

УДК 621.39

В.А. Миронов

Институт радиопрофики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ

В статье рассматриваются факторы, влияющие на характеристики обнаружения полезного сигнала. Рассматриваются расчетные модели представления радиолокационных сигналов в идеализированных условиях: по одиночному с заранее известными характеристикам сигнал; по пачке отраженных сигналов; по мерцающей пачке в пределах одного обзора. В статье приводятся расчетные зависимости вероятности правильного обнаружения от нормированной дальности для каждого перечисленного случая. Производится оценка влияния величины пачки принятых сигналов на характеристики обнаружения.

Ключевые слова: полезный сигнал, морская поверхность, пачка отраженных сигналов, характеристики обнаружения.

Введение

Факторы, влияющие на характеристики обнаружения. В современных радиолокационных станциях (РЛС) устройства обработки сигналов должны устанавливать факт наличия слабого сигнала (близкого к пороговому) на фоне интенсивного воздействия пассивных помех. Амплитуда и фаза полезного сигнала испытывают случайные флуктуации вследствие интерференционного характера отражений от реальной цели и влияния среды. В связи с этим обнаружение полезного сигнала оказывается случайной величиной. Ее статистический характер необходимо учитывать в расчетах, связанных с обоснованием энергетических характеристик радиолокационных станций сопряженных с системами обнаружения и сопровождения целей. При всех расчетах такого рода, требуется иметь возможность устанавливать связь между дальностью, вероятностью правильного обнаружения, характером флуктуаций отраженного от целей сигналов и техническими параметрами используемой РЛС.

Если рассмотреть идеализированный случай, состоящий в обнаружении статической цели по одиночному сигналу, имеющему регулярный, заранее известный характер, можно заключить, что вследствие наличия случайных выбросов шумового сигнала, на фоне которого рассматривается принимаемый сигнал, обнаружение цели носит вероятностный характер. Задача состоит в принятии решения о наличии полезного сигнала несущего информацию о цели в исследуемой случайной функции [1]

$$f(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

состоящей из смеси полезного сигнала $s(t)$ и шума $n(t)$. Полезный сигнал в нашем случае представляет контраст относительно среднего значения отражений от морской поверхности, как в сторону его увеличения, так и уменьшения. А его величина в

некоторых случаях не превышает значений 0,5...2 дБ. Пассивная помеха на средних дальностях представляет собой результат рассеяния радиосигнала на морских волнах, длина которых удовлетворяет условию резонанса обратного рассеяния радиоволн $\Lambda_0 = \lambda/2 \cos \varphi$. Превышение амплитудных значений выбросов сигналов помех над средним значением отражений от морской поверхности достигает 6...7 дБ. Для навигационных РЛС с $\lambda = 3,2$ см время существования выбросов составляет десятые доли секунды. В этих условиях имеется возможность произвести селекцию полезных сигналов путем правильного выбора времени накопления и адаптивного амплитудного ограничения в пределах периода стационарности. Рассмотрим три случая:

- в идеализированных условиях обнаружение одиночного статического сигнала, имеющего регулярный заранее известный характер;
- обнаружение пачки импульсов в одном обзоре, в пределах периода стационарности;
- обнаружение «мерцающей» пачки импульсов, наиболее отвечающей реальным условиям обнаружения.

Основная часть

1. Обнаружение одиночного статического сигнала. Статистическая теория приема, одной из основных задач которой является нахождение оптимальной процедуры обработки функции вида (1), позволяет также найти более точное выражение для определения величины вероятности правильного обнаружения (D) полезных сигналов адаптируя характеристики приемных устройств и программ обработки под конкретные условия обстановки. Для выяснения физической стороны вопроса и установления количественных зависимостей примем следующую процедуру рассмотрения. Вначале, рас-

смотреть работу неподвижного радиолокатора по неподвижной статической цели.

Затем рассмотрим, какие изменения внесет более реальный случай пачки импульсов при неизменных остальных условиях. Определить влияние флюктуаций пачки импульсов, отраженных от реальной «мерцающей» цели.

$$\text{Введем нормированную дальность } \beta = \frac{R}{R_{\max}},$$

где R_{\max} – дальность действия радиолокатора. Величина β может также рассматриваться как коэффициент, учитывающий уменьшение дальности обнаружения по сравнению с максимальной вследствие вероятностного характера процесса обнаружения. Тогда задача сведется к отысканию зависимости коэффициента β от вероятности правильного обнаружения D .

Известно [2, 3], что в случае одиночного регулярного сигнала с неизвестной фазой функция (1) имеет распределение, подчиняющееся закону Райса:

$$P[f(t)] = h \exp\left(-\frac{h^2 + S^2}{2}\right) I_0(sh). \quad (2)$$

В данном случае вероятность правильного обнаружения можно представить как вероятность превышения функцией (2) некоторого порога C :

$$D = \int_C^\infty h \exp\left(-\frac{h^2 + S^2}{2}\right) I_0(sh) dh. \quad (3)$$

Значение порога C может быть найдено исходя из принятого фиксированного значения вероятности ложной тревоги. Физически C можно понимать как некоторую функцию от устанавливаемого регулировкой приемника уровня амплитудного ограничения.

В случае отсутствия сигнала на основании (2) получаем только для шума

$$p(n) = ne^{-\frac{n^2}{2}}.$$

Следовательно, вероятность ложной тревоги F , понимаемая как вероятность появления шумового выброса, превышающего установленный порог ограничения в условиях отсутствия сигнала, определится как интеграл:

$$F = \int_C^\infty ne^{-\frac{n^2}{2}} = e^{-\frac{C^2}{2}},$$

откуда $C = \sqrt{-2 \ln F} \approx 2,14\sqrt{p}, \quad (4)$

где $p = 1, 2, 3, \dots, 10$ – показатель степени при 10 ($F = 10^{-p}$).

С другой стороны, вероятность ложной тревоги может рассматриваться как отношение среднего

числа ложных обнаружений к общему числу наблюдений, при которых цель отсутствует, и может быть задана как $F = \frac{T\tau}{T_F \Delta t}$, где T – период следования импульсов; τ – длительность импульса; T_F – период ложной тревоги; Δt – длительность строка дальности.

Формула (4) позволяет, исходя из заданного значения F , обычно весьма малого, найти значение нижнего предела для интеграла (3). Такая процедура отвечает однопороговому решению в соответствии с критерием Неймана-Пирсона. Интеграл (3), часто встречающийся в статистической теории обнаружения сигналов, не имеет выражения через конечное число элементарных функций. В данной ситуации удобно воспользоваться асимптотическим представлением интеграла (3), полученным из [4]:

$$D(C, \beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_y^\infty e^{-\frac{h^2}{2}} dh,$$

где $y = C - 0,707 \left(\frac{1}{\beta^2} + \beta^2 \right).$ (5)

С помощью формулы (4) можно в (5) исключить C и вычислить зависимость $D(F, \beta)$. На рис. 1 приведены рассчитанные указанным путем характеристики обнаружения $D(\beta)$ для $F = 10^{-2}$ и $F = 10^{-7}$.

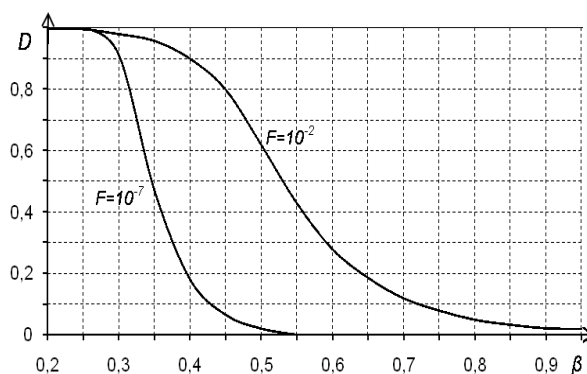


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного обнаружения от нормированной дальности (одиночный статический сигнал)

Зависимости показывают, что по мере увеличения дальности вероятность правильного обнаружения уменьшается, это уменьшение тем более значительно, чем меньше принятый уровень вероятности ложной тревоги.

При некотором фиксированном значении дальности (например, при нормированной дальности $\beta = 0,4$) меньшим значениям вероятности ложной тревоги соответствуют меньшие значения вероятности правильного обнаружения:

при $F = 10^{-2}$ $D = 0,91$; при $F = 10^{-7}$ $D = 0,2$.

Это объясняется тем, что малое значение вероятности ложной тревоги требует применения высокого порога ограничения, что при неизменной интенсивности полезного сигнала, неизбежно ухудшает условия его обнаружения на фоне флюктуационных помех. При вероятности ложной тревоги, зафиксированной на уровне $F = 10^{-7}$, дальность обнаружения, соответствующая нормированной дальности $\beta \geq 0,4$, вообще не может быть реализована.

Так как более жесткие требования к значению вероятности ложной тревоги вызывают снижение дальности, на которой обеспечивается заданная вероятность правильного обнаружения, при оценке допустимого уровня ложных тревог следует ограничиваться минимально необходимым значением, зависящими от используемого радиолокатора и конкретной обстановки.

2. Обнаружение некогерентной пачки, отраженной от статической цели. Рассмотрим показатели обнаружения пачки импульсов, состоящих из L одиночных импульсов. Количество импульсов в пачке зависит от принятой в радиолокаторе частоты посылок, параметров диаграммы направленности антенны и скорости вращения антенны.

При этом на дальностях более 6 км угловыми размерами цели можно пренебречь, рассматривая ее как точечную.

Для упрощения диаграмму направленности рассмотрим как прямоугольник, все импульсы в пачке будут иметь одинаковую амплитуду.

Вероятностные соотношения при обнаружении цели по пачке сигналов будут отличаться от рассмотренных ранее для одиночного сигнала не только за счет эффекта накопления вероятности обнаружения от импульса к импульсу, но также в отличии оптимальной процедуры обработки.

Вероятность ложной тревоги в этом случае определяется как [1]:

$$F = \frac{1}{2^{L-1}(L-1)} \int_0^{\infty} C^{2L-1} e^{-\frac{C^2}{2}} dC, \quad (6)$$

где L – количество импульсов в пачке; C – порог ограничения; m – коэффициент, учитывающий превышение принимаемого сигнала над собственными шумами, необходимый для реализации заданной вероятности обнаружения.

Для вероятности правильного обнаружения получены выражения [3]:

$$D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mu}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} dy,$$

где $\mu = C - \frac{0,707\sqrt{L}}{\beta^2} - \frac{(2L-1)\beta^2}{\sqrt{2L}}$, β – нормированная дальность.

Таким образом, при обнаружении некогерентной пачки сигналов вероятность правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги, кроме других, рассмотренных ранее факторов, зависят также от количества импульсов в пачке. На рис. 2 приведены характеристики обнаружения для некогерентной пачки сигналов, отраженных от статической (не мерцающей) цели.

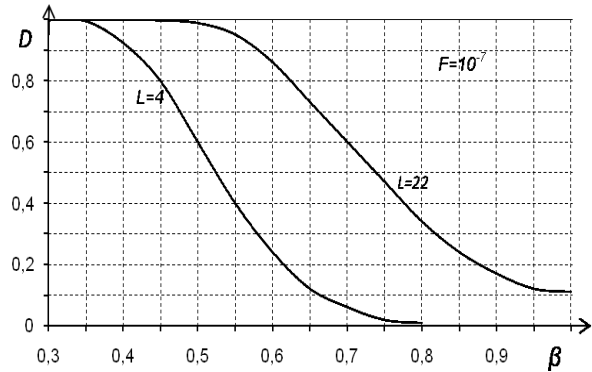


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от нормированной дальности для пачки сигналов, отраженных от статической цели

Характер зависимости принципиально не отличается от такой же зависимости для одиночного сигнала. Обработка большего количества импульсов позволяет реализовать некоторую заданную вероятность правильного обнаружения на большей дальности либо на той же дальности улучшить качество обнаружения и селекции.

3. Обнаружение мерцающей цели. Рассматривая задачу обнаружения пачки сигналов отраженных от реальной цели необходимо учитывать изменение коэффициента корреляции мерцаний во всем диапазоне значений. Однако для разного количества импульсов в пачке определение характеристик обнаружения представляет определенные трудности [3]. В связи с этим в большинстве случаев рассматривают лишь два предельных случая, соответствующих полностью независимым (быстрым) и полностью или жестко коррелированными (медленными) мерцаниями. Такое резкое деление, хотя и не полностью отражает физические процессы, имеющие место в действительности, являются удобной моделью, позволяющей получить количественные соотношения в двух крайних случаях, представляющих непосредственный практический интерес.

Обнаружение быстро мерцающей цели. Согласно [1] выражение для вычисления необходимого значения вероятности ложной тревоги F как для быстрых, так и для медленных мерцаний будет одинаковым. Значение F может быть получено из формулы (6). Выражение для определения вероятности правильного обнаружения D для быстрых мерцаний согласно [1]:

$$F = \frac{1}{2^{L-1}(L-1)} \int_C^{\infty} C^{2L-1} e^{-\frac{C^2}{2}} dC, \sqrt{1+m}$$

где m – коэффициент, учитывающий превышение принимаемого сигнала над собственными шумами, необходимый для реализации заданной вероятности обнаружения.

Зависимость вероятности правильного обнаружения от нормированной дальности при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-7}$ показана на рис. 3.

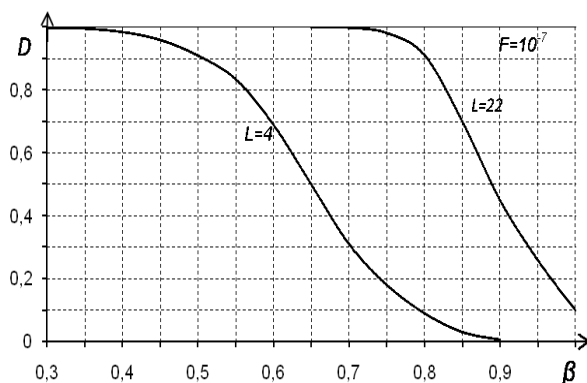


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного обнаружения от нормированной дальности для пачки сигналов (быстрые мерцания)

Обнаружение медленно мерцающей цели. Для полностью коррелированных (медленных) мерцаний в работе [1] приводится выражение связывающее эффективное отношение сигнал/шум для пачки из L импульсов с вероятностью правильного обнаружения мерцающей цели:

$$D = \left(\frac{1-Lm}{Lm} \right)^{L-1} e^{-\frac{C}{1-Lm}},$$

на основании которой получена зависимость $\beta(D)$:

$$\beta = \sqrt{\frac{L}{\frac{C-L+1}{Ln \frac{1}{D}} - 1}}$$

Характеристики обнаружения некогерентной пачки сигналов для медленно мерцающей цели, как видно из рис. 4, имеют более пологий наклон по сравнению с аналогичными кривыми для статической (рис. 2) и быстро мерцающей (рис. 3) цели.

Влияние мерцаний на характеристики обнаружения. Влияние характера мерцаний цели на характеристики обнаружения показаны на рис. 5 – 7.

На рис. 5 представлена зависимость вероятности правильного обнаружения от количества обрабатываемых импульсов для статической цели, случаев быстрых и медленных мерцаний.

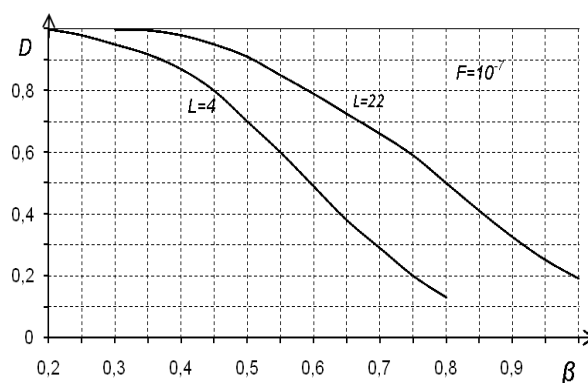


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного обнаружения от нормированной дальности для пачки сигналов (медленные мерцания)

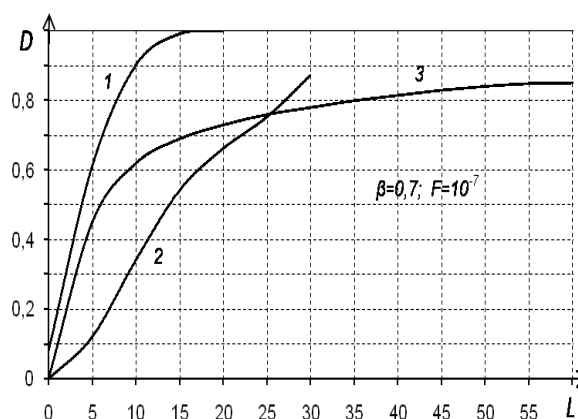


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного обнаружения от количества импульсов в пачке при различном характере мерцания ($F = 10^{-7}; \beta = 0,7$):
1 – статическая цель, 2 – быстрые мерцания, 3 – медленные мерцания

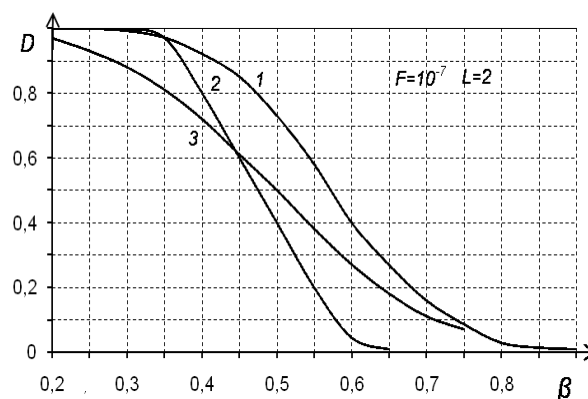


Рис. 6. Влияние характера мерцаний на вероятность правильного обнаружения при малом количестве импульсов в пачке ($F = 10^{-7}; L = 2$):
1 – статическая цель, 2 – быстрые мерцания, 3 – медленные мерцания

При статической цели практически достоверное обнаружение ($D \geq 0,9$) наступает при сравнительно коротких пачках, в то время как в случае мерцающей цели, особенно при медленных мерца-

ниях, для реализации достоверного обнаружения требуется обрабатывать большое количество импульсов в пачке.

Характер мерцаний оказывает воздействие по-разному в зависимости от количества импульсов в пачке. Например, при коротких пачках (рис. 6) в случае слабого сигнала (большое значение β) условия обнаружения быстро мерцающей цели оказываются наиболее тяжелыми. В то время как при более длинных пачках (рис. 7) наиболее тяжелыми являются условия обнаружения медленно мерцающей цели даже при значительно слабых сигналах. Условия обнаружения статической цели в любых случаях наиболее благоприятны.

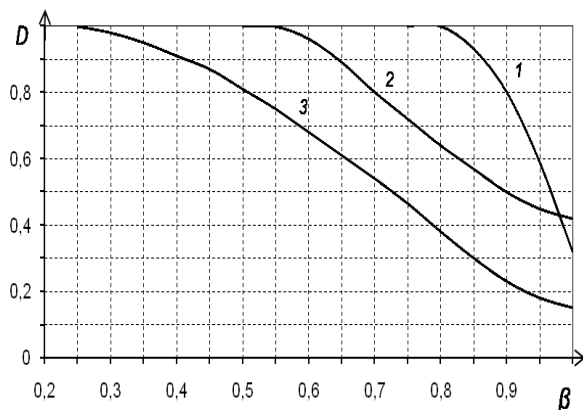


Рис. 7. Влияние характера мерцаний на вероятность правильного обнаружения при большом количестве импульсов в пачке

($F = 10^{-7}$; $L = 30$):

1 – статическая цель, 2 – быстрые мерцания,
3 – медленные мерцания

Выводы

1. Приведен анализ факторов влияющих на обнаружение полезного сигнала в реальных условиях распространения радиоволн в морских условиях.

2. Приведены характеристики обнаружения сигналов в идеализированных условиях по одиночному статическому сигналу, обнаружения пачки импульсов, обнаружение быстро и медленно мерцающей пачки принятых сигналов.

3. Проведен анализ влияния на характеристики обнаружения количества импульсов в пачке и характера мерцаний.

Список литературы

1. Вайнштейн Л.А. Выделение сигналов на фоне случайных помех / Л.А. Вайнштейн, В.Д. Зубаков. – М.: Сов. радио, 1960. – С. 34-42.

2. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике / Б.Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1960. – С. 89-97.

3. Райс Т. Теория флюктуационных шумов / Т. Райс // Вс. сб. «Теория передачи электрических сигналов при наличии помех»; пер. с англ., под ред. Н.А. Железнова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. – С. 145-149.

4. Бунимович В.И. Приближенное выражение вероятности правильного обнаружения при оптимальном приеме сигнала с неизвестной фазой / В.И. Бунимович // Радиотехника и электроника – 1958. – Т. III, № 4. – С. 55-59.

Поступила в редколлегию 17.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ НА ФОНІ ПАСИВНИХ ПЕРЕШКОД У МОРСЬКИХ УМОВАХ

В.О. Миронов

У статті розглядаються фактори впливаючі на характеристики виявлення корисного сигналу. Розглядаються розраховані моделі уявлення радіолокаційних сигналів: у ідеалізованих умовах по окремому сигналу з заранне відомими характеристиками; по пачці відбитих сигналів; по мигтючій пачці у мережах одного огляду. У статті приводяться розраховані залежності імовірності правильного визначення від нормованої дальності для кожного переліченого випадку. Приводиться оцінка впливання розміру пачки прийнятих сигналів на характеристики виявлення.

Ключові слова: корисний сигнал, морська поверхня, пачка відбитих сигналів, характеристики виявлення.

DETERMINATION OF THE FEATURES OF THE FINDING RADAR SIGNAL ON BACKGROUND OF THE PASSIVE HINDRANCES IN SEA CONDITION

V. A. Mironov

In article are considered factors, influencing upon features of the finding the useful signal. It is researched the accounting models of the presentation radar signal in idealized condition on single, with beforehand known feature, signal, on pack reflected signal and on twinkling pack within one review. The accounting dependencies happen to in article to probability of the correct finding from normalized range for each enumerated event. It Is Produced estimation of the influence of the value of the pack taken signal on features of the finding.

Keywords: useful signal, sea surface, pack reflected signal, features of the finding.