

УДК 621.396

Н. М. Боев

## АНАЛИЗ КОМАНДНО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛИНИИ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

*Рассматриваются вопросы организации командно-телеинструментальной радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Приводится анализ канала связи, формируются требования к бортовому и наземному антенно-фидерному оборудованию, формулируются необходимые характеристики приемопередающего оборудования. Обсуждаются возможные пути развития радиолиний связи с БПЛА.*

*Ключевые слова:* БПЛА, радиосвязь.

Стремительное развитие систем БПЛА в России и за рубежом и развитие радиоэлектроники заставляют постоянно пересматривать требования, выдвигаемые к командно-телеинструментальному каналу связи между БПЛА и наземным комплексом управления (НКУ).

На сегодняшний день стало возможным осуществление самолетовождения автопилотом (АП) при полном отсутствии связи между бортом летательного аппарата (ЛА) и НКУ. При этом летное задание выполняется в автономном режиме. Тем не менее, это не позволяет говорить о том, что командно-телеинструментальная радиолиния связи может быть исключена из состава БПЛА. В силу повышенной сложности и стоимости комплекса при его эксплуатации требуется постоянный контроль за состоянием находящихся в воздухе ЛА. Кроме того, иногда возникает необходимость корректировки параметров полета БПЛА.

Рассмотрим упрощенную классификацию радиоэлектронного оборудования БПЛА по вероятности безотказной работы (рис. 1).

Повышенные требования по отказоустойчивости предъявляются к оборудованию БПЛА, осуществляющему навигацию и самолетовождение, обеспечивающему режимы ручной посадки (если это необходимо), к сервоприводам и системе автоматического спасения (САС). Перечисленное оборудование входит в первую группу классификации и обеспечивает надежность комплекса БПЛА в целом. Поломка любого элемента оборудования первой группы приводит к немедленному прекращению выполнения летного задания и возврату ЛА на базу.

Если же это невозможно, срабатывает САС и происходит выброс парашюта. Остальное оборудование летательных аппаратов входит во вторую группу классификации. При выходе из строя оборудования этой группы решение о дальнейших действиях принимается управляющим персоналом комплекса. Взаимодействие оборудования первой и второй групп осуществляется посредством управляющих интерфейсов.

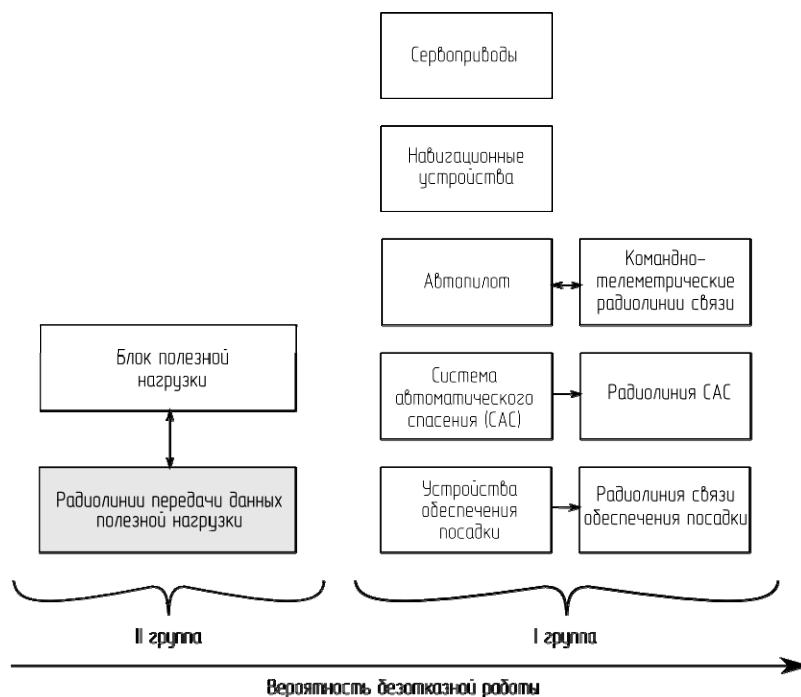


Рис. 1. Упрощенная классификация радиоэлектронного оборудования БПЛА по вероятности безотказной работы

В случае малых БПЛА (взлетная масса до 5 кг) вследствие ограничений по габаритам и массе приемопередающего оборудования рациональным является использование единого радиоканала связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки. Посадка таких ЛА осуществляется, как правило, при помощи парашюта, что не требует дополнительного радиоканала связи для передачи изображения с видеокамер ЛА, необходимого при ручной посадке. Дополнительным радиоканалом связи является только линия передачи данных САС. Для удовлетворения требований по пропускной способности канала связи при передаче как данных телеметрии, так и данных полезной нагрузки, необходимо расширять полосу частот приемопередающего оборудования и использовать спектрально-эффективные методы модуляции, что приводит к повышенным требованиям по отношению сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника, снижению дальности действия радиосистемы, повышению вероятности битовой ошибки и т. д. Таким образом, дополнительная связь оборудования первой и второй групп (рис. 1) приводит к ухудшению рабочих характеристик устройств первой группы. Высокая степень интеграции устройств двух групп приведет к уменьшению значения вероятности безотказной работы жизненно важных элементов комплекса. Исходя из этого, на комплексах БПЛА с взлетной массой более 5 кг целесообразным является использование отдельных радиолиний связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки. При этом на первый план выходят вопросы электромагнитной совместимости приемопередающего оборудования, частотного разделения каналов связи и размещения антенно-фидерного оборудования на борту БПЛА.

Выбор рабочего частотного диапазона радиоканала связи обуславливается несколькими факторами: требованиями к массе, габаритам и потреблению приемопередающего устройства БПЛА, необходимой дальностью работы при заданной вероятности битовой ошибки; возможностью получения лицензии на работу в необходимом диапазоне или возможностью безлицензионной работы.

Для систем связи малых БПЛА решающими факторами при выборе частотного диапазона являются масса и габариты бортового приемопередатчика и антенно-фидерного устройства (АФУ). Целесообразным является выбор диапазона сверхвысоких частот

(СВЧ), при этом удается создать антенну малых размеров, способную разместиться в профиле крыла. Плотная компоновка оборудования внутри малого БПЛА не позволяет эффективно использовать приемопередатчики большой мощности с укороченными антennами ультракоротковолнового диапазона (УКВ) вследствие проблем с электромагнитной совместимостью и большим влиянием окружающих объектов на характеристики антенны. Вопросы проектирования антенн для малых БПЛА более подробно рассматриваются автором в статье «Design and Implementation of Antenna for Small UAV» [1]. Одним из подходящих частотных диапазонов является диапазон 2.4 ГГц. Безлицензионная работа в этом диапазоне разрешена только для внутриофисного оборудования, поэтому необходимо рассматривать варианты получения лицензии [2].

К системам связи БПЛА среднего и большого класса предъявляются более жесткие требования по дальности работы, помехозащищенности и вероятности битовой ошибки. В этом случае является возможным и оптимальным комплексирование нескольких каналов связи, работающих в разных частотных диапазонах (рис. 2).

В процессе работы системы связи (рис. 2) оцениваются вероятности битовой ошибки для каждого канала связи и принимается решение о распределении командно-телеметрического потока данных между каналами. Использование нескольких каналов связи повышает надежность системы передачи данных и в то же время является избыточным с точки зрения эффективного использования радиочастотного спектра. Одним из способов повышения эффективности комплексированной системы связи является адаптивная работа системы, которая подразумевает передачу по командно-телеметрическим каналам связи части данных полезной нагрузки, объем которых варьируется в зависимости от текущих условий передачи радиосигнала.

Как правило, максимальное расстояние для прямой радиосвязи между БПЛА гражданского назначения и НКУ на сегодняшний день составляет не более 100 км. Для командно-телеметрической связи на больших расстояниях возможно использование спутниковой связи. В этом случае поток данных ограничивается минимально необходимой информацией о состоянии БПЛА, интервал передачи которой может составлять, например, от 30 до 300 с.

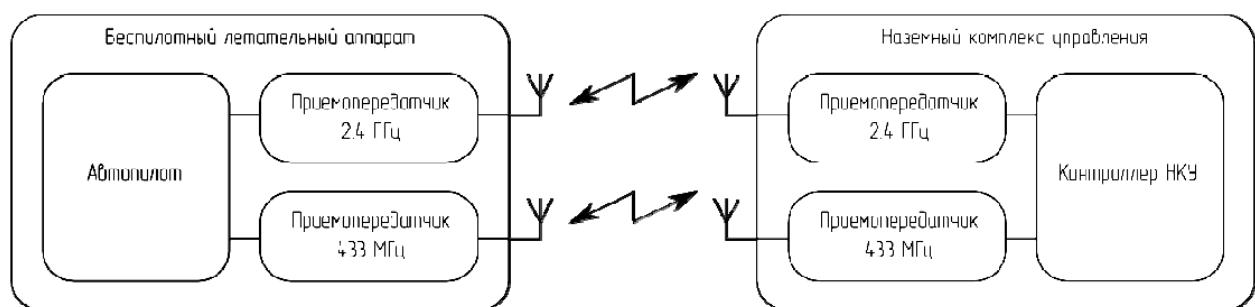


Рис. 2. Пример комплексирования радиоканалов связи

Перспективным направлением в развитии систем связи с БПЛА является использование частотных диапазонов выше 5 ГГц. При этом становится возможной передача большого объема данных полезной нагрузки в режиме реального времени (например, это могут быть изображения с датчиков излучения различного диапазона длин волн). Факторами, резко ограничивающими радиус действия радиосистемы связи при использовании данных диапазонов, являются сильная зависимость условий распространения электромагнитных волн от погодных условий, необходимость прямой видимости и влияние многолучевости.

Рассмотрим возможные ситуации взаимного расположения БПЛА и НКУ (рис. 3). Для обеспечения связи на больших расстояниях необходимо увеличивать расстояние до радиогоризонта для наземной и бортовой антенн. Максимальная дальность радиосвязи (без учета влияния различных видов атмосферной рефракции) будет определяться суммой дальностей радиогоризонта для антенны НКУ и БПЛА. При этом области воздушного пространства можно условно разделить на зону освещенности, зону полутени и зону тени (рис. 3). Зона полутени (в ней находится БПЛА № 1) является переходной между зоной освещенности (БПЛА № 2), в которой еще возможен уверенный прием, и зоной тени, прием в которой может быть осуществлен только благодаря дифракции сигнала вокруг земного шара.

Максимальная дальность радиосвязи определяется следующим образом [3]:

$$r_0 = 3,57 \left( \sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right),$$

где  $h_1$  – высота подъема первой антенны, м;  $h_2$  – высота подъема второй антенны, м;  $r_0$  – максимальная дальность радиосвязи, км.

Как правило, антенна НКУ является мобильной и устанавливается на высоте не более 10 м. Зависимость максимальной дальности радиосвязи от высоты полета БПЛА при некоторых заданных высотах подъема антенны НКУ показана на рис. 4.

Зависимость максимальной дальности связи от высоты подъема антенны НКУ слабая, поэтому высота мачты для установки наземной антенны определяется необходимостью снижения влияния многолучевости, с учетом возможных препятствий на пути распространения сигнала (рельеф местности, строения).

В зависимости от рабочей дальности полетов ЛА, в качестве антенны НКУ используются либо антенны с большим коэффициентом направленного действия (КНД), либо слабонаправленные антенны. Для антенн с большим КНД необходимо использование опорно-поворотного устройства и системы слежения за ЛА, так как ширина основного лепестка диаграммы направленности (ДН) таких антенн, как правило, менее 10°.



Рис. 3. Зоны освещенности, полутени и тени

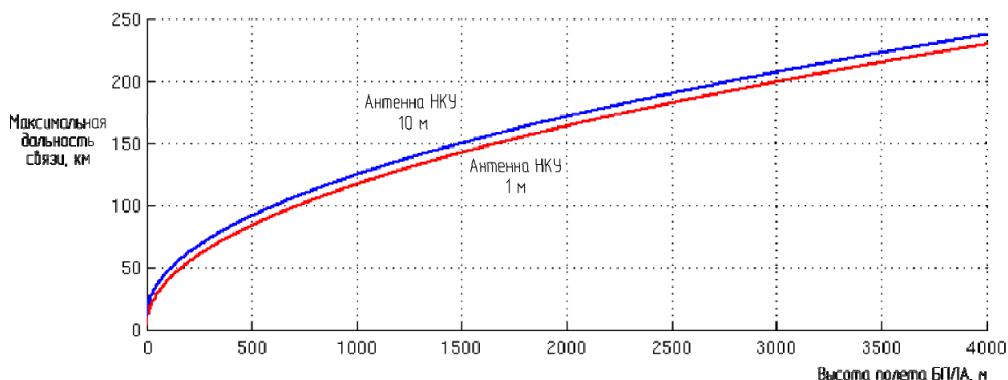


Рис. 4. Максимальная дальность связи в зависимости от высоты подъема антенн БПЛА и НКУ

Так как к наземному оборудованию не предъявляется жестких требований по массово-габаритным характеристикам, использование в качестве антенны НКУ сканирующей цифровой антенной решетки (АР) не всегда оправдано ввиду ее большой стоимости, за исключением случаев использования АР для одновременного слежения за несколькими ЛА.

Рассмотрим вопрос выбора вида модуляции сигнала в приемопередатчике. При сравнении различных видов модуляции пользуются критериями спектральной и энергетической эффективности. При этом энергетическая эффективность определяется как энергия, которую необходимо затратить на передачу одного бита информации с заданной достоверностью, а спектральная эффективность определяется как полоса частот, которая необходима для передачи информации с определенной скоростью. Основным требованием при создании системы связи с БПЛА является обеспечение возможности передачи данных с заданной скоростью и вероятностью ошибки при больших расстояниях между ЛА и НКУ. Типовое значение необходимой скорости передачи телеметрических данных с борта ЛА на землю составляет 115200 бит/сек при вероятности битовой ошибки не более  $10^{-8}$ . В некоторых случаях допустимо снижение скорости до 38400 бит/сек для поддержания вероятности битовой ошибки на том же уровне. Максимальное значение полосы частот, занимаемой радиосистемой, ограничивается требованиями государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) и зависит от рабочего диапазона частот и типа работы (лицензионная, безлицензионная). Например, для диапазона частот 2,4 ГГц полоса занимаемых частот по уровню  $-3$  дБ не должна превышать 15 МГц, а по нулям спектра – не более 22 МГц [2]. Таким образом, целесообразным является полное использование разрешенного частотного диапазона с применением расширяющих спектр-методов (прямое расширение спектра, расширение спектра методом псевдослучайной перестройки несущей частоты). Для обеспечения максимальной дальности связи в этом случае необходимо использовать наиболее энергетически эффективные методы модуляции. Сравнение энергетической эффективности некоторых видов модуляции показано на рис. 5.

С увеличением позиционности модуляции вероятность битовой ошибки увеличивается, т. е. для поддержания заданного уровня битовой ошибки необходимо увеличивать ОСШ на входе приемника. Поэтому целесообразным является использование многопозиционной модуляции только при малых расстояниях между ЛА и НКУ. Для обеспечения максимальной дальности связи необходимо использовать энергетически наиболее выгодные виды модуляции, такие как двоичная фазовая манипуляция (BPSK) и квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) (рис. 5). Стоит отметить, что при равной энергетической эффективности этих видов модуляции, QPSK в два раза спектрально эффективнее, чем BPSK (без учета межсимвольной интерференции). В общем случае, в условиях ограниченной полосы частот наиболее эффективным

методом модуляции является квадратурная амплитудная манипуляция (QAM), что определяется наибольшими расстояниями между точками в сигнальном созвездии в отличие от чисто фазовой манипуляции или амплитудной манипуляции. В большинстве случаев квадратурная амплитудная манипуляция более эффективна, чем различные виды частотной манипуляции [4]. Число уровней манипуляции определяется ОСШ на входе приемника, которое проще всего найти через оценку вероятности битовой ошибки по известной зависимости (рис. 5).

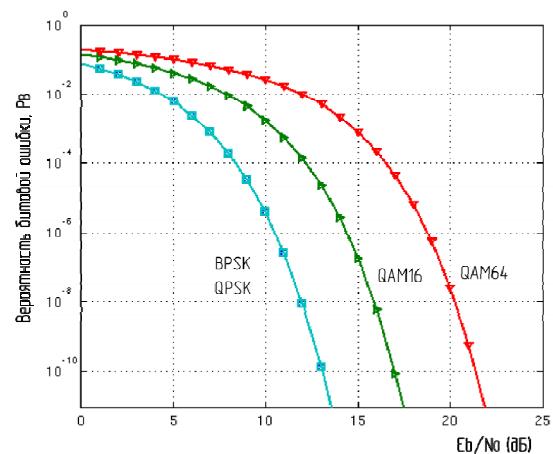


Рис. 5. Вероятности битовой ошибки для различных видов модуляции (когерентное детектирование, идеальная синхронизация, без кодирования)

Для когерентного детектирования сигналов BPSK и QPSK необходимо применение схем восстановления несущего колебания в приемнике (схема с возведением сигнала в квадрат, петля Костаса и др.). При этом возникает проблема решения фазовой неоднозначности восстанавливаемого несущего колебания, которая может быть решена несколькими способами: использованием фазоразностной манипуляции (ФРМ); введением уникальной последовательности бит перед блоком данных, дающей острый автокорреляционный пик при приеме сигнала; использованием методов канального кодирования. Фазовая манипуляция в идеальных условиях имеет более высокую помехоустойчивость в сравнении с ФРМ (на  $\sim 3$  дБ) [5]. Большое распространение систем с ФРМ объясняется их более простой реализацией, что на сегодняшний день не является принципиальным фактором.

Анализ канала связи подразумевает проведение расчетов полезной мощности сигнала и мощности шума в приемнике с учетом всех этапов передачи радиосигнала.

Потери радиосигнала на трассе рассчитываются по формуле [4]:

$$L = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right),$$

где  $L$  – потери на распространение в свободном пространстве, дБ;  $D$  – расстояние между приемником и передатчиком, м;  $\lambda$  – длина волны, м.

Рассмотрим зависимость затухания сигнала от расстояния между БПЛА и НКУ для двух частот (рис. 6).

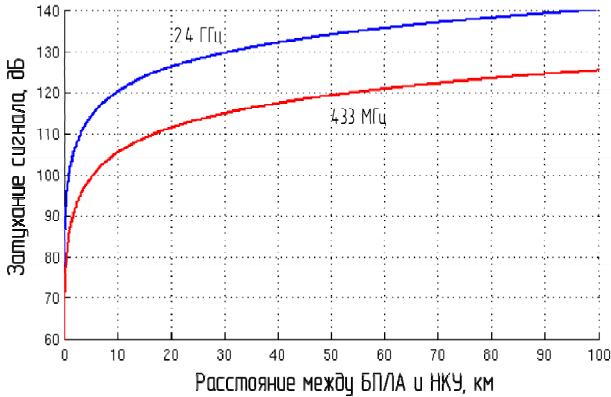


Рис. 6. Затухание сигнала на трассе в зависимости от расстояния между БПЛА и НКУ для двух разных частот

Затухание сигнала в диапазоне 2,4 ГГц при расстоянии между БПЛА и НКУ 30 км составит 130 дБ. Для компенсации такого затухания необходимо использовать все возможные способы, в том числе повышение коэффициента усиления антенн (главным образом, наземной), использование энергетически выгодных видов модуляции (рис. 5), повышение выходной мощности передатчиков до максимально разрешенной.

Определим мощность теплового шума на входе приемника по выражению [4]:

$$N = kTB,$$

где  $N$  – мощность шума, Вт;  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  – температура, К;  $B$  – ширина полосы пропускания, Гц.

При максимально возможной ширине полосы частот для диапазона 2,4 ГГц  $B = 22$  МГц [2] и температуре  $T = 320$  К, мощность теплового шума на входе приемника будет  $N = -100$  дБм.

Рассчитаем необходимое ОСШ на входе приемника для достижения заданного качества связи [4]:

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R}{B_T},$$

где  $E_b$  – энергия бита информации, Вт · с;  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума, Вт/Гц;  $R$  – скорость передачи данных, бит/сек;  $B_T$  – полоса пропускания, Гц.

Для значения вероятности битовой ошибки  $P_{BER} = 10^{-8}$  отношение  $E_b / N_0 = 12$  дБ, для  $P_{BER} = 10^{-3}$  отношение  $E_b / N_0 = 7$  дБ (рис. 5), при отношении  $R / B_T = 0,5$  получим следующие ОСШ на входе приемника: 9 дБ и 4 дБ, соответственно. Мощность сигнала на входе приемника должна быть не ниже уровня мощности шума на данные величины. Кроме того, значения необходимых ОСШ могут быть уменьшены при спектральном расширении сигнала. Так, например, при расширении спектра прямой последовательностью Баркера длиной 11 бит график зависимости значения вероятности битовой ошибки от ОСШ (рис. 5) сместится влево, для  $P_{BER} = 10^{-8}$  на ~5 дБ.

Сведем в таблицу полученные данные (см. таблицу).

Исследуя данные таблицы, можно сделать вывод, что для обеспечения связи между бортом ЛА и НКУ в диапазоне 2,4 ГГц на расстоянии 30 км необходимо иметь наземную антенну с большим коэффициентом усиления (более 20 дБ). Ширина диаграммы направленности (ДН) такого типа антенн менее 10°, что налагивает ограничения на применение их в условиях близкого полета ЛА. Является целесообразным использования двух типов антенн для различных дальностей полета БПЛА: с усиленiem ~8 дБи для условий ближнего полета и более 20 дБи для условий дальнего полета. Требования к опорно-поворотному устройству антенны НКУ определяются исходя из ширины ДН антенны – допустимая погрешность установки поворотной платформой азимутального угла и угла возведения антенны не должна превышать половину ширины ДН. В случае установки антенны с усиленiem 27 дБи ширина ДН составит приблизительно 6°, тогда допустимая погрешность будет равна 3°.

Таким образом, современная система связи НКУ с БПЛА на уровне обработки сигнала должна быть реализована как программно-определенная радиосистема, что позволяет в зависимости от условий прохождения сигнала на трассе БПЛА–НКУ адаптивно изменять виды модуляции, выходную мощность передатчика, виды канального кодирования сигнала, параметры расширения спектра сигнала, скорость передачи данных, соотношение времени передачи и приема для полудуплексных каналов связи, параметры шифрования передаваемых данных. По возможности необходимо использовать управляемые антенные решетки или направленные антенны с поворотным устройством на борту ЛА и два типа автоматически переключаемых антенн НКУ: остронаправленную на опорно-поворотном устройстве (или АР) и ненаправленную.

#### Анализ канала связи

№	Наименование позиции	Усиление/ослабление, дБ (дБм)	Итого, дБм
1	Выходная мощность передатчика	+30	+30
2	Потери в фидере и разъемах НКУ	-1,5	28,5
3	Усиление антенны НКУ	+24	52,5
4	Потери на распространение (2,4 ГГц, 30 км)	-130	-77,5
5	Усиление бортовой антенны	+2	-75,5
6	Потери в бортовом фидере и разъемах	-1,5	-77
7	Чувствительность приемника	-90	+13
<b>Итого, бюджет канала связи</b>			<b>+13</b>

Одной из актуальных задач на сегодня является создание сетевых систем связи с кодовым разделением, позволяющих передавать данные как между БПЛА и НКУ, так и транзитом через все доступные БПЛА. При этом для обеспечения устойчивой связи с удаленным БПЛА возможно использовать малые БПЛА в качестве ретрансляторов сигнала.

#### Библиографические ссылки

1. Boev N. Design and Implementation Antenna for Small UAV. International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON IEEE. 2011.

2. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Министерстве информационных технологий и связи Российской Федерации от 6 декабря 2004 г. № 04-03-04-003 Об использовании полосы радиочастот 2400-2483.5 МГц для внутриофисных систем передачи данных.

3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М. : Связь, 1972.

4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Вильямс, 2003.

5. Окунев Ю. Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами. М. : Радио и связь, 1991.

Н. М. Boev

### ANALYSIS OF UAV RADIO CONTROL AND TELEMETRY SYSTEMS

*The analysis of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) radio control and telemetry systems is considered. The descriptions and characteristics of communication equipment are presented. Requirements for the choice of ground control unit, antenna and UAV are formulated. The author gives the possible ways of development of radio systems for UAV.*

*Keywords:* UAV, radio communication.

© Боев Н. М., 2012

УДК 536.46

А. Г. Кучкин, С. В. Хижняк, Е. Я. Мучкина, М. Е. Баранов, В. Н. Анпилогов

### АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОБЪЕКТАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

*Дается анализ экологической обстановки специального объекта Министерства обороны Российской Федерации, и механизм восстановления химически загрязненных почв.*

*Ключевые слова:* почва, нефтепродукты, фитотоксичность, антропогенное воздействие, ракетно-космическая техника.

Важное значение в структуре научно-технического развития и экологической обстановки в мире приобретает взаимосвязь эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ) и экологии. Вооруженные силы Российской Федерации имеют многоплановую сферу деятельности, которая влияет на экологическую обстановку территорий нашей страны. В войсковых частях имеется большое число потенциально опасных в экологическом отношении военных объектов, таких как пусковые установки баллистических ракет, хранилища и склады ракетных топлив, боеприпасов, вооружения и военной техники, горючесмазочных материалов и т. д. Во время их эксплуатации происходит периодическое загрязнение окружающей природной среды: атмосферного воздуха, почвы, поверхностных и подземных вод, растительного и животного мира. Кроме того, на этих объектах могут происходить аварии, приводящие к более серьезным и возможно непоправимым экологическим последствиям.

С 2002 г. в рамках межправительственной Программы совместного уменьшения угрозы между Российской Федерацией и Соединенными Штатами Америки, а также в соответствии с Договором о сокращении и ограничении стратегических наступательных вооружений проводятся работы по выводу из эксплуатации ракетных комплексов и сокращения объектов Министерства обороны (МО) РФ.

Целью исследования является изучение экологической обстановки объектов Министерства обороны, выявление характерного состава загрязнений и определение механизма восстановления природных экосистем.

**Объекты и методы.** Объектом исследования являлись почва, растительный покров и водные ресурсы с бывшего места дислокации воинской части в районе поселка Кедровый Емельяновского района Красноярского края.