

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Лисничука Александра Александровича на диссертацию Ву Ши Дао на тему «Обнаружение и синхронизация слабых по мощности периодических шумоподобных сигналов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Актуальность темы диссертационного исследования

Результаты исследований, проведенных в работе Ву Ши Дао, направлены на повышение качества радиосвязи и точности определения местоположения абонентов широкого круга радиосистем – таких как спутниковые и наземные системы связи и радионавигации, использующие разнесенные ретрансляторы, системы контроля использования частотного ресурса и т.д. Во всех вышеперечисленных случаях так или иначе решается задача синхронизации в многолучевых каналах связи, то есть совместного обнаружения и оценки несущих частот и задержек по времени зачастую слабых по мощности шумоподобных сигналов с целью выявления всех лучей и разных по структуре сигналов, одновременно присутствующих на входе приемника.

В работе показано, что основу цифрового алгоритма обнаружения всех копий одного и того же шумоподобного сигнала, рассогласованных по частоте и задержке по времени, составляет операция дискретной свертки псевдослучайной последовательности (ПСП), на основе которой он сформирован, или, в конечном итоге – операции векторно-матричного перемножения. При этом повышение разрешающей способности алгоритма по частоте достигается при увеличении длительности обрабатываемого сигнала, то есть длины ПСП (ее периода), а разрешающая способность по времени возрастает при увеличении ширины полосы частот, занимаемой шумоподобным сигналом, то есть при заданных вероятностных характеристиках обнаружения сигнала разрешающая способность алгоритма обнаружения и оценки задержки по времени так же возрастает при увеличении длины ПСП обрабатываемого сигнала.

Вычислительная сложность алгоритма свертки псевдослучайной последовательности довольно высока (пропорциональна квадрату ее длины), в результате чего в настоящее время для решения вышеперечисленных задач в реальном масштабе времени на современной элементной базе удается реализовать обработку ПСП длиной порядка нескольких тысяч, что зачастую недостаточно для обеспечения требуемых вероятностных характеристик обнаружения сигналов, точности оценки их параметров и разрешающей способности соответствующих алгоритмов по частоте и задержке по времени, особенно при малых отношениях сигнал/шум на входе приемника, составляющих примерно (-10...-40) дБ. При этом объединение совокупности устройств вы-

числения свертки ПСП относительно коротких длин с помощью цифровых или аналоговых энергетических накопителей, может обеспечить отношение сигнал/шум на входе решающего устройства приемника, необходимое для обнаружения шумоподобных сигналов, но высокая точность оценки их параметров едва ли может быть достигнута.

В диссертационной работе после процедуры обнаружения и первоначальной грубой оценки параметров совокупности шумоподобных сигналов с целью более точной оценки их значений и слежения за их изменениями рассматривается использование систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и устройств автоматической подстройки времени (АПВ), каждая пара которых работает по одному обнаруженному сигналу. Таким образом, обнаружение шумоподобных сигналов и их копий, рассогласованных по частоте и задержке по времени, используется с целью вывода устройств слежения за их параметрами на рабочие участки их дискриминационных характеристик, обеспечивая точность оценки задержки по времени всех обнаруженных сигналов и их копий до десятых долей длительности их элементарного импульса, а точность оценки частоты каждой копии сигнала - до нескольких сотен Гц.

Таким образом, повышение эффективности цифровых алгоритмов обнаружения слабых по мощности шумоподобных сигналов, анализ совместной работы соответствующих устройств с петлевыми схемами слежения за изменением параметров сигналов при заданной точности их конечной оценки при многоэтапной параллельно-последовательной процедуре обнаружения и синхронизации, а также выработка единого критерия качества синхронизации, что и составляет цель данной работы, является весьма актуальной научно-технической задачей для широкого круга современных радиосистем, а также области радиотехники и связи в целом.

Основные результаты работы

Разработаны алгоритмы ускоренного вычисления свертки двоичных ПСП, представляющих собой М-последовательности (МП) и последовательности Голда, на основе быстрого преобразования Адамара. Основу алгоритмов составляют выявленные способы построения матриц-циркулянтов МП при учете структур автоморфных мультипликативных групп расширенного поля Гауа, построенного при помощи исходного неприводимого примитивного полинома, а также обоснованные варианты приведения этих матриц к матрице Уолша-Адамара. В результате проведенных исследований показано, что ускоренное умножение матрицы-циркулянта МП на вектор, соответствующий любой ее строке (что может соответствовать отсчетам сигнала с неизвестной задержкой по времени на входе приемника), может быть произведено с использованием алгоритма быстрого преобразования Адамара с вычислительной сложностью, в несколько сотен раз мень-

шей, чем при использовании традиционного алгоритма вычисления свертки при длине ПСП, составляющей несколько тысяч. В случае ПСП Голда выигрыш может составлять приблизительно 3...8 раз в зависимости от длины обрабатываемой ПСП.

Далее, рассмотрена задача совместного обнаружения (поиска) и синхронизации одного или сразу нескольких слабых шумоподобных сложных сигналов, рассогласованных по несущей частоте, фазе частоты и задержке по времени, в аппаратуре радиосистемы, использующей, кроме устройства ускоренного обнаружения, еще и набор систем ФАПЧ и АПВ. Предполагается использование многоэтапной параллельно-последовательной процедуры обнаружения и синхронизации сигналов с совместно работающими устройствами обнаружения и слежения за изменением параметров сигналов с формированием их копий в квазикогерентном приемнике. Для заранее заданных значений характеристик погрешностей оценки несущих частот и задержек по времени шумоподобных сложных сигналов разработан алгоритм приближенной оценки длительности времени их обнаружения и синхронизации в спутниковой радиосистеме. Показано, что при отношении сигнал/шум порядка (-10...-40) дБ эта длительность времени может составить менее 0,5 с при учете возможностей современных методов обработки сигналов и технологических решений, использующихся при их реализации.

Также разработан алгоритм расчета и анализа статистических характеристик боковых пиков двумерных и авто- и взаимно корреляционных функций шумоподобных сложных сигналов, определенных как поверхности в трехмерном пространстве с координатами, соответствующими частоте и времени. Показано, что результаты данной работы позволяют существенно упростить исследование вероятностных характеристик обнаружения и оценки параметров совокупностей шумоподобных сложных сигналов.

Научная новизна результатов

1. Показано, что дискретный сигнал, при формировании которого используется М-подобная последовательность, может быть преобразован к любой функции Уолша при перестановке его символов по возрастанию значений элементов мультипликативной группы расширенного поля Галуа, построенного по модулю неприводимого примитивного полинома, использовавшегося при формировании исходной ПСП, или по возрастанию значений некоторой конфигурации таких групп разных полей Галуа; установлено, что на основе вариантов сопровождающих матриц исходного полинома можно построить как минимум четыре мультипликативных группы.

2. Способ преобразования МП или ПСП Уолша на основе выбранной мультипликативной группы расширенного поля Галуа или суммы мультипликативных групп разных полей, а также выбор первообразного элемента группы, с которого начинается перестановка элементов исход-

ной ПСП, позволяет однозначно определить начальный блок преобразованной МП или циклический сдвиг ПСП Голда с использованием быстрого спектрального преобразования Уолша-Адамара.

3. Любая МП или ПСП Голда может быть приведена к любой из меандровых функций Радемахера соответствующей размерности или к ее аналогу; подоптимальный алгоритм идентификации полученной последовательности Радемахера может быть основан на использовании набора цифровых или аналоговых фильтров, число которых равно $\log_2(N)$, где N – длина ПСП.

Практическая ценность

1. Результаты теоретических исследований, проведенных в работе, позволяют использовать алгоритмы быстрых спектральных преобразований непосредственно в аппаратуре обработки шумоподобных сложных сигналов (СлС) при вычислении их двумерных корреляционных функций, что при возможности преобразования отсчетов исходных СлС к полному базису функций Уолша-Адамара позволяет снизить вычислительную сложность цифровых алгоритмов обнаружения СлС приблизительно в 50...630 раз при длинах используемых ПСП от 511 до 8191, по сравнению с традиционным методом вычислений.

2. Предложенная в диссертации многоэтапная параллельно-последовательной процедура обнаружения и оценки параметров совокупности шумоподобных сигналов, реализуемая с использованием совместно работающих цифровых устройств их ускоренного обнаружения и аналоговых систем слежения за их параметрами, позволяет на практике сократить длительность их синхронизации с точностью до нескольких сотен Гц по частоте и десятых долей длительности элементарного импульса по времени при значениях верхних границ начальной ширины области неопределенности сигналов по частоте порядка нескольких сотен кГц и скорости изменения частоты порядка нескольких сотен Гц с секунду, что характерно, например, для спутниковых радиосистем независимо от высоты орбиты ретранслятора.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, результатов и выводов настоящей работы подтверждается использованием в ней методов и инструментов дисциплин, в основе которых лежат фундаментальные законы – это теория полей Галуа и их мультипликативных групп, теория представления дискретных сигналов, заданных на конечных интервалах, в системах ортогональных дискретных функций и способы быстрого вычисления спектров в этих системах, корреляционный и

спектральный анализ сигналов, статистическая теория обнаружения-различения и оценки параметров сигналов на фоне шума, методы статистической радиотехники и компьютерного имитационного моделирования.

Сравнение полученных результатов с результатами компьютерного моделирования подтверждает обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в данной диссертации.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются использованием адекватных современных методов исследований, соотнесением результатов, полученных на основе теоретических исследований и результатов компьютерного моделирования, а также широкой апробацией на международных и российских конференциях. Основные результаты докладывались и обсуждались на:

- международной научно-технической конференции (МНТК) «Технологии информационного общества» в 2022, 2023 и 2024 годах со следующими темами: «Устройство ускоренного поиска шумоподобного сигнала», «Эффективность устройства грубой оценки параметров синхронизации шумоподобного сигнала», «Статистические характеристики двумерных автокорреляционных функций шумоподобных сложных сигналов»;

- МНТК Синхроинфо-2024 в городе Выборге с темой доклада «Fast Spectral Transformations in the Truncated Walsh-Hadamard Basic and Synchronization of M-like Sequences».

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 работах, 2 из которых размещены в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в изданиях, индексируемых SCOPUS. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Состав работы

Работа состоит из введения, четырех глав (все с оригинальными результатами), заключения, списка сокращений и терминов, списка из 72 ссылок и четырех приложений; в ней 193 страницы, 46 рисунков и 10 таблиц.

Автореферат соответствует содержанию и выводам диссертации и позволяет получить о них достаточно полное представление.

Диссертация оформлена в соответствии с существующими требованиями, написана хорошим языком с соблюдением научного стиля и практически не содержит языковых ошибок.

Необходимо отметить **недостатки** диссертации, которые заключаются в следующем:

1. В первой главе формулируется задача обнаружения совокупности рассогласованных по частоте и временной задержке копий одного и того же сигнала, но при этом не указывается, известно ли априори число обнаруживаемых копий, или в приемнике решается задача как обнаружения копий сигнала, так оценки их числа. Таким образом, не указано, какое решающее правило используется – на основе выставления порогового уровня или производится оценка параметров по заранее заданному числу наибольших значений откликов устройств сжатия шумоподобного сигнала. Отсутствует расчет порогового уровня при решении задачи обнаружения.

2. Не оговаривается, что задача совместного обнаружения и оценки параметров совокупности копий шумоподобного сигнала фактически сведена к задаче оптимального обнаружения-различения ортогональных сигналов; вместе с тем, ни разные шумоподобные сигналы, ни их рассогласованные копии не являются в строгом смысле ортогональными, что подтверждается результатами исследований, проведенных в четвертой главе диссертации.

3. В третьей главе заданы одинаковые вероятностные характеристики обнаружения сигнала на каждом этапе многоэтапной параллельно-последовательной процедуры и утверждается, что это может быть достигнуто при изменении порогового уровня в решающем устройстве на каждом этапе, но никакого способа оценки величины порога не предложено.

4. Во второй главе при рассмотрении свойств упорядоченной матрицы-циркулянта M -последовательности указывается: «Другим важным свойством упорядоченной матрицы-циркулянта является ... сдвиг каждой последующей строки на один элемент вправо...». Однако в соответствующей таблице, на которую автор ссылается, представлен сдвиг на один элемент влево.

5. Для матриц, в виде произведения которых представляется матрица Адамара при ее факторизации, по ходу изложения текста диссертации использует разные обозначения - B_m и B_{2^m} . Также используется запись: $B_{2^m}^m$. При этом не поясняется, что имеется в виду простая m -я степень матрицы B_{2^m} .

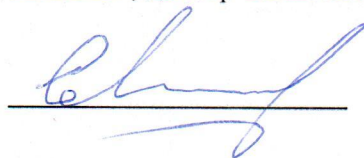
Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

На основании изложенного выше, можно сделать вывод, что представленная диссертационная работа Ву Ши Дао «Обнаружение и синхронизация слабых по мощности периодических шумоподобных сигналов» в соответствии с п.9 "Положение о присуждении ученых степеней" (Далее – Положение), является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для развития отрасли радиотехники, а именно повышения эффективности цифровых алгоритмов обнаружения слабых по мощности шумоподобных сигналов, анализа совместной работы соответствующих устройств с петлевыми схемами слежения за изменением параметров сигналов при заданной точности их конечной оценки при

многоэтапной параллельно-последовательной процедуре обнаружения и синхронизации, а также выработки единого критерия качества синхронизации для радиосистемы. Диссертационная работа написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, свидетельствует о личном вкладе автора в науку и соответствует п.10 Положения. Замечания по диссертации не снижают ценности научно-квалификационной работы.

Диссертационная работа Ву Ши Дао полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции). Соискатель Ву Ши Дао заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Профессор кафедры «Радиоуправления и связи» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», доктор технических наук, доцент



Лисничук Александр Александрович

15.04.25

e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.ru

Подпись А.А. Лисничука удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета РГРТУ
к.ф.-м.н., доцент



К.В. Бухенский/

Адрес РГРТУ: 390005, г.Рязань, ул.Гагарина, 59/1

Тел. +7(4912) 72-03-03