

На правах рукописи

БАЛАХОНОВ КИРИЛЛ АНДРЕЕВИЧ

**Алгоритмы частотной синхронизации OFDM-систем в подводном
акустическом канале**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Шахтарин Борис Ильич**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Козлов Анатолий Иванович**, профессор, доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО МГТУ ГА,
Голубев Сергей Владимирович, доцент, кандидат технических наук, сотрудник в/ч 33965

Ведущая организация: ОАО «Концерн «Созвездие»

Защита диссертации состоится 18 сентября 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при федеральном государственном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу 105005, Москва, Госпитальный пер., д.10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к. т. н., доцент

Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Технология OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) получила широкое распространение в современных стандартах цифровой радиосвязи, таких как LTE, 3G, Wi-Fi, WiMAX, что обусловлено возможностью добиться высокой спектральной и энергетической эффективности, низкого уровня или полного отсутствия межсимвольной интерференции, высокого качества передачи при условии наличия частотно-селективных замираний.

Актуальность работы обусловлена, во-первых, возрастающим интересом к применению технологии OFDM в подводном акустическом канале (ПАК), во-вторых, существующей возможностью реализации работающего в реальном времени приемо-передатчика в виде программно-определяемой радиосистемы на основе процессора общего назначения и звуковой карты персонального компьютера (ПК), что существенно снижает время на разработку, а также стоимость исследовательской системы по сравнению с цифровыми сигнальными процессорами, ПЛИС и т. д. Это особенно важно для исследовательских систем, где на начальных этапах работы невозможно задать все параметры оптимальным образом и приходится проводить эксперименты до начала разработки специализированной аппаратуры.

Диссертационная работа посвящена решению проблем частотной синхронизации OFDM-систем в ПАК при условии быстрых изменений характеристик канала и относительного движения приемника и передатчика, учитывая существенно отличающиеся доплеровские масштабные коэффициенты (ДМК) на путях распространения. Кроме того, при выборе в качестве аппаратного обеспечения процессоров общего назначения и звуковых плат существует возможность программного перестраивания системы, то есть применения преимуществ систем типа SDR (Software Defined Radio – Программно-определяемая радиосистема).

Использование сигналов OFDM в ПАК рассматривается в работах зарубежных исследователей (С. Чжоу, З. Ванг, М. Стоянович, З. Х. Ван, Дж. Катипович и Дж. Хуанг и др.), а также отечественных (В.П. Федосов, А.А. Легин, А.В. Ломакина, А.С. Шустов и др.). Существуют несколько реализаций подводных акустических модемов, которые используют различные сигнально-кодовые конструкции, в частности OFDM используется в зарубежных модемах AquaSeNT, а также в отечественном модеме НИИ «Штиль». Основным отличием от передачи в радиоканале является существенная широкополосность акустических систем из-за сильного поглощения на высоких частотах, которая приводит к невозможности моделирования эффекта Доплера частотным сдвигом, поэтому здесь приходится иметь дело с масштабированием сигнала по времени. Эта особенность предполагает передискретизацию на приемной стороне для корректной демодуляции. Кроме того, ПАК характеризуется особенно большим разбросом задержек, то есть характеристика канала может меняться от символа к символу, поэтому проблематично применять алгоритмы, использующие априорные знания о канале. В диссертации проводится разработка мер по эффективному противодействию названным проблемам при условии реализации алгоритмов в реальном масштабе времени на дешевых компонентах. Для проверки актуальности полученных результатов проводится имитационное и физическое моделирование.

Цель и задачи диссертации

Диссертационная работа посвящена разработке алгоритмов частотной синхронизации OFDM-систем в ПАК. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Разработка модели ПАК с различными доплеровскими масштабными коэффициентами (ДМК) на путях распространения.
2. Оценка ошибок, возникающих при передаче сигнала OFDM в ПАК при условии недостаточно точной временной, частотной синхронизации, а также их зависимости от параметров канала.

3. Сравнение эффективности работы алгоритмов обнаружения в ПАК по критерию отношения откликов.
4. Сравнение эффективности работы алгоритмов частотной синхронизации по СКО оценки ДМК.
5. Разработка улучшенных с точки зрения точности алгоритмов частотной синхронизации.
6. Исследование возможности реализации разрабатываемых алгоритмов на дешевом оборудовании путем физического моделирования.

Научная новизна результатов

1. Получена математическая модель принимаемого OFDM-сигнала при условии влияния ДМК, а также оценены вероятности битовой ошибки в зависимости от параметров канала и приема.
2. Разработан механизм выявления рационального метода обнаружения и частотной синхронизации при использовании технологии OFDM для ПАК с различными ДМК на путях распространения.
3. Разработан автокорреляционный алгоритм частотной и временной синхронизации на основе метода максимального правдоподобия (МП).
4. Разработан параметрический алгоритм частотной синхронизации для увеличения точности оценки ДМК в многолучевом канале.
5. Разработана методика коррекции алгоритмов частотной синхронизации на основе апостериорной характеристики ошибки.
6. Разработан алгоритм взвешенного суммирования (ВС) временных откликов согласованных фильтров, устраняющий эффект искажения откликов при использовании метода банка согласованных фильтров.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель OFDM-сигнала после прохождения через многолучевую ПАК.
2. Имитационная модель многолучевого ПАК с различными ДМК на путях распространения.

3. Имитационная модель OFDM-системы для оценки вероятности битовой ошибки, точности методов обнаружения и частотной синхронизации в ПАК.
4. Автокорреляционный алгоритм оценки ДМК на основе метода МП, увеличивающий точность оценки.
5. Корреляционный алгоритм оценки ДМК путем ВС и вычитания смежных пиков, увеличивающий точность.
6. Методика коррекции алгоритмов частотной синхронизации с использованием апостериорной характеристики ошибки.

Практическая ценность

1. Разработаны алгоритмы частотной синхронизации на основе ВС, а также метода МП, позволяющие увеличить точность при оценивании ДМК в многолучевом ПАК, которые были использованы при проектировании схем синхронизации.
2. Разработан алгоритм ВС временных откликов согласованных фильтров, устраняющий эффект искажения выходной характеристики в методе банка согласованных фильтров, который рационально использовать при проектировании OFDM-систем.
3. Разработана методика коррекции алгоритмов частотной синхронизации на основе апостериорной информации о параметрах среды распространения, которые были использованы при проектировании схем синхронизации OFDM-сигналов в ПАК.
4. Создан программно-аппаратный стенд для физического моделирования работы алгоритмов синхронизации OFDM-систем, позволяющий подтвердить практическую реализуемость разработанных алгоритмов и оценить влияние факторов, неучтенных при моделировании.
5. Разработано прикладное ПО для ПК, позволяющее проводить имитационное моделирование схем обнаружения и частотной синхронизации в ПАК с различными ДМК на путях распространения.

Апробация результатов

Результаты диссертации прошли апробацию на:

1. Международной научно-техническая конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2015», СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург, 2015).
2. Международной научно-техническая конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2017», КНИТУ им. А.Н. Туполева (Казань, 2017) IEEE (ConferenceRecord #41975).

Личный вклад

1. Разработаны алгоритмы частотной синхронизации.
2. Предложен алгоритм оценки ДМК на основе максимального правдоподобия.
3. Разработан алгоритм оценки ДМК на основе вычитания смежных пиков и взвешенного суммирования.
4. Показано, что предложенные алгоритмы позволяют увеличить точность оценки ДМК в ПАК.
5. Предложен экспериментальный стенд для физического моделирования OFDM в ПАК.
6. Разработан программный комплекс для имитационного моделирования OFDM в ПАК.
7. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018612603.

Внедрение результатов работы:

1. В опытно-конструкторской работе НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана «Гармония-Гамак»;
2. При разработке бесконтактного датчика скорости Luxast 1D Neo в компании SMG Technologie GmbH;
3. В учебном процессе на кафедре АИУС МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 173 страниц, включающих 74 иллюстрации, 12 таблиц и список литературы из 56 наименований.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы получены автором самостоятельно и изложены в 6 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 докладах международных конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и ее практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования, дан критический анализ работ в области частотной и временной синхронизации систем OFDM-систем при работе в ПАК.

В первой главе рассмотрены типы средств связи, которые могут функционировать под водой: проводные, оптические, акустические, радиочастотные. Каждый из этих типов имеет свои преимущества и недостатки, однако системы на основе использования акустических волн позволяют достичь больших дистанций, что объясняет использование акустических волн в большинстве систем подводной беспроводной связи. Подробно описаны особенности ПАК, такие как зависимость солёности, давления и температуры от глубины, влияющие на скорость распространения сигнала под водой, а также общая зависимость скорости распространения звука под водой от глубины. Рассмотрены зависимости потерь энергии из-за частотно-зависимого поглощения и от геометрического расхождения и рассеяния, а также важнейшие особенности распространения в ПАК: большой разброс задержек распространения, ДМК и концентрация энергии в нескольких путях. Формулируются возможные модели каналов, описывающие ПАК. Обоснована целесообразность использования

акустических сигналов в ПАК, которые при небольших скоростях передачи позволяют осуществлять связь на больших расстояниях.

Во второй главе рассматривается применение технологии OFDM в ПАК. Кратко описаны математические зависимости, свойственные этой технологии. Выведены соотношения принятого сигнала через параметры канала при условии различных ДМК на путях распространения и получена математическая модель сигнала на входе демодулятора после прохождения описанного многолучевого канала с ДМК:

$$s_r(t) = \exp(j\omega(t - \bar{\tau}(t))) \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{l=1}^N \left[x_l(m, l) \exp(j\omega_l(t - \bar{\tau}(t))) \cdot \int_{-\bar{\tau}(t)}^{\infty} h(t, \tau' - \bar{\tau}(t)) w(t - \tau' - \bar{\tau}(t)) \exp(-j(\omega_0 + \omega_l)\tau') d\tau' \right], \quad (1)$$

Показано, что в формуле (1) можно выделить три основных составляющих. Множитель $\exp(j\omega(t - \bar{\tau}(t)))$ соответствует доплеровскому сдвигу узкополосного сигнала на несущей частоте. Компонента $\sum_{l=1}^N x_l(m, l) \exp(j\omega_l(t - \bar{\tau}(t)))$ представляет собой комплексную огибающую OFDM-символа с учетом усредненной задержки в канале и описывает доплеровское искажение широкополосного сигнала. Наконец, составляющая $\int_{-\bar{\tau}(t)}^{\infty} h(t, \tau' - \bar{\tau}(t)) w(t - \tau' - \bar{\tau}(t)) \exp(-j(\omega_0 + \omega_l)\tau') d\tau'$ описывает частотно-избирательные свойства канала, приводящие к МСИ и МКИ. В общем виде описан процесс компенсации эффекта Доплера. Отмечено, что частично эффект Доплера в принимаемом сигнале компенсируется посредством передискретизации с использованием коэффициента $(1 + \hat{a})$, в результате чего воссозданный сигнал имеет вид $z_{rs}(t) = y\left(\frac{t}{1+\hat{a}}\right)$. Показано, что воссозданный сигнал $z_{rs}(t)$ может содержать остаточную доплеровскую ошибку. Смещение несущей частоты, вызванное остаточным эффектом Доплера, компенсируется путем перемножения с сигналом на основной частоте на $e^{-j2\pi\hat{\epsilon}t}$. Оценка смещения несущей частоты $\hat{\epsilon}$ производится по формуле $\hat{\epsilon} =$

$\arg \min_{\epsilon} \sum_m \left| \int_0^{T+T_g} y_r(t) e^{-j2\pi\epsilon t} e^{-j2\pi\frac{m}{T}t} dt \right|^2$, в которой принимают оценку как частоту $\hat{\epsilon}$, которая минимизирует энергию нулевой несущей $z(t) = e^{-j2\pi\hat{\epsilon}t} z_{rs}(t)$, T – длительность символа, T_g – длительность защитного интервала. Показано, что данный метод имеет существенную вычислительную сложность, например, для увеличения разрешения в N раз необходимо вычислить N преобразований Фурье соответствующей размерности. Известно, что использование модели доплеровского сдвига взамен масштаба является упрощенной моделью и чем более широкополосный сигнал, тем больше будет отличаться модель от действительности. Эти особенности обуславливают требования увеличения точности оценки и уменьшения вычислительных затрат. Обоснована целесообразность использования ZP-OFDM (Zero-Padded, с добавлением нулей в защитном интервале) в ПАК, поскольку это обеспечивает гибкость подходов к оценке и выравниванию ЧХ каналов, а также позволяет эффективнее использовать энергию.

Путем имитационного моделирования было выяснено, что от параметров распределения ДМК на путях распространения существенно зависит вероятность битовой ошибки (Рисунок 1), что обуславливает важность при имитационном моделировании использовать канал с различными ДМК на путях распространения, импульсная характеристика которого задается формулой: $h(t; \tau) = \sum_{p=1}^{N_{pa}} A_p \delta(\tau - (\tau_p - a_p t))$, где A_p – амплитуда, τ_p – начальная задержка, a_p – скорость изменения задержки на пути распространения с индексом p , N_{pa} – количество путей распространения.

В третьей главе рассмотрены методы обнаружения сигнала, подходящие для OFDM-систем и работающих в ПАК с различными ДМК на путях распространения. Для сравнения характеристик обнаружения была использована метрика $D = \frac{M_{max}}{\sigma_n}$, где M_{max} – значение отклика детектора в момент обнаружения пика, σ_n – СКО шума на выходе обнаружителя. При этом некоторые методы обнаружения дополнительно могут быть использованы для

определения значения ДМК без изменений, а другие методы только с дополнительными доработками, что рассматривается подробно в четвертой главе.

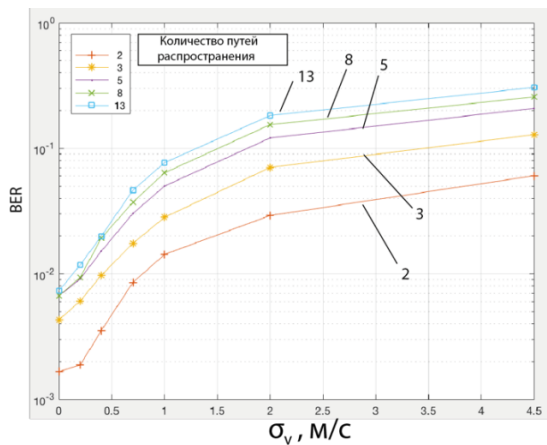


Рисунок 1.

Зависимость вероятности битовой
ошибки от СКО ДМК

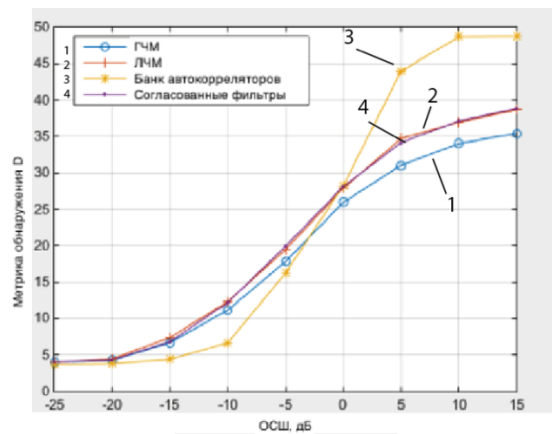


Рисунок 2.

Метрика обнаружения в
многолучевом канале

По итогам моделирования три метода (поиск линейно- и гиперболически-модулированных сигналов, а также использование банка СФ) показали близкую эффективность, и только один банк автокорреляторов показал существенно худшие результаты (Рисунок 2). Учитывая дополнительные ограничения метода банка автокорреляторов, при условии необходимости определять доплеровский сдвиг непосредственно с помощью той же самой преамбулы сформулированы рекомендации использовать метод с банком СФ или методы ЛЧМ и ГЧМ. При условии меняющихся в течение пакета доплеровских масштабных коэффициентов рекомендуется метод банка СФ, а при отсутствии – любой из методов с независимой от доплеровского сдвига преамбулой (ЛЧМ или ГЧМ).

В четвертой главе проведено сравнение существующих методов частотной синхронизации при использовании технологии OFDM в ПАК. Сравнение проводилось для методов, использующих преамбулы и постамбулы, а также для методов, работающих на каждом OFDM-символе на имитационной модели. Параметры системы выбраны таким образом, чтобы соответствовать параметрам практической системы, построенной на

аудиокарте ПК, где БПФ выполняется сразу на несущей частоте, частота дискретизации системы 44.1 кГц, а полоса работы системы [5 кГц, 15 кГц]. Такой вид моделирования позволяет приблизить результаты к реальным и сравнить результаты физического моделирования с имитационным.

В результате имитационного моделирования (Рисунок 3) получены графики, показывающие, что для широкого диапазона ОСШ стабильную, но не минимальную ошибку имеет метод банка СФ, что обуславливает рациональность его применения в шумном канале. Показано, что если доплеровский сдвиг не меняется в течение пакета, то наиболее вычислительно простой и незначительно проигрывающий по точности метод - использование ЛЧМ или ГЧМ преамбул и постамбул, но такие условия могут существенно отличаться от ПАК. Выявлено, что для наиболее рационального метода в шумном канале (банка СФ) отсутствует возможность увеличения точности путем использования дробных значений (Рисунок 4) - для большей частоты дискретизации ошибка может увеличиваться. Кроме того, существующие методы, показывающие более высокую эффективность требуют многократного вычисления БПФ, что по вычислительным ресурсам существенно превышает затраты на демодуляцию, использующим всего одно БПФ. И тем не менее, даже такая коррекция предполагает оценку эффекта Доплера как сдвига частоты, а не масштаба. Все это обуславливает предпосылки к разработке низкзатратных методов уточнения оценки базовых методов.

Для увеличения точности существующих методов проводится разработка алгоритмов на основе МП для метода банка автокорреляторов, а также на основе ВС для метода банка согласованных фильтров. Алгоритм основан на использовании обучающих последовательностей в виде повторяющихся отрезков сигнала. Эта последовательность представляет собой OFDM-символ, состоящий из двух одинаковых частей длительностью T (Рисунок 5).

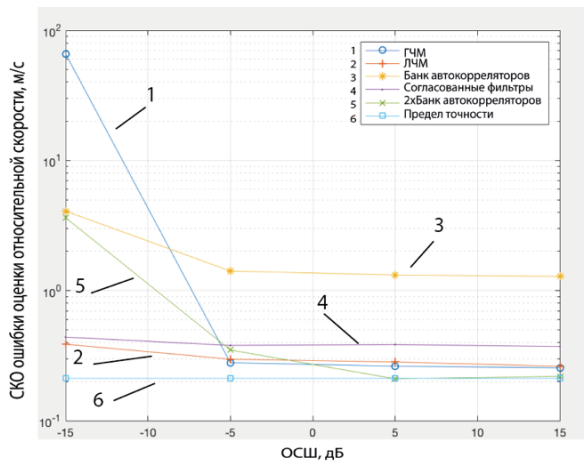


Рисунок 3.

СКО ошибки частотной синхронизации для случая 15 путей распространения при синхронизации по преамбуле

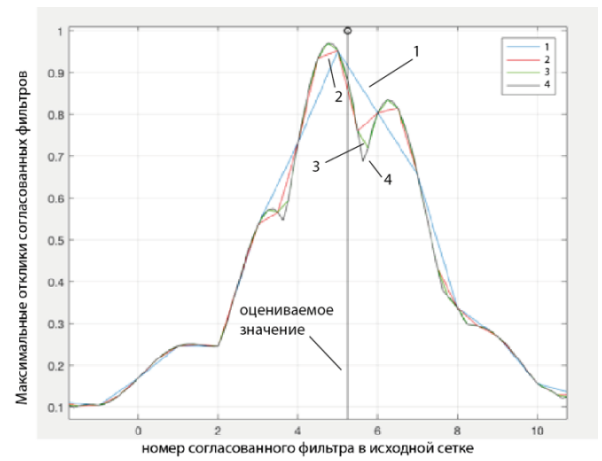


Рисунок 4.

Зависимость максимальных значений откликов фильтров от номера фильтра. 1 - исходный метод, 2 - сетка 2х, 3 - сетка 4х, 4 - истинное значение

Функцию правдоподобия (ФП) относительно величин a и b можно записать в следующем виде $\Lambda(a, b) = f(s_2|a, b)f(s_2|\bar{s}_2, a, b)$, где s_2 – вектор отсчетов сигнала, находящихся внутри отрезка S_2 , а $\bar{s}_2$ – вектор всех остальных отсчетов рассматриваемого временного интервала, $f(\cdot)$ – функция плотности распределения вероятности (ПРВ).



Рисунок 5.

Обучающая последовательность в наблюдаемом отрезке сигнала
После ряда преобразований и введения обозначений ФП:

$$L(a, b) = C \sum_{iT_D \in S_2} \left[-\frac{\rho}{2} E(a, b) + \text{Re}[R(a, b) \exp(j2\pi(a-1)f_0 T)] \right] \quad (2)$$

При синтезе алгоритма синхронизации для систем радиосвязи пренебрежение масштабированием сигнала во времени (2) позволяет разделить оценивание доплеровского сдвига и задержки. Однако в случае многолучевого ПАК с эффектом ДМК это сделать невозможно.

В итоге будем искать экстремум функции $L_T(a, \hat{b}) = \cos(\arg(R(a, \hat{b})) - 2\pi a f_0(a - 1)T)$, который достигается при $a = 1 - \frac{1}{2\pi f_0 T} [\arg(R(a, \hat{b})) + 2\pi n]$, где n – целое.

В качестве уточнения метода банка согласованных фильтров предложены два алгоритма на основе ВС. Оба метода используют последовательность максимальных значений откликов согласованных фильтров, при этом в одном из них проводится ВС значений максимумов с индексами фильтра, а в другом используется разность отстоящих от основного максимума пиков. Для обоих методов разработан механизм выбора рациональных параметров путем имитационного моделирования в ПАК. Алгоритм метод взвешенного суммирования реализуется формулой

$$i_{\text{точн. взвеш.}} = \frac{\sum_{i=i_{R_{\max}}-N}^{i_{R_{\max}}+N} i \cdot R_i^{\max}}{\sum_{i=i_{R_{\max}}-N}^{i_{R_{\max}}+N} R_i^{\max}}, \text{ а алгоритм вычитания смежных пиков формулой}$$

$$i_{\text{точн. пик}} = i_{R_{\max}} + \frac{R_{i_{R_{\max}}+N_1}^{\max} - R_{i_{R_{\max}}-N_1}^{\max}}{R_{i_{R_{\max}}}^{\max}}, \text{ где } R_i^{\max} - \text{максимальное значение}$$

отклика i согласованного фильтра, N - число используемых максимумов слева и справа от общего максимума, N_1 - номер используемого фильтра, считая от фильтра с максимальным откликом.

Путем имитационного моделирования выявлена возможность увеличения точности методов путем компенсации характеристики ошибки по формулам $i_{\text{точн. взвеш. корр.}} = i_{R_{\max}} + (i_{\text{точн. взвеш.}} - i_{R_{\max}}) \cdot k_{\text{корр}}$ и $i_{\text{точн. пик. корр.}} = i_{R_{\max}} + (i_{\text{точн. пик.}} - i_{R_{\max}}) \cdot k_{\text{корр}}$, где $k_{\text{корр}}$ - коэффициент коррекции по характеристике ошибки, для двух описанных алгоритмов соответственно. Итоговое улучшение относительно базового метода банка СФ по СКО ошибки оценки доплеровского масштабного коэффициента составило 8 раз для однолучевого канала и 4 раза для многолучевого с различными ДМК (Рисунок 6: 1 - банк СФ, 2, 3 - алгоритмы смежных пиков и ВС в исходной версии, 4, 5 - в компенсированной).

Для сравнения разработанных алгоритмов по СКО ошибки частотной синхронизации проводится имитационное моделирование при условии однолучевого и многолучевого канала по отдельности для различных ОСШ. Сравниваются конфигурации, имеющие максимальную точность, то есть для алгоритма МП - это вариант с уточнением грубой синхронизации, а для алгоритмов ВС и вычитания смежных пиков - это их скорректированные версии. Из графика (Рисунок 7) видно, что алгоритм на основе МП показывает более высокую точность только при ОСШ больше 5 дБ и однолучевом распространении.

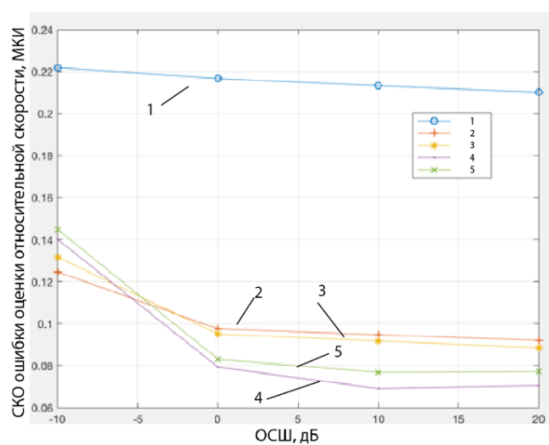


Рисунок 6.

СКО ошибки оценки относительной скорости от ОСШ

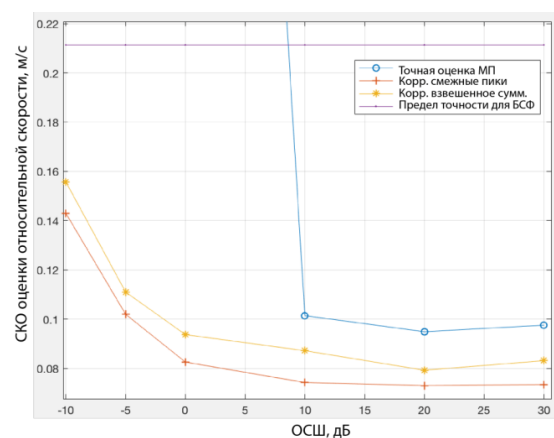


Рисунок 7.

СКО ошибки частотной синхронизации в ПАК

Скорректированные алгоритмы ВС и вычитания смежных пиков демонстрируют высокую точность в широком диапазоне ОСШ как при однолучевом, так и при многолучевом распространении. При этом алгоритм на основе МП требует существенных вычислительных затрат по сравнению с остальными алгоритмами. Эти факторы обуславливают рациональность использования более простых с вычислительной точки зрения и точных алгоритмов для работы в многолучевом канале с различными ДМК на путях распространения.

В пятой главе проведено физическое моделирование передачи акустического сигнала в воздушной среде (Рисунок 8 и Рисунок 9), в котором

проверялись полученные при имитационном моделировании результаты о возможности применения в реальных условиях основных результатов: метод ВС и метод смежных пиков для оценки доплеровского масштабного коэффициента, метод увеличения точности оценки путем компенсации характеристики ошибки, возможности исключения ошибки, связанной с отсутствием максимального значения в отклике соответствующего согласованного фильтра путем предварительного ВС. При этом условия эксперимента были заведомо более сложные, так как разброс задержек и доплеровские масштабные коэффициенты примерно в 5 раз больше по сравнению с ПАК, что подтверждается существенным снижением точности работы базового метода банка СФ. Кроме того, относительная скорость приемника и передатчика менялась в течение каждого символа более, чем на 1 межканальный интервал. В итоге разработанные алгоритмы подтвердили свою эффективность в данных условиях. Выявлен особый случай, при котором на соответствующем отклике согласованного фильтра отсутствует максимальное значение, что приводит метод банка СФ к ошибке порядка одного межканального интервала, при этом было показано, что ошибку можно устранить путем применения предварительного ВС.

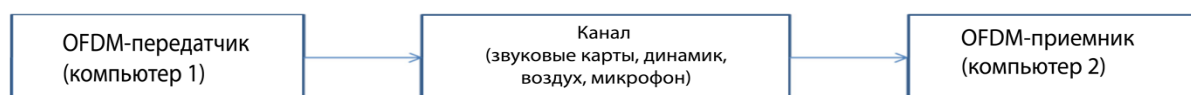


Рисунок 8.

Структурная схема экспериментальной установки

Для получения альтернативной оценки ДМК выведено выражение для скорости точки на поверхности платформы с использованием показаний датчиков: $v_{отн}(t) = \frac{2\pi R}{N_{об}} \cdot \frac{dN(t)}{dt} \cdot \cos\left(\arccos\left(\frac{(R-L \cdot \cos(\alpha(t)))}{\sqrt{R^2 + L^2 - 2RL \cdot \cos(\alpha(t))}}\right) - \pi/2\right)$, где $N(t)$ - сигнал со счетчика квадратурных импульсов, $N_{об}$ - количество импульсов на полный поворот платформы. Итоговая расчётная формула для валидации полученных результатов: $i_{реал}(t) = \frac{v_{отн}(t)}{v_{звука}} \cdot N_{FFT} = \frac{2\pi R \cdot N_{FFT}}{v_{звука} \cdot N_{об}} \cdot \frac{dN(t)}{dt}$.

$\cos\left(\arccos\left(\frac{(R-L\cdot\cos(\alpha(t)))}{\sqrt{R^2+L^2-2RL\cdot\cos(\alpha(t))}}\right)-\pi/2\right)$. Так как при работе в воздушной среде скорость распространения звука примерно в пять раз ниже, то для возможности сравнения результатов с предыдущими разделами рассчитаны значения относительных величин в единицах индексов растяжения/сжатия. Итоговое относительное улучшение (Рисунок 10) по сравнению с базовым методом банка СФ оказалось на уровне, превышающем три раза, что довольно близко к полученным при имитационном моделировании результатам.



Рисунок 9.

Экспериментальная установка

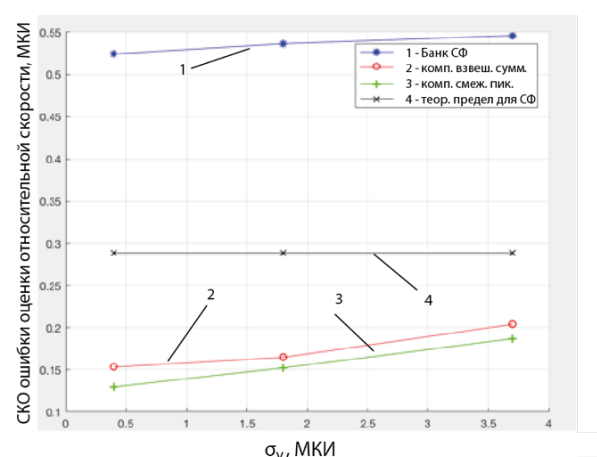


Рисунок 10.

СКО ошибки ДМК

В заключении сформулированы результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По окончании проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. Разработанные алгоритмы показали эффективность в имитационном и физическом моделировании.
2. Алгоритм коррекции с использованием апостериорной характеристики ошибки апробирован в опыте при изменяющихся ДМК в течение OFDM-символа.

3. Применение описанных коррекций позволяет достичь ошибки до 70% меньшей, чем в базовом методе банка СФ.
4. Вычислительные затраты на разработанные алгоритмы на основе ВС удовлетворяют требованию работы в реальном времени.
5. Полученные имитационные модели были использованы при проектировании OFDM-систем, работающих в ПАК.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Shakhhtar B.I., Balakhonov K.A., Kalashnikov K.S. OFDM Signal Synchronization Algorithm in the Multipath Hydroacoustic Channel. Radiotekhnika i Elektronika. 2018. Vol. 63.No. 4. P. 344-350. (5 п.л./2 п.л.). Индексируется в системе Scopus.

2. Исследование вероятности битовых ошибок OFDM-сигналов в подводном акустическом канале / Балахонов К.А [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2018. № 3 (120). С. 4-16. (13 п.л./3 п.л.).

3. Балахонов К.А, Шахтарин Б.И., Калашников К.С. Алгоритм оценки доплеровского масштаба для OFDM-систем в подводном акустическом канале // Сборник трудов международной конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов» «СИНХРОИНФО 2017», г. Казань, 2017 г. С. 109-114. (5 п.л./ 3 п.л.). Индексируется в системе Scopus.

4. Алгоритмы синхронизации OFDM-сигналов в системах акустической подводной связи / Балахонов К.А. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 8. С. 25-30. (5 п.л./2 п.л.).

5. Шахтарин Б.И., Федотов А.А., Балахонов К.А. Исследование качества передачи изображений с использованием OFDM в канале с АГБШ // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 15-19. (4 п.л./2п.л.).

6. Метод частотной синхронизации для OFDM-систем в каналах с аддитивным белым гауссовым шумом и рэлеевскими замираниями / Балахонов К.А [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2016. № 2 (107). С. 138-147. (9 п.л./5 п.л.).

7. Применение сигналов с ортогонально частотным разделением в гидроакустическом канале / Балахонов К.А [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2015. № 5 (104). С. 30-43. (13 п.л./ 6 п.л.).

8. Балахонов К.А, Шахтарин Б.И., Федотов А.А. Метод частотной синхронизации для OFDM-систем в каналах с АГБШ и рэлеевскими замираниями // Сборник трудов конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов» «СИНХРОИНФО-2015», г. Санкт-Петербург. 2015 г. Т. 6. № 1. С. 21-24. (3 п.л./2 п.л.).