

Модель некогерентного распознавания двоичных сигналов в условиях мешающих отражений и флуктуационных помех

А. Ф. Евстафиев, Ф. А. Евстафиев, email: evfeal@mail.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

***Аннотация.** Получены выражения для расчета вероятностных характеристик некогерентного распознавания двоичных сигналов при наличии мешающих отражений и флуктуационных помех. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с известными в одинаковых условиях помеховой обстановки.*

***Ключевые слова:** двоичные сигналы, мешающие отражения, некогерентное распознавание, вероятность ошибки.*

Введение

Актуальность проблемы распознавания информационных сигналов в радиотехнических системах различного функционального назначения обусловлена наличием в радиоканалах мешающих радиосигналов, порожденных отражениями радиоволн от посторонних объектов, границ раздела сред и от тропосферных неоднородностей на пути их распространения. При взаимодействии перекрытых во времени информационных и мешающих радиосигналов возникают интерференционные замирания результирующего сигнала, существенно снижающие помехоустойчивость принимаемой информации [1].

Для борьбы с замираниями сигналов используются методы временного или (и) частотного разнесения элементов информационного сигнала, а так же применение широкополосных шумоподобных сигналов (ШПС) с последующей их оптимальной обработкой [2]. Основным недостатком этих методов является увеличение частотно-временного ресурса радиоканала, что не всегда возможно.

Целью данной работы является разработка способа и соответствующей модели некогерентного распознавания двоичных сигналов в условиях мешающих отражений и флуктуационных помех без привлечения дополнительных энергетических и частотно-временных ресурсов радиоканала.

1. Структурная схема алгоритма распознавания

Структурная схема алгоритма некогерентного распознавания двоичных сигналов в условиях мешающих отражений и флуктуационных помех при пороговом принятии решения представлена на рис. 1.

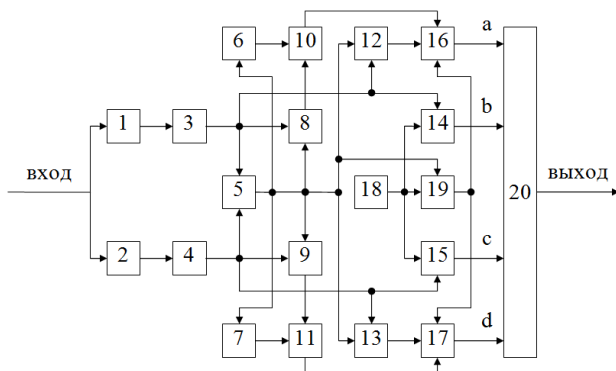


Рис. 1. Структурная схема алгоритма некогерентного распознавания двоичных сигналов в условиях мешающих отражений при пороговом принятии решения

На схеме 1, 2 – фильтры, согласованные с распознаваемыми сигналами; 3, 4 – линейные детекторы огибающих радиосигналов; 5 – устройство оценки моментов времени опорных отсчетов $\tau_{01,2}$; 6, 7 – вычислители коэффициентов корреляции $r_1(\tau_{01})$ и $r_2(\tau_{02})$ флуктуационных помех на выходах согласованных фильтров в моменты опорных отсчетов; 8, 9 – измерители сигнально-помеховых реализаций $e_1(\tau_{01})$ и $e_2(\tau_{02})$ на выходах фильтров; 10, 11 – вычислители пороговых уровней $\Pi_1(\tau_{01})$ и $\Pi_2(\tau_{02})$; 12, 13, 19 – управляемые элементы задержки на время $\tau_{01,2}$; 14, 15 – постоянные пороговые устройства; 16, 17 – управляемые пороговые устройства; 18 – генератор тактовых импульсов; 20 – решающее устройство.

Таким образом, схема распознавания содержит два симметричных канала обработки сигналов, каждый из которых имеет по два выхода (a, b) и (c, d), которые объединены в общем решающем устройстве. Выходы b и c являются основными, которые реализованы по известной схеме порогового обнаружения сигналов, а выходы a и d являются дополнительными и реализованы схемами обнаружения с применением

управляемых пороговых устройств с использованием дополнительной информации о сигнально-помеховых реализациях, полученных в опорных отсчетах. В результате объединяющее решающее устройство имеет четыре входа, по комбинации наличия и отсутствия сигналов на которых формируется итоговое решение о наличии в канале связи соответствующего сигнала.

2. Математическая модель некогерентного распознавания

Во многих случаях начальная фаза информационного сигнала, как и мешающего, является случайной величиной равномерно распределенной в интервале $[-\pi, \pi]$. В этом случае необходимо использовать некогерентное распознавание, при котором все операции обработки сигнально-помеховых реализаций осуществляются с их огибающими. Рассмотрим эффективность модели некогерентного распознавания двоичных сигналов при наличии мешающих отражений и флуктуационных помех с использованием двухканальной обработки каждого информационного сигнала.

Пусть распознаваемые выходные радиосигналы первого и второго согласованных фильтров имеют вид

$$e_{1,2}(t) = E_{1,2}(t) \cos(\omega_{01,2}t - \varphi_{1,2}), \quad 0 \leq t \leq T_{1,2}, \quad (1)$$

где $E_{1,2}(t)$, $\omega_{01,2}$, $\varphi_{1,2}$, $T_{1,2}$ — соответственно, огибающие радиосигналов, их несущие частоты, случайные начальные фазы и длительности, которые принимаются одинаковыми.

Поскольку каналы распознавания идентичны, то будем рассматривать прохождение только одного, например, первого сигнала, а во втором канале в это время будет присутствовать только помеха.

При этом мешающий радиосигнал на выходе первого согласованного фильтра будет определяться выражением:

$$V_1(t) = V_1[t - T(1 - \chi_1)] \cos(\omega_{01}t - \varphi_1 - \psi_1 - \varphi_{01}), \quad (2) \\ T(1 - \chi_1) \leq t \leq T(2 - \chi_1),$$

где $V_1(t)$ — огибающая мешающего радиосигнала; $\chi_1 = 1 - t_{01}/T$ — относительное перекрытие информационного и мешающего сигналов с постоянной составляющей времени перекрытия t_{01} ; $\varphi_{01} = \omega_{01}t_{01}$ — постоянная начальная фаза; $\psi_1 = \omega_{01}(\pm \Delta t_1)$ — случайная фаза за счет случайной составляющей времени перекрытия Δt_1 .

Результирующие амплитуды (огибающие) сигналов в информационном и опорном отсчетах с учетом (1) и (2) будут, соответственно, равны:

$$E_{1p}(0, \chi_1, \psi_1) = \{E_1^2(0) + V_1^2[-T(1 - \chi_1)] + 2E_1(0)V_1[-T(1 - \chi_1)] \cos(\psi_1 - \varphi_{01})\}^{1/2}, \quad (3)$$

$$E_{2p}(\tau_{01}, \psi_1) = E_1(\tau_{01})\{2[1 + \cos(\psi_1 - \varphi_{01})]\}^{1/2}, \quad (4)$$

где опорный отсчет τ_{01} определяется моментом времени пересечения огибающих информационного и мешающего радиосигналов.

Для получения вероятностных характеристик обнаружения сигнала по основному и дополнительному каналам обработки необходимо оперировать плотностью вероятности огибающей по информационному отсчету и двумерной плотностью вероятности огибающих между информационным и опорным отсчетами при наличии и отсутствии информационного сигнала.

При этом, опуская промежуточные преобразования, можно показать, что вероятность правильного обнаружения сигнала в первом (основном) канале обработки, выраженная через вероятность ложной тревоги P_{1F} при известной мощности флуктуационной помехи P_n на выходе согласованного фильтра, будет равна

$$P_{1Д}(\psi_1) = Q\left(\frac{E_{1p}(0, \chi_1, \psi_1)}{\sqrt{P_n}}, \sqrt{-2 \ln P_{1F}}\right), \quad (5)$$

где $Q(x, y)$ – табулированная функция Маркума.

Вероятность правильного обнаружения этого же сигнала, выраженная через вероятность ложной тревоги P_{2F} во втором (дополнительном) канале обработки будет равна

$$P_{2Д}(\psi_1) = Q\left(\frac{E_{1p}(0, \chi_1, \psi_1) - r_{01} E_{2p}(\tau_{01}, \psi_1)}{\sqrt{P_n(1 - r_{01}^2)}}, \sqrt{-2 \ln P_{2F}}\right), \quad (6)$$

где r_{01} – значение коэффициента корреляции помехи на выходе согласованного фильтра через интервал времени τ_{01} .

Ошибка при распознавании сигналов будет в том случае, если при передаче сигнала $e_1(t)$ регистрируется сигнал $e_2(t)$ и наоборот. При этом предполагается равенство априорных вероятностей передачи информационных символов.

Обозначим через $P_{1Д}, \dots, P_{4Д}; P_{1F}, \dots, P_{4F}$ – частные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги по выходам (а), (б), (с), (д)

и предположим, что $\tau_{01} = \tau_{02} = \tau_0$ и $r_1(\tau_{01}) = r_2(\tau_{02}) = r(\tau_0)$. При этом вероятности правильного обнаружения сигнала по основным и дополнительным каналам обработки будут, соответственно, равны $P_{1Д} = P_{3Д}$; $P_{2Д} = P_{4Д}$. Обеспечим также равенство частных вероятностей ложной тревоги в каналах обработки: $P_{1F} = \dots = P_{4F} = P_F$.

Поскольку решающее устройство имеет четыре входа то, следовательно, возможны четыре исхода, при которых возникают ошибки при распознавании сигналов.

Первый исход: на входе (а) сигнал присутствует, а на входе (б) отсутствует. При этом ошибка возникает, когда на входе (с) сигнал присутствует, а на входе (д) отсутствует. Такая неопределенность принимается за ошибку и решающее устройство с равной вероятностью регистрирует либо сигнал $e_1(t)$, либо $e_2(t)$. Явная ошибка имеет место при одновременном наличии сигналов на входах (с) и (д). Наличие сигнала на входе (д) при его отсутствии на входе (с) не будет являться ошибкой, так как приоритет отдается наличию сигнала в основном канале. В результате частная вероятность ошибки будет равна

$$P_{01} = 0,5P_{1Д}(1 - P_{2Д})(P_F + P_F^2). \quad (7)$$

Второй исход: на входе (а) сигнал отсутствует, а на входе (б) присутствует. При этом ошибка будет в том случае, если на входе (с) сигнал присутствует, а на входе (д) отсутствует (приоритетная ситуация), либо на входе (с) сигнал отсутствует, а на входе (д) присутствует (неопределенность), либо сигнал присутствует одновременно на входах (с) и (д). В этом случае частная вероятность ошибки будет равна

$$P_{02} = 0,5P_{2Д}(1 - P_{1Д})(3P_F - P_F^2). \quad (8)$$

Третий исход: на входах (а) и (б) сигналы отсутствуют. При этом ошибка будет в том случае, если на входах (с) и (д) сигналы также отсутствуют (неопределенность), либо на входе (с) сигнал присутствует, а на входе (д) отсутствует, либо на входе (с) сигнал отсутствует, а на входе (д) присутствует, либо сигналы одновременно присутствуют на входах (с) и (д). В этом случае частная вероятность ошибки будет равна

$$P_{03} = (1 - P_{1Д})(1 - P_{2Д})(0,5 + P_F - 0,5P_F^2). \quad (9)$$

Четвертый исход: на входах (а) и (б) сигналы присутствуют. В этом исходе ошибка в виде неопределенности будет в единственном случае,

одновременного присутствия сигналов на входах (с) и (d), вероятность которой будет равна

$$P_{04} = 0,5 P_{1д} P_{2д} 0,5 P_F^2. \quad (10)$$

Результирующая вероятность ошибки в приеме сигнала $e_1(t)$ будет равна сумме частных вероятностей ошибок по всем исходам и зависеть от случайной фазы ψ_1 :

$$P_0(\psi_1) = \sum_{i=1}^4 P_{0i}(\psi_1). \quad (11)$$

Путем осреднения выражения (11) по всем возможным изменениям фазы ψ_1 , получим среднюю вероятность ошибки при некогерентном распознавании двоичных сигналов:

$$\overline{P_0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_0(\psi_1) d\psi_1. \quad (12)$$

3. Результаты исследования

Для гауссовской формы информационного и мешающего радиосигналов с относительным временным перекрытием $\chi_1 = 0,7$ по выражению (12) рассчитаны характеристики зависимости средней вероятности ошибки некогерентного распознавания двоичных сигналов от исходного отношения сигнал-помеха по мощности h^2 , которые представлены на рис. 2

Характеристика 1 на данном рисунке соответствует случаю оптимального на фоне флуктуационной помехи некогерентного распознавания двоичных ортогональных сигналов, но при наличии мешающих отражений, при котором средняя вероятность ошибки распознавания определяется выражением:

$$\overline{P_0} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp \left[- \frac{E_{1p}^2(0, \chi_1, \psi_1)}{2P_n} \right] d\psi_1. \quad (13)$$

Характеристика 2 отображает потенциально-возможный случай, при котором отсутствуют мешающие отражения, а распознавание сигналов осуществляется только на фоне флуктуационной помехи [3]. Характеристика 3 соответствует разработанной модели некогерентного распознавания двоичных сигналов с вероятностью ложной тревоги в каждом частном решении $P_F = 10^{-3}$.

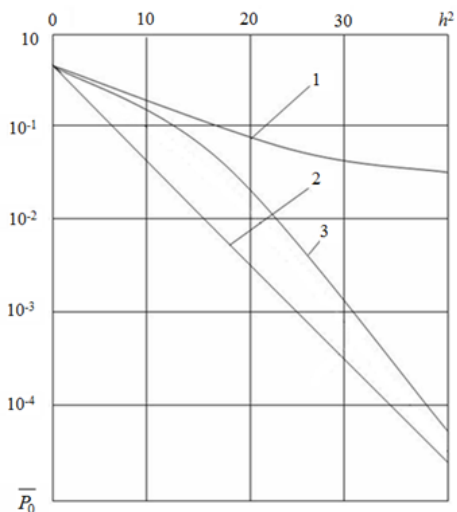


Рис. 2. Зависимость средней вероятности ошибки некогерентного распознавания двоичных сигналов от отношения сигнал-помеха

Анализ результатов, представленных на данном рисунке, свидетельствует, что применение классической модели некогерентного распознавания сигналов в условиях мешающих отражений и флуктуационных помех (характеристика 1) приводит к значительному снижению помехоустойчивости по сравнению со случаем отсутствия мешающих отражений (характеристика 2).

Использование разработанной модели распознавания сигналов (характеристика 3) существенно нейтрализует мешающие отражения. Так, например, при $h^2 = 30$ выигрыш по вероятности ошибки разработанной модели по сравнению с классической моделью распознавания (характеристика 1) составляет 30 раз и незначительно уступает потенциально-возможному значению при отсутствии мешающих отражений (характеристика 2), что свидетельствует о высокой эффективности разработанного способа распознавания сигналов.

Заключение

Разработана математическая модель и соответствующий алгоритм некогерентного распознавания двоичных сигналов в условиях мешающих отражений и флуктуационных помех с получением

аналитических выражений для расчета соответствующих характеристик помехоустойчивости, не требующих увеличения энергетических и частотно-временных ресурсов канала связи. Полученные результаты могут быть использованы как при модернизации существующих, так и при разработке перспективных систем передачи и приема информации, функционирующих в условиях сложной помеховой и электромагнитной обстановки.

Список литературы

1. Способ распознавания импульсных радиосигналов в условиях мешающих радиоимпульсов на фоне белого шума [текст]: пат. 2479921 Российская Федерация: МПК Н04В 1/10/Евстафиев А.Ф., Михайлов В.В., Евстафиев Ф.А.; заявитель и патентообладатель Воронеж: военный авиационный инженерный университет. – № 2011121181/07; заявл. 25.05.11; опубл. 20.04.13, Бюл. № 11. – 3 с.
2. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений / Л.М. Финк. – М.: Сов. радио, 1970. – 726 с.
3. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 324 с.