

УДК 621.391

DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-81-90

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА НА ПОИСК ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

И. З. Климов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Использование поляризационно-модулированного сигнала предъявляет дополнительные требования к процессу обнаружения такого сигнала, так как при смене поляризации возможно существенное изменение энергетических параметров сигнала при одинаковых угловых положениях диаграммы направленности антенны.

Выполнено исследование зависимостей средней вероятности пропуска сигнала для заданной дальности цели от сочетания различных показателей, определяющих положение поляризационной диаграммы направленности, отношения сигнала к помехе и веса луча. Получен алгоритм анализа последовательности решений по обнаружению поляризационно-модулированного сигнала. Получена зависимость качества обнаружения ПМ-сигнала от шага поиска. Предложен алгоритм распознавания ложных обнаружений. Выполнен анализ вариантов потери луча, несущего ложную информацию. Определено среднее время устойчивого сопровождения луча.

Процесс работы анализируемого алгоритма представлен простой цепью Маркова, модель алгоритма – диаграммой состояний потоков решений и ложных обнаружений, процесс поиска – последовательностью проверок, решения по которым носят статистический характер. Получены зависимости между средним временем поиска луча и отношением полезного сигнала к помехе. Показано, что процесс поиска характеризуется наличием оптимального значения вероятности ложных обнаружений, при котором обеспечивается минимальное среднее значение времени поиска. Полученные результаты позволяют утверждать, что вероятность пропуска определяет основные показатели обнаружения широкополосного поляризационно-модулированного сигнала.

Ключевые слова: поляризация, алгоритм, вероятность, пропуск сигнала, диаграмма, луч.

Введение

Результаты обнаружения сигнала на фоне помех носят статистический характер. Очевидно, что смена поляризации приведет к разделению принятого сигнала на отдельные временные составляющие, синхронные с параметрами поляризационной модуляции. Следовательно, принятый сигнал можно считать дискретным во времени в соответствии с параметрами поляризационной модуляции зондирующего сигнала, т. е. широкополосным сигналом (ШПС) [1]. Чтобы процедура поиска не прекращалась при получении ошибочных решений в области, лежащей за пределами основного пика автокорреляционной функции (АКФ) ШПС, она должна включать механизм выхода из таких положений [2].

Среднее значение вероятности пропуска сигнала является функцией пяти параметров: отношения сигнала к помехе (с/п) h_λ^2 , характеризующего отклик на сигнал луча при нулевом рассогласовании по задержке, отношения с/п на входе приемника q_s^2 , веса луча в многолучевом сигнале μ_λ , заданного уровня вероятности ложных обнаружений F , вероятности правиль-

ного обнаружения D и относительного значения шага поиска γ . При отношениях с/п на входе приемника $q_s^2 \ll 1$ сигналы на выходах согласованных фильтров (СФ), для остаточного рассогласования меньше чем временного дискрета поляризационной модуляции ΔT , характеризуются отношением с/п больше 1. В таких условиях полезный сигнал может обнаруживаться пороговым устройством [3]. Качество принятого решения характеризуется вероятностями двух видов: ошибками ложных обнаружений F и пропусками сигнала $(1 - D)$.

Процесс последовательного поиска поляризационно-модулированного (ПМ) сигнала, осуществляемого пошаговым сдвигом по оси времени демодулирующей последовательности, приводит к формированию потока решений, содержащего правильные и ошибочные решения [4].

Цель исследований состоит в следующем: разработать алгоритм анализа последовательности решений по обнаружению сигнала, обеспечивающий достаточно быстрое распознавание ложных обнаружений. Этот же алгоритм должен обнаруживать потерю выделяемого луча при изменении структуры многолучевости в ка-

нале связи. В качестве такого алгоритма предлагается использовать процедуру, основанную на аннулировании (сбросе) обнаружения, если в последовательности из m проверок все решения об обнаружении оказались ложными [5]. Так как необходимо выполнение условий $F \ll 0,5$, $D \approx 1$, то такой алгоритм будет характеризоваться относительно малым временем пребывания в состоянии ложного обнаружения и достаточно устойчиво сопровождать выделенный луч и, следовательно, цель.

Определение статистических характеристик поляризованно-модулированного сигнала

Если восстановленный сигнал отсутствует, то на выходе согласованных фильтров (СФ) наблюдается нормальный узкополосный процесс, мощность которого в базу B_s раз меньше мощности широкополосного процесса, поступающего на вход приемника. Модуль сигнала ρ на выходе СФ распределен по закону Рэлея:

$$\omega(\rho) = \frac{\rho}{\sigma_y^2} e^{-\frac{\rho^2}{2\sigma_y^2}}, \quad \rho \geq 0. \quad (1)$$

Дисперсия этого процесса

$$\sigma_y^2 = \frac{W_p(1+q_s^2)}{2B_s}, \quad (2)$$

где W_p – мощность аддитивной помехи, поступающей на вход приемника; q_s^2 – отношение с/п, характеризующее обнаруживаемый сигнал до его демодуляции.

Для порога A_0 вероятность ложного обнаружения есть

$$F = \exp\left[-\frac{A_0^2}{2\sigma_y^2}\right]. \quad (3)$$

Следовательно, порог обнаружения, обеспечивающий заданный уровень вероятности ложного обнаружения (3),

$$A_0 = \sqrt{\frac{-W_p(1+q_s^2)\ln(F)}{B_s}}. \quad (4)$$

При мощности W_a аддитивной смеси на входе приемника

$$W_p(1+q_s^2) = W_a. \quad (5)$$

Для поддержания порога, обеспечивающего фиксированный уровень ложных обнаружений в условиях нестационарности сигналов, обра-

зующих входную аддитивную смесь, необходимо поддерживать соотношение между порогом обнаружения и мощностью аддитивной смеси на входе приемника в соответствии с соотношениями (4) и (5) [6].

Если процесс обнаружения выполняется при рассогласовании $\Delta t < \Delta T$, то узкополосный процесс на выходе СФ представляет собой сумму восстановленного сигнала и аддитивной помехи. Мощность восстановленной составляющей информационного сигнала, подлежащего обнаружению,

$$W_{s\lambda} = W_s \mu_\lambda \left(1 - \frac{|\Delta t|}{\Delta T}\right), \quad (6)$$

где W_s – суммарная мощность ШПС на входе приемника; μ_λ – доля мощности луча, соответствующей значению поляризационной модуляции в суммарной мощности ШПС.

Мощность узкополосной помеховой составляющей с учетом неидеальности АКФ ШПС

$$W_{p\lambda} = \frac{W_p [1 + q_s^2 (1 - \mu_\lambda)]}{B_s}. \quad (7)$$

Модуль процесса на выходе СФ в этом случае распределен по обобщенному закону Рэлея – Райса

$$w(\rho_*) = \frac{\rho_*}{\sigma_*^2} e^{-\frac{\rho_*^2 + A_*^2}{2\sigma_*^2}} I_0\left(\frac{A_* \rho_*}{\sigma_*^2}\right), \quad (8)$$

где параметры распределения

$$\begin{cases} \sigma_*^2 = 0,5W_{p\lambda}, \\ A_*^2 = W_{s\lambda}. \end{cases} \quad (9)$$

Вероятность обнаружения сигнала при рассогласовании по задержке $\Delta t < \Delta T$

$$D(\Delta t) = \int_{A_0}^{\infty} w(\rho_*) d\rho_* = 1 - Q\left(h^*; a_0\right), \quad (10)$$

где

$$Q\left(h^*; a_0\right) = \int_0^{a_0} x \cdot \exp\left\{-\frac{x^2 + 2h^2}{2}\right\} I_0\left(\sqrt{2}h^* x\right) dx. \quad (11)$$

Соответственно,

$$a_0 = \sqrt{\frac{-2(1+q_s^2)\ln F}{1+q_s^2(1-\mu_\lambda)}}; \quad (12)$$

$$h^{*2} = h^2 \left(1 - \frac{|\Delta t|}{\Delta T} \right); \quad (13)$$

$$h^2 = \frac{W_s \mu_\lambda}{W_{p\lambda}}. \quad (14)$$

Таким образом, вероятность обнаружения ПМ-сигнала зависит:

- от отношения с/п в луче h^2 ;
- вероятности ложного обнаружения F ;
- отношения с/п на входе приемника q_s^2 ;
- доли луча в суммарном информационном сигнале μ_λ ;
- остаточного рассогласования Δt .

Следует учесть, что на этапе поиска максимума ПМ остаточное рассогласование является случайной величиной, и в процессе последовательных проверок по сдвигам деманипулирующей последовательности полезный сигнал будет восстанавливаться путем выполнения ряда смежных проверок [7]. При шаге поиска по задержке $\lambda \Delta T$ ($\lambda \leq 1$) остаточное рассогласование для сдвигов, на которых в отклике присутствует полезный сигнал, изменяется. Если Δt_m – рассогласование, характеризуемое минимальным значением модуля в последовательности рассогласований, – есть

$$|\Delta t_m| \leq 0,5\gamma\Delta T, \quad (15)$$

то

$$\begin{aligned} \Delta t_i &= \Delta t_m + i\gamma\Delta T; \\ I_2 \geq i \geq -I_1, \quad i - \text{целое}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для заданных границ изменения дискретных значений параметра (16)

$$\begin{cases} \Delta t_m - I_1\gamma\Delta T \geq -\Delta T, \\ \Delta t_m + I_2\gamma\Delta T \leq \Delta T; \end{cases} \quad (17)$$

из системы неравенств (16) имеем

$$\begin{cases} I_1 = \left\{ \left\lfloor \frac{\frac{\Delta t_m}{\Delta T} + 1}{\gamma} \right\rfloor \right\}, \\ I_2 = \left\{ \left\lfloor \frac{-\frac{\Delta t_m}{\Delta T}}{\gamma} \right\rfloor \right\}, \end{cases} \quad (18)$$

где $\{\{\dots\}\}$ – операция выделения целой части числа.

Вероятность обнаружения при минимальном сдвиге Δt_m есть разность

$$D(\Delta t_m) = 1 - \prod_{i=-I_1}^{I_2} Q_i(\Delta t_i), \quad (19)$$

где $Q_i(\Delta t_i)$ – вероятность, соответствующая рассогласованию Δt_i (17).

Среднее значение вероятности обнаружения

$$\bar{D} = \frac{1}{\Delta T\gamma} \int_{-0,5\Delta T\gamma}^{0,5\Delta T\gamma} D(\Delta t_m) d(\Delta t_m), \quad (20)$$

или с учетом (16)–(20)

$$\bar{D} = 1 - \frac{2}{\gamma} \int_0^{0,5\gamma} \left[\prod_{i=-I_1}^{I_2} Q_i \left(\frac{\Delta t_i}{\Delta T} \right) \right] \partial \left(\frac{\Delta t_m}{\Delta T} \right). \quad (21)$$

Так как удовлетворительное качество процесса обнаружения ПМ-сигнала характеризуется $\bar{D} \approx 1$, то при анализе следует использовать сравнение значений $(1 - \bar{D})$, которые представляют вероятность пропуска сигнала.

Определение вероятности пропуска поляризационно-модулированного сигнала

Среднее значение вероятности пропуска сигнала является функцией пяти параметров: отношения с/п h_λ^2 , характеризующего отклик на сигнал луча при нулевом рассогласовании по задержке; отношения с/п на входе приемника q_s^2 ; веса луча в многолучевом ПМ-сигнале μ_λ ; заданного уровня вероятности ложных обнаружений F и относительного значения шага поиска γ .

С целью исследования влияния значений указанных параметров на процесс обнаружения ПМ-сигнала получены зависимости средней вероятности пропуска от отношения с/п в идеальном отклике для дискретного ряда значений остальных параметров процедуры обнаружения (рис. 1, 2).

Таким образом, за счет уменьшения шага поиска можно существенно повысить качество обнаружения ПМ-сигнала. Однако снижение шага поиска ведет к росту времени поиска.

На рис. 1 приведены зависимости отношения вероятности пропуска сигнала к ее среднему значению от относительного значения остаточного рассогласования, определяемого по отношению к шагу поиска.

Зависимости, представленные на рис. 1, характеризуют пропуск сигнала по интервалу возможных значений остаточных рассогласова-

ний по задержке, обусловленных дискретным характером поисковой процедуры. Реальное обнаружение сигнала выполняется при наличии случайного рассогласования, модуль которого равномерно распределен от нуля до половины шага поиска. При этом распределение рассогласования симметрично, и его среднее значение равно нулю. Так как вероятность пропуска зависит от рассогласования, то реальное значение этой вероятности будет отличаться от ее среднего значения.

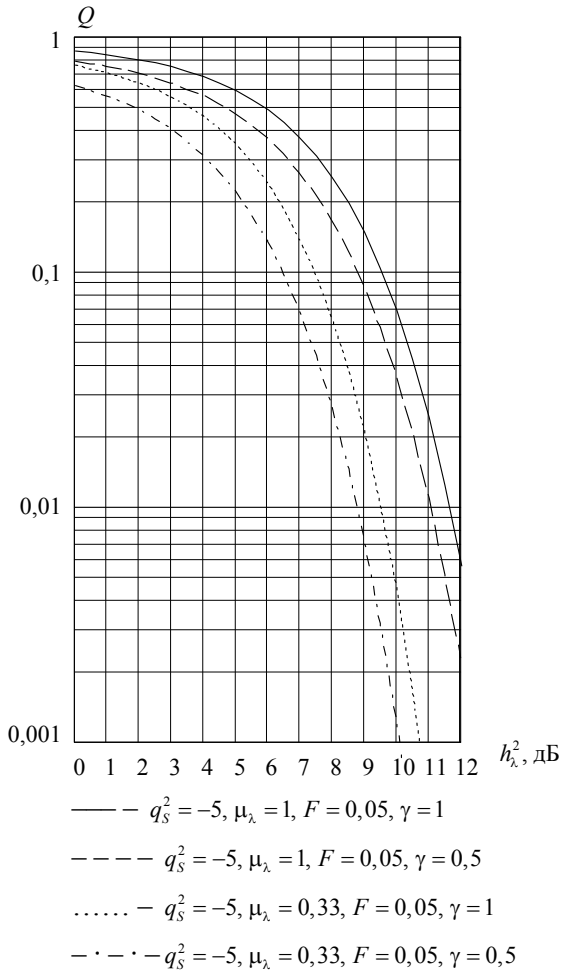


Рис. 1. Средняя вероятность пропуска сигнала при $q_s^2 = -5$ дБ, $F = 0,05$

Fig. 1. Average probability of pass signal at $q_s^2 = -5$ dB, $F = 0,05$

Так как пропуски сигнала также приводят к увеличению времени поиска, то снижение вероятности пропуска за счет уменьшения шага поиска будет ограничено некоторым пределом, ниже которого уменьшение шага будет нецелесообразным. Для определения этого предела необходимо исследовать статистические характеристики процесса поиска.

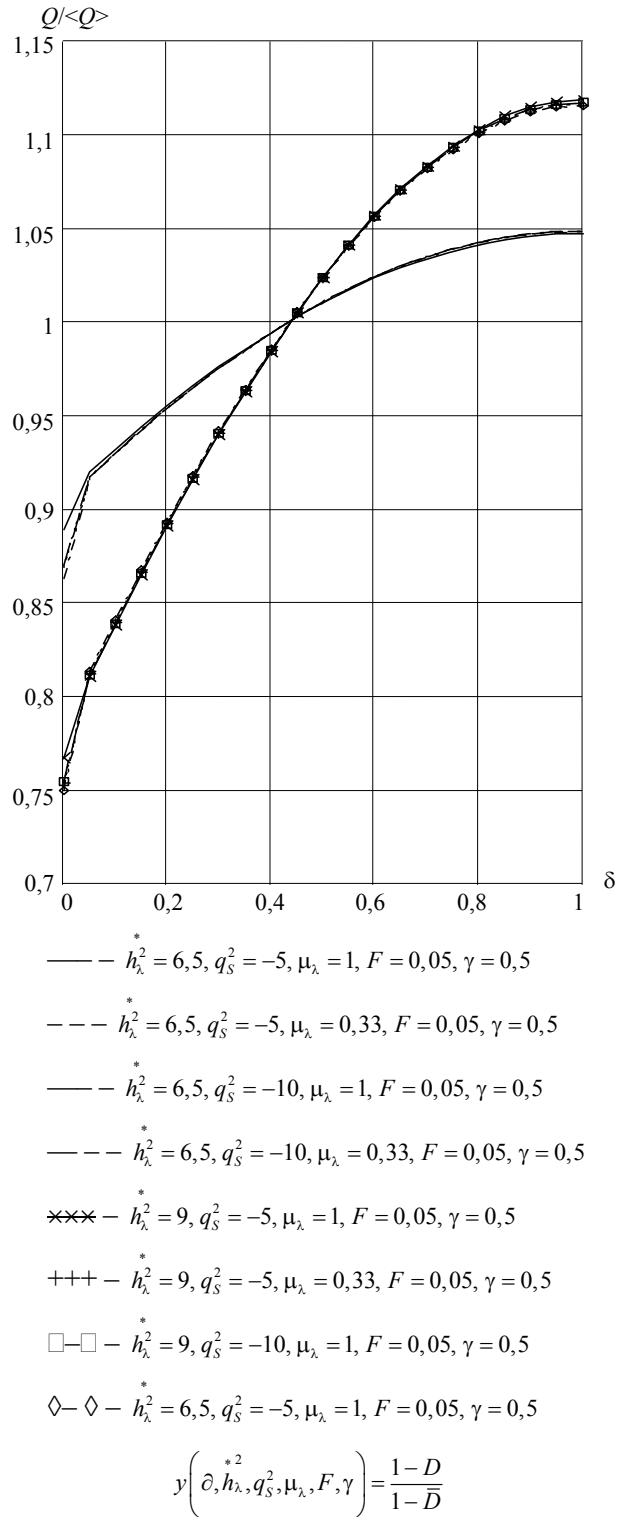


Рис. 2. Отношение вероятности пропуска сигнала к ее среднему значению при $\gamma = 0,5$, $F = 0,05$. Зависимости вероятности пропуска от рассогласования получены для двух уровней среднего значения этой вероятности: 0,1 и 0,01

Fig. 2. The ratio of the probability of passing the signal to its mean value at $\gamma = 0,5$, $F = 0,05$. The dependence of the probability of passage on the mismatch is obtained for two levels of the average value of this probability: 0.1 and 0.01

$$y\left(\delta, h_\lambda^2, q_s^2, \mu_\lambda, F, \gamma\right) = \frac{1-D}{1-\bar{D}}$$

Определение времени поиска поляризационно-модулированного сигнала

Процесс последовательного поиска ПМ-сигнала, осуществляемого пошаговым сдвигом по оси времени демодулирующей последовательности, приводит к формированию потока решений, содержащего правильные и ошибочные решения. Чтобы ложные обнаружения не привели к продолжительной работе луча диаграммы направленности РЛС в режиме слежения за аддитивной помехой, необходимо иметь алгоритм анализа последовательности решений по обнаружению сигнала, обеспечивающий достаточно быстрое распознавание ложных обнаружений. Этот же алгоритм должен обнаруживать потерю выделяемого луча при изменении структуры многолучевости в отраженном сигнале. В качестве такого алгоритма предлагается использовать процедуру, основанную на аннулировании (сбросе) обнаружения, если в последовательности из m проверок все решения об обнаружении оказались ложными. Так как необходимо выполнение условий $F \ll 0,5$, $D \approx 1$, то такой алгоритм будет характеризоваться относительно малым временем пребывания в состоянии ложного обнаружения и достаточно устойчиво сопровождать выделенный луч и, следовательно, цель [8].

Основной характеристикой алгоритма определения ложных обнаружений является соотношение среднего времени сопровождения ложного и правильного обнаружения. Тогда функции такого алгоритма представляет простая цепь Маркова, диаграмма состояний которой показана на рис. 3 при работе на потоках ложных обнаружений $p = F$ и правильного обнаружения сигнала $q = D$.

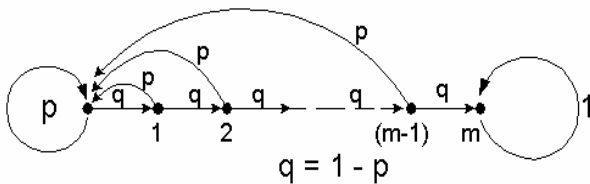


Рис. 3. Диаграмма состояний алгоритма определения (сброса) ложных обнаружений

Fig. 3. Diagram of states of the algorithm for defining (resetting) false detections

Так как сопровождение сигнала выполняется, в основном, в условиях поддержания синхронизма, то величина рассогласования будет относительно не большая и вероятность обнаруже-

ния соответствует выполнению условия $\Delta t_m \approx 0$. Среднему нормированному времени попадания из состояния k в поглощающее состояние m соответствует разностное уравнение

$$T_k = qT_{k+1} + pT_0 + 1 \quad (22)$$

с граничными условиями

$$T_m = 0; T_0 = qT_1 + pT_0 + 1. \quad (23)$$

Отсюда

$$T_0 = \frac{1 - q^m}{pq^m}. \quad (24)$$

На рис. 4 представлены зависимости времени T_0 от вероятностей F , $(1 - D)$ и параметра алгоритма сброса m . Анализ зависимостей показывает, что при $F \leq 10^{-2}$ нахождение в состоянии ложного обнаружения продолжается на протяжении числа проверок, сопоставимого со значением m .

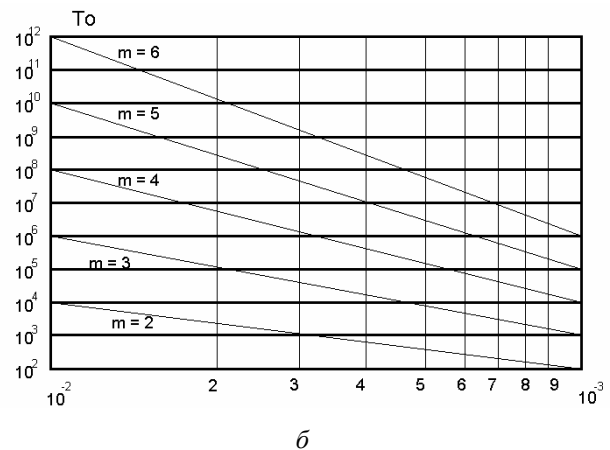
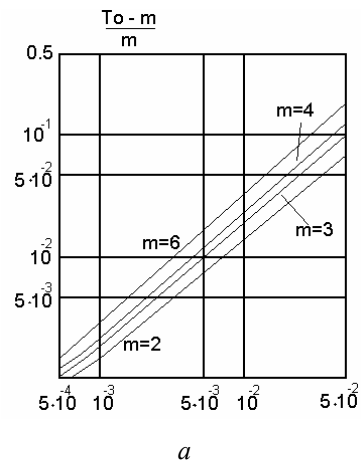


Рис. 4. Зависимости времени T_0 от вероятностей F , $(1 - D)$ и параметра алгоритма сброса m

Fig. 4. Time dependence T_0 on probabilities F , $(1 - D)$ and parameter of the reset algorithm m

Чтобы обнаруженная цель удерживалась достаточно долго, необходимо при $m=6$ иметь $D > 0,9$ (T_0 соответствует среднему числу посылок, в течение которых луч удерживается).

Полученное условие позволяет определить минимум отношения с/п в луче, при котором цель будет надежно выделяться с учетом влияния процесса устранения начальной неопределенности на прием луча и при отсутствии дополнительных мер по обеспечению синхронизации ШПС. Результаты выполненных расчетов показывают, что одна цель удовлетворительно обнаруживается и удерживается при относительном шаге поиска 1, две цели – при отношении с/п в отклике не менее 9 дБ. При относительном значении шага поиска 0,5 значение необходимых отношений с/п понизятся до 7,5 и 6,5 дБ соответственно. Для получения высокого качества обнаружения и удержания луча необходимо к указанным уровням прибавить 1,5 дБ. Процесс поиска представляет собой последовательность проверок, решения по которым носят статистический характер. Ложные обнаружения приводят к кратковременному переходу на выделение цели, пока алгоритм сброса не приведет к принятию решения о потере луча и переходе к дальнейшему поиску [9]. Таким образом, ложные обнаружения приводят к затягиванию процедуры поиска. Ошибки обнаружения сигнала на интервалах наличия цели, приводят к тому, что процедура поиска требует выполнения дополнительного цикла. Время устранения начальной неопределенности (поиска луча) является случайной величиной, определяемой суммой

$$T_p = \sum_{v=0}^* \sum_{i=1}^{n_v} T_{\phi i}^{(v)} + \sum_{v=0}^* N_v. \quad (25)$$

Здесь v – число пропусков сигнала, предшествующих первому обнаружению; v – номер цикла поиска; n_v – число ложных обнаружений в v -м цикле поиска; $T_{\phi i}^{(v)}$ – время принятия решения по i -й ошибке в v -м цикле поиска; N_v – число шагов поиска, выполняемое в v -м цикле.

Время поиска является дискретной случайной величиной, для которой могут быть определены характеристики ее распределения. Число шагов поиска в цикле принимает два значения:

$$N_v = \begin{cases} N_0 & v = 0, \\ N_m & v \neq 0, \end{cases} \quad (26)$$

где N_0 – величина интервала начальной неопределенности по задержке, выраженная в числе шагов поиска; N_m – максимальное число шагов поиска.

Значения $v, n_v, T_{\phi i}$ и N_0 являются случайными взаимно независимыми величинами. Время, затрачиваемое на определение ошибочного обнаружения, не зависит от номера цикла. Отсюда среднее значение времени определения ошибочного обнаружения также не зависит от номера цикла:

$$m_1 \{T_{\phi i}^{(v)}\} = \bar{T}_{\phi}. \quad (27)$$

Тогда условное значение среднего времени поиска определяется суммой

$$m_1 \{T_p / v, n_v, N_0\} = \bar{T}_{\phi} \sum_{v=1}^* n_v + v N_m + N_0. \quad (28)$$

В свою очередь, среднее число ложных обнаружений в цикле

$$\bar{n}_v = \begin{cases} N_0 F, & v = 0, \\ N_m F, & v \neq 0, \end{cases} \quad (29)$$

где F – вероятность ложной тревоги.

Число шагов, характеризующее начальный цикл поиска, N_0 равномерно распределено в интервале $0 \dots N_m$. Поэтому его среднее значение

$$\bar{N}_0 = \frac{N_m}{2}. \quad (30)$$

Так как пропуски сигнала также имеют биномиальное распределение, то значение вероятности получения v пропусков цели подряд есть

$$P(v) = \bar{D}(1 - \bar{D})^v. \quad (31)$$

Следовательно, среднее значение числа пропусков сигнала

$$\bar{v} = \sum_{v=1}^* v \bar{D}(1 - \bar{D})^v = \frac{1 - \bar{D}}{\bar{D}}. \quad (32)$$

Безусловное среднее время поиска ПМ-сигнала

$$\bar{T}_p = \bar{T}_{\phi} \left(\bar{n}_0 + \bar{n}_{v \neq 0} \bar{v} \right) + \bar{v} N_m + \bar{N}_0. \quad (32)$$

После подстановки величин (25), (26) и (28) в (30) получаем среднее время поиска отраженного сигнала:

$$\bar{T}_p = N_m \left(\frac{1 - \bar{D}}{\bar{D}} + \frac{1}{2} \right) (1 + F \bar{T}_\phi), \quad (33)$$

где \bar{T}_ϕ – среднее время определения ложного обнаружения (11) при $p = F$. Отсюда максимальное число шагов поиска N_m определяется базой ПМ-сигнала B_s , шагом поиска γ и числом параллельно выполняемых проверок n_p^* по обнаружению сигнала есть

$$N_m = \frac{B_s}{\gamma n_p^*}. \quad (34)$$

На рис. 5 показаны зависимости относительного значения среднего времени поиска от вероятности ложных обнаружений для ряда значений параметров ПМ-сигнала и процедуры обнаружения. Отсюда следует, что процесс поиска характеризуется наличием оптимального значения вероятности ложных обнаружений, при котором обеспечивается минимальное среднее значение времени поиска [10]. Значение вероятности ложных обнаружений зависит от параметров сигнала и процедуры поиска. Это объясняется тем, что причиной затягивания процесса поиска во времени являются два вида связанных между собой ошибок процедуры порогового обнаружения сигнала:

– ошибки ложного обнаружения увеличивают время поиска на интервал, необходимый для определения ошибочного обнаружения;

– пропуски сигнала приводят к тому, что процедура поиска реализует дополнительный цикл поиска, выполняемый при максимальном рассогласовании по задержке.

Так как уменьшение вероятности ложных обнаружений ведет к росту вероятности пропуска сигнала, то при малых уровнях ложных обнаружений имеет место большая вероятность дополнительных циклов поиска, для которых характерна большая продолжительность. В этом случае затраты времени на определение ложных обнаружений незначительны, и данный вид ошибок не влияет на время поиска. При значительных уровнях вероятности ложных обнаружений увеличиваются затраты времени на определение ложных обнаружений. Так как при этом уменьшается вероятность пропуска сигнала, то, соответственно, уменьшается вероятность дополнительных циклов поиска. При оптимальном

значении вероятности ложных обнаружений имеет место сочетание ошибок порогового обнаружения, при котором их суммарный вклад в величину времени поиска минимален. Зависимость среднего времени поиска от вероятности ложных обнаружений в точке оптимума возрастает с уменьшением отношения с/п, характеризующим согласованный отклик, и увеличением шага поиска.

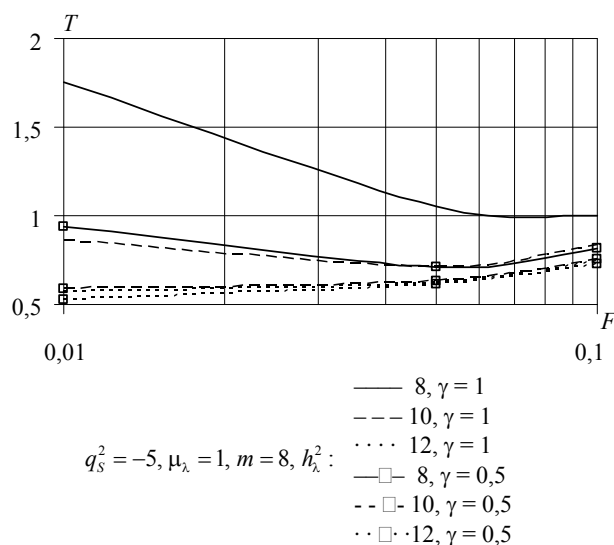


Рис. 5. Относительное среднее время поиска ПМ-сигнала при $q_s^2 = -5$, $\mu_\lambda = 1$

Fig. 5. The relative mean time of the search for the PM signal at $q_s^2 = -5$, $\mu_\lambda = 1$

Положение точки минимума на оси F также зависит от этих параметров. При уменьшении шага поиска и увеличении отношения с/п оптимальное значение вероятности ложных обнаружений смещается в сторону уменьшения. Так как при увеличении отношения с/п среднее время поиска быстро уменьшается, то оптимизировать процедуру поиска следует для нижних значений рабочего диапазона отношений с/п.

Обсуждение результатов и выводы

Выполненный анализ позволил определить зависимость относительного изменения вероятности пропуска сигнала от отношения с/п на входе приемника и веса луча. Диапазон изменений вероятности пропуска сигнала в окрестности ее среднего значения определяется шагом поиска, уровнем ложных обнаружений и заданным средним значением вероятности пропуска. Большие отклонения от среднего значения имеют место в сторону уменьшения вероятности от ее среднего значения и соответствуют положительному влиянию на исход процедуры обнаружения.

Отклонения в сторону увеличения вероятности пропуска сигнала на уровне среднего значения 0,1 не превышают 37 %, а на уровне 0,01 – 67 %. Использование относительного шага поиска равного 0,5 приводит к снижению верхнего уровня увеличения вероятности пропуска до 10 % при средней вероятности 0,1 и до 18 % при средней вероятности 0,01.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что среднее значение вероятности пропуска является общей характеристикой при принятии решений по обнаружению ШПСМ-сигнала [11].

Уровень значений относительного времени поиска 0,5 соответствует безошибочному поиску при равномерном распределении начального рассогласования в интервале длительности кодовой посылки. Поэтому влияние ошибок порогового обнаружения следует оценивать отклонением времени поиска от этого уровня. Можно в первом приближении предположить, что флуктуации этой составляющей будут соответствовать ее среднему значению. Тогда из полученных зависимостей следует, что уменьшение шага поиска в два раза хотя и дает уменьшение относительного значения времени поиска, эквивалентное значению, получаемому при увеличении отношения с/п на 2 дБ, но с учетом двукратного увеличения параметра (2), не приводит к существенному улучшению средних характеристик процедуры обнаружения.

Для снижения уровня отношений с/п, при котором обеспечиваются требуемые значения среднего времени (абсолютного значения) поиска необходимо увеличивать базу сигнала или уменьшать шаг поиска, обеспечивая при этом требуемое значение параметра (2) за счет соответствующего увеличения числа параллельных проверок n_p^* .

Анализ результатов процедуры устранения начальной неопределенности по задержке в целом позволяет утверждать, что исход данной процедуры имеет статистический характер, и сложно провести четкую границу между обнаруживаемыми и необнаруживаемыми сигналами.

Из анализа зависимостей среднего времени поиска следует, что сигналы с уровнями отношения с/п в согласованном по задержке отклике выше 10 дБ будут обнаруживаться сравнительно быстро. Характеристики пропуска сигнала при пороговом обнаружении, представленные на рис. 2, показывают, что сигналы такого уровня будут достаточно надежно удерживаться. Тем более что из зависимостей на рис. 2 следует

возможность увеличения параметра сброса m до 8, результатом чего будет увеличение среднего времени удержания луча минимум на 2 порядка.

Для сигналов с откликом в интервале от 8 до 10 дБ процесс поиска в среднем будет более продолжительным с возможностью существенных затягиваний его во времени. Удержание таких сигналов также ухудшится. Однако при многолучевом сигнале, когда доля выделяемого луча существенно меньше 1, характеристики обнаружения могут считаться удовлетворительными. При этом пороговое обнаружение должно выполняться с вероятностью 0,05. Сигналы с уровнем отклика менее 8 дБ будут выделяться неустойчиво; они будут обнаруживаться с существенными затратами времени, но система не сможет их надежно удержать из-за срабатывания алгоритма сброса. Поэтому такие сигналы будут демодулироваться частично. Так как при высоких значениях отношения с/п в отклике зависимость среднего времени обнаружения от вероятности ложных обнаружений выражена относительно слабо, то следует выбирать эту вероятность исходя из требований к данному параметру для интервала удовлетворительных характеристик обнаружения, то есть необходимо устанавливать порог, обеспечивающий $F = 0,05$.

Наиболее сильное влияние на пропуски оказывает отношение с/п, характеризующее отклик при нулевом рассогласовании по задержке. Величина отношения с/п на входе приемника и вес луча в суммарном сигнале относительно слабо влияют на величину вероятности пропуска ПМ-сигнала. Снижение значений этих показателей при фиксированном уровне отношения с/п в отклике приводит к уменьшению среднего значения вероятности пропуска. Так, уменьшение отношения с/п на входе с -5 до -10 дБ смещает кривые вероятности пропуска на 0,7 дБ при относительном шаге поиска $\gamma = 1$; те же 0,8-0,9 дБ достигаются при вдвое меньшем шаге поиска. Влияние отношения с/п на входе приемника на вероятность обнаружения практически не зависит от задаваемого уровня вероятности ложных обнаружений. Изменение веса луча значительно проявляется при больших значениях отношений с/п на входе. Уменьшение веса луча с 1 до 1/3 при $q_s^2 = -5$ дБ смещает кривую вероятности на 0,7 дБ для относительного значения шага поиска равного 1 и на 0,8-0,9 дБ для значения шага 0,5.

Относительное значение шага поиска оказывает существенное влияние на качество обна-

ружения сигнала. Его уменьшение с 1 до 0,5 снижает требуемое при заданном уровне вероятности пропуска отношение с/п в согласованном (по задержке) отклике при $F = 0,05$ на 2 дБ для $q_s^2 = -5$ дБ и на 2,3 дБ для $q_s^2 = -10$ дБ. В свою очередь, при $F = 0,01$ уменьшение требуемого отношения в отклике практически не зависит от отношения с/п на входе и составляет 1,8 дБ.

Библиографические ссылки

1. Старых А. А., Жилинская Г. Р. Варианты функциональных схем радиолокационных станций с управляемой поляризацией // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 186. С. 145–148.
2. Лукьянов С. П. Эффективность поляризационных радиолокаторов в задаче обнаружения стабильных целей на фоне пассивных помех // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 11. С. 1.
3. Sturm C., Sit Y.L., Braun M. and Zwick T. Spectrally Interleaved Multi-Carrier Signals for Radar Network Applications and MIMORadar. *Sonar & Navigation Journal*, 2012, pp. 88-97.
4. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью : монография / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. И. Лимарев, Н. П. Мухин, Г. С. Нахмансон. М. : Радио и связь, 2003. 347 с.
5. Nuss B., Sit Y.L. and Zwick T. A Novel Technique for Interference Mitigation in OFDM Radar using Compressed Sensing. MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), 2017 IEEE, Nagoya, 2017, pp. 1-4.
6. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. М. : Сов. радио, 1966. 440 с.
7. Sit Y.L., Nuss B., Basak S., Orzol M., Wiesbeck W. and Zwick T. Real-Time 2D+velocity Localization Measurement of a Simultaneous-Transmit OFDM MIMO Radar using Software Defined Radios. *European Radar Conference (EuRAD)*. London, 2016.
8. Справочник по радиолокации. В 2 кн. / под ред. И. Мерилла, М. Скольника ; пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук, проф. В. С. Вербы. М. : Техносфера, 2014. 680 с.
9. Климов И. З. Принципы построения эффективной системы передачи информации в декаметровом диапазоне радиоволн : монография. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. 264 с.
10. Климов И. З. Оптимальное правило приема ШПС с DPSK-модуляцией в условиях неравномерного спектра аддитивной помехи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 1. С. 84–86.
11. Климов И. З. Сравнительная оценка методов реализации широкополосной системы связи в декамет-

ровом диапазоне радиоволн // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 3. С. 118–124.

References

1. Starykh A.A., Zhilinskaya G.R. [Variants of functional schemes of radar-controlled stations with controlled polarization]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2012, no. 186, pp. 145-148 (in Russ.).
2. Luk'yanov S.P. [Efficiency of polarization radars in the task of detecting stable targets against passive interference]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2000, no. 1, p. 1 (in Russ.).
3. Sturm C., Sit Y.L., Braun M. and Zwick T. Spectrally Interleaved Multi-Carrier Signals for Radar Network Applications and MIMORadar. *Sonar & Navigation Journal*, 2012, pp. 88-97.
4. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.I., Mukhin N.P., Nakhmanson G.S. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiei nesushchei psevdosluchainoi posledovatel'nost'yu* [Interference immunity of radio communication systems with expanding the spectrum of signals by modulation of a carrier pseudo-random sequence]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2003, 347 p. (in Russ.).
5. Nuss B., Sit Y.L. and Zwick T. A Novel Technique for Interference Mitigation in OFDM Radar using Compressed Sensing. MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), 2017 IEEE, Nagoya, 2017, pp. 1-4.
6. Kanareikin D.B., Pavlov N.F., Potekhin V.A. *Pol'yarizatsiya radiolokatsionnykh signalov* [Polarization of Radar Signals]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966, 440 p. (in Russ.).
7. Sit Y.L., Nuss B., Basak S., Orzol M., Wiesbeck W. and Zwick T. Real-Time 2D+velocity Localization Measurement of a Simultaneous-Transmit OFDM MIMO Radar using Software Defined Radios. *European Radar Conference (EuRAD)*. London, 2016.
8. Merrill I., Skolnik M. (eds.). *Spravochnik po radiolokatsii* [Reference book on radar]. Moscow, Technosphere Publ., 2014, 680 p. (in Russ.).
9. Klimov I.Z. *Printsipy postroeniya effektivnoi sistemy peredachi informatsii v dekametrovom diapazone radiovoln* [Principles of building an effective system of information transmission in the decameter range of radio waves]. Izhevsk, IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova Publ., 2017. 264 p. (in Russ.).
10. Klimov I.Z. [The optimal rule for receiving SPS with DPSK-modulation under conditions of non-uniform spectrum of additive interference]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 84-86 (in Russ.).
11. Klimov I.Z. [Comparative assessment of methods for implementing a broadband communication system in the decameter range of radio waves]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 118-124 (in Russ.).

Investigation of the Influence of the Radar Channel on the Search of Polarization-Modulated Signal

I.Z. Klimov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The use of a polarization-modulated signal imposes additional requirements to the process of detecting such a signal, since a change in polarization can significantly change the energy parameters of the signal at the same angular positions of the antenna pattern. Research of dependency of the average probability of missing the signal for the given range of the target from the combination of different indicators define the state of polarization of the radiation pattern, the relationship of signal to interference and the weight of the beam. An algorithm for analyzing the sequence of solutions for detecting a polarization-modulated signal is obtained. The dependence of the quality of detection of the PM signal from the step of the search is obtained. The algorithm of recognition of false detections is offered. The analysis of variants of loss of the beam carrying false information is carried out. The average time of continuous tracking of the beam is determined. The process of the analyzed algorithm is represented by a simple Markov chain. The algorithm model is represented by a diagram of the states of decision flows and false detections. The search process is represented by a sequence of checks, the decisions on which are statistical in nature. The dependences between the average search time of the beam and the ratio of the useful signal to the noise are obtained. It is shown that the search process is characterized by the presence of the optimal value of the probability of false detections, which provides the minimum average value of the search time. The results suggest that the probability of skipping determines the main indicators of detection of broadband polarization modulated signal.

Keywords: polarization, algorithm, probability, signal skipping, diagram, beam.

Получено 14.03.2019

Образец цитирования

Климов И. З. Исследование влияния радиолокационного канала на поиск поляризованно-модулированного сигнала // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 81–90. DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-81-90.

For Citation

Klimov I.Z. [Investigation of the influence of the radar channel on the search of polarization-modulated signal]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 81-90 (in Russ). DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-81-90.