

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Феоктистов Денис Сергеевич

**Разработка и исследование способов повышения
помехозащищенности высокоточных морских
радионавигационных систем**

Специальность 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

Научно-квалификационная работа

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бондаренко Валерий Николаевич

Красноярск 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Современное состояние и перспективы развития морских радионавигационных систем.....	6
1.1 Навигационное обеспечение морских объектов.....	6
1.2 Методы измерения радионавигационных объектов.....	7
1.3 Фазовые радионавигационные системы.....	8
1.4 Интегрированные РНС.....	11
1.5 Перспективы развития радионавигационной системы «Крабик-БМ»....	13
Глава 2. Повышение точности и помехозащищенности морских РНС УВЧ диапазона с использованием шумоподобных сигналов.....	16
2.1 Шумоподобные сигналы.....	16
2.2 Частотно-временные параметры сигналов РНС.....	19
2.3 Потенциальные точностные характеристики.....	21
2.4 Помехозащищенность в широкополосных РНС	25
Глава 3. Повышение точности определения координат морских объектов...	27
3.1 Способы определения местоположения РНС.....	27
3.2 Точность местоопределения по сигналам РНС.....	29
3.3 Оценка траекторных параметров с использованием рекуррентных алгоритмов.....	32
3.4 Адаптивная модель фильтра Калмана.....	33
Заключение.....	38
Список использованных источников.....	39

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. За последние годы достигнуты значительные успехи в области спутниковой радионавигации. Вместе с тем интерес к наземным системам радионавигации по-прежнему не ослабевает. Это связано с тем, что в критических ситуациях наземные системы более эффективны и менее уязвимы из-за своей мобильности и локальности, чем спутниковые системы. Это особенно важно для систем специального назначения. Также большой интерес к эксплуатации наземных радионавигационных систем (РНС) нового поколения проявляют и гражданские потребители, относящиеся к службам геодезии, картографии и прочим отраслям.

Морские радионавигационные системы – это радионавигационные системы наземного базирования, предназначенные для определения координат и параметров движения морского судна, необходимых для обеспечения судовождения по заданному маршруту. В Российской Федерации в настоящее время эксплуатируются морские радионавигационные системы «Марс», «РС-10» и другие. Перспективные системы такие как «Спрут-Н1» и «Крабик-БМ» превосходят существующие РНС по ряду показателей, однако не в полной мере отвечают всем предъявляемым требованиям потребителя. К числу недостатков существующих РНС следует отнести невысокую энергетическую и спектральную эффективность, низкую устойчивость к помехам многолучевости, а также преднамеренным помехам. Эти недостатки ограничивают применение РНС в качестве систем специального назначения.

Необходимость разработки новых образцов и модернизации существующих наземных радионавигационных систем была отмечена в Радионавигационном плане Российской Федерации: п.6.10 – «Радиотехнические системы ближней навигации» [1].

Основы теории измерений навигационных параметров по фазе радиосигнала заложены советскими учеными Л. И. Мандельштамом и Н. Д.

Папалекси в 30-х – 40-х годах XX столетия. Им же принадлежат и первые изобретения, использующие фазовые методы радионавигации.

В монографии под редакцией Кинкулькина И.Е. [2] с позиции системного анализа рассмотрены наиболее важные аспекты построения фазовых радионавигационных систем.

В работах Никитенко [6], Агафонникова [7] рассмотрены вопросы построения приемоиндикаторов фазовых и импульсно-фазовых РНС, а также инженерные методы оценки влияния условий распространения радиоволн на точность определения координат. Повышению эффективности широкополосных радионавигационных систем СЧ диапазона с шумоподобными сигналами посвящена монография Бондаренко и Кокорина [4].

В то же время вопросы применения шумоподобных сигналов для повышения эффективности радионавигационных систем УВЧ диапазона до сих пор не нашли должного отражения в научных исследованиях.

Таким образом, тема научно-квалификационной работы, посвященная вопросам повышения точности и помехозащищенности радионавигационных систем УВЧ диапазона на базе применения шумоподобных сигналов, является актуальной и полностью согласуется с запросами практики.

Целью работы является исследование и разработка новых научно-технических решений для реализации высокоточных и помехозащищенных широкополосных РНС УВЧ диапазона с шумоподобными сигналами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) на основе анализа современного состояния и перспектив развития отечественных и зарубежных радионавигационных систем определены основные направления повышения помехозащищенности и точности радионавигационных систем УВЧ диапазона;

2) проведен анализ выбора вида модуляции и структуры сигналов широкополосных радионавигационных систем УВЧ диапазона с учетом их

электромагнитной совместимости с действующими и перспективными системами;

3) исследованы вопросы применения ШПС для совместного измерения дальности и скорости морских объектов, а также повышения устойчивости к помехам многолучевости;

4) исследованы вопросы передачи цифровой информации в широкополосных радионавигационных системах УВЧ диапазона;

5) разработаны методика и программное обеспечение расчета погрешности определения местоположения и скорости морских объектов во вторичной обработке навигационной информации;

6) исследованы алгоритмы адаптивной калмановской фильтрации в целевых системах ближней навигации.

В научно-квалификационной работе использованы методы математического и спектрального анализа, теории сигналов, статистической радиотехники, методы цифровой обработки сигналов, имитационное моделирование в среде MATLAB с использованием разработанных автором программ.

Результаты научного исследования могут быть применены предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) при разработке и модернизации морской РНС «Крабик-БМ».

Публикации и личный вклад автора. Результаты, полученные при исследовании, опубликованы в 22 печатных работах из них 4 – в изданиях перечня ВАК, 4 – статьи с индексацией в Scopus, 8 – в сборниках трудов научно-технических конференций, 3 – тезисы докладов международных и всероссийских конференций, 5 – отчеты по хоздоговорным темам и грантам.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В настоящей главе дана общая характеристика методов измерения радионавигационных параметров, используемых в существующих системах. Проведен краткий обзор действующих отечественных и зарубежных фазовых морских радионавигационных систем. Выполнен анализ современного состояния и перспектив развития отечественных морских радионавигационных систем УВЧ диапазона.

1.1 Навигационное обеспечение морских объектов

Навигация морских судов, как процесс управления движением транспортного средства, осуществляется с применением различных технических средств, таких как: астрономические (секстанты и астрономические компасы); светотехнические средства (световые маяки, прожекторы и пр.); автономные бортовые радионавигационные устройства (радиодальномеры, доплеровские измерители скорости и пр.); радионавигационные системы наземного базирования и спутниковые; инерциальные навигационные средства.

После изобретения радио и разработки конструкций направленных антенн были предприняты попытки применить для целей навигации радиомаяки, работающие за пределами прямой оптической видимости. Кроме морской навигации, радиомаяки нашёл применение в авиации для прокладки и коррекции курса воздушных судов [3].

Главным достоинством средств радионавигационного обеспечения подвижных объектов является их высокая точность, слабо зависящая от погодных условий, времени суток и сезона. Этот факт позволяет широко использовать их для решения широкого спектра задач навигации космических кораблей, морских судов и других объектов.

1.2 Методы измерения радионавигационных параметров

В наземных РНС в качестве радионавигационных параметров (РНП) при определении координат морских объектов, как правило, используются задержки сигналов, для измерения которых используются следующие методы:

- импульсный (временной) метод, при котором задержка сигнала измеряется непосредственно;
- частотный метод, основанный на косвенном измерении задержки частотно-модулированного сигнала посредством измерения его частотного сдвига;
- фазовый метод, основанный на косвенном измерении задержки гармонического сигнала посредством измерения фазового сдвига на одной или нескольких масштабных частотах.

Недостатком импульсных измерений, основанных на определении временного положения характерных точек огибающих, является их невысокая точность [9].

Недостатком частотного метода является сложность аппаратуры, реализующей помехоустойчивое измерение частоты.

В морских радионавигационных системах наиболее перспективным является фазовый метод, позволяющий с наибольшей точностью определять координаты и параметры движения морских объектов. К недостаткам метода относятся трудности, связанные с разрешением фазовой неоднозначности, а также низкая устойчивость к помехам многолучевости [9].

Сочетая достоинства двух и более методов, комбинированные методы измерения позволяют во многом нивелировать недостатки каждого из методов в отдельности.

1.3 Фазовые радионавигационные системы

В настоящее время фазовые радиоизмерения используются для определения пространственного положения объекта в спутниковых системах радионавигации и определения высокоточных координат объекта в специализированных наземных радионавигационных системах.

В основе определения ориентации объектов лежит принцип приема радионавигационных сигналов на разнесенные в пространстве антенны аппаратуры потребителя, в то время как для определения координат объекта используется зависимость расстояния от фазы сигнала:

$$D = ct = \frac{c\Phi}{2\pi f} = \frac{c}{2\pi f}(N2\pi + \varphi) = \frac{c}{f}(N + \Theta), \quad (1.1)$$

где D – расстояние между передатчиком и приемником; c – скорость распространения; t – время запаздывания; f – несущая частота; Φ – текущая фаза; N – число полных фазовых циклов; $\Theta = \varphi/2\pi$ – дробная часть фазового цикла.

Бесспорным преимуществом фазовых РНС является высокая точность определения навигационных параметров, благодаря чему данные системы получили свое развитие и практическое применение.

В то же время главный недостаток фазовых РНС – методическая и техническая трудности устранения неоднозначности фазовых измерений. Проблема заключается в том, что измеренному значению фазы может соответствовать множество значений расстояния D , в случае, когда длина волны радиосигнала меньше расстояния между приемником и передатчиком, что в большинстве случаев встречается на практике.

Другой недостаток фазовых РНС, с которым нельзя не считаться в условиях современного перенасыщения эфира различными сигналами – низкая помехоустойчивость в условиях различного рода помех. Помимо

этого, к влиянию шумов добавляются ошибки измерений в приемнике из-за дополнительного набега фазы при распространении радиосигналов над неоднородной поверхностью и ошибки измерений, возникающие по причине не идентичности приемных трактов аппаратуры.

Фазовые системы радионавигации являются, как правило, многочастотными (дополнительные частоты предназначены для реализации многошкального метода устранения фазовой неоднозначности) и работают в режиме временного разделения сигналов.

Краткая характеристика наиболее известных из существующих отечественных и зарубежных фазовых морских РНС приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Фазовые морские РНС

Название РНС	Структура частотно-временного формата	Диапазон частот, кГц	Дальность действия, км	Точность измерения координат, м
1	2	3	4	5
ДЕССА	Временное разделение сигналов, радиоимпульсы с целочисленным соотношением частот	70 – 150	1000	100-500 (днем), до 1000 (ночью)
Альфа	Временное разделение сигналов, радиоимпульсы со ступенчатым изменением частоты	10 – 14	10000	~ 3000 (днем), до 6000 (ночью)
Спрут-Н1	Временное разделение сигналов, МЧМ-сигнал	1660 – 2160	600	10
Syledis	Временное разделение, двоичный ФМ-сигнал	406000 – 448000	150	1-3
Крабик-БМ	Временное разделение, радиоимпульсы со ступенчатым изменением частоты	421000 – 431000	150	0,5-3

Рассмотрим более подробно РНС «Крабик-БМ», которую в литературе [9] еще называют радиогеодезическим комплексом (РГК). Она представляет собой фазовую радионавигационную систему диапазона УВЧ (421-431 МГц), предназначенную для высокоточной геодезической привязки подвижных и стационарных надводных объектов в прибрежной зоне. В настоящее время

РНС «Крабик-БМ» имеет четыре режима работы: дальномерный, разностно-дальномерный, комбинированный и активный дистанционный. Приемопередатчики РНС являются унифицированными, т.е. могут использоваться как в качестве корабельных (КС), так и опорных станций (ОС) путем задания соответствующего режима работы.

Каждая из активных станций излучает когерентные колебания (в режиме временного разделения) на основной частоте f_0 и дополнительных частотах f_1, f_2, \dots, f_5 . Для идентификации принимаемых сигналов порядок следования дополнительных частот для ведущей ОС изменен на противоположный по сравнению с КС и ведомыми ОС.

Временная диаграмма излучения одной станции РНС «Крабик-БМ» приведена на рисунке 1.1. Сигнал станции РНС представляет собой последовательность импульсов из 5 частотных групп, каждая из которых состоит из двух импульсов с частотой заполнения f_0 и одного импульса с частотой f_i .

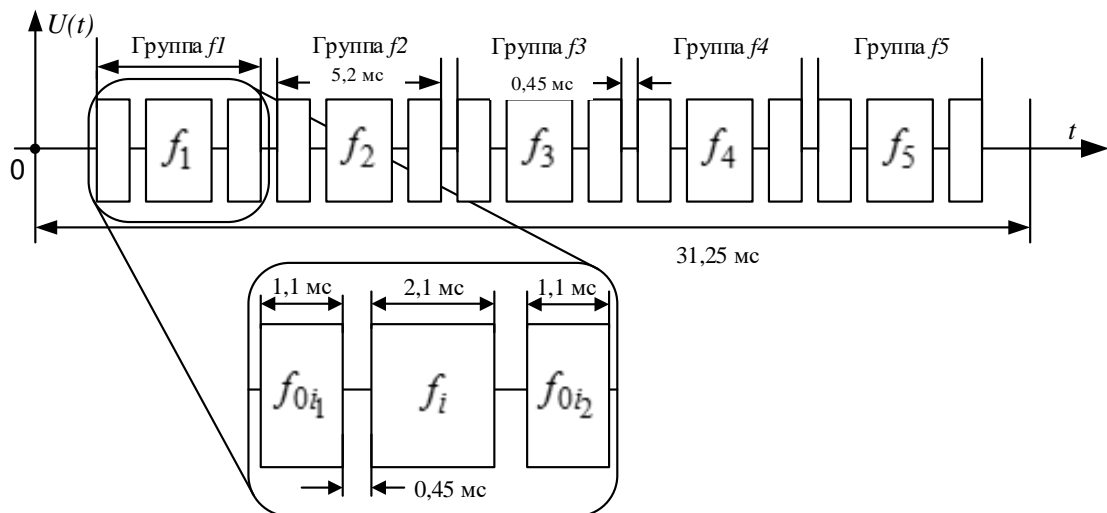


Рисунок 1.1 Формат излучения сигналов станции РНС «Крабик-БМ»

Для каждой из частотных групп значение фазового сдвига на i -й метрической частоте вычисляется в соответствии с выражением

$$\varphi_i = \varphi_{ni} - \frac{\varphi_{0i_1} + \varphi_{0i_2}}{2}, \quad (1.2)$$

где φ_{ni} – измеренное значение фазового сдвига на дополнительной несущей частоте f_i ; φ_{0i_1} – значение фазового сдвига на основной частоте f_0 для i -й частотной группы в импульсе f_{0i_1} ; φ_{0i_2} – значение фазового сдвига на частоте для i -й частотной группы в импульсе f_{0i_2} ; φ_i – искомое значение фазового сдвига на i -й метрической частоте [11].

Точные фазовые измерения в корабельных станциях производятся на основной масштабной частоте $F_5 = f_5 - f_0 = 10$ МГц, а четыре вспомогательные масштабные частоты $F_i = f_i - f_0$ ($i = 1, 2, 3, 4$), равные соответственно 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц и 5 МГц, используются для устранения многозначности фазовых измерений (диапазон однозначности составляет 15 км).

Дальность действия РНС $D_{\max} \approx 150$ км, точность определения координат $\sigma_M \leq 0,5-3$ м; пропускная способность - до 8 потребителей в активном дальномерном режиме и неограниченная в разностно-дальномерном режиме [3].

К числу недостатков РНС «Крабик-БМ» следует отнести невысокую энергетическую и спектральную эффективность, низкую устойчивость к помехам многолучевости, а также преднамеренным помехам. Эти недостатки ограничивают применение РНС в качестве системы двойного назначения.

1.4 Интегрированные РНС

В настоящее время общепризнанно, что для выполнения требований потребителей по целостности, доступности, точности и непрерывности обслуживания, спутниковые радионавигационные системы (СРНС) нуждаются в дополнениях. Проведенные и в России, и за рубежом исследования показывают, что фазовые и импульсно-фазовые РНС при выполнении сравнительно недорогой модернизации аппаратуры ОС могут стать наиболее эффективными дополнениями для СРНС.

Широкое развитие получила концепция интегрированной радионавигационной системы (ИРНС), в основе которой лежит объединение радионавигационных полей наземных и спутниковых РНС.

Согласно этой концепции, все составные части ИРНС: навигационные космические аппараты (НКА), ОС наземных РНС, контрольно-корректирующие станции (ККС), пункты контроля и мониторинга полей РНС, а также аппаратура потребителей - должны использовать единую временную шкалу и единую систему координат. Помимо выполнения своих основных функций, ОС наземных РНС должны вырабатывать и сообщать по радиоканалам корректирующие дифференциальные поправки и сообщения о целостности работы СРНС [4].

Одной из первой отечественной морской РНС, в которой была применена концепция интеграции со СРНС, стала «Спрут-Н1» (рисунок 1.2 [11]).

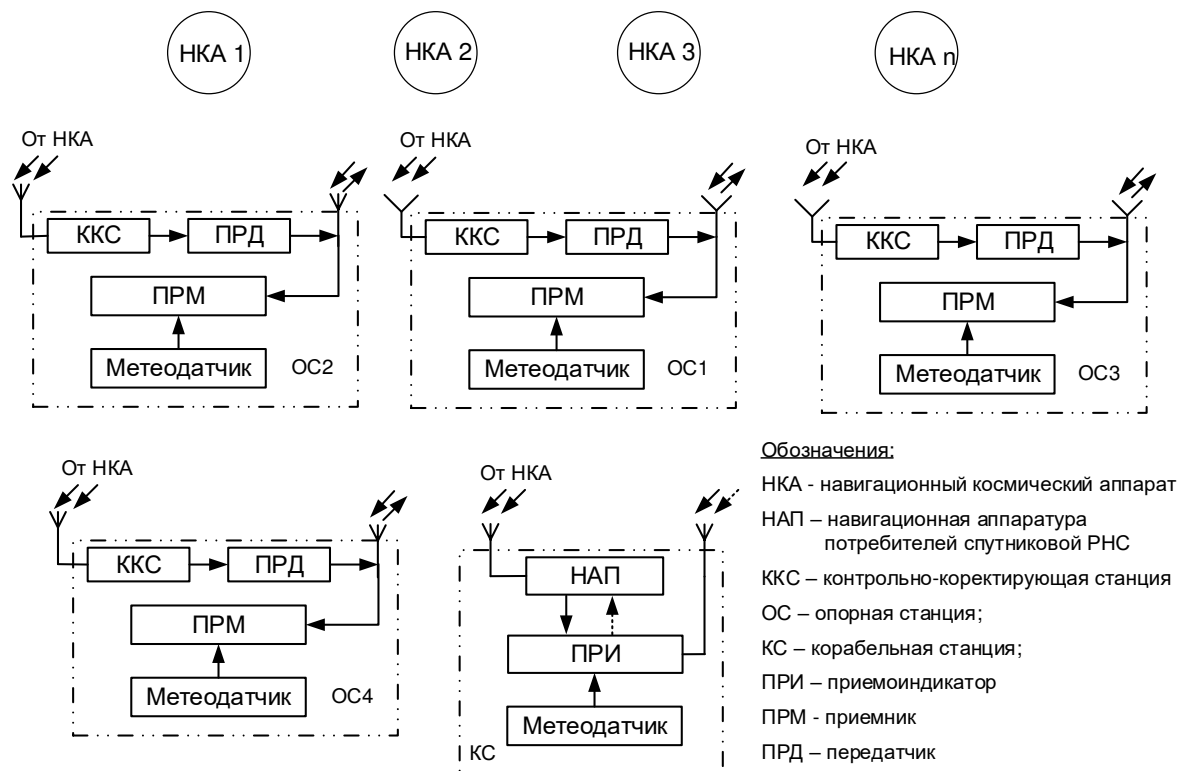


Рисунок 1.2 Структура интегрированной системы морской навигации

Синхронизация опорных станций РНС может осуществляться с использованием информации о точном времени (режим внешней

синхронизации), получаемой с помощью контрольно-корректирующих станций, принимающих сигналы НКА СРНС.

В таком режиме внешней синхронизации нет необходимости приема ведомыми станциями сигналов ведущей ОС, в плане синхронизации все станции равноправны между собой, что значительно сокращает общее время синхронизации (порядка 2 минут) [11]. Указанное время необходимо для осуществления точной ступени синхронизации (кодовой и фазовой), связанной с устранением начальной неопределенности из-за ошибок определения точного времени контрольно-корректирующими станциями. Дополнительно, измерение координат по сигналам спутниковой и наземной радионавигационных систем, позволяют повысить результирующую надежность и точность определения местоположения КС.

1.5 Перспективы развития РНС «Крабик-БМ»

Радионавигационные системы DECCA, Альфа, Крабик-БМ, не использующие широкополосные сигналы, характеризуются тем, что их энергия сконцентрирована в сравнительно узком частотном диапазоне, а большинство параметров не удовлетворяют жестким современным требованиям помехозащищенности и надежности работы. Сосредоточение энергии сигнала по времени и/или частоте позволяет с легкостью обнаружить присутствие и функционирование в эфире соответствующей системы.

К тому же расположенные поблизости другие радиотехнические системы могут повлиять на измеряемые параметры сигналов этих РНС за счет перегрузок мощными импульсными наводками, которые приводят к сбою в работе. Кроме того, для системы «Крабик-БМ» характерны проблемы, связанные с затенениями, которые могут возникнуть вследствие перекрытия антенны приемной аппаратуры элементами корабля, многолучевостью распространения радиосигнала, возникающей в результате отражений от различных препятствий на пути распространения, приводят к снижению

точности определения координат либо к невозможности решения навигационной задачи.

Зарубежная система Syledis, которая является широкополосной системой ближней навигации, представляет собой прямого конкурента по тактико-техническим характеристикам для РНС «Крабик-БМ». Причем, РНС Syledis, разработанная в середине 80-х годов прошлого столетия, уже на тот момент имела сопоставимые точностные характеристики с существующей версией РНС «Крабик-БМ», была более помехозащищена и стабильна в эксплуатации.

Опыт эксплуатации РНС «Крабик-БМ» показал, что именно низкая устойчивость системы к помехам является причиной периодических сбоев измерений, обусловленных наличием отражающих поверхностей на пути распространения сигнала между антеннами ОС и КС.

Решение проблемы повышения помехозащищенности для РНС «Крабик-БМ», а также улучшения ее электромагнитной совместимости (ЭМС) связано с применением шумоподобных сигналов (ШПС), которые позволили бы распределить энергию сигнала по времени и частоте и «замаскировать» излучение под естественные шумы. В [7] показано, что с увеличением базы ШПС радиотехнической системы увеличивается ЭМС с другими системами, в том числе и с узкополосными.

Применение ШПС позволяет совместить системы траекторных измерений и системы передачи данных. При измерении параметров движения объекта расстояние между передатчиком и приемником измеряется по временному сдвигу, а относительная скорость – по доплеровскому сдвигу частоты. При этом, как и для узкополосных сигналов, так и для ШПС актуален вопрос о наиболее рациональном использовании отведенного частотного диапазона, т.е. выбора спектрально эффективного метода манипуляции при формировании ШПС.

Переход к шумоподобным сигналам в РНС «Крабик-БМ» позволит производить обмен служебной информацией между станциями системы.

Помимо каналов слежения за навигационным сигналом и измерения дальности до ОС, будет реализован дополнительный информационный канал для передачи служебной информации: координат опорной сети, текстовых либо речевых сообщений, данных для калибровки системы. В будущем при интеграции со СРНС появится возможность передачи корректирующих поправок к измерениям СРНС, как это реализовано в РНС «Спрут-Н1».

В связи с чем переход на качественно новый уровень РНС «Крабик-БМ» является актуальной задачей и востребован для эксплуатации как гражданскими ведомствами, так и ВМФ РФ, а также другими силовыми структурами.

Аппаратная модернизация системы, прошедшая в 2017 году при непосредственном участии автора работы, заключалась в доработке программных алгоритмов для новой архитектуры построения аппаратуры станций (КС и ОС) РНС «Крабик-БМ». В основе новой аппаратуры были заложены микросхемы программно конфигурируемых приемопередатчиков Software Defined Radio (SDR) AD9361. Более подробно о предложении и результатах модернизации описано в работах [14, 16]. Таким образом, только программное обеспечение вычислительных устройств (ПЛИС, процессор) будет определять принципы работы РНС, методы формирования и обработки сигналов, оставив при этом аппаратную платформу приборов без серьезных изменений.

По существу, нет необходимости полностью отказываться от существующих сигналов и частотно-временного формата работы РНС «Крабик-БМ». «Сохранение» текущих режимов работы РНС позволит сделать систему обратно совместимой с уже выпущенными и эксплуатируемыми ВМФ станциями «Крабик-БМ».

В работе предлагается расширение возможностей за счет ввода дополнительного режима работы РНС на базе ШПС.

ГЛАВА 2. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ МОРСКИХ РНС УВЧ ДИАПАЗОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ

В данной главе приведено обоснование выбора модуляции сигнала и формата излучения РНС с применением ШПС, гарантирующие требуемые точностные показатели. Произведен расчет потенциально достижимой точности измерения кодовой задержки.

2.1 Шумоподобные сигналы

В существующих наземных (Syledis, Spot) и спутниковых (ГЛОНАСС, GPS и пр.) РНС для формирования шумоподобных сигналов (ШПС) используется преимущественно фазовая манипуляция несущего колебания двоичной кодовой последовательностью (двоичная ФМ), или binary phase-shift keying (BPSK) [18]. Однако более высокую частотную и энергетическую эффективность имеют сигналы с постоянной огибающей, частотной манипуляцией и непрерывной фазой, среди которых практический интерес представляют сигналы с минимальной частотной манипуляцией (МЧМ), или minimal shift keying (MSK). Сохранение непрерывности фазы в моменты смены информационных символов позволяет существенно сузить полосу частот, занимаемую сигналом, и уменьшить долю внеполосного излучения.

МЧМ-сигналами называются частотно-манипулированные сигналы, которые можно описать выражением

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k S_0(t - 2kT) \cos(2\pi f_0 t) - \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_k S_0(t - (2k + 1)T) \sin(2\pi f_0 t), \quad (2.1)$$

$$S_0(t) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\pi}{2T} t\right), & |t| \leq T, \\ 0, & |t| > T, \end{cases}$$

где f_0 – несущая частота сигнала, T – длительность элемента ШПС, $S_0(t)$ – функция, определяющая форму элемента видеочастотных ШПС, $\{c_k\}$ и $\{s_k\}$ – элементы кодов, принадлежащие двоичному алфавиту $\{-1, +1\}$.

МЧМ-сигнал одновременно является и частотно-манипулированным сигналом с непрерывной фазой, и квадратурным ФМ со сдвигом. Это говорит о дуализме особенностей присущим обоим типам манипуляций.

Рассмотрим наиболее распространенные в радионавигации сигналы с двоичной ФМ и МЧМ по ЭМС, а также эффективности использования диапазона частот. Для этого запишем нормированные энергетические спектры данных сигналов [18]

$$G_{\text{МЧМ}} = \frac{1}{f_T} \left[\frac{4 \cos\left(\frac{2\pi f}{f_T}\right)}{\pi \left(1 - 16\left(\frac{f}{f_T}\right)^2\right)} \right]^2; \quad (2.2)$$

$$G_{\text{двФМ}} = \frac{1}{f_T} \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi f}{f_T}\right)}{\left(\frac{\pi f}{f_T}\right)} \right]^2. \quad (2.3)$$

По графикам нормированных спектров (рисунок 2.1) можно отметить, что при одной и той же скорости передачи информации и мощности сигнала МЧМ имеет более компактный спектр, нежели двоичная ФМ.

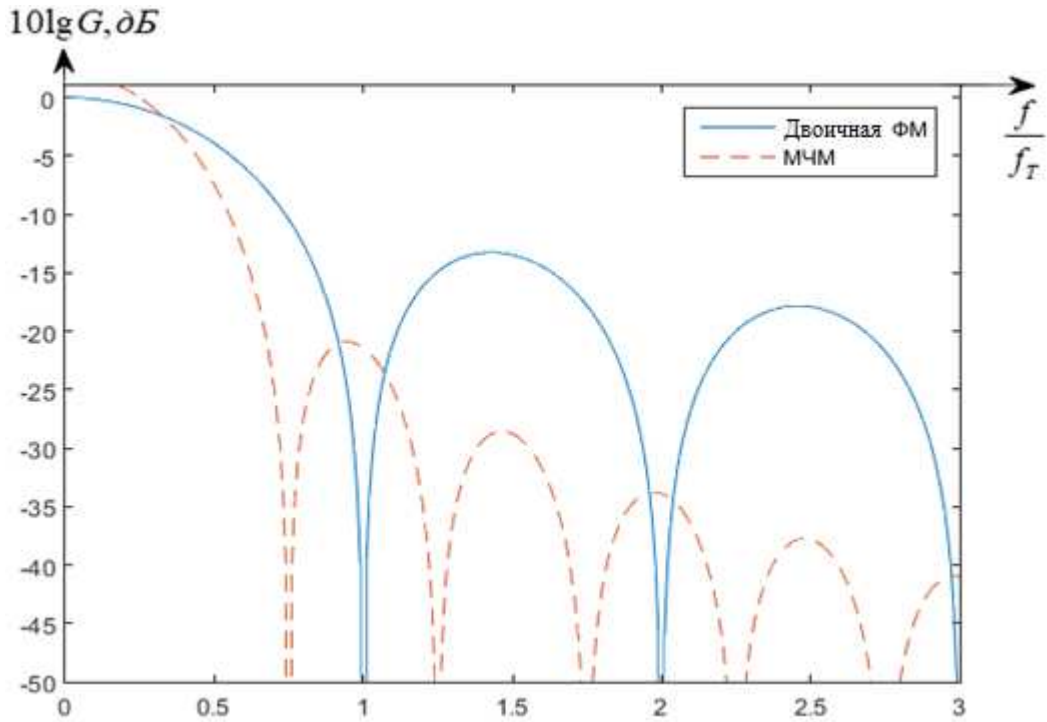


Рисунок 2.1 Нормированные спектры сигналов с МЧМ и двоичной ФМ

По формулам (2.2) и (2.3) можно увидеть, что в спектре сигнала с МЧМ уровень боковых лепестков убывает пропорционально f^{-4} , в то время как при двоичной ФМ – пропорционально f^{-2} .

Для оценки спектральной эффективности сигнала определяют полосу частот, занимаемую сигналом, и уровень внеполосного излучения. Под полосой частот F_{Π} понимают такую полосу, в которой сосредоточено 99% средней мощности сигнала P_c , а под уровнем внеполосного излучения $P_{ВНИ}$ – долей средней мощности сигнала вне полосы частот, которая необходима для обеспечения требуемого качества передачи сигнала (уровень внеполосного излучения радиопередатчиков морских служб в соответствии с ГОСТ 50016-92 составляет -40 дБ). Уровень внеполосного излучения $P_{ВНИ}$ определяется как

$$P_{ВНИ} = 1 - \left[\frac{\int_0^{F_{\Pi}} G(f) df}{\int_0^{\infty} G(f) df} \right]. \quad (2.4)$$

Результаты вычислений показывают, что для удержания 99% энергии МЧМ сигнала требуется полоса $F_{П.МЧМ} = 1,2/T$, а для ФМ сигнала $F_{П.ФМ} = 2,0/T$, в то время как вне полосы $F_{П} = 1,2/T$ содержится 1% и 13% энергии соответственно МЧМ и двоичной ФМ сигналов. Кроме того, МЧМ сигнал имеет более высокую скорость спада внеполосных излучений.

Однопиковая форма АКФ, характерная для обоих видов манипуляций, определяет отсутствие «ложных» нулей дискриминационной характеристики. Это упрощает процесс поиска сигналов и синхронизацию по коду приемопередатчиков.

2.2 Частотно-временные параметры сигналов РНС

При работе РНС в условиях интенсивных многолучевых и внутрисистемных помех важную роль играет выбор способа разделения сигналов, обеспечивающего наилучшее качество выделения радионавигационной информации из сигналов различных станций. При фиксированном частотном ресурсе возможно применение временного или кодового методов.

В случае использования кодового разделения сигналов станций каждый имеет свою кодовую структуру и перекрывается с сигналом соседней во времени. Уровень внутрисистемных помех определяется величиной $\gamma = 1/\sqrt{B}$, где B – база ШПС. Таким образом, более надежное разделение может быть достигнуто лишь при больших базах ШПС, что приводит к значительному росту времени «слепого» поиска.

При временном разделении каждая из станций излучает сигнал в своем временном интервале, при этом необходимо обеспечить, чтобы эти сигналы не перекрывались на приемной стороне в пределах всей рабочей зоны РНС. Для этого вводятся защитные интервалы $t_{ЗИ}$, которые определяются выражением

$$t_{3И} \geq \frac{2R_B}{c}. \quad (2.5)$$

Минимальная величина $t_{3И}$ для РНС «Крабик-БМ» будет составлять 0,5 мс.

К тому же необходимость в последовательном излучении сигналов всеми опорными станциями вызвана требованием тактико-технического задания (ТТЗ) в использовании системы в автономном режиме, то есть без поддержки других радионавигационных систем. Для этих целей используется ведущая станция, задающая формат работы системы ведомых станций. Таким образом, необходимость приема слабых сигналов других ОС требует отключения на время приема собственного передатчика.

В соответствии со всем вышесказанным предлагается использование временного разделения сигналов РНС, последовательность излучения приведена на рисунок 2.2.

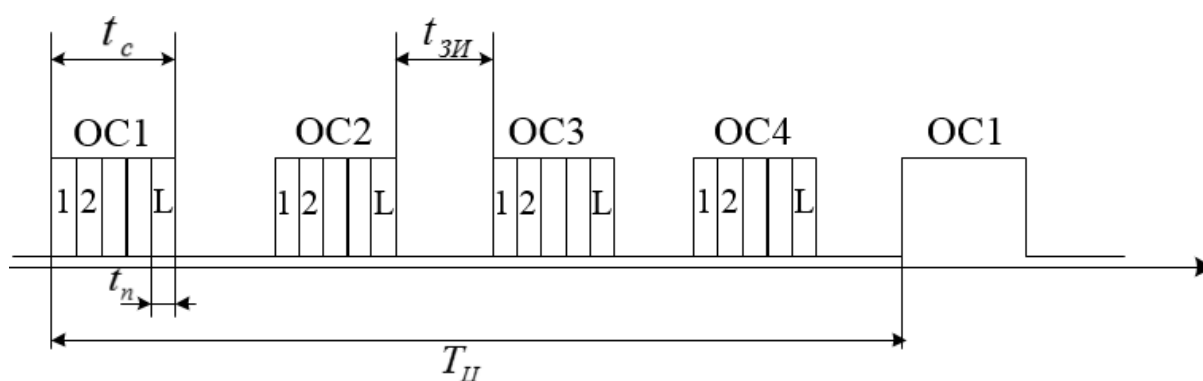


Рисунок 2.2 Последовательность излучения станций РНС

На рисунке 2.2: t_c – длительность сигнала ОС, t_n – период повторения ПСП, L – число периодов ПСП, $T_{Ц}$ – длительность цикла РНС.

Увеличение длительности сигнала опорной станции t_c , с одной стороны, дает возможность разместить на интервале t_c большее число периодов ШПС, что позволяет наиболее полно реализовать достоинства периодических свойств кодирующих последовательностей. Однако, при этом происходит уменьшение числа полезных сигналов, передаваемых станциями системы в единицу времени, что приводит к снижению темпов обновления

навигационной информации.

Минимальная длительность цикла $T_{Ц}$ действующей РНС «Крабик-БМ» составляет $1/8$ с [3]. Для обеспечения дискретности проведения измерений не менее заданной, предлагается определить длительность цикла $1/20$ с.

В предложенном временном уплотнении сигналов качество выделения радионавигационной информации в наибольшей степени зависит от периодических автокорреляционных свойств кодирующих последовательностей. В этом плане привлекательными оказываются M -последовательности, имеющие уровень бокового лепестка периодической автокорреляционной функции $\rho = -1/N$ [4].

Для частотного диапазона системы 421-431 МГц в качестве несущей частоты следует выбрать среднее значение $f_n = 426$ МГц. В качестве дальномерных кодов предлагается использовать M -последовательности с тактовой частотой $f_T = 10$ МГц и длиной $N = 2047$. Период повторения ПСП сигнала $t_n = NT = 0,2$ мс, где $T = 0,1$ мкс – длительность элемента ПСП ($T = 1/f_T$). При длительности цикла $T_{Ц} = 50$ мс и защитном интервале $t_{ЗИ} = 0,5$ мс длительность излучения каждой из станций t_c составит 12 мс с числом повторений ПСП $L = 60$.

2.3 Потенциальные точностные характеристики

При разработке РНС основными требованиями, определяющими выбор сигнала, модуляции, частотно-временного формата работы системы, можно выделить [18]:

- точность измерения радионавигационных параметров;
- помехоустойчивость по отношению к мешающим сигналам узкополосных систем, помехам многолучевости и внутрисистемным помехам, а также преднамеренным помехам;
- радиоскрытность, обусловленная низким уровнем спектральной плотности мощности излучаемых сигналов.

Как уже отмечалось ранее, фазовый метод измерения радионавигационных параметров обеспечивает наибольшую точность координат. Оценить потенциальную точность измерения дальности фазовым методом в условиях действия аддитивного белого гауссовского шума можно с помощью следующего выражения

$$\sigma_D \approx \lambda \frac{\sigma_\varphi}{2\pi} = \frac{\lambda}{2\pi q}, \quad (2.6)$$

где λ – длина волны; $\sigma_\varphi = 1/q$ – СКО ошибки измерения фазового сдвига, $q = \sqrt{2E/N_0}$ – отношение сигнал/шум, E и $N_0/2$ – энергия сигнала и спектральная плотность мощности белого шума.

Так для достижения точности измерения РНП (согласно ТТЗ σ_D 0,2–0,5·10⁻⁵· D м) в РНС УВЧ диапазона требуемое значение отношения сигнал/шум $q^2 \geq 10$ дБ. Однако для обеспечения высокой скрытности требуются малые значения отношения сигнал/шум q^2 в полосе ШПС (порядка -40дБ [18]). В таком случае требуемый энергетический выигрыш при корреляционной обработке принимаемого ШПС составляет не менее 50дБ и может быть обеспечен «сжатием» сигнала по спектру в базу раз ($B = F_c T$, где F_c и T – ширина спектра и длительность ШПС).

В РНС с ШПС устранение многозначности производится с использованием измерения кодовой задержки принимаемого сигнала. Требуемая точность измерения задержки τ определяется заданной вероятностью правильного устранения неоднозначности [4]

$$P_{np} = P\left(|\delta\tau| \leq \frac{T_K}{2}\right), \quad (2.7)$$

где T_K – период колебания несущей частоты f_0 . Тогда для обеспечения вероятности $P_{np} \geq 0,999$ (по значению 3σ) на несущей частоте $f_0 = 426$ МГц

требуемое значение СКО ошибки составит $\sigma_\tau \leq 1$ нс (при распределении ошибки $\delta\tau$ по нормальному закону).

Потенциальная точность совместной оценки задержки и частотного сдвига ШПС определяется соотношениями [4]:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi F_3 q}, \sigma_F = \frac{1}{2\pi T_3 q}, \quad (2.8)$$

$$F_3 = \frac{1}{\sqrt{2E}} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |\tilde{S}(f)|^2 df \right)^{\frac{1}{2}}, T_3 = \frac{1}{\sqrt{2E}} \left(\int_{-\infty}^{\infty} t^2 |\dot{S}(t)|^2 dt \right)^{\frac{1}{2}},$$

где T_3 и F_3 – соответственно эффективная длительность и эффективная (среднеквадратическая) ширина спектра комплексной огибающей $\dot{S}(t)$ ШПС; $\tilde{S}(f)$ – спектр комплексной огибающей.

При фиксированном частотном ресурсе $F_c = 10$ МГц максимально возможные значения тактовой частоты f_T составляют 5 и 10 МГц для двоичной ФМ и МЧМ соответственно. При этом эффективная ширина спектра для ФМ $F_{3, \text{ФМ}} = 0,33f_T = 1,65$ МГц, а для МЧМ $F_{3, \text{МЧМ}} = 0,23f_T = 2,3$ МГц [4]. Энергетические потери за счет ограничения спектра сигнала указанной полосой 10 МГц составляют около 1 дБ и 0,1 дБ соответственно для ФМ и МЧМ.

При этом выигрыш по СКО ошибки σ_τ МЧМ относительно двоичной ФМ составляет почти 1,4 раза ($F_{3, \text{МЧМ}}/F_{3, \text{ФМ}}$), что эквивалентно энергетическому выигрышу около 3,3 дБ. При энергопотенциале $\frac{A^2}{N_0} = 25$ дБГц (соответствует отношению сигнал/шум -40 дБ в полосе 10 МГц), времени интегрирования $t_c = 12$ мс (отношение сигнал/шум $q^2 = 10$ дБ) СКО ошибки σ_τ в соответствии с (2.8) составляет приблизительно 20 нс (или 6 м по дальности) для МЧМ сигнала.

Для достижения требуемой для устранения многозначности точности $\sigma_\tau = 1$ нс необходима дополнительная фильтрация результатов измерения

задержки с использованием следящего фильтра (например, фильтра Калмана), а также за счет повышения мощности излучения сигнала.

Как и в случае измерения фазового сдвига принимаемого сигнала, с учетом динамики морских объектов и требования малых значений шумовой полосы ($F_{ш} \leq 0,33\text{Гц}$) целесообразна реализация следящего измерителя задержки, комплексируемого с автономными датчиками скорости и курса корабля [4].

Помимо более высокой точности измерения задержки МЧМ имеет больший иммунитет по отношению к помехам многолучевости, чем двоичной ФМ. Для обоих сигналов влиянием помехи можно пренебречь, если относительное запаздывание превышает длительность элемента ПСП $|\Delta\tau| \approx T$, равного 100 и 200 нс соответственно для МЧМ и двоичной ФМ (что эквивалентно 30 и 60 м по дальности). Данные значения получены для случая прямой радиовидимости станций системы.

При тех же заданных пороговых значениях отношения сигнал/шум $q^2=10\text{дБ}$ СКО частотного сдвига σ_F в соответствии с (2.8) составляет 4,5 Гц, что соответствует погрешности измерения скорости 1,6 м/с.

Таким образом, для обеспечения требуемой точности широкополосной РНС необходимо использовать ШПС с максимально возможной базой $B = 1,2 \cdot 10^5$, что при ширине спектра $F_c=10\text{ МГц}$ соответствует длительности ШПС $t_c = 12\text{ мс}$. С другой стороны, длительность ШПС ограничена сверху максимально возможным доплеровским частотным сдвигом: $t_c \leq 1/F_{\Delta\text{max}}$ (при котором можно пренебречь неидеальной когерентностью принимаемого и опорного ШПС). При $t_c = 12\text{ мс}$ максимальное значение $F_{\Delta\text{max}} = 83\text{ Гц}$, что соответствует максимальной скорости объекта около 210 км/час.

Несмотря на то, что излучаемые сигналы РНС «Крабик-БМ» занимают полосу 10 МГц, в частотном плане системы предусмотрены сдвиги частот на 5, 10 и 15 МГц. Таким образом, общий диапазон, отведенный системе,

занимает 30 МГц. Тогда возможно потенциальное расширение полосы сигнала с 10 до 30 МГц исследуемой РНС, показатели точности и разрешающей способности улучшатся примерно в 3 раза за счет выбора тактовой частоты МЧМ $f_T = 30$ МГц (расширение полосы в 3 раза приводит к прямо пропорциональному росту эффективной ширины спектра сигнала, а в соответствии с формулой (2.8) и точности выполняемых измерений).

2.4 Помехозащищенность в широкополосных РНС

Численной мерой помехозащищенности служит коэффициент помехозащищенности, выраженный в децибелах [18]:

$$k_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{P_C} = B - q_{\min}^2 - L_{\text{суст}}, \quad (2.9)$$

где B – база сигнала, q_{\min}^2 – пороговое значение отношения сигнал/шум на выходе корреляционного приемника, $L_{\text{суст}}$ – аппаратные потери в системе.

Как следует из (2.9), коэффициент помехозащищенности определяет предельно допустимое отношение помеха/сигнал P_{Π}/P_C , соответствующее пороговому значению q_{\min}^2 , которое, в свою очередь, определяется требуемой точностью измерения РНП (значением СКО ошибки).

При фиксированном частотном ресурсе с увеличением длительности посылок ОС на каждом цикле излучения увеличивается база сигнала и соответственно запас помехозащищенности. Так при полосе частот 10 МГц изменение длительности посылок ОС от 10 до 100 мс влечет увеличение базы сигнала от 10^5 до 10^6 (от 50 до 60 дБ) и соответственно коэффициента помехозащищенности на 10 дБ (аналогичное значение может быть получено и при полосе частот 30 МГц). Достигается это ценой снижения темпа выдачи результатов измерения РНП (дискретность – T_{Π}).

Пороговое значение $q_{\min}^2 = 2E/N_0$ отношения сигнал/шум на выходе корреляционного приемника определяется видом модуляции и структурой сигнала, а также способом приема сигнала.

Помехозащищенность широкополосных РНС определяется, прежде всего, рациональным выбором вида модуляции и параметров сигналов. Так выбор длительности излучения ОС, определяющей интервал интегрирования на каждом цикле, проводится для достижения требуемой точности измерения РНП (значения σ_φ). Так для достижения значения $\sigma_\varphi = 0,01$ рад по формуле (2.6) требуемое отношение сигнал/шум составляет 40дБ. В то же время типичным для ОС широкополосной РНС УВЧ диапазона является пороговое значение отношения сигнал/шум на цикле излучения $q_{\min}^2 \geq 10$ дБ, что соответствует условиям приема сигнала ОС, удаленной от корабельной станции на расстоянии 150 км. При этом отношение сигнал/шум в полосе приемного тракта КС составляет около -40дБ. Достижение указанной точности измерения РНП в этих условиях требует крайне малых значений шумовой полосы следящего фильтра: порядка 0,1 Гц и менее [18].

Аппаратурные потери $L_{\text{сист}}$ в системе определяются несколькими факторами, основными из которых являются потери, связанные с реализацией таких служебных функций как синхронизация, регулировка излучаемой мощности, передача служебной информации; потери из-за ограничения разрядности вычислений, неточности синхронизации и др.; потери из-за некогерентного накопления при поиске и приеме информационных сигналов.

Приведенное в литературе требуемое значение коэффициента помехозащищенности для систем специального назначения составляет 40 дБ. Для предложенного частотно-временного формата излучения станций системы помехозащищенность составит 44 дБ без учета аппаратурных потерь, величина которых должна быть минимизирована при аппаратной реализации.

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

Одним из ключевых вопросов, определяющих точность и достоверность работы РНС, являются применяемые в ее программном обеспечении алгоритмы преобразования измеренных радионавигационных параметров (дальностей, квазидальностей, разностей дальностей) в координаты и элементы движения объектов. Неточности в реализации алгоритмов определения места могут стать источником дополнительных методических погрешностей. С другой стороны, исследование погрешностей алгоритмов определения координат в тех или иных способах местоопределения позволяет оценить ожидаемые значения точности вычисления этих самых координат и сравнить с требованиями ТТЗ.

3.1 Способы определения местоположения РНС

В соответствии предлагаемым частотно-временным форматом отсутствие излучения КС определяет использование только пассивных способов определения координат судна: дальномерного, квазидальномерного и разностно-дальномерного.

3.1.1 Дальномерный способ

Определение координат в дальномерном режиме работы РНС осуществляется путем решения системы нелинейных уравнений вида:

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_{КС})^2 + (y_i - y_{КС})^2}, \quad (3.1)$$

где $i=1, \dots, N$ – текущий номер сигнала принимаемой станции; N – общее число принимаемых сигналов станций; D_i – измеренные значения дальности ОС_{*i*}-

КС; x_i, y_i – прямоугольные координаты i -й ОС; $x_{КС}, y_{КС}$ – неизвестные координаты КС.

Для данного способа дальности ОС-КС определяются значениями задержек сигналов с учетом фаз несущих частот.

В зависимости от числа ОС система уравнений может содержать до N уравнений. Для решения систем нелинейных уравнений используют итерационные методы, например, метод Ньютона, для первой итерации вычислений которой необходимы априорные данные о месте КС.

Более подробное описание решения такого рода систем можно найти в работе [9].

3.1.2 Квазидальномерный способ

В данном способе аппаратура объекта измеряет не истинные дальности между ОС и КС, как это было в предыдущем способе, а квазидальности, отличающиеся от геометрических дальностей на величину, пропорциональную расхождению шкалы времени КС и шкалы времени (ШВ) опорной сети $\Delta\tau$.

Система уравнений вычисления координат для квазидальномерного способа имеет вид:

$$Q_i = \sqrt{(x_i - x_{КС})^2 + (y_i - y_{КС})^2} + v \cdot \Delta\tau, \quad (3.2)$$

где $i=1, \dots, N$ – номер текущего измерения квазидальности по сигналу i -й ОС; Q_i – измеренное значение квазидальности для i -й ОС; x_i, y_i – координаты i -й ОС; v – значение скорости распространения радиосигналов в среде распространения радиосигнала; $\Delta\tau$ – отклонение шкалы времени КС по отношению к ШВ опорной сети.

Решение системы уравнений (3.2) также производится итерационным методом Ньютона.

3.1.3 Разностно-дальномерный способ

При разностно-дальномерном способе приемником КС вычисляются разности между значениями задержек сигналов, принятых от ведомых ОС и сигналами ведущей ОС.

Таким образом, при работе по сигналам n ОС КС может измерить $n-1$ разностей дальностей и представить в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta D_1 = \sqrt{(x_2 - x_{KC})^2 + (y_2 - y_{KC})^2} - \sqrt{(x_1 - x_{KC})^2 + (y_1 - y_{KC})^2} \\ \Delta D_2 = \sqrt{(x_3 - x_{KC})^2 + (y_3 - y_{KC})^2} - \sqrt{(x_1 - x_{KC})^2 + (y_1 - y_{KC})^2} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta D_{n-1} = \sqrt{(x_n - x_{KC})^2 + (y_n - y_{KC})^2} - \sqrt{(x_1 - x_{KC})^2 + (y_1 - y_{KC})^2} \end{array} \right., \quad (3.3)$$

где $\Delta D_1 \dots \Delta D_{n-1}$ – измеренные разности дальностей.

Полученная система уравнений может решаться, как и в предыдущих пунктах, итерационным методом Ньютона.

3.2 Точность местоопределения по сигналам РНС

В работе [9] говорится, что погрешность определения радионавигационных параметров σ_D ($\sigma_{\Delta D}$ – для разностно-дальномерного) в фазовых РНС в общем случае определяется рядом факторов:

- отличие фактической скорости распространения радиосигнала на рабочей трассе от ее расчетного значения;
- отличие фактической частоты сигналов, на которой выполняются измерения фазы, от ее расчетного значения;
- наличие случайной и систематической погрешностей в измеренных значениях фазы принятых сигналов.

Пути уменьшения погрешностей рассмотрены в работе [9]. Остаточная составляющая случайной и систематической погрешностей измерения фазы и

определяет погрешность измерения радионавигационных параметров, которая, свою очередь, приводит к погрешностям измерения координат КС, величина которых зависит от:

- расположения ОС друг относительно друга, что обуславливает формирование рабочей зоны РНС;
- положения КС относительно ОС;
- способа местоопределения координат КС.

Известно, что ковариационная матрица погрешностей координат в радионавигационной системе

$$W = H^{-1} \cdot S \cdot (H^{-1})^T, \quad (3.4)$$

где H – матрица частных производных, измеряемых РНП; S – ковариационная матрица погрешностей измерения РНП.

Для равноточных измерений дальномерным способом матрица частных производных, измеряемых РНП по координатам, определяется как

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_1}{\partial x} & \frac{\partial D_1}{\partial y} \\ \frac{\partial D_2}{\partial x} & \frac{\partial D_2}{\partial y} \\ \frac{\partial D_3}{\partial x} & \frac{\partial D_3}{\partial y} \\ \frac{\partial D_4}{\partial x} & \frac{\partial D_4}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

где D_1, \dots, D_4 – измеряемые РНП (дальности/квазидальности).

Ковариационная матрица погрешностей измерения РНП имеет вид

$$S = \sigma_\tau^2 c^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

где σ_τ – СКП измерений задержки; c – скорость распространения сигнала.

В случае для разностно-дальномерного способа данные матрицы имеют вид

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_2}{\partial x} & \frac{\partial D_1}{\partial x} & \frac{\partial D_2}{\partial y} & \frac{\partial D_1}{\partial y} \\ \frac{\partial D_3}{\partial x} & \frac{\partial D_1}{\partial x} & \frac{\partial D_3}{\partial y} & \frac{\partial D_1}{\partial y} \\ \frac{\partial D_4}{\partial x} & \frac{\partial D_1}{\partial x} & \frac{\partial D_4}{\partial y} & \frac{\partial D_1}{\partial y} \end{bmatrix};$$

$$S = \sigma_{\Delta\tau}^2 c^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 1 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\sigma_{\Delta\tau}$ – СКП разностей измерений задержек.

Приведенные выше выражения позволяют оценить ковариационную матрицу погрешностей W в любой точке рабочей зоны РНС в виде

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

В РНС для характеристики погрешностей часто используется понятие геометрического фактора, представляющего собой коэффициент, на который умножается погрешность измерения дальности (разности дальностей) для получения оценки погрешности измерения координат.

Для случая, если СКП оценок РНП неравноточны (когда $\sigma_{r1} \neq \sigma_{r2} \neq \dots \neq \sigma_{rN}$), ковариационная матрица погрешностей измерения РНП (для дальномерного способа) имеет вид

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{r1}^2 & \sigma_{r1}\sigma_{r2}P_{12} & \sigma_{r1}\sigma_{r3}P_{13} & \sigma_{r1}\sigma_{r4}P_{14} \\ \sigma_{r1}\sigma_{r2}P_{21} & \sigma_{r2}^2 & \sigma_{r2}\sigma_{r3}P_{23} & \sigma_{r2}\sigma_{r4}P_{24} \\ \sigma_{r1}\sigma_{r3}P_{31} & \sigma_{r2}\sigma_{r3}P_{32} & \sigma_{r3}^2 & \sigma_{r3}\sigma_{r4}P_{34} \\ \sigma_{r1}\sigma_{r4}P_{41} & \sigma_{r2}\sigma_{r4}P_{42} & \sigma_{r3}\sigma_{r4}P_{43} & \sigma_{r4}^2 \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

где p_{ij} – коэффициенты корреляции отсчетов измерений РНП между станциями i и j .

Без учета геометрического фактора определяющий вклад в погрешность определения координат КС вносит точность измерения РНП (σ_r либо $\sigma_{\Delta r}$) и погрешность синхронизации сигналов ОС РНС.

3.3 Оценка траекторных параметров с использованием рекуррентных алгоритмов

Использование методов фильтрации позволяет уменьшить случайную погрешность измерения. В настоящее время разработано большое число алгоритмов фильтрации изменяющихся параметров, среди которых наибольшее распространение получили методы калмановской фильтрации.

В настоящее время в РНС «Крабик-БМ» использована упрощенная модель фильтрация измеренных значений фазовых сдвигов – $(\alpha - \beta)$ – фильтр. Анализ показал, что при неограниченном увеличении номера отсчета k происходит уменьшение коэффициентов α и β вплоть до нуля, т.е. при большом значении k фильтрация идет все с меньшим весом, и, в конечном итоге, фильтр перестает реагировать на изменения входных данных. Фильтр начинает расходиться, что позволяет считать его несостоятельным.

Такие фильтры находят применение в различных системах из-за простоты реализации и низким требованиям к вычислительным мощностям. В таких системах используют фиксированные или предварительно рассчитанные коэффициенты усиления. Исследования, касающиеся выбора таких коэффициентов для РНС «Крабик-БМ», приведены в работе [9], в которой представлены расчеты, подтверждающие оптимальность данных величин. Однако, как показывает практика, эти параметры не всегда применимы, например, в начале сопровождения и в случае совершения маневра наблюдаются отскоки, после которых в ряде случаев траектория

движения не возвращается к истинной. Восстановление траектории в таком случае возможно либо через очень продолжительное время (до нескольких десятков минут), либо путем ручного сброса фильтрации оператором. Это делает его мало пригодным для использования в автоматизированных РНС.

3.4 Адаптивная модель фильтра Калмана

Широкое применение алгоритма фильтра Калмана в современных информационных системах обусловлено рядом его преимуществ. Это прежде всего то, что формируемая им текущая оценка является наилучшей в смысле минимума дисперсии по сравнению с другими линейными оценками, полученными только линейными преобразованиями наблюдений. Кроме того, несколько усложнив алгоритм Калмана, можно использовать его и в задачах нелинейной фильтрации. Пошаговый (рекуррентный) характер алгоритма Калмана позволяет получать текущую оценку корректировкой ее предыдущего значения с использованием только очередного наблюдения. Это удобно для реализации цифрового фильтра в реальном времени, т.е. по мере поступления данных.

К числу основных проблем, связанных с реализацией фильтра Калмана, относится обеспечение сходимости вычислений фильтра [8].

Алгоритм фильтра Калмана построен с использованием двух многократно повторяющихся операций: экстраполяции и фильтрации. Суть первой состоит в предсказании состояния в следующий момент времени (с учетом неточности измерения):

$$\hat{s}_k(t_i^-) = F_k(t_i, t_{i-1}) \cdot \hat{s}_k(t_{i-1}^+) + B_k(t_{i-1}) \cdot n(t_{i-1}); \quad (3.9)$$

$$P_k(t_i^-) = F_k(t_i, t_{i-1}) \cdot P_k(t_{i-1}^+) \cdot F_k^T(t_i, t_{i-1}) + Q_k(t_i). \quad (3.10)$$

Далее полученная с измерителя информация корректирует предсказанное значение (с учетом неточности информации):

$$K_k(t_i) = P_k(t_i^-) \cdot H_k^T(t_i) \cdot [H_k(t_i) \cdot P_k(t_i^-) \cdot H_k^T(t_i) + R]^{-1}; \quad (3.11)$$

$$P_k(t_i^+) = P_k(t_i^-) - K_k(t_i) \cdot H_k(t_i) \cdot P_k(t_i^-); \quad (3.12)$$

$$\hat{s}_k(t_i^+) = \hat{s}_k(t_i^-) + K_k(t_i) \cdot [z(t_i) - H_k(t_i) \cdot \hat{s}_k(t_i^-)]. \quad (3.13)$$

В формулах (3.10)–(3.14) использованы обозначения: $F_k(t_i, t_{i-1})$ – матрица, описывающая динамику системы (матрица перехода между состояниями); $B_k(t_{i-1})$ – матрица, определяющая применение управляющего воздействия; $H_k(t_i)$ – матрица, определяющая соотношение между измерениями и состоянием системы; $Q_k(t_i)$ – матрица ковариации шума процесса; R – ошибка измерения, определяемая матрицей погрешностей измерения; $s(t_i)$ и $\hat{s}(t_i)$ – вектор состояния системы и его оценка; $n(t_i)$ – вектор входного воздействия; $z(t_i)$ – наблюдаемый вектор измерения; $P(t_i)$ – предсказание ошибки ковариации; $K(t_i)$ – коэффициент усиления Калмана [5].

При разработке фильтра Калмана для морских радионавигационных систем важнейшую роль играет модель движения объекта. В общем случае полные модели движения судна являются динамическими, представляя собой дифференциальные уравнения движения центра масс судна и кинематические уравнения связи скоростей с угловыми и пространственными координатами [6]. Для оценки движения объекта на плоскости достаточно применять более упрощенные модели, которые отражали бы основные изменения параметров движения объекта. Изменение курса или скорости судна может занять, в зависимости от маневренности судна, от нескольких секунд для небольших судов (катеров) до нескольких минут для крупных судов, обладающих большой инерцией (танкеров). В ситуации, когда требуется срочно изменить курс или скорость корабля, эта задержка может оказаться критической.

При выполнении моделирования были рассмотрены следующие модели движения надводных объектов.

- стационарное состояние объекта, при котором координаты объекта полагаются неизменными. В данной модели шум состояний – это случайные изменения скорости объекта с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_v^2 . Вектор состояния имеет вид $s(t_i) = [x(t_i); y(t_i)]$;

- равномерное прямолинейное движение объекта. В этом случае шум состояний представляет собой случайные вариации ускорения объекта, имеющие нулевое математическое ожидание и заданную дисперсию σ_a^2 . Вектор состояния имеет вид $s(t_i) = [x(t_i); y(t_i); v_x(t_i); v_y(t_i)]$;

- равноускоренное движение объекта. Шум состояний представляет собой случайные рывки объекта. Вектор состояния имеет вид $s(t_i) = [x(t_i); y(t_i); v_x(t_i); v_y(t_i); a_x(t_i); a_y(t_i)]$.

Моделирование фильтра Калмана проводилось в среде Octave со следующими исходными параметрами:

- для каждой модели использовался интервал в 100 единиц дискретного времени;
- решение навигационной задачи проводилось дальномерным методом;
- для моделирования шума измерений координат, к радионавигационным параметрам (дальностям) были добавлены случайные величины, распределенные по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением 6 м;
- для модели равномерного движения объекта была выбрана скорость 15 м/с;
- для модели равноускоренного движения объекта было выбрано ускорение 0,5 м/с².

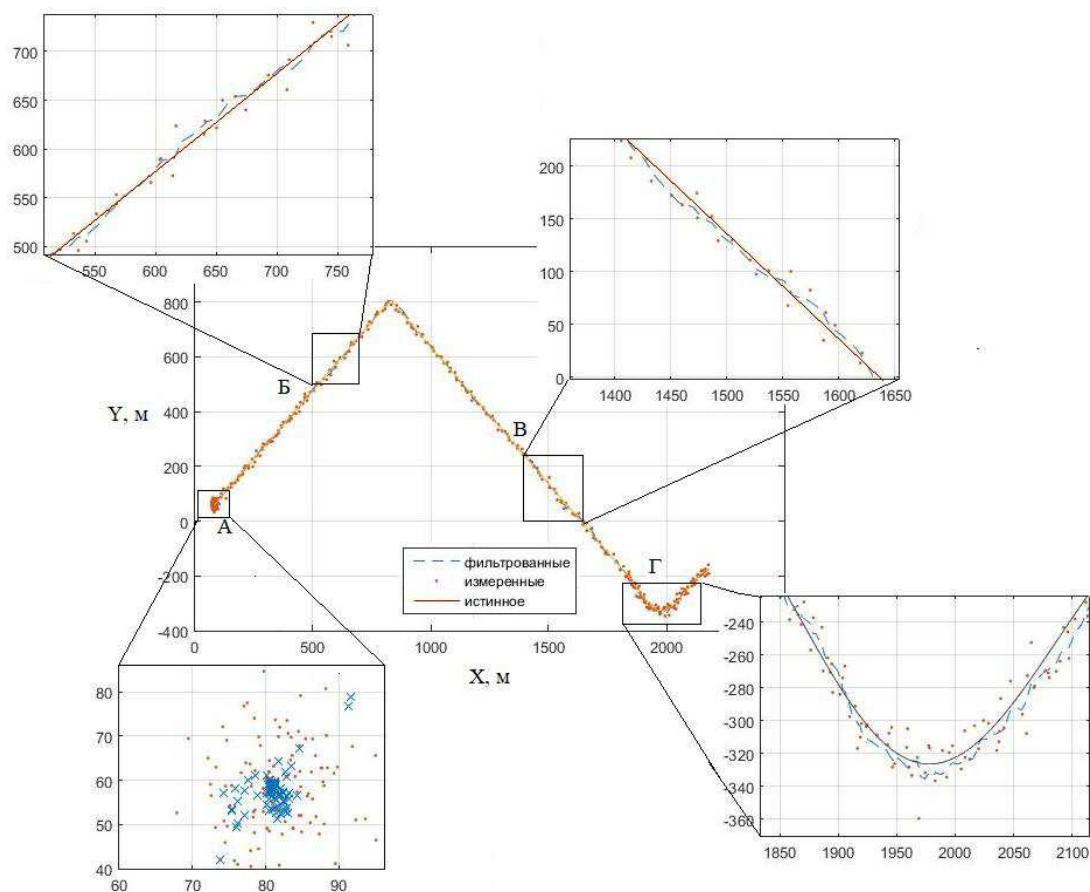


Рисунок 3.1 Исследуемая траектория движения

На рисунке 3.1 приведена полученная в результате моделирования траектория движения объекта на плоскости: участок А – стационарное положение, участок Б – равноускоренное движение, участок В – равномерное прямолинейное движение, участок Г – маневрирование по кривой (окружности).

Результаты моделирования, представленные значениями среднеквадратических отклонений (СКО) оценок координат на входе и выходе ФК, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Сводная таблица результатов моделирования

Участок	СКО измеренных значений координат, м	СКО фильтрованных значений координат, м
1	2	3
А	11,13	4,04
Б	11,84	3,92
В	6,64	4,51
Г	6,9	3,94

По результатам моделирования можно сделать вывод, что применение оптимального оценивания фильтра Калмана позволяет снизить СКО координат в 1,5-3 раза для рассматриваемой траектории. Ухудшение эффективности работы фильтра Калмана в конце участка В связано с резким маневром объекта без снижения скорости движения, что привело к искажению траектории на 3 дискретных отсчета, которое можно объяснить недостаточной скоростью реакции фильтра.

Главной задачей при разработке адаптивного фильтра Калмана является подстройкой параметров фильтрации под текущий режим работы (модель движения). С одной стороны, фильтр не должен пропустить маневр, т.е. иметь достаточную чувствительность к изменению траектории, а с другой – как можно меньше реагировать на возмущение в радионавигационной информации при движении объекта по прямой.

Таким образом, за счет адаптивной фильтрации Калмана значение точности измерения координат для предлагаемого частотно-временного формата составляет примерно 4 м (дальности между ОС и КС ≈ 110 км). Данная величина не соответствует требованиям ТТЗ на РНС «Крабик-БМ» (точность измерения до 3 м на таком удалении КС от опорных станций), однако необходимая точность измерения местоположения объекта может быть достигнута, например, за счет расширения полосы частот до 30 МГц, как это было показано ранее. Либо путем применения вида манипуляции с более эффективной шириной спектра (например, MSK-BOC, которые подробно исследованы и описаны в работах [4,11,18]). Еще одним вариантом является повышение уровня излучаемой мощности, однако в это случае стоит помнить о снижении помехозащищенности системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Выполненный анализ современного состояния и тенденций развития радионавигационных систем свидетельствует, что постоянный рост требований к точности и помехозащищенности современных радионавигационных систем со стороны гражданских потребителей и силовых структур обуславливает актуальность разработки эффективных способов «сигнальной помехозащиты», стимулирует поиск новых видов модуляции и алгоритмов обработки сигналов в РНС нового поколения.

2. Применение ШПС позволяет получить высокую точность совместного измерения дальности и скорости подвижных объектов, а также дает возможность бороться с многолучевостью распространения радиоволн, возникающей в результате отражений от различных препятствий на пути распространения. С точки зрения простоты реализацией аппаратуры формирования, приема и обработки сигналов следует признать целесообразным применение в широкополосных РНС УВЧ диапазона спектрально-эффективных сигналов с МЧМ.

3. При использовании МЧМ-сигналов обеспечивается возможность передачи цифровой информации, что позволяет значительно ослабить негативное влияние модуляции сигнала данными: сократить время поиска, повысить точность и устойчивость слежения за кодовой задержкой и фазой.

4. Предлагаемая модель адаптивной калмановской фильтрации с подстройкой параметров позволяет снизить СКО измерения координат в 1,5-3 раза. Полученные результаты позволяют считать ее более состоятельной даже в моменты начала сопровождения траектории, а также при совершении маневров.

5. Алгоритмы функционального построения опорных и корабельных станций РНС с гибкой архитектурой на основе SDR-технологий позволяют проводить адаптацию к помеховой обстановке и условиям распространения радиоволн путем оперативного выбора режима работы РНС (узкополосного или широкополосного).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Радионавигационный план Российской Федерации. Утвержден в редакции приказа Минпромторга России от 28.08.2015 г. № 2123.
2. Кинкулькин И.Е. Фазовый метод определения координат / И.Е. Кинкулькин, В.Д. Рубцов, М.А. Фабрик. – М.: Сов. радио, 1979. – 280 с.
3. Кокорин В. И. Радионавигационные системы / В.И. Кокорин. – Красноярск: СФУ, 2006. – 175 с.
4. Бондаренко В. Н. Широкополосные радионавигационные системы с шумоподобными частотно-манипулированными сигналами / В.Н. Бондаренко, В. И. Кокорин. – Новосибирск: Наука, 2011. – 260 с.
5. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. М., Сов радио, 1975 г.
6. Никитенко Ю.И. Судовые радионавигационные системы / Ю.И. Никитенко, В.И. Быков, Ю.М. Устинов. – М.: Транспорт, 1992. – 336 с.
7. Агафонников А.М. Фазовые радиогеодезические системы для морских исследований – М.: Наука, 1979. – 164 с.
8. Семушин И.В. Устойчивые алгоритмы фильтрации – обзор и новые результаты для систем судовождения / И.В. Семушин, Ю.В. Цыганова, К.В. Захаров // Журнал «Информационные технологии и вычислительные системы», №4. – 2013. С. 90-112.
9. Алешечкин А.М. Разработка методов и средств повышения точности и достоверности радионавигационных определений на море: Диссертация на соискание уч. степени доктора техн. наук / А.М. Алешечкин // Красноярск, 2009.
- 10 Фатеев Ю.Л. Методы измерения угловых координат объектов на основе глобальных навигационных спутниковых систем: Диссертация кандидата техн. наук / Ю.Л. Фатеев // Красноярск, 1996.
11. Бондаренко В.Н. Разработка методов высокоточной синхронизации интегрированных наземных и спутниковых радионавигационных систем:

отчет о НИР / В.Н. Бондаренко, Д.С. Феоктистов, В.Ф. Гарифуллин и др. – Красноярск: СФУ, 2018. – 186 с.

12. Феоктистов Д.С. Исследование адаптивной фильтрации Калмана для морских радионавигационных систем / Д.С. Феоктистов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации». Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2018. С. 106-109.

13. Феоктистов Д.С. Исследование алгоритма дискретной фильтрации Калмана для морских радионавигационных систем / Д.С. Феоктистов // Журнал «Успехи современной радиоэлектроники». 2018. №12. С. 108-111.

14. Алешечкин А.М. Направления модернизации аппаратной части и программного обеспечения радионавигационной системы «Крабик-БМ» / А.М. Алешечкин, Д.С. Феоктистов // Журнал «Вестник СибГАУ», том 16, №3. – 2015. С. 546-553.

15. Алешечкин А.М. Разработка аппаратно-программного комплекса измерителя радионавигационных параметров приемопередатчика РНС «Крабик-БМ»: отчет о НИР / А.М. Алешечкин, Д.С. Феоктистов, А.П. Романов и др. – Красноярск: СФУ, 2015. – 125 с.

16. Феоктистов Д.С. Реализация приемопередатчика наземной радионавигационной системы с использованием платы SDR / Д.С. Феоктистов, Э.И. Мельник, А.В. Косолапов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации». Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2017. С. 143-146.

17. Феоктистов Д.С. Модернизация радионавигационной системы «Крабик-БМ» с использованием системы на кристалле Xilinx Zynq-7000 / Д.С. Феоктистов, А.М. Алешечкин // Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 179-181.

18. Бондаренко В.Н. Помехоустойчивость приема спектрально-эффективных шумоподобных сигналов: монография / В.Н. Бондаренко. – Красноярск: Сиб.фед. ун-т, 2015. – 160 с.

19. Бондаренко В.Н. Эффективность подавления структурных помех корреляционным приемником с автокомпенсатором / В.Н. Бондаренко, Д.С. Феоктистов, В.Ф. Гарифуллин и др. // Журнал «Успехи современной радиоэлектроники». 2018. №12. С. 45-48.

20. Бондаренко В.Н. Помехоустойчивость корреляционного приемника MSK-BOC сигнала к сосредоточенной помехе / В.Н. Бондаренко, Д.С. Феоктистов, Т.В. Краснов и др. // Журнал «Успехи современной радиоэлектроники». 2017. №12. С. 139-142.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Феоктистов Денис Сергеевич



**Разработка и исследование способов повышения
помехозащищенности высокоточных морских
радионавигационных систем**

Специальность 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

Научно-квалификационная работа

Зав. кафедр. РЭС
О.В. Замедер Ф.И.
1.07.2019г.

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бондаренко Валерий Николаевич



Красноярск 2019