

*Смирнов Д.Д.,*

*Курсант*

*4 курс, факультет «Радиотехнических комплексов»*

*Ярославское Высшее Военное Училище Противовоздушной обороны*

*Шхануков А.А.,*

*Курсант*

*4 курс, факультет «Радиотехнических комплексов»*

*Ярославское Высшее Военное Училище Противовоздушной обороны*

*Зарипов Б.И.,*

*Курсант*

*4 курс, факультет «Радиотехнических комплексов»*

*Ярославское Высшее Военное Училище Противовоздушной обороны*

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И  
ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

***Аннотация:** Рассматриваются результаты исследований потенциальных возможностей радиолокационных систем в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн. Предложены методики оценки основных параметров радиолокационных систем. Проводится оценка эффективности помехозащитности радиолокационных систем в условиях радиоэлектронного противодействия. Оцениваются активные и пассивные методы противодействия обнаружению и распознаванию объектов.*

***Ключевые слова:** Радиолокационная система, диапазон радиоволн, помехозащитность, параметры системы, радиоэлектронное противодействие.*

***Abstract.** In the paper the results of research of potential capabilities of radar systems in the decimeter, centimeter and millimeter wave band are analyzed. A method*

*is proposed for evaluation of basic parameters of radar systems. An assess is made for the effectiveness of radar jamming protection systems under electronic countermeasures. Active and passive methods for counteracting the detection and recognition of objects are evaluated.*

**Keywords:** *radar system, range of radio waves, noise immunity, parameters of the system, electronic countermeasures.*

Анализ зарубежной и отечественной научно-технической литературы последних лет показывает, что в настоящее время намечается тенденция возрастающего внимания к разработке средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), что вызвано острой необходимостью повышения эффективности функционирования радиоэлектронного оборудования, средств радиолокации и систем обработки и передачи информации в условиях естественных и преднамеренных помех. В финансовых кругах ведущих зарубежных стран практически ежемесячно заключаются контракты на производство систем, приборов, блоков и узлов для системы РЭБ. Так, суммарные расходы в США за последние 20 лет возрастают с 1716,9 млн. дол. в 1980 г. до 3628,2 млн. дол. в 1989 г., а к началу XXI века общий рынок сбыта средств РЭБ увеличился не менее чем на 200 %.

Средства РЭБ в зависимости от назначения комплектуются из тех или иных блоков (приемные устройства, передатчики активных помех, антенные устройства и др.) и представляют собой самые разнообразные радиоэлектронные системы (РЭС), которые постоянно совершенствуются.

В ходе ее выполнения наряду с исследованиями в сантиметровом диапазоне волн проведен конкретный анализ и построение моделей для оценки условий функционирования и параметров радиолокационных систем миллиметрового диапазона, а также оценки их эффективности в условиях радиоэлектронного противодействия, что также представляет несомненный интерес.

1. Оценки потенциальных возможностей радиолокационных систем в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн

Рассмотрим параметры РЛС миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн, которые часто применяются при обеспечении задач обнаружения и наведения в наземных условиях. Метровые волны находят большое применение для обнаружения объектов в растительности и в основном с воздушных и космических носителей.

### **1.1. Дальность действия РЛС в сложных метеоусловиях**

В настоящее время накоплены данные о распространении дециметровых, сантиметровых и миллиметровых радиоволн. С помощью этих данных возникает возможность качественной и количественной оценки предельной дальности обнаружения объектов, а также определения деградации РЛС обнаружения объектов в тяжелых метеорологических условиях.

В этом случае необходимо пользоваться известным законом Бугера, согласно которому мощность излучения в поглощающей среде в приближении однократного рассеяния изменяется с расстоянием по экспоненциальному закону. Увеличение числа рассеивателей в среде приводит к возникновению многократного рассеяния, что вызывает нарушение закона Бугера, и ослабление в среде убывает медленнее, чем при однократном рассеянии. Известно, что для определения дальности действия РЛС в тропосфере на дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волнах применяются трансцендентные уравнения, решение которых следует искать численными методами или методом подгонки. При этом следует иметь в виду, что результаты вычислений из-за осредненного ослабления в поглощающих средах позволяют приблизиться к реальным оценкам изменения дальности действия РЛС. Однако, более строгий учет неоднородностей ослабления в пространстве и во времени является практически неразрешимой задачей из-за отсутствия текущих мгновенных данных вдоль трассы распространения.

Для решения задачи о влиянии поглощения на дальность действия представим уравнение дальности действия РЛС в однородной среде в несколько иной, чем обычной форме:

$$\alpha = \frac{\ln \left[ \Pi \left( \frac{d^2}{8\lambda} \right)^2 \frac{\pi\sigma}{4 \cdot 10^6} \frac{\pi\sigma}{R} \right]}{2R} - \frac{2 \ln R}{R} \quad (1.1)$$

где  $\Pi$  - потенциал РЛС, равный отношению мощности, излучаемой в антенну, к чувствительности приемника;  $d$  - диаметр апертуры параболоида в м;  $\lambda$  -длина волны в мм;  $R$  -расстояние в км;  $\sigma$ -эффективная поверхность рассеяния объекта в кв.м.

Для проведения численных оценок дальности действия РЛС необходимо задаться следующими параметрами РЛС: мощностью передатчика  $R_s$ , чувствительностью приемника  $R_{пр}$ , длиной волны  $l$ , диаметром параболоида  $d$ , эффективной поверхностью цели  $s$ , подлежащей обнаружению.

Согласно уравнению (1.1) сначала вычисляется предельная дальность действия РЛС при отсутствии ослабления, а затем дальность РЛС из-за воздействия только молекулярного поглощения, после чего находится уменьшение дальности действия при одновременном воздействии молекулярного поглощения и ослабления в дожде или в тумане с малой оптической видимостью. Точное решение трансцендентного уравнения (1.1) может быть найдено методом подгонки, путем определения необходимой дальности для значения  $\alpha$ , которое должно быть равно теоретическому значению суммарного молекулярного поглощения или совместному воздействию молекулярного поглощения и ослабления в дожде. Далее влияние молекулярного поглощения и ослабления в гидрометеорах на дальность действия дециметровых, сантиметровых и миллиметровых РЛС могут иллюстрироваться некоторыми типичными примерами в предположении отсутствия неоднородностей среды распространения.

На основании трансцендентного уравнения (1.1) оценим влияние поглощающей среды распространяя на дальность действия дециметровых,

сантиметровых и миллиметровых РЛС систем. В целях сравнения различных диапазонов зададим для всех диапазонов одинаковые параметры РЛС. Положим, что потенциал всех РЛС систем  $P = 3 \cdot 10^{15}$ , длительность импульса  $t_{\text{и}} = 2 \cdot 10^{-6}$  с., диаметр круглого параболоида 8 м, эффективная поверхность рассеяния цели –  $50 \text{ м}^2$ , длины волн, на которых проведем расчеты по этому уравнению: 100 см; 30 см; 10 см; 3 см; 8 мм. Предполагается также, что атмосфера, как среда распространения, является однородной средой вдоль трассы распространения.

Для разных дальностей распространения сигналов на разных длинах волн распределение паров воды, кислорода, тумана, дождей данной интенсивности вдоль трассы предполагается однородным. Предположение об однородности распределения мете элементов может иметь место лишь для коротких трасс распространения. Оценки проведены без учета неоднородностей распределения дождей вдоль трассы распространения и неоднородностей ослабления в дождях. Однако, изменчивость интенсивности дождя вдоль трассы оказывает существенное влияние на дальность локации объектов. О степени этого влияния свидетельствуют результаты экспериментов по измерению ослабления в дождях различной протяженности и разной интенсивности на волне 3 см.

Видно, что дожди в пространстве неоднородны, при этом ширина полосы дождя данной интенсивности зависит от ее величины. При ливневых дождях полоса, в которой интенсивность дождя имеет постоянное значение, составляют сотни метров и сильно меняется с расстоянием. По трансцендентному уравнению (1.1) было исследовано влияния на дальности действия РЛС полного молекулярного поглощения, тумана, дождевых облаков и дождей с интенсивностью 5 и 100 мм

2. Обоснование параметров РЛС и оценка эффективности помехозащищенности в условиях радиоэлектронного противодействия

Оценка влияния преднамеренных помех в радиолокационном канале при обнаружении (распознавании) радиолокационной системой объектов в процессе распространения электромагнитного сигнала к объекту и обратно,

сводится к определению помехозащищенности РЛС во время её функционирования.

Помехозащищенность РЛС в общем случае определяется факторами, основными из которых являются скрытность работы, помехоустойчивость к возможности постановки помех с противоборствующей стороны.

Скрытность функционирования РЛС практически связана с её радиолокационной заметностью и эта позиция уже рассматривалась в предыдущей главе.

Наиболее существенным показателем эффективной работы приемной системы, исследуемой РЛС является её помехоустойчивость, как способность системы передачи - приема противостоять вредному действию помех.

## **2.1. Меры помехоустойчивости приемной системы РЛС**

Предельно достижимая помехоустойчивость называется, по В.А. Котельникову, потенциальной помехоустойчивостью. Сравнение фактической помехоустойчивости каждого конкретного устройства с его потенциальной помехоустойчивостью дает оценку качества устройства и показывает наличие еще неиспользованных резервов.

Действие помехи проявляется в том, что принятый сигнал (а, следовательно, и сообщение) отличается от переданного. Поэтому помехоустойчивость можно характеризовать как степень соответствия принятого сигнала (или сообщения) переданному при заданной помехе.

Таким образом, при сравнении нескольких систем та из них будет более помехоустойчивой, в которой при одинаковой помехе различие между принятым и переданным сигналами (или сообщениями) будет меньше.

Ввести единое количественное определение помехоустойчивости затруднительно, так, как и критерий соответствия принятого сигнала переданному и характеристики действующей в системе помехи могут в зависимости от условий передачи существенно различаться.

Количественную меру соответствия приходится выбирать по-разному в зависимости от характера сообщения. Выбор меры зависит от того, передаются ли дискретные символы, или непрерывная функция непрерывного аргумента, которую нужно восстановить при приеме.

В качестве меры помехоустойчивости приемной системы РЛС чаще всего выбирается надежность её функционирования при заданной помехе.

Каковы же общие возможности повышения помехоустойчивости? Прежде всего, необходимо отметить, что при данной интенсивности помех вероятность правильного приема тем больше, чем сильнее различаются между собой сигналы, соответствующие различным сообщениям. На языке современной теории различие между сигналами называется расстоянием.

Таким образом, один из путей к повышению помехоустойчивости состоит в выборе системы сигналов, в которой любая пара возможных сигналов как можно далее отстоит друг от друга.

## **2.2. Методика и оценка помехоустойчивости РЛС обнаружения наземных объектов**

Для оценки помехоустойчивости РЛС обнаружения требуется сравнить уровни помех, которые могут быть созданы на различных участках СВЧ диапазона, при фиксированных внешних условиях и соблюдении необходимых для постановки помех требований. Наибольший уровень прицельных по направлению и частоте помех для РЛС могут создавать станции помех. Конкретных данных о наличии станции помех для РЛС ММ диапазона не имеется. Поэтому оценка помехоустойчивости проводится по аналогии с диапазонами, в которых такие станции существуют.

Мощность помехи  $P_n$  на входе приемника РЛС определяется по известной формуле:

$$P_n = \frac{P_{\text{пер}}^{(n)} G_{\text{пер}}^{(n)} G_{\text{пр}} \lambda^2 L^{(n)} L_k \Delta f}{4\pi D^2} 10^{-0,1\gamma_a D \alpha} \quad (2.1)$$

где  $P_{пер}^{(n)}$  – мощность передатчика помех;  $G_{пер}^{(n)}, G_{пр}$  – коэффициенты усиления антенн станции помех и РЛС соответственно;  $L^{(n)}, L$  – потери в трактах станции помех и РЛС;  $k_{\Delta f}$  – множитель потерь на расширение полосы, необходимой для определения частоты подавляемого сигнала.

Для оценки принято наиболее вероятное удаление передатчика помех от РЛС  $D_n = 5000$  м, подавление осуществляется по боковым лепесткам прицельной по частоте и направлению помехой. Так как направление на РЛС определяется с ошибкой, то эта ошибка должна перекрываться ДНА передатчика помех. При достигнутой в настоящее время точности пеленгования и прицеливания считается, что коэффициент усиления антенны передатчика помех не должен превышать  $G_{пер}^{(n)} = 2000$ . Эта величина принимается одинаковой и постоянной для всех длин волн. Считается также, что средняя величина коэффициента усиления антенны по боковым лепесткам составляет 10 дБ по отношению к уровню излучения изотропной антенны. Примем запас на несовершенство антенны РЛС равным 3 дБ, тогда коэффициент усиления антенны РЛС в направлении боковых лепестков будет  $G_{бок} = 0,2$ , что соответствует 7 дБ.

Необходимая полоса частот прицельной помехи  $\Delta f_n$  должна составлять  $\pm 0,05\%$  относительно несущей частоты подавляемой РЛС. Полоса частот сигнала РЛС  $\Delta f_c$  определяется длительностью импульса  $\tau_i$  по известному соотношению  $\Delta f_c = 1/\tau_i$  и составляет около  $0,02\%$  несущей частоты. Таким образом, потери на расширение необходимой полосы частот передатчика могут быть приняты одинаковыми для всех волн и равными

$$k_{\Delta f} = \frac{\Delta f_c}{\Delta f_n} = \frac{0,02 f_0}{0,1 f_0} = 0,2 \approx -7 \text{ дБ.} \quad (2.)$$

2)

Принятые для расчетов значения мощностей передатчиков помех  $G_{пер}^{(n)}$ , коэффициентов ослабления радиоволн в атмосфере  $\gamma a$  и потерь в трактах  $L^{(n)}$

Мощности передатчиков помех, принятые для расчетов, соответствуют имеющимся в настоящее время в основных диапазонах. Ожидаемая мощность помехи  $P_n$  в зависимости от длины волны, рассчитанная при перечисленных исходных данных по формуле (2.1), приведена на графике (см. рис. 2.1), где для сравнения приведены и уровни шума  $P_{ш.пр}$  приемников РЛС. На этом же графике приведены значения мощностей передатчиков помех  $P_{пер}^{(n)}$  в рассматриваемом диапазоне волн, принятые для расчета зависимости  $P_n = f(\lambda)$  и требуемые мощности передатчиков  $P_{тр}$ , которые необходимы для создания

на входе приемника такого же уровня помехи, как на волне 32 мм.

Из графика видно, что ожидаемые уровни помех на входе приемников РЛС в короткой части ММ диапазона радиоволн существенно ниже мощности собственных шумов приемников.

При работе РЛС в режиме секторного поиска коэффициент усиления ее антенны в направлении на передатчика помех будет изменяться в соответствии со структурой ДНА, характеризующейся областями основного и не основного направлений приема.

Область основного направления приема, соответствующая ширине главного лепестка ДНА на уровне 10 дБ, для РЛС составит не более 1–3% ширины сектора сканирования ДНА, что позволяет с погрешностью 3–7% исключить значение составляющей ширины ДНА из величины общего сектора сканирования.

Значения мощности помех на входе приемника, рассчитанные при указанных выше исходных данных и  $G_{пер} = \bar{G} = 0,2$ . Там же приведены реальные значения уровня шума  $P_{ш.пр}$  приемника РЛС. Из анализа данных видно, что с ускорением длины волны снижается абсолютное значение мощности помех в приемнике РЛС.

При известном законе распределения уровня боковых лепестков можно оценить часть сектора поиска РЛС, подверженную эффективному воздействию помех, в зависимости от дальности обнаружения.

представлены графики зависимости относительных потерь сектора поиска (здесь:  $\alpha_o$  – угол основного сектора поиска;  $\alpha_n$  – сектор эффективного воздействия помех) от отношения дальности от объекта к максимальной дальности действия РЛС, где сплошные линии соответствует станции помех с  $G_{пер}^{(n)} = 2000$ , штриховые  $A\epsilon\phi = 0,2 \text{ м}^2$ , а нумерация кривых: 1 – для волны 2 мм; 2 – для длины волны – 3 мм и 3 – для волны 8 мм.

Из графиков видно, что имеется явное преимущество в помехоустойчивости РЛС коротковолновой части ММ диапазона по сравнению с РЛС, работающими в диапазоне длин волн 8 мм.

Повышение скрытности РЛС достигается такими известными способами, как: снижением спектральной плотности потока мощности зондирующего сигнала, перестройкой частоты передатчика, запрограммированной работой передатчика с определенными паузами («замирания») и др. Последние два способа адекватны для РЛС на любой рабочей волне, поэтому здесь остановимся только на способе снижения спектральной плотности потока мощности.

Снижение спектральной плотности при заданной мощности передающего устройства достигается расширением спектра зондирующего сигнала, что также повышает разрешающую способность РЛС по дальности. За количественную меру скрытности в данном случае, согласно, можно взять среднюю радиояркость источника зондирующего сигнала,  $V_{cp}$  :

$$V_{cp} = \frac{P_{пер.ср} G_{бок}}{A\epsilon\phi \Delta f_c}, \quad (2.3)$$

где  $P_{пер.ср}$  – средняя мощность передающего устройства.

Исходные данные и результаты расчета средней радиояркости по формуле 2.3

Из приведенных данных следует, что увеличение ширины спектра снижает среднее значение радиояркости зондирующего источника.

В заключении следует отметить, что помехозащищенность РЛС обнаружения наземных объектов в ММ диапазоне (особенно в короткой части), несомненно, лучше по сравнению с РЛС сантиметрового диапазона. Целесообразно привести и другие основные технические способы, позволяющие повысить помехозащищенность РЛС ММ диапазона:

- использование когерентно-импульсного метода радиолокации для обеспечения помехоустойчивости РЛС в условиях воздействия интенсивных помех от подстилающей поверхности;

- использование широкополосных сигналов для снижения радиояркости источника зондирующего сигнала (при одновременном уменьшении мощности передающего устройства до единиц ватт за счет применения методов когерентной обработки принимаемых сигналов скрытность РЛС может быть повышена не менее чем на два порядка);

- использование моноимпульсного метода пеленгации для повышения помехозащищенности пеленгационных каналов РЛС обнаружения.

### **Литература:**

1. Ин. печать об экон., науч.-техн. и воен. потенциалах гос.- участн. СНГ и техн.средствах его выявления. Сер. «Технические средства разведслужб капиталистических государств», Информационный бюллетень ВИНТИ, РАН - 2009-2015 г.г.

2. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография. /Под ред. А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.

3. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. - 2007. -512 с.

4. Акиншин Н.С., Быстров Р.П., Румянцев В.Л., Соколов А.В. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения негауссовских сигналов. / Под ред. Р.П. Быстрова. – М.: Радиотехника, 2010. – 528 с.
5. Харкевич А.А. Основы радиотехники. – 3-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 512 с.
6. Быстров Р.П., Меркин А.А., Садыков Р.Р., Серебряков О.П. Помехозащищенность радиолокационных систем обнаружения движущихся и неподвижных объектов в миллиметровом диапазоне радиоволн. – Электромагнитные волны и электронные системы, № 3, т.2, 1997, с.63-65.
7. Skolnik. Proc. Symph. on Submillimeter waves, v, March 31 apr. 1,2,1970. NY, pp.9-25.
8. Зубков А.Н. Радиолокационная система обнаружения наземных целей в коротковолновой части ММ диапазона. – Докл. на НТК по миллиметровой технике, Львов, ЛНИРТИ, 1986.
9. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств – участников СНГ и технических средствах его выявления. Серю Технические средства разведывательных служб капиталистических государств. – ВИНТИ, 1998, №№ 9-11.
10. Небабин В.Г., Белоус О.И. Методы и техника противодействия радиолокационному распознаванию. Зарубежная радиоэлектроника, № 2, 1987, с.38- 47.