

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64098 от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» (141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)

Издается с сентября 2014 г.

Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:

2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге «Почта России» ПП997

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Багдасарян А.А.
Харитонов А.А.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Артюшенко В.М.

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ПАКЕТА ОШИБОК В УЗКОПОЛОСНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ.....3

Воловач В.И., Артюшенко В.М., Строганова С.М.

ОЦЕНКА ЗАЩИТНОГО РАССТОЯНИЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВ МАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ ОТ ПОМЕХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....10

Самаров Е.К.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОШИБОК СВЯЗИ НА КАЧЕСТВО ПОТОКОВОГО ВИДЕО В СЕТЯХ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА.....26

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Меньшикова Л.В., Яковлев Д.А., Найденова Д.М.

ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ WEB-САЙТОВ.....38

Стреналюк Ю.В., Леандров И.Н.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ, ПОВЫШЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ ПРИНЦИПОВ И КОМПОНЕНТОВ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ СЕТИ (ЧАСТЬ 3).....60

Строганова С.М., Теодорович Н.Н., Шумилин М.П.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА БЕСПРОВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА МАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ.....67

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аббасова Т.С.

ИНТЕРАКТИВНЫЙ МОБИЛЬНЫЙ ПОМОЩНИК ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКИПАЖА.....84

Антипова Т.Н., Тихонов В.А.

ПРИМЕНЕНИЕ РОБАСТНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ.....92

УДК 621.391

Оценка влияния помех радиоэлектронных устройств на беспроводные устройства малого радиуса действия

С.М. Строганова, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,
Н.Н. Теодорович, доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,
М.П. Шумилин, студент направления 09.04.03 «Прикладная информатика» (магистр),
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В работе приводятся оценка влияния шумовых помех разного типа (гауссовский шум, гармонический сигнал и комбинированная помеха) на беспроводные устройства малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и двойной частотной модуляцией и частотной модуляцией; зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал-шум и отношения сигнал-помеха.

Беспроводные устройства малого радиуса действия, отношение сигнал-шум, отношение сигнал-помеха, плотность вероятности, вероятность ошибки.

Evaluation of the influence of interference from radio electronic devices on short-range wireless devices

S.M. Stroganova, senior teacher of information technology and management systems department,
N.N. Teodorovich, assistant professor of information technology and management systems department,
M.P. Shumulín, student of the direction 09.04.03 «Applied Informatics» (master), State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The article presents an assessment of the impact of noise interference of various types (Gaussian noise, harmonic signal and combined interference) on short-range wireless devices with pseudo-random tuning of the operating frequency and double frequency modulation and frequency modulation; dependence of the error probability on the signal-to-noise ratio and the signal-to-noise ratio.

Short-range wireless devices, signal-to-noise ratio, signal-to-noise ratio, probability density, error probability.

Шумовые помехи на устройствах малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и двойной частотной модуляцией

Рассмотрим шумовые помехи, которые представляют собой белый шум, распределенный по нормальному закону. В системе беспроводных устройств малого радиуса действия (УМРД) реализованы методы псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) и двойной частотной манипуляции (МЧ). В работе [3] приводится оценка для величины средней вероятности ошибки, рассчитанной на один информационный канал (ИК), когда шумовые помехи от РЭУ приходится на интервал перескока частот в беспроводных устройствах малого радиуса действия:

$$P_B = K_{\text{пер}} P_{B1} [E_c (G_{\text{ш}} + G_{\text{п}})] + (1 - K_{\text{пер}}) P_{B0} [E_c / G_{\text{ш}}] \quad (1)$$

где: P_B – это усредненное значение вероятности ошибки, рассчитанной на объем информации, равный одному биту, в случае воздействия помех на УМРД; P_{B0} – это усредненное значение вероятности ошибки, рассчитанной на объем информации, равный одному биту, в случае нет воздействия помех на УМРД; $K_{\text{пер}}$ – коэффициент, лежащий в диапазоне от нуля до единицы, характеризующий величину частоты перекрытия помехи.

Пусть $K_{\text{пер}}=1$. Тогда выражение (1) запишем в виде:

$$P_B = P_{B1} [E_c (G_{\text{ш}} + G_{\text{п}})]$$

Среднюю вероятность ошибки на основной информационный канал можно, рассчитать по следующей формуле (предполагаем, что помеха представляет собой белый шум):

$$P_{B,\text{осн}} = (2 + \beta)^{-1} \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\} \quad (2)$$

Среднюю вероятность ошибки на дополнительный информационный канал можно, рассчитать по следующей формуле (предполагаем, что помеха представляет собой белый шум):

$$P_{B,\text{доп}} = [(1 + \beta)/(2 + \beta)] \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\} \quad (3)$$

Суммарная средняя вероятность ошибки на основной информационный канал и на дополнительный информационный канал определяется следующим выражением:

$$P_{B,\text{осн+доп}} = 0,5 \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\}$$

Из формул (2) и (3) определим усредненную вероятность, которая приходится на прием информации в 1 бит:

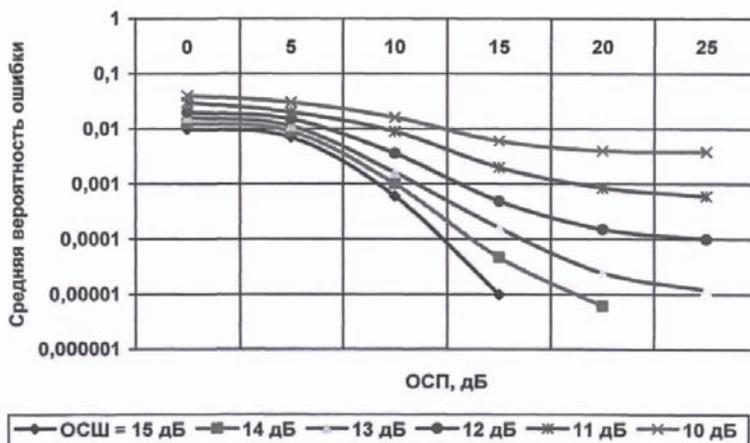
$$P_B = 0,5(P_{B,\text{осн}} + P_{B,\text{доп}}) = 0,5 \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\}.$$

Обозначим отношения сигнал – шум и сигнал – помеха как:

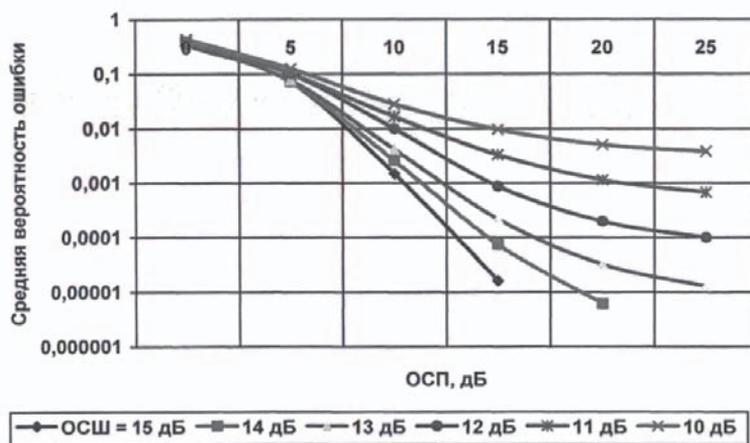
$$\rho_{\text{ш}} = E_c / G_{\text{ш}} \quad \text{и} \quad \rho_{\text{п}} = E_c / G_{\text{п}} \quad \text{Тогда (1) можно переписать в виде:}$$

$$P_B = 0,5 \exp\{-[2\rho_{\text{ш}}^{-1} + \rho_{\text{п}}^{-1}]^{-1}\} \quad (4)$$

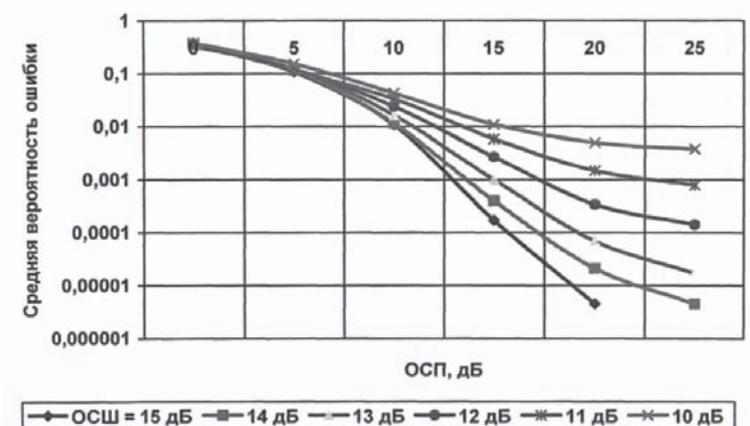
Зависимости средней вероятности ошибки показаны от ОСП для разных отношений сигнал/шум показаны на рисунке 1. Шумовая помеха воздействует на основной, дополнительный и оба канала одновременно, соответственно. Из рисунка видно, что оба показателя (отношение сигнал-шум и отношение сигнал-помеха) будут оказывать влияние на величину средней вероятности ошибки. С увеличением отношения сигнал-шум, величина отношения сигнал-помеха оказывает меньшее влияние на значение средней вероятности.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Зависимость СВО от ОСП для различных типах воздействия:
а) – на основной канал; б) – на дополнительный канал; в) – на основной и дополни-
тельный каналы

Также из графиков видно, на дополнительном канале отрицательное воздействие помех сказывается сильнее. Так как максимум средней вероятности стремится к $\frac{1}{2}$, то можно заключить, что наиболее помехозащищенными оказываются устройства, для которых постоянно меняется разность частот между каналами. На рисунке 2 изображена модель приемника УМРД с двойной частотной манипуляцией [2]. В соответствии с рисунком 43 изображены основные компоненты такой системы: ГПСК – генератор последовательности псевдослучайных чисел; ДО – демодулятор огибающей исходного сигнала; РУ – решающее устройство; СЧ – синтезатор частот; ПФ – фильтр, пропускающий в определенной полосе частот.

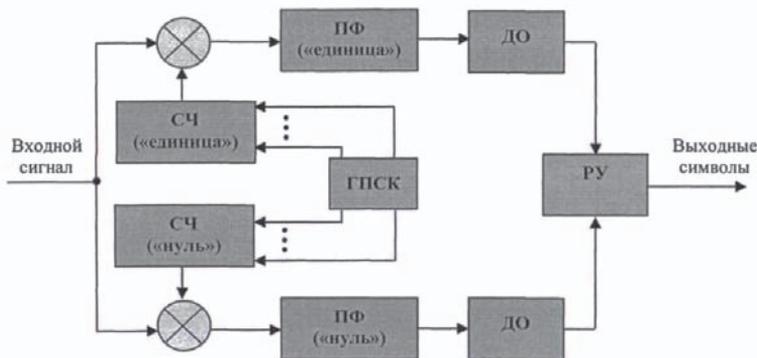


Рисунок 2 – Схема приемника УМРД с двойной ЧМ

Максимум средней вероятности ошибки $\rightarrow \frac{1}{2}$ при отношении СП $\rightarrow 0$ по формуле (4) для случая, когда воздействие помехи оказывается на основной и дополнительный каналы приемника.

Решая $\frac{dP_B}{dP_n} = 0$ в (4), можно для случая, когда помеха оказывает воздействие на основной канал, найти оценку максимума средней вероятности:

$$P_{B, \text{max.осн}} \approx \begin{cases} \rho_{\text{ш}}^{-1} E^{-1}, & P_n = P_c - 2\sigma_{\text{ш}}^2 > 0; \\ 0,5 \exp\{-0,5\rho_{\text{ш}}\}, & P_n = P_c - 2\sigma_{\text{ш}}^2 \leq 0; \end{cases}$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2$ – мощность собственных шумов приемника.

Таким образом, нельзя пренебрегать шумовыми помехами от приемника, если даже устройство по мощности значительно меньше, чем устройство, создающее помеху.

Шумовые помехи на устройствах малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и М-ичной частотной модуляцией

На рисунке 3 приводится схема передачи сигнала на устройства малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и М-ичной частотной модуляцией со схемой выбора максимума частоты (СВМ) и широкополосным фильтром (ШПФ).

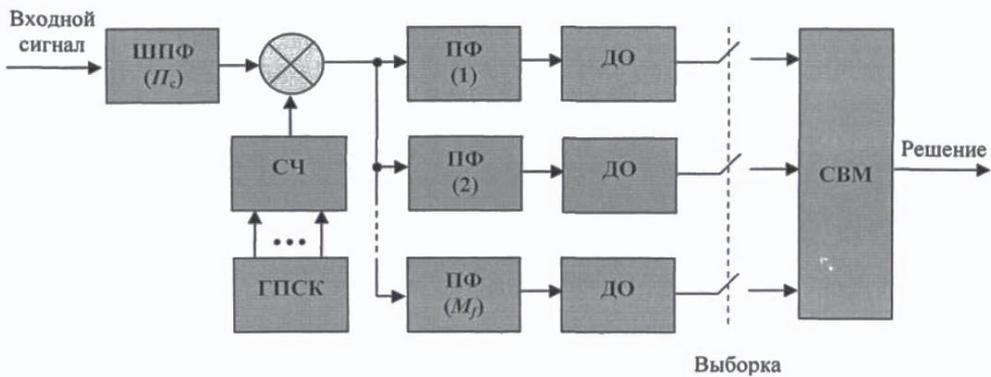


Рисунок 3 – Устройство малого радиуса действия с М-ичной частотной модуляцией

Согласно работе [30] для случая, когда используется М-ичная ЧМ можно определить среднюю вероятность ошибки приема сигнала, приходящего на 1 бит информации по следующей формуле:

$$P_B = M[2(M - 1)]^{-1}(1 - P_K)$$

Здесь P_K представляет собой вероятность напряжения превышения выходного напряжения (М-1) каналов детектора над напряжением на выходе канала; М – весь алфавитный набор сигнала.

Вероятность напряжения находится по формуле:

$$P_B = M[2(M - 1)]^{-1}(1 - P_K)$$

Функция плотности вероятности согласно работе [2]:

$$f_c(z_c) = \frac{z_c}{\sigma_n^2 + \sigma_m^2} \exp \left[-\frac{z_c^2 + P_c}{2(\sigma_n^2 + \sigma_m^2)} \right] I_0 \left(\frac{\sqrt{P_c}}{\sigma_n^2 + \sigma_m^2} z_c \right)$$

Функция плотности вероятности для случая, когда присутствуют только собственные шумы определяется формулой:

$$f_0(z_n) = \left[\frac{z_n}{\sigma_m^2} \right] \exp \left\{ -\frac{z_n}{2\sigma_m^2} \right\}$$

Для определения вероятности ошибки, которая приходится на объем информации величиной в 1 бит, в случае шумового воздействия на устройства малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и М-ичной частотной модуляцией:

$$P_{\text{Б,осн}} = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \binom{M-1}{m} \frac{1}{1 + \frac{m}{m+1} \beta} \exp \left\{ -k \rho_n^{-1} + \frac{m+1}{m} \rho_n^{-1} \right\}^{-1} \quad (5)$$

где:

$$M = 2^k, k = 1, 2, 3, \dots, k = \log_2 M; m \in [1, M]; \beta = \rho_{\text{ш}} / \rho_{\text{п}}$$

На рисунке 4 показана зависимость этой величины от ОСШ для разных значений ОСШ и разных М.

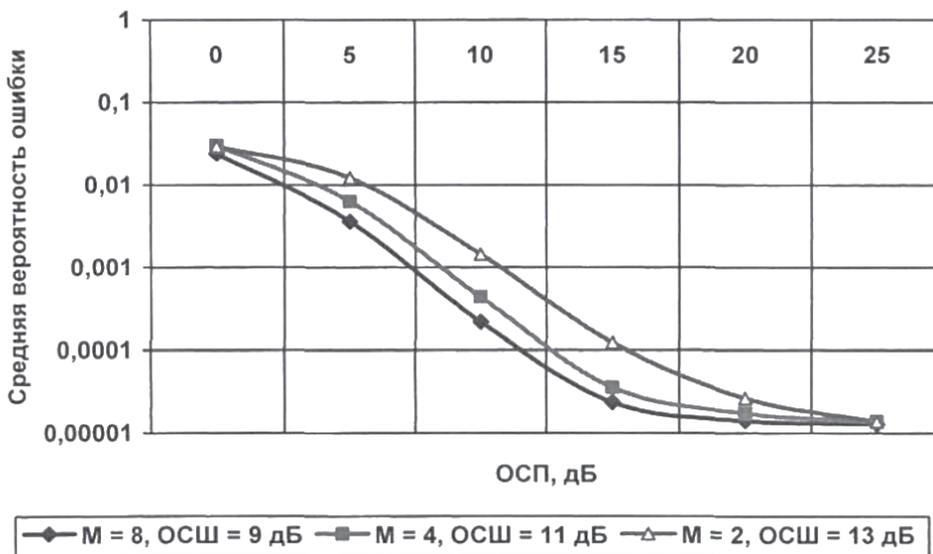


Рисунок 4 – Зависимость СВО от ОСП

Как видно, вероятность ошибки $\rightarrow 10^{-5}$ когда растет ОСШ.

Таким образом, при наличии шумовой помехи максимум средней вероятности ошибки можно определить, решив уравнение $\frac{dP_{Б.осн}}{d\rho_{п}} = 0$ применительно к (5):

$$\rho_{п} = (m/(m + 1)\rho_{ш}) / \left[\frac{m}{m+1\rho_{ш}k} - 1 \right] \quad (6)$$

Поскольку $m/(m + 1)\rho_{ш}k \gg 1$, то в первом приближении, считаем, что соотношение (5) примет вид $\rho_{п} \approx k^{-1}$, а подставив в (6), получим:

$$P_{Б.тахосн} = \frac{M}{2^{(M-1)}} \sum_{m=1}^{M-1} (-1)^{m+1} \binom{M-1}{m} \frac{e^{-1}}{mk\rho_{ш}}$$

На рисунке 5 показаны зависимости $P_{Б.тахосн}$ от ОСШ для разных M и ОСШ. Видно, что при наибольшем значении отношения сигнал/шум для приемника УМРД достигается наименьшее влияние шумового сигнала УМРД с ППРЧ и M -ичной ЧМ. Также помехоустойчивость возрастает при увеличении размера алфавита сигнала M .

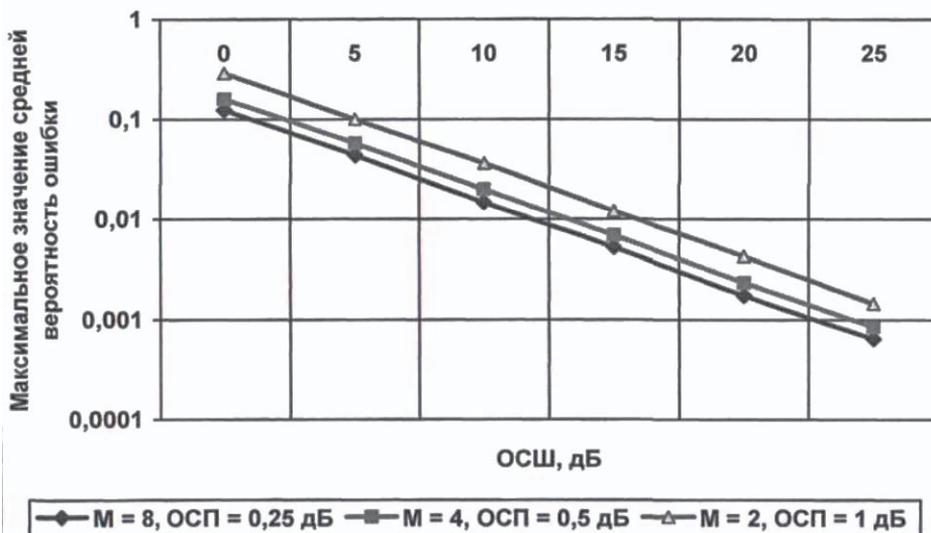


Рисунок 5 – Зависимость максимального значения средней вероятности от отношения сигнал – шум

Сравнивая последние два выражения, можно заключить, что более помехоустойчивым является УМРД с ППРЧ и M -ичной ЧМ. Если M возрастет до 4, то воздействие шумовых помех станет меньше на 2дБ. Рост до 8 приводит к уменьшению на 3 дБ.

Шумовые гармонические помехи на устройствах малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и двойной частотной модуляцией

Рассмотрим шумовые сигналы, имеющие равномерное распределение по фазе, частота сигнала совпадает с частотой помех.

Вероятность ошибки, когда $K_{пер} = 1$, согласно работе [2], можно рассчитать из следующего выражения:

$$P_{Б.осн} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{-0,5\rho_{ш}(1 + \rho_c^{-1} + 2\sqrt{\rho_c^{-1}} \cos \theta)\} d\theta \quad (7)$$

где θ – разность фаз помеха-сигнал, $\theta \in [-\pi; \pi]$.

Взяв среднее интегральное представление по фазе функции Бесселя нулевого порядка первого рода к формуле (7), получим:

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[x \cos(u + v)] du \quad (8)$$

$$P_{Б.осн} = \frac{1}{2} \exp\{-0,5\rho_{ш}(1 + \rho_c^{-1})\} I_0(\rho_{ш}\sqrt{\rho_c^{-1}})$$

На рисунке 6 представлена кривая изменения средней вероятности от отношения СП для величины отношения сигнал/шум равной 13дБ. Видно, что с ростом отношения СП средняя вероятность ошибки падает.

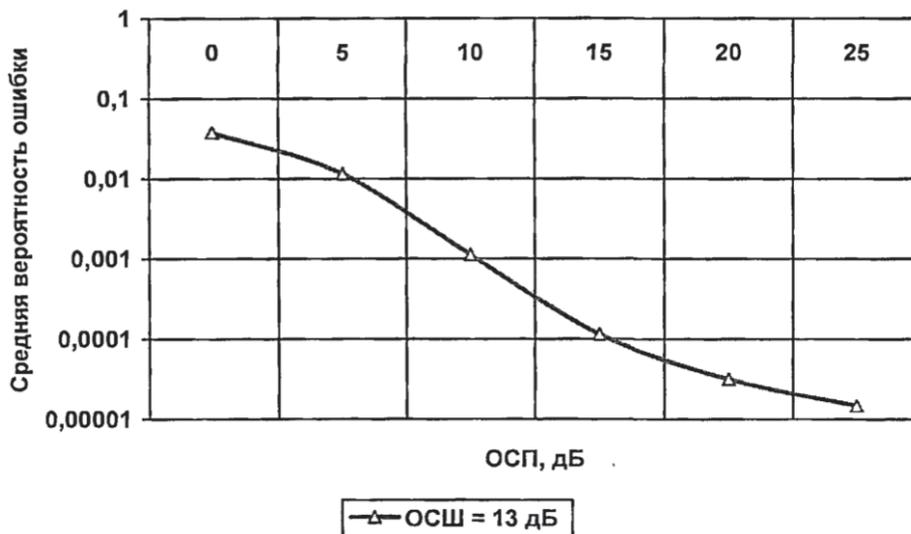


Рисунок 6 – Зависимость СВО от ОСП

Воспользовавшись асимптотикой Бесселя:

$$I_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} \exp(x), \quad x \gg 1 \quad (9)$$

запишем формулу (8) в виде:

$$P_{Б.осн} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ш}^2}{2\pi\sqrt{P_c P_{ш}}} \right)^{0,5} \exp \left[-\frac{(P_c^{0,5} - P_{ш}^{0,5})^2}{2\sigma_{ш}^2} \right], \quad (P_c P_{ш})^{0,5} \geq \sigma_{ш}^2 \quad (10)$$

Решая уравнение $\frac{dP_{Б.осн}}{dP_{ш}} = 0$, к (8), получим, что в случае, когда $P_{ш} = P_c$ т.е. когда помеха воздействует на основной канал, мощность шумовой помехи эквивалентна мощности полезного сигнала, и максимум вероятности можно определить по формуле:

$$P_{Б.тахосн} \approx 0,5(1/2\pi\rho_{ш})^{0,5}, \quad P_{ш} \approx P_c \gg \sigma_{ш}^2$$

В случае воздействия на дополнительный канал, мощность помехи может быть определена, согласно данным работы [9], как:

$$P_{Б.доп} = Q[(\rho_{ш}/\rho_{п})^{0,5}, (\rho_{ш})^{0,5}] - 0,5 \exp[-0,5\rho_{ш}(1 + \rho_{п}^{-1})] I_0[\rho_{ш}(\rho_{п}^{-1})^{0,5}]$$

На рисунке 7 представлены зависимости средней вероятности от ОСП, для разных ОСШ. Видно, что при воздействии на дополнительный канал, если ОСП < 15 дБ, помеха сильнее оказывает влияние на значение средней вероятности по сравнению с воздействием на основной канал. Максимум средней вероятности $\rightarrow 1$, при $\rho_{п} \rightarrow 0$.

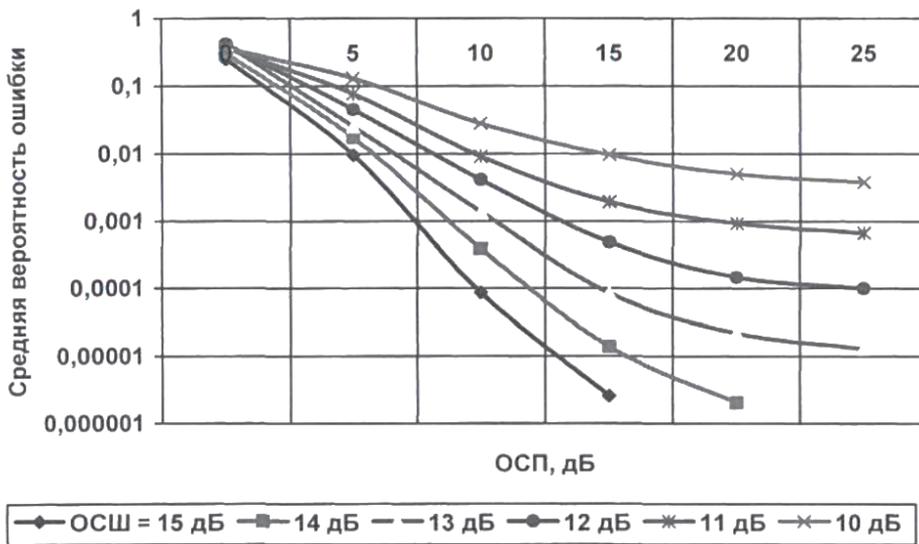


Рисунок 7 – Кривые зависимости средней вероятности ошибки от отношения сигнал – помеха

Таким образом при воздействии помехи гармонического типа на один из каналов можно определить среднюю вероятность ошибки как:

$$P_B = 0,5(P_{B,осн} + P_{B,доп}) = 0,5Q[(\rho_{ш}/\rho_{п})^{0,5}, (\rho_{ш})^{0,5}]$$

Когда гармонические помехи воздействует как на основной, так и на дополнительный каналы, то средняя вероятность ошибки (согласно [2]) может быть рассчитана по формуле:

$$P_{B,осн+доп} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ Q[(\rho_{ш}/\rho_{п})^{0,5}, (\rho_{ш}(1 + \rho_{п}^{-1} + 2\sqrt{\rho_{п}^{-1}} \cos \theta))^{-0,5}] - 0,5 \exp[-\rho_{ш}(0,5 + \rho_{п}^{-1} + \sqrt{\rho_{п}^{-1}} \cos \theta)] \times I_0[\rho_{ш}(\rho_{п}^{-1}(1 + \rho_{п}^{-1} + 2\sqrt{\rho_{п}^{-1}} \cos \theta))^{0,5}] \right\} d\theta$$

На рисунке 8 приводится зависимость средней вероятности ошибки, когда на основной канал воздействует две помехи гармонического типа. Мощность обеих помех равная. ОСШ= 13дБ. Если сравнить кривые зависимостей на рисунках 6 и 8, то можно заключить, что средняя вероятность ошибки больше, когда воздействуют две помехи гармонического типа на основной и дополнительный каналы, по сравнению с воздействием одиночной гармонической помехи.

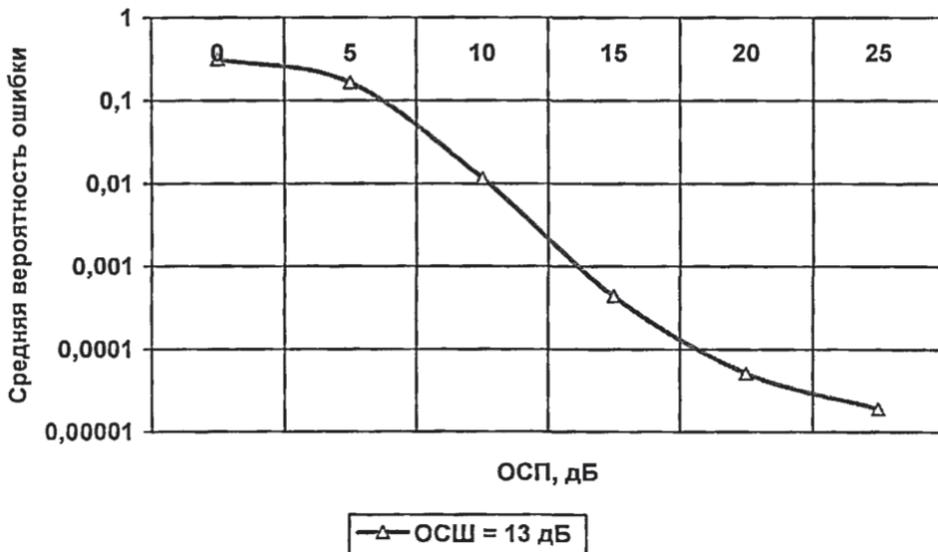


Рисунок 8 – Зависимость СВО от ОСП

Рассмотрим случай, когда между сигналом и помехой разность фаз меняется $-\pi$ до π . Это необходимо учитывать при оценке вероятности ошибки при наличии помех гармонического характера. Согласно работе [37] можно определить мощность суммарного сигнала между сигналом и помехой по следующей формуле:

$$P_{\Sigma} = P_c \left(1 + \left(\frac{2}{\rho_{\text{о.с}}} \right) \cos \theta + \rho_{\text{п}}^{-1} \right)$$

На рисунке 9 показаны кривые зависимостей, полученных по формулам (8) и (10) в зависимости от отношения сигнал-помеха. Из рисунка видно, что в случае, когда сигналы находятся в противофазе, то достигается максимум средней вероятности ошибки. Когда разность фаз равна нулю – средняя вероятность ошибки достигает минимального значения, отличающиеся на несколько порядков по значениям, если отношение сигнал/помеха стремится к единице.

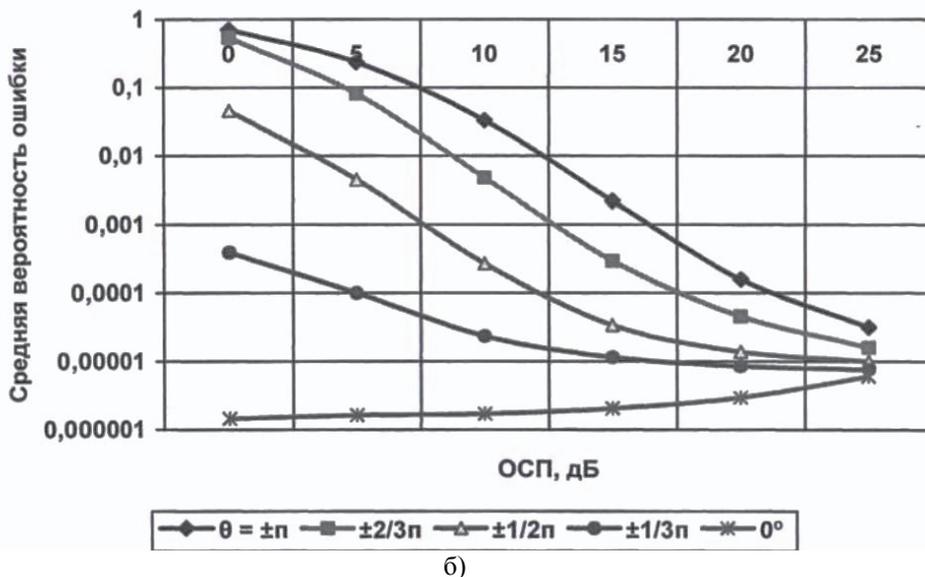
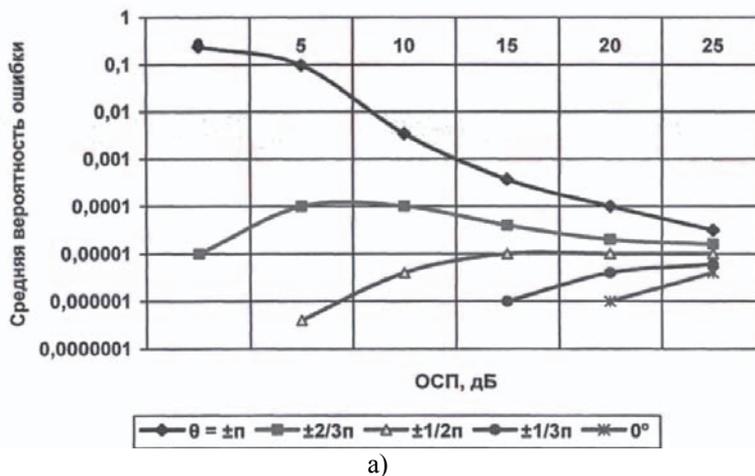


Рисунок 9 – Зависимость СВО от ОСП: а) – основной канал; б) – основной и дополнительный каналы

Гармонические помехи на УМРД с ППРЧ и М-ичной ЧМ

Рассмотрим воздействие гармонической помехи на УМРД с ППРЧ, когда используется М-ичная частотная манипуляция. Средняя вероятность ошибки (для основного канала) можно найти по формуле (7). Тогда величина функции плотности вероятности можно представить в виде следующего соотношения (по работе [2]):

$$f_c(z_c) = \frac{z_c}{\sigma_{\text{ш}}^2} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{\text{ш}}^2} (z_c^2 + P_c + P_n + 2(P_c P_n)^{0.5} \cos \theta) \right] I_0 \left[\frac{1}{\sigma_{\text{ш}}^2} (z_c^2 + P_c + P_n + 2(P_c P_n)^{0.5} \cos \theta) z_c \right]$$

Тогда согласно формулам, приводимым в работе [8], можно определить среднюю вероятность ошибки как:

$$P_{\text{Б.осн}} = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \binom{M-1}{m} \exp \left\{ -k\rho_{\text{ш}} \left(1 + \rho_{\text{п}}^{-1} \frac{m}{m+1} \right)^{-1} I_0 \left(\frac{2m}{m+1} \right) k\rho_{\text{ш}} (\rho_{\text{п}}^{-1})^{0,5} \right\}$$

На рисунке 10 показаны зависимости СВО от ОСП для разных M и разных значений отношения сигнал-шум. Вероятность ошибки увеличивается до максимума при $\rho_{\text{п}} = 1$. Величина отношения сигнал-шум при этом уменьшается.

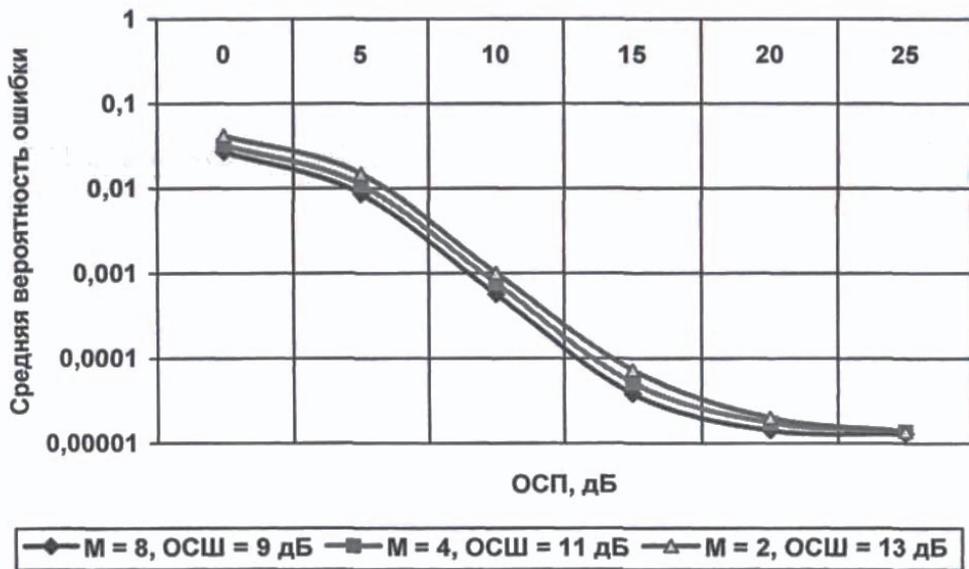


Рисунок 10 – Зависимость СВО от ОСП

Взяв среднее интегральное представление по фазе функции Бесселя нулевого порядка первого рода к формуле (9), получим:

$$P_{\text{Б.тахосн}} = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \binom{M-1}{m} 0,5 \left[\frac{m+1}{\pi m k \rho_{\text{ш}}} \right]^{0,5}, P_c = P_{\text{ш}}$$

На рисунке 11 представлены графики зависимостей максимального значения вероятности для приема информации величиной в 1 бит, когда помеха гармонического типа совпадает по мощности с основным сигналом. Кривые даются для разных M . Видно, что когда воздействует помеха гармонического типа на УМРД с ППРЧ и M -ичной частотной манипуляцией с увеличением M возрастет помехоустойчивость УМРД. При $M=4$ помехоустойчивость увеличивается на 2дБ, а при $M=8$ – на 3 дБ.

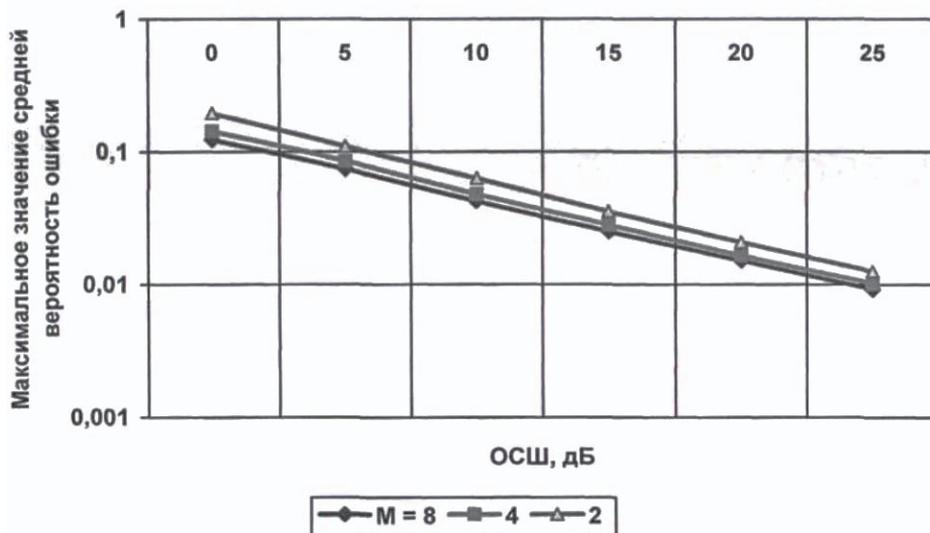


Рисунок 11 – Зависимость максимума СВО от ОСП

Таким образом, анализируя кривые зависимостей на рисунке 11, можно сделать вывод о том, что помехоустойчивость УМРД становится хуже, когда присутствуют помехи гармонического типа. Максимум средней вероятности ошибки уменьшается, когда увеличиваются значения отношения сигнал-помеха и сигнал-шум.

Комбинированные помехи на УМРД с ППРЧ и двойной ЧМ

Рассмотрим одновременное воздействие гармонической и шумовой помех на УМРД с ППРЧ и двойной частотной манипуляцией. В этом случае вероятность можно определить по формуле:

$$P_{\text{Б.осн}} = (2 + \rho_{\text{ш}}/\rho_{\text{п}})^{-1} \exp \left\{ -\frac{1 + \rho_{\text{п}}^{-1}}{\rho_{\text{п}}^{-1} + 2\rho_{\text{ш}}^{-1}} \right\} I_0 \left(\frac{\sqrt{\rho_{\text{п}}^{-1}}}{\rho_{\text{п}}^{-1} + 2\rho_{\text{ш}}^{-1}} \right) \quad (11)$$

На рисунке 12 представлены кривые зависимости вероятности от величины отношения сигнал/помеха, построенные согласно формуле (11). Величина отношения сигнал/шум составляет 13дБ. Приводятся кривые для трех видов помех: шумовой, гармонической комбинированной. Из графика видно, что при увеличении ОСШ помехи становятся практически неотличимы.

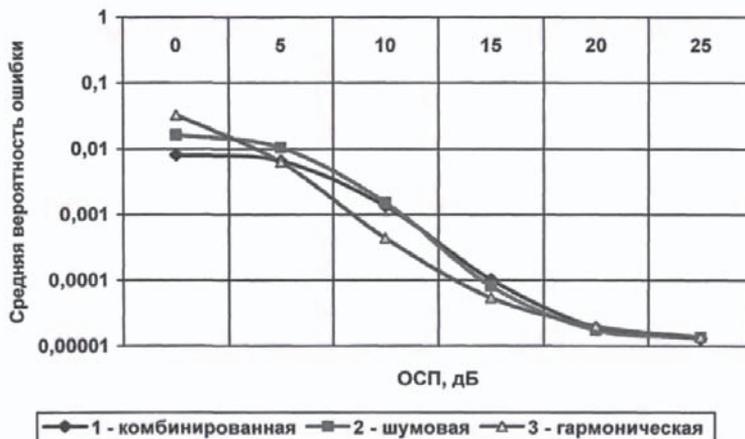


Рисунок 12 – Зависимость средней вероятности ошибки от отношения сигнал-помеха: а) – комбинированная помеха; б) – шум; в) – гармоническая помеха

Блоковое кодирование

Рассмотрим, как влияет воздействие разных помех на помехоустойчивость УМРД с ППРЧ, двоичной частотной модуляцией и блоковым кодированием. Когда используется блоковое кодирование, это означает, что можно менять параметры устройства малого радиуса действия и исправлять ошибки. На рисунке 13 приведена схема типового обнаружителя максимального правдоподобия [11]. На схеме отображены следующие компоненты, согласно работе [11].

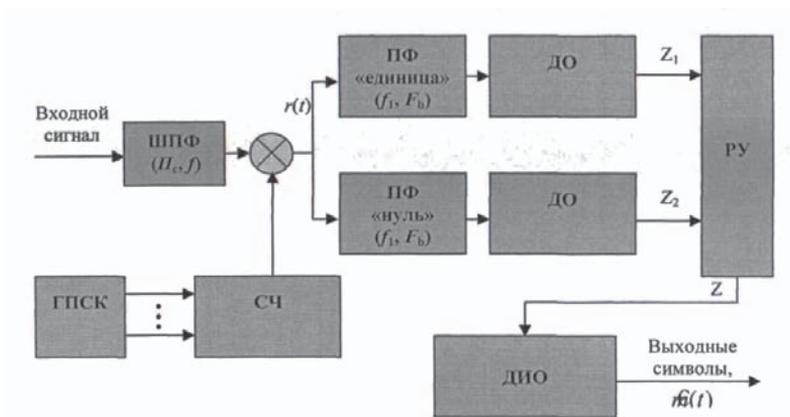


Рисунок 13 – Схема типового некогерентного обнаружителя максимального правдоподобия [11]

Средняя вероятность ошибки при использовании УМРД с ППРЧ и ЧМ двоичным блоковым кодированием может быть найдена по формуле (согласно [3, 10]):

$$P_{Б,к} \approx dn^{-1} \sum_{i=\alpha+1}^d \binom{n}{i} P_b^i(2) [1 - P_b(2)]^{n-i} + n^{-1} \sum_{i=d+1}^n \binom{n}{i} P_b^i(2) [1 - P_b(2)]^{n-i}$$

где: $P_b(2)$ – вероятность ошибки на один символ в канале. Энергия канального символа определяется выражением: $E_k = (k/n)E_c = V_k E_c$, где E_c – энергия сигнала. Тогда при воздействии шумовых помех можно записать:

$$P_{b,осн} = 0,5(1 + 0,5\rho_{ш}\rho_{п}^{-1})^{-1} \exp\{-V_k(2\rho_{ш}^{-1} + \rho_c^{-1})^{-1}\} \quad (12)$$

а при воздействии гармонических помех

$$P_{b,осн} = 0,5 \exp\{-V_k 0,5\rho_{ш}(1 + \rho_c^{-1})\} I_0[V_k\rho_{ш}(\rho_c^{-1})^{0,5}] \quad (13)$$

Как следует из выражений (12) и (13), когда $V_k=1$, то вероятность ошибки растет, что связано с применением кодирования.

Найдем максимум средней вероятности ошибки, когда на УМРД оказывают влияние помехи разного типа. Подставив выражение $\frac{dP_b}{d\rho_{п}} = 0$ в (12) и (13), получаем максимум средней вероятности ошибки:

– при воздействии шума:

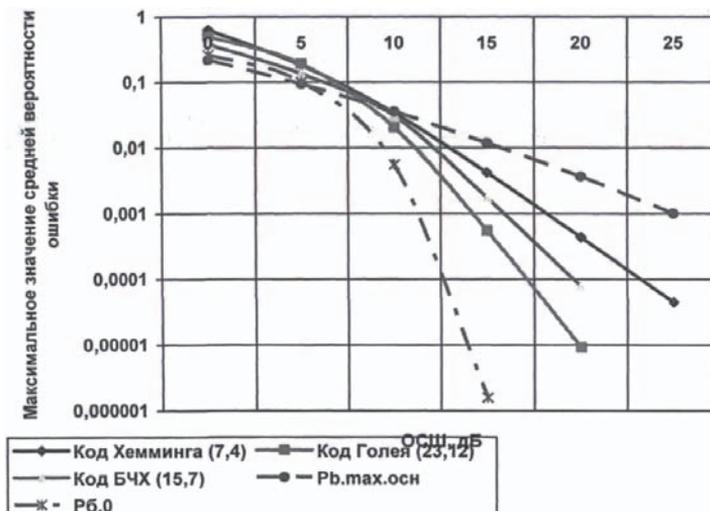
$$P_{b,махосн} \approx \rho_{ш}^{-1} V_k^{-1} e^{-1}, \rho_{п} = (V_k - 2\rho_{ш}^{-1})^{-1} \approx V_k^{-1} \text{ или } V_k \gg 2\rho_{ш}^{-1} \quad (14)$$

– при воздействии помехи гармонического типа:

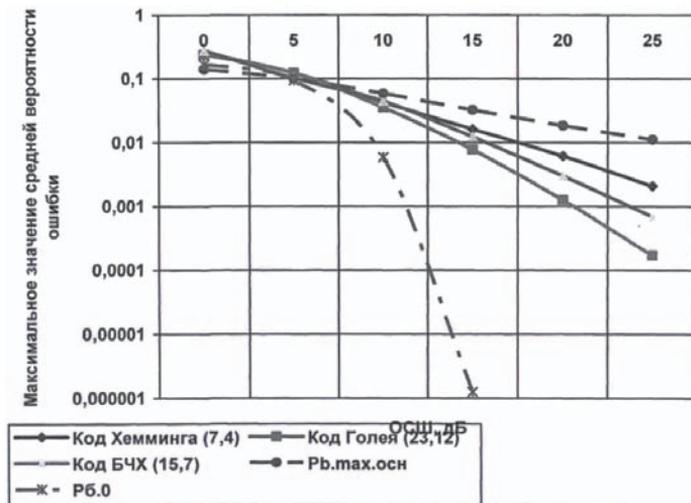
$$P_{b,махосн} \approx 0,5[(2\pi)^{-1}\rho_{ш}^{-1}V_k^{-1}]^{-1}, \rho_{п} \approx 1 \quad (15)$$

Из последних двух выражений следует, что максимум средней вероятности ошибки больше, когда воздействует шум и в (V_k^{-1}) больше, чем, когда воздействует помеха гармонического типа.

На рисунке 14 показаны кривые зависимости максимума СВО, когда шум и помеха представляют собой сигнал гармонического типа.



а)



б)

Рисунок 14 – Максимум СВО от ОСШ, когда на УМРД действует:
а) шум с $\rho_{\Pi} = V_k^{-1}$; б) – шум с $\rho_{\Pi} = 1$

Таким образом можно заключить, что, используя простые двоичные коды, можно повысить помехоустойчивость УМРД.

Выводы

1. Получена оценка влияния шумовых помех разного типа (гауссовский шум, гармонический сигнал и комбинированная помеха) на УМРД с ППРЧ и ЧМ; зависимость вероятности ошибки от ОСШ и ОСП. Рост значения отношения сигнал/шум приводит к увеличению влияния на помехоустойчивость величины отношения сигнал/помеха, и наоборот. Наиболее помехозащищенными оказываются устройства, для которых частотный размах между каналами непрерывно меняется.

2. Получена оценка влияния шумовых помех разного типа (гауссовский шум, гармонический сигнал и комбинированная помеха) на УМРД с ППРЧ и M -ичной частотной манипуляцией. Показано, что вероятность ошибки стремится к значению 10^{-5} при увеличении значения величины отношения сигнал/помеха. Наиболее помехозащищенными оказываются устройства с наибольшим значением отношения сигнал/шум.

3. Получена оценка влияния помех гармонического типа на УМРД. Изменение средней вероятности ошибки связано с влиянием мощности мешающего сигнала и разность фаз между сигналом и приемников. Величина размаха между максимальным и минимальным значениями вероятности ошибки может отличаться на порядок, если отношение сигнал/помеха близко к единице.

4. Получена оценка влияния помех гармонического типа. Рост помехоустойчивости УМРД с увеличением размера алфавита сигнала M .

5. Получена оценка влияния комбинированной помехи на УМРД с ППРЧ и ЧМ, представляющей собой суперпозицию шумового и гармонического сигналов. Показано, что помехоустойчивость УМРД с при наличии комбинированной

помехи мало отличается от помехоустойчивости УМРД с ППРЧ и двоичной ЧМ при воздействии одной из помех.

6. Получена оценка влияния помех на с блоковым кодированием. Показано, что использование двоичных блоковых кодов повышает помехоустойчивость УМРД.

Литература

1. Артющенко В.М., Корчагин В.А. Анализ особенностей распространения радиоволн в пикосетях беспроводных устройств малого радиуса действия // Промышленный сервис. № 4(31). 2009. С. 32-37.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: РадиоСофт, 2018. 512 с.
3. Борисов В.И., Зинчук В.М., Мухини Н.П. др. Оценка воздействия ответных помех на системы радиосвязи с медленной ППРЧ // Теория и техника радиосвязи. 1994. Вып. 1. С. 3-19.
4. Борисов В.И., Зинчук В.М., Николаев В.И. и др. Системы радиосвязи с расширением спектра сигналов (аналитический обзор) // Теория и техника радиосвязи. 1998. Вып. 1. С. 18-48.
5. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры. Пермь: изд-во Перм.гос.техн.ун-та, 2007. 312 с.
6. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1995. 264 с.
7. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2009. 520 с.
8. Blanchard J.E. A slow frequency-hopping technique that is robust to repeat jamming / IEEE Milconf 82, Conf.Boston, 1982. Vol. 1. P.14.1-14.19.
9. Torrieri D.J. Principles of Military Communication Systems. MA.: Artech House, Inc., 1981. 306 p.
10. Torrieri D.J. The Information – Bit Error for Block Codes // IEEE Trans. 1984. Vol. COM-32. № 4. P.474-476.
11. Torrieri DJ. Principles of Secure Communication Systems. MA.: Artech House Inc., 1985. 286 p.