

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы диссертационного исследования

В диссертационной работе Ву Ши Дао рассматривается использование алгоритма быстрого преобразования Адамара (БПА) для обнаружения и синхронизации шумоподобных сигналов, формируемых на основе двух типов псевдослучайных последовательностей (ПСП) – М-последовательностей (МП) и последовательностей Голда. Следует отметить, что использование быстрых спектральных преобразований сигналов с большим периодом повторения, в том числе, при наличии множества копий сигнала, сдвинутых друг относительно друга по частоте и временной задержке, для решения вышеуказанной задачи может оказаться выгоднее других известных способов синхронизации. В частности, способы синхронизации шумоподобных сигналов, основанные на посимвольном приеме (например, широко известные вариации метода Уорда), даже при учете взаимосвязей между элементарными символами применяемых ПСП, не позволяют обеспечить требуемую вероятность синхронизации принимаемых и опорных (формируемых в приемнике) сигналов из-за низкого отношения сигнал/(помеха+шум) на входе приемника.

Таким образом, основу диссертации составляют разработанные методы быстрой синхронизации ПСП на основе БПА, но рассмотрен и целый комплекс задач, связанных с обнаружением копий сигналов, смещенных друг относительно друга по частоте и задержке по времени. В этом случае с точки зрения теории радиотехнических систем рассматривается не задача обнаружения шумоподобных сигналов, как указывается в названии диссертации, а фактически задача обнаружения-различения совокупности квазиортогональных сигналов, представляющих собой копии одного и того же сигнала, смещенные друг относительно друга по частоте и задержке. Таким образом, метод обнаружения-различения известного или неизвестного числа таких сигналов из известной их совокупности, оптимальный при воздействии белого гауссовского шума по любому из традиционных критериев оптимальности, позволяет не только обнаружить все копии сигнала, но и приближенно оценить их частоты и задержки.

Результаты, полученные в диссертации при решении задачи обнаружения и синхронизации шумоподобных сложных сигналов, могут быть полезными для дальнейшего развития целого ряда наземных систем радионавигации и связи, имеющих важное народнохозяйственное и

военное значение. Поэтому тема диссертации и задачи, решаемые в ней, являются весьма актуальными.

Основные результаты работы

Известный еще с 70-х годов алгоритм приведения циклических сдвигов МП к строкам матрицы Адамара предполагает перестановку их символов по возрастанию значений элементов мультипликативной группы расширенного поля Галуа по модулю неприводимого примитивного полинома, использовавшегося при формировании этой МП. Но в данной диссертации показано, что существуют по крайней мере четыре разных мультипликативных группы данного типа, и перестановка символов МП с использованием каждой из них приводит к разным результатам. Например, если мультипликативная группа строится на основе сопровождающей матрицы исходного полинома типа H_1 (см. диссертацию), то только перестановка, начиная с ее первообразного элемента $[10 \dots 0]$, позволит преобразовать циклические сдвиги исходной МП к матрице функций Уолша, упорядоченной по Кронекеру, то есть к матрице Адамара, причем номер полученной функции Уолша в матрице Адамара в двоичной системе счисления будет соответствовать начальному блоку циклического сдвига преобразуемой МП. Однако, перестановка символов МП в соответствии с данным правилом, начиная с любого другого первообразного элемента этой мультипликативной группы, не позволит преобразовать МП к функции Уолша. В диссертации это строго доказано.

Новый способ преобразования циклических сдвигов МП к функциям Уолша, выявленный в диссертации, основывается на использовании другого типа мультипликативной группы расширенного поля Галуа, когда элементы МП можно переставлять начиная с любого ее первообразного элемента, в результате чего любой циклический сдвиг МП можно привести к любой функции Уолша. Для заданного первообразного элемента сохраняется взаимно однозначное соответствие между циклическим сдвигом преобразуемой МП и получаемой функцией Уолша. При этом из всех возможных циклических сдвигов МП можно получить матрицу функций Уолша, упорядоченную на основе элементов мультипликативной группы поля Галуа. В диссертации приводятся строгие доказательства способа преобразования полученной матрицы к матрице Адамара.

Последний вариант преобразования МП к функциям Уолша используется при разработке способа синхронизации ПСП Голда, поскольку позволяет выявить способ построения матрицы-циркулянта ПСП Голда на основе суммы мультипликативных групп двух разных расширенных полей Галуа. При этом показано, что ПСП Голда могут быть приведены только к аналогам функций Радемахера, то есть к искаженному усеченному базису функций Уолша, упорядоченных по Адамару. Поэтому применительно к ПСП Голда рассматривается алгоритм быстрых спектральных преобразований в усеченном базисе Адамара, состоящем лишь из функций Радемахера.

макера. Вследствие многократного повторения указанных преобразований с проверкой отображения ПСП Голда в одну из функций Радемахера разработанный алгоритм синхронизации существенно уступает по вычислительной сложности алгоритму синхронизации МП. Если выигрыш при синхронизации МП в соответствии разработанным алгоритмом достигает нескольких сотен раз при их длинах порядка нескольких тысяч, то в случае ПСП Голда он не превышает 5...8 раз.

В диссертационной работе рассматривается также совокупность важных для практических приложений вопросов, связанных с ускоренным вычислением двумерных автокорреляционных функций шумоподобных сигналов с использованием БПА. Рассмотрена многоэтапная параллельно-последовательная процедура поиска, обнаружения и грубой синхронизации совокупностей рассогласованных сложных сигналов. параметров сигналов и Показано, что выбор числа этапов поиска при заранее заданных точностях оценки их параметров и размерах областей их неопределенности позволяет в несколько раз снизить длительность времени до начала слежения за параметрами обнаруженных сигналов, по сравнению с отсутствием такого выбора. В процессе исследований сформулирован и критерий качества работы системы синхронизации.

Научная новизна

1. Матрица-циркулянт МП, строки которой начинаются с блоков двоичных символов, соответствующих десятичным номерам этих строк при их двоично-десятичном кодировании, может быть приведена к матрице Адамара без нулевых строки и столбца при их нумерации от нуля путем перестановки столбцов матрицы в соответствии со значениями единственной мультипликативной группы расширенного поля Галуа. Способ формирования этой группы соответствует рис. 2.1 а) (см. диссертацию) и виду H_1 сопровождающей матрицы исходного неприводимого примитивного полинома, и только при значении первообразного элемента этой пы $\alpha^0_{H_1} = [1 \ 0 \dots \ 0 \ 0]^T$.

2. Любая из N упорядоченных матриц-циркулянтов МП может быть приведена к матрице из функций Уолша, упорядоченной по степеням мультипликативной группы расширенного поля Галуа, где N – длина МП. В этом случае перестановка столбцов матрицы-циркулянта должна производиться по возрастанию значений элементов мультипликативной группы поля Галуа, соответствующей виду матрицы H_2 (см. диссертацию). При этом любой циклический сдвиг МП может быть приведен к любой функции Уолша без нулевого символа при их нумерации от нуля в зависимости от выбора первообразного элемента $\alpha^0_{H_2}$ данной группы, который и определяет структуру матрицы-циркулянта. Но при данном значении $\alpha^0_{H_2}$ соответствие между преобразуемым циклическим сдвигом МП и функцией Уолша без нулевого символа при их нумерации от нуля является взаимно однозначным. Таким образом, все возможные матрицы-циркулянты МП, каждая последующая строка которой сдвинута циклически относительно предыдущей

строки на один символ, приводятся к одной и той же матрице функций Уолша без нулевых символов при их нумерации от нуля, упорядоченной по степеням элементов мультиплекативной группы поля Галуа с первообразным элементом $\alpha^0 H_1 = [1 \ 0 \dots \ 0 \ 0]^T$, соответствующей сопровождающей матрице полинома вида H_1 . Отметим также важное свойство данного преобразования матриц: если при выбранном $\alpha^0 H_2$, определяющем структуру матрицы-циркулянта со строками, упорядоченными по циклическим сдвигам МП, некоторая ее i -я строка приводится к u -ой строке матрице функций Уолша без нулевого символа при их нумерации от нуля, то при выборе в качестве первообразного элемента $\alpha^{0+l} H_2$ эта же строка матрицы-циркулянта приводится к $(u + l)$ -ой строке матрице функций Уолша.

3. Матрица Адамара может быть получена из матрицы функций Уолша, упорядоченной по степеням максимальной мультиплекативной группы поля Галуа, путем перестановки ее строк по возрастанию значений элементов этой группы и добавлением нулевой строки и нулевого столбца при их нумерации от нуля.

4. Любой из способов преобразования МП в соответствии с правилами, описанными в п.2 и 3, позволяет привести ее к функции Уолша без нулевого символа при их нумерации от нуля, а последующее добавление к ней этого символа и преобразование полученного вектора с помощью БПА - быстро вычислить периодическую автокорреляционную функцию (ПАКФ) МП с поправкой на разницу в длинах МП и последовательностей Уолша; выигрыш по вычислительной сложности будет в N/m раз, по сравнению с традиционным алгоритмом вычисления дискретной свертки МП.

5. Первые m строк любой упорядоченной матрицы-циркулянта последовательности Голда могут быть приведены к аналогам функций Радемахера путем перестановки ее столбцов по возрастанию значений суммы максимальных мультиплекативных групп двух предпочтительных неприводимых примитивных полиномов, на основании которых построен данный код. При этом структура групп определяется сопровождающими матрицами предпочтительных полиномов вида H_2 . При сдвиге первообразных элементов суммируемых мультиплекативных групп на m элементов - следующие m строк исходной матрицы приводятся к функциям Радемахера, при сдвиге на $2m$ элементов – следующие и т.д.

6. Преобразование последовательности Голда в соответствии с предыдущим пунктом данного раздела позволяет быстро вычислить его ПАКФ с помощью БПА в усеченном базисе функций Уолша-Адамара, причем выигрыш по числу элементарных операций в зависимости от длины ПСП $N = 2^m - 1$ соответствует рис. 1.9 (см. диссертацию), по сравнению с корреляционным алгоритмом.

Практическая ценность

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 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 в приблизительно в 50...630 раз при длинах используемых ПСП от 511 до 8192, по сравнению с традиционным методом вычислений;
2. в случае, если циклические сдвиги применяемых типов ПСП 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) ПСП, указанных в предыдущем пункте, по сравнению с простым векторно-матричным перемножением;
3. оптимизировать длительность времени обнаружения и синхронизации СлС 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 входления в синхронизм по шумоподобным СлС можно сократить на практике приблизительно до 0.2 с; в случае использования последовательного корреляционного поиска эта длительность времени при таких же исходных условиях будет составлять несколько десятков секунд.

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

Положения, выводы и рекомендации, высказанные в настоящей диссертационной работе, обоснованы с использованием инструментов, методов и методик, применяемых в дисциплинах, имеющих в своей основе основополагающие законы природы – это корреляционный и спектральный анализ сигналов, быстрое преобразование Фурье-Адамара, теория полей Галуа и их мультиплекативных групп, статистическая радиотехника и статистическая теория обнаружения сигналов, методы компьютерного моделирования.

Сравнение полученных теоретических 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 2024 году 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.

Структура и состав работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и терминов, списка литературных источников, включающего 72 пункта, и четырех приложений; она содержит 193 страницы, 46 рисунков и 10 таблиц.

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

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

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

1. Двумерные авто- и взаимно корреляционные функции двоичных псевдослучайных последовательностей, которые рассматриваются в Разделе 4 диссертации, достаточно подробно исследованы к настоящему времени, и имеются многочисленные публикации на данную тему. В диссертации отсутствует обзор соответствующих литературных источников, а выводы по Разделу 4 диссертации выглядят порою тривиально. Кроме того, не разъясняется назначение и новизна результатов работы разработанной компьютерной программы.
2. В 3-ей главе диссертации, кроме двоичных фазоманипулированных шумоподобных сигналов, рассматриваются также исигналы со скачками по частоте. Исследуется общая структура канала синхронизации для двух типов сигналов, состоящая из одних и

тех же устройств – устройства ускоренного обнаружения и двухпетлевой схемы слежения за частотами и задержками по времени обнаруженных сигналов. Вместе с тем, сигналы со скачками по частоте не рассматриваются ни в предыдущих, ни в последующей главах диссертации. Их двумерные корреляционные функции не исследуются, и методика их расчета не разработана. Необходимость рассмотрения этих сигналов в третьей главе диссертации никак не обоснована, поскольку полноценное сравнение характеристик обнаружения и синхронизации двух типов сигналов с использованием предлагаемого варианта канала синхронизации в диссертации отсутствует.

3. Не проведено сравнение разработанного алгоритма быстрой синхронизации ПСП Голда на основе БПА с ранее проведенными исследованиями в этой области. Более того, не дается никакой оценки ранее полученным результатам других авторов, посвященных этой же теме.
4. Позиции 1-3 Положений, выносимых на защиту, и позиция 1 раздела «Научная новизна» Введения к диссертации сформулированы как математические выражения из области теории полей Галуа, в которых не разъясняется, какое отношение они имеют к названию диссертации и технической проблеме, решаемой в ней.
5. В пункте 6 Положений, выносимых на защиту, а также в Разделе 4 автореферата и диссертации не оговариваются условия, при которых боковые пики двумерных авторекорреляционных функций шумоподобных сигналов могут считаться случайными величинами, кроме того, не указывается, что законы их распределения являются усеченными, то есть соответствуют номинальным законам распределения только на конечном интервале определения случайной величины.
6. Раздел 2 Автореферата перегружен формулами и математическими выкладками, но в нем явно недостаточно выводов и формулировок результатов исследований, что в Автореферате было бы необходимо в большей степени.
7. В Автореферате, а возможно и в диссертации, следовало бы рассматривать более краткое и формализованное описание совместно работающих устройств обнаружения шумоподобных сигналов и двухпетлевых схем слежения за их параметрами с целью акцентирования внимания лишь на тех элементах и узлах схем, которые имеют значение для последующего рассмотрения.

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 СлС, 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 402 «Радиосистемы и комплексы управления, передачи информации и информационная безопасность» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доктор технических наук, доцент

Владимир Юрьевич Михайлов

Подпись доктора технических наук, профессора кафедры 402 «Радиосистемы и комплексы управления, передачи информации и информационная безопасность» заверяю

Директор дирекции института №4

«17» 04 2025 г.

Кирдяшкин В.В.

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Тел: +7 (499) 158-49-33

e-mail: mihvj@yandex.ru