

МОДЕЛЬ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОГО РАДИОКАНАЛА ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНАЛОВ ОЦЕНКИ ДЕТЕКТОРОВ СИГНАЛА МПЧТ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-7-21-36

Пыков Евгений Владимирович,
ВУНЦ ВМФ "Военно-морская академия",
г. Санкт-Петербург, Россия, eugene354057@list.ru

Manuscript received 04 June 2024;
Accepted 10 July 2024

Строганова Елена Петровна,
Московский технический университет связи
и информатики, г. Москва, Россия

Дворников Сергей Викторович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения;
Военная академия связи, г. Санкт-Петербург, Россия,
practicdsv@yandex.ru

Ключевые слова: эффективность оценки,
непараметрическая ранговая оценка, функционал
оценки, асимптотическая относительная
эффективность, функция влияния

Постановка задачи: задача повышения показателей достоверности, помехоустойчивости и помехозащищённости радиоканала на этапе разработки каналаобразующих средств радиосвязи декаметрового диапазона радиоволн может быть решена на основе совершенствования способов приёма и обработки радиосигнала. Среда распространения радиоволн декаметрового диапазона характеризуется статистически неоднородными физическими параметрами. Характеристики среды распространения являются случайными величинами, априорные знания о параметрах их распределений положены в основу алгоритмов, реализованных в радиоприёмных устройствах. В условиях априорной неопределённости обусловленной нестационарностью параметров распределения сигнала и помехи оптимальные способы приёма для гауссова канала оказываются неустойчивыми. На основе решения задач статистической теории связи возможно определить основные параметры проектируемых каналов связи. Устойчивость и эффективность функционалов оценки реализованных в детекторах сигналов возможно сравнить на основе имитационного моделирования. Целью работы является разработка модели помехозащищённого оптимального канала связи с псевдослучайной перестройкой радиочастоты, радиоприёмное устройство, которого осуществляет приём сигнала на основе оценки непараметрической ранговой статистики, а также проведение сравнительного анализа функционалов оценки некогерентного оптимального детектора и непараметрического рангового детектора на основе расчёта показателей эффективности и устойчивости статистических оценок для различных условий помеховой обстановки.

Используемые методы: решение задачи устойчивой оценки принимаемого сигнала выполняется на основе статистических непараметрических методов ранговой оценки, методов теории распространения радиоволн и теории электрической связи. **Новизна:** предложена имитационная компьютерная модель, отличающаяся от существующих применением детектора напольного непараметрического рангового двухвыборочный функционал оценки для приёма сигналов многопозиционной частотной телеграфии (МПЧТ) с псевдослучайной перестройкой радиочастоты в условиях нестационарности параметров распределения случайной величины на длительности информационного символа. Предлагаемая модель включает вычислительный модуль выполняющий расчёт показателей эффективности и устойчивости функционалов оценки сравниваемых детекторов сигналов. **Практическая значимость:** подтверждена возможность повышения показателей достоверности приёма сигналов МПЧТ с ППРЧ в условиях общих и интерференционных замираний в декаметровом канале связи на основе применения в детекторе рангового функционала оценки. Разработанная модель обеспечивает автоматический расчёт показателей эффективности и устойчивости оценок, выполняемых в некогерентном и ранговом детекторах сигналов по результатам моделирования. Предложенный функционал ранговой оценки может применяться для расчёта индекса достоверности информационного символа при реализации декодеров помехоустойчивых кодов с принятием "мягкого" решения.

Информация об авторах:

Пыков Евгений Владимирович, соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аджанкт НИЦ ТТ ВМФ НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ "Военно-морская академия". Область научных интересов: помехозащищённые радиоканалы СДВ, ДВ, КВ диапазонов радиоволн, г. Санкт-Петербург, Россия
Строганова Елена Петровна, д.т.н., профессор, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия
Дворников Сергей Викторович, д.т.н., профессор. Профессор кафедры Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Профессор кафедры Военной академии связи. Область научных интересов: помехозащищённость радиоприёмных устройств, масштабнo-временной анализ, цифровой синтез и обработка сигналов, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Пыков Е.В., Строганова Е.П., Дворников С.В. Модель помехозащищённого радиоканала декаметрового диапазона с системой автоматической оценки эффективности функционалов оценки детекторов сигнала МПЧТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №7. С. 21-36.

For citation:

Pukov E.V., Stroganov E.P., Dvornikov S.V. (2024). A model of a decimeter-band noise-proof radio channel with an automatic monitoring system based on a nonparametric statistical test. *T-Comm*, vol. 18, no.7, pp. 21-36. (in Russian)

Введение

В основу обработки сигналов, поступающих от преселектора радиоприёмного устройства на фоне помех, положена теория статистической обработки информации, раскрытая в основополагающих работах В.А. Котельникова, Н. Винера, Л.М. Финка [1], Б.Р. Левина [2] и других ученых [3-7].

Вместе с тем необходимо отметить, что в исследованиях не учитывается ряд факторов, существенно снижающих эффективность функционирования систем связи декаметрового диапазона. Таких как неточность и инерционность измерения параметров канала связи, что приводит к необходимости решения задачи создания устройств анализа состояния канала связи.

Развитие вычислительной техники и методов цифровой обработки сигналов, позволяет поставить задачу разработки ряда методов, связанных с практической реализацией адаптивных систем и их отдельных элементов [8], которые ранее подробно не рассматривались и остаются не решёнными как в теоретическом, так и в практическом смыслах.

Одна из наиболее сложных задач декаметровой радиосвязи, которая требует решения, заключается в обнаружении и различении сигналов в условиях априорной неопределённости [9]. Сложность задачи обусловлена тем, что отсутствует полный объём априорных сведений о свойствах сигналов и помех, которые требует классическая теория информационных систем.

В связи с этим необходимо создание систем, которые могли бы успешно функционировать в условиях априорной неопределённости характеристик сигналов и помех в точке приёма

Как одно из направлений решения этой задачи можно выделить синтез систем радиоприёма [10, 11], в которых оценивание параметров сигнала выполняется на основе непараметрических статистик, устойчивых к изменениям характеристик сигналов и помех.

Суть непараметрических процедур сводится к получению инвариантных свойств функционала оценки относительно номиналов значений оцениваемых характеристик распределения случайной величины [12-14].

Можно выделить основной технический приём непараметрических статистик – редукция данных к величинам, распределения которых являются инвариантными к распределению входных данных [15, 16]. В настоящее время активно внедряются в ведомственные сети радиосвязи современные помехозащищённые адаптивные радиолинии связи декаметрового диапазона (см. рис. 1) [17], в том числе и со скачкообразной псевдослучайной (программной) перестройки радиочастоты (ППРЧ) [18-20], предназначенные для доведения информации на глобально перемещающиеся морские объекты [21].

Современная теория распространения радиоволн выделяет несколько типов каналов связи: детерминированный канал связи с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ), канал связи с АБГШ и случайной фазой, каналы связи с общими и частотно-селективными интерференционными замираниями [22-23]. Задача приёма радиосигнала для первых двух типов каналов хорошо исследована, имеет оптимальные для этих типов каналов связи схемы решения [1].

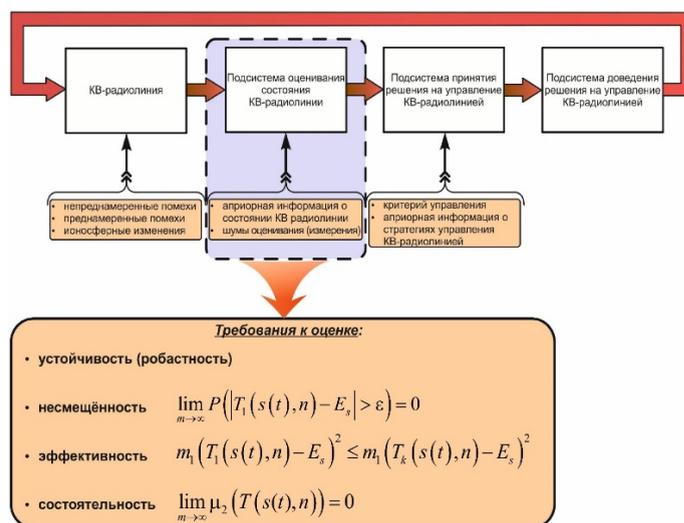


Рис. 1. Модель адаптивной радиолинии (системное представление)

Для каналов связи с общими и частотно-селективными интерференционными замираниями задача приёма сигналов решается комплексными способами [23], такими как пространственное разнесение радиоприёмных устройств, временное разнесение передаваемых сигналов, избыточное помехоустойчивое кодирование, адаптация радиолинии по рабочей частоте [24, 25]. В каналах с общими и интерференционными замираниями уровень сигнала в точке приёма в течение некоторого периода времени можно считать постоянным, на основе отношения длительности элементарной посылки и указанного периода времени в теории радиоприёма введена классификация замираний по двум классам: медленных и быстрых замираний [26-28]. Авторы ряда фундаментальных научных работ имеют разные подходы к критерию временного показателя. Однако сущность подхода неизменна и основана на временных характеристиках автокорреляционной функции случайного процесса, характеризующего изменение уровня сигнала в точке приёма на определённом временном интервале [1, 2, 29].

При оценивании параметров сигнала в детекторе радиоприёмного устройства для медленных замираний можно произвести усреднение значения уровня сигнала (коэффициента передачи) [30]. В случае быстрых замираний случайный процесс на длительности элементарной посылки оказывается нестационарным [31]. Сигнал в канале связи с замираниями подвержен не только амплитудным мультипликативным воздействиям, но и случайному изменению фазы. Функционал расчёта корреляционного интеграла сигнала, принимаемого из канала связи, с опорным гармоническим (аналитическим) сигналом в таких условиях, будет неустойчивым, а накопление энергии сигнала (комплексной огибающей) – оценивание энергетических параметров становится невозможным.

Можно сделать вывод, что в условиях нестационарности параметров сигнала в канале связи, целесообразно применение в радиоприёмных устройствах непараметрических ранговых функционалов оценки, обладающих инвариантными свойствами вероятностей ошибок первого и второго рода, к виду распределения случайной величины [2]. Наиболее выраженными инвариантными свойствами обладает процедура ранжирования результатов расчёта взаимнокорреляционного

интеграла, которая преобразует их в последовательность целых чисел – рангов, зависящих от относительного уровня вычисления операции расчёта взаимнокорреляционного интеграла информационной выборки среди всех вычисленных значений корреляционных функций опорных и информационной выборки [29].

На основе рассмотренного подхода предложен способ непараметрической ранговой оценки отношения сигнал/шум в устройствах беспроводной связи [30]. Способ реализован в ранговом детекторе сигналов МПЧТ и представляет собой статистическую процедуру оценки сдвига.

Модель помехозащищённого радиоканала декаметрового диапазона

В целях оценки статистических свойств непараметрических ранговых тестов и подтверждения возможности применения их в качестве функционалов оценки для различения сигналов многопозиционной частотной телеграфии (МПЧТ) (международное обозначение МПЧТ – M-FSK) [32] разработана компьютерная модель помехозащищённого декаметрового канала связи со скачкообразной псевдослучайной (программной) перестройкой радиочастоты [33]. Предлагаемая модель включает:

имитатор многолучевого радиоканала для радиолинии с ППРЧ, разработанный с учётом Рекомендаций международного союза электросвязи ITU-R F.1487* «Исследование КВ модемов с шириной полосы частот до 12 кГц при использовании имитаторов ионосферных каналов»;

два вида детекторов сигналов МПЧТ, некогерентного детектора и непараметрического рангового детектора [30];

вычислительный модуль – выполняющий на основе результатов моделирования автоматический расчёт показателей устойчивости функционалов оценки детекторов и показателей эффективности и позволяющий провести сравнительный анализ функционалов оценки детекторов.

Модель выполнена в виде класса объектно-ориентированных языков программирования высокого уровня, что позволяет легко интегрировать модель в другие программные продукты.

Предлагаемая модель радиоканала учитывает особенности радиоканалов, в которых предусмотрена защита от преднамеренных помех в ходе возможного радиоэлектронного противоборства способом ППРЧ. Таким образом приёмные и передающие каналообразующие средства радиоканалов с ППРЧ должны синхронно изменять рабочую частоту радиосигнала по псевдослучайному закону.

В работах [38, 40] предложены имитационные модели радиоканалов с ППРЧ учитывающие особенности функционирования радиочастотных трактов систем связи с ППРЧ. Представленные авторами модели включают преобразователи частоты, управляемые синтезаторы частот, цифровые фильтры и другие элементы характерные моделируемым системам связи. Несмотря на то, что предложенный подход наиболее близок к моделируемым объектам, однако имеет ряд особенностей, ограничивающих возможности исследования радиоканалов с ППРЧ во всём поддиапазоне в котором выполняется ППРЧ. Функционирование радиоканала в режиме ППРЧ предполагает изменение номинала рабочей частоты в сравнительно широком диапазоне. Очевидно, что компьютерное имитационное моделирование выполняется с

использованием дискретизированных сигналов. Таким образом радиочастотный сигнал в программной среде компьютерного имитационного моделирования представляется массивом со значениями амплитуд аналогового сигнала в дискретные моменты времени. Учитывая накладываемое теоремой Котельникова ограничение на частоту дискретизации снизу, можно сделать вывод что для восстановления радиочастотного сигнала с максимальным значением частоты из диапазона ППРЧ, необходимо чтобы частота дискретизации была выше номинала максимальной частоты гармонических составляющих в спектре сигнала более чем в два раза.

Таким образом, независимо от номинала рабочей частоты, частота дискретизации будет высокой, на одно гармоническое колебание для различных рабочих частот будет приходиться разное число дискретных отсчётов. Можно сделать вывод, что значение мощности шумов квантования, возникающих при выполнении аналого-цифрового преобразования радиосигнала, для сравнительно широких радиочастотных диапазонов, в которых выполняется ППРЧ будет не одинаковым (не равномерным) и зависит от номинала рабочей частоты, что существенно влияет на результаты моделирования.

В отличие от SDR-радиоприёмников, выполняющих дискретизацию сигнала на радиочастоте за счёт высокопроизводительного аналого-цифрового преобразователя [34, 35], программная среда в которой выполняется моделирование, выполняет расчёты, связанные с дискретизацией и квантованием сигнала, последетекторной обработкой, имитации физической среды распространения радиоволн на одном и том же вычислительном устройстве.

Постоянно высокая частота дискретизации требует существенных затрат вычислительных ресурсов. Таким образом, моделирование систем радиосвязи с ППРЧ, учитывающих особенности радиочастотного тракта, требует высокопроизводительных вычислительных аппаратных средств. Существенное отличие соотношения радиочастоты в нижней и в верхней части диапазона ППРЧ к частоте дискретизации может вносить неточность, связанную с особенностями вычисления и обработки дискретизированных сигналов в имитационной модели [35].

Наиболее предпочтительный подход при моделировании систем радиосвязи с ППРЧ декаметрового диапазона представлен в [36]. Разработанная модель учитывает скачкообразно меняющуюся помеховую обстановку, а также АЧХ и ФЧХ декаметрового канала, и параметры их изменения во времени, описываемые параметрами модели Ваттерсона [33]. Однако в предложенной в [36] модели скачкообразно меняются параметры имитатора среды распространения, при этом частоту дискретизации в таком случае можно выбрать в сравнении с предложенными моделями [37, 38] низкой и постоянной.

Имитатор радиоканала декаметрового диапазона с ППРЧ

Диапазон частот, в котором выполняется скачкообразная псевдослучайная перестройка радиочастоты декаметровых радиоканалов связи равен единицам мегагерц. Ограничение частотного диапазона обусловлено шириной полосы пропускания октавных фильтров современных радиопередающих устройств декаметрового диапазона, а также диапазонными свойствами антенно-фидерных устройств.

Учитывая положения Рекомендаций международного союза электросвязи ИТУ-R F.1487* «Исследование КВ модемов с шириной полосы частот до 12 кГц при использовании имитаторов ионосферных каналов» [27], а также модель ионосферы IRI-2012 условия распространения, приближённо можно считать однородными в пределах полосы 12 кГц.

Таким образом, частотный диапазон, в котором выполняется ППРЧ может быть разделён на поддиапазоны с различными значениями параметров канала для каждого из поддиапазонов. Каждый такой поддиапазон, в модели реализован в виде программного объекта модели многолучевого радиоканала Ватгерсона. Далее по тексту объекты имитатора многолучевого радиоканала будем называть – субканалом.

Субканал включает в себя два программных объекта Рэлеевского канала, для каждой магнитоионной компоненты. Субканал имитатора радиоканала выполняет мультипликативное воздействие на сигнал, поступающий в имитатор радиоканала. Амплитудно-частотная характеристика, одного из субканалов с интерференционными частотно-селективными замираниями, представлена на (рис. 2).

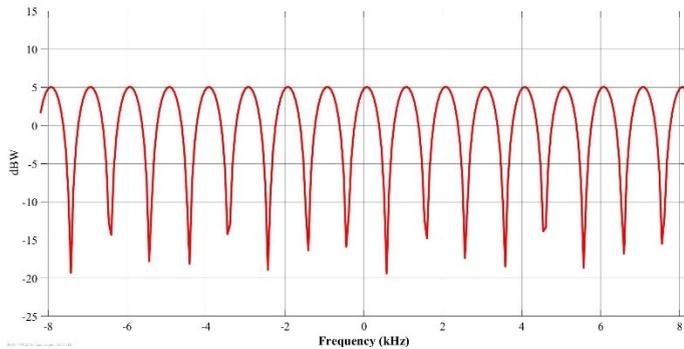


Рис. 2. АЧХ двухлучевого радиоканала, с равными амплитудами лучей

На графике (рис.2) видно, что интервал частотной корреляции равен $F_c = 1/\tau_{i,j} = 1$ кГц. АЧХ и ФЧХ субканалов меняются во времени, являются случайными величинами и зависят от параметров модели:

$\bar{\mu}_{i,j}$ – среднее значение коэффициента передачи i -го дискретного луча j -го поддиапазона (субканала имитатора).

N_j – число дискретных лучей для каждого j -го поддиапазона (субканала имитатора).

$\tau_{i,j}$ – время задержки (прохождения) i -го дискретного луча j -го поддиапазона (субканала имитатора).

$\Delta f_{\max ds_j}$ – максимальное значение Доплеровского растекания.

$f_{ds_{i,j(a)}}$, $f_{ds_{i,j(b)}}$ – средние значения Доплеровского растекания для каждой из магнитоионных компонент.

$\sigma_{i,j(a)}$, $\sigma_{i,j(b)}$ – средние квадратичные отклонения частотного растекания.

$A_{i,j(a)}$, $A_{i,j(b)}$ – коэффициенты затухания доплеровского растекания.

В связи с тем, что моделирование радиочастотных трактов требует хранения значительных объёмов данных о

дискретизированных радиочастотных сигналах и выполнения вычислений со значениями дискретных отсчётов этих сигналов. Предлагаемый способ скачкообразного изменения параметров помеховой обстановки в имитаторе радиоканала позволяет обеспечить инвариантность модели к шумам квантования, а также сократить объёмы выполняемых вычислений.

Дополнительно в предлагаемой модели по сравнению с [40] частота дискретизации снижена в 2 раза за счёт использования области отрицательных частот. В имитаторе радиоканала происходит коммутация программных субканалов, по закону псевдослучайной последовательности с равномерным распределением. Для каждого из субканалов имитатора фактического изменения радиочастоты не происходит. Это позволяет сохранить частоту дискретизации модели постоянной независимо от выбранного субканала. Одновременно функционирует только один субканал имитатора многолучевого радиоканала.

Коэффициент передачи j – субканала определяется выражением:

$$\mu_{i,j} = \tilde{\mu}_{i,j(a)} \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot \tilde{f}_{ds_{i,j(a)}} \cdot t} + \tilde{\mu}_{i,j(b)} \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot \tilde{f}_{ds_{i,j(b)}} \cdot t} \quad (1)$$

Тогда энергетический спектр коэффициентов передачи $\mu_{i,j}$ можно записать в виде [27]:

$$G_{i,j}(f) = \frac{1}{A_{i,j(a)} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{i,j(a)}} \cdot e^{\left(\frac{-(f - f_{ds_{i,j(a)}})^2}{2 \cdot \sigma_{i,j(a)}^2} \right)} + \frac{1}{A_{i,j(b)} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{i,j(b)}} \cdot e^{\left(\frac{-(f - f_{ds_{i,j(b)}})^2}{2 \cdot \sigma_{i,j(b)}^2} \right)} \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что мгновенное значение доплеровского растекания для одной из магнитоионных компонент $\tilde{f}_{ds_{i,j(a)}}$, $\tilde{f}_{ds_{i,j(b)}}$ – случайная величина с гауссовым распределением, средними значениями $f_{ds_{i,j(a)}}$, $f_{ds_{i,j(b)}}$, средними квадратичными отклонениями – $\sigma_{i,j(a)}$, $\sigma_{i,j(b)}$. Сигнал прошедший через j – ый субканал имитатора радиоканала и аддитивной гауссовой помехой на входе детектора можно представить выражением:

$$Z_j(t) = \sum_{i=1}^{N_j} \mu_{i,j}(t) \cdot S(t - \tau_{i,j}) + n(t), \quad (3)$$

где $n(t)$ – реализация гауссова случайного процесса (аддитивная гауссова помеха).

Необходимо отметить, что для большинства случаев имитационного моделирования многолучевого декаметрового радиоканала можно учитывать только одну из компонент, в таком случае замирания подчиняются рэлеевскому закону [26, 27].

При этом если значение $\Delta f_{\max ds_j}$ будет больше или равно времени излучения на одной частоте – T_{fh} :

$$T_{fh} \geq \frac{1}{\Delta f_{\max ds_j}}, \quad (4)$$

то случайный процесс на длительности $- T_{fh}$ нельзя считать стационарным.

Анализ выражений (1) и (2) позволяет сделать вывод, что случайный процесс на выходе имитатора радиоканала будет нестационарным по параметру математического ожидания (параметру сдвига), уровень сигнала на выходе имитатора радиоканала будет зависеть от коэффициента передачи каждого j -го субканала со своим набором коэффициентов передачи $\mu_{i,j}$ для i лучей в каждом j -ом субканале имитатора. Имитационная модель многолучевого радиоканала декаметрового диапазона с ППРЧ (имитатор радиоканала), см. рис. 3, была проверена на адекватность и чувствительность к входным параметрам, верифицирована путём сравнения результатов моделирования с аналитическими расчётами. Показателем для сравнения при проверке адекватности имитатора радиоканала выбрана средняя вероятность ошибки на символ на выходе декодера помехоустойчивого кода Рида-Соломона. Разработана частная имитационная модель, которая включает:

кодер и декодер Рида-Соломона с параметрами кода (255, 205) над расширением GF (2⁸);

программный имитатор многолучевого декаметрового радиоканала с ППРЧ;

счётчик ошибок, выполняющий сравнение информационных символов от источника информации с информационными символами, переданными по каналу радиосвязи с ППРЧ и помехоустойчивым кодированием Рида-Соломона;

вычислительный модуль выполнения аналитических расчётов средней вероятности ошибки на символ при заданных

параметрах частной модели.

Параметры субканалов имитаторов выбраны с учетом обеспечения режима медленных релейских замираний на длительности элементарной посылки:

$$T_{fh} \ll \frac{1}{\Delta f_{\max ds_j}}. \quad (5)$$

Средняя вероятность ошибки на символ МПЧТ для радиоканала с гауссовой помехой и некогерентным детектором определяется выражением [1]:

$$P_{ser} = \sum_{m=1}^{M-1} (-1)^{m+1} \cdot C_{M-1}^m \cdot \frac{1}{m+1} \cdot e^{-\frac{m}{m+1} \frac{K \cdot E_b}{N_0}}. \quad (6)$$

С учётом выполнения условия (4), для радиоканала с общими релейскими замираниями средняя вероятность ошибки на символ для МПЧТ определяется выражением [2]:

$$P_{ser} = \sum_{i=1}^M \frac{(-1)^{i+1} \cdot C_{M-1}^i}{1+i+i \cdot h_0^2}, \quad (7)$$

где P_{ser} – средняя вероятность ошибки на символ МПЧТ; M – число позиций МПЧТ (M-FSK); K – число бит передающихся одним символом МПЧТ $K = \log_2 M$; $h_0^2 = \frac{E_s}{N_0}$ – усреднённое отношение сигнал/шум (на символ); $q = \log_2 Q$ – число бит, которыми выражается один символ кода Рида-Соломона являющегося элементом поля Галуа GF(2^q).

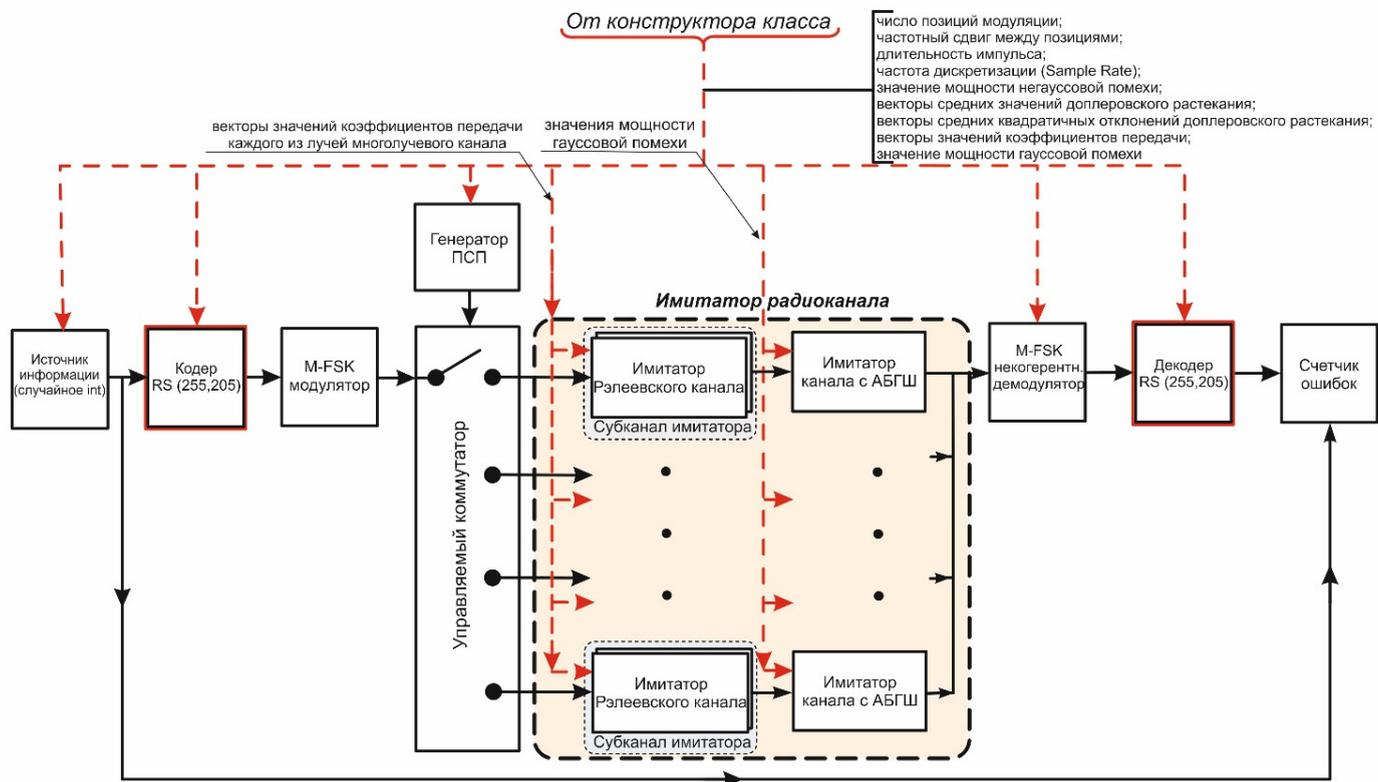


Рис. 3. Частная имитационная модель помехозащищённого декаметрового радиоканала с ППРЧ, функционирующего в условиях общих и интерференционных замираний

Далее, рассмотрим случай, когда $q:K$ (или $q \equiv 0 \pmod K$). Тогда один элемент кода Рида-Соломона передаётся в канал связи $\frac{q}{K}$ символами МПЧТ, выполняется посимвольная ППРЧ, то есть один знак МПЧТ передаётся на одной рабочей частоте. Следовательно вероятность ошибки на один кодовый символ при условии, что параметры канала связи однородны во всей полосе перестройки частоты определяется выражением:

$$P_{sRS} = 1 - (1 - P_{ser})^{\frac{q}{K}}. \quad (8)$$

С учетом выражения (8), не нарушая общности метода предложенного авторами в работах [37, 41, 42] при рассмотрении преднамеренных шумовых помех в части диапазона в котором выполняется ППРЧ ΔF_{II} , руководствуясь соображениями о том, что гипотезы о выборе субканала имитатора составляют полную несовместную группу событий, можно записать выражение для канала связи с ППРЧ, в котором полоса перестройки частоты разбита на L – субканалов:

$$P_{sRS} = 1 - \left(\sum_{j=1}^L (1 - P_{ser(j)}) \cdot \frac{\Delta f_{sc(j)}}{\Delta F_{II}} \right)^{\frac{q}{K}}. \quad (9)$$

где $\Delta f_{sc(j)}$ – ширина полосы частот для i -го субканала, определяет часть полосы перестройки частоты ΔF_{II} , в которой параметры канала можно считать равномерными.

Принимая во внимание, что номинал рабочей частоты выбирается из полосы перестройки частоты ΔF_{II} равномерно, то вероятность события, при котором номинал рабочей частоты выбран в $\Delta f_{sc(j)}$ будет равна отношению $\frac{\Delta f_{sc(j)}}{\Delta F_{II}}$.

Выражение (9) определяет среднюю вероятность ошибки на один символ кода Рида-Соломона. Тогда среднюю вероятность ошибки на символ для декаметрового радиоканала с ППРЧ с каналным помехоустойчивым кодом Рида-Соломона можно выразить [2]:

$$P_{symfhs} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=t+1}^n i \cdot C_n^i \cdot P_{sRS}^i \cdot (1 - P_{sRS})^{n-i}. \quad (10)$$

где $d = \left\lceil \frac{t-1}{2} \right\rceil$ – кодовое расстояние для кода Рида-Соломона с учётом границы Синглтона ($k \leq n - d + 1$, равенство справедливо для кодов с максимально достижимым кодовым расстоянием, в том числе Рида-Соломона) [43]; t – количество символов кодовой комбинации кода Рида-Соломона которые возможно исправить.

Проведённое имитационное моделирование и аналитические расчёты в соответствии с выражениями (9) и (10) при различных объёмах передаваемой информации (объёме статистической выборки), различных параметрах для каждого из субканалов и кодов Рида-Соломона с различными соотношениями информационных и проверочных символов показали соответствие результатов моделирования и численных расчётов (см. рис. 4).

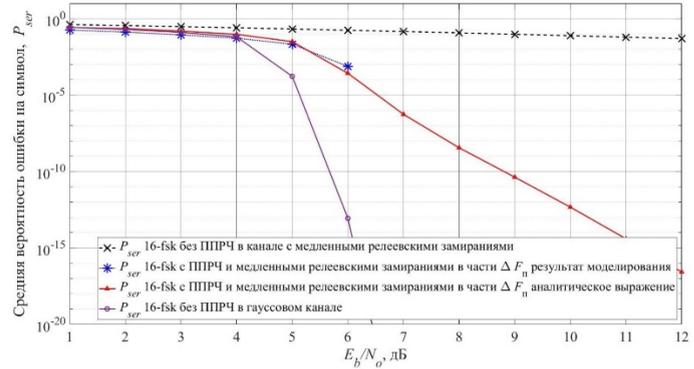


Рис. 4. Сравнительная характеристика результатов имитационного моделирования и аналитических расчётов средней вероятности ошибки на символ на выходе канального декодера Рида-Соломона (255, 205)

На (рис. 4) представлены результаты аналитических расчётов и результаты моделирования с использованием частной имитационной модели помехозащищённого декаметрового радиоканала с ППРЧ. Сымитирована ситуация, когда в небольшой части частотного диапазона перестройки рабочей частоты наблюдаются общие релейские замирания, в остальной, большей части диапазона действует только аддитивная гауссова помеха. Выполнены 12 итераций расчёта с дискретным, последовательным увеличением отношения сигнал/шум h_0^2 в точке приёма.

Кодер Рида-Соломона выполняет жёсткое декодирование, выбор разрешённой кодовой комбинации по критерию максимума правдоподобия не выполняется, в случае превышения числа ошибок в кодовой комбинации, возникающих при приёме радиосигнала, исправляющих возможностей кода ($t = 25$), кодер выдаёт информационные символы без исправления. Информационные символы, полученные от декодера, сравниваются с символами, полученными от источника информации (см. рис. 3).

Результаты моделирования не отображаются для случаев, когда кодер полностью исправил ошибки. Вносимый вклад в среднюю вероятность ошибки на символ субканалом имитатора, в котором происходят медленные релейские замирания пропорционален вероятности выбора этого субканала, то есть пропорциональна ширине полосы частот соответствующей этому субканалу. С увеличением отношения сигнал/шум в точке приёма, субканал в котором действуют релейские замирания вносит основной вклад в среднюю вероятность ошибки на символ, что показано на графиках (см. рис. 4) для радиоканала с ППРЧ и медленными релейскими замираниями в части диапазона радиочастот, в котором выполняется ППРЧ.

Полученные зависимости (см. рис. 4) подтверждают соответствие результатов моделирования, результатам аналитических расчётов в соответствии с выражениями (6, 7, 9, 10), что подтверждает адекватность функционирования программного имитатора радиоканала.

Показатели эффективности функционалов оценки

Структура модели предусматривает применение для приёма сигналов МПЧТ двух видов детекторов. Некогерентного детектора сигналов МПЧТ и детектора сигналов МПЧТ с

функцией ранговой оценки отношения сигнал/шум в точке приёма (см. рис. 5) [30]. Одновременное применение двух детекторов позволяет по результатам моделирования произвести их сравнительный анализ по нескольким показателям эффективности и устойчивости функционалов оценки и по показателю достоверности – средней вероятности ошибки на символ для различных условий распространения радиоволн, определяемых входными параметрами модели.

Одним из основных требований при разработке функционалов оценок, на основе вычисления которых принимаются решения о значении информационного символа, а также на адаптацию параметров радиоканала по частоте и сигнально-кодовой конструкции, являются эффективность и устойчивость оценки. Указанные свойства можно оценить, сравнивая исследуемый функционал оценки с применяемым, например с некогерентным оптимальным детектором, для канала с априорно определенными параметрами аддитивной смеси сигнал/помеха в точке приёма (с гауссовой аддитивной помехой и случайной фазой).

В современных SDR радиоприёмных устройствах декаметрового диапазона широко применяются некогерентные схемы приёма сигналов МПЧТ. По результатам приёма на выходе детектора формируется I/Q сигнал, на основе оценки которого принимается решение о значении принятого информационного символа.

Разработанная компьютерная модель позволяет в процессе моделирования оценить устойчивость и эффективность предлагаемого функционала ранговой оценки [30] с

функционалом оценки некогерентного оптимального детектора по двум показателям: асимптотической относительной эффективности; функции влияния.

Указанные показатели введены в теорию оценки в работах Д. Тьюки, Г. Ван Триса, П. Хьюбера, Ф. Хампеля. Но существенное развитие применительно к теории электрической связи получили благодаря работам Б. Левина [2], а также П. Бакута и В. Богдановича [44].

Асимптотическая относительная эффективность показывает, как относятся рассеяния оценок, выполненных с помощью двух сравниваемых функционалов оценки за одинаковое количество экспериментов (при одинаковом объёме выборки), и определяется в предельной форме как [45]:

$$e_{r,c} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\frac{D(T_{rank})}{(E(T_{rank}))^2}}{\frac{D(T_{corr})}{(E(T_{corr}))^2}}, \quad (11)$$

где T_{rank} – функционал ранговой оценки; T_{corr} – функционал оценки корреляционной функции; $D(T_{rank})$ – дисперсия ранговой оценки; $D(T_{corr})$ – дисперсия оценки корреляционной функции; $E(T_{rank})$ – математическое ожидание ранговой оценки; $E(T_{corr})$ – математическое ожидание оценки корреляционной функции.

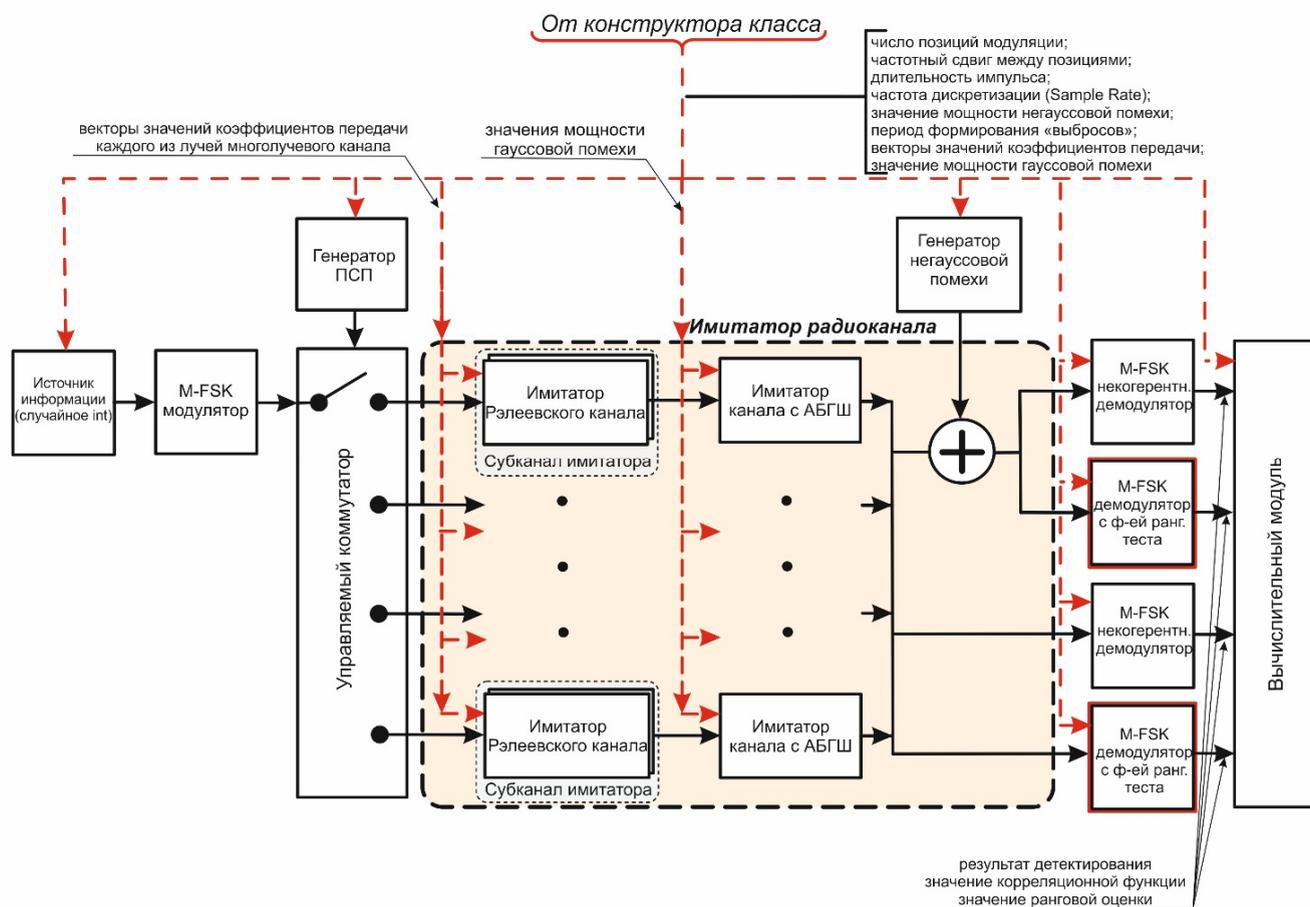


Рис. 5. Компьютерная модель помехозащищённого декаметрового радиоканала функционирующего в условиях общих и интерференционных замираний

Значительно отличающиеся значения статистической выборки, а также изменение параметров распределения на временном интервале при ограниченном объёме выборки могут существенно повлиять на значение оценки параметра. Фундаментальным инструментом теории устойчивых оценок, введённым Ф. Хампелем является функция влияния [45]. Из предельного выражения (2) видно, что оценивается влияние на функционал оценки $T(x)$ появляющихся в выборке с малой относительной частотой ε , значений, существенно отличающихся от закона распределения F :

$$IC(x, F, T) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{T((1-\varepsilon) \cdot F + \varepsilon \cdot \delta_x) - T(F)}{\varepsilon}, \quad (12)$$

где $\varepsilon = \frac{n_d}{n}$ – относительная частота появления «выбросов»;

T – функционал оценки; δ_x – значения выборки «загрязняющего» распределения, отличающегося от основного распределения F ; n_d – число появившихся выбросов из выборки размера $n = 512$; n – общий размер выборки.

В [2] была предложена уточненная модель Д.Тьюки зашумления основной выборки (3):

$$F(x) = (1-\varepsilon) \cdot \Phi\left(\frac{x-m_x}{\sigma_x}\right) + \varepsilon \cdot \delta_x, \quad (13)$$

где Φ – функция распределения нормальной случайной величины.

Выборка дискретной случайной величины, представляющая собой аддитивную смесь аналитического сигнала МПЧТ и гауссовой помехи с существенно отличающимися значениями («выбросами»), появляющимися с относительной частотой ε , представлена на рисунке 6.

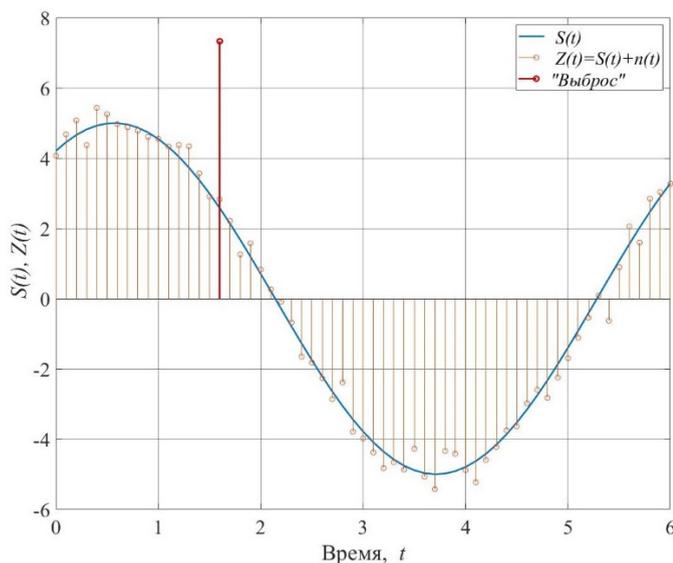


Рис. 6. Аддитивная смесь гармонического сигнала и гауссовой помехи и существенно отличающееся значение выборки («выброс») в соответствии с моделью Д.Тьюки

Разработанная компьютерная модель (рис. 5), учитывает предложенную модель зашумления (13) основной выборки случайной величины, соответствующей нормальному закону распределения «выбросами» и позволяет рассчитать по

результатам моделирования указанные выше показатели эффективности функционалов оценки: относительную асимптотическую эффективность $e_{r,c}$ одного функционала оценки относительно другого и функции влияния $IC(x, F, T)$ для каждого из функционалов оценки.

Формализованная постановка задачи на моделирование

С учётом проведённого анализа особенностей существующих моделей распространения радиоволн характерных декаметровым радиоканалам, режимов работы радиоканалов с ППРЧ, принимая во внимание гипотезу об априорной неопределённости статистических параметрах аддитивной смеси сигнал/шум на входе радиоприёмного устройства, а также рассмотренные показатели эффективности возможно выполнить формализованную постановку задачи на моделирование.

Модель – ψ_m декаметрового помехозащищённого радиоканала связи с ППРЧ – S_{rc} , **множеством входных параметров модели:**

- $\Delta f_{max ds}$ – максимальное значение доплеровского растекания;
- J – число субканалов имитатора радиоканала;
- K_{accum} – коэффициент накопления (размер частотно-временной матрицы);
- N_0 – спектральная плотность мощности аддитивной гауссовой помехи в точке приёма;
- $\tau_{i,j}$ $\tau_{i,j}$ – время задержки (прохождения) i -го дискретного луча j -го поддиапазона (j -го субканала имитатора);
- $\mu_{i,j}$ – среднее значение коэффициента передачи i -го дискретного луча j -го поддиапазона (j -го субканала имитатора);
- $N_j | i \in [1 \dots N_j]$ – число дискретных лучей для каждого j -го поддиапазона (j -го субканала имитатора);
- ε – относительная частота формирования сильно отличающихся значений выборки.

Множество промежуточных параметров модели:

- \tilde{y}_i – выборка (массив) дискретных отсчётов аналитического сигнала МПЧТ (М-FSK) на выходе имитатора многолучевого декаметрового канала с ППРЧ;
- $\tilde{y}_{i(\varepsilon)}$ – выборка (массив) дискретных отсчётов аналитического сигнала МПЧТ (М-FSK) на выходе имитатора многолучевого декаметрового канала с ППРЧ с внесёнными значительно отличающимися значениями.

Множество выходных параметров модели:

- $T_{corr}(y_i)$ – выборка корреляционных оценок на выходе некогерентного детектора сигналов МПЧТ;
- $T_{rank}(y_i)$ – выборка ранговых оценок на выходе рангового детектора сигналов МПЧТ;
- $T_{corr}(y_{i(\varepsilon)})$ – выборка корреляционных оценок на выходе некогерентного детектора сигналов МПЧТ с учётом внесённых значительно отличающихся значений выборки аналитического сигнала;
- $T_{rank}(y_{i(\varepsilon)})$ – выборка ранговых оценок на выходе рангового детектора сигналов МПЧТ с учётом внесённых значительно отличающихся значений выборки аналитического сигнала;

Множество показателей эффективности:

- $IC(x, F, T_{corr})$ – функция влияния корреляционного функционала оценки T_{corr} ;
- $IC(x, F, T_{rank})$ – функция влияния рангового функционала оценки T_{rank} ;

$e_{r,c}$ – асимптотическая относительная эффективность рангового функционала оценки относительно корреляционного функционала оценки;

$P_{ser\ corr}, P_{ser\ rank}$ – средняя вероятность ошибки на символ на выходе некогерентного и рангового детекторов сигналов МПЧТ (M-FSK).

При этом на значения параметров множеств входных и внутренних параметров наложены **ограничения физической реализуемости**:

$m_1(y_i, t) \neq const$ – для нестационарного случайного процесса математическое ожидание уровня сигнала в точке приёма не постоянная величина;

$\{\mu_{i,j} \in M | W_{Ray}(\mu_{i,j})\}$ – коэффициент передачи субканала – случайная эрлеевская величина;

$R_{\mu\mu}(\tau \neq 0, \Delta f_{\max ds_{i,j}}) > 0$ – корреляционная функция коэффициентов передачи, определяемых случайной эрлеевской величиной, имеет ограниченный спектр;

$T_{fh} \leq \frac{1}{\Delta f_{\max ds}}$ – на длительности элементарной посылки (времени излучения на одной частоте сигнала ППРЧ) уровень сигнала можно считать постоянным.

$\Psi_m : \langle S_{rc}, \Delta f_{\max ds}, N_0, J, K_{accum}, \tau_{i,j}, \bar{\mu}_{i,j}, \varepsilon, \tilde{y}_i, \tilde{y}_{i(\varepsilon)} \rangle \rightarrow$

$T_{corr}(y_i), T_{rank}(y_i), T_{corr}(y_{i(\varepsilon)}), T_{rank}(y_{i(\varepsilon)}),$

$IC(y_i, F_y, T_{corr}(y_i)), IC(y_i, F_y, T_{rank}(y_i)),$

$e_{r,c}, P_{ser\ corr}, P_{ser\ rank} | m_1(y_i, t) \neq const, \{\mu_{i,j} \in M | W_{Ray}(\mu_{i,j})\},$

$R_{\mu\mu}(\tau \neq 0, \Delta f_{\max ds_{i,j}}) > 0 | T_{fh} \leq \frac{1}{\Delta f_{\max ds_{i,j}}}$

Результаты имитационного моделирования и расчётов устойчивости функционалов оценки по результатам моделирования

Расчёт показателей эффективности и устойчивости функционалов оценки, асимптотической относительной эффективности $e_{r,c}$ и функций влияния функционалов корреляционной $IC(x, F, T_{corr})$ и ранговой оценок $IC(x, F, T_{rank})$ производится в вычислительном модуле на основе промежуточных и выходных параметров модели имитационной компьютерной модели (см. рис. 7).

На выходе некогерентных M-FSK детекторов и M-FSK детекторов с функцией ранговой оценки формируются по две выборки ранговых оценок $T_{rank}(y_{i(\varepsilon)}), T_{rank}(y_i)$ и по две выборки корреляционных оценок $T_{corr}(y_{i(\varepsilon)}), T_{corr}(y_i)$ (комплексной огибающей). По одной из каждого вида выборок, сформированных с учётом аддитивного воздействия сильно отличающихся значений «выбросов» $T_{corr}(y_{i(\varepsilon)}), T_{rank}(y_{i(\varepsilon)})$.

На каждом цикле моделирования увеличивается относительная частота появления «выбросов» $\varepsilon = \frac{n_d}{n}$ в диапазоне значений от $\frac{1}{512}$ до $\frac{512}{512}$.

Асимптотическая относительная эффективность рассчитывается на основе массивов оценок комплексной

огibaющей $T_{corr}(y_{i(\varepsilon)})$ и ранговых оценок $T_{rank}(y_{i(\varepsilon)})$ полученных по результатам моделирования. На каждой итерации цикла в вычислительном модуле рассчитываются массивы значений математического ожидания и дисперсии корреляционной и ранговой оценок при увеличивающейся на каждой итерации цикла относительной частоте появления сильно отличающихся значений выборки ε .

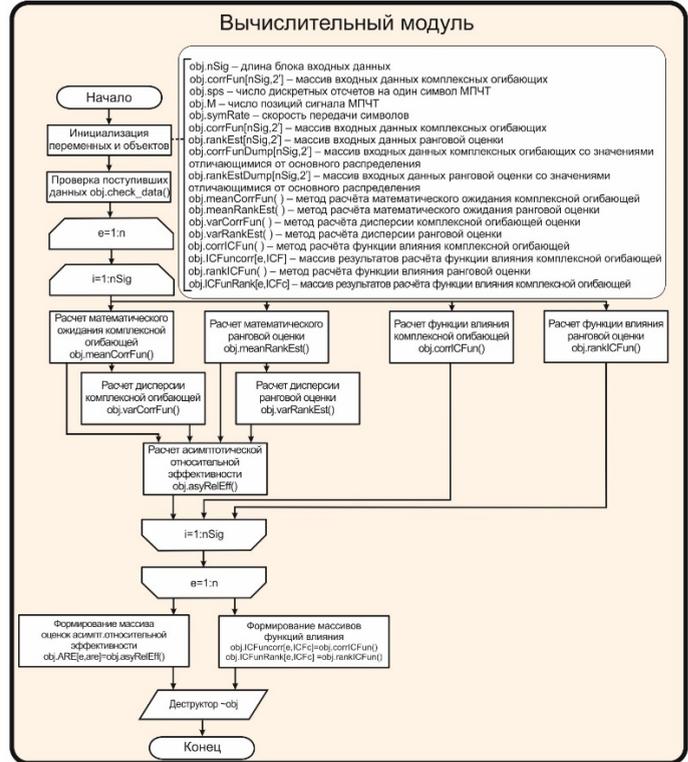


Рис. 7. Программный алгоритм функционирования вычислительного модуля имитационной модели

Асимптотическая относительная эффективность определена на закрытом интервале (отрезке) значений относительной частоты появления «выбросов» $\varepsilon \in [0, 1]$.

Результаты моделирования, приведенные на графике рисунка 8, позволяют сделать вывод, что ранговый функционал оценки T_{rank} эффективней функционала оценки корреляционной функции T_{corr} , по показателю асимптотической относительной эффективности $e_{r,c} < 1$, когда основная выборка «загрязнена» значениями, сильно отличающимися от основного закона распределения составляющими до 33% объёма выборки.

Необходимо отметить, что если треть выборки не относится к основному распределению $\Phi(x)$, то сделать вывод о принадлежности элементов выборки к распределению $\Phi(x)$ становится невозможным и некорректным независимо от применяемого функционала оценки.

В вычислительном модуле имитационной модели (см. рис. 7), на основе полученных по результатам моделирования выборок значений ранговых и корреляционных оценок, выполненных с учётом «выбросов» $T_{rank}(y_{i(\varepsilon)}), T_{corr}(y_{i(\varepsilon)})$, и с учётом аддитивной гауссовой смеси сигнал/шум $T_{rank}(y_{i(\varepsilon)}), T_{rank}(y_i)$, выполняется расчёт функций влияния рангового и корреляционного функционалов оценки.

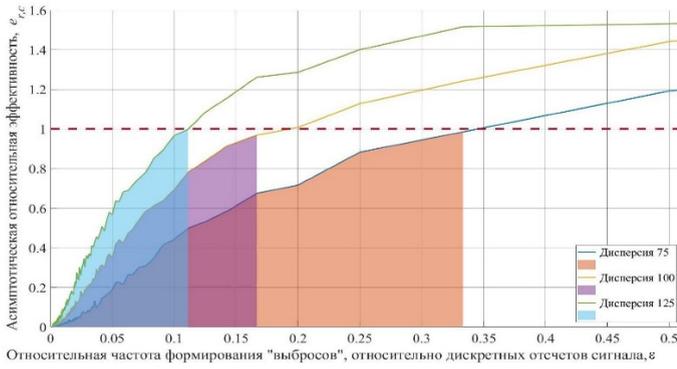


Рис. 8. График асимптотической относительной эффективности рангового функционала оценки относительно функционала оценки корреляционной функции

На рисунках 9 и 10 представлены результаты расчётов функции влияния оценки корреляционного интеграла $IC(x, F, T_{corr})$ и функционала ранговой оценки $IC(x, F, T_{rank})$. Анализ полученных значений функций влияния $IC(x, F, T_{corr})$ и $IC(x, F, T_{rank})$ показывает, что оценка, полученная с помощью функционала корреляционного интеграла, существенно подвержена влиянию значений выборки, значительно отличающихся от основного распределения.

Принимая во внимание определение функции влияния $IC(x, F, T)$ (11), итеративно уменьшая относительную частоту появления значительно отличающихся значений $\varepsilon \rightarrow 0+$, функция влияния корреляционного интеграла $IC(x, F, T_{corr})$ возрастает, рост носит асимптотический характер, определяется знаменателем выражения (11).

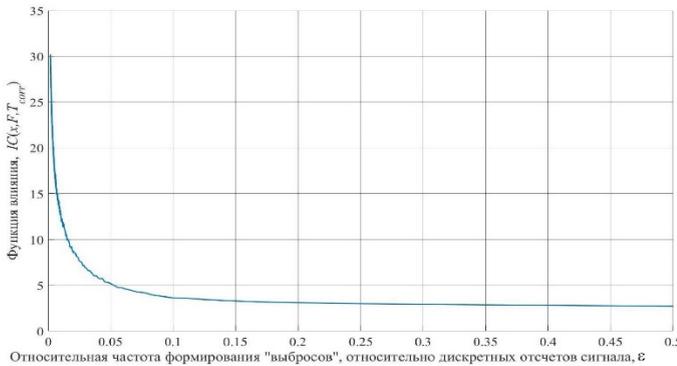


Рис. 9. График влияния функционала оценки корреляционного интеграла $IC(x, F, T_{corr})$

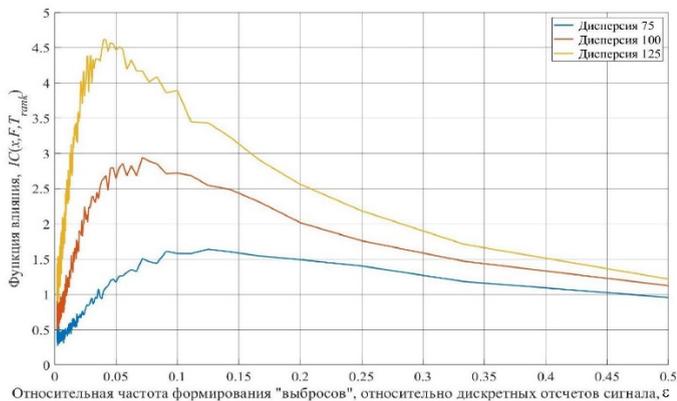


Рис. 10. График влияния рангового функционала оценки $IC(x, F, T_{rank})$

Можно сделать вывод, что уже одно значительно отличающееся значение оказывает существенное воздействие на функцию влияния $IC(x, F, T_{corr})$. Корреляционная оценка непосредственно зависит от номинала значения расчёта корреляционного интеграла. Функция влияния рангового функционала оценки $IC(x, F, T_{rank})$ убывает (см. рис. 10 и 11) при $\varepsilon \rightarrow 0+$.

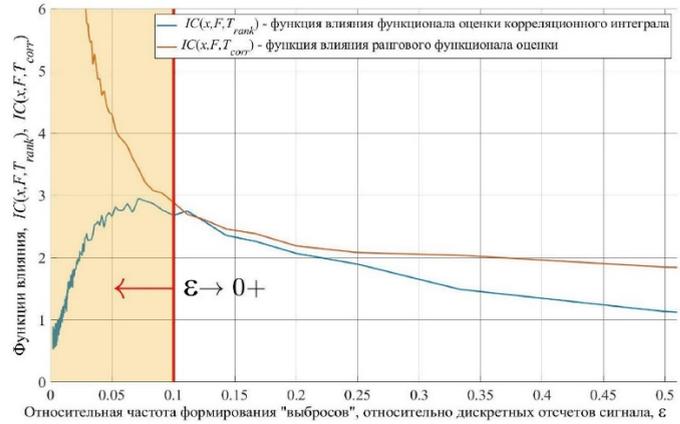


Рис. 11. Графики влияния корреляционного интеграла $IC(x, F, T_{corr})$ и рангового функционалов оценки $IC(x, F, T_{rank})$

Обратим внимание, что $IC(x, F, T_{rank})$ является ограниченной на всем интервале $\varepsilon \in [0, 1]$. Свойство устойчивости рангового функционала оценки характеризуется поведением его функции влияния $IC(x, F, T_{rank})$ в области малых значений относительной частоты появления «выбросов»/

Таким образом, проявляются редуцирующие свойства рангового функционала оценки к значительно отличающимся значениям в выборке. Можно сделать вывод, что функционал ранговой оценки T_{rank} устойчив к появлению относительно небольшого числа значительно отличающихся значений.

Результаты имитационного моделирования и расчётов средней вероятности ошибки на символ для радиоканала с ППРЧ по результатам моделирования

Разработанная модель также позволяет получить оценку средней вероятности ошибки на символ M – позиционной МПЧТ для декаметрового канала связи с ППРЧ в условиях обших и интерференционных замираний, а также воздействия гауссовой шумовой помехи в точке приёма. Средняя вероятность ошибки на символ P_{ser} рассчитывается для нескольких способов приёма сигнала МПЧТ:

с накоплением корреляционной оценки на временном интервале $T_{sym} = K_{accum} \cdot T_{fh}$;

с накоплением символов на временном интервале $T_{sym} = K_{accum} \cdot T_{fh}$, с принятием решения о значении накапливаемых символов по критерию максимума корреляционной оценки на временном интервале T_{fh} ;

с накоплением ранговых оценок на временном интервале $T_{sym} = K_{accum} \cdot T_{fh}$, рассчитанных на T_{fh} для каждой частотной позиции сигнала МПЧТ (11).

Входные параметры имитатора радиоканала установлены в соответствии с рекомендованными параметрами [27] для среднеширотной радиолинии с удовлетворительными условиями, для части диапазона рабочих частот ΔF_n в котором выполняется ППРЧ.

$$P_{ser_{fhs}} = 1 - \left(\sum_{j=1}^L (1 - P_{ser(j)}) \cdot \frac{\Delta f_{sc(j)}}{\Delta F_{II}} \right). \quad (17)$$

Формула (17) определяет среднюю вероятность ошибки на символ на длительности одной элементарной посылки и справедлива, только если коэффициент передачи субканала на длительности временного интервала можно считать постоянным $m_1(y_i, t) = const$. Используя выражения (6), (7) и (17) рассчитаем среднюю вероятность ошибки на символ для сигнала МПЧТ с ППРЧ (см. рис. 14 и 15). На графиках представлена бордовой линией без маркеров. Расчёт выполнен только для коэффициента накопления $K_{accum} = 1$. Для значений $K_{accum} > 1$, с учётом того что $m_1(y_i, t) \neq const$ может быть не постоянным, усреднение коэффициента передачи субканала $\mu_{i,j}$ будет не корректно.

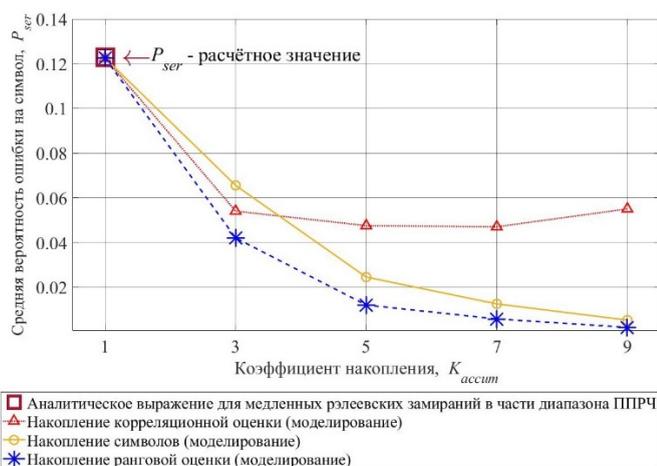


Рис. 14. Графики зависимости средней вероятности ошибки на символ для различных функционалов оценки в зависимости от значения коэффициента накопления K_{accum} (реализация 1)

При $K_{accum} = 1$, результаты аналитических расчётов и моделирования практически совпадают (с точностью до 0,1 %). Так как значения автокорреляционных интегралов являются прообразами отображения рангового функционала оценки T_{rank} , то средние вероятности ошибок на символ для автокорреляционного интеграла, накопления символов и рангового функционалов оценки при $K_{accum} = 1$ будут совпадать.

Накопление корреляционной некогерентной оценки с увеличением коэффициента накопления $K_{accum} \geq 3$, практически не изменяет среднюю вероятность ошибки на символ, что свидетельствует о влиянии свойств корреляционной функции в условиях нестационарности уровня сигнала, которая равномерно непрерывна только на ограниченном интервале.

Результаты моделирования показали, что при дискретном увеличении $K_{accum} \in \{3, 5, 7, 9\}$, в условиях нестационарности уровня сигнала, автокорреляционный интеграл неустойчив в сравнении с ранговым функционалом оценки. Ранговый функционал T_{rank} обеспечивает более устойчивую оценку выборки нестационарного случайного процесса, которым является случайное значение уровня сигнала в точке приёма для декаметрового радиоканала в условиях общих интерференционных замираний. Предложенный в [11] ранговый функционал оценки снижает среднюю вероятность ошибки на символ.

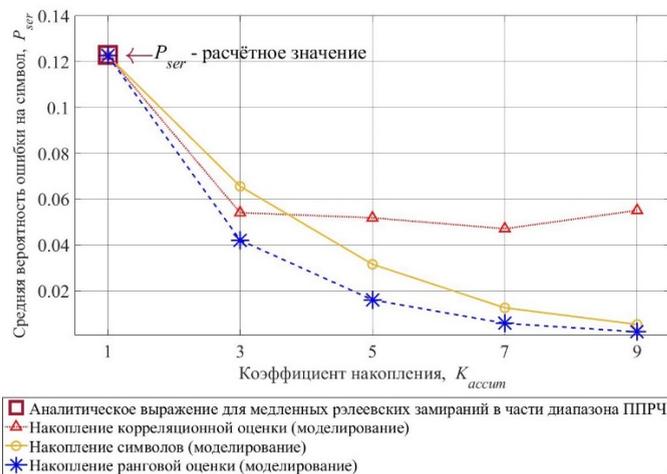


Рис. 15. Графики зависимости средней вероятности ошибки на символ для различных функционалов оценки в зависимости от значения коэффициента накопления K_{accum} (реализация 2)

В таблице 1 представлены результаты моделирования процесса передачи информации в декаметровом канале связи сигналами 8-позиционной МПЧТ (8-FSK) в различных условиях распространения, при коэффициенте накопления $K_{accum} = 3$.

Таблица 1

Оценка средней вероятности ошибки на бит для различных условий распространения

Тип детектора	E_s/N_0	Количество лучей	$P_{ser} / n_{err} / N_{symbol}$
Однлучевой гауссовский канал со стационарным уровнем сигнала			
Некогерентный детектор МПЧТ	5 дБ	1	0/4000
Ранговый детектор МПЧТ			0,00025/1/4000
Двухлучевой рэлеевский канал с равными амплитудами лучей			
Некогерентный детектор МПЧТ	10 дБ	2	0,119/476/4000
Ранговый детектор МПЧТ			0,0063/25/4000
Двухлучевой рэлеевский канал (радиотрасса Санкт-Петербург – Омск, 6 марта 2023 г.)			
Некогерентный детектор МПЧТ	43 дБ, 31 дБ	2	0,0215/86/4000
Ранговый детектор МПЧТ			0,00025/1/4000
Однлучевой канал с общими рэлеевскими замираниями			
Некогерентный детектор МПЧТ	7 дБ	1	0,1944/779/4000
Ранговый детектор МПЧТ			0,0293/117/4000

В точке приёма детектирование выполняется с помощью некогерентного детектора и рангового детектора сигналов МПЧТ. По результатам детектирования каждый детектор принимает решение о значении информационного символа. Последовательности полученных информационных символов с выхода каждого из детекторов сравниваются с исходной информационной последовательностью, выполняется расчёт вероятности ошибки на символ для каждого из детекторов.

В условиях гауссова канала связи при стационарном уровне отношения сигнал/шум в точке приёма некогерентный детектор сигналов МПЧТ имеет выигрыш в средней вероятности ошибки на символ P_{ser} при отношении сигнал/шум менее 5 дБ. В случае нестационарного уровня отношения сигнал/шум на длительности элементарной посылки (времени излучения одной из 8 частотных позиций сигнала МПЧТ), ранговый детектор обеспечивает выигрыш в средней вероятности ошибки на символ P_{ser} . Необходимо отметить, что в большинстве случаев любой ионосферный декаметровый радиоканал имеет нестационарные параметры распределения [18].

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

Разработанная компьютерная модель позволяет получить результаты, не противоречащие теории электрической связи и теории оценок, применяемые показатели оценки эффективности чувствительны к изменению входных параметров модели.

Сравнительный анализ рангового и корреляционного функционала оценки по показателям асимптотической относительной эффективности $e_{r,c}$, сравнению функций влияния $IC(x, F, T)$ и показателю средней вероятности ошибки на символ $P_{ser\ corr} > P_{ser\ rank}$ в декаметровых каналах связи с общими и интерференционными замираниями показывает, что ранговой функционал оценки эффективней функционала оценки корреляционного интеграла.

Устойчивость рангового функционала оценки обеспечивает эффективность оценки в условиях нестационарности параметров распределения на длительности элементарной посылки (периоде интегрирования).

Литература

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970 с. 496.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники М.: Радио и связь, 1989. 653 с.
3. Ороцук И.М., Сучков А.Н., Кадочников М.М. Статистическая модель высоконаправленной цифровой антенной решетки пространственно-корреляционным методом обработки сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 12. DOI 10.30898/1684-1719.2023.12.10.
4. Кутузов В.М., Овчинников М.А., Виноградов Е.А. Характеристики точности параметрического метода Берга при пространственной обработке сигналов в линейной неэквидистантной антенной решетке // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 60-71. DOI 10.32603/1993-8985-2021-24-3-60-71.
5. Dvornikov S.S., Zheglov K.D., Dvornikov S.V. SSB signals with controlled pilot level // T-Comm. 2023. Vol. 17, No. 3, pp. 41-47. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47.
6. Егоров В.В., Тимофеев А.Е. Обратный канал в адаптивных коротковолновых радиосистемах передачи информации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2013. № 6. С. 3-8.
7. Егоров В.В., Маслаков М.Л. Использование преобразования Хартли для решения интегрального уравнения типа свёртки // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 2. С. 2-6.
8. Дворников С.В., Дворников С.С., Жеглов К.Д. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 11. С. 15-20. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.
9. Егоров В.В. Адаптивное управление параметрами коротковолновых систем передачи данных // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 47-52.
10. Ананьев А.В., Лютин В.И., Иванников К.С. Синтез бортовых приемных устройств совмещенной обработки радиолокационных и информационных сигналов беспилотных летательных аппаратов малого класса // Телекоммуникации. 2022. № 9. С. 9-20. DOI 10.31044/1684-2588-2022-0-9-9-20.
11. Савватеев Ю.И., Назаров О.В., Бывшев М.Е. Структурный синтез оптимальных алгоритмов многоканального приема сигналов на фоне непрерывной помехи и шума в однолучевом канале распространения радиоволн // Радиотехника. 2007. № 4. С. 95-136.
12. Дворников С.В., Балыков А.А. Предложения по управлению скоростью передачи и помехоустойчивостью сигналов с перестановочной частотной модуляцией // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 6. С. 20-26. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26.
13. Гусев А.В. Непараметрическая модель априорной неопределенности при обработке выходного сигнала резонансных гравитационных антенн (режим медленной фильтрации) // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2006. № 3. С. 41-44.
14. Добровидов А.В. Автоматические методы выделения полезных сигналов на фоне помех в условиях непараметрической неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2011. № 2. С. 56-70.
15. Горпинич М., Бахтеев О.Ю., Стрижов В.В. Градиентные методы оптимизации метапараметров в задаче дистилляции знаний // Автоматика и телемеханика. 2022. № 10. С. 67-79. DOI 10.31857/S0005231022100075.
16. Попков Ю.С., Попков А.Ю. Кросс-энтропийная оптимальная редукция размерности матрицы данных с ограничением информационной ёмкости // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488, № 1. С. 21-23. DOI 10.31857/S0869-5652488121-23.
17. Егоров В.В., Тимофеев А.Е. Установление частотно-временной синхронизации в многочастотных КВ-системах передачи данных // Электросвязь. 2013. № 7. С. 41-44.
18. Гордиенко Д.Ю., Дворников С.В. Корреляционный прием частотно-манипулированных сигналов в режиме с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 3. С. 18-22. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-3-18-22.
19. Хвостунов Ю.С. Предложения по построению аналоговой части SDR радиоприёмных устройств декаметрового диапазона системы радиосвязи с ППРЧ // Техника средств связи. 2022. № 1(157). С. 35-44.
20. Запорожец Г.В., Руденко В.Л., Скогорев К.К. Использование геометрического подхода для оценки эффективности функционирования радиоэлектронных систем РТК с ППРЧ в условиях радиоэлектронного конфликта // Радиотехника. 2018. № 12. С. 103-110. DOI 10.18127/j00338486-201812-13.
21. Жуков Г.А., Будко П.А., Дяченко А.Н. Повышение скорости обмена данными в направлениях «берег-море-берег» по радиотрактам декаметрового диапазона волн // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 147-174.
22. Егоров В.В., Смаль М.С. Оценка параметров распределения Накагами по рабочим сигналам // Электросвязь. 2011. № 11. С. 35-36.
23. Коваль С.А., Пашищев В.П., Копытов В.В. и др. Метод определения интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолнии // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 67-103. DOI 10.24412/2410-9916-2022-1-67-103.
24. Дворников С.В., Марков Е.В., Маноши Э.А. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 6. С. 4-9. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9.
25. Shalin G.N., Pokamestov D.A., Krykov Ya.V. et al. Adaptation of the polar coding procedure in 5G NR for signaling in rayleigh channels // T-Comm. 2023. Vol. 17, No. 11, pp. 58-63. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-11-58-63.

26. Recommendation ITU-R 520-2, pp. 1-4.
 27. Recommendation ITU-R F.1487*, pp. 1-11.
 28. *Савищенко Н.В., Остроумов О.А.* Расчет оптимального и рационального числа ветвей разнесения в каналах связи с аддитивным белым гауссовым шумом и общими замираниями Райса – Накагами. // Информационно-управляющие системы. № 5. 2015. С. 71-80.
 29. *Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А.* и др. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. С. 440.
 30. *Катанович А.А., Пыков Е.В.* Способ оценки отношения сигнал/шум в устройствах беспроводной связи // Патент на изобретение RU 2809969 С1, опублик. 19.12.2023, бюл. № 35. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2809969&TypeFile=html (дата обращения 25.12.2023).
 31. *Елисеев С.Н.* Оценка величины мощности межканальной помехи OFDM сигнала в канале с быстрыми замираниями // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11, № 4. С. 59-63.
 32. *Романов Ю.В., Хмырова Н.П.* Сравнение способов передачи сообщений сигналами систем МЧТ и ЧВС в режиме с быстрой ППРЧ // Техника радиосвязи. 2016. № 3(30). С. 7-22.
 33. *Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Балыков А.А.* Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6-12.
 34. *Хвостунов Ю.С.* Предложения по построению аналоговой части SDR радиоприёмных устройств декаметрового диапазона системы радиосвязи с ППРЧ // Техника средств связи. 2022. № 1(157). С. 35-44.
 35. *Привалов Д.Д.* Влияние частоты дискретизации и интерполяции на коэффициент битовых ошибок ГММС-сигнала // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 9. С. 108-114. DOI 10.18127/j00338486-202109-10.
 36. *Малютин А.А., Нечаев Е.Б., Меркулов Д.В., Радько П.Н.* Имитатор КВ канала с ППРЧ // Патент на полезную модель RU 101298 U1, опублик. 10.01.2011, бюл. № 21. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=101298&TypeFile=html (дата обращения 25.12.2023).
 37. *Дворников С.В., Семисошенко М.А., Домбровский Я.И., Гулидов А.А., Иванов Р.В.* Оценка помехозащищённости линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Информация и Космос. 2016. № 4. С. 11-14.
 38. *Bing M.A. Ye H.E.* Simulation of Implementation of DS/FH Hybrid Spread Spectrum Communication System [J] MATEC // 2018 International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE 2018), 22(6), pp. 1-3.
 39. *Коваль С.А.* Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем декаметровой радиосвязи: современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. № 4. 2020. С. 73-100.
 40. *Малютин А.А., Нечаев Е.Б., Меркулов Д.В., Радько П.Н.* Имитатор КВ канала с ППРЧ // Патент на полезную модель RU 101298 U1, опублик. 10.01.2011, бюл. № 21. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=101298&TypeFile=html (дата обращения 25.12.2023).
 41. *Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е.* Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // под ред. В.И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. М.: РадиоСофт, 2008. 512 с.
 42. *Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А.* Помехозащищённость систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
 43. *Гаврилюк А.Л., Махнев А.А.* О дистанционно регулярных графах, в которых окрестности вершин изоморфны графу Хоффмана-Синглтона // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428, № 2. С. 157-160.
 44. *Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А.* и др. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
 45. *Хьюбер Дж.П.* Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 304 с.

A MODEL OF A DECAMETER-BAND NOISE-PROOF RADIO CHANNEL WITH AN AUTOMATIC MONITORING SYSTEM BASED ON A NONPARAMETRIC STATISTICAL TEST

Evgeny V. Pykov, Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russia, eugene354057@list.ru

Ekena P. Stroganova, MTUCl, Moscow, Russia

Sergey V. Dvornikov, SUAI; Budyonny Military Academy of the Signal Corps, St. Petersburg, Russia, practicdsv@yandex.ru

Abstract

Purpose: the task of increasing the reliability, noise immunity and noise immunity of a radio signal at the stages of developing channel-forming radio communication means in the decameter range of radio waves can be solved on the basis of improving the methods of receiving and processing a radio signal. The medium of propagation of radio waves in the decameter range is characterized by statistically heterogeneous physical parameters. Thus, based on solving the problems of statistical communication theory, it is possible to determine the main parameters of the projected communication channels. The characteristics of the propagation medium are random variables, and a priori knowledge about the parameters of their distributions is the basis for algorithms implemented in radio receivers. The purpose of the present paper: is to develop a model of an interference-proof decametric communication channel, a radio receiving device that automatically monitors the quality of the received signal based on nonparametric rank statistics. Methods: the solution of the problem of stable assessment of the quality of the received signal is performed on the basis of statistical nonparametric methods of rank estimation, methods of the theory of radio wave propagation and methods of the theory of electrical connection. Novelty: the use of a nonparametric rank two-sample functional for evaluating received signals of multi-position frequency telegraphy (M-FSK) under conditions of nonstationarity of the distribution of a random variable over the duration of an information symbol is proposed, efficiency indicators are compared with the correlation evaluation functional. Practical relevance: increasing the reliability of receiving M-FSK signals in conditions of non-stationarity of a random process caused by general and interference fades in a decameter communication channel. A computer model of a noise-proof communication channel of the decameter range is proposed. The developed model provides an automatic calculation of the efficiency of the assessment performed in incoherent and rank signal detectors based on the simulation results. The developed functional of the rank assessment can be used to calculate the reliability index of an information symbol when implementing decoders of noise-resistant codes with the adoption of a "soft" solution.

Keywords: estimation efficiency, nonparametric rank estimation, functional estimation, asymptotic relative efficiency, influence function

References

1. L.M. Fink, "Theory of discrete message transmission," Moscow: Sov. radio, 1970. 496 p.
2. B.R. Levin, "Theoretical foundations of statistical radio engineering," Moscow: Radio and communication, 1989. 653 p.
3. I.M. Oroshchuk, A.N. Suchkov, M.M. Kadochnikov, "Statistical model of a highly directional digital antenna array using the spatial-correlation method of signal processing," *Journal of Radio Electronics*. 2023. No. 12. DOI 10.30898/1684-1719.2023.12.10.
4. V.M. Kutuzov, M.A. Ovchinnikov, E.A. Vinogradov, "Accuracy characteristics of the parametric Berg method for spatial processing of signals in a linear nonequidistant antenna array," *Bulletin of Higher Educational Institutions of Russia. Radio Electronics*. 2021. Vol. 24. No. 3, pp. 60-71. DOI 10.32603/1993-8985-2021-24-3-60-71.
5. S.S. Dvornikov, K.D. Zheglov, S.V. Dvornikov, "SSB signals with controlled pilot level," *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 3, pp. 41-47. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47.
6. V.V. Egorov, A.E. Timofeev, "Reverse channel in adaptive shortwave radio systems of information transmission," *News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 2013. No. 6, pp. 3-8.
7. V.V. Egorov, M.L. Maslakov, "Using the Hartley transform to solve an integral equation of the convolution type," *Digital signal processing*. 2014. No. 2, pp. 2-6.
8. S.V. Dvornikov, S.S. Dvornikov, K.D. Zheglov, "Proactive monitoring of the suitability of radio channels in the frequency hopping mode," *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 11, pp. 15-20. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.
9. V.V. Egorov, "Adaptive control of parameters of shortwave data transmission systems," *News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 2017. No. 2, pp. 47-52.
10. A.V. Ananyev, V.I. Lyutin, K.S. Ivannikov, "Synthesis of on-board receiving devices for combined processing of radar and information signals of small-class unmanned aerial vehicles," *Telecommunications*. 2022. No. 9, pp. 9-20. DOI 10.31044/1684-2588-2022-0-9-9-20.
11. Yu.I. Savvateev, O.V. Nazarov, M.E. Byvshev, "Structural synthesis of optimal algorithms for multichannel signal reception against the background of continuous interference and noise in a single-beam radio wave propagation channel," *Radio Engineering*. 2007. No. 4, pp. 95-136.
12. S.V. Dvornikov, A.A. Balykov, "Proposals for controlling the transmission rate and noise immunity of signals with permutation frequency modulation," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 6, pp. 20-26. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26.
13. A.V. Gusev, "Nonparametric model of a priori uncertainty in processing the output signal of resonant gravitational antennas (slow filtering mode)," *Bulletin of Moscow University. Series 3: Physics. Astronomy*. 2006. No. 3, pp. 41-44.
14. A.V. Dobrovodov, "Automatic methods for identifying useful signals against the background of noise under nonparametric uncertainty," *Automation and Telemekhanics*. 2011. No. 2, pp. 56-70.
15. M. Gorpinich, O.Yu. Bakhteev, V.V. Strizhov, "Gradient methods for optimizing metaparameters in the problem of knowledge distillation," *Automation and Telemekhanics*. 2022. No. 10, pp. 67-79. DOI 10.31857/S0005231022100075.
16. Yu.S. Popkov, A.Yu. Popkov, "Cross-entropy optimal reduction of the dimension of a data matrix with limited information capacity," *Reports of the Academy of Sciences*. 2019. Vol. 488. No. 1, pp. 21-23. DOI 10.31857/S0869-5652488121-23.
17. V.V. Egorov, A.E. Timofeev, "Establishing time-frequency synchronization in multi-frequency HF data transmission systems," *Electrosvyaz*. 2013. No. 7, pp. 41-44.
18. D.Yu. Gordienko, S.V. Dvornikov, "Correlation reception of frequency-shifted signals in the mode with pseudo-random frequency hopping," *T-Comm*. 2022. Vol. 16, No. 3, pp. 18-22. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-3-18-22.
19. Yu. S. Khvostunov, "Proposals for the construction of the analog part of SDR radio receivers of the decimeter range of a radio communication system with frequency hopping," *Communication equipment*. 2022. No. 1 (157), pp. 35-44.
20. G.V. Zaporozhets, V.L. Rudenko, K.K. Skogorev, "Using a geometric approach to assess the performance of radio-electronic systems of the RTK with frequency hopping in conditions of an electronic conflict," *Radio Engineering*. 2018. No. 12, pp. 103-110. DOI 10.18127 / j00338486-201812-13.
21. G.A. Zhukov, P.A. Budko, A.N. Dyachenko, "Increasing the data exchange rate in the "coast-sea-coast" directions over decimeter wave range radio paths," *Control, Communications and Security Systems*. 2023. No. 2, pp. 147-174.
22. V.V. Egorov, M.S. Smal, "Estimation of the Nakagami distribution parameters for working signals," *Electrocommunications*. 2011. No. 11, pp. 35-36.
23. S.A. Koval, V.P. Pashintsev, V.V. Kopytov et al., "Method for determining the frequency correlation interval of fading in a single-beam decimeter radio line," *Control, Communications and Security Systems*. 2022. No. 1, pp. 67-103. DOI 10.24412/2410-9916-2022-1-67-103.

24. S.V. Dvornikov, E.V. Markov, E.A. Manoshi, "Increasing the noise immunity of decimeter radio channel transmissions under unintentional interference," *T-Comm*. 2021. Vol. 15, No. 6, pp. 4-9. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9.
25. G.N. Shalin, D.A. Pokamestov, Ya.V. Krykov et al., "Adaptation of the polar coding procedure in 5G NR for signaling in rayleigh channels," *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 11, pp. 58-63. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-11-58-63.
26. Recommendation ITU-R 520-2. P. 1-4.
27. Recommendation ITU-R F.1487*. P. 1-11.
28. N.V. Savishchenko, O.A. Ostroumov, "Calculation of the optimal and rational number of diversity branches in communication channels with additive white Gaussian noise and general Rice-Nakagami fading," *Information and control systems*. No. 5. 2015, pp. 71-80.
29. P.S. Akimov, P.A. Bakut, V.A. Bogdanovich et al. Signal detection theory. Moscow: Radio and Communications, 1984. 440 p.
30. A.A. Katanovich, E.V. Pykov, "Method for estimating signal-to-noise ratio in wireless communication devices," Patent for invention RU 2809969 C1, published 12/19/2023, bulletin No. 35. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2809969 &TypeFile=html (accessed 12/25/2023).
31. S. N. Eliseev, "Estimation of the magnitude of interchannel interference power of an OFDM signal in a channel with fast fading," *T-Comm*. 2017. Vol. 11, No. 4, pp. 59-63.
32. Yu.V. Romanov, N.P. Khmyrova, "Comparison of methods for transmitting messages by signals of the MChT and ChVS systems in the fast frequency hopping mode," *Radio communication engineering*. 2016. No. 3 (30), pp. 7-22.
33. S.V. Dvornikov, G.R. Ovchinnikov, A.A. Balykov, "Software simulator of an ionospheric radio channel of the decimeter range," *Information and space*. 2019. No. 3, pp. 6-12.
34. Yu.S. Khvostunov, "Proposals for the construction of the analog part of SDR radio receivers of the decimeter range of a radio communication system with frequency hopping," *Communication engineering*. 2022. No. 1(157), pp. 35-44.
35. D.D. Privalov, "Influence of sampling frequency and interpolation on the bit error rate of the GMMS signal," *Radio Engineering*. 2021. Vol. 85. No. 9, pp. 108-114. DOI 10.18127/j00338486-202109-10.
36. A.A. Malyutin, E.B. Nechaev, D.V. Merkulov, P.N. Radko, "Simulator of a HF channel with frequency hopping," Patent for utility model RU 101298 U1, published 10.01.2011, Bulletin No. 21. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=101298 &TypeFile=html (date of access 12/25/2023).
37. S.V. Dvornikov, M.A. Semisoshenko, Ya.I. Dombrovsky, A.A. Gulidov, R.V. Ivanov, "Evaluation of noise immunity of radio communication lines with slow pseudo-random frequency hopping," *Information and Space*. 2016. No. 4, pp. 11-14.
38. M.A. Bing, H.E. Ye, "Simulation of Implementation of DS/FH Hybrid Spread Spectrum Communication System [J] MATEC," *2018 International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE 2018)*, no. 22(6), pp. 1-3.
39. S.A. Koval, "Ionospheric monitoring in the interests of promising adaptive decimeter radio communication systems: current state and development prospects," *Control, communication and security systems*. No. 4. 2020, pp. 73-100.
40. A.A. Malyutin, E.B. Nechaev, D.V. Merkulov, P.N. Radko, "Simulator of HF channel with frequency hopping," Patent for utility model RU 101298 U1, published. 10.01.2011, Bulletin. No. 21. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=101298 &TypeFile=html (date of access 12/25/2023).
41. V.I. Borisov, V.M. Zincuk, A.E. Limarev, "Noise immunity of radio communication systems with signal spectrum expansion by the method of pseudo-random frequency hopping," edited by V.I. Borisov; 2nd ed., revised. and add. Moscow: RadioSoft, 2008. 512 p.
42. S.I. Makarenko, M.S. Ivanov, S.A. Popov, "Noise immunity of communication systems with pseudo-random frequency hopping," monograph SPb.: Svoe izdatelstvo, 2013. 166 p.
43. A.L. Gavriluk, A.A. Makhnev, "On distance-regular graphs in which the neighborhoods of vertices are isomorphic to the Hoffman-Singleton graph," *Reports of the Academy of Sciences*. 2009. Vol. 428. No. 2, pp. 157-160.
44. P.S. Akimov, P.A. Bakut, V.A. Bogdanovich et al., "Signal detection theory," Moscow: Radio and Communications, 1984. 440 p.
45. J.P. Huber, "Robustness in statistics," Moscow: Mir, 1984. 304 p.