

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
доктор химических наук, профессор

Н.И. Прокопов

«03» апреля 2025 г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Ву Ши Дао на тему:

«Обнаружение и синхронизация слабых по мощности периодических
шумоподобных сигналов», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности

2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Обнаружение (поиск) слабых шумоподобных сигналов обычно производится при длительном накоплении их энергии в приемнике, поскольку отношение сигнал/шум на его входе по мощности может составлять $(-10...-40)$ дБ, причем при неизвестных частоте и задержке по времени принимаемых сложных сигналов первоначальное ее накопление производится с помощью набора корреляторов или согласованных фильтров, на выходе которых формируются двумерные корреляционные функции принимаемых сложных сигналов или их фрагментов. Но имеются существенные ограничения на длительность времени накопления энергии сложных сигналов в таких устройствах в случае необходимости обработки сигналов с большими базами при значительной ширине области неопределенности по частоте, вызванные в основном техническими сложностями их изготовления. В результате длительность времени обнаружения таких сложных сигналов может составлять несколько десятков секунд или

даже минут при последовательной перестройке устройств обнаружения по частоте.

Во многих случаях корреляторы или согласованные фильтры рассматриваются только как устройства, использующиеся с целью повышения достоверности работы последующего последетекторного энергетического обнаружителя сложного сигнала, в котором накапливается энергия необходимого количества (до нескольких десятков или даже сотен) фрагментов сигналов. Данное обстоятельство приводит к существенному снижению точности оценки параметров этих сигналов в устройстве их обнаружения, а также эффективности различения их рассогласованных копий, определяющейся в основном размерами проекции(ий) основного пика(ов) двумерных корреляционных функций сложных сигналов на плоскость частота-время, то есть характеристиками первого блока накопления энергии сложных сигналов, включающего набор корреляторов или согласованных фильтров. Последующий энергетический накопитель позволит лишь обеспечить точность оценки параметров сложных сигналов, соответствующую размерам этой проекции, с требующейся достоверностью.

Вследствие этого тема диссертации Ву Ши Дао, направленной на решение научной задачи комплексного рассмотрения и оптимизации процедуры совместного обнаружения и оценки параметров совокупностей слабых по мощности шумоподобных сигналов по критериям длительности времени правильной оценки их несущих частот и задержек по времени с заранее заданными погрешностями и вероятностями, является актуальной и практически важной.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности цифровых алгоритмов обнаружения слабых по мощности шумоподобных сложных 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, и выработка единого критерия качества синхронизации для радиосистемы.

Объектом исследования являются алгоритмы и устройства обнаружения и синхронизации слабых по мощности шумоподобных сигналов.

Предметом исследования являются цифровые алгоритмы ускоренного векторно-матричного перемножения применительно к задаче обнаружения совокупности шумоподобных сигналов; многоэтапная параллельно-последовательная процедура обнаружения и синхронизации шумоподобных

сигналов с использованием цифровых устройств синхронизации псевдослучайной последовательности и аналоговых петлевых схем.

Судя по материалам автореферата, в диссертации решены следующие частные научные задачи:

- обоснован выбор M -подобных псевдослучайных последовательностей для формирования сложного сигнала, приводящихся к специальным ортогональным функциям, в системах которых можно построить быстрые алгоритмы векторно-матричного перемножения на основе быстрого преобразования Уолша-Адамара;

- исследованы варианты построения матриц-циркулянтов M -последовательностей на основе мультипликативных групп расширенного поля Галуа по модулю неприводимого примитивного полинома, а также вариантов приведения этих матриц к полной или усеченной матрице Адамара с целью разработки ускоренных алгоритмов синхронизации M -последовательностей при обработке шумоподобных сложных сигналов;

- исследован способ построения матриц-циркулянтов псевдослучайных последовательностей Голда и взаимосвязи их структуры с изоморфными мультипликативными группами полей Галуа, а также способов приведения матриц-циркулянтов этих псевдослучайных последовательностей к функциям Уолша с целью разработки быстрого способа синхронизации псевдослучайных последовательностей Голда при обработке шумоподобных сложных сигналов;

- исследована эффективность многоэтапной параллельно-последовательной процедуры оценки параметров частоты и задержки по времени совокупности шумоподобных сложных сигналов при совместной работе устройств их ускоренного обнаружения и слежения за их параметрами на основе двухпетлевых схем;

- разработана методика расчета двумерных корреляционных функций сложных сигналов на частотно-временной плоскости, соответствующей области их определения, при учете возможности формирования сложных сигналов на основе псевдослучайных последовательностей разных типов, а также исследование параметров функций распределения боковых пиков двумерных корреляционных функций, являющихся случайными величинами при неизвестных частоте и задержке сложных сигналов по времени; анализ вероятностных характеристик обнаружения совокупности сложных сигналов, рассогласованных по частоте и задержке по времени.

Результаты, имеющие научную новизну и обладающие теоретической значимостью:

1. Показано, что дискретный сигнал, при формировании которого используется M -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 псевдослучайной последовательности, 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 M -последовательностей или псевдослучайных последовательностей 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 исходной псевдослучайной последовательности, позволяет однозначно определить начальный блок преобразованной M -последовательности или циклический сдвиг псевдослучайной последовательности Голда с использованием быстрого спектрального преобразования Уолша-Адамара.

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

Практическая значимость полученных в работе научных результатов состоит в том, что предложенный подход к разработке устройств обнаружения и синхронизации слабых по мощности периодических шумоподобных сложных сигналов позволил:

1. Использовать алгоритмы быстрых спектральных преобразований непосредственно в аппаратуре обработки шумоподобных сложных сигналов при вычислении их двумерных корреляционных функций, что при возможности преобразования отсчетов исходных сложных сигналов к полному базису функций Уолша-Адамара позволяет снизить вычислительную сложность цифровых алгоритмов обнаружения сложных сигналов в приблизительно в 50...630 раз

при длинах используемых псевдослучайных последовательностей от 511 до 8191, по сравнению с традиционным методом вычислений.

2. В случае, если циклические сдвиги применяемых типов псевдослучайных последовательностей не приводятся к полной системе Уолша-Адамара, использовать алгоритм их преобразования к неполной ортогональной системе функций Радемахера, что позволяет обеспечить выигрыш по вычислительной сложности алгоритма примерно в 3–8 раз при длинах (периодах) псевдослучайных последовательностей от 511 до 8191, по сравнению с простым векторно-матричным перемножением.

3. Оптимизировать длительность времени обнаружения и синхронизации сложных сигналов при подборе числа этапов многоэтапной параллельно-последовательной процедуры их поиска, реализуемой с использованием совместно работающих устройств их ускоренного обнаружения и слежения за их параметрами; в диссертации показано, что в спутниковой радиосистеме длительность времени вхождения в синхронизм по слабым шумоподобным сложным сигналам при совместном использовании разработанных цифровых устройств ускоренного их обнаружения и аналоговых петлевых схем слежения за их частотами и задержками по времени можно сократить на практике приблизительно до 0,2 с; в случае использования последовательного корреляционного алгоритма эта длительность времени при таких же исходных условиях будет составлять несколько десятков секунд.

Основное содержание диссертации отражено в достаточно полном объеме в 11 научных работах, из них: 9 статей (1 – в журнале, индексируемом в международных базах данных Web of Science и Scopus, 2 – в журналах из перечня ВАК, 6 – в журналах, индексируемых в РИНЦ); 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Тематика и содержание опубликованных работ свидетельствует о полученных результатах и их апробации.

Аннотация написана логично, доказательно, ясным научным языком.

К числу недостатков могут быть отнесены следующие:

1. На рисунке 1 аннотации в качестве опорного сигнала используется действительная часть комплексной огибающей опорного сигнала для перемножения как с синфазной, так и с квадратурной составляющей входного сигнала на выходе схемы квадратурного приемника. Данное обстоятельство нуждается в пояснении.

2. В автореферате не пояснено, что представляют собой предпочтительные М-последовательности, а также их упорядоченные матрицы-циркулянты. Не ясно, почему для формирования матрицы-циркулянта последовательности Голда используются матрицы М-последовательностей, сформированные только на основе сопровождающих матриц их неприводимых примитивных полиномов только лишь одного типа, в то время как в автореферате приведены два вида таких сопровождающих матриц для каждой М-последовательности.

3. В автореферате не обоснован и указан тип закона распределения суммарной помеховой составляющей, на фоне которой производится обнаружение шумоподобного сигнала с неизвестной частотой и задержкой по времени. В частности, формула (21), описывающая вероятность правильного обнаружения сигнала и включающая распределение Релея-Райса, содержит дополнительный множитель, смысл которого не разъяснен в автореферате. Так же отсутствует обоснование значения нижнего порога интегрирования в формулах (19), (21), (23).

Тем не менее, указанные недостатки не снижают качества работы и не оказывают существенного влияния на основные теоретические и практические результаты диссертации.

Содержание автореферата позволяет сделать выводы об оригинальности диссертационной работы, обладающей актуальностью, научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Вывод: диссертация Ву Ши Дао представляет собой законченную научную квалификационную работу, актуальна, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость. В ней решена актуальная научная задача, заключающаяся в комплексном рассмотрении и оптимизации процедуры совместного обнаружения и оценки параметров совокупностей слабых по мощности шумоподобных сигналов по критериям длительности времени правильной оценки их несущих частот и задержек по времени с заранее заданными погрешностями и вероятностями. Решение обозначенной научной задачи имеет важное народнохозяйственное значение.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». Указанное соответствие подтверждается содержанием работы, ее апробацией, научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Диссертация соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, критериям раздела II «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 25 января 2024 г.), предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ву Ши Дао заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Профессор кафедры КБ-2 «Информационно-аналитические системы кибербезопасности» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (научная специальность, по которой защищена докторская диссертация: 20.02.12 «Системный анализ, моделирование боевых действий и систем военного назначения, компьютерные технологии в военном деле», согласен на обработку персональных данных)

доктор технических наук



Шатовкин Роман Родионович

«01» апреля 2025 г.

Заведующий кафедрой КБ-2 «Информационно-аналитические системы кибербезопасности» Института кибербезопасности и цифровых технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»

кандидат технических наук, доцент



Трубиенко Олег Владимирович

«01» апреля 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (адрес: 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78; тел.: +7 (499) 600-80-80; электронная почта: rector@mirea.ru)