигационной системы «ИНС – СРНС» по параметрам СКО местоопределения координат (а) и скорости (б) в зависимости от ОСШ сигналов СРНС на приемнике АП в различных режимах [158]

Обозначения цифрами на рис. 4.7 соответствуют следующим режимам комплексирования данных в навигационной системе:

- 1) режим, при котором данные от ИНС комплексируются с сигналами АП СРНС, после чего осуществляется их одноэтапная обработка без разделения на первичную и вторичную;
- 2) режим, при котором в АП СРНС производится разделение обработки на первичную и вторичную, а комплексирование с данными ИНС осуществляется на уровне вторичной обработки;
- 3) режим с одноэтапной обработкой сигналов в АП СРНС без комплексирования ее с ИНС;
- 4) режим с двухэтапной обработкой сигналов в АП СРНС без комплексирования ее с ИНС.

Результаты данных исследований показывают, что снижение ОСШ на входе АП СРНС отражаются на текущей точности интегрированных навигационных систем БПЛА. Причем наибольшую точность и устойчивость к снижению ОСШ на входе АП СРНС демонстрирует режим, при котором данные от ИНС комплексируются с сигналами СРНС, после чего осуществляется их одноэтапная обработка без разделения на первичную и вторичную обработку [158].

Подробные теоретические исследования помехозащищенности навигационной системы в режиме «ИНС – СРНС» представлены в работе [142]. Результаты этих исследований относительно АП СРНС GPS обобщены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты исследований подавления каналов АП СРНС при использовании различных типов помех для ситуаций, когда АП СРНС GPS функционирует интегрированно с ИНС [142]

Канал АП СРНС	Тип помехи	Вероятность успешного подавления канала АП	Требуемый энергопотенциал станции РЭП, $P_{\text{пп}}G_{\text{пп}}$, дБВт
Канал обнаружения	Шумовая	0,745	16,5
	Гармоническая	0,745	16,5
	Заградительная имитирующая	0,67	-3,6...-9,5
Канал слежения за частотой	Шумовая	0,32	36,5
	Гармоническая	0,32	41,4
Канал слежения за задержкой сигнала	Шумовая	0,5	50,4
	Гармоническая	0,5	94
	Заградительная имитирующая	0,67	-3,6...-9,5
Квадратичный детектор	Шумовая	0,1	28,7
	Гармоническая	0,1	28,7

Примечание: дальность между АП СРНС и станцией РЭП – 10 км.

Из приведённых в таблице 4.3 результатов следует, что из всех рассматриваемых помех наименьший энергетический потенциал требуется при постановке заградительной имитирующей помехи. При постановке шумовой и гармонической помех в случае использования комплексирования АП СРНС с ИНС требуется дополнительное увеличение энергетического потенциала станции РЭП для обеспечения вероятности подавления до $P_{\text{n}}=0,5$ на 8 дБВт, а для $P_{\text{n}} \rightarrow 1$ на 15-20 дБВт [142].

Сравнительный анализ вероятности подавления АП СРНС интегрированного с ИНС с использованием шумовых, гармонических и заградительной имитационной помех позволяет однозначный вывод о целесообразности перехода от «силовых» помех (шумовых и гармонических) к имитационным помехам, навязывающим навигационной системе ложный режим работы по определению местоположения БПЛА и траектории его полета.

В работе [155] исследовались различные варианты реакции интегрированных навигационных систем «ИНС – СРНС» на постановку имитационных помех. Показано, что для обеспечения наилучшего навязывания БПЛА ложной траектории параметры имитационных помех, навязываемое ложное местоположение, а также ложная траектория должны быть согласованы с такими параметрами как: текущее местоположение БПЛА, скорость его полета, дальность до цели, величина требуемого отклонения от цели, и самое главное – функция дрейфа датчиков микромеханических ИНС, при отсутствии сигналов СРНС. Формирование такого индивидуального режима подавления для каждого БПЛА требует, чтобы в формируемых имитационных помехах для АП СРНС учитывалась нарастающая ошибка ИНС. Это позволяет «мягко» перевести БПЛА на

нужную траекторию, при этом на начальном этапе постановки таких интеллектуальных имитационных помех, между данными ложных сигналов СРНС и ИНС не будет наблюдаться критического рассогласования, что исключит переход навигационной системы в режимы навигации без использования СРНС (например, в режим «ИНС – ОЭС – барометр – радиовысотомер»). Это позволит «привязать» БПЛА к ложным сигналам СРНС, а затем сформировать ложную траекторию с учетом дрейфа показаний ИНС во времени. Вместе с тем, практическая реализация такого многопараметрического индивидуального режима помех для каждого БПЛА, представляет собой сложнейшую научно-техническую задачу, которая до сих пор не решена.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что подавление интегрированных навигационных систем БПЛА в режиме «ИНС – СРНС» является принципиально возможным. Однако такое подавление требует создания территориально-распределенной группировки станций РЭП работающих в режиме псевдо-спутников, при этом формируемые имитационные помехи, навязывающие ложную траекторию полета, должны учитывать диапазоны дрейфа гироскопических датчиков ИНС, а также индивидуальный режим полета каждого подавляемого БПЛА. Использование же энергетических помех (шумовых и заградительных) для нарушения функционирования интегрированной навигационной системы БПЛА сопряжено с необходимостью формирования высокоенергетических помех, при этом применение таких помех обладает потенциально низкой результативностью.

4.3.4. Возможности акустического подавления автономной навигационной системы БПЛА, основанной на микромеханических инерциальных системах

Одним из относительно новых способов нарушения нормального функционирования навигационной системы БПЛА является воздействие на его автономную ИНС акустическими колебаниями. В работе [19] показано, что для противодействия БПЛА, оснащенных автономными ИНС с микромеханическими датчиками, можно использовать мощные акустические колебания, негативно влияющие на дрейф гироскопических датчиков из-за эффекта резонанса.

Исследования, проведенные учеными из южнокорейского института Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) [161], показали, что будучи механической системой, гироскоп имеет свою резонансную частоту. Следовательно, подобранное по частоте акустическое воздействие может вызвать резонанс в гироскопе, что приведет к его неправильной работе и, как следствие, к выдаче ошибочных показаний о местоположении БПЛА. Эксперименты, проведенные исследователями из KAIST, показали, что 7 моделей гироскопов из 15 наиболее часто используемых в коммерческих малых БПЛА подвержены резонансу. По результатам дальнейших расчетов учеными были сделаны следующие выводы – звукового воздействия мощностью порядка 140 дБ на резонансной частоте гироскопа достаточно, чтобы нарушить работу этого прибора на расстоянии до 40 м от источника звукового сигнала.

Важно отметить, что акустическое воздействие на гироскопы, во-первых, будет эффективно только против малых БПЛА, во-вторых, такое воздействие не всегда приводит к значительной дестабилизации БПЛА. Это связано с тем, что в некоторых гироскопах звуковое колебание влияет только на канал ориентации в горизонтальной плоскости, который в ряде моделей БПЛА продублирован магнитометром для лучшей стабилизации полета. В этом случае эффективность технических средств противодействия БПЛА, основанных на способе акустического воздействия, существенно снижаются [19]. Кроме того, само формирование акустических помех на уровне 120-140 дБ, что соответствует болевому порогу или контузии человека, фактически невозможно в населенной местности, а также в составе комплексов, в которые входят люди-операторы. В связи с этим применение данного способа подавления на практике весьма затруднено.

4.4. Радиоэлектронное подавление радиолиний управления и передачи данных БПЛА

4.4.1. Проблемные вопросы радиоэлектронного подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА

Нужно отметить, что в сравнении с задачей радиоэлектронного подавления навигационной системы БПЛА, задача подавления радиолиний «ПУ – БПЛА» и «БПЛА – ПУ» не является принципиально новой и фактически сводится к известной задаче формирования на входе подавляемого приемника средства связи такого значения ОСШ, которое не позволяет обеспечить прием данных с требуемой степенью достоверности. Данная задача является классической в теории РЭП, а особенностью ее решения, применительно к БПЛА, является учет используемых в радиолиниях типов сигнально-кодовых конструкций, типов передаваемых данных (тип передаваемых данных определяет требуемый уровень достоверности приема), а также сигнальных, энергетических, пространственных и прочих параметров радиолиний.

При рассмотрении вопросов подавления КРУ и каналов передачи данных БПЛА необходимо учитывать, что подсистема управления и радиосвязи БПЛА представляет собой совокупность различных линий, в которых предаются данные принципиально различного типа, уровня важности, объема, уровня криптозащиты и т.д.

Для управления и обмена данными с БПЛА организуются следующие направления связи:

- направление «вверх» – организуется от ПУ к БПЛА и включает в себя:
 - направление «вверх» КРУ для передачи команд управления БПЛА, а также команд управления специальной аппаратурой и техническими средствами полезной нагрузки, размещенными на БПЛА;
- направление «вниз» – организуется от БПЛА к ПУ и включает в себя:
 - направление «вниз» КРУ для передачи телеметрической информации (ТМИ) о состоянии подсистем БПЛА, специальной аппа-

ратуры и технических средств полезной нагрузки, а также квантаций о выполнении команд управления;

- высокоскоростная линия передачи данных от специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, размещенных на БПЛА.

Вышеуказанные линии связи могут организовываться в различных частотных диапазонах, использовать различные режимы с ретрансляцией и без неё, использовать различные сигнально-кодовые конструкции, специально адаптированные под тип и важность передаваемых данных.

Наиболее критичным элементом для функционирования БПЛА является КРУ. Именно подавление КРУ по направлению «вверх» способно обеспечить максимальный эффект с точки зрения нарушения нормального функционирования БПЛА. Вместе с тем при решении данной задачи встречается ряд трудностей:

- вскрытие параметров линии КРУ «вверх» требует наблюдения за ПУ, при этом ПУ может находиться на существенном удалении от средств РЭП (до 30-50 км) и использовать для организации связи антеннную систему с остронаправленной ДНА (порядка 5-10°) и с подавлением боковых лепестков, что резко снижает возможности средств РРТР в составе комплекса РЭП по вскрытию параметров КРУ БПЛА значимых для ее подавления;
- варианты организации КРУ на одних и тех же частотах в дуплексном режиме встречаются исключительно на простых малых БПЛА. Достаточно часто встречающимся вариантом организации КРУ для БПЛА специального назначения является формирование направлений «вверх» и «вниз» не только на различных частотах, но даже в различных частотных диапазонах (L, C, S, Ku диапазоны), и с различными частотно-временными параметрами. В результате успешное вскрытие параметров КРУ «вниз», при подлете БПЛА к контролируемому рубежу, не позволяет сформировать целеуказания средствам РЭП для подавления КРУ в направлении «вверх»;
- в КРУ, как в наиболее важном элементе системы управления БПЛА, широко используются различные способы повышения помехозащищенности: ШПС, автоматическая перестройка частоты на наименее пораженные помехами каналы, использование режима ППРЧ, резервирование каналов, многократное дублирование команд управления и передаваемых ТМИ, использование антенн с направленными ДНА, высокий уровень криптозащиты передаваемых данных и т.д.

Однако первостепенными являются не эти трудности, а то, что даже успешное вскрытие и подавление КРУ не гарантирует, что БПЛА прекратит свой полет в направлении контролируемой зоны. Как правило при отсутствии внешнего управления, БПЛА переходит в автономный режим, при этом его действия в этом режиме полностью определяются предварительно заложенной программой автономного полета. При этом сутью программы может быть не «возврат к ПУ», а продолжение дальнейшего полета к контролируемому объекту и выполнение целевой задачи с использованием всех доступных способов

навигации. Для БПЛА, используемых в незаконных или военных целях, именно эта программа реализуется чаще всего. Таким образом, подавление КРУ может снизить вероятность успешного выполнения БПЛА целевой задачи, но не гарантирует каких-либо однозначных действий по прекращению полета БПЛА в направлении контролируемого рубежа, активации «программы возвращения» или «программы посадки» и т.д. Именно отсутствие однозначной реакции БПЛА на успешное подавление КРУ является существенным недостатком комплексов противодействия БПЛА основанным исключительно на РЭП.

Следующей по важности радиолинией БПЛА, которая является уязвимой для средств РЭП, является линия «вниз» в направлении «БПЛА – ПУ», предназначенная для передачи данных от специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, размещенных на БПЛА. Дело в том, что довольно распространенным способом управления БПЛА остается режим ручного управления им со стороны оператора по визуальным данным от ОЭС видимого диапазона. Особенностью этой линии является следующее. Передаваемые от ОЭС на ПУ видеоданные имеют большой объем, требуют широкой полосы частот для передачи, и в связи с их высокими скоростями и необходимостью передачи в режиме реального времени, могут не подвергаться криптозащите даже на БПЛА специального и военного назначения. При этом сложность организации на БПЛА большеразмерных остронаправленных антенных систем, ведет к тому, что зачастую эти данные передаются либо через всенаправленную антенну, либо через антенну с широким главным лепестком ДНА (порядка 60-90°). Это позволяет относительно легко не только вскрывать сигнально-частотные параметры данной линии связи, но и получать доступ к передаваемым видеоданным. Подавление такой линии потенциально бы позволило лишить оператора визуальной обратной связи, и принудить его управлять БПЛА, так сказать, «по приборам» т.е. только по данным ТМИ поступающим по КРУ «вниз», что резко бы снизило эффективность и эргономичность управления. Вместе с тем высокоеэффективное подавление этой линии связи требует знания местоположения ПУ или промежуточного узла-ретранслятора, используемых для управления БПЛА. При этом высота полета БПЛА, а также возможность размещения ПУ или узлов-ретрансляторов на летно-подъемных средствах, потенциально обеспечивают больший радиогоризонт и, как следствие, более высокую дальность организации связи прямой видимости, чем дальность действия наземных средств РЭП. В результате весьма вероятна ситуация, когда при наличии полной информации о сигнально-частотных параметрах линии «вниз» будет невозможно подавить ПУ и узлы-ретрансляторы, ввиду их пространственной недоступности для наземных средств РЭП.

Вышеуказанное относится к подавляющему числу БПЛА и является фундаментальными ограничениями, накладываемыми на эффективность существующих комплексов РЭП, ориентированных на противодействие БПЛА-

Далее будут более подробно рассмотрены различные технические аспекты проблематики подавления каналов управления и связи с БПЛА, при этом большее внимание будет уделено вопросам подавления каналов малых БПЛА, как наиболее опасных и сложных объектов для противодействия.

4.4.2. Особенности организации связи в командной радиолинии управления БПЛА

Командная радиолиния управления в направлениях «вверх» и «вниз» предназначена для передачи наиболее критических данных для процесса нормального управления полетом БПЛА: команд управления с ПУ и квитанций об их исполнении, программ полета, программ действий в автономном режиме, навигационных и специальных данных, обеспечивающих нормальное функционирование БПЛА, а также ТМИ о состоянии отдельных подсистем, остатке топлива и т.д. Указанные данные, как правило, имеют относительно малый объем и требуемую скорость передачи (порядка 2,4-200 кбит/с), однако, должны передаваться в масштабе реального времени.

Для больших и средних БПЛА специального и военного назначения, как правило КРУ организуется в режиме прямой видимости с наземным или воздушным ПУ, а при значительном удалении ПУ – ретрансляцией через узел-ретранслятор на летно-подъёмном средстве или через ССС. Для малых БПЛА как специального, так и коммерческого назначения КРУ организуется в режиме прямой видимости с наземным ПУ.

4.4.2.1. Специальные и военные БПЛА

Обобщая материалы работ [164-207] возможно сформировать следующие обобщенные ТТХ КРУ специальных и военных БПЛА, значимых для радиоэлектронного подавления.

При организации КРУ специальных и военных больших и средних БПЛА через ССС, как правило, используются ССС Iridum, Inmarsat, MOUS, WGS, при этом линии связи формируются в УКВ, L, X, Ku, Ka диапазонах. В УКВ диапазоне используются низкоскоростные каналы шириной по 25 кГц с QPSK сигналами. В L, Ku, X и Ka диапазонах производится «упаковка» КРУ в широкополосный общий спутниковый канал ССС (например, ССС Iridium, Inmarsat или WGS), на основе кодового (CDMA – Code Division Multiple Access) или частотно-временного (MF-TDMA – Multi-Frequency Time-Division Multiple Access) разделения абонентов с использованием BPSK, QPSK, 8PSK, 8QAM сигналов. Ширина главного лепестка ДНА спутниковой связи на БПЛА составляет порядка 10-35° [209].

Для управления специальными и военными малыми БПЛА (например, такими как RQ-7B Shadow 200, RQ-11B Raven, RQ-16T-Hawk и др.), как правило, организуется КРУ в режиме прямой видимости с наземным ПУ или с узлом-ретрансляции:

- каналы в L (1,4-1,85 ГГц), S (2,2-2,5 ГГц), C (4,4-5,85 ГГц), и Ku (15,15-15,35 / 14,4-14,83 ГГц) диапазонах – основные каналы КРУ;
- в УКВ диапазоне (220-400 МГц) – резервные каналы КРУ;
- спутниковый канал (как правило используется низкоорбитальная ССС Iridium обеспечивающая возможность использованием небольших антенн) L-диапазона (1,616-1,6265 ГГц) – резервный канал КРУ, устанавливаемый опционально на отдельных БПЛА.

Ширина каналов:

- канал «вверх» в L, S, C и Ku диапазонах: в режиме фиксированной частоты – 300-700 кГц; в режиме ШПС – 0,7-28 МГц;
- канал «вниз» в L, S, C и Ku диапазонах: 3-20 МГц;
- каналы «вверх»/«вниз» в УКВ диапазоне: 25 кГц.

Скорости передачи данных в КРУ:

- до 20 кбит/с – в линии «вверх»; 200 кбит/с – в линии «вниз» (при передаче только ТМИ); 1,6-12 Мбит/с – в линии «вниз» (при передаче ТМИ совместно с данными от ОЭС БПЛА для визуального управления оператором) в L, S, C и Ku диапазонах;
- 2,4-16 кбит/с в линиях «вверх»/«вниз» в УКВ диапазоне;
- до 2,4 кбит/с в линиях «вверх»/«вниз» по спутниковой линии L диапазона (для ССС Iridium).

Мощности передатчиков:

- в L, C, S, Ku диапазоне в каналах «вверх»/«вниз»: 5-15 Вт;
- в УКВ диапазоне в каналах «вверх»/«вниз»: 15-25 Вт.

Используемые типы сигналов: BPSK, QPSK (DQPSK, SOQPSK), 2FSK, GMSK. Возможно использование режима ППРЧ в пределах разрешенной к использованию полосы частот в S, C и Ku диапазонах (например, встречаются варианты организации КРУ БПЛА с использованием режима ППРЧ по 10 каналам шириной по 4 МГц каждый в общей полосе 40 МГц). Тип помехоустойчивого кодирования: коды Рида-Соломона, сверточное кодирование, кодирование Виттерби, турбо-кодирование, LDPC-кодирование. Скорости кода $R=1/2$, $2/3$, $3/4$. Типы многостанционного доступа: «точка-точка», многостанционный доступ БПЛА в режимах частотного (FDMA – Frequency Division Multiple Access) и временного (TDMA – Time-Division Multiple Access) разделения абонентов.

На БПЛА, стоящих на вооружении стран НАТО, формат данных КРУ, порядок передачи и обработки команд определяется стандартами STANAG: 4586, 4660 и 7085.

Для криптографической защиты данных в КРУ специализированных и военных БПЛА используется шифрование в соответствии со стандартами: MIL-STD-188-181A, MIL-STD-188-183, NSA Type I, Triple DES, AES-128, AES-256.

На БПЛА используются либо всенаправленные антенны, либо направленные антенны с шириной ДНА порядка $60\text{-}90^\circ$ и усилением 2-4 дБи. Наземные ПУ используют следящие за БПЛА поворотные антенны диаметром до 1,2 м с усилением до 40 дБи с остронаправленной ДНА до $3,5\text{-}5^\circ$.

Дальность связи:

- в направлении ПУ – БПЛА с использованием направленных антенн на ПУ: до 75 км;
- в направлении ПУ – БПЛА / ПУ – БПЛА с использованием ненаправленных антенн: до 15 км;
- в направлении БПЛА – ПУ с использованием направленных антенн на БПЛА и ПУ: до 55 км.

4.4.2.2. Коммерческие БПЛА

Обобщая материалы работ [162-208] возможно сформировать следующие обобщенные ТТХ КРУ малых коммерческих БПЛА, значимых для радиоэлектронного подавления.

Для коммерческих малых БПЛА, направления «вверх» / «вниз» КРУ организуются в фиксированных частотных диапазонах, которые, как правило, соответствуют использованию на БПЛА одной или нескольких коммерческих технологий связи:

- RC433: 433 МГц;
- сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
- сети CDMA: 850-894 МГц;
- RC868: 868-916 МГц;
- GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
- GSM1800: 1710-1880 МГц;
- сети 3G: 2110-2170 МГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
- сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц.

Используемые типовые частоты, ширина типовых каналов, типы сигналов и помехоустойчивого кодирования, мощности передатчиков и ТТХ приемных средств определяются соответствующими стандартами на вышеуказанные технологии связи.

Данные по наиболее распространённым стандартам Wi-Fi, используемым для управления малыми коммерческими БПЛА, представлены в таблице 4.4.

Особенностью организации канала «вниз» КРУ в малых коммерческих БПЛА является, то, что фактически сам канал отсутствует, а роль ТМИ от БПЛА выполняют видеоданные, поступающие от ОЭС БПЛА и предназначенные для визуального управления со стороны оператора.

ТТХ каналаобразующей аппаратуры различных КРУ малых коммерческих БПЛА представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.4 – Данные по наиболее распространенным стандартам Wi-Fi, используемым для управления коммерческими малыми БПЛА

Характеристика	Wi-Fi IEEE 802.11b	Wi-Fi IEEE 802.11g	Wi-Fi IEEE 802.11n
Диапазон частот, ГГц	S (2,4-2,483)	S (2,4-2,483)	S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)
Ширина канала, МГц	22	22	20, 40
Мощность передатчика, дБм	до 20	до 20	до 20
Технология разделения каналов	FDMA	FDMA, OFDM	FDMA, OFDM
Используемые сигналы	DBPSK, DQPSK	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM

Характеристика	Wi-Fi IEEE 802.11b	Wi-Fi IEEE 802.11g	Wi-Fi IEEE 802.11n
Помехоустойчивое кодирование	код Баркера, комплементарные последовательности, сверточное кодирование		сверточное кодирование $R=5/6$
Скорость передачи данных, Мбит/с	до 11	до 54	до 100
Дополнительные технологии помехозащиты	Стандартом предусмотрена возможность использования DSSS и ППРЧ		Стандартом предусмотрена возможность использования HR-DSSS и MIMO
Шифрование (опционально)*	WEP, WPA, DES, AES-128, AES-256		

*Шифрование данных в коммерческих БПЛА может не использоваться.

Таблица 4.5 – ТТХ каналаобразующей аппаратуры различных КРУ малых коммерческих БПЛА [208]

Параметр	Значения параметров				
Наименование КРУ	3D Link	Skyhopper PRO	Picoradio OEM	SOLO7	J11
Производитель, страна	Geoscan, РФ	Mobilicom, Израиль	Airborne Innovation, Канада	DTC, Великобритания	Redess, Китай
Диапазон частот, ГГц			S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)		
Дальность связи, км	20-60	5	н/д	н/д	10-20
Скорость передачи данных, Мбит/с	0,023-64,9	1,6-6	0,78-28	0,144-31,668	1,5-6
Задержка передачи данных, мс	1-20	25	н/д	15-100	15-30
Мощность передатчика, дБм	25	н/д	27-30	20	30
Чувствительность приемника, дБм:	-78,6... -122	-101	-76... -101	-95... -104	-90... -97
Энергетический бюджет КРУ, дБ	103-147	н/д	103-131	н/д	120-127
Поддерживаемые полосы частот, МГц	4-20	4,5; 8,5	2; 4; 8	0,625; 1,25; 2,5; 6; 7; 8	2; 4; 8
Режим организации связи	Дуплекс	Дуплекс	Дуплекс	Симплекс	Дуплекс
Поддержка разнесенного приема	да	да	да	да	да
Отдельный канал для управления/телеметрии	да	да	да	нет	да
Используемые протоколы управления БПЛА в КРУ / ТМИ	MAVLink, проприетарные	MAVLink, проприетарные	нет	нет	MAVLink
Поддержка мультиплексирования в канале КРУ / ТМИ	да	да	нет	нет	н/д
Используемые сетевые топологии:					

Параметр	Значения параметров				
Наименование КРУ	3D Link	Skyhopper PRO	Picoradio OEM	SOLO7	J11
«точка – точка»	да	да	да	да	да
«точка – многоточка»	да	да	да	нет	да
ретрансляция данных	да	да	да	нет	да
Средства повышения помехозащищенности	DSSS, подавители узко-полосных и импульсных помех	н/д	н/д	н/д	н/д
Энергопотребление блока связи на БПЛА, Вт	6-7	н/д	4,8	4,5-7	8
Энергопотребление блока связи на ПУ, Вт	7	н/д	4,8	8	5
Габариты бортового блока, длина × ширина × высота, мм	77×45×25	74×54×26	40×40×10 (без корпуса)	67×68×22	76×48×20
Масса бортового блока, г	89	105	17,6 (без корпуса)	135	88

Примечание: н/д – нет данных.

4.4.3. Особенности организации связи в радиолиниях передачи данных с БПЛА

При организации линий передачи данных «вниз» по направлению «БПЛА – ПУ» необходимо учитывать следующие особенности:

- специальная аппаратура и технические средства полезной нагрузки, размещенные на БПЛА, формируют потоки данных значительного объема (таблица 4.6), при этом, в большинстве случаев передачу этих данных необходимо вести в режиме времени близком к реальному (например, видеоданные от ОЭС БПЛА зачастую используются оператором для управления БПЛА в ручном режиме);
- большой объем формируемых данных, а также ограниченность доступного частотного ресурса предопределяет необходимость использования различных способов и технологий оптимизации пропускной способности и повышения скорости линии передачи данных: использование технологии адаптивной смены сигнально-кодовых конструкций ACM (Adaptive Coding and Modulation); технологий спектрального уплотнения OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), технологий сжатия данных на борту. При этом небольшие габариты БПЛА препятствуют размещению на нем направленных антенных систем с относительно высоким коэффициентом усиления, однако возможно использование антенных систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) на основе нескольких простых антенн;
- большой объем формируемых данных, необходимость их передачи в режиме реального времени, а также отсутствие высокопроизводительной аппаратуры шифрования на борту БПЛА, предопределяет использование либо низкого уровня криптозащиты, либо ее полное отсутствие.

Таблица 4.6 – Приблизительные оценки интенсивности потоков данных, формируемых специальной аппаратурой и техническими средствами полезной нагрузки БПЛА

Технические средства полезной нагрузки	Кол-во источников данных на БПЛА	Интенсивность потока данных от одного источника без сжатия	Интенсивность потока данных от одного источника с учетом предварительного сжатия
ТВ-камера	1-4	10-150 Мбит/с	2-6 Мбит/с
Фото-камера	1-4	до 20 Мбит/с	до 4 Мбит/с
Тепловизионная аппаратура	1-4	до 0,5 Мбит/с	до 0,5 Мбит/с
Лазерная аппаратура	1	до 0,5 Мбит/с	до 0,5 Мбит/с
РЛС	1	5-200 Мбит/с	до 10 Мбит/с
РРТР аппаратура (с обработкой сигналов РЛС на борту)	1	до 5 Мбит/с	0,2-1 Мбит/с

4.4.3.1. Специальные и военные БПЛА

Обобщая материалы работ [162-207, 209] возможно сформировать следующие обобщенные ТТХ радиолиний передачи данных со специальных и военных БПЛА, значимых для их радиоэлектронного подавления.

Для передачи данных с больших и средних БПЛА специального и военного назначения через ССС, как правило, используются ССС WGS и Inmarsat, а также другие совместимые с ними по режимам организации связи широкополосные ССС. Линия связи «вниз» с ретрансляцией через ССС, как правило, формируется в Ка диапазоне (30-31 / 20,2-21,2 ГГц) в полосе частот 125 МГц, в которой требуемая полоса частот выделяется подканалами с шириной 2,6 МГц. Это позволяет гибко формировать требуемую пропускную способность линии, обеспечивая скорости передачи 10-137 Мбит/с. Ширина главного лепестка ДНА спутниковой связи на БПЛА составляет 10-35° [209].

Для высокоскоростного получения данных со специальных и военных малых БПЛА (например, таких как RQ-7B Shadow 200, RQ-11B Raven, RQ-16T-Hawk и др.), как правило, организуется высокоскоростная линия связи в режиме прямой видимости (без ретрансляции) с наземным ПУ в S (2,2-2,5 ГГц), C (4,4-5,85 ГГц), и Ku (15,15-15,35 / 14,4-14,83 ГГц) диапазонах. Ширина линии связи 3-40 МГц. Типовые скорости передачи данных 1,6-12 Мбит/с, при использовании режима частотного ортогонального уплотнения OFDM совместно с QAM сигналами скорость передачи данных повышается до 45 Мбит/с.

Используемые типы сигналов: BPSK, QPSK (DQPSK, SQPSK), FSK, GMSK, QAM (16QAM, 64QAM). Тип помехоустойчивого кодирования: коды Рида-Соломона, сверточное кодирование, кодирование Витерби, турбо-кодирование, LDPC-кодирование, со скоростями кода $R=1/2, 2/3, 3/4$. Типы многостанционного доступа: «точка-точка», многостанционный доступ БПЛА в режимах частотного (FDMA – Frequency Division Multiple Access) и временного (TDMA – Time-Division Multiple Access) разделения абонентов.

Компрессия видеоданных, поступающих от ОЭС БПЛА: MPEG-2/4, H.264.

Стандарты «упаковки» передаваемой информации: DVB, DVB-S1/S2, DVB-T1/T2.

Для криптографической защиты передаваемых данных может использоваться шифрование по стандартам: NSA Type 1, AES-128, AES-256. При отсутствии на БПЛА средств высокоскоростного шифрования данные от БПЛА передаются без криптозащиты.

На БПЛА, стоящих на вооружении стран НАТО, формат данных полезной нагрузки, порядок их передачи и обработки определяется стандартами STANAG: 4545, 4559, 4575, 4607, 4609, 7023, 7085.

На БПЛА используются либо всенаправленные антенны, либо направленные антенны с шириной ДНА порядка 60-90° и усилением 2-4 дБи. Наземные ПУ используют следящие за БПЛА поворотные антенны диаметром до 1,2 м с усилением до 40 дБи с остронаправленной ДНА до 3,5-5°.

Мощности передатчиков БПЛА и ПУ составляют порядка 5-15 Вт.

Дальность связи:

- в направлении ПУ – БПЛА с использованием направленных антенн на ПУ: до 75 км;
- в направлении ПУ – БПЛА / ПУ – БПЛА с использованием неправленных антенн: до 15 км;
- в направлении БПЛА – ПУ с использованием направленных антенн на БПЛА и ПУ: до 55 км.

4.4.3.2. Коммерческие БПЛА

Обобщая материалы работ [162-208] возможно сформировать следующие обобщенные ТТХ радиолиний передачи данных с коммерческих малых БПЛА, значимых для их радиоэлектронного подавления.

Для коммерческих малых БПЛА, направления «вверх» / «вниз» КРУ организуются в фиксированных частотных диапазонах, которые, как правило, соответствуют использованию на БПЛА одной или нескольких коммерческих технологий связи:

- RC433: 433 МГц;
- сети 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц;
- сети CDMA: 850-894 МГц;
- RC868: 868-916 МГц;
- GSM900: 890-915, 935-960 МГц;
- GSM1800: 1710-1880 МГц;
- сети 3G: 2110-2170 МГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;
- сети 4G: 2,5-2,7 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;
- сети Wi-Fi на базовой частоте 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц.

Используемые типовые частоты, ширина типовых каналов, типы сигналов и помехоустойчивого кодирования, мощности передатчиков и ТТХ приемных средств определяются соответствующими стандартами на вышеуказанные технологии связи и соответствуют ТТХ, представленным выше для КРУ на основе технологии Wi-Fi (таблицы 4.4-4.5).

Основным типом данных, передаваемых по каналу «вниз» являются видеоданные, поступающие от ОЭС БПЛА и предназначенные для визуального управления со стороны оператора. Формат передаваемых видеоданных: MPEG-2/4, MPEG-TS, H.264.

Для передачи видеоданных, а также мультиплексирования видеоданных и ТМИ, помимо радиолиний на основе Wi-Fi могут использоваться радиолинии на основе стандартов DVB, предназначенных для цифрового телевизионного вещания: DVB-T1/T2 или DVB-S2 (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – ТТХ радиолиний на основе стандартов DVB

Характеристика	DVB-T1	DVB-T2	DVB-S2
Диапазон частот, ГГц		S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)	
Ширина канала, МГц	6; 7; 8	1,7; 5; 6; 7; 8; 10	36
Технология разделения/уплотнения каналов	FDMA, OFDM		FDMA
Используемые сигналы	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK
Помехоустойчивое кодирование	FEC, PC	FEC, LDCP-код, БЧХ	FEC, LDCP-код
Скорость кода	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6	1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10
Скорость передачи данных, Мбит/с	до 31,67	до 50,34	
Технологии помехозащиты	ACM	ACM	ACM (прием до – 2,4 дБ)
Инкапсуляция данных	MPEG-TS	MPEG-4, GTS, PLP	MPEG-4, PLP

Для передачи высокоскоростных потоков основным требованием является энергетическая эффективность, поэтому в условиях многолучевого распространения, в последнее время, предпочтение отдается технологии DVB-T2 (с использованием OFDM), как наиболее устойчивой к межсимвольной интерференции, потери от которой могут достигать 10 дБ. При этом значительный пик-фактор, свойственный радиосигналу DVB-T2 с множеством ортогональных несущих, компенсируется умеренными требованиями к средней выходной мощности передающего устройства.

4.4.4. Особенности радиоэлектронного подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА

Эффективность подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА определяется следующими факторами:

- условиями распространения радиоволн на трассе радиолиний БПЛА – ПУ, а также на трассе радиоподавления;
- энергетической, временной и пространственной доступностью приемников средств связи на БПЛА и ПУ для средств РЭП, а также их чувствительностью;

- мощностью передатчиков средств связи БПЛА и ПУ, а также средств РЭП;
- типом антенных систем, взаимной ориентацией ДНА средств связи БПЛА и ПУ, а также средств РЭП;
- используемыми для передачи шириной полосы частот, типом сигнала, типом помехоустойчивого кодирования, скоростью кода.

Для подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА используются следующие типы помех (рис. 4.1).

1. Помехи, перекрывающие рабочий диапазон частот, предположительно используемый для организации связи с БПЛА. Данный тип помех используется при отражении массированного налета БПЛА, когда невозможно вскрыть параметры частных КРУ отдельных БПЛА и требуется перекрыть весь используемый диапазон частот, или же при невозможности средствами РРТР вскрыть частотные параметры линий связи.

К таким помехам относятся:

- заградительная шумовая помеха (белый шум высокой мощности) во всем диапазоне частот;
- узкополосная шумовая или гармоническая (одночастотное или модулированное гармоническое колебание) помеха, скользящая по диапазону частот.

2. Помехи, прицельные по частоте линий управления и связи БПЛА. Данный тип помех используется при подавлении одиночных БПЛА или группы БПЛА, управляемых по одной КРУ, когда средствами РРТР достоверно вскрыты частотные параметры линий связи. К таким помехам относятся:

- шумовая помеха, прицельная по частоте линии связи;
- гармоническая помеха, прицельная по частоте линии связи;
- узкополосная шумовая или гармоническая помеха, скользящая по используемому диапазону частот (при использовании линий связи с ШПС или ППРЧ);
- имитирующая помеха, прицельная по частоте линии связи и структуре передаваемых сигналов (имитирует структуру сигналов линии связи);
- имитирующая помеха, прицельная по частоте и структуре сигнала, а также по структуре и формату передаваемых данных (имитирует ложные данные, передаваемые по линии связи), с целью навязывания ложных режимов работы.

Эффективность подавления может быть повышена если средствами мониторинга вскрывается ожидаемая траектория полета БПЛА и средства РЭП могут формировать вышеуказанные помехи прицельно по направлению на БПЛА или его ПУ за счет изменения ориентации ДНА антенных систем.

В настоящее время широкое распространение получили шумовые помехи, прицельные по частотам линий связи БПЛА – ПУ. При этом, ввиду более высокой эффективности, перспективным является использование имитирующих помех, прицельных по структуре сигнала. Однако данный режим подавления более сложен в реализации и, по всей видимости, будет реализован в средствах РЭП следующего поколения.

При организации подавления линий управления и передачи данных БПЛА средства РЭП, как привило, придерживаются следующей логики функционирования.

1. При обнаружении факта налета БПЛА средства РРТР пытаются вскрыть частотные параметры линий радиосвязи «вверх» и «вниз». Если вскрытие частотных параметров данных линий невозможно, то средство РЭП переходит в режим излучения заградительных или скользящих помех по всему диапазону частот, потенциально используемому для организации связи с БПЛА по линиям «вверх» / «вниз». В этот же режим средство РЭП переходит в случае если количество вскрытых линий связи превышает возможности средств РЭП постановке помех, прицельных по частоте и по направлению.

2. Если произведено успешное вскрытие частотных параметров линий «вверх» / «вниз», то средства РРТР пытаются определить сигнально-структурные и пространственные параметры этих линий. Если вскрытие таких параметров невозможно, то по ранее определённым частотным параметрам формируются шумовые или гармонические помехи, прицельные по частоте. Этот же тип помех формируется если успешное вскрытие сигнальных и структурных параметров радиолинии показывает, что данные радиолинии имеют высокостойкую криптографическую защиту.

3. Если функционал средства РЭП позволяет управлять ДНА, то постановка помех линии «вверх» осуществляется с учетом ориентации ДНА на БПЛА и его траекторного сопровождения. Если по результатам вскрытия пространственных параметров радиолиний определено направление на ПУ, то постановка помех линии «вниз» осуществляется с учетом ориентированности ДНА средств РЭП на ПУ БПЛА.

4. Если по результатам вскрытия сигнально-структурных параметров радиолиний определены тип и структура сигналов и ширина сигнала позволяет произвести его запись и воспроизведение [210], то имитационные структурно-прицельные помехи формируются путем циклического воспроизведения на частоте линии ранее записанного сигнала. Если определены тип и структура сигналов, но ширина сигнала не позволяет произвести его запись, например, вследствие того, что используется сигналы ШПС или ППРЧ, то используется либо широкополосная шумовая помеха в полосе частот радиолинии, либо узкополосная шумовая или гармоническая помеха, скользящая по полосе частот радиолинии.

5. Если по результатам вскрытия сигнально-структурных параметров радиолиний определены не только тип и структура сигналов, но также вскрыты формат и структура передаваемых данных, тип используемого протокола или кодека связи, то появляется возможность подмены управляющих команд БПЛА или передачи ложных данных путем формирования имитирующей помехи, прицельной по частоте и структуре сигнала, а также по структуре и формату передаваемых данных. Этот же тип помех может быть сформирован если в линии используется уязвимый или имеющий низкую криптографическую защищённость протокол шифрования. Наиболее распространенным примером такого подавления является вскрытие формата передаваемых видеоданных в канале

«вниз», с записью и последующим циклическим воспроизведением ранее переданного видео, что фактически блокирует обратную связь для оператора.

Приблизительная оценка эффективности подавления линий управления и передачи данных может быть оценена путем использования двух основных, относительно простых, подходов:

- расчет помехозащищенности (по показателю BER (Bit Error Rate) – вероятности ошибочного приема бита P_b) используемой в радиолинии комбинации сигнала и помехоустойчивого кода при достигаемом значении ОСШ на входе приемника, с последующим сравнением ее с предельными требуемыми значениями $P_{b\text{тр}}$ для используемого протокола связи;
- расчет энергетического бюджета радиолинии, с последующим сравнением полученного значения с предельными значениями чувствительности приемника.

При использовании этих подходов предполагается, что помеха представляет собой аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) в полосе частот сигнала. Вопрос сведения сложных мультиплексивных помех к эквивалентным аддитивным помехам, рассмотрен в работе [211].

Значение ОСШ q на входе приемника при постановке шумовой помехи средством РЭП в радиолинии равен (рис. 4.8) [212]:

$$q = \frac{P_c G_c F_c(\phi_{CA}) F_a(\phi_{AC})}{P_n G_n F_n(\phi_{PA}) F_a(\phi_{AP})} \cdot \frac{D_n^2}{D_c^2} \cdot \frac{\Delta f_n}{\Delta f_c} \cdot \frac{1}{\gamma},$$

где: P_c – мощность передатчика (ПРД) абонента-излучателя сигнала в радиолинии; P_n – мощность ПРД помех средства РЭП; G_c – коэффициент направленного действия (КНД) передающей антенны в радиолинии; G_n – КНД передающей антенны средства РЭП; D_n – расстояние от средства РЭП до приемника (ПРМ) абонента-получателя в радиолинии; D_c – расстояние от ПРД сигнала до ПРМ в радиолинии; $F_n(\phi_{PA})$ – функция, описывающая ориентацию оси ДНА средства РЭП относительно ДНА ПРМ абонента-получателя в радиолинии; $F_a(\phi_{AP})$ – функция, описывающая ориентацию ДНА ПРМ абонента-получателя радиолинии относительно направления на средство РЭП; $F_c(\phi_{CA})$ – функция, описывающая ориентацию ДНА ПРД абонента-излучателя сигнала в радиолинии относительно направления на абонента-получателя; $F_a(\phi_{AC})$ – функция, описывающая ориентацию ДНА ПРМ абонента-получателя относительно направления на абонента-излучателя в радиолинии; γ – коэффициент поляризации, учитывающий различие поляризации передающей антенны средства РЭП и приемной антенны абонента-получателя; Δf_c – полоса пропускания приемника радиолинии; Δf_n – ширина энергетического спектра помех, излучаемых средством РЭП.

Знание значения ОСШ на входе ПРМ и используемого типа сигнала позволяет определить значение вероятности ошибочного приема бита P_b . Сравнение значения P_b с требуемыми значениями $P_{b\text{тр}}$ для КРУ и канала передачи данных (таблица 4.8) позволяет сделать вывод о потенциальной эффективности подавления.

В теоретических работах [213-217] для учета различных особенностей приема BPSK, QPSK и M-QAM, сигналов обосновываются различные аналити-

ческие выражения для расчета вероятности ошибки на бит P_b , достаточные для инженерного применения, в зависимости от энергетических соотношений ОСШ с АБГШ. На основе этих выражений, например, в работе [218] рассчитаны значения P_b для типовых сигнально-кодовых конструкций, используемых в линиях радиосвязи с БПЛА – рис. 4.9.

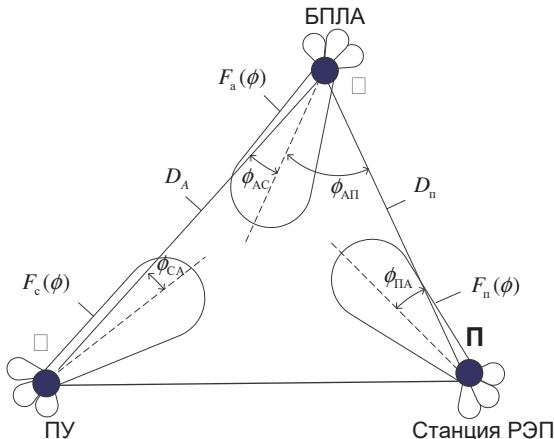


Рис. 4.8. Вариант взаимного положения в пространстве БПЛА, ПУ и станции РЭП [212]

Таблица 4.8 – Требуемые значения достоверности передачи данных для КРУ и канала передачи данных

Параметры	КРУ «вверх»	КРУ «вниз»	Линия передачи данных «вниз»
Передаваемая информация	Команды управления	ТМИ	Данные от бортовых средств ОЭС, РЛС и т.д.
Протоколы передачи	IP/TCP, X.25, MAVlink, SLT.DSM, XBee, проприetaryные протоколы		DVB, MPEG-TS, MPEG-2/4, H.264
Требуемая достоверность передачи данных, $P_{b\text{тр}}$		10^{-6}	10^{-3}

Для коррекции и экспериментальной проверки аналитических выражений оценки помехозащищенности $P_b(q)$, для наиболее распространенных сигналов, типов кодирования (таблица 4.4 и 4.7), а также условий применения БПЛА были проведены экспериментальные исследования. Эксперименты проводились по методике, представленной в работе [219]. При этом рассматривались ниже-указанные модели многолучевого распространения [219, 220].

1. Модель гауссовой линии – соответствует радиолинии с АБГШ, в которой многолучевость полностью отсутствует, то есть рассматривается единственный прямой луч между ПРД и ПРМ. Таким образом, данная модель описывает идеальные условия распространения на трассе «ПУ – БПЛА», которые,

как правило, не встречаются на практике, но зачастую соответствует верхней границе оценки помехозащищенности P_b , полученной расчетно-теоретическим путем [213-217].

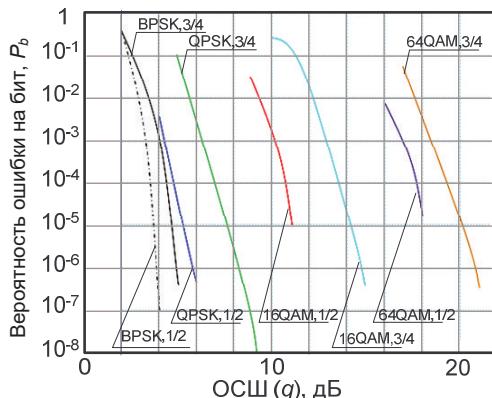


Рис. 4.9. Зависимость вероятности битовой ошибки P_b от ОСШ для типовых сигналально-кодовых конструкций, используемых в линиях радиосвязи с БПЛА [218]

2. Модель райсовской линии - соответствует радиолинии с помехами (АБГШ, импульсные и гармонические помехи), моделирует наличие прямого луча и нескольких отраженных лучей с разными мощностью и задержками прихода в точку приема, статистические свойства которых описываются распределением вероятностей Райса. Данная модель соответствует условиям полета БПЛА в прямой радиовидимости ПУ, с учетом переотражения электромагнитных волн от поверхности Земли и других объектов.

3. Модель рэлеевской линии – отличается от райсовской отсутствием прямого луча, при этом статистические свойства отраженных лучей описываются распределением вероятностей Рэлея. Соответствует условиям полета БПЛА в отсутствие прямой радиовидимости ПУ на относительно низкой высоте в пересеченной местности или в высотной городской застройке.

Исследования линии радиосвязи ПУ – БПЛА проводились для QPSK, 16QAM, 64QAM сигналов. В качестве помехоустойчивого кода использовалось кодирование Витерби со скоростями $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$. В качестве помехи рассматривалась шумовая помеха – АБГШ. При учете многолучевого распространения радиоволн использовались стандартные модели каналов RC20 и RL20 [220]. Влияние доплеровского сдвига частот не учитывалось. Результаты экспериментальной оценки помехозащищенности КРУ с QPSK, 16QAM, 64QAM сигналами, при типовой скорости кодирования $R=3/4$, представлены в виде среднего значения вероятности ошибки на бит P_b , который соответствует вероятности ошибочного приема бита после различных этапов декодирования (рис. 4.10 и 4.11) – на выходе декодера Витерби ($P_{b \text{ in Vit}}$) и на выходе этого декодера ($P_{b \text{ out Vit}}$).

Анализ графиков на рис. 4.10 показал следующее. Значения показателей $P_{b\ out\ Vit}$ на выходе декодера Витерби в райсовской линии (полет БПЛА в прямой радиовидимости ПУ) соответствует ухудшению их на 1,5-5 дБ относительно гауссовой линии, что соответствует значению потерь за счет приема переотраженных сигналов. По мере роста ОСШ q увеличивается отклонение показателей $P_{b\ out\ Vit}$, что соответствует изменению структуры ошибок (наблюдается группирование ошибочно принятых бит) в радиолинии и на выходе декодера Витерби.

Аналогичный эффект характерен и для рэлеевской модели радиолинии (полет БПЛА в отсутствии радиовидимости ПУ в пересеченной местности или в городских условиях) – рис. 4.11. Наблюдаются сдвиг значений $P_{b\ out\ Vit}$ на выходе декодера Витерби на 10-20 дБ вправо, в рэлеевской линии относительно гауссовой, а также серии ошибочных битов (до 10 бит), разделенных интервалами безошибочного приема до нескольких десятков секунд. Данное исследование качественно и количественно соответствует результатам, полученным в работе [219].

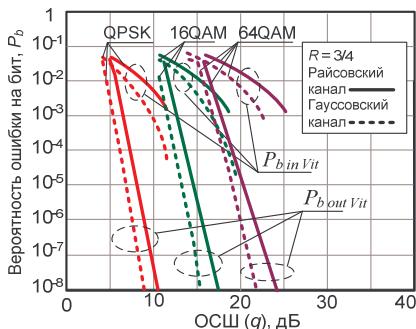


Рис. 4.10. Зависимость $P_b(q)$ на входе ($P_{b\ in\ Vit}$) и выходе кодера Витерби ($P_{b\ out\ Vit}$) для гауссовой и райсовской радиолиний

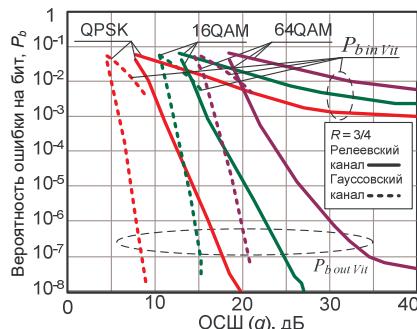


Рис. 4.11. Зависимость $P_b(q)$ на входе ($P_{b\ in\ Vit}$) и выходе кодера Витерби ($P_{b\ out\ Vit}$) для гауссовой и рэлеевской радиолиний

Оценка вклада помехоустойчивого кодирования в повышение помехозащищенности радиолиний связи с БПЛА проводилось путем оценки значения вероятности ошибки на бит на входе ($P_{b\ in\ Vit}$) и на выходе декодера Витерби ($P_{b\ out\ Vit}$). Данные значения для райсовской и рэлеевской радиолиний для кодовых скоростей $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$ для сигнала 64QAM представлены на рис. 4.12.

По результатам анализа можно сформировать приблизительные предельные значения ОСШ q (таблица 4.9), при которых достигается требуемый уровень достоверности приема для типовых схем сигнально-кодовых конструкций, используемых в КРУ и в линии передачи данных. При ориентировании на эти данные следует иметь ввиду, что, как правило, разработчиками КРУ закладывается дополнительный запас на помехоустойчивость порядка 10 дБ. Указанные в таблице 4.9 данные является очень приблизительной и грубой оценкой, оконч-

тельная оценка требуемых энергетических затрат необходимых для нарушения функционирования КРУ и линии передачи данных средствами РЭП проводится после вскрытия сигнально-кодовых конструкций, используемых в радиолиниях «ПУ – БПЛА».

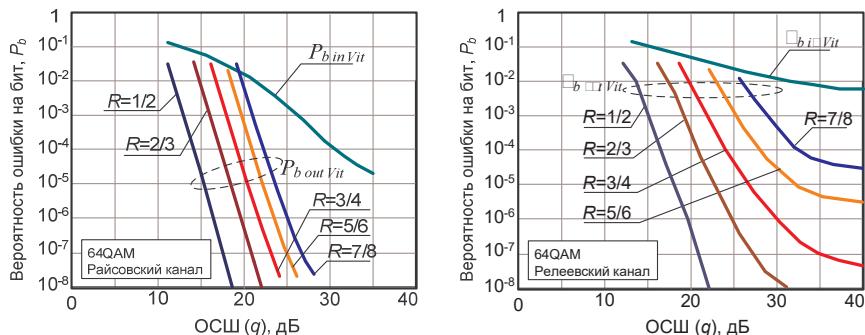


Рис. 4.12. Влияние значения скорости кода

на помехоустойчивость линии радиосвязи

Таблица 4.9 – Приблизительные значения ОСШ при которых достигается требуемый уровень достоверности приема в радиолиниях связи «ПУ – БПЛА» для типовых схем сигнально-кодовых конструкций

Условия полета	Тип радиолинии, тип передаваемых данных	Требуемая достоверность приема, $P_{b,\text{тр}}$	Значение ОСШ при котором достигается требуемая достоверность приема, дБ									
			BPSK, 1/2	BPSK, 3/4	QPSK, 1/2	QPSK, 3/4	16QAM, 1/2	16QAM, 3/4	64QAM, 1/2	64QAM, 3/4	64QAM, 5/6	64QAM, 7/8
Полет БПЛА в прямой радиовидимости ПУ	KRU «вверх», команды управления БПЛА	10^{-6}	6	7	8	9	14	16	17	22	24	25
	KRU «вниз», ТМИ для ПУ, квитанции о выполнении команд											
Полет БПЛА в отсутствии радиовидимости ПУ, в пересеченной местности или в городских условиях	Радиолиния передачи данных «вниз», видеоданные от ОЭС*	10^{-3}	4	5	6	7	11	13	14	18	19	21
	KRU «вверх», команды управления БПЛА	10^{-6}	11	13	16	17	21	23	20	30	46	n/d
	KRU «вниз», ТМИ для ПУ, квитанции о выполнении команд											
	Радиолиния передачи данных «вниз», видеоданные от ОЭС*	10^{-3}	7	8	10	11	14	16	16	22	25	28

*В случае если ТМИ интегрированы в видеоданные и передаются в едином потоке, то рекомендуется ориентироваться на наиболее «худший» для средств РЭП вариант – подавление радиолинии «вниз» с $P_{b,\text{тр}} = 10^{-3}$.

Значения ОШП в таблице 4.9 не учитывают возможности использования таких способов повышения помехозащищённости как расширение базы сигнала или использование режима ППРЧ. Вопросы воздействия помех на такие сложные типы сигналов как ШПС и ППРЧ рассмотрены в работах [221] и [222] соответственно.

Для оценки помехозащищенности других сигнально-кодовых конструкций, которые не указаны в таблице 4.9, автор рекомендует обратиться к достаточно полному справочнику [223].

Достигаемое на входе ПРМ радиолинии значение ОСШ оценивается путем расчета энергетического бюджета радиолинии. Общая методика расчета энергетического бюджета радиолинии довольно подробно представлена в работах [223, 224] и, применительно к БПЛА, с учетом различных влияющих факторов, такой расчет проводился в статьях [168, 194, 204, 222].

Подводя итог оценке возможностей подавления линий КРУ и передачи данных, необходимо еще раз акцентировать внимание на то, что несмотря на достаточные возможности существующих средств РЭП по эффективному подавлению этих линий, такое подавление не гарантирует какой-либо определенной реакции БПЛА в виде прекращения полета БПЛА в направлении контролируемого рубежа, активации «программы возвращения» или «программы посадки» и т.д. Именно отсутствие однозначной реакции БПЛА на успешное подавление радиолиний является существенным недостатком комплексов противодействия БПЛА основанным исключительно на РЭП.

4.5. Особенности информационно-технического воздействия с целью вмешательства в процесс функционирования систем БПЛА или перехвата управления

Если по результатам анализа КРУ средствами РРТР удается определить не только тип и структуру сигналов, но также вскрыть формат и структуру передаваемых данных, тип используемого протокола управления или кодека связи, то появляется возможность подмены управляющих команд БПЛА или передачи ложных данных путем формирования имитирующей помехи, прицельной по частоте и структуре сигнала, а также по структуре и формату передаваемых данных. Фактически задача вскрытия формата и протокола передаваемых данных в КРУ относится уже не к задачам, которые решаются средствами РРТР, а к задачам средств форматной, потоковой и сетевой компьютерной разведки (КР). При этом формирование вышеуказанного типа помех соответствует уже не «чистому» РЭП, а, в большей степени, имитонавязыванию ложного управления [192] или информационно-техническому воздействию (ИТВ) на БПЛА реализуемого через его КРУ [122, 188, 226-230, 243]. Одним из основных достоинств воздействия ИТВ на БПЛА является ее скрытность. Отсутствие явных признаков деструктивных воздействий на БПЛА, существенно затрудняет своевременное и адекватное принятие мер противодействия со стороны ПУ и операторов системы.

Доступ средств КР к форматам передаваемых данных КРУ возможен если в ней используется протокол шифрования с низкой криптоустойчивостью, либо протокол шифрования не используется вообще. Для БПЛА, в которых КРУ реализуется на основе коммерческих технологий Wi-Fi, WiMAX Mobile и LTE, средствами КР могут эксплуатироваться следующие уязвимости:

- подмена данных авторизации при установлении или поддержании соединения в КРУ;
- использование в Wi-Fi для шифрования передаваемых данных протоколов WEP (Wired Equivalent Privacy) и WPA (Wi-Fi Protected Access), которые имеют низкую криптографическую стойкость, при этом известны способы, позволяющие вскрыть ключевую информацию за считаное число минут [122, 230];
- использование в WiMAX Mobile для шифрования алгоритма DES (Data Encryption Standard) с ключами TEK (Traffic Encryption Key), которые имеют ограниченный срок действия, а также использование ложных сертификатов идентификации абонентских станций X.509 [122, 230];
- уязвимости процедур «attach», «detach» и «paging» для сетей LTE [231] и т.д.

После доступа средств КР к форматам передаваемых в КРУ данных, анализа их структуры и особенностей, появляется возможность сделать вывод о следующих аспектах управления БПЛА:

- используемые протоколы и форматы передачи данных в КРУ на канальном, сетевом и транспортном уровнях модели OSI (Open System Interconnect);
- используемый протокол управления БПЛА;
- текущая задача БПЛА, текущая последовательность выполняемых команд;
- данные о состоянии подсистем БПЛА (в составе ТМИ), данные от бортовых средств полезной нагрузки (прежде всего ОЭС);
- местоположение БПЛА по данным от бортовой навигационной системы;
- структура адресации, маршрутизации, а также приоритетности при передаче команд управления и данных полезной нагрузки в сети управления группой БПЛА;
- типы используемых на БПЛА и ПУ управляющей операционной системы (ОС), программного обеспечения (ПО), микроконтролеров (МК) управления радиосетью, отдельными бортовыми подсистемами и средствами полезной нагрузки БПЛА.

Вышеуказанные признаки формируют исходные данные для анализа уязвимостей одиночного или группы БПЛА как стандартной удаленной информационной системы (ИС) или, как сейчас их еще часто называют, киберфизической системы [244], каналом доступа к которой является КРУ. Основные уязвимости БПЛА как удаленной ИС рассмотрены в работе [229]. Общая классификация стандартных ИТВ, которые могут быть реализованы в отношении ИС, представлена на рис. 4.13.

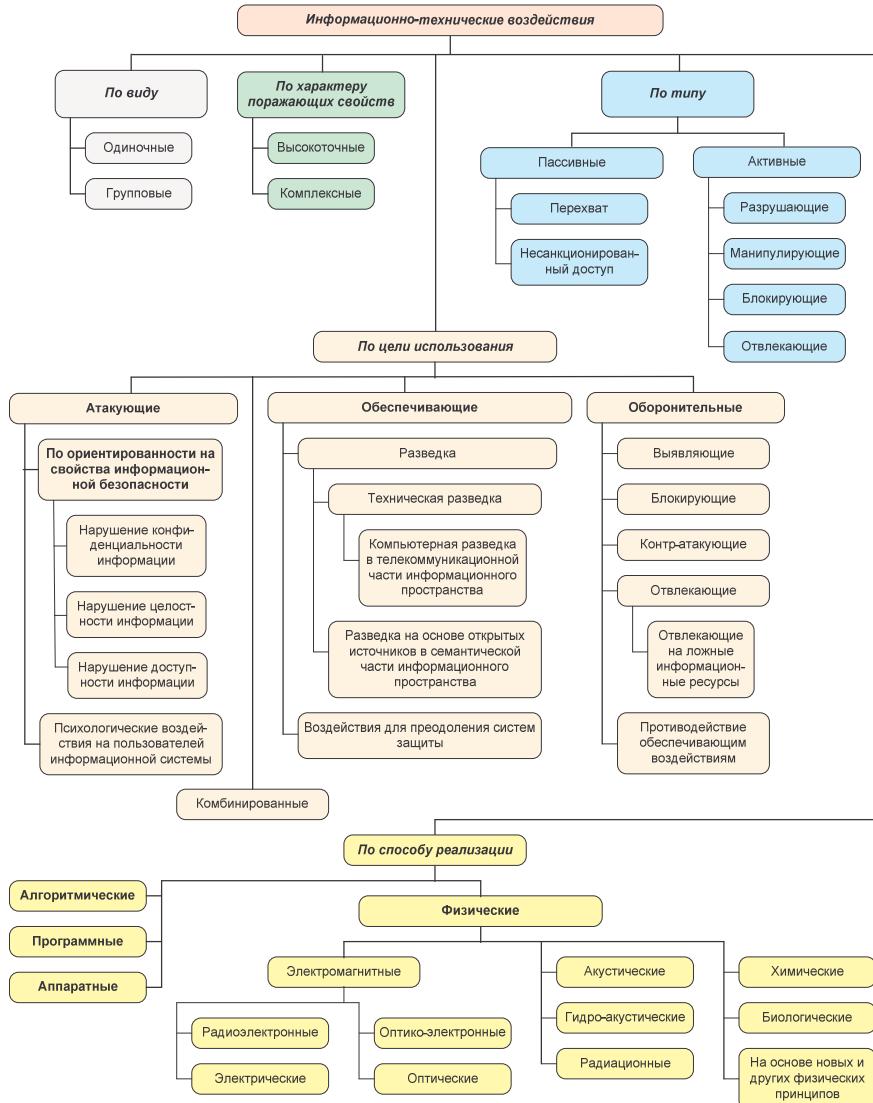


Рис. 4.13. Классификация ИТВ [84, 245]

На основе анализа уязвимостей системы «ПУ – БПЛА» как стандартной ИС можно предположить, что в отношении этой системы могут быть успешно реализованы следующие ИТВ:

- ИТВ, основанные на нарушении доступности БПЛА или ПУ:
 - о ИТВ, направленные на нарушение синхронизации и правил вхождения в связь;

- ИТВ, направленные на снижение эффективности протоколов канального или сетевого уровней радиосети [232-236];
 - ИТВ типа DOS или DDOS-атаки на входные порты ИС, с целью переполнения входного буфера [230];
 - ИТВ на нарушение нормального функционирования ПО МК, управляющих средствами связи;
- ИТВ, основанные на нарушении конфиденциальности и целостности связи между БПЛА или ПУ:
 - внедрение в КРУ ложного ПУ с целью перехвата управления БПЛА и навязывания ему новых режимов полета;
 - отправка на БПЛА некорректных или разнонаправленных команд, которые переводят его в аэродинамически-неустойчивый режим полета;
 - отправка на БПЛА команд «снижение» или «отключение питания двигателей», а также других команд, однозначно ведущих к немедленному прекращению полета БПЛА;
 - отправка на БПЛА команд отключения бортовой аппаратуры полезной нагрузки;
 - внедрение в КРУ ложного «виртуального» БПЛА, предоставляющего ПУ такую ложную ТМИ, которая вынуждает ПУ формировать заведомо некорректные команды управления БПЛА, переводящие последний в аэродинамически-неустойчивый режим полета;
- ИТВ основанные на нарушении целостности и доступности ОС или ПО на БПЛА или ПУ:
 - использование стандартных уязвимостей управляющих ОС или ПО для формирования ИТВ на них с целью блокирования нормального режима их функционирования;
 - скрытый перевод аппаратных средств БПЛА в режим повышенного расхода энергии или в аэродинамически-неустойчивый режим полета;
 - внедрение в управляющие ОС или ПО компьютерных вирусов, которые создают условия для нарушения функционирования ОС и ПО или для перехвата управления БПЛА;
 - внедрение в БПЛА программных или аппаратных закладок, реализующих несанкционированные режимы работы или подключение к другому «несанкционированному ПУ» и исполнение его команд с более высоким приоритетом.

В целом при формировании ИТВ на БПЛА, последний рассматривается как стандартная ИС. В этом смысле таргетированная атака на ОС и ПО БПЛА фактически не отличается атаки какой-либо другой удаленной ИС. Основные типы ИТВ характерных для ИС рассмотрены в работе [237]. Примеры таргетированных ИТВ на БПЛА представлены в работах [238-242]. При этом, особенностью ИТВ на БПЛА является то, что формируемые ИТВ должны приводить к максимально быстрому прекращению полета БПЛА к контролируемому рубежу с минимальным ущербом.

Рассматривая вопрос организации ИТВ на БПЛА, необходимо отметить, что несмотря на распространение в популярных СМИ большого числа сообщений об успешном «взломе» БПЛА и перехвате управления ими, создание такой системы представляется весьма нетривиальной научно-технической задачей. Организация ИТВ на БПЛА требует интеграции средств РПТР и КР в единый комплекс разведки сигнальных, форматных, потоковых и сетевых параметров КРУ, обеспечивающих автоматическое вскрытие и получения данных об ОС и ПО, используемых на БПЛА и на ПУ, в весьма сжатые сроки (в лучшем случае – порядка нескольких десятков секунд, пока БПЛА движется к контролируемому рубежу), основываясь на весьма ограниченном числе перехваченных пакетов из относительно низкоскоростной линии КРУ.

Формирование ИТВ потребует интегрирования в единый комплекс средств РЭП и ИТВ, которые бы на основе данных о сигнальных, форматных, потоковых и сетевых параметрах КРУ, БПЛА и ПУ автоматически выбирали сценарии наиболее оптимальных ИТВ и затем в режиме реального времени формировали таргетированные атаки на элементы системы «БПЛА – ПУ», с целью скорейшего прекращения полета БПЛА. Действующие полнофункциональные системы, решающие подобные задачи в режиме реального времени в отношении БПЛА, или хотя бы их проекты, к настоящему времени автору неизвестны.

Вместе с тем, в отдельных проектах систем РЭП для противодействия БПЛА встречаются технические решения, направленные на определение факта использования одного из наиболее распространенных протоколов управления коммерческими малыми БПЛА (MAVlink, SLT.DSM, XBee и др.) и формирование в рамках этого конкретного протокола ложных команд управления БПЛА: «посадки», «снижения» и т.д.

Более реализуемым, при решении задачи противодействия малым коммерческим БПЛА, выглядит способ разработки специальных программных закладок, внедряемых в управляющую ОС или ПО БПЛА при их сертификации, например, для продажи и применения на территории России. При этом данная программная закладка должна предусматривать прием по стандартным радиоканалам (например, Wi-Fi) и обработку с наивысшим приоритетом специализированных команд запрета полета, которые могут транслироваться «виртуальными ПУ» размещаемыми на рубежах контролируемых зон. Такая мера позволит на 90% однозначно закрыть проблему противодействия коммерческим малым БПЛА в зонах, где их полет запрещен, причем без разработки дорогостоящих средств РЭП с потенциально сомнительной эффективностью.

5. Противодействие БПЛА средствами функционального поражения СВЧ излучением

В главе 3 показано, что современные комплексы ПВО при поражении БПЛА вынуждены расходовать большое количество боеприпасов, которые с одной стороны, имеют низкую вероятность поражения, с другой стороны, являются невосполнимым материальным ресурсом, исчерпание которого ведет к невозможности комплекса ПВО в дальнейшем выполнять свою целевую задачу.

Средства РЭП не расходуют подобных материальных ресурсов и нуждаются исключительно в энергетическом обеспечении, которое может быть стационарным. Однако, как показано в главе 4, успешные вскрытие и подавление каналов навигации, управления и радиосвязи не гарантируют, что БПЛА прекратит свой полет в направлении контролируемой зоны. Именно отсутствие однозначной реакции БПЛА на успешное подавление является существенным недостатком комплексов противодействия БПЛА, основанным на РЭП. Вышеуказанного недостатка лишены другие средства, принцип функционирования которых основан на формировании направленного ЭМИ для нанесения ущерба целям – средствам функционального поражения электромагнитным излучением (ФП ЭМИ).

Средства ФП ЭМИ обладают большим «площадным эффектом», обеспечивая относительно эффективное прекращение полета практически всех БПЛА, попадающих в зону их действия независимо от их типа, режима управления (дистанционное управление или автономный полет), типа навигационной системы. Эффективность ФП ЭМИ основана на изменениях электрофизических параметров полупроводниковых элементов многочисленных РЭС, функционирующих в составе БПЛА.

Вместе с тем эффективность средств ФП ЭМИ имеет и оборотную сторону. В частности, им свойственны другие существенные недостатки – высокая мощность создаваемого ЭМИ и сложность обеспечения его «избирательности» в отношении поражаемых РЭС. Это остро ставит вопрос обеспечения ЭМС средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА.

Для всесторонней оценки данного способа поражения БПЛА рассмотрим основы функционального поражения РЭС сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением, имеющиеся в настоящее время прототипы подобных средств ФП ЭМИ, на основании чего проведем оценку эффективности применения данных средств поражения против БПЛА.

5.1. Особенности функционального поражения радиоэлектронных средств СВЧ излучением

Функциональное поражение электромагнитным излучением – разрушение и/или повреждение элементов РЭС путем использования однократных или многократных импульсных электромагнитных воздействий, приводящих к необратимым изменениям электрофизических параметров в полупроводниковых или оптико-электронных элементах РЭС в результате их перегрева или пробоя [84].

Основным отличием ФП ЭМИ от РЭП является физический принцип нанесения ущерба. При ФП ЭМИ ущерб РЭС причиняется путем необратимого (катастрофического) или обратимого (восстанавливаемого) изменения физико-химической структуры элементов РЭС вследствие воздействия электромагнитных полей на материалы, входящие в состав электронных и полупроводниковых приборов и других компонентов этих систем. Эффект воздействия средств ФП ЭМИ на РЭС основан на возможности изменения физико-химических свойств электро- и радиоматериалов при облучении их сильными электромагнитными полями. Необратимые изменения свойств вещества, приводящие к качественно новым образованиям с иной электромагнитной структурой, происходят при значительной энергии воздействующего ЭМИ [84].

В зависимости от мощности, длительности импульсов, рабочей частоты источника ЭМИ и расстояния до РЭС эффекты от электромагнитного воздействия могут быть различными – от кратковременного снижения качества функционирования и временной потери работоспособности РЭС до его полного повреждения или разрушения в результате перегрева или полевого пробоя [84].

При воздействии ЭМИ на метровых и более длинных волнах на металлических корпусах РЭС наводятся значительные электродвижущие силы (ЭДС), отказывают различные электронные схемы и исполнительные элементы. При воздействии ЭМИ в дециметровом или сантиметровом диапазоне волн, совпадающем с рабочим диапазоном РЭС, повреждаются входные устройства (в частности, СВЧ-диоды). Миллиметровые волны проникают в щели экранов, повреждая как входные цепи, так и экранированные устройства микроэлектроники.

При взаимодействии мощных СВЧ-колебаний с РЭС БПЛА могут наблюдаться два основных эффекта [246]:

- 1) наведение на контурных элементах (выводах полупроводниковых приборов, печатных проводниках и т.д.) СВЧ-мощности, которая приводит к электрическим перегрузкам;
- 2) непосредственное взаимодействие СВЧ-импульсов со структурой и материалом полупроводникового элемента.

Мощности ЭМИ, формируемых известными средствами ФП ЭМИ, могут превышать десятки ГВт, при этом длительности их импульсов лежат в пределах от миллисекунд до наносекунд. В большинстве практических случаев функциональное поражение БПЛА при применении ЭМИ имеет место при отказе хотя бы одного из основных полупроводниковых элементов РЭС, управляющего полетом.

Перечень типовых нарушений работоспособности радио- и электротехнического оборудования РЭС при их эксплуатации в условиях воздействия ЭМИ приведен в таблице 5.1 [84, 247, 248].

Таблица 5.1 – Типовые нарушения работоспособности радио- и электротехнического оборудования РЭС при воздействии ЭМИ [84, 247, 248]

Тип устройства	Характер нарушения	Причина нарушения
Антенно-фидерные устройства (АФУ)	<p>а) отказ антенного коммутатора; б) пробой изоляции антенны, излучателя и кабельной системы фидера; в) выход из строя входных устройств приемника и выходных устройств передатчика.</p> <p>Все нарушения в основном носят необратимый характер</p>	<p>а) появление перенапряжений в АФУ; б) низкая электрическая прочность входной элементной базы</p>
Приемные и передающие устройства, генераторы синусоидальных сигналов и сигналов специальной формы	<p>а) обратимые изменения электрического режима СВЧ-генераторов; б) временное увеличение коэффициента шума, изменение коэффициента шума, частоты и мощности генерируемых сигналов; в) сбои, выдача ложных импульсов и подавление полезных сигналов</p>	<p>а) превышение по амплитуде полезных сигналов наводками; б) перекрытие спектров полезных сигналов спектрами помеховых наводок; в) высокая чувствительность полупроводниковых элементов</p>
Устройства управления, стабилизации и формирования команд	<p>а) сбои в структуре команд; б) выдача ложных команд по разрядам кодовых групп; в) уменьшение амплитуды полезных сигналов; г) ложные срабатывания при обработке команд, их исполнении и отработке</p>	<p>а) наложение импульсов помех в цепях устройств на формируемые полезные сигналы и их суперпозиция во времени</p>
Линейные усилители	<p>а) выход из строя входных и выходных цепей; б) искажение формы входных (выходных) сигналов и появление ложных сигналов; в) самовозбуждение</p>	<p>а) появление перенапряжений в линиях связи; б) низкая электрическая прочность входных элементов усилителей; в) изменение тока поджига защитных разрядников</p>
Электронные вычислительные машины (ЭВМ) и цифровые системы автоматики и управления	<p>а) сбои в работе, нарушение нормального процесса выполнения программ; б) потери информации в регистрах оперативной памяти; в) ошибки и искажения вводимой и получаемой информации</p>	<p>а) наводки во внешних и внутренних цепях и схемах; б) выход из строя систем ввода и вывода информации</p>
Источники питания	<p>а) выход из строя первичных и вторичных источников электропитания; б) значительные амплитудные изменения выходного напряжения первичных источников и временное пропадание выходного напряжения вторичных источников питания</p>	<p>а) перенапряжение в питающих линиях электропередач; б) срабатывание линейной защиты и скачки тока и напряжения в питающих линиях; в) наводки по цепям питания и системам заземления; г) низкая электрическая прочность элементов преобразования</p>

Элементная база РЭС весьма чувствительна к энергетическим перегрузкам. Поток электромагнитной энергии достаточно высокой плотности способен «выжечь» полупроводниковые переходы, полностью или частично нарушив их нормальное функционирование. Даже у кремниевых сильноточных биполярных транзисторов, обладающих повышенной стойкостью к перегревам, напряжение пробоя составляет 15-65 В, а у арсенид-галлиевых приборов – 10-12 В. Запоминающие устройства имеют пороговые напряжения порядка 7 В, типовые логические интегральные схемы на МОП-структуратах – 7-15 В, а микропроцессоры обычно прекращают свою работу при 3,3-5 В [84].

Кроме того, анализ результатов отечественных и зарубежных исследований воздействия импульсов ЭМИ наносекундной длительности напряженностью 2-10 кВ/м (при частоте следования импульсов порядка 1 МГц) на вычислительные блоки и микропроцессоры РЭС показал, что уровни наводимых напряжений приводят к отказам этих элементов и ложным срабатываниям в них, что делает практически невозможным корректное функционирование в них программного обеспечения [84].

Источниками импульсов мощного СВЧ ЭМИ могут быть мощные релятивистские СВЧ-генераторы (взрывомагнитные, магнитокумулятивные), обычные электровакуумные СВЧ-генераторы (усилители), в том числе с временной компрессией излучаемых импульсов, твердотельные генераторы с полупроводниковыми коммутаторами, генераторы с газовыми коммутаторами и др. В качестве излучателей также могут применяться апертурные антенны (зеркальные, рупорные), а также фазированные антенные решетки (ФАР) и активные ФАР [248].

Основным показателем устойчивости элементной базы к воздействию ЭМИ являются критериальные уровни поражения, определяемые значением энергии, при котором возникают восстановляемые и невосстанавливаемые отказы в элементах РЭС. В таблицах 5.2 и 5.3 приведены энергетические уровни поражения некоторых элементов, блоков и узлов РЭС.

Таблица 5.2 – Энергетические уровни поражения элементов РЭС при воздействии СВЧ-импульсов [249]

Тип прибора	Энергия повреждения, мкДж
СВЧ-диоды	0,1 – 10
Интегральные схемы	0,1 – 300
Цифровые интегральные схемы	80
Полевые транзисторы	10
Маломощные транзисторы	$1 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$
Транзисторы средней и большой мощности	$400 - 4 \cdot 10^4$
Выпрямительные диоды	$100 - 4 \cdot 10^5$
Быстродействующие переключающие диоды	20
ТунNELНЫЕ диоды	500
Кремниевые тиристоры	3000
Низкочастотные транзисторы	–

Таблица 5.3 – Уровни функционального поражения некоторых блоков и узлов РЭС при воздействии импульсного СВЧ-излучения [249]

Тип изделия	Плотность потока энергии, Вт/см ²	Поток энергии, Дж/см ²	Длительность импульса, с	Частота импульсов, кГц	Длительность воздействия, с
Усилители систем управления и связи	10 – 40	$10^{-2} – 4 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	–	–
Узлы систем управления и связи на интегральных схемах и больших интегральных схемах (БИС)	70 – 600	$0,7 \cdot 10^{-2} – 6 \cdot 10^{-2}$	10^{-6}	1	1
Элементы радиопередатчиков	$10^4 – 10^5$	$10^{-3} – 10^{-4}$	10^{-7}	–	–
Радиоприемники через антенну с $S_{\text{эфф}} = 1-2 \text{ м}^2$	1 – 100	$10^{-5} – 10^{-6}$	10^{-7}	–	–
Телевизионные системы на видеоконах (повреждение видеовышки)	$3 \cdot 10^{-3} – 5 \cdot 10^{-3}$	0,6 – 2	$2 \cdot 10^{-4} – 4 \cdot 10^{-4}$	–	–

Критериальные (критические для поражаемого оборудования) уровни функционального поражения широкой номенклатуры РЭС отличаются большим разбросом и могут составлять от 10 до 5000 Вт/см². Типовые критериальные уровни различных полупроводниковых приборов приведены в работах [246, 249]. При этом наиболее уязвимыми элементами РЭС являются СВЧ-диоды, работающие во входных трактах преобразователей частоты, интегральные микросхемы и диоды с точечным контактом.

В таблице 5.4 приведены характеристики нескольких типов генераторов мощных ЭМИ-импульсов миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн [249].

Таблица 5.4 – Характеристики некоторых мощных СВЧ-генераторов миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн [249]

Тип генератора	Частота, ГГц	Длительность импульса	Выходная мощность	КПД, %	Примечание
Гиратрон с импульсным соленоидом, обладающий стабилизируемым носителем энергии	500	2 мкс	более 100 кВт	–	Эксперимент
Тиратрон с высокой эффективностью моды TE ₀₃₁	140	2 мкс	100 кВт	30	Эксперимент
Тиратрон с резонаторами моды TE ₀₃₁	100	–	1000 кВт	–	–
Виркатор	до 40	3 – 5 нс	до 1 ГВт	–	–
Релятивистский гиратрон	35	55 нс	0,2 ГВт	–	Разработан
Взрывомагнитный генератор	–	1 мкс	10^{10} кВт	–	Разработан в Лос-Аламосе

Как видно из таблицы 5.4, наиболее короткие импульсы достигаются в виркаторах, а наибольшая выходная мощность реализуется во взрывомагнитных генераторах (ВМГ). Современный уровень развития СВЧ-генераторов обеспечивает выделение в нагрузке энергии 10^7 – 10^8 Дж, мощность которой эк-

вивалентна мощности энергии, освобождающейся при взрыве заряда взрывчатого вещества массой 10 кг [249].

Более подробные сведения о средствах ФП ЭМИ и вариантах их целевого применения представлены в работах [84, 246-249]. Особенности применения СВЧ-импульсов и исследование характера их дестабилизирующего влияния на различное бортовое оборудование БПЛА подробно изложено в работах [258-287].

5.2. Тактико-технические характеристики типовых средств функционального поражения СВЧ излучением, ориентированных на противодействие БПЛА

Прикладные исследования по созданию экспериментальных средств ФП ЭМИ ведутся с 1995 г. при этом опытные образцы этих средств регулярно проходят испытания в ходе военных конфликтов [57].

К достоинствам средств ФП ЭМИ при их применении против БПЛА можно отнести следующие:

- расширение диапазона решаемых задач за счет возможности поражения не излучающих БПЛА;
- универсальность (способность ЭМИ поражать широкую номенклатуру БПЛА, при этом эффективность поражения БПЛА не зависит от их типа, габаритов, функционального назначения);
- внеполосность (способность ЭМИ проникать внутрь РЭС БПЛА помимо полосы пропускания его приемных трактов радиосвязных РЭС);
- эффективное воздействие на БПЛА с высокой помехозащищенностью к применению традиционных способов РЭП;
- отказ от сложных средств анализа и имитации сигналов для подавления канала навигации и радиосвязи БПЛА, которые традиционно используются в РЭП;
- снижение в ряде случаев требований к качеству целеуказания (по местоположению, частотному диапазону, режимам работы), которое необходимо для поражения БПЛА противника.

Перспективные образцы средств ФП ЭМИ основаны на генерации кратковременного импульса ЭМИ большой мощности, способном вывести из строя РЭС, составляющие основу системы управления любого БПЛА.

Основываясь на данных об испытании опытных образцов, представленных в работах [84, 249], можно сформировать приблизительные обобщенные ТТХ средств ФП ЭМИ.

Мобильные средства ФП ЭМИ:

- используемый диапазон частот: 0,5-20 ГГц;
- частота повторения импульсов: 10 Гц;
- длительность импульса: 200-1000 нс;
- импульсная мощность излучения: 1-5 ГВт;
- энергия в импульсе: 2-10 кДж;
- тип энергоустановки: газотурбинный генератор;
- тип источника ЭМИ: гираторы, виркаторы, черенковский генератор;

- КПД генераторного прибора 36-40%;
- КПД средства ФП ЭМИ в целом: 20-25%;
- масса: 6-10 т;
- варианты базирования: автомобиль, бронетранспортер;
- диаметр антенны: 2-5 м;
- дальность действия: в пределах прямой радиовидимости.

Средства ФП ЭМИ одноразового действия:

- используемый диапазон частот: 6-10 ГГц;
- энергия в импульсе: 3-5 ГВт;
- длительность импульса: 150-1500 нс;
- тип источника ЭМИ: взрывомагнитный генератор, резонансный магнетрон, виркатор;
- масса: 500 кг;
- дальность действия: 3-4 км.

Малогабаритные средства ФП ЭМИ:

- используемый диапазон частот: 0,5-100 ГГц;
- энергия в импульсе: 1-5 ГВт;
- длительность импульса: 1-100 нс;
- тип источника ЭМИ: взрывомагнитный генератор, ударно-волновой генератор;
- масса: 40-50 кг;
- дальность действия: 1-2 км.

Вместе с тем, вышеуказанные данные относятся к средствам ФП ЭМИ, так сказать, вообще, без ориентированности этих средств именно на какие-либо определенные объекты поражения. Что касается средств ФП ЭМИ ориентированных на поражение именно БПЛА, то достоверной информации по таким средствам чрезвычайно мало. Вместе с тем, судя по открытым публикациям, работы в направлении создания таких средств ведутся во всех технологически развитых странах, в том числе в США, России и Китае.

Как показано в статьях [250, 251] в США компания Raytheon с 2013 г. ведет разработку комплекса Phaser, задачей которого является функциональное поражение одиночных и групп БПЛА потоком мощных СВЧ-импульсов. Комплекс Phaser передан в опытную эксплуатацию в 2020 г., по итогам которой ожидается принятие решения о начале серийного производства. Phaser выполнен на основе стандартного грузового контейнера, внутри и снаружи которого устанавливаются необходимые системы (рис. 5.1). В том же контейнере организовано рабочее место оператора. Основная часть оборудования размещается внутри контейнера. На его крыше помещено поворотное основание с излучателем, который может складываться для транспортировки. Излучатель комплекса Phaser состоит из антенны и управляемого отражающего зеркала. Первая выполнена в виде прямоугольного полотна, установленного под наклоном. Рабочая поверхность направлена внутрь, в направлении зеркала. Зеркало выполнено в виде диска с приводами наведения в двух плоскостях. Его перемещение относительно излучателя обеспечивает управление направлением СВЧ-луча в двух

плоскостях. Грубая наводка осуществляется поворотом всей конструкции. Параметры излучателя, мощность, энергопотребление, параметры луча, дальность эффективного поражения БПЛА и т.д. – в открытой печати отсутствуют. При этом, известно, что излучатель имеет два режима. Первый отличается меньшей мощностью излучения и предназначен для серьезного нарушения работы БПЛА. Второй режим предусматривает кратковременное включение излучателя на большую мощность, с целью функционального поражения БПЛА. Комплекс Phaser получает целевказание о направлении на БПЛА от внешних источников через существующие средства связи и управления. После этого выполняется расчет данных для наведения излучателя с последующим формированием последовательности СВЧ-импульсов. Собственные средства обнаружения и целеуказания в комплексе пока отсутствуют.



Рис. 5.1. Комплекс Phaser [251]

Основной задачей комплекса Phaser заявляется создание бесполётных зон ПВО, за счет функционального поражения, прежде всего, БПЛА всех классов, а также, по возможности, пилотируемых летательных аппаратов [250, 251].

В 2016 г. компания Raytheon провела заводские испытания, в ходе которых комплекс Phaser успешно поразил 33 БПЛА разных типов, причем некоторые цели выполняли полет парами и тройками. Комплекс показал возможность противодействия БПЛА мощным направленным СВЧ-излучением, а также простоту эксплуатации и низкую стоимость боевого применения. Длительность и интенсивность работы в боевом режиме на излучение фактически зависят только от ресурса имеющейся системы энергоснабжения [250, 251].

В ходе дальнейших доработок компания Raytheon планирует сократить габариты изделия Phaser. Таким образом, в будущем могут появиться компактные и мобильные средства ПВО на основе принципов ФП ЭМИ [250, 251].

В статьях [252, 253] показано, что аналогичные разработки ведутся и в России. Так на выставке ЛИМА-2001 в Малайзии еще в 2001 г. Россия проде-

монстрировала действующий образец боевого комплекса ФП ЭМИ «Ранец-Э» разработки Московского радиотехнического института РАН (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Комплекс Ранец-Э [252, 253]

По заявлению Рособоронэкспорта этот комплекс предназначен для борьбы с малыми БПЛА, а также крылатыми ракетами высокоточного оружия. Комплекс «Ранец-Э» состоит из антенны, высокомощного генератора, подсистемы управления, измерительной установки и источника электропитания. «Ранец-Э» может быть изготовлен в стационарном и мобильном вариантах (масса собственно боевых средств – около 5 т). Мощность излучения – 500 МВт в импульсе длительностью 10-20 нс в Х-диапазоне. Комплектация изделия «Ранец-Э» предусматривает возможность использования 2-х антенн (рис. 5.3) [252, 253]:

- с усиливанием 50 дБи и с шириной главного лепестка ДНА $15\text{--}20^\circ$ – дальность эффективного поражения РЭС 7-14 км, дальность частичного нарушения функционирования РЭС – 22-40 км;
- с усиливанием 45 дБи и с шириной главного лепестка ДНА 60° – дальность эффективного поражения РЭС до 7 км, дальность частичного нарушения функционирования РЭС – до 23 км.

Эффект функционального поражения достигается путем формирования на поверхности цели напряженности электрического поля, превышающего 1 кВ/м, что вызывает пробои, выводящие из строя РЭС аппарата. Комплекс «Ранец-Э», подобно комплексу Phaser, также получает внешнее целеуказание от РЛС и ПУ сопрягаемых систем ПВО [252, 253].

Помимо разработки стационарных и мобильных комплексов ФП ЭМИ активно разрабатываются и другие средства такого типа поражения. Одним из перспективных вариантов применения средств ФП ЭМИ является создание малогабаритных генераторов мощного СВЧ-импульса, которые доставляются на рубеж гарантированного функционального поражения РЭС (50-100 м от БПЛА) путем встраивания в артиллерийские снаряды или в ЗУР и запуска последних в направлении группы БПЛА. Такие способы применения выстреливаемых средств ФП ЭМИ рассмотрены в работах [254, 255, 282-284].

В частности, в работах [282-284] обсуждается перспективный вариант ЗУР для ЗРК «Тор» оснащенной ВМГ, вместо классической боевой части. ВМГ обеспечивает прямое преобразование энергии взрыва в энергию ЭМИ с помощью специального встроенного СВЧ-генератора. При массе ВМГ порядка 12-15 кг, что является приемлемым для ЗУР, применяемой в ЗРК «Тор», излучаемой ВМГ энергии достаточно для функционального поражения РЭС группы БПЛА в радиусе до 300-500 м от точки подрыва, что обеспечивает реализацию принципа «одна ракета – группа БПЛА».

В качестве ТТХ БЧ ЗУР оснащенных средством ФП ЭМИ на основе ВМГ можно рассматривать следующие характеристики [284]:

- тип источника ЭМИ: взрывомагнитный генератор;
- энергия в импульсе: 8-50 МДж в зависимости от типа ЗУР;
- дальность действия ЗУР: 2,5-15 км;
- высота действия ЗУР: 2,5-10 км;
- радиус поражения БПЛА от точки подрыва ЗУР: до 500 м;
- способ подрыва: командный;
- масса: 12-15 кг.

5.3. Эффективность функционального поражения БПЛА СВЧ излучением

В настоящее время, несмотря на потенциальную перспективность развития средств поражения этого типа, публикаций по оценке эффективности применения подобных средств именно против БПЛА относительно немного. К таким публикациям можно отнести работы [133, 255-261].

В работе [256] исследуется эффективность способа воздействия мощных коротких СВЧ-импульсов на antennу средств радиосвязи БПЛА при их работе в C, S и L диапазонах. Результаты исследования представлены в таблице 5.5. Как показано в этой работе, эффект нарушения связи, а также необратимое функциональное поражение средств радиосвязи БПЛА происходят из-за наведения СВЧ-импульсами паразитного напряжения на его antennу, которое, вследствие низких изоляционных свойств материалов электронных компонентов БПЛА, начинает негативно влиять на элементы приемного тракта, прежде всего, усилители, вплоть до их полного отказа. Аналогичные результаты и выводы о функциональном поражении усилителей в приемном тракте средств радиосвязи БПЛА были получены и в работе [257], в которой исследовалось воздействие СВЧ-импульсов длительностью 0,5-4,5 нс мощностью 1 ГВт с частотой следования 1-100 Гц.

В работе [258] представлены экспериментальные исследования влияния СВЧ-импульсов на малые коммерческие БПЛА DJI Phantom 3 и Phantom 4. Результаты исследования показывают, что воздействие СВЧ-импульсов шириной 2-3 ГГц с максимумом в области 1-2 ГГц с длительностью 200-270 пс, в зависимости от значений напряжённости формируемого на БПЛА электрического поля, ведут к двум типам отказов. При формировании напряжённости электрического поля порядка 1,4 кВ/м наблюдаются необратимое нарушение функци-

нирования БПЛА, потеря управления и его «неуправляемая посадка», т.е. фактически его полное функциональное поражение. При формировании напряжённости электрического поля порядка 0,05-0,07 кВ/м наблюдается обратимые эффекты нарушения приема-передачи данных, ошибки в выполнении команд управления и т.д. При такой напряженности, прекращение воздействия ведет к восстановлению управляемости БПЛА.

Таблица 5.5 – Результаты исследования воздействия коротких СВЧ-импульсов на antennу средств радиосвязи БПЛА [256]

Диапазон	Плотность потока мощности, Вт/см ²	Частота следования импульсов, Гц	Продолжительность воздействия, с	Длительность импульса, нс	Достигаемый эффект
C	100	50	3	200	Эффекты отсутствуют
S	100	50	3	200	Эффекты отсутствуют
L	5-30	1	1	100	Перебои в радиосвязи
	30	1	1	200	Перебои в радиосвязи
	30	10	1	200	Перебои в радиосвязи
	30	10	3	100	Долговременная потеря радиосвязи
	40-50	1	1	100	Перебои в радиосвязи
	50	10	1	100	Необратимая потеря связи без ее восстановления

В целом вышеуказанные данные, согласуются с критическими значениями напряженности электрического поля на поверхности БПЛА, необходимыми для его функционального поражения, приводимыми для комплекса «Ранец-Э» (рис. 5.3), который был рассмотрен ранее. Судя по графику, уровень напряженности электрического поля, ведущий к нарушению функционирования БПЛА, составляет от 1 кВ/м, а уровень полного функционального поражения – 3 кВ/м [253].

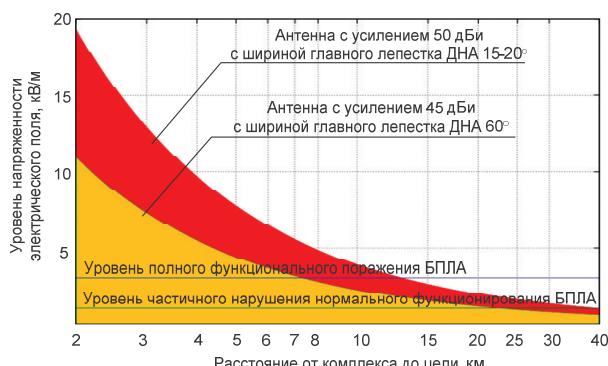


Рис. 5.3. Уровни напряженности электрического поля на поверхности цели, формируемые комплексом «Ранец-Э» на различных расстояниях до цели [253]

В работах [133, 259-261] рассмотрены вопросы обоснования ТТХ потенциальных средств ФП ЭМИ, мощности излучателей и параметров ФАР, обеспечивающих внеполосное функциональное поражение БПЛА.

В работах [133, 259-261] показано, что для реализации внутриполостного режима функционального поражения БПЛА требуется обеспечить следующую мощность на входе соответствующих радиоэлектронных элементов БПЛА. Для деградации микроволновых диодов и интегральных схем необходима мощность на входе приемников поражаемых РЭС от 0,006 до 0,4 Вт, коммутирующих диодов и маломощных транзисторов – 0,06-9,5 Вт, микроволновых диодов и микросхем – от 6,125 до 125 Вт, коммутирующих диодов и маломощных транзисторов соответственно – от 62 Вт. Расчетная напряженность электрического поля, обеспечивающая такую деградацию радиоэлектронных элементов с учетом коэффициента потерь $K_p = -28$ дБ, составляет порядка 70 кВ/м при величине рассогласования направлений главных лепестков ДНА средства ФП ЭМИ и БПЛА на 5 дБ, при использовании пачки импульсов длительностью 255 мкс с количеством импульсов $N=1000$ шт (длительность одиночного импульса 5 нс, период их следования 250 нс). Предложена конструкция антенной системы на основе цилиндрической ФАР с выходной мощностью излучения 0,25 МВт, позволяющей осуществлять внутриполостное функциональное поражение БПЛА с вышеуказанными параметрами в диапазоне частот от 10 ГГц до 12 ГГц на дальности действия до 5 км.

В работе [261] предложен вариант системы функционального подавления БПЛА в котором критериальные уровни деградации радиоэлектронных элементов достигаются путем фокусировки ЭМИ. Показано, что для внеполосного подавления РЭС БПЛА с чувствительностью от $5 \cdot 10^{-13}$ до 10^{-14} Вт на дальностях 0,5-1 км требуется средство ФП ЭМИ с эффективной площадью апертуры антенны $0,2-0,5 \text{ м}^2$ выходной мощностью 2 кВт, формирующие плотность потока мощности СВЧ ЭМИ в районе БПЛА от $3,8 \cdot 10^{-3}$ до 50 мкВт/см 2 .

В целом, анализ работ [133, 256-261] показывает, что несмотря на отсутствие в настоящее время реальных средств ФП ЭМИ, ориентированных на поражение БПЛА, разработка прототипов подобных средств активно ведется многими технологически развитыми странами. При этом первые опытные экземпляры подобных средств поражения демонстрируют высокую эффективность и могут обеспечивать необратимое поражение всех типов БПЛА на дальности до 10 км. Недостатком этих средств является то, что одновременно с поражением БПЛА поражаются и другие типы РЭС попадающие в зону воздействия, что исключает применение средств ФП ЭМИ в мирное время, в населенных пунктах и на промышленных объектах. Кроме того, отдельным проблемным вопросом, который, судя по всему, пока никак не прорабатывается, является обеспечение электромагнитной безопасности операторов средств ФП ЭМИ.

6. Противодействие БПЛА средствами лазерного излучения

Функциональное поражение БПЛА лазерным излучением является в настоящее время еще одним перспективным, но пока еще не получившим широкого распространения, способом противодействия БПЛА. Для всесторонней оценки данного способа поражения БПЛА рассмотрим основы поражения объектов лазерным излучением, имеющиеся в настоящее время прототипы подобных средств поражения, на основании чего проведем оценку эффективности применения данных средства против БПЛА.

6.1. Особенности поражения объектов лазерным излучением

Лазер, являющийся оптическим квантовым генератором, способен формировать сильное ЭМИ в оптическом диапазоне волн с высокой плотностью энергии в весьма узком телесном угле. Свойство очень узкой направленности луча и высокая энергетическая плотность излучения позволяют применять лазер в качестве средства функционального поражения [247, 262].

Атмосфера прозрачна для лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,3-1 мкм. Это несколько шире видимой области. Лазеры способны генерировать ЭМИ в широком оптическом диапазоне, однако, как средства функционального поражения практический интерес представляют оптические квантовые генераторы, работающие в так называемых «окнах прозрачности» атмосферы, которым соответствуют волны оптического диапазона $\lambda = 0,5\text{--}2$ мкм, за исключением «непрозрачных» участков $\lambda = 0,95; 1,15; 1,3\text{--}1,5$ мкм [247]. В ИК-диапазоне тоже есть «окна прозрачности», где отсутствуют линии молекулярного поглощения различных атмосферных газов и аэрозольных примесей. Однако для длин волн менее 0,3 мкм атмосфера абсолютно непропускает. Но даже в диапазоне прозрачности атмосферы лазерный луч рассеивается в областях, в тумане, на аэрозолях и на пылинках [247].

Из всего многообразия лазеров наиболее целесообразными к использованию в качестве лазерного оружия считаются твердотельные, химические, со свободными электронами и др. [262]. Обобщенные характеристики лазерных устройств приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Обобщенные характеристики лазерных устройств

Активная среда	Длина волны, мкм	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, с	Диаметр луча на выходе, мм
Рубин	0,69	300	10^{-3}	6
Стекло с ниодимом	1,06	150	10^{-3}	6
Полупроводник	0,84	10^{-4}	–	
Газовая He+Ne	1,15	$2 \cdot 10^{-2}$	Непрерывный режим	10

Сформированное лазером ЭМИ обладает высокой степенью пространственно-временной когерентности. Временная когерентность поля достигает значения $\tau_{\text{kog}} \approx 0,1$ с, благодаря чему удается получить сигнал с узким спектром ($f \approx 10$ Гц) [247].

Высокая степень пространственной когерентности позволяет с помощью простых оптических устройств концентрировать энергию лазера в весьма узком телесном угле. Эта способность лазера позволяет при сравнительно небольшой энергии излучения на выходе оптической системы даже на больших расстояниях до подавляемого РЭС формировать ЭМИ с плотностью энергии, которой достаточно для достижения эффекта функционального поражения на значительных расстояниях (около 10 км). Однако вследствие весьма малого сечения лазерного луча ($0,2\text{--}0,8$ м 2) на расстоянии от 20 км и выше возникает проблема точного наведения луча на цель [247].

Можно выделить следующие механизмы функционального поражения объектов лазерным оружием [247].

1. Непосредственное поражение электронных приборов путем прямого воздействия мощного узконаправленного лазерного ЭМИ.
2. Выведение из строя объекта за счет вторичного индуцированного излучения плазмы, порождаемой взаимодействием сильного электромагнитного поля и твердого вещества (например, материала корпуса цели). В частности, при облучении управляемых ракет лазерным излучением с плотностью мощности порядка 10 Вт/см 2 вблизи поверхности обтекателя возникает мощное плазменное образование, являющееся источником некогерентного оптического излучения [247]. В этом случае возможно обратимое (временное) поражение РЭС, которое через некоторое время восстанавливает свои функции.
3. Деструктивное воздействие на поверхностный слой материала цели, в результате лазерное излучение может разрушить тонкостенные оболочки тепловым или ударным воздействием. В этом случае поражающее действие лазерного оружия определяется в основном термомеханическим и ударно-импульсным воздействием лазерного луча на цель и достигается за счет нагревания до высоких температур материалов объекта. Это вызывает расплавление или даже испарение материалов.

Действие лазерного излучения отличается внезапностью, скрытностью, отсутствием внешних признаков в виде огня, дыма, звука, высокой точностью, прямолинейностью распространения и практически мгновенным действием [247, 262].

Среди общих преимуществ лазерного оружия военные специалисты отмечают огромную концентрацию энергии на единице площади, практически мгновенное поражение объекта на недостижимых для других видов оружия дальностях, высокую избирательность поражения. При этом лазерные боевые комплексы могут быть наземного, морского, воздушного базирования [248, 262].

Более подробная общетеоретическая информация о методах и способах функционального поражения лазерным излучением представлена в работах [246, 247, 263].

6.2. Анализ средств поражения БПЛА лазерным излучением

В США с 1996 г. дочерней фирмой «Boeing» – Boeing Defense and Space Group велись разработки лазерного оружия большой мощности. В частности, разрабатывался химический лазер COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) авиационного базирования, общей мощностью 6 МВт, способный поражать баллистические ракеты на дальности 400-460 км. Однако комплекс специфичных проблем, связанных с созданием генераторов мощного лазерного излучения, таких как расфокусировка луча вследствие изменения оптико-физических свойств линз под влиянием лазерного излучения, необходимость отвода большого количества тепла, не позволил успешно завершить данный проект.

В 2009 г. компания Northrop Grumman Corporation сумела создать мощный и надежный боевой твердотельный лазер. Ей удалось первой в мире достичь на лазере подобной конструкции мощности луча в 105,5 кВт. Работы ведутся в рамках военной программы JHPSSL (Joint High Power Solid-State Laser – «Модульный высокомощный твердотельный лазер»). В 2010 г. удалось добиться непрерывной работы твердотельного лазера на этой мощности в течение 6 ч. Это произошло во время тестовых испытаний в процессе интеграции системы наведения и слежения перед полевыми испытаниями. По габаритам установка-демонстратор JHPSSL сопоставима с автобусом и состоит из 7 лазерных усилителей мощностью каждого порядка 15 кВт, что в сумме дает 105,5 кВт. В одном из пресс-релизов Northrop Grumman Corporation за 2009 г. сообщалось, что было проведено успешное испытание системы из 8 лазерных усилителей общей мощностью 120 кВт.

В 2011 г. прошли испытания «Морского лазера-демонстратора» MLD (Maritime Laser Demonstrator), созданного Northrop Grumman Corporation (рис. 6.1). В испытаниях участвовал твердотельный лазер, разрабатываемый в рамках военной программы JHPSSL и состоящий из нескольких модулей мощностью по 15 кВт, который был установлен на борту выведенного из боевого состава эсминца типа Spruance Paul Foster. В пресс-релизе по итогам тестирования сообщалось, что впервые боевая лазерная система для корабля была интегрирована с его радиолокационной системой обнаружения и его навигационной системой, а также впервые лазерное оружие производило «выстрелы» в море с движущейся платформы.

По мнению американских экспертов, лазерные средства поражения идеально подходят для корабельных систем ПВО и ПРО по следующим причинам. Во-первых, на кораблях стоят мощные энергетические установки, зачастую избыточной мощности. Во-вторых, над морем воздух чище, чем над сушей [264]. При этом, изменение акцента разработчиков с мегаваттной мощности в сторону киловаттной скорректировало применение лазерных средств в сторону их использования для поражения БПЛА в составе систем ПВО, а также в сторону создания гибридных систем ПВО-ПРО.



Рис. 6.1. Морской лазер-демонстратор MLD [265]

На портале YouTube было выложено официальное видео испытаний созданного исследовательской лабораторией Командования морских систем ВМС лазера LaWS (Laser Weapon System), проходивших 30 июля 2012 г. в Сан-Диего на борту USS Dewey (DDG-105) [266]. В апреле 2013 г. ВМС США заявили о планах оснащения в 2014 г. боевых кораблей лазерами, способными поражать БПЛА и мелкие суда [267]. В конце 2014 г. первая боевая лазерная установка была развернута на корабле ВМС США в Персидском заливе [268].

В 2012 г. компания Lockheed Martin официально представила прототип компактной наземной системы лазерной ПВО-ПРО ADAM (Area Defense Anti-Munitions) [269]. Система испытывалась в 2012 и 2013 г. для борьбы с небольшими БПЛА и ракетами на расстоянии в 1,5-2 км и в 2014 г. – против моторных лодок [270].

Корпорация Boeing в кооперации с британским подразделением европейского консорциума BAE System создало гибрид лазера и малокалиберной автоматической пушки Mk-38. Автоматом Mk-38 на турели вооружаются десантные и вспомогательные суда ВМС США. Эффективный огонь может вестись на дальность 2,5 км. Исполнители в июле 2011 г. объявили о создании прототипа тактической лазерной системы TLS (Tactical Laser System) для поражения БПЛА и малых судов [57].

Годом раньше подобную систему ПВО-ПРО на авиакосмическом салоне Farnborough-2010 в Великобритании показала американская компания Raytheon. Шесть волоконных лазеров LaWS (Laser Weapon System) общей мощностью 50 кВт были объединены с корабельной 20-мм шестиствольной автоматической артиллерийской установкой Mark 15 Phalanx CIWS (Close-In Weapon System – «орудийная система ближнего боя»). Подразумевается, что комбинированная

установка сможет поражать цель 6 лазерами, чьи лучи сведены в одну точку. В первую очередь она предназначена для борьбы с противокорабельными ракетами. Если же это не удастся, то на более близком расстоянии в дело вступит шестиствольная пушка, выпускающая 4500 снарядов в минуту (дальность эффективной стрельбы Mark 15 Phalanx – 1,5 км). На испытаниях в мае 2010 г. система обнаружила, захватила, взяла на сопровождение и поразила четыре БПЛА, летевших на разных высотах и дальностях. Представители Raytheon дали понять, что условия испытаний были близки к реальным боевым. При этом в британских СМИ появилось неподтвержденное сообщение, что один из БПЛА был поражен на дальности 3,2 км при скорости 480 км/ч [57].

В декабре 2013 г. в США прошли испытания боевого мобильного лазера HEL MD (High Energy Laser Mobile Demonstrator) мощностью 10 кВт для подразделений тактического звена. Во время испытаний установка уничтожила более 90 минометных снарядов и несколько БПЛА. Разработку программы HEL MD ведет корпорация Boeing. В 2014 г. были проведены успешные его испытания в сложных погодных условиях. Идут работы по установке с мощностью лазера 50 кВт, а в дальнейшем – 100 кВт. Это позволит уничтожать цели с более высокой скоростью движения [57, 271].



Рис. 6.2. Лазерная установка Excalibur [272]

Американское военное агентство DARPA испытало в начале 2014 г. установку Excalibur. Она включает в себя 28 волоконных лазеров, объединенных в систему, которая способна фокусировать луч на расстоянии, превышающем 7 км. Каждый элемент обладает излучающей мощностью в 10 кВт. Лазеры объединены в блоки по 7 шт., при этом диаметр такого блока составляет 10 см, а их общее количество и мощность можно наращивать простым соединением. Эксперименты DARPA показали эффективность масштабируемого лазера с набором излучателей. Excalibur использует особый алгоритм оптимизации лазерного излучения и в течение считанных миллисекунд корректирует параметры ла-

зерного луча, компенсируя турбулентность атмосферы. В течение следующих трех лет планируется довести мощность до 100 кВт. Данной мощности достаточно для уничтожения ракет, снарядов, БПЛА и поражения живой силы. Кроме того, такую систему можно будет совместить с существующими платформами: вертолетами, самолетами, кораблями и бронетехникой. Разработчики ожидают, что волоконно-оптический лазер будет в 10 раз легче и компактнее текущих опытных твердотельных лазерных систем [272].

В 2014 г. ВМС США и компания Kratos Defense & Security Solutions провели модернизацию десантного корабля USS Ponce (LPD-15), в ходе которой он получил новое вооружение и сопутствующее оборудование. На корабле была смонтирована лазерная система ПВО AN/SEQ-3 Laser Weapon System или XN-1 LaWS (рис. 6.3).



Рис. 6.3. AN/SEQ-3 Laser Weapon System (LaWS)

Основным элементом комплекса XN-1 LaWS является твердотельный инфракрасный лазер регулируемой мощности, с пиковой мощностью до 30 кВт. Предполагается, что комплекс XN-1 LaWS может использоваться кораблями ВМС США для самообороны от БПЛА и малых надводных целей. За счет изменения энергии ЭМИ может регулироваться степень воздействия на цель. Так, маломощные режимы смогут поражать ОЭС БПЛА, а полная мощность позволяет обеспечить физическое поражение цели, за счет его нагревания и разрушения. Таким образом, лазерная система способна защитить корабль от различных угроз, отличаясь определенной гибкостью применения. Испытания лазерного комплекса AN/SEQ-3 были начаты в середине 2014 г. в режиме с ограничением мощности генератора до 10 кВт. В дальнейшем планировалось провести ряд проверок с постепенным наращиванием мощности. На расчетные 30 кВт планировалось выйти в 2016 г. [273].

Примечательно, что лазерные системы борьбы с БПЛА заинтересовали не только ВМС, но и сухопутные войска США.

Так, в интересах сухопутных войск в 2015 г. компанией Boeing был представлен комплекс Compact Laser Weapon Systems (CLWS или CLaWS) – рис. 6.4. Задачей этого проекта является создание малогабаритной лазерной системы противодействия БПЛА, которую можно будет транспортировать при помощи легкой техники или силами расчета из двух человек. Комплекс CLWS оснащается лазером мощностью всего 2 кВт, что позволило достигнуть приемлемых боевых характеристик при компактных размерах. Тем не менее, несмотря на меньшую мощность в сравнении с другими аналогичными комплексами, система CLWS способна решать поставленные боевые задачи.



Рис. 6.4. Лазерный комплекс CLWS

В 2015 г. в ходе учений Black Dart состоялись испытания комплекса CLWS в условиях, приближенных к реальным. Учебно-боевой задачей расчета было обнаружение, сопровождение и уничтожение малогабаритного БПЛА. Автоматика системы CLWS успешно взяла на сопровождение цель в виде БПЛА самолетного типа, а затем направила лазерный луч на хвостовую часть цели. В результате воздействия на пластиковые агрегаты цели в течение 10-15 с произошло возгорание нескольких деталей с образованием открытого пламени (рис. 6.5). Испытания были признаны успешными. В 2016 г. по заказу сухопутных войск США были проведены испытания 2 кВт лазера CLWS в рамках испытаний Maneuver Fires Integrated Experiment, для чего лазер смонтировали на стандартном бронеавтомобиле JLTV. В кабине машины установили пульт управления, а блок с излучателем разместили на стойке над грузовой площадкой. Такая компоновка позволяла осуществлять круговую наводку и контроли-

ровать почти всю верхнюю полусферу. JLTV с CLWS успешно справился с поиском и уничтожением БПЛА условного противника. В дальнейшем, по мере развития этого проекта планируется разработка комплексов с мощностью 5 и 10 кВт. Так, лазер мощностью 10 кВт должен был выйти на испытания в 2019 г. Однако, пока же продолжаются испытания менее мощной системы [274].

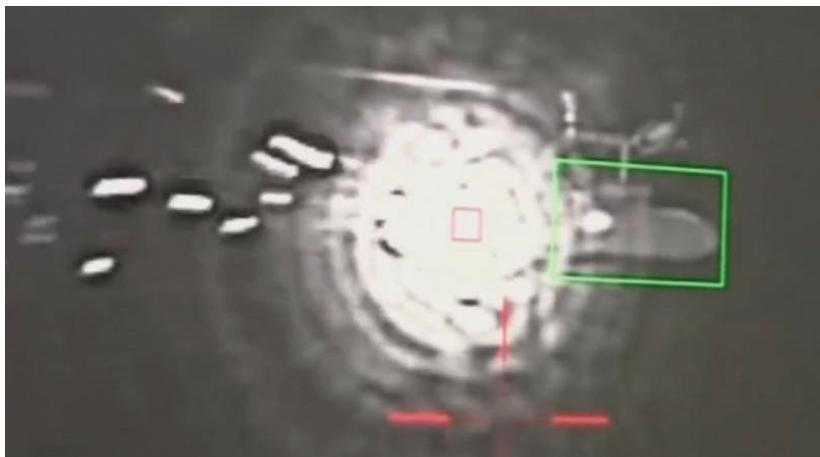


Рис. 6.5. Атака БПЛА системой CLWS, съемка в ИК-диапазоне. Наблюдаются разрушение конструкции БПЛА вследствие ее нагрева лазером [273]

Близким к принятию на вооружение можно считать разработанный для БТР Stryker лазерный комплекс GDLS компании Boeing мощностью 5 кВт, задачей которого является борьба с малоразмерными БПЛА во взаимодействии с другими системами ПВО. Этот комплекс получил наименование Stryker MEHEL 2.0. В ходе испытаний MFIX (Maneuver Fires Integrated Experiment) в 2016 г. в США, комплекс Stryker MEHEL 2.0 поразил 21 БПЛА из 23 запущенных. На последней версии комплекса дополнительно установлены системы РЭП для подавления каналов связи и навигации БПЛА. Компания Boeing планирует последовательно увеличивать мощность лазера вначале до 10 кВт, а в дальнейшем и до 60 кВт [275].

В октябре 2018 г. в рамках тех же испытаний MFIX уже другая компания – Raytheon продемонстрировала работу малогабаритной лазерной установки противодействия тактическим БПЛА. Один лазер, установленный на легковом автомобиле, поразил за короткий период 12 БПЛА на удалении до 1,4 км [135].

В перспективе в армии США должны появиться лазерные системы противодействия БПЛА мощностью до 100 кВт, позволяющие осуществлять их поражение на удалении до 5 км. Ключевое преимущество систем лазерного поражения БПЛА – в уникальной дешевизне единичных «выстрелов».

Не отстают от США и другие технологически развитые страны. Так в 2012 г. немецкая компания Rheinmetall провела испытания лазерной системы мощностью 50 кВт, состоящей из двух комплексов на 30 кВт и 20 кВт, предназначенных для перехвата миномётных снарядов в полёте, а также для пораже-

ния воздушных целей, в том числе – БПЛА. В ходе испытаний с расстояния в 1 км была перерезана стальная балка толщиной 15 мм, а с расстояния 3 км были уничтожены 2 малых БПЛА. Необходимая мощность комплексов в этой системе обеспечивается интеграцией необходимого количества модулей по 10 кВт. В 2015 г. на выставке DSEI-2015 компания Rheinmetall представила лазерный модуль мощностью уже 20 кВт, установленный на машину Boxer 8×8. В 2019 г. компания Rheinmetall сообщила об успешном испытании боевого лазерного комплекса мощностью 100 кВт. Данный комплекс включает высокомощный источник энергии, модульный генератор лазерного излучения, управляемый оптический резонатор, формирующий направленный лазерный луч, систему наведения, отвечающую за поиск, обнаружение, распознавание и сопровождение целей, с последующим наведением и удержанием лазерного луча. Система наведения обеспечивает круговой обзор в секторе 360° и угол наведения по вертикали 270°. Лазерный комплекс может быть размещен на наземных, воздушных и морских носителях, что обеспечивается модульностью конструкции. Испытания, проведенные в декабре 2018 г., показали высокие результаты, свидетельствующие о возможном скором запуске оружия в серийное производство. В качестве мишеней для проверки возможностей оружия были задействованы БПЛА и минометные снаряды. Таким образом, компания Rheinmetall последовательно, год за годом, развивала лазерные технологии, и в результате она может стать одним из первых производителей, предлагающих заказчикам серийно производимые боевые лазерные комплексы достаточно высокой мощности, ориентированные на решение задач ПВО, в том числе – на противодействие БПЛА [275].

В 2015 г. немецкая оборонная компания MBDA на Парижском авиасалоне представила лазерную установку мощностью 40 кВт, которая может сбивать мини-БПЛА в радиусе 3–5 км и успешно использовалась по воздушным целям на расстоянии более 2 км и высоте 1 км. Для подсветки цели и более точного наведения боевого лазера предполагалось использовать еще один лазер малой мощности. При этом ранее компания MBDA испытала лазерную установку мощностью 20 кВт, которая успешно уничтожила мини-БПЛА на расстоянии 500 м, затратив на это 3,4 с. В модернизированной установке были использованы 4 лазера мощностью по 10 кВт, лучи которых фокусировались с помощью системы зеркал. Коэффициент полезного действия (КПД) составлял около 30%. Благодаря модульному принципу можно собирать и более мощные установки. Инженеры MBDA сочли оптимальным использование от 4 до 6 лазерных модулей в установке, что позволит сохранить небольшие габариты всей системы. Компания также планировала разработать самоходную лазерную установку с переменной мощностью от 5 до 20 кВт [276].

Отечественные производители средств поражения БПЛА также работают в направлении использования лазерных средств поражения для противодействия БПЛА. Так на выставке «Армия-2020» отечественные производители представили мобильный комплекс «Рать» предназначенный для борьбы с БПЛА с ЭПР порядка 0,01 м². Комплекс обнаруживает БПЛА с ЭПР 0,01 м² двигающихся со скоростью до 200 км/ч с помощью РЛС на дальности до 3,5 км. Противодействие БПЛА данным комплексом носит интегрированный характер –

на дальности от 2,5 км используются средства РЭП, подавляющие каналы радиосвязи ПУ – БПЛА в диапазоне 2-6 ГГц, а также средства ФП ЭМИ с целью поражения бортовых РЭС БПЛА; на дальности от 1 км против БПЛА применяется генератор лазерного излучения, по заявлению производителя, гарантированно поражающего малые БПЛА путем их нагрева и разрушения [288].

6.3. Эффективность поражения БПЛА лазерным излучением

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что функциональное поражение БПЛА существующими лазерными комплексами достигается за счет возникновения одного или нескольких эффектов:

- поражение электронных приборов, прежде всего матриц приемников ОЭС бортовой аппаратуры наблюдения БПЛА путем прямого воздействия сильного узконаправленного лазерного ЭМИ;
- нагревание до высоких температур материалов БПЛА, с последующим их возгоранием, расплавлением или разрушением;
- индуцирование плазмы, порождаемой взаимодействием лазерного ЭМИ и твердого вещества (например, пластикового корпуса) БПЛА;
- лазерные средства могут применяться совместно со средствами огневого поражения ПВО для «подогрева» цели, в интересах повышения ее «видимости» для ИК-головок самонаведения ГСН ЗУР комплексов ПВО.

Подавляющее число существующих лазерных комплексов из вышеуказанных эффектов, в основном используют только первые два – поражение ОЭС и поражение конструкции БПЛА путем его нагрева. Рассмотрим их более подробно.

Одним из основных элементов БПЛА, подвергающихся лазерному излучению, является фото- видео-приемник ОЭС. Рассмотрение воздействия излучения большой мощности на фотоприемники основывается на процессах взаимодействия лазерного излучения с полупроводниками, из которых изготавливают приемники оптического излучения ОЭС. Экспериментальные исследования показали, что при плотности энергии лазерного излучения $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$ Дж/см² и длительности импульсов 0,3 с температура наружной поверхности фильтра на площади, куда попало излучение, превышает температуру плавления его поверхностного слоя. При плотностях энергии импульсного лазерного излучения на входном зрачке ОЭС порядка 10^{-2} Дж/см² происходит быстрый нагрев приемника излучения до высокой температуры. Такие уровни облучения могут быть созданы лазерным источником с энергией излучения в импульсе 200-300 Дж на дальностях порядка 5 км [246].

Что касается поражения БПЛА путем его нагрева, то здесь необходимо отметить, что такой способ поражения зависит от мощности лазерного ЭМИ и времени удержания лазерного луча на БПЛА. Результаты испытаний показывают, что для теплового поражения БПЛА требуется удержание на нем лазерного луча мощностью 2 кВт в течении 10-15 с, а луча 20-50 кВт – 0,5-5 с. Такая длительность удержания луча на цели является существенной проблемой на высоких дальностях поражения (свыше 10 км). Например, для того, чтобы по-

пасть в отсек с двигателем БПЛА с размахом крыла 1 м на удалении 2 км требуется угловая точность наведения лазерного луча не хуже 0,00145°. Поскольку БПЛА находится в движении и маневрирует, то реальная точность ориентации лазерного луча для получения эффекта поражения БПЛА должна быть еще на порядок выше. Выдержать это требование в ближайшее время вряд ли будет возможно [21].

Сегодня функциональное поражение БПЛА является еще экспериментальной технологией. Однако, результаты испытаний первых прототипов позволяют утверждать, что именно данный тип поражения малых коммерческих БПЛА имеет высокую эффективность и наилучшие перспективы развития. К основным достоинствам данного типа поражения стоит отнести следующее.

1. В сравнении со средствами ПВО, лазерные средства поражения не расходуют какой-либо ресурс материальных средств (снаряды, ракеты и т.п.), при этом возможности непрерывной работы на отражение масированных налетов группы БПЛА ограничены исключительно энергозатратностью источника питания, а при наличии стационарного питания – ограниченны режимом непрерывной работы генератора лазерного ЭМИ на излучение.
2. В сравнении со средствами РЭП лазерные средства поражения, обеспечивают однозначный эффект прекращения полета БПЛА за контролируемую зону путем его нагрева с последующим разрушением. Причем данный эффект не зависит от достоверности предварительного вскрытия параметров командной радиолинии управления или эффективности постановки помех. Средства поражения лазерным излучением обладают высокой избирательностью, могут применяться против БПЛА, осуществляющих полет в режиме «радиомолчания» и по автономной программе, днем и ночью, в условиях как мирного, так и военного времени, в том числе – в черте городской застройки и на промышленных объектах.
3. В сравнении со средствами поражения СВЧ ЭМИ при сопоставимой эффективности лазерные средства поражения не требуют проведения масштабных мероприятий по обеспечению ЭМС с другими РЭС, а также мероприятий по электромагнитной безопасности операторов данных средств.

Вероятность функционального поражения БПЛА без отражателей и защитных экранов $P_{\text{пор}}$ с помощью лазерного излучения можно определить по выражению [21]:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{обн}} P_{\text{нав}} P_{\text{уд}} P_{\text{разр}},$$

где:

$P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения БПЛА в интересах выдачи целеуказания на лазерное средство поражения. Обнаружение может производиться как РЛС так и ОЭС, при этом подробные вероятностно- дальностные оценки обнаружения БПЛА представлены в главе 2;

$P_{\text{нав}}$ – вероятность успешного наведения лазерного луча на БПЛА. Для механической следящей системы этот показатель применительно к рассмотренным выше условиям находится на уровне 0,8-0,87 [21];

$P_{уд}$ – вероятность удержания лазерного луча на БПЛА в течение заданного времени. Для БПЛА летящего прямолинейно с постоянной скоростью $P_{уд} \approx 0,9$. Для БПЛА маневрирующего с перегрузкой $g \geq 1,7$ вероятность удержания луча составляет $P_{уд} \leq 0,3$ [21];

$P_{разр}$ – вероятность того, что воздействие лазерного луча на конструкцию БПЛА приведёт к её разрушению, возгоранию, взрыву горючего или боеприпаса. При возможности точной идентификации цели эта величина может достигать значения $P_{разр} \rightarrow 1$. В других случаях, прожиг пустотелого корпуса или плоскости крыла, к фатальным последствиям для БПЛА не приведет. По крайней мере, все попытки повредить вращающийся воздушный винт БПЛА во время экспериментов окончились безрезультатно [21]. Кроме того, на эту вероятность влияют факторы трассы распространения луча – облачность, дымка, туман, осадки резко снижают вероятность разрушения $P_{разр}$ даже при условии высоких показателей обнаружения, наведения и удержания луча.

К недостаткам и проблемным вопросам использования лазерных средств поражения можно отнести следующее.

1. Эффективность лазерных средств поражения существенно зависит от метеоусловий. Низкая облачность, дымка, туман, осадки, все это резко снижает эффективность применения данных средств.
2. Эффективность лазерных средств поражения может быть существенно снижена, фактически сведена к нулю, применением одиночными или группой БПЛА таких элементарных способов маскировки как распыление аэрозолей типа «дымовая завеса».
3. Лазерные средства поражения требуют высокоточного внешнего целеуказания, как правило, от РЛС или ОЭС обнаружения БПЛА.
4. Для достижения эффекта поражения БПЛА требуется удержание лазерного луча на цели в течение 0,5–15 с, что на высоких дальностях и при маневренном полете БПЛА является достаточно сложной технической задачей.
5. С развитием и широким распространением технологий лазерного поражения ожидается переход к использованию в корпусах БПЛА материалов, специально ориентированных на отражение или рассеивание лазерного излучения.

В целом отметим, что современные лазерные системы находятся только в начале своего пути в качестве эффективной системы ПВО и противодействия БПЛА. Научно-исследовательский задел 2010-х гг., полученный при проведении испытаний первых образцов лазерного вооружения, позволил сформировать основные принципы построения лазерных комплексов ПВО – использование твердотельных и волоконных лазеров, а также построение лазерных систем по модульному принципу, путем объединения нескольких лазерных генераторов в единый комплекс. Однако несмотря на наличие успешно работающих прототипов, вопросы объединения большого числа генераторов, объединение генераторов высокой мощности, синхронизация их работы и сведение всех лучей на цели на высокой дальности, повышение КПД лазерных систем, а также создание эффективных систем теплоотвода – это сложные технические задачи, которые до конца еще не решены.

7. Другие средства и способы противодействия БПЛА

7.1. Противодействие БПЛА с использованием специальных БПЛА-перехватчиков

Данный способ противодействия БПЛА является одним из наименее проработанных, однако, в перспективе – одним из наиболее перспективных.

В работе [21] в качестве платформы БПЛА-перехватчика рассматривался многофункциональный БПЛА [93], внешний вид и компоновка которого приведена на рис. 7.1. Целями для БПЛА-перехватчика рассматривались [21]:

- воздухоплавательная техника;
- БПЛА со скоростями полёта до 300 км/ч.

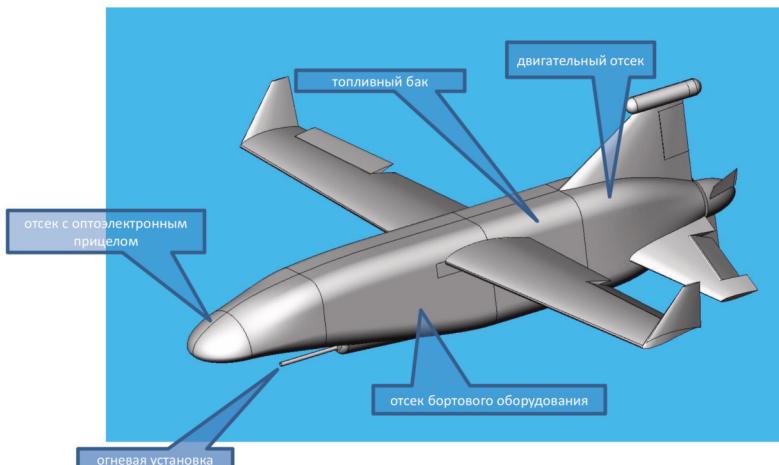


Рис. 7.1. Компоновка БПЛА-перехватчика (вариант) [21]

Предполагалось двухэтапное применение такого БПЛА в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Предварительное целеуказание для БПЛА-перехватчика осуществлялось с наземного ПУ. В качестве средства поражения на БПЛА-перехватчике может быть установлена малокалиберная лёгкая гладкоствольная пушка. В качестве поражающих элементов – композитная дробь.

Результаты предварительных исследований, представленных в [21], показали приемлемый уровень боевой эффективности такого БПЛА-перехватчика при перехвате одиночных целей:

- для свободно дрейфующего воздушного шара диаметром 4 м, объемом $33,5 \text{ м}^3$ вероятность поражения составила $P_{\text{пор}} \geq 0,7$;
- для одиночного БПЛА, маневрирующего с перегрузкой $1,5g$ и изменением курса («змейка») на скорости 150 км/ч вероятность поражения составила $P_{\text{пор}} \approx 0,67$.

Однако, оказалось, что применение БПЛА-перехватчика для противодействия группе из 4-х БПЛА не привело к успешному перехвату всех целей: половина перехватываемой группы БПЛА успешно выполнила свою задачу. При этом, замена средства поражения с гладкоствольной пушки на комплект управляемых малогабаритных ракет с ГСН не привела к улучшению результата [21].

Другой вариант БПЛА-истребителя рассмотрен в работах [277, 278]. В данных работах в отсеке бортового оборудования БПЛА-перехватчика (рис. 7.1) предлагается разместить большое количество «пакетов» с поражающими элементами. При этом в качестве поражающих элементов могут рассматриваться:

- объемные сети или нити из высокопрочных материалов;
- иглы;
- клейкие аэрозоли;
- горючие аэрозоли.

В процессе боевого применения БПЛА-перехватчик достигает группы перехватываемых БПЛА и на маршруте их полета выбрасывает пакеты которые, самовскрываясь на определенной высоте, формируют «бесполетную зону» противодействия. Количество применяемых пакетов, зависит от плотности и количества БПЛА в группе и позволяет многократно использовать БПЛА-перехватчик.

Критическими для принятия решения по продолжению дальнейших исследований явились следующие факторы [21]:

- в среднем, стоимость поражения БПЛА существенно превышает стоимость самих поражаемых БПЛА;
- низкая эффективность применения БПЛА-перехватчика против групп малогабаритных маневренных БПЛА;
- существенное усложнение структуры воинского формирования, которому должен быть придан комплекс с БПЛА-перехватчиком, и, как результат, потеря оперативности и мобильности этого воинского формирования;
- быстрое и резкое снижение эффективности комплексов с БПЛА-перехватчиками по мере расходования таких БПЛА из комплекта в потери.

Одним из вариантов преодоления вышеуказанных негативных факторов, по отношению к одиночным БПЛА, является создание системы из высокointеллектуальных БПЛА-перехватчиков патрулирующих заданный район. Как указывается в [97], компания Airspace Systems (г. Сан-Леандро, США) разработала подобную систему в которой мощные БПЛА-перехватчики, оборудованные сетью, обнаруживают, наводятся и осуществляют перехват малых «БПЛА-квадрокоптеров». Как указывает разработчик, БПЛА-перехватчики могут автономно обнаруживать другой БПЛА-нарушитель на трассе своего патрулирования, самостоятельно рассчитывать и прогнозировать траекторию его полета, догонять с опережением и сбрасывать на БПЛА-нарушитель кевларовую сеть.

Примерные характеристики БПЛА-перехватчиков, выстреливающих сеть в перехватываемый БПЛА, приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Примерные характеристики
БПЛА-перехватчиков, выстреливающих сеть [90]

Параметр	БПЛА-перехватчик типа «квадрокоптер»	БПЛА-перехватчик типа «планер»	Ракета
Максимальная скорость	60 км/ч	150 км/ч	800 км/ч
Максимальная дальность	10 км	50 км	12 км
Максимальная высота цели	2 км	2 км	5 км
Точность поражения	1,8 м	1,8 м	0,2 м
Диаметр выстреливающейся сетки	10 м	10 м	2,5 м



Рис. 7.2. Использование БПЛА-перехватчиков оборудованных сетью [279]

В некоторых других решениях сеть не выстреливается в БПЛА-нарушитель, а постоянно закреплена снизу БПЛА-перехватчика, что позволяет ему «собирать» сетью за один вылет несколько малых «БПЛА-квадрокоптеров» (рис. 7.2). Именно такой способ применения БПЛА-перехватчиков использует Японская полиция для пресечения несанкционированных полетов БПЛА-квадрокоптеров при проведении массовых мероприятий [279].

7.2. Противодействие БПЛА с использованием горючих аэрозолей

При использовании против БПЛА аэрозольного облака горючего вещества оно заблаговременно распыляется на трассе полета БПЛА и впоследствии поджигается, например, путем использования трассирующих боеприпасов.

При использовании аэрозольного облака горючего вещества, роль топлива могут выполнять: окись этилена и окись пропилена, бутилнитрит и пропилнитрит, МАРР: техническая смесь метилацетилен, аллена (пропадиена) и

пропана. Возможно использование смесей горючих (включая лёгкие бензины) и мелкодисперсного порошка алюминий – магниевого сплава в пропорции 10:1 [21].

Данный способ борьбы с БПЛА относительно прост, однако имеет свои недостатки, которые делают его малопригодным для практического применения [21]:

- сильная зависимость от погодных и ветровых условий;
- невозможность применения в городских условиях при проведении мероприятий антитеррористической направленности;
- невозможность селекции поражаемых воздушных целей;
- сложность управления моментом подрыва аэрозольного облака;
- сложность процесса формирования аэрозольного облака в нужном месте, в нужное время с требуемым уровнем концентрации горючего вещества;
- малый «срок жизни» аэрозольного облака;
- потенциально низкая эффективность применения против активно маневрирующих БПЛА и т.д.

7.3. Противодействие БПЛА с использованием специальных клейких и вязких аэрозолей

Данный способ, в принципе, аналогичен вышеуказанному, с той лишь разницей, что в качестве основы аэрозольного облака используются не горючие, а другие вещества:

- клейкие аэрозоли – при взаимодействии с несущими аэродинамическими поверхностями и элементами управления БПЛА прилипают к ним, изменяя их геометрическую конфигурацию и свойства обтекания воздухом, что делает БПЛА аэродинамически неустойчивым, и в конечном итоге – проводят к падению аппарата;
- вязкие аэрозоли – изменяют свойства (плотность и вязкость) воздуха в котором движется аппарат, и так же делают БПЛА аэродинамически неустойчивым, и в конечном итоге – проводят к его «сваливанию», либо «опрокидыванию».

Данному способу противодействия свойственены почти все те же недостатки, что и способу с аэрозольным облаком горючего вещества.

7.4. Противодействие БПЛА с использованием сетей

Использование сетей – улавливателей БПЛА, применяемых с Земли или с других БПЛА, в настоящее время является активно развивающимся направлением [21].

Сеть, опутав БПЛА, блокирует двигатели и элементы системы управления аппарата, лишая его возможности продолжать полет. Анализ [19] показал, что существующие наземные пусковые установки, выстреливающие сеть, обеспечивают дальность перехвата БПЛА 100-300 м, точность – порядка 0,5 м, при диаметре выстреливаемой сети от 2,5 до 10 м.

В целом, способ противодействия БПЛА за счет использования сетей является весьма эффективным, особенно в условиях городской застройки. Однако этому способу присущи некоторые недостатки, которые ограничивают его применение при ведении боевых действий или проведении специальных операций [21]:

- малая дальность применения – не более 200-300 м;
- пригодность только для малоскоростных и зависающих БПЛА;
- возможность применения только в пределах визуального наблюдения;
- сильная зависимость от погодных, и особенно ветровых, условий.

Дальнейшим развитием данного способа противодействия БПЛА может служить создание специальных боеприпасов с разделяющейся боевой частью, между элементами которой натягивается сеть диаметром 1,5 м. Основной недостаток такого способа борьбы – недостаточная дальность, ограниченная у существующих прототипов 90 м [139].

7.5. Противодействие БПЛА с использованием специально тренированных птиц

В работе [1] указывается очень «нетрадиционный» способ противодействия БПЛА. В Голландии фирма Guard обучает крупных хищных птиц перехватывать малые БПЛА, нападая на них сверху в процессе их полета. Согласно информации этой компании, орлы, которые обуты в специальные щитки для защиты своих лап от вращающихся винтов БПЛА, демонстрируют 95% эффективность перехвата, что гораздо выше, чем эффективность большого количества технических систем.

7.6. Вывод БПЛА из положения устойчивого полёта в закритические условия путём накрытия спутным следом от пролетающего летающего аппарата

Способ вывода БПЛА из положения устойчивого полёта в закритические условия путём накрытия его спутным следом от пролетающего ЛА (пилотируемого или беспилотного), впервые был описан в работе [21], и может быть достаточно эффективным несмотря на всю свою экзотичность.

Высокая эффективность этого способа связана с тем, что бортовые системы управления современных БПЛА не могут обеспечивать устойчивость и управляемость на закритических режимах полёта. Вывод БПЛА на закритические условия полёта за счёт воздействия спутным следом [280] приводит к тому, БЛА оказывается на очень больших по модулю углах атаки во вращающемся потоке воздуха.

В авиации хорошо известны случаи аварий и катастроф из-за попадания ЛА в спутный след от пролетевшего самолёта [281]. При этом, вывод ЛА из сложных условий, вызванных попаданием в спутный след представляет очень тяжёлую задачу для экипажа и автоматике она пока неподвластна.

7.7. Мероприятия, направленные на повышение скрытности собственных объектов, а также на снижение эффективности применения БПЛА

Подавляющее количества малых БПЛА применяются для решения задач разведки. В связи с этим особую важность приобретают мероприятия, направленные на повышение скрытности собственных объектов. Данные мероприятия носят «пассивный» характер и ориентированы, не на противодействие непосредственно БПЛА, а на введение в заблуждение средств разведки, имеющимся в составе аппаратуры БПЛА.

К основным мерам повышения скрытности, следует отнести [49]:

- использование различных способов маскировки важных объектов;
- применение маскирующих дымов и аэрозолей;
- создание системы ложных (имитирующих) объектов;
- умелое использование силами и средствами защитных свойств местности и др.

Комплекс подобных мер имеет целью ввести в заблуждение относительно истинного расположения сил и средств на позициях, воспрепятствовать разведывательной аппаратуре БПЛА получать объективные данные путем проведения аэрофотосъемок, определения частотно-технических характеристик излучающей радиоэлектронной аппаратуры, ведения оптического наблюдения, передачи видеоизображений и др. [49].

Маскировка войск всегда проводилась при занятии боевых позиций и подготовке к ведению боевых действий. Однако, появление малоразмерных БПЛА, «неподвижно висящих» над боевыми позициями, способных в режиме реального времени передавать противнику видеоизображения непосредственно с поля боя, предъявляет повышенные требования к проведению маскировочных мероприятий. Тщательная маскировка должна стать необходимым, крайне важным видом боевого обеспечения, решающим задачи ослабления (устранения) тактических и технических демаскирующих признаков своих сил и средств [49].

Ослабление демаскирующих признаков требует нешаблонного построения порядков сил, применения специальных средств маскировки, маскировочного окрашивания ВВТ, специальных надувных макетов-имитаторов боевой техники, ложных излучателей электромагнитной энергии, уголковых отражателей и т.п. Весьма эффективным в интересах обеспечения скрытности элементов боевого порядка от разведки малоразмерными БПЛА является применение аэрозолей и дымов. Практика показывает, что комплексное применение перечисленных выше мер маскировки в совокупности с умелым использованием маскирующих (скрывающих) свойств местности позволяет снизить возможности оптических средств воздушной разведки противника на 20-40% [49].

Таким образом, комплексное применение мероприятий повышения скрытности своих сил и средств позволит значительно снизить результативность применения малоразмерных БПЛА противника по ведению ими разведки и точечного поражения войсковых объектов [49].

Заключение

В монографии в кратком и обзорном виде представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств противодействия БПЛА, основанных на огневом поражении, радиоэлектронном подавлении, функциональном поражении СВЧ-излучением, а также поражении лазерным излучением. В основу систематизации положено более 280 открытых источников, анализ которых позволил вскрыть основные особенности БПЛА, как объекта обнаружения и поражения, а также провести многоаспектный подробный анализ современных комплексов ПВО, РЭП, ФП ЭМИ и лазерного оружия, а также оценить их эффективность при работе по воздушным целям типа БПЛА.

Элементом новизны работы являются выявленные общие особенности процессов обнаружения и поражения БПЛА, а также системные недостатки используемых технологических решений в комплексах ПВО, РЭП, ФП ЭМИ и лазерного оружия, приводящие к снижению их боевой эффективности при применении против БПЛА.

Материал монографии может использоваться для формирования исходных данных для моделирования и исследования боевой эффективности комплексов ПВО, РЭП, ФП ЭМИ и лазерного оружия, при их противодействии БПЛА. Также, данная монография может быть полезна конструкторам, проектирующим системы противодействия БПЛА, а также военным специалистам при оценке параметров БПЛА или группы БПЛА, гарантированно вскрывающих и преодолевающих зону противодействия противника при решении своих целевых задач.

Список сокращений

- 2G – 2th Generation – 2-е поколение мобильной связи
- 3G – 3th Generation – 3-е поколение мобильной связи
- 4G – 4th Generation – 3-е поколение мобильной связи
- ACM – Adaptive Coding and Modulation – адаптивный выбор типа кодирования и модуляции сигнала
- AES – Advanced Encryption Standard – симметричный алгоритм блочного шифрования
- APSK – Amplitude Phase Shift Keying – амплитудно-фазовая манипуляция
- ARM – Advanced RISC Machine – усовершенствованная RISC-машина, семейство микропроцессорных и микроконтроллерных ядер, разрабатываемых компанией ARM Limited
- BER – Bit Error Rate – вероятность ошибочного приема бита
- BPSK – Binary Phase-Shift Keying – двоичная фазовая манипуляция
- C – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 4-8 ГГц
- CCDC – Combat Capabilities Development Command – командование по развитию боевых возможностей
- CDMA – Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением каналов / абонентов
- CLaWS – Compact Laser Weapon Systems – малогабаритная лазерная система вооружения
- CLWS – Compact Laser Weapon Systems – малогабаритная лазерная система вооружения
- CPU – Central Processing Unit – центральный процессор
- CR – Close-Range – ближнего действия
- C-RAM – Counter Rocket, Artillery and Mortar – противодействие ракетам, артиллерией и минометам
- DDOS – Distributed Denial of Service – распределенная компьютерная атака «отказ в обслуживании»
- DEC – Decoy – ложная цель
- DES – Data Encryption Standard – симметричный стандарт шифрования данных
- DME – Distance Measuring Equipment – всенаправленный дальномерный радиомаяк
- DOS – Denial of Service – компьютерная атака «отказ в обслуживании»
- DQPSK – Differential Quadrature Phase Shift Keying – относительная (дифференциальная) фазовая манипуляция со сдвигом кратным $\pi/4$
- DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum – широкополосная модуляция сигнала с прямым расширением спектра
- DVB – Digital Video Broadcasting – стандарт цифрового видеовещания

DVB-S	– Digital Video Broadcasting – Satellite – стандарт спутниковой цифровой передачи данных
ESC	– Electric Speed Controller – электронный регулятор скорости
FCU	– Flight Control Unit – полетный контроллер
FDMA	– Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по частоте
FEC	– Forward Error Correction – прямая коррекция ошибок
FHSS	– Frequency Hopping Spread Spectrum – расширение спектра за счет использования псевдослучайной перестройки рабочей частоты
FSK	– Frequency Shift Keying – частотная манипуляция
G	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 110-300 ГГц
GMSK	– Gaussian Minimum Shift Keying – гауссовская минимальная манипуляция
GPS	– Global Positioning System – глобальная система определения местоположения
GPU	– Graphics Processing Unit – графическое процессорное устройство
GSM	– Global System for Mobile communications – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи
HALE	– High-Altitude, Long-Endurance – высотный, высокой длительности полета
HR-DSSS	– High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum – высокоскоростная широкополосная модуляция сигнала с прямым расширением спектра
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers – Институт инженеров электротехники и электроники
K	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 18-27 ГГц
Ka	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 27-40 ГГц
KAIST	– Korea Advanced Institute of Science and Technology – Корейский институт научных исследований и технологий
Ku	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 12-18 ГГц
L	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 1-2 ГГц
LADP	– Low Altitude Deep Penetration – низковысотный, большой дальности полета
LALE	– Low Altitude Long Endurance – маловысотный, большой длительности полета
LDPC	– Low-Density Parity-check Code – помехоустойчивый код с малой плотностью проверок на чётность

LOWER AD	<ul style="list-style-type: none"> – Low-Cost Extended Range Air Defense – система ПВО низкой стоимости
LTE	<ul style="list-style-type: none"> – Long Term Evolution. – «долговременное развитие» – проект разработки сетей 4G стандарта с усовершенствованной технологией мобильной передачи данных
MALE	<ul style="list-style-type: none"> – Medium-Altitude Long-Endurance – средневысотный, большой длительности полета
MAV	<ul style="list-style-type: none"> – Micro Air Vehicle – микро летательный аппарат
MAVlink	<ul style="list-style-type: none"> – Micro Air Vehicle Link – протокол обмена данными между наземной станцией и малыми беспилотными летательными аппаратами
MF-TDMA	<ul style="list-style-type: none"> – Multi-Frequency TDMA – многочастотный доступ с разделением по времени
MIMO	<ul style="list-style-type: none"> – Multiple Input – Multiple Output – система «множество входов – множество выходов»
MPEG	<ul style="list-style-type: none"> – Moving Picture Experts Group – видео- и аудио- стандарт для широковещательного телевидения
MR	<ul style="list-style-type: none"> – Medium Range – средней дальности
MRE	<ul style="list-style-type: none"> – Multi Role Endurance – многоцелевой
NAVSTAR	<ul style="list-style-type: none"> – NAVigation System using Timing And Ranging – спутниковая радионавигационная система «Навстар»
OFDM	<ul style="list-style-type: none"> – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов
OSI	<ul style="list-style-type: none"> – Open System Interconnections – эталонная модель взаимодействия открытых систем
QAM	<ul style="list-style-type: none"> – Quadrature Amplitude Modulation – квадратурная амплитудная модуляция
QNX	<ul style="list-style-type: none"> – POSIX-совместимая операционная система реального времени, предназначенная преимущественно для встраиваемых систем
QPSK	<ul style="list-style-type: none"> – Quadro Phase-Shift Keying – квадратичная фазовая манипуляция
RISC	<ul style="list-style-type: none"> – Reduced Instruction Set Computer – архитектура вычислительной системы, реализующая сокращенную систему команд
RPAV	<ul style="list-style-type: none"> – Remotely Piloted Aerial Vehicle – удаленно пилотируемый летательный аппарат
S	<ul style="list-style-type: none"> – радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 2-4 ГГц
SCADA	<ul style="list-style-type: none"> – Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных
SLAM	<ul style="list-style-type: none"> – Simultaneous Localization and Mapping – режим автоматического одновременного построения карты местности в неизвестном пространстве, контроля текущего местоположения объекта и пройденного пути
SOQPSK	<ul style="list-style-type: none"> – Shaped Offset Quadrature Phase Shift Keying – тип QPSK сигнала
SR	<ul style="list-style-type: none"> – Small Range – малой дальности

STANAG	– STANdardization AGreement – семейство стандартов, принятых в вооруженных силах стран НАТО
TDMA	– Time Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по времени
TEK	– Traffic Encryption Key – ключ для шифрования трафика
TGT	– Target – летательный аппарат – мишень
TUAV	– Tactical Unmanned Aerial Vehicle – тактический беспилотный летательный аппарат
UAS	– Unmanned Aircraft System – беспилотная летательная система
UAV	– Unmanned Aerial Vehicle – беспилотный летательный аппарат
UVAS	– Unmanned-Aircraft Vehicle System – беспилотная летательная система
UCAV	– Unmanned Combat Aerial Vehicle – боевой беспилотный летательный аппарат
UHF	– Ultra High Frequency – ультравысокие частоты, соответствующие частотам от 300 МГц до 3 ГГц, в СССР аналогичный диапазон носил название «ультракороткие волны»
V	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 40-75 ГГц
VME	– Virtual Machine Environment – операционная система
VOR	– Very high frequency Omni-directional Radio Range – всенаправленный азимутальный радиомаяк
W	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 75-110 ГГц
WEP	– Wired Equivalent Privacy – стандарт обеспечения безопасности сетей Wi-Fi
Wi-Fi	– беспроводная сеть стандарта IEEE 802.11
WiMAX	– Worldwide Interoperability for Microwave Access – широкополосный стандарт радиодоступа
WPA	– Wi-Fi Protected Access – стандарт обеспечения безопасности сетей Wi-Fi
X	– радиодиапазон, в соответствии с номенклатурой стандарта IEEE 521-2002, соответствующий частотам 8-12 ГГц
А	– активный
АБГШ	– аддитивный белый гауссовский шум
АЗН-В	– автоматическое зависимое наблюдение-вещание
АП	– аппаратура потребителя
АР	– акустическая разведка
АФАР	– активная фазированная антенная решетка
АФУ	– антенно-фидерное устройство
Б	– боевой
ББС	– беспилотный боевой самолет
БД	– база данных
БД	– большой дальности
БиОТР	– баллистические и оперативно тактические ракеты

БИП	– бортовой источник питания
БИС	– большая интегральная схема
Б-Л	– беспилотная ложная цель
БЛА	– беспилотный летательный аппарат
БлД	– ближней дальности
БМ	– боевая машина
ВМГ	– взрывомагнитный генератор
Б-М	– беспилотная мишень
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат
БРЭО	– бортовое радиоэлектронное оборудование
Б-У	– беспилотный ударный
БЦВМ	– бортовая цифровая вычислительная машина
БЧ	– боевая часть
БЧХ	– помехоустойчивый код Боуза-Чоудхури-Хоквенгема
ВБД-БПП	– высотный, большой дальности, большой продолжительности полета
BBC	– Военно-воздушные силы
BBCT	– вооружения, военная и специальная техника
БВТ	– вооружение и военная техника
ВКС	– Воздушно-космические силы
ВМС	– Военно-морские силы
ВРД	– воздушно-реактивный двигатель
ВС	– вооруженные силы
ВСИ	– внутрисистемная информация
ВТО	– высокоточное оружие
ВЧ	– высокая частота
ГЛОНАСС	– ГЛОбальная российская НАВигационная Спутниковая Система
ГСН	– головка самонаведения
ДКМВ	– декаметровые волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длиnam волн 10-100 м, что соответствует частотам от 3 - 30 МГц
ДМВ	– дециметровые волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длиnam волн от 10 см до 1 м, что соответствует частотам от 300 МГц до 3 ГГц
ДНА	– диаграмма направленности антенны
ДЦМВ	– дециметровые волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длиnam волн от 10 см до 1 м, что соответствует частотам от 300 МГц до 3 ГГц
ЕС	– Европейский Союз
ЗАК	– зенитно-артиллерийский комплекс
ЗАУ	– зенитная артиллерийская установка
ЗПП	– забрасываемый передатчик помех
ЗПУ	– зенитная пулемётная установка
ЗРАК	– зенитный ракетно-артиллерийский комплекс
ЗРК	– зенитно-ракетный комплекс

ЗРК БД	– зенитно-ракетный комплекс ближнего действия
ЗРК ДД	– зенитно-ракетный комплекс дальнего действия
ЗРК МД	– зенитно-ракетный комплекс малой дальности
ЗРК СД	– зенитно-ракетный комплекс средней дальности
ЗРПК	– зенитный ракетно-пушечный комплекс
ЗСАУ	– зенитная самоходная артиллерийская установка
ЗСУ	– зенитная самоходная установка
ЗУ	– зенитная установка
ЗУР	– зенитная управляемая ракета
ИИ	– искусственный интеллект
ИК	– инфракрасный
ИНС	– инерциальная навигационная система
ИРИ	– источник радиоизлучения
ИС	– информационная система
ИТВ	– информационно-техническое воздействие
КВ	– короткие волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длинам волн от 10 м до 100 м, что соответствует частотам от 3 МГц до 30 МГц
КПД	– коэффициент полезного действия
КР	– компьютерная разведка
КРУ	– командная радиолиния управления
КТОиР	– комплексное техническое обслуживание и ремонт
ЛА	– летательный аппарат
ЛК	– лазероконтрастный канал
МБД	– маловысотный большой дальности
МБД-БПП	– маловысотный, большой дальности, большой продолжительности полета
МВ	– метровые волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длинам волн 1-10 м, что соответствует частотам от 30 до 300 МГц
МВД	– Министерство внутренних дел
МД	– малой дальности
МО	– Министерство обороны
МСНР	– многоканальная станция наведения ракет
НАТО	– Организация североатлантического договора
НОС	– наземные опорные станции
НС	– нейронная сеть
ОКС	– оперативно-командная связь
ОАЭ	– Объединенные Арабские Эмираты
ОП	– опционально пилотируемый
ОС	– операционная система
ОСШ	– отношение сигнал/шум
ОЭР	– оптико-электронная разведка
ОЭС	– оптико-электронное средство
ПА	– полуактивный

ПВО	– противовоздушная оборона
ПЗРК	– переносной зенитно-ракетный комплекс
ПЛИС	– программируемая логическая интегральная схема
ПНС	– правительство национального согласия
ПО	– программное обеспечение
ПП	– переоборудованный пилотируемый
ППРЧ	– псевдослучайная перестройка рабочей частоты
ПРО	– противоракетная оборона
ПУ	– пункт управления
РДТТ	– ракетный двигатель твердого топлива
РК	– радиоконтрастный
РЛР	– радиолокационная разведка
РЛС	– радиолокационная станция
РР	– радиоразведка
РРТР	– радио- и радиотехническая разведка
РС	– помехоустойчивый код Рида-Соломона
РСБН	– радиотехническая система ближней навигации
РСЗО	– реактивная система залпового огня
РТР	– радиотехническая разведка
РФ	– Российская Федерация
РЭО	– радиоэлектронное оборудование
РЭП	– радиоэлектронное подавление
РЭС	– радиоэлектронное средство
СБД-БПП	– средневысотный большой дальности, большой продолжительности полета
СВН	– средство воздушного нападения
СВЧ	– сверхвысокие частоты, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют частотам от 3 ГГц до 30 ГГц
СД	– средней дальности
СД-БПП	– средней дальности с большей продолжительностью полета
СДЦ	– селекция движущихся целей
СКИ	– сверхкороткоимпульсный
СКО	– среднеквадратическая ошибка
СМВ	– сантиметровые волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длинам волн 1-10 см, что соответствует частотам 3-30 ГГц
СМВ	– сантиметровые волны
СМИ	– средства массовой информации
СОУ	– самоходная огневая установка
СОЦ	– станция обнаружения целей
СРНС	– спутниковая радионавигационная система
ССС	– спутниковая система связи
США	– Соединенные Штаты Америки
ТВ	– телевизионный
ТМИ	– телеметрическая информация
ТТХ	– тактико-технические характеристики

УБКП	– универсальный боевой командный пункт
УВЧ	– ультравысокие частоты, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют частотам от 300 МГц до 3 ГГц
УКВ	– ультракороткие волны, согласно ГОСТ 24375-80, соответствуют длинам волн от 10 м до 0,1 мм, что соответствует частотам от 30 МГц до 3000 ГГц
УКСА	– универсальный комплекс средств автоматизации
УПБУ	– универсальный пункт боевого управления
УФ	– ультрафиолетовый
ФАР	– фазированная антенная решетка
ФК	– фотоконтрастный канал
ФП ЭМИ	– функциональное поражение электромагнитным излучением
ФСИН	– Федеральная служба исполнения наказаний
ФСО	– Федеральная служба охраны
ШПС	– широкополосный сигнал
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭДС	– электродвигущая сила
ЭМИ	– электромагнитное излучение
ЭМС	– электромагнитная совместимость
ЭПР	– эффективная площадь рассеяния

Литература

1. Michel A. H. Counter-drone systems. – Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. – 23 c.
2. Countering rogue drones. – FICCI Committee on Drones, EY, 2018. – 31 c.
3. de Visser E., Cohen M. S., LeGoullon M., Sert O., Freedy A., Freedy E., Weltman G., Parasuraman R. A Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles // Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008). – 2008. – P. 1-5.
4. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., Huang C. I., Chen W. P. Sheu B. H. et al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System // Applied Sciences. 2019. T. 9. № 13. C. 2583.
5. Kratky M., Minarik V. The non-destructive methods of fight against UAVs // 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). – IEEE, 2017. – C. 690-694.
6. Kim B. H., Khan D., Choi W., Kim M. Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar // Preceding SPIE 11005, Laser Radar Technology and Applications XXIV, 110050C (2 May 2019). – 2019. DOI: 10.1117/12.2520110.
7. Gaspar J., Ferreira R., Sebastião P., Souto N. Capture of UAVs Through GPS Spoofing // 2018 Global Wireless Summit (GWS). – IEEE, 2018. – C. 21-26.
8. Müller W., Reinert F., Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system // Preceding SPIE 10651, Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2018, 1065106 (9 May 2018). – 2018. DOI: 10.1117/12.2305606.
9. Hartmann K., Giles K. UAV exploitation: A new domain for cyber power // 8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon). – IEEE, 2016. – C. 205-221.
10. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» // Авиапанорама. 2018. № 4. С. 12-17.
11. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авиапанорама. 2018. № 5. С. 8-21.
12. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авиапанорама. 2018. № 6. С. 16-23.
13. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авиапанорама. 2019. № 1. С. 12-17.
14. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авиапанорама. 2019. № 1. С. 28-51.
15. Ковалева В. С., Нисенбаум Е. Э., Поверин С. А. Комплекс программ имитации технических средств системы противодействия БПЛА // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 3. № 5. С. 180-186.

16. Логинова Н. А., Ползунов Н. В., Фролов А. С. Применение алгоритмов построения зон видимости и воздействия для обнаружения и противодействия БПЛА // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 3. № 4. С. 162-169.
17. Мосиенко С. А. Проблема ПВО ВКС ВС РФ: как сбивать группы боевых беспилотных летательных аппаратов // Молодой ученый. 2020. № 32 (322). С. 35-38.
18. Кузнецов В. Е., Волков Ю. А. Анализ методов противодействия малоразмерным беспилотным летательным аппаратам // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 12. С. 81-87.
19. Егурнов В. О., Ильин В. В., Некрасов М. И., Сосунов В. Г. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1-2 (115-116). С. 51-58.
20. Демьянович М. А. Использование беспилотных летательных аппаратов в преступных целях: методы противодействия и борьбы // Правопорядок: история, теория, практика. 2019. № 2 (21). С. 108-112.
21. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_lestatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaya_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.05.2019).
22. Беловодский Ю. П., Стадник С. В., Шарапов К. А. О противодействии полетам хулиганских беспилотных летательных аппаратов в районе аэропортов // Транспортное дело России. 2019. № 4. С. 94-97.
23. Шалыгин А. С., Петрова И. Л. Защита объектов от беспилотных летательных аппаратов в условиях огневого противодействия // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2009. № 3 (61). С. 73-78.
24. Митюшин Д. А., Андреенко С. В. Основные направления противодействия беспилотным летательным аппаратам как источнику террористической угрозы // Специальная техника. 2013. № 5. С. 56-61.
25. Бомштейн К. Г. Противодействие современных систем ПВО нападению беспилотных летательных аппаратов противника // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2015. № 7. С. 35-42.
26. Бомштейн К. Г., Полянский В. В. Борьба с беспилотными летательными аппаратами противника // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2014. № 2. С. 49-60.
27. Семенец В. О., Трухин М. П. Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам // Наукоменные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 4-12.

28. Зайцев А. В. Комплексная система противодействия беспилотным летательным аппаратам // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 3 (103). С. 21-25.
29. Митрофанов Д. Г., Гаврилов А. Д., Майбуров Д. Г., Котов Д. В., Злобинова М. В. Способ противодействия выполнению задач беспилотным летательным аппаратом // Патент на изобретение RUS 2497063 от 15.10.2012.
30. Подстригаев А. С., Слободян М. Г., Можаева Е. И. Система критериев для оценки эффективности способов противодействия беспилотным летательным аппаратам // Труды МАИ. 2019. № 106. С. 10.
31. Парфенов Д. Ю. Способ противодействия выполнению задач беспилотному летательному аппарату // Патент на изобретение RUS 2679377 от 08.02.2018.
32. Петричкович Я. Я., Иванченко С. Т., Пименов А. В. Система противодействия беспилотным летательным аппаратам // Патент на полезную модель RUS 191584 от 08.04.2019.
33. Верхунов К. Г. Устройство электронного противодействия беспилотным летательным аппаратам // Патент на полезную модель RUS 178484 от 26.09.2017.
34. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2 (6). С. 62-70.
35. Шишков С. В. Система управления комплексными методами борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Патент на изобретение RUS 2578524 от 25.02.2014.
36. Шишков С. В. Малогабаритный роботизированный комплекс для борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Патент на полезную модель RUS 149412 от 25.02.2014.
37. Пархоменко А. В., Молохина Л. А., Богомолов А. И., Елизаров С. С., Пушкин В. А., Устинов Е. М., Шишков С. В., Искоркин Д. В. Устройство сетиловушки для борьбы с дистанционно пилотируемыми (беспилотными) летательными аппаратами // Патент на полезную модель RUS 72753 от 24.12.2007.
38. Шишков С. В., Устинов Е. М., Барсуков В. А., Лысенко Е. Н., Синяев Е. Г., Петренко В. И., Борщин Ю. Н., Колесников И. Б., Пашинян Д. Б., Немов О. Н., Дюндяев А. В., Дорошев А. А., Кутъменев А. В., Кудрявцев П. Ю. Комплекс борьбы с беспилотными летательными аппаратами // Патент на изобретение RUS 2700107 от 24.10.2018.
39. Агеев П. А., Иванов А. А., Козлов С. Ю., Кудрявцев А. М., Смирнов П. Л., Удалцов Н. П. Способ борьбы с беспилотными летательными аппаратами // Патент на изобретение RUS 2674392 от 29.01.2018.
40. Донских Д. Н., Болкунов А. А., Ивойлов В. Ф., Мурзинов П. Д., Пашук М. Ф., Саркисьян А. П., Юрьев А. В. Комплекс радиоэлектронной

борьбы с беспилотными летательными аппаратами // Патент на изобретение RUS 2685509 от 03.04.2018.

41. Нескин А. Г., Бзыба В. И., Зеленов А. Н., Соколов М. Л., Подгорнов В. А., Кипкаев А. Е. Устройство борьбы с беспилотными летательными аппаратами // Патент на полезную модель RUS 185949 от 08.10.2018.

42. Белоусов А. В., Болкунов А. А., Ивойлов В. Ф., Пашук М. Ф., Саркисян А. П., Сидоров В. Ю., Хакимов Т. М. Способ борьбы с беспилотными летательными аппаратами // Патент на изобретение RUS 2625506 от 19.07.2016.

43. Бочмага Д. А., Шимон Н. С., Калач А. В., Калач Е. В., Урусова Т. Е. Проблемы противодействия БПЛА в учреждениях ФСИН России // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 89-91.

44. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65. – URL <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения: 21.09.2019).

45. Аминов С. ПВО в борьбе в БПЛА // UAV.RU. Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 03.04.2012. – URL: http://www.uav.ru/articles/pvo_vs_uav.pdf (дата обращения 20.05.2019).

46. Аниськов Р. В., Архипова Е. В., Гордеев А. А., Пугачев А. Н. К вопросу борьбы с незаконным использованием беспилотных летательных аппаратов коммерческого типа // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9-10 (111-112). С. 71-75.

47. Митрофанов Д. Г., Шишков С. В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 28-40.

48. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14). – URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата доступа 11.12.2019).

49. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2014. № 6 (14). – URL: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (дата доступа 11.12.2019).

50. Зайцев А. В., Назарчук И. И., Красавцев О. О., Кичулкин Д. А. Особенности борьбы с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2013. № 5. С. 37-43.

51. Лопаткин Д. В., Савченко А. Ю., Солоха Н. Г. К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2014. № 2. С. 41-47.

52. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10204.
53. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
54. Макаренко С. И., Тимошенко А. В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.
55. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 3. Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 101-175. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205.
56. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 122-157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304.
57. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2018. – 898 с.
58. Алешин Б. С., Суханов В. Л., Шибаев В. М., Шнырев А. Г. Типы беспилотных летательных аппаратов // Межотраслевой альманах. 2014. № 46. – URL: <http://slaviza.ru/print?page,1,1494-tipy-bespilotnyh-letatelnyh-apparato.html> (дата обращения: 21.09.2019).
59. Арбузов И. В., Болховитинов О.В., Волочаев О. В., Вольнов И. И., Гостев А. В., Мышкин Л. В., Хабиров Р. Н., Шеховцов В. Л. Боевые авиационные комплексы и их эффективность. Учебник / Под ред. О.В. Болховитинова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.
60. Бугаков И. А., Сорокин А. Д., Хомяков А. В. Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника // Известия Института инженерной физики. 2019. № 1 (51). С. 65-68.
61. Корнеев В. М. Особенности конструкции и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. – М.: Издательская система Ridero, 2019. – 38 с.
62. Корнеев В. М. Конструкция и эксплуатация воздушных судов для пилотов и бортинженеров. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2006. – 152 с.
63. Штаев Д. В. Анализ технологии управления беспилотными летательными аппаратами // Территория новых возможностей. Вестник

Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2019. Т. 11. № 2. С. 113-119. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/113-119.

64. Беклемишев Д. Н., Переверзев А. Л., Твердунов Д. В. Одноокристальный вычислитель для беспилотного летательного аппарата // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2010. № 6 (86). С. 33-38.
65. Семенова Л. Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. 2018. № 4 (27). С. 6-8.
66. Щербинин В. В., Свиязов А. В., Смирнов С. В., Кветкин Г. А. Автономный навигационный комплекс для роботизированных наземных и летательных аппаратов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 234-243.
67. Веремеенко К. К., Кошелев Б.В., Соловьев Ю. А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32-41.
68. Филиппов А. А., Бажин Д. А., Хлобыстов А. Н. Повышение эффективности управления беспилотного летательного аппарата в условиях помех // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6 (73). С. 45-50 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-upravleniya-bespilotnogo-letatelnogo-apparata-v-usloviyah-pomeh> (дата обращения: 16.04.2020).
69. Гришин В. А. Системы технического зрения в решении задач управления беспилотными летательными аппаратами // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 46-52.
70. Югай Е. Б. Способ и система навигации пассажирского дрона в горной местности // Патент на изобретение RU 2681278 C1, 05.03.2019.
71. Корнеев М. А., Максимов А. Н., Максимов Н. А. Методы выделения точек привязки для визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 58. С. 6. – URL: <https://mai.ru/upload/iblock/086/metody-vydeleniya-tochek-privayazki-dlya-vizualnoy-navigatsii-bespilotnykh-letatelnikh-apparatorov.pdf> (дата обращения 14.04.2020).
72. Степанов Д. Н., Тищенко И. П. Задача моделирования полета беспилотного летательного аппарата на основе системы технического зрения // Программные системы: теория и приложения. 2011. № 4. С. 33-43. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zadacha-modelirovaniya-poleta-bespilotnogo-letatelnogo-apparata-na-osnove-sistemy-tehnicheskogo-zreniya> (дата обращения: 14.04.2020).
73. Wang H., Zhao H., Zhang J., Ma D., Li J., Wei J. Survey on unmanned aerial vehicle networks: A cyber physical system perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Т. 22. № 2. С. 1027-1070.

74. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.
75. U.S. Navy Plans to Fly First Drone Swarm This Summer // Millitary.com [Электронный ресурс]. – 04.06.2016. – URL: <https://www.military.com/defensetech/2016/01/04/u-s-navy-plans-to-fly-first-drone-swarm-this-summer> (дата обращения: 20.12.2019).
76. Drew J. DARPA selects industry teams for 'Gremlins' UAV project // Flight Global [Электронный ресурс]. – 04.04.2016. – URL: <https://www.flightglobal.com/news/articles/darpa-selects-industry-teams-for-gremlins-uav-proj-423819/> (дата обращения 20.12.2019).
77. Атака дронов. Хуситский удар // Военное обозрение [Электронный ресурс], 20.09.2019. – URL: <https://topwar.ru/162608-ataka-dronov-chast-1.html> (дата доступа 20.12.2019).
78. Жуковский И. Боевики получили дроны для терактов в любой стране // Газета.ru [Электронный ресурс]. – 08.01.2018. – URL: <https://www.gazeta.ru/army/2018/01/08/11596730.shtml> (дата доступа 20.12.2019).
79. Карташов В. М., Олейников В. Н., Шейко С. А., Бабкин С. И., Корытцев И. В., Зубков О. В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. № 195. С. 235-243. – URL: http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/9513/1/Kartashov_235_243.pdf (дата доступа 11.12.2019).
80. Бакулов П. А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
81. Ананенков А. Е., Марин Д. В., Нуждин В. М., Растворгувев В. В., Соколов П. В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 19.
82. Вождаев В. В., Теперин Л. Л. Характеристики радиолокационной заметности летательных аппаратов. – М.: Физматлит, 2018. – 376 с.
83. Сухоревский О. И., Васильев В. А., Кукобко С. В., Нечитайло С. В., Сazonov A. Z. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / под ред. О.И. Сухаревского. – Харьков: ХУПС, 2009. – 468 с.
84. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевентрических войнах начала XXI века. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2017. – 546 с.
85. Перунов Ю. М., Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. – М.: Вузовская книга, 2017. – 190 с.
86. Кононов В. И. Теоретические основы радио- и радиотехнической разведки. – СПб: ВАС, 2000.

87. Рембовский А. И., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Теоретические основы радио- и радиотехнической - задачи, методы, средства. 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 624 с.
88. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Воениздат, 2001. – 456 с.
89. Рощина Н. В. Системы и средства управления беспилотных летательных аппаратов как объект их поражения // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2019. № 1 (4). С. 68-74.
90. Изделия и комплексы противодействия беспилотным летательным аппаратам [Доклад]. – СПб.: АО «НИИ «Вектор», 2018. – 51 с.
91. Годунов А. И., Шишков С. В., Бикеев Р. Р. Взаимосвязь машинного (технического) зрения с компьютерным зрением при идентификации малогабаритного беспилотного летательного аппарата // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 1. С. 213-217.
92. Бодров В. Н., Прудников Н. В., Панков С. Е. Многоканальные «смотрящие» ОЭС кругового и секторного обзора с высоким угловым разрешением и быстродействием // Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки). Материалы всероссийской научной конференции. – Звенигород: Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН, 2018. – С. 324-337.
93. Дмитриев М. Л., Покровский М. В., Ростопчин В. В., Федин С. И. Возвращаемый беспилотный летательный аппарат с трехопорным шасси // Патент РФ № 2408500. 2008. – URL: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1548576482683 (дата доступа 20.05.2019).
94. Гейстер С. Р., Джеки А. М. Решение задачи обнаружения маловысотных легкомоторных летательных аппаратов путем использования акустических и сейсмических полей // Наука и военная безопасность. 2008. № 1. С. 42-46. – URL: <http://militaryarticle.ru/nauka-i-voennaya-bezopasnost/2008/12105-reshenie-zadachi-obnaruzhenija-malovysotnyh> (дата обращения 11.12.2019).
95. Японцы вычислят дронов по жужжанию // N+1 [Электронный ресурс], 19.05.2015. – URL: <https://nplus1.ru/news/2015/05/19/invaders-must-die> (дата доступа 20.12.2019).
96. Оружие и технологии России: Энциклопедия XXI век. Том. 9. Противовоздушная и противоракетная оборона / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2004. – 752 с.
97. В США разработали дрон-перехватчик потребительских БЛА // Роботрендс [Электронный ресурс], 27.11.2016. – URL: <http://robotrends.ru/pub/1647/v-ssha-razrabotali-dron-perehvatchik-potrebitelskih-bla> (дата доступа 20.12.2019).

98. Юферев С. «Панцирь-СМ» и его возможности // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 28.06.2019. – URL: <https://topwar.ru/159474-pancir-sm-i-ego-vozmozhnosti.html> (дата обращения 20.12.2019).
99. Рябов К. ЗРК «Сосна»: очевидные преимущества и заметные недостатки // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 20.06.2019. – URL: <https://topwar.ru/159232-zrk-sosna-ochevidnye-preimushchestva-i-zametnye-nedostatki.html> (дата обращения 20.12.2019).
100. Армия США закупает 144 боевые машины ПВО MSHORAD с РЛС израильской компании Rada // Супер-оружие [Электронный ресурс], 28.02.2019. – URL: https://super-orujiye.ru/blog/43653425435/Armiya-SSHA-zakupayet-144-boevyie-mashiny-PVO-MSHORAD-s-RLS-izrutm_referrer=mirtesen.ru?nr=1 (дата доступа 07.10.2019).
101. Multi-Mission Launcher (MML) // MDAA [Электронный ресурс], 28.02.2019. – URL: <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-defense-systems-2/future-bmd-systems-2/multi-mission-launcher-mml/> (дата доступа 07.10.2019).
102. Американцы решили создать аналоги наших «Панцирь-С» и «Бук» // Армейский вестник [Электронный ресурс]. 14.03.2016. – URL: <https://army-news.ru/2016/03/amerikancy-reshili-sozdat-analogi-nashix-pancir-s-i-buk/> (дата обращения 20.12.2019).
103. Рябов К. Модернизация ЗРК Patriot по проекту PDB8 // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 27.08.2019. – URL: <https://topwar.ru/161729-modernizacija-zrk-patriot-po-proektu-pdb8.html> (дата обращения 20.12.2019).
104. Зенитная артиллерийская установка Centurion C-RAM: сомнительная эффективность на фоне заявлений об успехах // Военное обозрение [Электронный ресурс], 09.03.2019. – URL: <https://topwar.ru/154864-zenitnaja-artillerijskaja-ustanovka-centurion-c-ram-somnitelnaja-jeffektivnost-na-fone-zajavlenij-ob-uspehah.html> (дата доступа 20.12.2019).
105. Рябов К. Перспективный ЗРК LOWER AD. Дешёвое дополнение для «Петриота» // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 21.09.2019. – URL: <https://topwar.ru/162582-perspektivnyj-zrk-lower-ad-deshevoe-dopolnenie-dlya-pjetriota.html> (дата обращения 20.12.2019).
106. Василин Н. Я., Гуринович А. Л. Зенитные ракетные комплексы. – Минск: ООО «Попурри», 2001. – 464 с.
107. Балаганский И. А., Мержиевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 408 с.
108. Алешков М. Я., Жуков И. Я., Савин Н. В., Кукушкин Д. Д., Марков О. Я., Фомин Ю. Г. Физические основы ракетного оружия. – М.: Воениздат, 1972. – 312 с.
109. MANTIS Air Defence Protection System // Army Technology [Электронный ресурс]. 2013. – URL: <http://www.army-technology.com/projects/mantis/> (дата обращения 03.12.2019).

110. «Деривация-ПВО» и другие новинки калибра 57 мм // Военное обозрение [Электронный ресурс], 30.01.2018. – URL: <https://topwar.ru/134853-derivaciya-pvo-i-drugie-novinki-kalibra-57-mm.html> (дата обращения 03.12.2019).
111. Корчагин С., Терентьев С. Зенитный артиллерийский комплекс MANTIS BBC ФРГ // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 9. С. 59-65.
112. Романов Л. Авиабазу Хмеймим в Сирии защитила бы ЗСУ 2С38 «Деривация ПВО» // Вестник Мордовии [Электронный ресурс]. 2018. – URL: <http://vestnik-rm.ru/news-4-22623.htm> (дата обращения 09.12.2019).
113. Абросимов В. К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. Монография. – М.: Наука, 2013. – 168 с.
114. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. 2009. – 280 с.
115. Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 7. С. 8-16.
116. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 61-67.
117. Верба В. С., Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимальное групповое управление беспилотными летательными аппаратами в сетевоцентрической системе // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 11. С. 48-53.
118. Митрофанов А. Прорыв ПВО превышением её возможностей по перехвату целей: пути решения // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 19.04.2019. – URL: <https://topwar.ru/156999-proryv-pvo-prevysheniem-ee-vozmozhnostej-po-perehvatu-celej-puti-reshenija.html> (дата доступа 20.12.2019).
119. Тимохин А. Решение проблемы «насыщающих» атак ПВО // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 22.04.2019. – URL: <https://topwar.ru/157073-reshenie-problemy-nasyschajuschih-atak-pvo-ono-est-i-nad-nim-rabotajut.html> (дата доступа 20.12.2019).
120. Митрофанов А. Обеспечение работы ЗРК по низколетящим целям без привлечения авиации BBC // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 26.04.2019. – URL: <https://topwar.ru/157292-obespechenie-raboty-zrk-po-nizkoletjaschim-celjam-bez-privlechenija-aviacii-vvs.html> (дата доступа 11.12.2019).
121. Друзин С. В., Майоров В. В., Горевич Б. Н. Создание перспективной системы вооружения войсковой ПВО нового облика // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 4. С. 7-18
122. Макаренко С. И. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. – Ставрополь: СФ МГТУ им. М. А. Шолохова, 2008. – 352 с.

123. Макаренко С. И., Федосеев В. Е. Системы многоканальной связи. Вторичные сети и сети абонентского доступа: учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 179 с.
124. Литовкин Д. В армейские арсеналы вернули шрапнель // Известия [Электронный ресурс]. 17.10.2016. – URL: <https://iz.ru/news/638481> (дата доступа 11.09.2020).
125. Противостояние ЗРК «Панцирь-С1» и турецких БПЛА: репетиция войн будущего // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 14.06.2020. – URL: <https://topwar.ru/172126-protivostojanie-zrk-pancir-s1-i-tureckih-bpla-repeticija-vojn-buduschego.html> (дата доступа 11.09.2020).
126. ЗРПК «Панцирь» против атаки БПЛА слабые места при варианте слабой обученности экипажей // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 08.06.2020. – URL: <https://topwar.ru/171955-zrpk-pancir-protiv-ataki-bpla-slabye-mesta-pri-variante-slaboj-obuchennosti-jekipazhej.html> (дата доступа 11.09.2020).
127. Репеллент-1. Комплекс радиоэлектронной борьбы с малоразмерными БЛА // НИИ РЭБ [Электронный ресурс], 2019. – URL: <http://www.ntc-reb.ru/repelent.html> (дата обращения 14.04.2020).
128. Ловушка для дрона: как вывести из строя беспилотник // Государственная корпорация «Ростех» [Электронный ресурс], 2019. – URL: https://rostec.ru/news/lovushka-dlya-drona-kak-vyvesti-iz-stroya-bespilotnik/?phrase_id=115590 (дата обращения 14.04.2020).
129. Комплекс радиоэлектронной борьбы с БПЛА «Шиповник-АЭРО» // RuFor.org [Электронный ресурс], 18.06.2015. – URL: <https://rufor.org/showthread.php?t=29323> (дата обращения 14.04.2020).
130. Станция постановки помех Р-330Ж «Житель» // Военное обозрение [Электронный ресурс], 26.07.2016. – URL: <https://topwar.ru/98467-stanciya-postanovki-pomeh-r-330zh-zhitel.html> (дата обращения 14.04.2020).
131. Бойко А. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников // RoboTrends [Электронный ресурс], 2019. – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov> (дата обращения 14.04.2020).
132. Оружие и технологии России. Энциклопедия. ХХI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.
133. Ясечко М. Н., Очкуренко А. В., Ковальчук А. А., Максюта Д. В. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2015. № 3 (44). С. 54-57.
134. Бойко А. Blighter AUDS // RoboTrends [Электронный ресурс], 2015. – URL: <http://robotrends.ru/pub/1542/bespilotnik-v-polete-ostanovit-blighter-auds> (дата обращения 14.04.2020).

135. Федоров Е. Война с дронами. Саудовский голиаф против хуситов // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 28.09.2019. – URL: <https://topwar.ru/162842-vojna-s-dronami-saudovskij-goliaf-protiv-husitov.html> (дата обращения 14.04.2020).

136. Какие существуют дроны и на каких частотах они работают? // Podavitel.ru [Электронный ресурс], 2020. – URL: <http://www.podavitel.ru/nakakikh-chastotakh-rabotayut-kvadrokoptery-i-drony.html> (дата обращения 14.04.2020).

137. Подавитель сотовой связи Monster 16CH // n-sb.ru [Электронный ресурс], 2020. – URL: <http://sankt-peterburg.n-sb.ru/podaviteli-gsm-signala.php> (дата обращения 14.04.2020).

138. Частоты передачи данных // Podavitel.ru [Электронный ресурс], 2020. – URL: <http://www.podavitel.ru/chastoty-peredachi-dannykh.html> (дата обращения 14.04.2020).

139. Охота на беспилотник: как военные борются с гражданской угрозой с воздуха // Военное.рф [Электронный ресурс], 11.11.2018. – URL: <https://военное.рф/2018/%D0%91%D0%BF%D0%BB%D0%B2/> (дата доступа 20.12.2019).

140. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.

141. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.

142. Дятлов А. П., Дятлов П. А., Кульбикаян Б. Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. Монография. – М.: Радио и связь, 2004. – 226 с.

143. Камнев Е. А. Радиоподавление помехозащищенной навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в интересах объектово-территориальной защиты. Дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация». – М.: МАИ (НИУ), 2018. – 160 с.

144. Жук А. П., Орел Д. В. Об оценке помехозащищенности спутниковых радионавигационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10. № 2. С. 83-88.

145. Казаков А. Е., Водяных А. А. Пути повышения помехозащищенности навигационной аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем // Системи обробки інформації. 2007. № 1 (59). С. 48-51.

146. Кащеев А. А., Кошелев В. И. Оценка эффективности подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем преднамеренными помехами // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 7. С. 1. – URL: <http://jre.cplire.ru/koi/ju12/3/text.pdf> (дата обращения: 14.04.2020).

147. Юдин В. Н., Камнев Е. А. Принципы создания противонавигационного поля радиопомех // Труды МАИ. 2015. № 83. С. 28. – URL:

https://mai.ru/upload/iblock/8cb/yudin_kamnev_rus.pdf https://mai.ru/upload/iblock/8cb/yudin_kamnev_rus.pdf (дата обращения: 14.04.2020).

148. Абукраа А. С., Вилькоцкий М. А., Лыньков Л. М. Влияние на помехоустойчивость и точность абонентских приемников спутниковых навигаторов близкорасположенных экранов с учетом условий распространения радиоволн на реальной местности // Доклады БГУИР. 2017. № 3 (105). С. 85-92.

149. Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Мошкина Т. Г. Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 3 (43). С. 113-119.

150. Дмитриев Д. Д. Исследование помехоустойчивости аппаратуры радионавигации // Современные проблемы развития науки, техники и образования. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 202-209.

151. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС. Монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. – 260 с.

152. Пантенков Д. Г. Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем при воздействии преднамеренных помех // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 57-68.

153. Журавлев А. В., Безмага В. М., Красов Е. М., Смолин А. В., Шуваев В. А., Маркин В. Г. Устройство для пространственной селекции сигналов навигационных космических аппаратов с использованием пеленгования источников радиопомех // Патент RU 2 619 800 C1 от 18.05.2017.

154. Гэн К., Чулин Н. А. Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей // Машиностроение и компьютерные технологии. 2016. № 12. С. 182-206.

155. Беркович С. Б., Грибунин В. Г., Котов Н. И., Мартынюк Г. А., Махаев А. Ю., Смирнов Д. В., Шолохов А. В., Лапшина А. А. Оценка эффективности вариантов построения навигационных систем робототехнических комплексов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 11-3. С. 19-38.

156. Доронин Д. В., Донченко А. А., Шевцов С. Н. Функционирование математической модели ошибок бесплатформенной инерциальной навигационной системы при одновременной навигации, динамическом построении и обработки данных многоструктурных систем управления в рамках разработки алгоритмов интегрированной системы навигации летательного аппарата с использованием GPS/ГЛОНАСС технологий //

Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (5). С. 1363-1367.

157. Марюхненко В. С., Ерохин В. В. Структурный синтез навигационного обеспечения триадной интегрированной системы навигации на основе инерциальных и спутниковых технологий // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т. 20. № 4. С. 69-77. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-69-77.

158. Рубцов В. Д., Заикин А. А. Сравнительный анализ эффективности различных вариантов комплексной обработки информации в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем и инерциальной навигационной системе // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 159. С. 128-132.

159. Усов О. С., Хорошко А. Ю., Кванин Л. В. Лазерный высотомер для беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа средней и большой дальности (ЛВ-50) // Секрет производства («ноу-хау») № 218.016.804d от 28.08.2018. – URL: <https://edrid.ru/rid/218.016.804d.html> (дата обращения: 17.04.2020).

160. Фокин Г. А. Позиционирование в условиях отсутствия прямой видимости с использованием цифровых моделей местности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. № 11. С. 4-13. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10319.

161. Vaas L. Sound: Yet another way to smack down drones // Naked Security by Sophos [Электронный ресурс]. 06.08.2015. – URL: nakedsecurity.sophos.com/2015/08/06/sound-yet-another-way-to-smack-down-drones/ (дата обращения: 10.04.2020).

162. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

163. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиоуправления нового поколения // Радиотехника. 2014. № 5. С. 39-44.

164. Верба В. С., Меркулов В. И., Миляков Д. А. Проблемы управления большими плотными группами беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 6. С. 3-13.

165. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.

166. Белов С. Г., Крайлюк А. Д., Меркулов В. И., Чернов В. С. Информационные системы беспилотных комплексов стратегической и

оперативной воздушной разведки США // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 1. С. 28-42.

167. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 2 (42). С. 86-91.

168. Боев Н. М., Шаршавин П. В., Нигруца И. В. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 147-158.

169. Боев Н. М., Лебедев Ю. А. Управление энергетической эффективностью совмещенных каналов передачи данных единой системы связи // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 11-15.

170. Боев Н. М. Способы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи беспилотных летательных аппаратов // Труды Московского физико-технического института. 2014. Т. 6. № 2 (22). С. 162-166.

171. Боев Н. М. Разработка и проектирование бортового антенно-фидерного оборудования малых беспилотных летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2011. Т. 1. С. 162-163.

172. Батурина Т. Н., Боев Н. М. Разработка и проектирование бортового усилителя мощности радиосигнала УКВ-диапазона для беспилотного летательного аппарата // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. С. 141-142.

173. Лебедев Ю. А., Боев Н. М. Разработка и проектирование малогабаритной системы связи малых беспилотных летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. С. 155-156.

174. Слюсар В. И. Передача данных с борта БПЛА: Стандарты НАТО // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2010. № 3 (101). С. 80-87.

175. Слюсар В. И. Радиолинии связи с БПЛА. Примеры реализации // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2010. № 5 (103). С. 56-61.

176. Ананьев А. В., Стafeев М. А., Макеев Е. В. Апробация способа организации связи с использованием беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 14.

177. Ананьев А. В., Катруша А. Н. Контуранная антенна ДКМВ-диапазона для беспилотных летательных аппаратов // Антенны. 2017. № 8 (240). С. 45-52.

178. Ананьев А. В., Ерзин И. Х., Щербаков А. А., Филатов С. В. Аэромобильная сеть связи - эффективная система ретрансляции объединенной автоматизированной цифровой системы связи // Военная мысль. 2017. № 4. С. 26-34.

179. Ананьев А. В., Катруша А. Н. Сравнительная оценка возможностей радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами в диапазонах КВ и УКВ

для полузакрытых и закрытых трасс распространения радиоволн // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 10. С. 4-9.

180. Ананьев А. В., Стafeев М. А., Филатов С. В. Оценка эффективности систем связи и боевого управления на базе беспилотных летательных аппаратов межвидовой группировки войск // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 3 (3). С. 75-84.

181. Ананьев А. В., Змий Б. Ф., Кащенко Г. А. Модернизация бортовых приемо-передающих систем беспилотных летательных аппаратов на основе эволюционного подхода // Радиотехника. 2016. № 8. С. 46-49.

182. Пантенков Д. Г., Ломакин А. А. Оценка устойчивости спутникового канала управления беспилотными летательными аппаратами при воздействии преднамеренных помех // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 11 (17). С. 43-50.

183. Долженков Н. Н., Пантенков Д. Г., Литвиненко В. П., Ломакин А. А., Егоров А. Т., Грищенко А. А. Интегрированный комплекс дальней радиосвязи для повышения эффективности решения целевых задач беспилотными летательными аппаратами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 102-108. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.015.

184. Долженков Н. Н., Пантенков Д. Г., Егоров А. Т., Ломакин А. А., Литвиненко В. П., Великоиваненко В. И., Лю-Кэ-Сю Е. Ю. Технические характеристики комплекса средств спутниковой радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 74-82. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.011.

185. Пантенков Д. Г., Гусakov Н. В., Егоров А. Т., Ломакин А. А., Литвиненко В. П., Великоиваненко В. И., Лю-Кэ-Сю Е. Ю. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 52-71. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.5.007.

186. Киричек Р. В. Разработка и исследование комплекса моделей и методов для летающих сенсорных сетей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.13. – СПб.: СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2018. – 276 с.

187. Самойленко Д. В., Финько О. А., Еремеев М. А. Распределённая обработка и защита информации в группировке комплексов с беспилотными летательными аппаратами // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 4. С. 93-100.

188. Самойленко Д. В., Финько О. А. Обеспечение целостности информации в группе беспилотных летательных аппаратов в условиях деструктивных воздействий нарушителя // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 5-6 (107-108). С. 20-27.

189. Самойленко Д. В., Финько О. А. Помехоустойчивая передача данных в радиоканалах робототехнических комплексов на основе полиномиальных классов вычетов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 3. С. 49-55.
190. Дворников С. В., Дворников С. С., Морозов Е. В. Модель взаимодействия радиотехнических систем беспилотных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 1. С. 84-90.
191. Дворников С. В., Погорелов А. А., Дворников С. С., Иванов Р. В. Предложения по восстановлению сигналов в каналах управления беспилотных летательных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 1. С. 91-97.
192. Дворников С. В. Методика оценки имитоустойчивости каналов управления роботизированных устройств // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 64-69.
193. Донченко А. А., Нехорошев Г. В., Штефан В. И. Технология построения высокоскоростных энергоскрытых каналов передачи команд управления, видео и телеметрии группировки робототехнических комплексов специального назначения // Роботизация вооружённых сил Российской Федерации. Сборник статей конференции. – Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2019. – С. 174-179.
194. Донченко А. А., Чиров Д. С. Обоснование требований к системе связи беспилотных летательных аппаратов средней и большой дальности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 12. С. 12-16.
195. Чиров Д. С., Лобов Е. М. Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 10. С. 21-28.
196. Чертова О. Г., Чиров Д. С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 60-71. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10269.
197. Бородин В. В., Петраков А. М., Шевцов В. А. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87. С. 16.
198. Бородин В. В., Петраков А. М., Шевцов В. А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 81. С. 27.
199. Назаров Л. Е., Игошин Е. В., Зудилин А. С., Щеглов М. А. Разработка, реализация и испытания сигнально-кодовых конструкций для высокоскоростной радиолинии связи с БПЛА // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 8. С. 68-74.

200. Паршин Ю. Н., Кудряшов В. И. Анализ пропускной способности канала передачи информации от беспилотного летательного аппарата при неточной канальной матрице // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 52. С. 22-27.
201. Сивов А. Ю. Алешин М. Г. Обоснование основных параметров антенной системы ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Техника радиосвязи. 2011. № 16. С. 43-54.
202. Крыжевич Л. С., Сизов А. С. Обзор состояния проблемы передачи растровых изображений с беспилотных летательных средств // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 6 (45). С. 54-60.
203. Макаров И. В. Оценка пропускной способности системы связи беспилотного летательного аппарата для решения задач управления // Радиотехника. 2013. № 4. С. 40-45.
204. Фокин Г. А. Обзор моделей радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 4. С. 85-101. DOI: 10.31854/1813-324X-20184-4-85-101.
205. Казаков Л. Н., Исмаилов А., Кукушкин Д. С. Оценка эффективности применения OFDM-технологий в высокоскоростных системах авиационной связи // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2013. Т. 4. № 3. С. 146-149.
206. Казаков Л. Н., Селянская Е. А., Соловьев Д. М., Ботов В. А. Организация энергетически скрытных радиоканалов для передачи данных и команд управления беспилотными летательными аппаратами // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2017. Т. 8. № 4. С. 91-93.
207. Казаков Л. Н., Царев А. Б., Соловьев Н. В., Махов М. И. Разработка OCDM системы для организации информационного обмена группы БПЛА // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 4. С. 51-56.
208. Смородинов А. А. Как выбрать широкополосный модем для беспилотного летательного аппарата (БЛА) или робототехники // Habr.com [Электронный ресурс]. 22.03.2019. – URL: <https://habr.com/ru/post/444898/> (дата обращения 14.04.2020).
209. Михайлов Р.Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2019. – 150 с.
210. Добыкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн. – М.: Вузовская книга, 2009. – 360 с.
211. Харкевич А. А. Борьба с помехами. 5-е изд. – М.: ЛиброКом, 2018. – 280 с.
212. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Военное издательство, 1989. – 350 с.

213. Комашинский В. И. Максимов А. В. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации: основы моделирования. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 176 с.
214. Борисов В. А., Калмыков В. В., Ковальчук Я. М., Себекин Ю. Н., Сенин А. И., Федоров И. Б., Щикин И. А. Радиотехнические системы передачи информации: Учебное пособие для вузов / под ред. В.В. Калмыкова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
215. Маслов П. В. Сравнительный анализ методов цифровой модуляции // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 2. С. 46.
216. Песков С. Н., Ищенко А. Е. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Телеспутник. 2010. № 11. С. 70-75.
217. Иванов Ю. А., Невстрueв И. А. Структура и помехоустойчивость систем беспроводного доступа с OFDM // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5. № 3. С. 25-29.
218. Пантенков Д. Г. Методический подход к интегральной оценке эффективности применения авиационных комплексов с БПЛА. Часть 1. методики оценки эффективности решения задач радиосвязи и дистанционного мониторинга // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 60-78.
219. Красносельский И. Н., Канев С. А. Исследование помехоустойчивости системы DVB-T на модели канала с многолучевым распространением // Электросвязь. 2010. № 7. С. 28-30.
220. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 300 744 V1.6.1. – Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. 2009. – URL: <http://www.etsi.org> (дата доступа 12.04.2019).
221. Баракин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
222. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: – Свое издательство, 2013. – 166 с.
223. JSC-CR-10-004. Communications Receiver Performance Degradation Handbook. – Annapolis: Joint Spectrum Center, 2010. – 306 с.
224. Ерохин Г. А., Мандель В. И., Нестёркин Ю. А., Струков А. П. Методика расчета энергетического запаса радиолинии "космический аппарат - станция" // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. № 1. С. 65-74.
225. Полянкин А. В., Ле Х. Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-2. С. 98-107.
226. Зикратов И. А., Зикратова Т. В., Лебедев И. С., Гуртов А. В. Построение модели доверия и репутации к объектам мультиагентных робототехнических систем с децентрализованным управлением // Научно-

технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 30-38.

227. Зикратов И. А., Зикратова Т. В., Лебедев И. С. Доверительная модель информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем с децентрализованным управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 47-52.

228. Викснин И. И., Мариненков Е. Д. Противодействие скрытому деструктивному воздействию в роях беспилотных летательных аппаратов // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Т. 6. № 12. С. 1-11.

229. Винокуров А. В. Анализ уязвимостей комплексов с беспилотными летательными аппаратами и классификация угроз безопасности циркулирующей в них информации // I-Methods. 2016. № 1. С. 5-9.

230. Макаренко С. И. Информационная безопасность: учебное пособие для студентов вузов. – Ставрополь: СФ МГГУ им. М. А. Шолохова, 2009. – 372 с.

231. Нефёдова М. Множественные уязвимости в 4G LTE позволяют следить за абонентами и подделывать данные // Хакер [Электронные ресурсы]. 07.03.2018. – URL: <https://xaker.ru/2018/03/07/lteinspector/> (дата доступа 20.12.2019).

232. Перегудов М. А., Семченко И. А. Оценка эффективности случайного множественного доступа к среде типа ALOHA при голосовых соединениях, передаче служебных команд, текстовых сообщений и мультимедийных файлов в условиях деструктивных воздействий // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 4. С. 887-911. DOI: 10.15622/sp.2019.18.4.887-911.

233. Перегудов М. А., Стешковой А. С., Бойко А. А. Вероятностная модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA // Труды СПИИРАН. 2018. № 4 (59). С. 92-114. DOI: 10.15622/sp.59.4.

234. Перегудов М. А., Бойко А. А. Модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа S-Aloha // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6 (73). С. 75-81.

235. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 2. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата доступа 20.04.2020).

236. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 2. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (дата доступа 20.04.2020).

237. Макаренко С. И. Информационное оружие в технической сфере: терминология, классификация, примеры // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 3. С. 292-376. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10311.

238. Холмогоров В. Угнать дрон. Методы перехвата управления коптерами // Хакер [Электронный ресурс]. 24.06.2019. – URL: <https://xakep.ru/2019/06/24/dron-interception/> (дата доступа 20.04.2020).
239. Khan A. Hacking the Drones // Open Web Application Security Project [Электронный ресурс]. 2016. – URL: https://owasp.org/www-chapter-london/assets/slides/OWASP201604_Drones.pdf (дата доступа 20.04.2020).
240. Rodday N. Hacking a Professional Drone // Black Hat Asia 2016 [Электронный ресурс]. 2016. – URL: <https://www.blackhat.com/docs/asia-16/materials/asia-16-Rodday-Hacking-A-Professional-Drone.pdf> (дата доступа 20.04.2020).
241. Petrovsky O. Attack on the drones: security vulnerabilities of unmanned aerial vehicles // 25th Virus Bulletin International Conference [Электронный ресурс]. 2015. – URL: <https://www.virusbulletin.com/conference/vb2015/abstracts/attack-drones-security-vulnerabilities-unmanned-aerial-vehicles> (дата доступа 20.04.2020).
242. Here's how easy it is to hack a drone and crash it // Futurity [Электронный ресурс]. 08.06.2016. – URL: <https://www.futurity.org/drones-hackers-security-1179402-2/> (дата доступа 20.04.2020).
243. Самойленко Д. В. Повышение информационной живучести группировки робототехнических комплексов в условиях деструктивных воздействий злоумышленника // Автоматизация процессов управления. 2018. № 2 (52). С. 4-13.
244. Wang H., Zhao H., Zhang J., Ma D., Li J., Wei J. Survey on unmanned aerial vehicle networks: A cyber physical system perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Т. 22. № 2. С. 1027-1070. DOI: 10.1109/COMST.2019.2962207.
245. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 337 с.
246. Добыкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / Под ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.
247. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.
248. Буренок В. М., Ляпунов В. М., Мудров В. И. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения / Под ред. А.М. Московского. – М.: Изд-во «Вооружение. Политика. Конверсия», 2005. – 418 с.
249. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / Под ред. Ю.М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. – М.: Радиотехника, 2010. – 352 с.

250. Рябов К. Проект Raytheon Phaser: фантастическое оружие в опытной эксплуатации // Военное обозрение [Электронный ресурс], 30.09. 2019. – URL: <https://topwar.ru/162882-proekt-raytheon-phaser-fantastika-v-optynoj-jekspluatacii.html> (дата обращения 10.06.2020).
251. Mizokami K. The Army's Real-Life "Phaser" Would Knock Out an Entire Drone Swarm With One Shot // Popular Mechanics [Электронный ресурс], 14.11.2016. – URL: <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a23881/the-army-is-testing-a-real-life-phaser-weapon/> (дата обращения 10.06.2020).
252. Рябов К. «Ранец» против ракет // Военное обозрение [Электронный ресурс], 18.04.2012. – URL: <https://topwar.ru/13539-ranec-protiv-raket.html> (дата обращения 10.06.2020).
253. Боевой ЭМИ-генератор "Ранец-Е" // Око планеты [Электронный ресурс], 04.04.2012. – URL: <https://oko-planet.su/politik/politikarm/110924-boevoym-emi-generator-ranec-e-rossiya.html> (дата обращения 10.06.2020).
254. Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. Способ двухфакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата // Патент России RU 2700206 C1 от 13.09.2019. Бюл. № 26 от 13.09.2019.
255. Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. Способ функционального подавления беспилотного летательного аппарата // Патент России RU 2700207 C1 от 13.09.2019. Бюл. № 26 от 13.09.2019.
256. Zhang D., Zhou X., Cheng E., Wan H., Chen Y. Investigation on Effects of HPM Pulse on UAV's Datalink. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2020. Т. 62. № 3. С. 829-839.
257. Shukun G., Erwei C., Yazhou C., Yuming W. Research on ultra-wideband electromagnetic pulse irradiation effect and protection method of Unmanned Aerial Vehicle // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Т. 1325. № 1. С. 012165. doi: 10.1088/1742-6596/1325/1/012165.
258. Sakharov K. Yu., Sukhov A. V., Ugolev V. L., Gurevich Yu. M. Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle // Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, The Netherlands, August 27 - 30, 2018.
259. Ясечко М. Н., Воробьев О. М. Рекомендации по технической реализации формирующих каналов цилиндрических фазированных антенных решеток с V-образными распределениями частот по апертуре для средств функционального поражения БПЛА // Системи обробки інформації. 2013. № 4 (111). С. 48-51.
260. Ясечко М. Н., Максюта Д. В., Дзигора А. М. Обоснование выбора цилиндрической фазированной антенной решетки для средств функционального поражения радиоэлектронной аппаратуры // Системи озброєння і військова техніка. 2014. № 1 (37). С. 251-253.

261. Гомозов А. В., Гречих Д. В., Демченко А. В., Цикаловский Н. М. Средства функционального подавления радиоэлектронных средств малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с фокусировкой электромагнитного излучения // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2018. № 1 (115). С. 13-19.
262. Владимиров В. А., Лебедев А. В. Анализ состояния и тенденций развития современных видов оружия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2012. № 2. С. 61-80.
263. Леньшин А. В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления – Воронеж: Научная книга, 2014. – 590 с.
264. Рябов К. Новости проекта CBARS (США) // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 2016. – URL: <https://topwar.ru/91693-novosti-proekta-cbars-ssha.html> (дата доступа 29.06.2016).
265. Maritime Laser destroys target boat in at-sea test // optics.org [Электронный ресурс]. 11.04.2016. – URL: <https://optics.org/news/2/4/15> (дата доступа 20.06.2020).
266. Laser Weapon System (LaWS) // YouTube [Электронный ресурс]. 08.04.2013. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=OmoldX1wKYQ&feature=youtu.be> (дата обращения 19.01.2017).
267. США намерены оснащать военные корабли лазерным оружием // Информационное агентство РИА-новости [Электронный ресурс]. 2013. – URL: <https://ria.ru/world/20130409/931642.html> (дата доступа 20.06.2020).
268. BMC США вооружились лазерной пушкой, чтобы сбивать дроны, сообщают СМИ // Информационное агентство РИА-новости [Электронный ресурс]. 18.11.2014. – URL: https://ria.ru/defense_safety/20141118/1033980337.html (дата обращения 20.06.2020).
269. Area Defense Anti-Munitions (ADAM) // Lockheed Martin [Электронный ресурс]. 2012. – URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/ADAM.html> (дата обращения 20.06.2020).
270. Lockheed Martin Demonstrates New Ground-Based Laser System in Tests Against Rockets and Unmanned Aerial System // Lockheed Martin [Электронный ресурс]. 27.11.2012. – URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/news/pressreleases/2012/november/1127-ss-adam.html> (дата обращения 20.06.2020).
271. Армия США провела испытания наземного боевого лазера против воздушных целей // Независимое военное обозрение [Электронный ресурс]. 13.12.2013. – URL: <http://nvo.ng.ru/news/452359.html> (дата обращения 20.06.2020).

272. Excalibur Prototype Extends Reach of High-Energy Lasers // DARPA [Электронный ресурс]. 03.06.2014. – URL: <http://www.darpa.mil/news-events/2014-03-06> (дата обращения 20.06.2020).
273. О борьбе с беспилотными летательными аппаратами // Военное обозрение [Электронный ресурс], 18.07.2016. – URL: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatelnymi-apparatami.html> (дата доступа 20.06.2020).
274. Проект Boeing CLWS. Лазерная ПВО для Пентагона // Военное обозрение [Электронный ресурс], 24.06.2019. – URL: <https://topwar.ru/159300-proekt-boeing-clws-lazernaja-pvo-dlya-pentagona.html> (дата доступа 20.06.2020).
275. Митрофанов А. Лазерное оружие: сухопутные войска и ПВО. Часть 3 // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 19.03.2019. – URL: <https://topwar.ru/155508-lazernoe-oruzhie-suhoputnye-vojska-i-pvo-chast-3.html> (дата доступа 20.06.2020).
276. Сысуев С., Умеренков С., Игнатов А., Акатьев С. Боевые лазеры: состояние, перспективы // Армейский сборник [Электронный ресурс]. 02.04.2020. – URL: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/253471/> (дата доступа 20.06.2020).
277. Шишков С. В. Устройство - истребитель малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Патент на полезную модель RUS 145279 от 25.02.2014.
278. Пархоменко В. А., Устинов Е. М., Пушкин В. А., Беляков В. А., Шишков С. В. Устройство борьбы с дистанционно пилотируемыми (беспилотными) летательными аппаратами // Патент на полезную модель № 72754. 27.04.2008.
279. В Японии полицейские дроны будут ловить хобби-дроны сетями // RoboTrends [Электронный ресурс], 12.12.2015. – URL: <http://robotrends.ru/pub/1550/v-yaponii-policyayskie-drony-budut-lovit-hobbi-drony-setyami> (дата доступа 20.12.2019).
280. Гиневский А. С., Желанников А. И. Вихревые следы самолётов. – М.: Физматлит, 2008. – 172 с.
281. Бирюков В. В. Предотвращение попадания самолётов транспортной категории в сложные пространственные положения, сваливания и вывод из них - новый подход к обучению пилотов. – Жуковский: ЛИИ имени М.М. Громова, 2016. – 34 с.
282. Лузан А. Г. Военная наука: реальность, мифы и перспективы // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 1 (102). С. 106-116. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-102-1-106-116.
283. Лузан А. Г. Исчезающие перспективы. Настоящее и беспокойное будущее ЗРК семейства «Тор» // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 3 (96). С. 52-63. DOI: 10.30981/2587-7992-2018-96-3-52-63.

284. Лузан А. Г. Система активной защиты Крымского моста // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 1. С. 33-40. DOI: 10.30981/2587-7992-2018-94-1-32-40.

285. Фомина И. А. Метод тестирования устойчивости телекоммуникационной системы управления беспилотных летательных аппаратов к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов. Диссертация ... кандидата технических наук. – М.: МНИРТИ, 2015. – 139 с.

286. Михайлов В. А., Мырова Л. О., Рязановский Т. Л., Солдатов И. Г., Фомина И. А., Сухов А. В. Анализ функционирования бортовых вычислительных комплексов при воздействии сверхкоротких электромагнитных полей // Электросвязь. 2013. № 6. С. 31-33.

287. Михайлов В. А., Фомина И. А., Рязановский Т. Л. Устойчивость каналов передачи данных бортовой системы управления современных беспилотных летательных аппаратов к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 72-75.

288. На «Армии-2020» представили мобильный комплекс «Рать» для борьбы с БПЛА // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 25.08.2020. – URL: <https://topwar.ru/174438-na-armii-2020-predstavili-mobilnyj-kompleks-rat-dlya-borby-s-bpla.html> (дата доступа 10.09.2020).

289. Ударные БПЛА изменили ход боевых действий в Сирии и Ливии // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 23.06.2020. – URL: <https://topwar.ru/172367-udarnye-bpla-izmenili-hod-boevyh-dejstvij-v-sirii-i-livii.html> (дата доступа 10.09.2020).

290. Рожин Б. Нагорный Карабах стал первой войной эпохи ударных беспилотников // Федеральное агентство новостей [Электронный ресурс]. 12.10.2020. – URL: <https://riafan.ru/1320335-nagornyi-karabakh-stal-pervoi-voinoi-epokhi-udarnykh-bespilotnikov> (дата доступа 15.10.2020).

291. Советский ЗРК «Оса»: история его создание, описание и технические характеристики // MilitaryArms.ru [Электронный ресурс]. 29.04.2019. – URL: <https://militaryarms.ru/voennaya-tekhnika/boevye-mashiny/zrk-osa/> (дата доступа 15.10.2020).

292. Аксенов П. Война дронов в Карабахе: как беспилотники изменили конфликт между Азербайджаном и Арменией // BBC News [Электронный ресурс]. 06.10.2020. – URL: <https://www.bbc.com/russian/features-54431129> (дата доступа 15.10.2020).

293. Тучков В. Воздушную фазу битвы за Карабах Ереван уже проиграл // Свободная Пресса [Электронный ресурс]. 06.10.2020. – URL: <https://svpressa.ru/war21/article/277832/> (дата доступа 15.10.2020).

294. Союстов А. Успех турецких беспилотников в Идлибе оказался дутым // Федеральное агентство новостей [Электронный ресурс]. 11.03.2020. – URL:

<https://riafan.ru/1258020-uspekh-tureckikh-bespilotnikov-v-idlibe-okazalsya-dutyom>
(дата доступа 15.10.2020).

295. Орлов В. «Байрактары» против «Панцирей» // Военно-промышленный курьер. 2020. № 21 (834). – URL: <https://www.vpk-news.ru/articles/57318> (дата доступа 15.10.2020).

296. Потери турецких БПЛА в Ливии // livejournal.com [Электронный ресурс]. 08.06.2020. – URL: <https://colonelcassad.livejournal.com/5929471.html> (дата доступа 15.10.2020).

297. В Карабахе турецкие Bayraktar TB2 уничтожили советские «Осы» и «Стрелы» // Lenta.ru [Электронный ресурс]. 29.09.2020. – URL: <https://lenta.ru/news/2020/09/29/bayraktartb2/> (дата доступа 18.10.2020).



Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Профессор Академии военных наук.

Родился в 1980 году в Ставрополе. В 2002 году окончил Военный авиационный технический университет имени проф. Н. Е. Жуковского (филиал в г. Ставрополь) по специальности «Автоматизированные системы управления и обработки информации».

В 2007 году в Ставропольском высшем военном авиационном инженером училище защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Вооружение и военная техника. Комплексы и системы военного назначения». С 2015 года – доцент по специальности «Военные системы управления, связи и навигации». В 2018 году в НИИ «Рубин» защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

В период с 2007 по 2017 годы проходил военную службу на научных и преподавательских должностях в Ставропольском высшем военном авиационном инженером училище, в ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. После увольнения из вооруженных сил работает на предприятиях оборонно-промышленного комплекса России, в учреждениях РАН, а также в системе высшего образования и подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации.

ISBN 978-5-6044793-6-0

9 785604 479360

Научное издание

Макаренко Сергей Иванович

Противодействие беспилотным летательным аппаратам

Монография

Рецензенты:

Ананьев Александр Владиславович, доктор технических наук (ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»);

Газизов Тальгат Рашитович, доктор технических наук, профессор (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники);

Гончаренко Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор (Московский авиационный институт);

Тимошенко Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор (Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца);

Шишков Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент (Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева).

Издательство «Наукоемкие технологии»

ООО «Корпорация «Интел Групп»

197372, Санкт-Петербург, пр. Богатырский, дом 32, к. 1 лит. А, пом. 6Н.

<https://publishing.intelgr.com>

Тел.: +7 (812) 945-50-63

E-mail: publishing@intelgr.com

ISBN 978-5-6044793-6-0



9 785604 479360

Гарнитура «TimesNewRoman». 12,75 п.л.

Тираж 600 экз. Подписано в печать 20.10.2020.

Материалы изданы в авторской редакции