Контактные данные автора, ответственного за связь с редакцией

Фитасов Евгений Сергеевич

ФГАУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ), радиофизический факультет, кафедра радиотехники, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

рабочий телефон (831) 462-32-72

мобильный телефон +7 905-661-12-36

e-mail: [fitasoves@mail.ru](mailto:fitasoves@mail.ru)

УДК 621.396.96

**СЕЛЕКЦИЯ ИМИТИРУЮЩИХ СИГНАЛОПОДОБНЫХ ПОМЕХ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ВНУТРЕННЕЙ КОГЕРЕНТНОСТЬЮ**

*Е.С. Фитасов*1*, Е.В. Леговцова1,О.Е. Кудряшова1,С.А. Козлов2,В.В. Насонов3*

1 ФГАУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород;

2АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Нижний Новгород;

3Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, 150001,  
г. Ярославль, Россия

Предложен и исследован метод защиты от интеллектуальных имитирующих сигналоподобных активных помех, основанный на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов. В качестве селектирующего признака предложена мера когерентности сигналов как энтропия распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы. Проведен анализ основных факторов, влияющих на степень когерентности радиолокационных сигналов. Проведена оценка вычислительных затрат при реализации предложенного метода оценки количественной меры степени когерентности сигналов. Приведены результаты натурных экспериментальных исследований с использованием различных типов летательных аппаратов (с винтовым двигателем и турбореактивных) и специализированной аппаратуры - ретранслятора имитирующих сигналоподобных помех. Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты оценки степени когерентности реальных воздушных объектов и имитирующей сигналоподобной помехи подтвердили возможность селекции имитирующей сигналоподобной помехи предложенным методом.

**СЕЛЕКЦИЯ ИМИТИРУЮЩИХ СИГНАЛОПОДОБНЫХ ПОМЕХ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ВНУТРЕННЕЙ КОГЕРЕНТНОСТЬЮ**

*E. S. Fitasov, E. V. Legovtsova, O.EA. Kudryashova, S. A. Kozlov, V.V. Nasonov*

A method of protection against intelligent simulating signal-like active interference based on the assessment of the coherent properties of radar signals has been proposed and investigated. As a selection feature, a measure of signal coherence is proposed as the entropy of the signal energy distribution over the eigen subspaces of its correlation matrix. The analysis of the main factors influencing the degree of coherence of radar signals is carried out. The estimation of computational costs in the implementation of the proposed method for assessing the quantitative measure of the degree of coherence of signals is carried out. The results of field experimental studies using various types of aircraft (with a propeller engine and turbojets) and specialized equipment - a repeater of simulating signal-like interference are presented. Obtained in the course of experimental studies, the results of evaluating the degree of coherence of real air objects and imitating signal-like interference confirmed the possibility of selecting a simulating signal-like interference by the proposed method.

**ВВЕДЕНИЕ**

Активные имитирующие сигналоподобные помехи обычно используются для внесения ложной информации в радиоэлектронное устройство. Так, например, результатом воздействия таких помех на радиолокационные системы является затруднение в отождествлении эхо-сигналов от объекта, т.е. помеха воспринимается системой как ложная воздушная цель (ЛВЦ). Как следствие, происходит перегрузка вычислительной системы за счёт обработки большого объёма ложной информации. В последнем случае действие помехи приводят к тому, что радиоэлектронное устройство работает на пределе пропускной способности, или, более того, аппаратурная пропускная способность канала становится недостаточной для передачи необходимой информации [1-3].

Вопросы формирования, воздействия и защиты радиотехнических систем (радиолокационных, радионавигационных, радиосвязи) от активных имитирующих сигналоподобных помех достаточно подробно рассмотрены в целом ряде публикаций [3-13]. В основе построения устройств формирования имитирующих сигналоподобных помех радиолокационным системам лежит, как правило, принцип ретрансляции зондирующего сигнала с измененными параметрами, несущими информацию о координатах и скорости объекта [4,6]. При этом, существует ряд подходов к построению систем помехозащиты, объединённых, как правило, наличием блока анализа некоторых характеристик и логического элемента сравнения. Например, наиболее простой способ помехозащиты основан на логическом сравнении уровней сигналов и помех (в предположении, что мощность помехи будет существенно больше мощности сигнала). Также может применяться анализ второй и третьей производной отслеживаемой координаты, которые у помеховых сигналов в определенные моменты могут отличаться от аналогичных производных полезного сигнала. Кроме того, возможно применение систем, которые могут использовать результаты спектрального анализа сигнала и помехи [4,14]. Однако, появление современных сверхманевренных летательных аппаратов, способных выполнять маневры, приводящие к более сложным законам изменения координат объекта (и их производных), делает задачу обнаружения имитирующих сигналоподобных помех по результатам трассовой обработки более затруднительным [4]. В связи с этим приходится использовать комбинированные приемы, которые дают возможность достоверно проводить селекцию имитирующей помехи по совокупности признаков, получаемых в результате сигнальной и трассовой обработки.

Таким образом, проведённый краткий анализ влияния активных имитирующих помех позволяет сделать ряд выводов об общих недостатках существующих методов защиты:

– необходимость использования априорной информации о помехе;

– применение селекции только для радиолокационных систем с определённым видом и типом зондирующего сигнала;

– сложность селекции в условиях сопровождения нескольких близкорасположенных воздушных объектов;

– необходимость внесения конструктивных (технических) изменений в структуру радиоэлектронных средств (в существующих системах).

В работе [15] был предложен метод селекции имитирующих сигналоподобных радиопомех, основанный на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов. Суть данного подхода строится на предположении, что сигнал радиолокационной системы и имитационной помехи (т.е. сигнал ретранслятора) при прочих равных условиях будут иметь различную степень когерентности. Современные радиолокационные системы являются системами с внутренней когерентностью, что означает знание закономерности фазовой структуры излучаемого и отражённого сигналов [16]. Это, в свою очередь обеспечивается высокой стабильностью характеристик различных радиотехнических устройств радиолокационной системы: задающего генератора, системы синхронизации, гетеродинов, идентичностью АЧХ фильтров передающего и приёмного устройства, частоты квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и др. При этом, система формирования имитирующей сигналоподобной помехи (ретранслятор) также является аналогичной системой с жёсткой внутренней когерентностью. При этом, очевидно, что «внутренняя когерентность» радиолокационной системы не равна «внутренней когерентности» формирователя имитирующей сигналоподобной помехи, т.к. характеристики вышеперечисленных радиотехнических устройств не равны между собой.

Временная когерентность также может частично или полностью нарушаться из-за флуктуаций отражающей поверхности обнаруживаемого объекта. Однако за время когерентного накопления отраженного сигнала в пределах главного луча диаграммы направленности(при заданном качестве приемо-передающего тракта) когерентность сигналов, отраженных от реальных воздушных объектов в большинстве современных радиолокационных систем можно считать достаточно высокой. Поэтому для радиолокационных систем с данными характеристиками эффектом разрушения когерентности из-за флуктуаций отражающей поверхности, очевидно можно пренебречь.

Известны различные частные показатели когерентности, в том числе радиолокационных сигналов [17-19]. В качестве количественной меры степени когерентности сигналов в работе [20] было предложено использовать значение оценки энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матриц.

Применение данной меры для оценки когерентных свойств сигналов имеет ряд существенных достоинств по сравнению с известными методами:

– инвариантность относительно формы сигнала (универсальность применяемого понятия «когерентность» к сигналам произвольного вида, в том числе и шумовым);

– универсальность оценки как для временной, так и для пространственной когерентности;

– при отсутствии априорных данных оценка может быть реализована на основе выборочной корреляционной матрицы сигнала.

Таким образом, можно сделать предположение, что когерентность имитирующей сигналоподобной помехи в виде оценки энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы, будет меньше по сравнению с когерентностью полезного сигнала.

**1. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ВИДЕ ЭНТРОПИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА ПО СОБСТВЕННЫМ ПОДПРОСТРАНСТВАМ ЕГО КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ**

Метод оценки когерентности радиолокационных сигналов, в том числе с флуктуациями параметров, подробно рассмотрен в работах [20-22]. Рассмотрим его основные положения.

Пусть радиолокационной системой принимается отраженный от воздушного объекта (цели) эхо-сигнал, представляющий собой аддитивную смесь детерминированного сигнала, характеризующегося неслучайным вектором сигнала **Х** и собственного шума приемного канала **Z**, распределенного в общем случае по гауссовскому (нормальному) закону [17]

 (1)

где *а* – фиксированный амплитудный множитель, **Z** – вектор шума с корреляционной матрицей , где  – единичная матрица, а *σ2* – мощность каждой из компонент вектора **Z**.

Комплексная амплитуда отражённого радиолокационного сигнала от точечной воздушной цели [17]

, (2)

где *T* – период зондирования радиолокационных импульсов;

*N* – количество импульсов в принимаемой пачке сигналов;

 – частота Доплера;

\* – знак эрмитова сопряжения.

В качестве информационной меры степени когерентности было предложено использовать энтропию *H* распределения сигнала по собственным числам его корреляционной матрицы **Ф**. В соответствии с [20] показатель энтропии равен:

. (3)

где  - нормированные собственные значения матрицы **Ф**; Sp **Ф** – след (сумма диагональных элементов) матрицы **Ф**.

В случае детерминированного сигнала КМ имеет единичный ранг и её нормированные собственные значения равны . При этом энтропия , то есть детерминированный сигнал является полностью когерентным. В случае случайного гауссового процесса с равными по мощности и некоррелированными компонентами КМ является диагональной с равными между собой элементами главной диагонали. Нормированные собственные значения , а энтропия равна.

В случае аддитивной смеси детерминированного сигнала и гауссового шума (1) показатель энтропии будет соответствовать [20]:

, (4)

где – отношение сигнал-шум (ОСШ).

При увеличении отношения сигнал-шум (при ) значения энтропии *Н* стремится к нулю (т.е. процесс становится полностью когерентным), при  энтропия *Н* стремится к значению *ln(N).*

**2. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СТЕПЕНЬ КОГЕРЕНТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

Среди ряда факторов, влияющих на степень когерентности радиолокационных сигналов можно выделить три основных.

1. Флуктуации параметров сигнала (амплитуды, частоты, фазы), вызванных собственным шумом радиотехнической системы. Степень когерентности сигнала в данном случае будет определиться, в соответствии с выражением (4) отношением сигнал-шум.
2. Постоянные флуктуации параметров сигнала, например, флуктуации в автоколебательных системах, обусловленные техническими характеристиками радиотехнических устройств и влияющие на их стабильность. В данном случае очевидно предположить, что при ОСШ  значение энтропии будет стремиться не к нулю, а к некоторому постоянному значению, зависящему от параметров распределения флуктуаций.
3. Искажение спектра сигнала в частотно-избирательных системах, вызванных рассогласованием спектра принимаемого сигнала и амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. Данный эффект возможен в предположении, что АЧХ фильтров приемной системы согласованы только с излучаемым сигналом (что очевидно), а спектр имитирующей помехи будет иметь некоторое отличия, т.е. фильтры являются «несогласованными» для имитирующей помехи.

Анализ степени когерентности сигналов с флуктуациями частоты и фазы был проведен в работе [22]. При этом флуктуационный процесс можно представить как колебания со случайными амплитудой и фазой (частотой) или как результат случайного наложения (суммы) детерминированных сигналов [23].

Случай флуктуации амплитуды сигнала будет аналогичен аддитивной смеси детерминированного сигнала и собственного шума и значение энтропии будет соответствовать выражению (4).

Проведем оценку влияния искажения спектра радиолокационного сигнала на степень когерентности в частотно-избирательных системах, вызванных рассогласованием спектра принимаемого сигнала и АЧХ фильтра. Оценим значения энтропии *H* в случае увеличения ширины спектра радиолокационного сигнала. Очевидно, что это будет эквивалентно уменьшению длительности сигнала. При этом данная оценка, конечно, будет иметь качественный характер.

Примем за *N*=*N*1-*n* (*n=*0,1,…,*N*1-1) длительность полезного сигнала, присутствующего в выборке процесса длительностью *N.* После несложных преобразований выражение (4) примет следующий вид:

. (5)

В соответствии с выражением (5) построена зависимость энтропии *H1* от ОСШ для аддитивной смеси детерминированного сигнала и собственного шума различных значений *N* длины полезного сигнала при фиксированном значении длины выборки процесса *N*1. Результат моделирования для *N*1= 16 представлен на рис. 1.

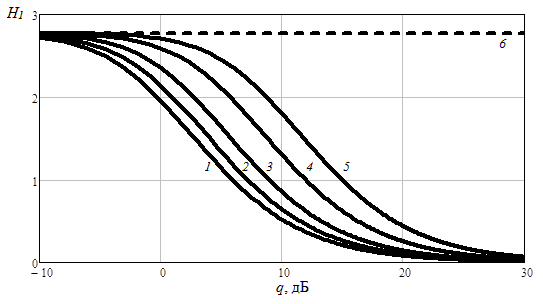


Рис. 1. Зависимость нормированных значений энтропии *Н* от ОСШ *q* для аддитивной смеси детерминированного сигнала и собственного шума различных значений длительности *N* сигнала (для длины выборки процесса *N*1= 16):

1 – *N*= *N*1= 16; 2 – *N*= 14; 3 – *N*= 12; 4 – *N*= 10; 5 – *N* = 8; 6 – *ln(N*1*), N*1= 16

Анализ результатов моделирования показал, что при увеличении ОСШ () значения энтропии *Н1* стремится к нулю, т.е. процесс становится полностью когерентным. При этом значения энтропии *Н1* для имитирующей помехи будет совпадать со значением энтропии сигнала только при достаточно больших значениях ОСШ.

**3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СЕЛЕКЦИИ ИМИТИРУЮЩИХ СИГНАЛОПОДОБНЫХ АКТИВНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СИГНАЛА ПО СОБСТВЕННЫМ ЧИСЛАМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ**

Для оценки эффективности селекции имитирующих помех с использованием меры когерентности радиолокационных сигналов (4) был проведен ряд натурных экспериментов по влиянию имитирующих сигналоподобных помех на работу активной радиолокационной системы [15]. Результаты, представленные в работе [15], были дополнены новыми типами воздушных объектов. В качестве реальных воздушных объектов (ВО) использовались: легкомоторный пропеллерный самолет (Як-52), вертолёт (Robinson R44), турбовинтовой самолет и БПЛА (МATRICE-600). Имитирующую сигналоподобную помеху формировал ретранслятор радиолокационных сигналов – имитатор ложных воздушных целей (ЛЦ). Принцип работы имитатора основан на ретрансляции принятого радиолокационного сигнала. В качестве системы регистрации радиолокационной информации использовалась трехкоординатная доплеровская радиолокационная станция кругового обзора *D* диапазона с внутренней когерентностью[24]. Для последующего анализа регистрировались данные с выхода системы межпериодной временной обработки, представляющей собой набор доплеровских фильтров [25].

Оценка когерентности сигналов проводилась в соответствии с выражением (3)[26]. Входной сигнал для алгоритма обработки представлял собой пачку отраженных импульсов (1), промодулированных азимутальной диаграммой направленности антенны.

На практике точное значение корреляционной матрицы помехи **Ф**, как правило, неизвестно и поэтому приходится использовать её оценку ) (максимально правдоподобную оценку), получаемую в соответствии с выражением [27]:

, (6)

где **Y**(*i*) – вектор процесса, принимаемый *i*-й момент времени, в соответствии с выражением (1); *L* – объём выборки, используемой для получения оценки корреляционной матрицы сигнала (количество отсчётов, по которым усредняется матрица ).

Размерность оценочной корреляционной матрицы  для рассматриваемого случая составляла *N* = 130*, L = 2·N*.

Всего в ходе эксперимента было обработано порядка 100 различных сигнально-помеховых ситуаций – пачек принятых сигналов, отраженных от реальных воздушных объектов и имитирующих сигналоподобных помех.

Радиолокационные изображения эхо-сигналов после процедуры межпериодной временной обработки (доплеровской фильтрации), построенные при фиксированной дальности объекта на плоскости азимут×частота Доплера, показаны на рис. 2-4. Рис. 2 –вертолёт RobinsonR44, рис. 3 – Як-52, рис. 4 – ретранслятор радиолокационного сигнала.

Для обнаружения цели в системе межпериодной обработке использовалось *n*=0*,…,*256 доплеровских фильтров, перекрывающих частотный диапазон, равный 2*π/T* (*T* — период зондирования радиолокационных импульсов) [28]. Пачки импульсов промодулированы диаграммой направленности антенны в азимутальной плоскости. (Условия проведения эксперимента были аналогичными, приведенным в работе[28]).

На двумерных графиках видны пачки импульсов, отраженных от реальных объектов, и сигналов ретранслятора, при этом видна их внешняя идентичность.

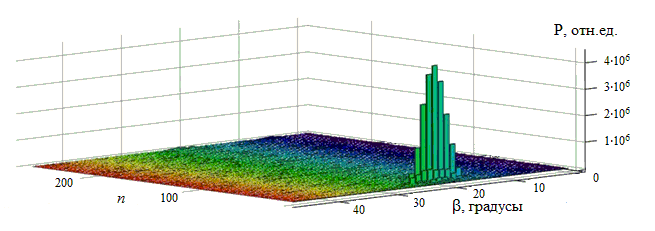


Рис.2. Сигнал, отраженный от вертолёта RobinsonR44

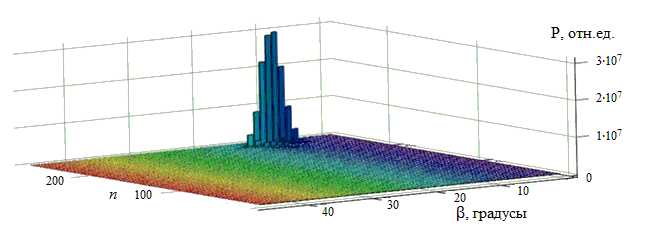


Рис.3. Сигнал, отраженный от самолета Як-52

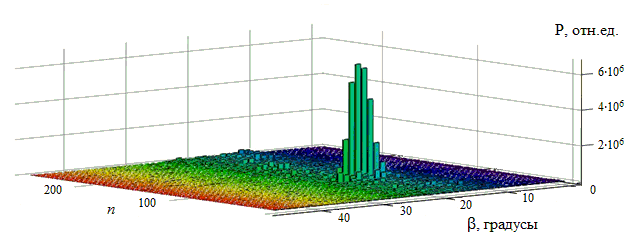
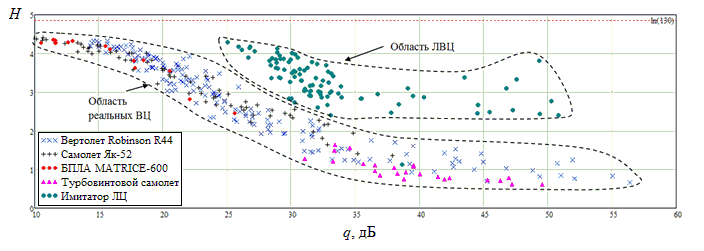


Рис.4. Сигнал ретранслятора радиопомех – имитатора ложных целей

На рис. 5 представлены результаты обработки экспериментальных данных в виде зависимости значений энтропии *H* от отношения сигнал-шум *q*, в соответствии с выражением (3).

Рис. 5. Результаты натурных экспериментов по селекции имитирующих сигналоподобных помех

Значения энтропии *H* для эхо-сигналов отраженных от реальных воздушных объектов представляет собой некую область, которую можно аппроксимировать зависимостью (4). При этом, значения энтропии, соответствующие сигналу имитирующей помехи лежит вне этой области (область ЛВЦ – «ложной воздушной цели»). Максимальное значение энтропии *H* стремится к теоретическому пределу при *N*=130 *H=ln(N)*=4.87. Рис. 5 наглядно показывает расхождение полученных значений для истинных и ложных эхо-сигналов.

Полученный в ходе экспериментальных исследований эффект различая значений энтропий *Н* (степени когерентности) сигналов, отраженных от реальных воздушных объектов и ретранслятора (помехи), подтвердил возможность селекции активных имитирующих сигналоподобных помех. При этом в ходе ряда экспериментов использовались различные типы летательных аппаратов (с винтовым двигателем, турбореактивные, малоразмерные и др.), а также серия однотипных радиолокационных станций. Эксперименты проводились для различных типов местностей и погодных условий. Таким образом, представленные экспериментальные данные позволяют говорить о высокой степени достоверности полученных результатов и выводов.

**4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Предложен и исследован метод защиты от интеллектуальных имитирующих сигналоподобных активных помех, основанный на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов. В качестве селектирующего признака предложена мера когерентности сигналов как энтропия *Н* распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его выборочной корреляционной матрицы .
2. Показано, что среди основных факторов, влияющих на степень когерентности радиолокационных сигналов являются:

- флуктуации параметров сигнала (амплитуды, частоты, фазы), вызванные собственным шумом радиотехнической системы;

- постоянные флуктуации параметров радиолокационного сигнала, обусловленные техническими характеристиками радиотехнических устройств и влияющие на их стабильность;

- искажения спектра сигнала в частотно-избирательных системах, вызванные рассогласованием спектра принимаемого сигнала и АЧХ фильтра приемной системы.

1. Приведены результаты натурных экспериментальных исследований с использованием различных типов летательных аппаратов (с винтовым двигателем и турбореактивных) и специализированной аппаратуры - ретранслятора имитирующих сигналоподобных помех. Полученный в ходе экспериментальных исследований эффект различая степени когерентности сигналов, отраженных от реальных воздушных объектов, и сигнала помехи, подтвердил возможность селекции активной имитирующей сигналоподобной помехи.
2. Рассмотренный метод, кроме радиолокационных систем, также может быть использован при защите от имитирующих сигналоподобных помех систем радиосвязи и радионавигации.
3. **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**
4. Канащенков А.И. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.
5. Михайлов А.В. Подавляющее информационное превосходство / А.В. Михайлов // Воздушно-космическая оборона. Информационно-аналитическое издание. – 2010. – Т. 7. – С. 20–25.
6. Максимов М.В. Защита от радиопомех / Под ред. М.В Максимова. –М.: Сов. радио, 1976. 496 с.
7. Гейстер С.Р. Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам. – Минск: Военная академия РБ, 2000. –172 с.
8. Карманов Ю.Т. Способ защиты РЛС со сложным сигналом от имитирующей помехи / Ю.Т. Карманов, Г.А. Непомнящий // Вестник ЮУрГУ, №26, 2009. – С. 41-46.
9. Киреев С.Н., Таланов В.А. Особенности подавления ретрансляционных помех с помощью нелинейного преобразования при цифровой обработке сигнала // Радиотехника. 2008. №1. С. 60–64.
10. Крячко А.Ф., Куксенко М.А. Воздействие имитационных помех на информационно-измерительные системы // Вопросы радиоэлектроники. 2009. №2. С. 107–116.
11. Крячко А.Ф., Гладкий Н.А., Лосев В. К. Оценка воздействия структурных помех на приемно-регистрирующее оборудование радиотелеметрических систем // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 10. – С. 201–204.
12. Бухалёв В.А., Болдинов В.А., Прядкин С.П. Распознавание и оценивание выходного сигнала линейной системы в условиях скачкообразной имитационной помехи // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20, №5. С. 149–157.
13. Черноусов А.В., Кузовников А.В., Сомов В.Г. Оценка устойчивости широкополосных сигналов к имитационным помехам // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф.Решетнева. 2013. №4. С. 81–84.
14. Корягин М.Г., Никифоров С.Н. Метод селекции сигналоподобных помех в обзорных РЛС при широкополосном зондировании // Телекоммуникационные устройства и системы. 2017. Т.7, №2, С.149–151.
15. Крячко А.Ф., Глазнев М.А., Лосев В.К., Левин Я.Я. Вероятностный подход к оценке воздействия структурных помех на радионавигационные системы // Вопросы радиоэлектроники. 2016, №6, С.71-75.
16. Перунов Ю.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М.: Изд. Радиотехника, 2008. 41с.
17. Гейстер С.Р., Садовский И.С. Разрушение спектральной структуры имитирующих помех путем псевдослучайного изменения фазовой диаграммы направленности антенны радиолокатора // В Сб.: «Доклады БГУИР». 2005. №1. С. 48–53.
18. Фитасов Е.С. Система селекции имитирующих помех // Датчики и системы. 2017. №3. С.24-28.
19. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин и др. Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
20. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
21. Черных М.М. Экспериментальная оценка когерентности радиолокационного сигнала, отраженного от воздушной цели / M.М. Черных, О.В.Васильев // Радиотехника. - 1999, №2, C.36-42.
22. Аганин А.Г., Замараев В.В., Васильев О.В. Способ измерения когерентности сигналов // Радиотехника. 2003. № 6. С. 50–57.
23. Михеев П.В. Метод оценки когерентных свойств радиолокационных сигналов / П. В. Михеев // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, № 1. – С. 82–87.
24. Оценка когерентности радиолокационных сигналов в антенных решетках на основе анализа распределения энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы / И.Я. Орлов, Е.С. Фитасов, Д.Н.Ивлев, С.А. Козлов // Антенны. 2017. №3. С. 31–36.
25. Фитасов Е.С., Орлов И.Я., Леговцова Е.В., Насонов В.В. Оценка когерентности радиолокационных сигналов с флуктуациями параметров // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 1. С. 69–82.
26. Бунимович В.И. Флюктуационные процессы в радиоприемных устройствах. М.: Сов. радио, 1951. 360 с.
27. Егорочкин Г. А., Бляхман А. Б., Бомштейн А. Д. и др. Наземные и вертолетные РЛС разработки ННИИРТ // В кн. История отечественной радиолокации. М.: ООО «Изд. дом «Столичная энциклопедия», 2015. С. 48.
28. Фитасов Е.С., Орлов И.Я., Козлов С.А., Бессонова Е.В., Насонов В.В. Квазиоптимальный проекционный метод доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов // Известия вузов. Радиофизика. № 6. Т. 62. С. 460-468.
29. Устройство селекции ложных целей. Фитасов Е.С., Козлов С.А. № 184465 от 18.07.2018.
30. Марпл–мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ. М. : Мир, 1990. 547 с.
31. Фитасов Е.С., Леговцова Е.В., Пальгуев Д.А., Козлов С.А., Саберов А.Г., Борзов А.Б., Васильев Д.А. Экспериментальная оценка проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов при обнаружении воздушных объектов с малыми радиальными скоростями // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 4. С. 331–340.

Подписи к рисункам

Рис. 1. Зависимость нормированных значений энтропии *Н* от ОСШ *q* для аддитивной смеси детерминированного сигнала и собственного шума различных значений длительности *N* сигнала (для длины выборки процесса *N*1= 16): 1 – *N*= *N*1= 16; 2 – *N*= 14; 3 – *N*= 12; 4 – *N*= 10; 5 – *N* = 8; 6 – *ln(N*1*), N*1= 16

Рис. 2. Сигнал, отраженный от вертолёта Robinson R44

Рис. 3. Сигнал, отраженный от самолета Як-52

Рис. 4. Сигнал ретранслятора радиопомех – имитатора ложных целей

Рис. 5. Результаты натурных экспериментов по селекции интеллектуальных имитирующих сигналоподобных помех

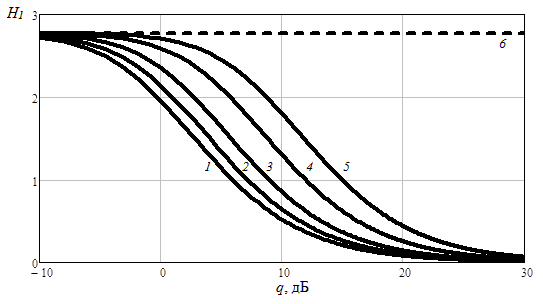


Рис. 1

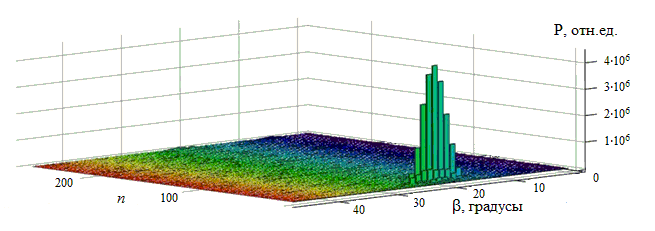


Рис. 2

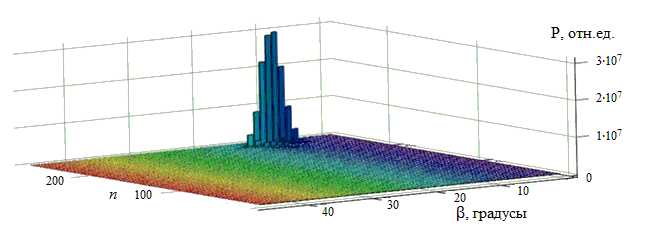


Рис. 3

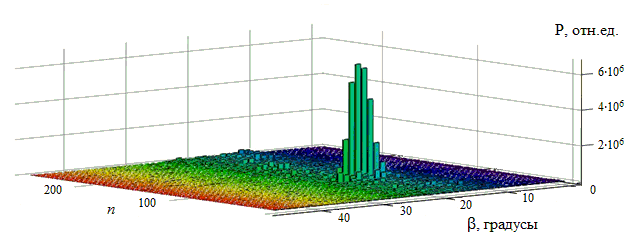


Рис. 4

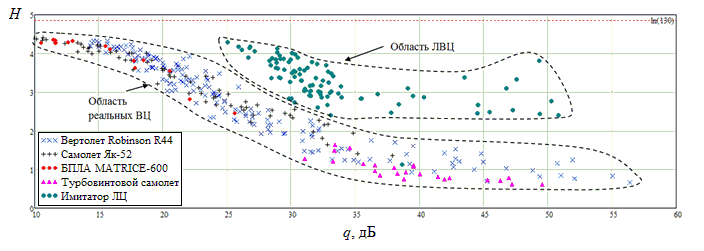


Рис. 5