УДК 621.396.969.34

Исследование моделей шумовых активных заградительных помех

Холодов И.Ю., Костров В.В.

В работе рассмотрены основные виды помех и методы их формирования, дано описание оптимальной помехи, которая обладает максимально возможными маскирующими способностями. Рассмотрены базовые характеристики для оценки эффективности активных шумовых помех, к которым относятся информационный (энтропийный) коэффициент качества и энергетический коэффициент качества помехи. Проведены численные оценки характеристик постановщика активных помех позволили получить некоторые исходные данные для задачи синтеза алгоритмов сверхразрешения.

Ключевые слова: активные помехи, оценка эффективности шумовых помех, маскирующие способности.

Введение

Активные помехи представляют собой электромагнитное поле на полотне ФАР и создаются аппаратурой различных космических и наземных средств, работающих в смежных диапазонах волн, или специальными постановщиками помех, которые преднамеренно излучают в направлении антенны подавляемой системы. В любом случае активные помехи создают в подавляемой РЛС дополнительный фон, который затрудняет обнаружение полезных сигналов, измерение координат и скорости движения, распознавание и классификацию целей.

Чтобы воздействие активных помех было эффективным, они должны действовать в четырех основных координатах РЛС: во временной области, в частотной области, в пространственной (угловой) области и в поляризационной области. Если все эти области будут покрыты активной помехой, то эхо-сигналы полезных целей, имеющие те же координаты, будут отличаться от фона крайне слабо или при определенных условиях не будет отличаться вообще, т.е. помеха полностью замаскирует полезный сигнал. В связи с этим активные помехи часто называют маскирующими и подразделяют на три класса: непрерывные шумовые помехи, хаотические импульсные помехи и последовательности детерминированных (квазидетерминированных) сигналов. По принципу формирования активных помех их можно разделить на помехи с независимым формированием (генераторные помехи) и ответные помехи, которые формируются после обнаружения факта облучения постановщика активных помех (ПАП).

Наиболее эффективными с точки зрения воздействия, как будет показано ниже, являются прямошумовые помехи. В постановщиках активных помех (ПАП) с амплитудной модуляцией большая мощность затрачивается на создание несущей, что снижает общий КПД передатчика. Кроме того, по несущему колебанию можно определить рабочую частоту ПАП и принять меры по противодействию таким помехам. Поэтому с точки зрения энергетических затрат более рациональными являются частотно (фазо) модулированные помехи, которые обеспечивают постоянный уровень сигналов в усилителях мощности и сохраняют высокий КПД передатчика ПАП. Чтобы повысить эффективность воздействия, спектральную плотность мощности помехи делают равномерной, поэтому для системы ее можно аппроксимировать белым шумом. Задача формирования такой шумовой помехи легко решается при использовании прямошумовой помехи.

Описание модели активной помехи

В качестве модели активной помехи рассмотрим случайную стационарную последовательность $\xi = \{\xi(t_i)\} = \{\xi_i\}, i = 1, 2, \dots n$ с многомерной плотностью распределения $w_\xi(x) = w_\xi(x_1, t_1, x_2, t_2, \dots, x_n, t_n)$.

Для одномерной плотности распределения энтропия для одного отсчета вычисляется по соотношению

$$H_{\xi_i} = -\int_{-\infty}^{\infty} w_{\xi_i}(x_i, t_i) \cdot \log w_{\xi_i}(x_i, t_i)\ dx,$$

причем в общем случае энтропия всего процесса меньше суммы энтропий отдельных отсчетов

$$H_\xi \le \sum_{i=1}^{n} H_{\xi_i}.$$

Максимальное значение энтропия H_ξ всей помехи принимает только при условии статистической независимости (некоррелированности) отсчетов, при этом

$$w_\xi(x) = w_\xi(x_1, t_1, x_2, t_2, \dots, x_n, t_n) = \\ = \prod_{i=1}^{n} w_{\xi_i}(x_i, t_i).$$

Отсюда следует, что случайная последовательность $\xi = \{\xi_i\}$ должна представлять собой белый шум.

На плотность распределения вероятностей здесь ограничения не накладываются, поэтому возникает вопрос о виде одномерной плотности, которая обеспечивает помехе наибольшую эффективность. Учтем два момента: а) помеха передается по радиочастотным цепям, поэтому ее смещение (математическое ожидание m_1) равно нулю, $m_1 = 0$; б) одной из основных характеристик помехи является мощность, которая для всех сравниваемых помех с разными плотностями распределения должна быть одинаковой. Для случайного процесса полная мощность определяется вторым моментом, который в рассматриваемых условиях равен дисперсии помех, определяющей в общем случае мощность флуктуационной составляющей.

Тогда одномерная плотность распределения, которая дает максимальную энтропию, сводится к нормальному одномерному распределению отсчетов помехи

$$w_{\xi_i}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left\{-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right\}.$$

Таким образом, наиболее «вредной» помехой для радиоэлектронных средств (РЭС) является случайный процесс с гауссовской плотностью распределения. Точно гауссовское распределение воспроизвести нельзя, поскольку динамический диапазон РЭС всегда ограничен. Это приводит к ограничению помехи и снижению энтропии, т.е. эффективности воздействия помехи на РЭС.

Характеристики эффективности активных шумовых помех

Поскольку имеется несколько видов активных шумовых помех, то необходимо их сравнивать по их маскирующей способности. Одной из наиболее полных показателей степени воздействия помехи на РЛС являются характеристики обнаружения, которые представляют зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала P_d от отношения сигнал-помеха q_{sn} при постоянной вероятности ложной тревоги F. Расчет характеристик обнаружения реальных РЛС вызывает существенные математические трудности, а проведение натурных испытаний приводит существенным материальным затратам. В отдельных случаях в оценке характеристик обнаружения помогает имитационное моделирование. Однако в большинстве практических случаев можно использовать более простые показатели эффективности помех.

1. *Информационный (энтропийный) коэффициент качества*

Выше рассматривался вопрос о плотности распределения вероятностей процесса, который обладает наибольшей энтропией. Поскольку энтропия непрерывной помехи зависит от закона распределения и в пределе стремится к бесконечности, то для непрерывных помех используется термин «дифференциальная энтропия».

Энтропийный коэффициент качества помехи определяется соотношением

$$k_H = \frac{H_T}{H_G} = \frac{-\int_{-\infty}^{\infty} w_{\xi_T}(u) \cdot \log w_{\xi_T}(u)\ du}{-\int_{-\infty}^{\infty} w_{\xi_G}(u) \cdot \log w_{\xi_G}(u)\ du},$$

где H_T - энтропия рассматриваемого источника помех; H_G - энтропия гауссовской по-

мехи; функция log обычно берется по основанию 2. Условием применимости и сравнения различных помех является их одинаковая мощность.

По существу, коэффициент k_H показывает относительную долю достигаемой энтропии от максимального значения, $k_H < 1$. Коэффициент $k_H = 1$ только в случае гауссовской помехи.

Тогда энтропия гауссовской помехи равна

$$H_{\xi_G} = \log\left(\sqrt{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\right)\int_{-\infty}^{\infty} w_{\xi_G}(u)\,du + \\ + \frac{\log e}{2\sigma^2}\int_{-\infty}^{\infty} u^2 w_{\xi_G}(u)\,du = \log\left(\sqrt{2\pi e\sigma^2}\right).$$

Для примера рассмотрим энтропийный коэффициент качества помехи в виде случайного процесса с равномерной плотностью распределения. Дисперсия помехи с равномерной плотностью распределения равна, $\sigma^2 = \frac{x_{max}^2}{3}$, откуда $x_{max} = \sqrt{3\sigma^2}$. Энтропия такого источника равна $H_T = \log\left(2\sqrt{3\sigma^2}\right)$.

Полученные соотношения позволяют записать

$$k_H = \frac{H_T}{H_G} = \frac{\log\left(2\sqrt{3\sigma^2}\right)}{\log\left(\sqrt{2\pi e\sigma^2}\right)}.$$

Пусть мощность помех будет равна 1, тогда $k_H = \frac{\log(2\sqrt{3})}{\log(\sqrt{2\pi e})} = 0{,}836$, т.е. 83,6% от энтропии гауссовского процесса.

На рис. 1 представлена зависимость энтропийного коэффициента качества помехи с равномерной ПРВ по отношению к гауссовской помехе. График показывает, что при малых мощностях информационный ущерб от помехи с равномерным распределение заметно меньше, чем от гауссовской помехи, а при больших мощностях эти помехи становятся практически одинаковыми по наносимому ущербу, коэффициента качества асимптотически стремится к единице, $k_H \to 1$.

2. *Энергетический коэффициент качества помехи*

Поскольку основным назначением помехи является подавление разведанной РЛС, то для характеристики противодействия используется коэффициент подавления по мощности k_P, который вводится как минимально необходимое отношение мощности помехи к мощности сигнала, обеспечивающее нарушение тактико-технических характеристик РЛС,

$$k_P = \frac{P_{n\,min}}{P_s} = \frac{1}{q_{sn}^*},$$

где q_{sn}^* - пороговое отношение сигнал-помеха.

При прочих равных условиях помеха с более низким коэффициентом подавления по мощности k_P считается более эффективной, т.к. ей необходима меньшая мощность для достижения в РЛС того же эффекта. Эффективность постановки помех зависит также от пространственного расположения РЛС, объекта

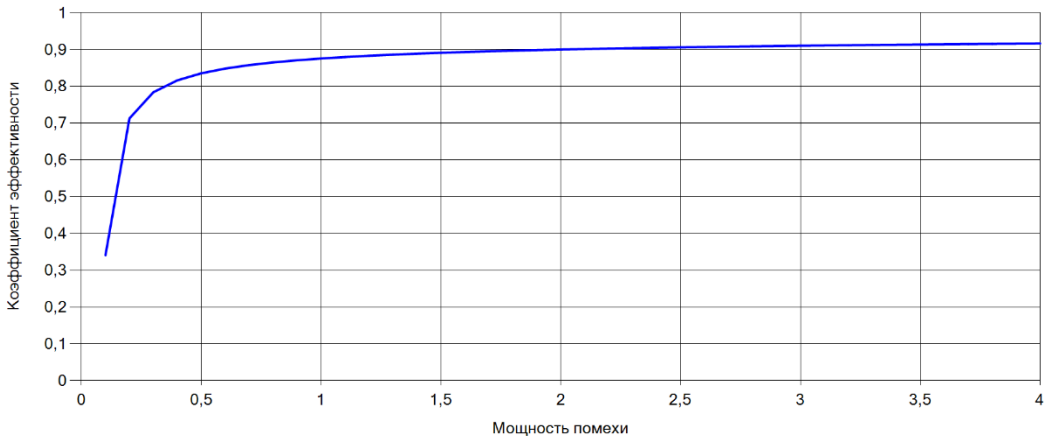

Рис. 1. – Энтропийный коэффициент качества помехи с равномерной ПРВ

защиты и постановщика помех, однако в любом случае РЛС будет считаться подавленной, если текущее отношение помеха-сигнал $\frac{P_n}{P_s} \geq k_P$.

Рассмотрим основные варианты организации постановки помех в ближнем космосе (рис. 2).

1. Космический аппарат (КА) с передатчиком помех находится на большом расстоянии R_{TN1} (до 400...30000 км и более) от защищаемого КА (ЗКА) и подавляемой РЛС. Частным случаем данной ситуации является расположение постановщика помех $ПП_1$ на геостационарной орбите (высота орбиты 36 тыс. км). В качестве носителей ПП используются специализированные космические аппараты радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Помехи, создаваемые из зоны ПП, действуют на РЛС, как правило, по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС. Такое расположение ЗКА и ПП требует согласования их траекторий движения, поскольку скорости движения КА, находящихся на орбитах с разными высотами, отличаются друг от друга.

2. Носитель $ПП_2$ располагается в промежуточной зоне, то есть в зоне между подавляемой РЛС и защищаемым КА. При такой пространственной конфигурации функции носителя ПП может выполнять КА на более низкой орбите, ракета, самолет или беспилотный летательный аппарат. Излучение $ПП_2$ действует на РЛС, как правило, по боковым лепесткам ДНА РЛС. Чтобы носитель $ПП_2$ попал в основной лепесток ДНА РЛС, необходимо пространственное согласование. Однако, ввиду того, что ДНА РЛС является узкой и при сканировании занимает ограниченное пространство, вероятность такого согласования невелика.

3. Носитель ПП расположен в составе орбитальной группировки ЗКА ($ПП_3$ на рис. 2). Функции таких ПП выполняют специализированные КА РЭБ, обладающие аппаратурой радиотехнической разведки и позволяющие им следовать той же орбитой, что и ЗКА. В современном космическом приборостроении используется в основном два типа орбит: спиральные и синхронные. При использовании спиральной орбиты оба КА удерживаются в орбитальной трубке диаметром 300…700 м, в которой по спирали двигаются КА. Во втором случае орбиты примерно одинаковые с максимальным расхождением до 1…2 км. В любом случае ЗКА и КА-носитель ПП могут быть разрешены по дальности, однако по угловой координате оба КА могут попасть в один элемент разрешения РЛС (при одинаковой наклонной дальности до РЛС). Помеха, созда-

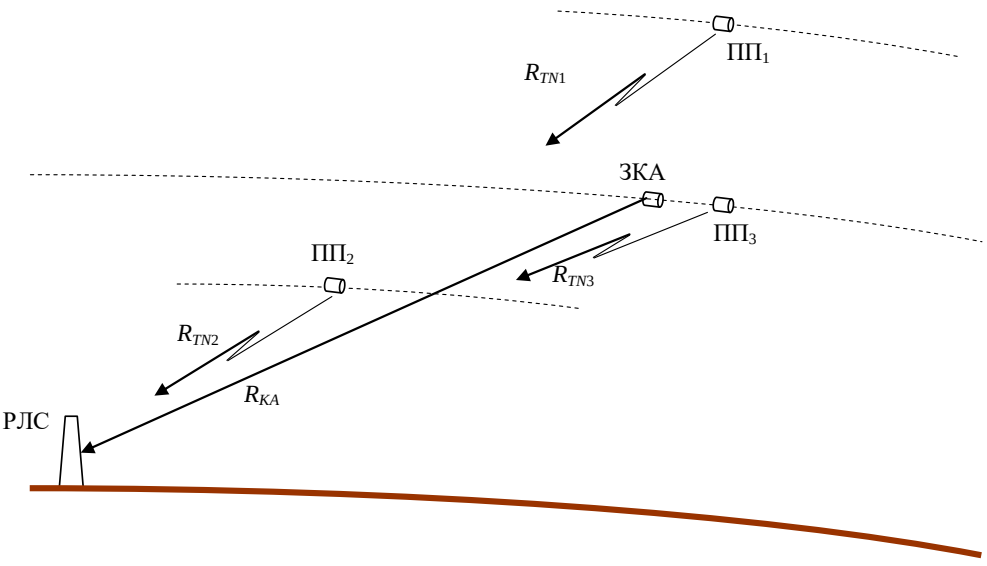

Рис. 2. – Пространственное положение устройств противодействия

ваемая ПП, в основном действует на подавляемую РЛС по боковым лепесткам ДНА и только в случае одинаковой дальности – по основному лепестку.

4. Носитель ПП расположен на защищаемом КА, т.е. имеем совмещенный вариант. При такой конфигурации системы помеха действует на РЛС по основному лепестку ДНА, поэтому всегда требуется меньшая мощность от передатчика по сравнению с предыдущими случаями.

Оценка характеристик постановщика помех

Общие расчетные соотношения основываются на уравнении радиолокации и его модификациях для систем связи и радиолокации с активным ответом. Мощность помехи P_{nin}, создаваемой ПП на входе приемного тракта РЛС в полосе его пропускания, определяется соотношением

$$P_{nin} = \frac{P_{pn} G_n(\alpha_n) G_{tr}(\alpha_r) \lambda^2 \gamma_{pm}}{16\pi^2 R_{TN}^2 K_f},$$

где P_{pn} – мощность передатчика ПП; $G_{tr}(\alpha_r)$ - коэффициент усиления антенны РСА в направлении ПП; α_r - угол между направлением максимума ДНА РЛС и направлением на ПП; $G_n(\alpha_n)$ - коэффициент усиления антенны ПП в направлении РЛС; α_n - угол между направлением максимума ДНА ПП и направлением на РЛС; R_{TN} - расстояние от РЛС до постановщика помех.

Мощность эхо-сигнала на входе приемника РЛС соответствует направлению максимального излучения на КА и максимальному уровню сигнала:

$$P_{s\,in} = \frac{P_{\text{рлс}} G_{tr}^2 \lambda^2 \sigma_{KA} \gamma_{KA}}{64\pi^3 R_{KA}^4},$$

где $P_{\text{рлс}}$ – импульсная мощность излучения РЛС; γ_{KA} - коэффициент, учитывающий деполяризацию эхо-сигналов, отражаемых от корпуса ЗКА; R_{KA} - расстояние между РЛС и ЗКА.

Условие подавления РЛС сводится к проверке неравенства

$$k_{PAP} = \frac{P_{n\,in}}{P_{s\,in}} = 4\pi \frac{P_{pn} G_n(\alpha_n) G_{tr}(\alpha_r) \lambda^2 \gamma_{pm}}{P_{\text{рлс}} G_{tr}^2 \lambda^2 \sigma_{KA} \gamma_{KA}} \frac{R_{KA}^4}{R_{TN}^2 K_f} \geq k_p.$$

Прежде всего, необходимо задать пороговый уровень k_p, который определяется пороговым отношением сигнал-шум q_{sn}^* и заданными вероятностями P_d^* и P_{fa}. Если помеха на входе приемника имеет равномерную спектральную плотность мощности и приемный тракт представляет собой фильтр, согласованный с эхосигналом, то справедливо

$$q_{sn}^* = \frac{2E_s}{N_{wn}},$$

где E_s - средняя энергия эхосигнала на входе приемника; N_{wn} - спектральная плотность белого гауссовского шума.

Если имеют место отличия приемного тракта от согласованного фильтра, то пороговое отношение сигнал-шум рассчитывается с учетом потерь

$$q_{sn}^* = \frac{2E_s}{N_{wn} K_{loss}},$$

где K_{loss} - коэффициент, учитывающий потери в величине параметра сигнал-шум на выходе.

Типовыми для обзорных РЛС являются значения вероятности ложной тревоги из диапазона $P_{fa} = 10^{-4} \ldots 10^{-6}$; значение вероятности правильного обнаружения, при котором РЛС можно считать подавленным, P_d^* при решении задач помехоподавления принимается из диапазона P_d^* = 0,05…0,15. Выберем значения P_d^* = 0,05 и $P_{fa} = 10^{-4}$, что приводит к несколько завышенным требованиям к передатчику ПП. Для этих данных пороговое значение отношения сигнал-шум при обнаружении детерминированного сигнала в случае белого гауссовского шума равно 6 дБ (4 по мощности, потери отсутствуют).

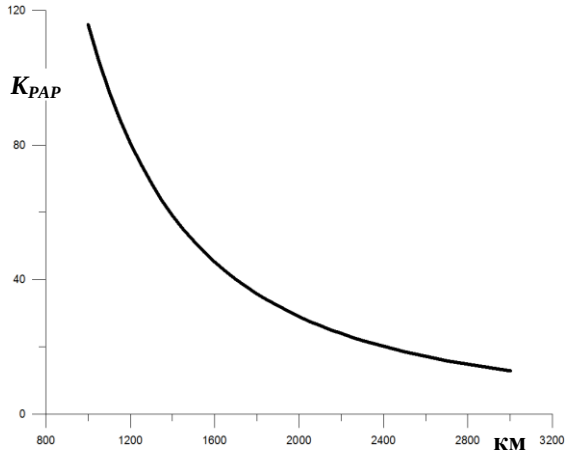

Рис. 3. Зависимость K_{PAP} от расстояния от РЛС до ПАП при σ_{KA}= 1 м^2

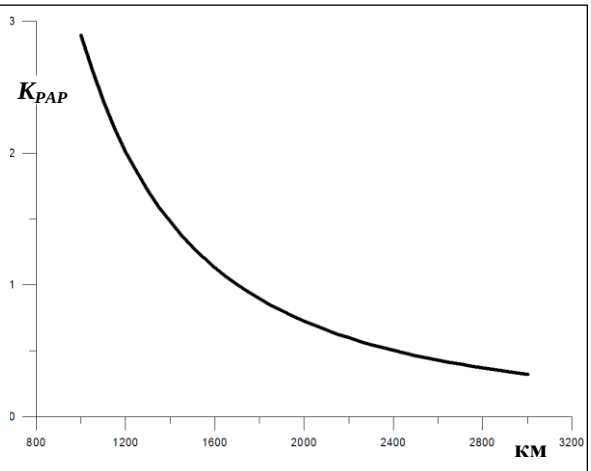

Рис. 4. Зависимость K_{PAP} от расстояния от РЛС до ПАП при σ_{KA}= 40 м^2

Особый интерес представляет такой параметр как плотность потока мощности Π_n излучения постановщика помех в точке расположения РЛС, поскольку он во многих случаях является исходным при формировании ТЗ на организацию помехозащиты. При известных значениях параметров постановщика помех плотность потока мощности равна

$$\Pi_n = \frac{P_{pn} G_n(\alpha_n)}{4\pi R_{TN}^2}.$$

Также для характеристики помех у антенны РЛС широко используется спектральная плотность помехи

$$N_n = \frac{\Pi_n G_{tr} \lambda^2}{4\pi \Delta f_{Tn}},$$

где Δf_{Tn} - ширина спектра помехи, излучаемой ПП.

Таким образом, эти два параметра достаточно полно определяют пространственно-частотные свойства помехи у антенн: один имеет размерность Вт/м^2, другой – Вт/Гц. С помощью этих параметров достаточно легко можно оценить ущерб, который наносит помеха работающей РЛС.

В качестве примера рассмотрим зависимости коэффициента K_{PAP} от расстояния до постановщика помех R_{TN} (км) для ЭПР защищаемого КА 1 и 40 м^2, представленные на рис. 3 и 4 соответственно.

Графики показывают, что при ЭПР КА, равном 1 м^2, мощности ПАП в 1 Вт оказывается достаточно для подавления работы РЛС в широком диапазоне расстояния до КА – носителя ПАП. Границу эффективного действия ПАП по максимальной дальности можно оценить в 5500 км. Это объясняется тем, что принимаемый эхо-сигнал от такой цели очень слаб. Как показывают расчеты, его мощность составляет всего 0,2 пВт.

Для большой ЭПР защищаемого КА 40 м^2 подавление РЛС возможно только с расстояний менее 500 км, при расстояниях боле 500 км $k_{PAP} < k_p = 4$ (рис. 4).

Работа ПАП на орбитах, отличающихся от орбиты защищаемого КА, требует временной и пространственной синхронизации. Существенно проще осуществляется асинхронная работа защищаемого КА и ПАП, если носитель ПАП движется в траекторной трубке диаметром 300…500 м вместе с защищаемым КА. При этом расстояния и угловые направления будут примерно одинаковыми, поскольку луч ДНА в 1° дает линейное разрешение порядка 20 км. Рассмотрим, какие требования предъявляются мощности передатчика ПАП в этом случае. Расстояние от РЛС до постановщика помех примем таким же, как до объекта контроля (1000 км).

На рис. 5 и 6 представлены зависимости k_{PAP} от мощности передатчика ПАП при σ_{KA} 1 м^2 и работе ПАП в области основного лепестка или максимального бокового лепестка.

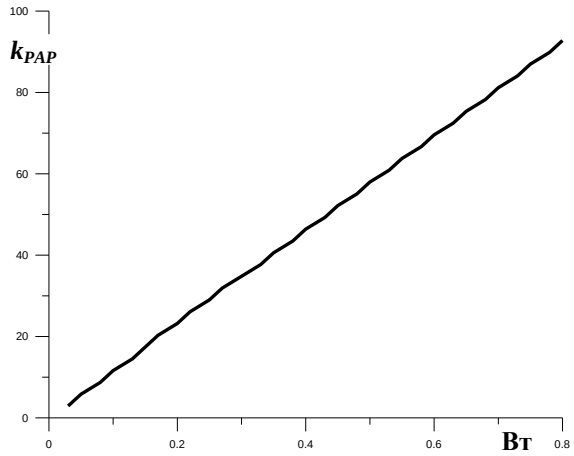

Рис. 5. Зависимость k_{PAP} от мощности передатчика ПАП в основном лепестке

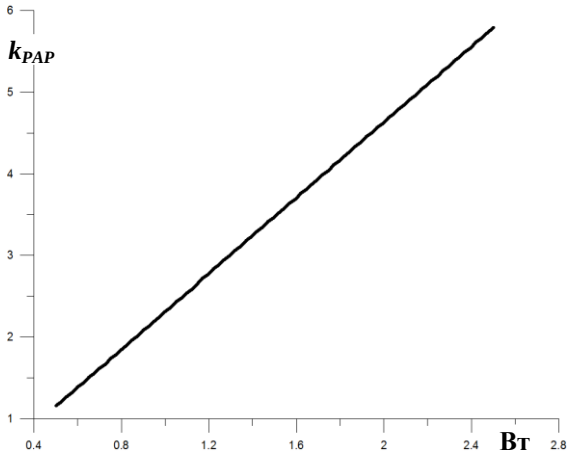

Рис. 6. Зависимость k_{PAP} от мощности передатчика ПАП в боковом лепестке

Исходя из рис. 5 и рис. 6 видно, что в основном лепестке от передатчика ПАП требуются для подавления незначительные мощности, чтобы подавить сигнал на входе РЛС. При выходе носителя ПАП из основного луча эффективность его воздействия на РЛС снижается, поэтому требуется увеличение мощности передатчика. Из графика рис. 6 следует, что для достижения граничного значения $k_{PAP} \geq 4$ требуется мощность $P_{pn} \geq (1{,}8 \ldots 2{,}0)$ Вт. Еще более высокие требования предъявляются к передатчику ПАП при организации противорадиолокационной маскировки защищаемого КА по боковым лепесткам и из области задней полусферы.

Поскольку энергетический ресурс для большинства КА систем связи составляет 50…100 Вт, то сценарий использования ПАП в задней полусфере можно рассматривать как не реалистичный. Отдельный постановщик помех, который обеспечивает достаточную для противорадиолокационной маскировки защищаемого КА, может иметь мощность не более 50 Вт. Учитывая, что постановка помех может быть совмещена с основным функционалом КА, примем диапазон возможных мощностей ПАП 1…50 Вт.

Для данного диапазона изменения мощности передатчика ПАП на рис. 7 и 8 представлены зависимости плотности потока мощности у антенны РЛС и спектральная плотность мощности эквивалентного шума от мощности ПАП. Параметр прицельности ПАП взят равным 2 (20 МГц), что позволяет ПП перекрыть весь диапазон разрешенных частот. Это спра-

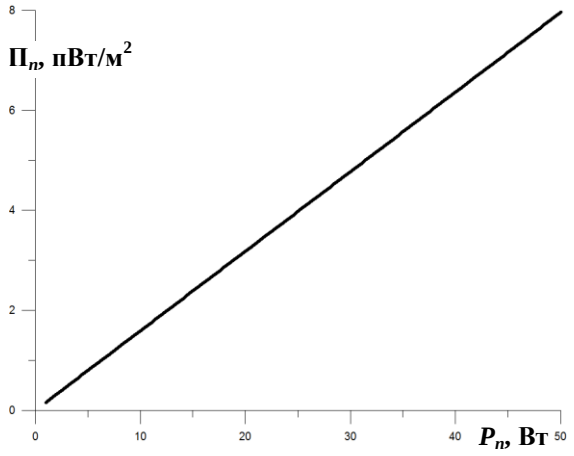

Рис. 5. Зависимость плотности мощности у РЛС от мощности передатчика ПАП

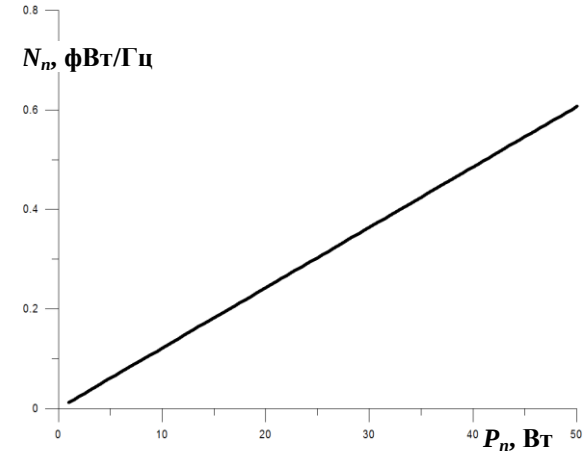

Рис. 6. Зависимость спектральной плотности помех от мощности передатчика ПАП

ведливо для случая использования в РЛС сигналов с ЛЧМ. В случае ФКМ сигналов ширина спектра больше, поэтому параметр прицельности ПП нужно увеличивать до 3…5, чтобы охватить боковые лепестки спектра сигналов.

Заключение

В данной работе представлены результаты исследования моделей шумовых активных помех. По результатам работы были сделаны следующие выводы:

1. Для космического аппарата с ЭПР, равной 1 м^2, мощность ПАП должна быть более 1 Вт на максимальной дальности в 5500 км; для большой ЭПР защищаемого КА 40 м^2 подавление РЛС возможно только с расстояний менее 500 км.

2. В основном лепестке от передатчика ПАП требуются для подавления незначительные мощности, чтобы подавить сигнал на входе РЛС. При выходе носителя ПАП из основного луча эффективность его воздействия на РЛС снижается, поэтому требуется увеличение мощности передатчика, граничное значение составляет $P_{pn} \geq (1{,}8 \ldots 2{,}0)$ Вт.

Литература

1. Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. радио, 1976. – 496 с.

2. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. – М.: Сов. радио, 1968. – 448 с.

3. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.

4. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарёв В.Г. и др. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн. – М.: Вузовская книга, 2009. – 360 с.

5. 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.

6. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. – М.: Вузовская книга, 2015. – 800 с.

7. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузовская книга, 2015. – 360 с.

8. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.

9. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: ракеты против РЛС. – М.: Вузовская книга, 2016. – 182 с.

10. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. – М.: Вузовская книга, 2016. – 190 с.

11. Цветнов В.В. и др. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие: Учебное пособие. – М.: Вузовская книга, 2012. – 248 с.

12. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие: Учебное пособие. – М.: Вуз. книга, 2012. – 248 с.

13. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Радиомаскировка и помехозащита. – М.: Вузовская книга, 2012. – 240 с.

Поступила 02 сентября 2024 г.

The paper considers the main types of interference and methods of their formation, describes the optimal interference, which has the maximum possible masking abilities. The basic characteristics for evaluating the effectiveness of active noise interference are considered, which include the information (entropy) quality coefficient and the energy coefficient of interference quality. Numerical estimates of the characteristics of the active interference setter were carried out, which allowed us to obtain some initial data for the task of synthesizing superresolution algorithms.

Key words: active interference, evaluation of the effectiveness of noise interference, masking abilities.

Холодов Иван Юрьевич – магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Костров Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: kostrov.46@mail.ru

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.