

*На правах рукописи*



Козлов Сергей Владиславович

**ОБРАБОТКА ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ  
СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ**

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Нахмансон Геннадий Симонович**

**Официальные оппоненты:** **Монаков Андрей Алексеевич**  
доктор технических наук, Федеральное  
государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт-  
Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения», профессор

**Куцов Руслан Владимирович**  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное казенное образовательное  
учреждение высшего образования «Воронежский  
институт Федеральной службы исполнения  
наказаний», заместитель начальника  
организационно-научного и редакционного  
отдела

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Концерн «Созвездие»,  
г. Воронеж

Защита состоится «17» мая 2018 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д212.038.10 при Воронежском государственном университете по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, ауд. 428.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Воронежского Государственного университета по адресу 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1 и на сайте ВУЗа <http://www.vsu.ru>, с авторефератом – также на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «16» апреля 2018 г.

**Ученый секретарь  
диссертационного совета:**



**Степкин Владислав Андреевич**  
кандидат физико-математических  
наук

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современных системах радиосвязи (СРС) широко применяются фазоманипулированные широкополосные сигналы (ФМШПС). Такие СРС обладают рядом преимуществ: повышенной помехоустойчивостью, возможностью обеспечения многостанционного (множественного) доступа на основе кодового разделения каналов связи, высокой энергетической скрытностью. Среди сигналов с расширением спектра широкое распространение получили ФМШПС, получаемые путем непосредственной модуляции несущей частоты псевдослучайной последовательностью (ПСП).

Современные СРС с ФМШПС обычно работают в условиях многостанционного доступа, то есть прием ФМШПС осуществляется при наличии однотипных сигналов других СРС. Однотипные сигналы, излучаемые другими СРС, представляют специальный вид помех – взаимные помехи. Сигналы взаимных помех отличаются от сигналов, несущих полезную информацию, коэффициентами ПСП и влияют на процессы обнаружения и выделения передаваемой информации. Для эффективного анализа работы таких систем требуется методология расчета характеристик обнаружения и приема ФМШПС в условиях взаимных помех с учетом искажений сигналов в тракте приемника. Обычно для учета взаимных помех при приеме ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией используют гауссовскую аппроксимацию совокупности мешающих сигналов, либо методы статистического моделирования. Однако до настоящего момента отсутствуют методики, позволяющие проводить анализ процесса обнаружения ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех в общем случае приема полезного и помеховых сигналов, содержащих регулярные и флуктуирующие составляющие, с учетом искажений сигналов во входных цепях приемника. Также отсутствуют методики, позволяющие проводить анализ приема ФМШПС в условиях взаимных помех с более сложными видами модуляции. Кроме того анализ влияния искажений, вносимых входным полосовым фильтром приемника, на прием ФМШПС выполнен с учетом только внутренних шумов аппаратуры, и отсутствуют результаты, учитывающие наличие взаимных помех. Поэтому задачу разработки методов анализа эффективности обработки ФМШПС в условиях взаимных помех следует считать актуальной.

**Цель работы** – разработка методов анализа и статистической обработки ФМШПС с бинарной и квадратурной фазовыми модуляциями в условиях взаимных помех в общем случае наличия у полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих, с учетом искажений сигналов во входных цепях приемника.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику анализа и статистической обработки ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией при обнаружении в условиях взаимных помех в общем случае наличия у полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих;
2. Разработать математические модели взаимных помех, создаваемых при работе СРС, использующих ФМШПС;
3. Разработать методику анализа и статистической обработки ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией при обнаружении и приеме в условиях взаимных помех в общем случае наличия у полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих;
4. Исследовать влияние входного полосового фильтра на статистическую обработку ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией при их приеме в условиях взаимных помех в общем случае наличия у полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих с учетом их искажений во входных цепях приемника;
5. Разработать алгоритмы и провести на их основе статистическое моделирование приема ФМШПС, в условиях многостанционного доступа для общего случая наличия у амплитуд полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих.

**Методы исследования.** При проведении исследований использовались методы теории вероятностей и математической статистики, теории статистических решений, математического анализа, теории функций комплексного переменного, статистической радиофизики, математического моделирования.

**Научная новизна** полученных результатов:

1. Разработана методика анализа и статистической обработки процесса обнаружения ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией и получены новые аналитические выражения, отличающиеся от известных учетом влияния взаимных помех на процесс обнаружения ФМШПС и позволяющие рассчитывать вероятности правильного обнаружения ФМШПС и ложной тревоги в общем случае наличия у полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих.
2. Разработаны новые математические модели взаимных помех, создаваемых при работе СРС для случаев использования:
  - ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией;
  - ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией с учетом искажений во входных цепях приемникав общем случае наличия у амплитуд полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих.

3. Разработана методика анализа и статистической обработки ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией при обнаружении и оценке значений информационного символа и получены новые аналитические соотношения, отличающиеся от известных учетом влияния взаимных помех на процесс обнаружения ФМШПС и позволяющие рассчитывать вероятности правильного обнаружения, ложной тревоги и средней вероятности ошибки (СВО) оценивания информационного символа ФМШПС в общем случае наличия у полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих.
4. Разработана методика анализа и статистической обработки ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией при его обнаружении и оценке информационного символа и получены новые аналитические соотношения, отличающиеся от известных учетом влияния взаимных помех с учетом искажений сигналов входным полосовым фильтром приемника и позволяющие рассчитывать вероятности правильного обнаружения, ложной тревоги и СВО оценивания информационного символа ФМШПС в общем случае наличия у полезного и помеховых сигналов регулярных и флуктуирующих составляющих.
5. Разработан алгоритм, на основании которого проведено статистическое моделирование обнаружения ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией квадратурным корреляционным приемником на фоне взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры.

**Достоверность полученных в работе новых результатов и выводов** подтверждается: использованием методов, апробированных на решении подобных задач; соответствием сделанных выводов фундаментальным теоретическим представлениям; совпадением полученных результатов при переходе к частным случаям с известными; согласием результатов статистического моделирования с полученными аналитическим способом зависимостями.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке новых моделей взаимных помех и развитии теории статистической обработки ФМШПС с бинарной и квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех с учетом искажений сигналов во входных цепях приемника.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности рассчитывать характеристики обнаружения ФМШПС и СВО оценивания значений его информационного символа в зависимости от величин баз сигналов, количества и мощности воздействующих взаимных помех, величин отношений сигнал/шум и соотношений между регулярными и флуктуирующими составляющими амплитуд принимаемых сигналов на основе полученных аналитических выражений.

Результаты могут использоваться на этапе проектирования СРС для выбора их параметров в соответствии с задаваемыми требованиями при работе СРС в условиях взаимных помех.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика анализа и статистической обработки ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией при его обнаружении в условиях взаимных помех и новые аналитические соотношения для расчета их характеристик обнаружения.
2. Математические модели взаимных помех, создаваемых при работе СРС, использующих ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией и с бинарной фазовой модуляцией с учетом искажений во входных цепях приемника.
3. Методика анализа и статистической обработки ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех и аналитические соотношения для вероятностей правильного обнаружения, ложной тревоги и СВО оценивания информационного символа сигнала.
4. Методика анализа и статистической обработки ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией с учетом искажений сигналов входным полосовым фильтром приемника и аналитические соотношения для расчета его вероятностей правильного обнаружения, ложной тревоги и СВО оценивания информационного символа сигнала в условиях взаимных помех.
5. Алгоритм моделирования процесса обнаружения ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией квадратурным корреляционным приемником на фоне взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры.

**Апробация работы.** Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на XIX, XX, XXI, XXIII международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация связь» (Воронеж, 2013, 2014, 2015, 2017); XIV научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии 21 века» (Воронеж, 2013); XXIII межвузовской научно-практической конференции Военно-научного общества курсантов и молодых ученых ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (Воронеж, 2013); 26 международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016).

**Личный вклад** состоит в разработке и проведении теоретических исследований и статистического моделирования, а также анализе полученных результатов. Результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора на этапах постановки задач и разработки методов для их выполнения, анализа полученных результатов и написании публикаций.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ общим объемом более 110 печатных страниц. Шесть работ опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК ведущих рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации: «Известия вузов России. Радиоэлектроника», «Телекоммуникации», «Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика». Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация общим объемом 152 страницы машинописного текста состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 83 наименований. Работа содержит 22 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования. Отмечены положения, выносимые на защиту. Изложена цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования.

**В первой главе** приведен обзор современного состояния исследований по обработке ФМШПС в условиях взаимных помех. Выявлены основные особенности и проблемы работы СРС с ФМШПС в условиях взаимных помех. Обоснованы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрен процесс обнаружения ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех. Поступающий на вход СРС полезный ФМШПС имеет вид

$$s(t) = ad^{(0)}(t)p^{(0)}(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $a$  – амплитуда сигнала,  $\varphi_0$  – случайная начальная фаза,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  – несущая частота сигнала,  $d^{(0)}(t)$  – информационная последовательность, символы которой принимают значения  $\{-1, 1\}$ ,  $p^{(0)}(t) = \sum_{k=1}^L p_k^{(0)} \text{rect}[t - (k-1)\tau_k]$  – функция, расширяющая спектр информационного сигнала, представляющая собой непрерывную последовательность  $L$  элементарных импульсов прямоугольной формы, отличных от нуля на временном интервале длительностью  $\tau_u$ .

С учетом наличия взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры поступающий на вход сигнал можно записать как

$$x(t) = s(t - \tau) + s_{\text{ес}}(t) + n(t), \quad (2)$$

где  $\tau$  – время задержки полезного сигнала относительно опорных ( $|\tau| < \tau_u$ ),

$$s_{\text{вз}}(t) = \sum_{i=1}^K a_i d^{(i)} p^{(i)}(t - \tau_i) U(t - \tau_i) \cos(\omega_0(t - \tau_i) + \varphi_i), \quad (3)$$

где  $a_i$  и  $\varphi_i$  – амплитуда и начальная фаза  $i$ -го мешающего сигнала,  $p^{(i)}(t)$  – функция, расширяющая спектр  $i$ -го помехового сигнала и отличающаяся от  $p^{(0)}(t)$  коэффициентами ПСП  $p_k^{(i)}$ ,  $d^{(i)}$  – информационные последовательности помеховых сигналов,  $\tau_i$  – время задержки  $i$ -го помехового сигнала относительно опорных,  $K$  – число помеховых сигналов,  $n(t)$  – внутренние шумы аппаратуры, аппроксимируемые белым гауссовским шумом со спектральной плотностью мощности  $N_0$  с нулевым средним значением.

С помощью метода характеристической функции получены новые аналитические выражения для вероятности правильного обнаружения ФМШПС и ложной тревоги при работе СРС в условиях взаимных помех и шумов аппаратуры

$$D = \frac{1}{2^{K+1} A} \sum_{\substack{v_1=\pm 1 \\ \dots \\ v_K=\pm 1}} \exp\left(-\frac{A_1(\vec{v})^2}{2A}\right) \int_{\hat{M}_{\text{нор}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x}{2A}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{x} A_1(\vec{v})}{A}\right) dx \quad (4)$$

где  $A = 1 + K^2(\tau) Q_{\phi 0} + \sum_{i=1}^K \frac{\sigma_{ai}^2 R_i^2}{4\sigma_n^2}$ ,  $A_1(\vec{v}) = \gamma K(\tau) \sqrt{Q_{\phi 0}} + \sum_{i=1}^K v_i \gamma_i \frac{\sigma_{ai} R_i}{2\sigma_n}$ ,  $Q_{\phi 0} = \frac{\sigma_a^2 T}{N_0}$  – отношение сигнал/шум для флуктуационной составляющей амплитуды полезного сигнала,  $\gamma = a_0 / \sigma_a$  и  $\gamma_i = a_{0i} / \sigma_{ai}$  – отношения регулярных составляющих амплитуд к среднеквадратическим значениям их флуктуационных составляющих,  $\hat{M}_{\text{нор}} = M_{\text{нор}} / \sigma_n^2$  – величина порога, нормированного на уровень мощности шумовой составляющей. Уровень порога выбирается исходя из заданного уровня вероятности ложной тревоги;

$$F = \frac{1}{2^{K+1} B} \sum_{\substack{v_1=\pm 1 \\ \dots \\ v_K=\pm 1}} \exp\left(-\frac{B_1^2(\vec{v})}{2B}\right) \int_{\hat{M}_{\text{нор}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x}{2B}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{x} B_1(\vec{v})}{B}\right) dx, \quad (5)$$

где  $B = 1 + \sum_{i=1}^K \frac{\sigma_{ai}^2 R_i^2}{4\sigma_n^2}$ ,  $B_1(\vec{v}) = \sum_{i=1}^K v_i \gamma_i \frac{\sigma_{ai} R_i}{2\sigma_n}$ . В рассматриваемом случае  $R_i = T / \sqrt{L}$ .



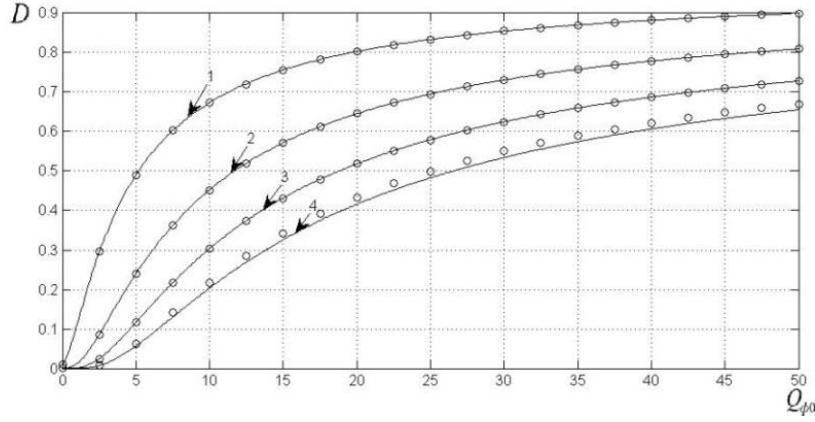


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум

На рис. 1 представлена зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум для флуктуационной составляющей амплитуды при воздействии десяти помех ( $K=10$ ), при  $\gamma=0.5$ .  $\tau=0$ , кривая 1 соответствует результатам при вероятности ложной тревоги  $F=10^{-2}$ , кривая 2 –  $F=10^{-4}$ , 3 –  $F=10^{-6}$  и 4 –  $F=10^{-8}$ . Результаты статистического моделирования отображены на рис. 1 кружками.

Вероятности правильного обнаружения принимаемого ФМШПС возрастают с увеличением отношения сигнал/шум  $Q_{\phi 0}$ , уменьшением количества взаимных помех, вызывающих уменьшение помеховых составляющих и, следовательно, увеличение отношения сигнал/(помеха плюс внутренний шум).

**В третьей главе** рассмотрена обработка ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех. В СРС, использующих ФМШПС вида

$$s_0(t) = d_1(t)p_1^{(0)}(t)\cos(\omega_0 t) + d_2(t)p_2^{(0)}(t)\sin(\omega_0 t), \quad (6)$$

где  $p_1^{(0)}(t) = \sum_{k=1}^L p_{1k}^{(0)} \text{rect}[t - (k-1)\tau_k]$  и  $p_2^{(0)}(t) = \sum_{k=1}^L p_{2k}^{(0)} \text{rect}[t - (k-1)\tau_k]$  – расширяющие спектры информационных импульсов функции, взаимные помехи можно представить в виде

$$s_{\text{вз}}(t) = \sum_{i=1}^K a_i d_1^{(i)}(t - \tau_i) p_1^{(i)}(t - \tau_i) \cos(\omega_0(t - \tau_i) + \varphi_i) + a_i d_2^{(i)}(t - \tau_i) p_2^{(i)}(t - \tau_i) \sin(\omega_0(t - \tau_i) + \varphi_i), \quad (7)$$

где  $p_1^{(i)}(t)$  и  $p_2^{(i)}(t)$  – функции, расширяющие спектр  $i$ -го помехового сигнала и отличающиеся от  $p_1^{(0)}(t)$  и  $p_2^{(0)}(t)$  коэффициентами ПСП  $\{p_{1k}^{(i)}\}$  и  $\{p_{2k}^{(i)}\}$ .

Методом характеристической функции получены аналитические выражения для вероятности правильного обнаружения ФМШПС и ложной тревоги

$$D = \frac{1}{2B_D} \int_{\hat{M}_{nop}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\hat{M} + A_D^2}{2B_D}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{\hat{M}} A_D}{B_D}\right) d\hat{M}, \quad (8)$$

где  $A_D = \gamma \sqrt{Q_{\phi 0}} K(\tau) + \sum_{i=1}^K \sqrt{Q_{\phi i}} \rho_i \gamma_i$ ,  $B_D = 2 + Q_{\phi 0} K^2(\tau) + \sum_{i=1}^K Q_{\phi i} \rho_i^2$ ,

$$F = \frac{1}{2B_F} \int_{\hat{M}_{nop}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\hat{M} + A_F^2}{2B_F}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{\hat{M}} A_F}{B_F}\right) d\hat{M}, \quad (9)$$

где  $A_F = \sum_{i=1}^K \sqrt{Q_{\phi i}} \rho_i \gamma_i$ ,  $B_F = 2 + \sum_{i=1}^K Q_{\phi i} \rho_i^2$ .

Соотношения (8) и (9) позволяют рассчитывать значения вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в зависимости от количества воздействующих помех, отношения сигнал/шум и других параметров СРС.

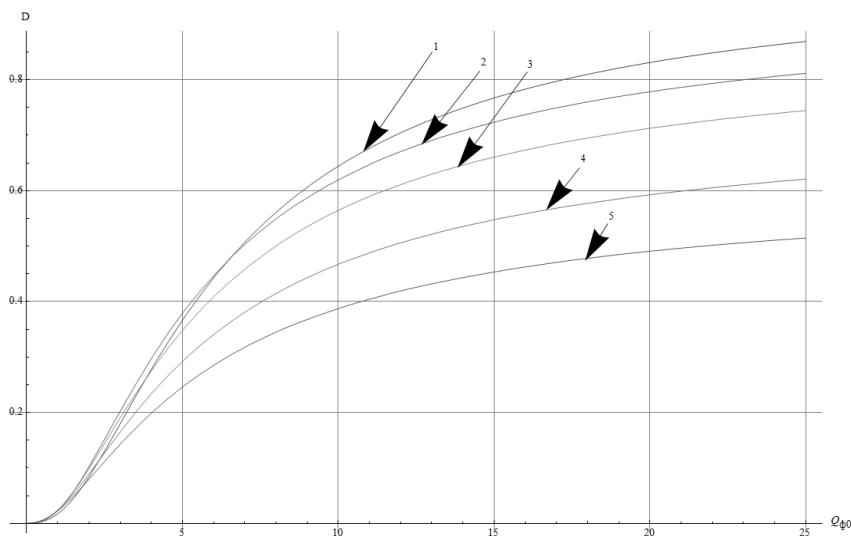


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум

Кривые на рис. 2 приведены для  $\gamma = \gamma_{II} = 2$  и вероятности ложной тревоги  $F = 10^{-4}$  при различном количестве воздействующих помех. Кривая 1 соответствует случаю отсутствия помех, кривая 2 – воздействию пяти помеховых сигналов ( $K = 5$ ), кривая 3 –  $K = 10$ , кривая 4 –  $K = 20$ , кривая 5 –  $K = 30$ . На рис. 2 видно ухудшение вероятности правильного обнаружения с ростом числа помеховых сигналов.

Для характеристик эффективности обнаружения ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией, обладающих по сравнению с бинарной фазовой модуляцией повышенной скрытностью и «живучестью» СРС, справедливы те же закономерности, что и для ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией. Однако, как видно из сравнения результатов, «платой» за использование ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией является незначительное уменьшение вероятности правильного обнаружения.

Аналитическое выражение для СВО оценивания информационного символа при когерентном приеме ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией имеет вид

$$P_{\text{ош}} = \sum_{\substack{v_i=\pm 1 \\ \dots \\ v_k=\pm 1}} \int_0^{\infty} dx \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\varphi_0 x}{4\pi 2^K} \exp\left(\frac{2x\gamma \cos \varphi_0 - x^2 - \gamma^2}{2}\right) \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{z_{1v} \rightarrow}{2} + \frac{z_{1v} \rightarrow}{D\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z_{1v}^2 \rightarrow}{4}} \left( 1 + \frac{H_{1v}^2 \rightarrow}{4} \right) \right], (10)$$

где  $z_{1v} \rightarrow = \frac{x\sqrt{Q_{\phi 0}} + h\beta_{1v} \cos \varphi_0}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}h^2 Q_{\phi \Pi}}}$ ,  $H_{1v} \rightarrow = h\beta_{1v} \sin \varphi_0$ ,  $\beta_{1v} \rightarrow = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{i=1}^K \gamma_i \sqrt{Q_{\phi i}} v_i$ ,  $Q_{\phi \Pi} = \sigma_{\text{ап}}^2 T / N_0$

и  $\sigma_{\text{ап}}^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sigma_{\text{аи}}^2$ .

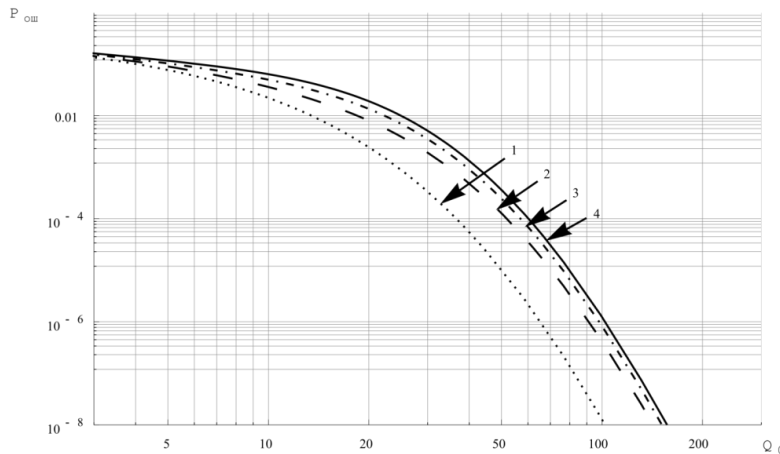


Рис. 3. Зависимость СВО оценивания бита информации от отношения сигнал/шум

Кривые на рис. 3 приведены для различного числа помеховых сигналов кривые 1 соответствуют случаю отсутствия помех, кривые 2 – воздействию пяти источников помех ( $K = 5$ ), кривые 3 – воздействию 10 источников помех ( $K = 10$ ), кривые 4 – воздействию 15 источников помех ( $K = 15$ ), значения рассчитаны для  $\gamma = \gamma_{\Pi} = 10$ ,  $D = 10$ . Из рис. 3 видно, что СВО, равная  $10^{-6}$ , достигается при  $Q_0 = 65$  в случае действия 5 помех и при  $Q_0 = 105$  в случае действия 15 помех.

СВО оценивания значения информационного символа ФМШПС уменьшается с улучшением качества синхронизации (увеличением параметра  $D$ ) и увеличением отношения сигнал/шум. При больших значениях отношения сигнал/шум значения СВО стремятся к пределу, определяемому величиной  $K/L$  – отношением числа воздействующих взаимных помех к величине базы сигнала.

**В четвертой главе** рассмотрено влияние полосового фильтра приемника на обработку ФМШПС в условиях взаимных помех. После прохождения полосового фильтра с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) прямоугольной формы и полосой пропускания  $\Delta f_\phi$  сигнал и помехи можно представить как

$$x_\phi(t) = \int_0^t (s(\tau - \tau_s) + s_{\text{вз}}(\tau) + n(\tau)) h(t - \tau) d\tau, \quad (11)$$

где  $h(t) = \frac{\Delta\omega_\phi}{\pi} \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\omega_\phi}{2}t\right) \cos(\omega_0 t)$ ,  $\Delta\omega_\phi = 2\pi\Delta f_\phi$ .

Выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для СРС, использующих ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией, с учетом искажений, вносимых входным полосовым фильтром, имеют вид

$$D = \sum_{\substack{v_1=\pm 1 \\ \dots \\ v_k=\pm 1}} \frac{1}{2^{K+1}A} \exp\left(-\frac{A_1(\vec{v})^2}{2A}\right) \int_{\dot{M}_{\text{ноп}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x}{2A}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{x}A_1(\vec{v})}{A}\right) dx, \quad (12)$$

$$F = \sum_{\substack{v_1=\pm 1 \\ \dots \\ v_k=\pm 1}} \frac{1}{2^{K+1}B} \exp\left(-\frac{B_1(\vec{v})^2}{2B}\right) \int_{\dot{M}_{\text{ноп}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x}{2B}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{x}B_1(\vec{v})}{B}\right) dx, \quad (13)$$

где  $A = 1 + g^2(\varepsilon)Q_{\phi 0} + g_0^2 \sum_{i=1}^K \frac{\sigma_{ai}^2 R_i^2}{4\sigma_n^2}$ ,  $A_1(\vec{v}) = \gamma g(\varepsilon) \sqrt{Q_{\phi 0}} + g_0 \sum_{i=1}^K v_i \gamma_i \frac{\sigma_{ai} R_i}{2\sigma_n}$ ,

$B = 1 + g_0^2 \sum_{i=1}^K \frac{\sigma_{ai}^2 R_i^2}{4\sigma_n^2}$ ,  $B_1(\vec{v}) = g_0 \sum_{i=1}^K v_i \gamma_i \frac{\sigma_{ai} R_i}{2\sigma_n}$ ,  $g(\varepsilon)$  – величина, зависящая от ширины

полосы пропускания фильтра и времени задержки принимаемого сигнала относительно опорного и учитывающая вклад откликов импульсов сигнала и помех после прохождения полосового фильтра,  $g_0 = g(0)$ .

Сужение полосы пропускания фильтра приводит к увеличению длительности его откликов, что вызывает максимальное совпадение во времени

поступающих на вход коррелятора импульсов опорного сигнала и откликов фильтра на импульсы принимаемого ФМШПС, соответствующих одинаковым элементам модулирующей ПСП, при опережении принимаемым сигналом опорного. Последнее приводит к достижению максимальных вероятностей правильного обнаружения при конечной временной задержке опорного сигнала относительно принимаемого ФМШПС.

Аналитическое выражение для СВО оценивания информационного символа при когерентном приеме ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией с учетом искажений, вносимых входным полосовым фильтром, имеет вид

$$P_{ou} = \frac{1}{2\pi 2^K} \sum_{\substack{v_1=\pm 1 \\ \dots \\ v_K=\pm 1}} \int_0^\infty dx \int_{-\pi}^\pi d\varphi_0 x \exp\left(-\frac{x^2 + \gamma^2 - 2x\gamma \cos \varphi_0}{2}\right) \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{z_{\rightarrow}^2}{\sqrt{2}} + \frac{z_{\rightarrow}^2}{D\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z_{\rightarrow}^2}{2}\right) \left(1 + h^2 \beta_{\rightarrow}^2 \sin^2 \varphi_0\right) \right], \quad (14)$$

где  $z_{\rightarrow}^2 = \frac{x\sqrt{g^{(0)}}\sqrt{Q_{\phi 0}} + h\beta_{\rightarrow} \cos \varphi_0}{\sqrt{1 + h^2 g Q_{\phi \Pi}}}$ ,  $Q_{\phi 0} = \frac{\sigma_a^2 T}{N_0 \eta}$ ,  $\beta_{\rightarrow} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{i=1}^K \gamma_i \sqrt{g^{(i)}} \sqrt{Q_{\phi i} v_i}$ ,  
 $Q_{\phi i} = \frac{\sigma_{ai}^2 T}{N_0 \eta}$ ,  $Q_{\phi \Pi} = \frac{\sigma_{a\Pi}^2 T}{N_0 \eta}$ ,  $\sigma_{\Pi}^2 \approx \frac{N_0 T}{2} \eta$ .

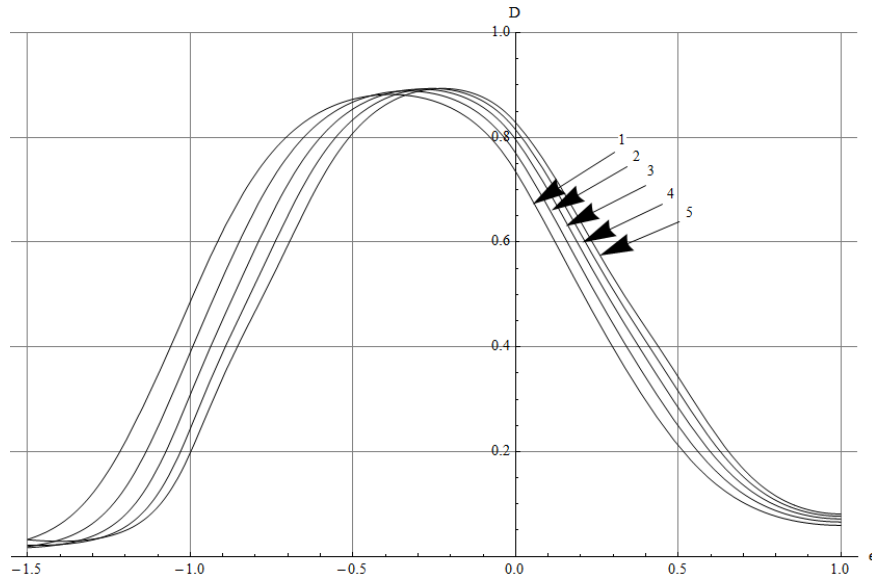


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного обнаружения от нормированной на длительность элементарного импульса временной задержки

На рис. 4 представлены зависимости вероятности правильного обнаружения  $D$ , как функция нормированной временной задержки  $\varepsilon = \tau_s / \tau_u$  при различных значениях нормированной полосы входного фильтра на активную ширину спектра элементарного импульса  $b / \pi = \Delta f_\phi / \Delta f_u$ . Кривая 1 –  $b / \pi = 0.8$ , кривая 2 –  $b / \pi = 0.9$ , кривая 3 –  $b / \pi = 1$ , кривая 4 –  $b / \pi = 1.1$ , кривая 5 –  $b / \pi = 1.2$ . При проведении расчетов база полагалась равной  $L = 127$ , вероятность ложной тревоги  $F \sim 10^{-4}$ , отношение сигнал/шум для регулярной составляющей сигнала  $Q_0 = 20$ , количество помеховых сигналов  $K = 10$ ,  $\gamma = 4$ .

Из выражений (12) и (13), и рис. 4 видно, что вероятность правильного обнаружения достигает наибольшего значения, в отличие от случая оптимального приема, при отличных от нуля временных задержках, а именно: при опережении принимаемым сигналом опорного на  $0.25\tau_u - 0.4\tau_u$ . При этом модуль величины запаздывания опорного сигнала относительно принимаемого, соответствующей максимальному значению вероятности правильного обнаружения сигнала, возрастает с уменьшением полосы пропускания входного фильтра. Это объясняется тем, что сужение полосы пропускания фильтра приводит к увеличению длительности его откликов, что увеличивает влияние межсимвольной интерференции на снижение эффективности приема ФМШПС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана методика анализа и статистической обработки ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией при обнаружении в условиях взаимных помех и получены новые аналитические соотношения, позволяющие рассчитывать вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для различных параметров СРС и канала связи: отношения сигнал/шум, отношений помеха/шум, числа мешающих сигналов, соотношения регулярных и флуктуирующих составляющих амплитуд сигналов. Показан количественный рост вероятности правильного обнаружения принимаемого ФМШПС, в зависимости от увеличения отношения сигнал/шум  $Q_{\phi 0}$ , уменьшения количества взаимных помех, увеличения отношения регулярной составляющей амплитуды к флуктуационной.
2. Разработаны математические модели взаимных помех, создаваемых при работе СРС, использующих ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией и с бинарной фазовой модуляцией с учетом искажений во входных цепях приемника.
3. Разработана методика анализа и статистической обработки ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех и получены

новые аналитические соотношения для вероятностей его правильного обнаружения и ложной тревоги и СВО оценивания информационного символа ФМШПС для различных параметров СРС и канала связи: отношения сигнал/шум, отношений помеха/шум, числа мешающих сигналов, соотношения регулярных и флуктуирующих составляющих амплитуд сигналов, различном качестве синхронизации опорных сигналов. Анализ, проведенный на основе полученных результатов показал, что ФМШПС с квадратурной фазовой модуляцией имеют худшие характеристики эффективности обнаружения по сравнению с ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией. Показано количественное уменьшение СВО оценивания значения информационного символа с улучшением качества синхронизации и увеличением отношения сигнал/шум. При больших значениях отношения сигнал/шум значения СВО стремятся к пределу, определяемому отношением числа воздействующих взаимных помех к величине базы сигнала.

4. Разработана методика анализа и статистической обработки ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией с учетом искажений сигналов входным полосовым фильтром приемника и получены новые аналитические соотношения для вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги и СВО оценивания информационного символа в условиях взаимных помех. Показано, что вероятность правильного обнаружения достигает наибольшего значения при отличных от нуля временных задержках, при этом модуль величины запаздывания опорного сигнала относительно принимаемого, соответствующей максимальному значению вероятности правильного обнаружения сигнала, возрастает с уменьшением полосы пропускания входного фильтра.
5. Разработан алгоритм моделирования процесса обнаружения ФМШПС с бинарной фазовой модуляцией квадратурным корреляционным приемником на фоне взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры. Результаты моделирования, проведенного на основе разработанного алгоритма, хорошо согласуются с полученными аналитическими результатами.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Статистическое моделирование алгоритмов обнаружения фазоманипулированных широкополосных сигналов в системах радиосвязи в условиях взаимных помех. Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2012, №2, с. 58-65.
2. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Обнаружение фазоманипулированного широкополосного сигнала с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры. Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014, №2, с. 21-29.

3. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Эффективность приема фазоманипулированного широкополосного сигнала с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры. Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2015, №2, с. 10-18.
4. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Обнаружение фазоманипулированного широкополосного сигнала, принимаемого в условиях взаимных помех. Часть 1. Телекоммуникации. 2015, №10, с. 13-18.
5. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Обнаружение фазоманипулированного широкополосного сигнала, принимаемого в условиях взаимных помех. Часть 2. Телекоммуникации. 2015, №11, с. 10-18.
6. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Влияние искажений фазоманипулированных широкополосных сигналов полосовыми фильтрами в квадратурном приемнике на их обнаружение в условиях взаимных помех. Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2017, №2, с. 32-44.

#### Прочие работы:

7. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Эффективность обнаружения фазоманипулированного широкополосного сигнала, принимаемого в условиях взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры. РЛНС. 2013, Том 1, с. 327-339.
8. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Моделирование процедуры обнаружения фазоманипулированных широкополосных сигналов в системах радиосвязи в условиях взаимных помех. Кибернетика и высокие технологии XXI века. 2013, Том 1, с. 327-339.
9. Козлов С. В. Эффективность приема фазоманипулированных широкополосных сигналов на фоне взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры. XXIII Межвузовская научно-практическая конференция Военно-научного общества курсантов и молодых ученых ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. 2013.
10. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Эффективность обнаружения фазоманипулированного широкополосного сигнала с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры. РЛНС. 2014, Том 1, с. 88-98.
11. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Эффективность приема фазоманипулированного широкополосного сигнала с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры. РЛНС. 2015, Том 1, с. 33-42.
12. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Влияние искажения фазоманипулированного широкополосного сигнала полосовым фильтром квадратурного приемника на его обнаружение в условиях взаимных помех. 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2016. с. 516-522.
13. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Обнаружение фазоманипулированного широкополосного сигнала приемником с полосовым фильтром в условиях взаимных помех. РЛНС. 2017, Том 3, с. 1079-1087.
14. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа оценивания характеристик обнаружения фазоманипулированного широкополосного сигнала в условиях многостанционного доступа». Регистрационный номер 2013614185.