

На правах рукописи

Фам Ки Куанг

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ЗАЩИЩЁННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ
ШИРОКОЗОННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ НА
ТОЧНОСТЬ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ**

Специальность:

05.13.06 - «Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (технические системы)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт - Петербург

2010

Работа выполнена на кафедре «Технические средства судовождения и связи» Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций.

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Вишневский Юрий Георгиевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Зубарев Юрий Яковлевич

кандидат технических наук

Бояров Александр Викторович

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество

«Холдинговая компания Ленинец»

Защита состоится «25» февраля 2010г. в «14:00» часов на заседании диссертационного совета Д223.009.03 при Санкт-Петербургском государственном университете водных коммуникаций по адресу: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций..

Автореферат разослан «21» января 2010г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент

Барщевский Е.Г.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Многолетний анализ аварий судов мирового морского флота вместимостью более 3 тыс. рег. т говорит о том, что преобладают чисто навигационные виды аварийности: посадка на мель (35%) и столкновение (20%). Большинство навигационных аварий связано с техническими проблемами, а также с точностью и надежностью определения положения судов. По этой причине вопросы навигационной безопасности мореплавания являются важнейшим требованием к эксплуатации судов, а также самыми актуальными.

Наиболее рациональным путем устранения указанных недостатков и улучшения основных характеристик систем GPS и ГЛОНАСС, необходимых для расширения их функциональных возможностей, является применение дифференциального режима (ДР) этих систем, что позволяет добиться повышения точности, надежности и эффективности радионавигационного обеспечения в рабочих зонах дифференциальных подсистем (ДПС).

В настоящее время наиболее перспективным средством обеспечения безопасности мореплавания на морях, в прибрежных водах, в узкостях, а также на внутренних водных путях (ВВП) признаны дифференциальные подсистемы спутниковой радионавигационной системы (СРНС). Они подразделяются на широкозонные, региональные и локальные.

Широкозонные дифференциальные подсистемы (ШДПС), включающие в себя Американскую WAAS (*Wide Area Augmentation System*), Европейскую EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Services*) и Японскую MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*), повышают точность, целостность, непрерывность и эксплуатационную готовность навигационного обеспечения в пределах большой зоны действия. В случае нарушения и сбоя в работе ШДПС, которые могут произойти из-за воздействия помех, а также из-за увеличения энергетических потерь при распространении радиоволн в свободном пространстве, требуемая точность местоопределения судов не обеспечивается.

Очевидно, что точность обсервации судна не только зависит от вероятности безопасного плавания, но и в большой степени связана с качеством сигнала и с информационным каналом в радиолинии ШДПС, его электромагнитной защищённостью. Поэтому выбор в качестве критериев оценки точности обсервации судна не только вероятности безопасного плавания, но и коэффициента электромагнитной защищённости радиолиний дифференциальных поправок совершенно справедлив, т.к. указанные критерии более полно отражают навигационную обстановку.

Цель работы и задачи исследования

Цель исследования состоит в повышении точности обсервации судна и безопасности мореплавания на основе разработки методов, моделей и алгоритмов, обеспечивающих комплексную оценку качества информационных каналов ШДПС, способствующую улучшению их электромагнитной защищённости за счёт минимизации площади поля поражения сигнала (ПППС) и максимизации коэффициента электромагнитной защищённости информационных каналов (ЭМЗИК) $K_{ЭМЗ}$ в системе ШДПС.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать принципы построения, функционирования и общую структуру ШДПС, а также предпосылки использования ШДПС для совершенствования радионавигационного обеспечения.
2. Использовать новые критерии оценки качества сигналов и информационных каналов ШДПС - поле поражения сигнала и коэффициент ЭМЗИК ($K_{ЭМЗ}$).
3. Выполнить анализ помехозащищённости (ПЗ), электромагнитной совместимости (ЭМС), ЭМЗИК ШДПС и разработать имитационную модель ЭМЗИК ШДПС в условиях воздействия сосредоточенных помех.
4. Разработать методику оценки влияния ЭМЗИК ШДПС на время восстановления их нормального функционирования.
5. Разработать методику оценки влияния ЭМЗИК ШДПС на точность обсервации судна.

Объект исследования

В работе исследуется электромагнитная защищённость информационных каналов ШДПС, а также её влияние на точность обсервации судна.

Предмет исследования

Предмет исследования составляют технологические процессы электромагнитной защиты информационных каналов ШДПС, их взаимосвязь с навигационным обеспечением судов в условиях воздействия помех.

Методы исследования

Методологической основой исследования являются системология, теория сигналов, теория оценок, теория алгоритмов, принципы системного анализа, теория систем массового обслуживания, теория управления и принятия решений, теория радиосвязи, теория математического и имитационного моделирования, математическая теория надежности.

Основные результаты. В работе получены и выносятся на защиту следующие основные результаты:

1. Анализ принципов построения, функционирования и общей структуры широкозонных дифференциальных подсистем, а также их эффективности и предпосылок использования.
2. Использование новых критериев оценки качества сигналов и информационных каналов ШДПС - поля поражения сигнала и коэффициента ЭМЗИК ($K_{ЭМЗ}$).
3. Имитационная модель ЭМЗИК систем ГЛОНАСС и ИНМАРСАТ в условиях воздействия помех.
4. Методика прогнозирования времени восстановления нормального функционирования радиолиний ШДПС.
5. Методика оценки влияния ЭМЗИК ШДПС на точность обсервации судна.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы состоит в использовании её результатов в совершенствовании радионавигационного обеспечения России, в том числе широкозонных дифференциальных подсистем, а также в учебном процессе кафедры при подготовке специалистов по специальности 180402.65 «Судовождение на морских путях». Результаты работы внедрены в учебный процесс СПГУВК и Вьетнамского морского университета, что подтверждается соответствующими актами.

Апробация работы. Полученные результаты докладывались на:

- межвузовской научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной 200-летию транспортного образования в России. «Водный транспорт России: история и современность» (г. Санкт-Петербург, СПГУВК, 2009).
- Международной научно-практической конференции, посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России. «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление» (г. Санкт-Петербург, СПГУВК, 2009).
- научных семинарах кафедры.

Публикация результатов работы

По теме диссертации опубликованы 09 научных статей, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав с основными выводами, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы составляет 169 страниц, в том числе 136 страниц текста, 41 рисунка, 23 таблицы, список используемых источников из 101 наименований и 3 приложения.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены условия использования дифференциального режима глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС.

Основными достоинствами этих систем при использовании в штатном режиме работы являются глобальность рабочей зоны, высокая доступность, точность и надежность при непрерывности навигационных определений, а в дифференциальном режиме работы (ДР) - возможность повышения точности и надежности навигационных определений в рабочей зоне ДПС. Эксперименты показали возможность снижения ошибок местоопределения GPS/ГЛОНАСС до 5 м при использовании дифференциального режима в рабочей зоне ДПС.

На основании анализа методов использования дифференциального режима следует отметить основные для этого условия:

- дифференциальный режим с коррекцией координат может быть использован для коррекции координат потребителя, а также выбран в случае, когда потребитель и ККС (контрольно-корректирующая станция) для выполнения местоопределений выбирают одинаковое созвездие космического аппарата (КА) СРНС (координаты ККС заранее известны с высокой точностью).
- дифференциальный режим с относительными координатами может быть использован в случае, когда точная геодезическая привязка контрольно-корректирующей станции затруднена. В этом режиме оба объекта равноправны, не требуют знания местоположения одного из них, являющегося опорным, а также могут быть выполнены по одному и тому же созвездию КА СРНС.
- дифференциальный режим с использованием псевдоспутников может быть применён в случае, когда передаваемые контрольно-корректирующей станцией сигналы с дифференциальной поправкой и другой информацией привязаны к местной шкале времени.

Рассмотрение функционирования дифференциального режима СРНС показало, что по своему принципу действия наиболее подходящим для использования в ГЛОНАСС и GPS является метод псевдоспутников. С точки зрения навигации, наиболее рациональным является метод коррекции координат, т.к. не накладывает ограничений на выбор созвездия спутников.

Во второй главе проанализированы принципы построения, функционирования и общая структура широкозонных дифференциальных подсистем, а также значения их эффективности и предпосылки использования.

Системы ШДПС включают в себя Американскую WAAS, Европейскую EGNOS и Японскую MSAS (см. рис. 1). Они строятся с использованием геостационарных космических аппаратов в качестве средств передачи сигналов контроля целостности и дифференциальных поправок. Такие системы созданы на основании Международного технического стандарта, относящегося к дифференциальной глобальной навигационной спутниковой системе, который называется GNSS RTCM SC-104, версия 2.2, 1998 (*International standards for differential Global Navigation Satellite System, Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee, № 104, version 2.2, 1998. - USA*).

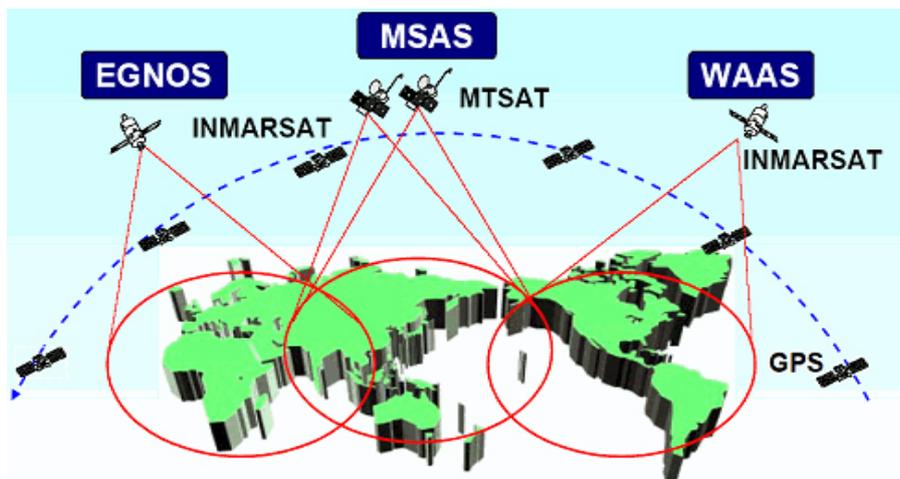


Рис. 1. Схема расположения систем ШДПС (WAAS/EGNOS/MSAS)

В основном, принципы построения, функционирования и структурная организация этих систем почти одинаковы. Система ШДПС состоит из космического и наземного сегментов (см. рис. 2):

1. Космический сегмент включает в себя геостационарные космические аппараты (ГКА) типа ИНМАРСАТ или МТСАТ. Он обеспечивает передачу навигационного GPS/ГЛОНАСС сигнала в диапазоне L1 на частоте $f = 1575,42$ МГц, который увеличит доступность, точность и надежность навигационных определений, а также сигналов контроля своей целостности и ретрансляцию сформированных на земле сообщений о целостности НКА GPS и ГКА и вектора поправок к эфемеридным данным, шкалам времени и к параметрам ионосферной модели.

2. Наземный сегмент включает в себя:

- широкозонные контрольные станции (ШКС), предназначенные для контроля и наблюдения за состоянием навигационного поля;

- широкозонные главные станции (ШГС), предназначенные для обработки данных мониторинга, расчета поправок, формирования информации о целостности, навигационного сообщения и наблюдений ШКС;
- наземные станции передачи данных (НСПД), которые должны передавать сигналы целостности и корректирующие поправки (КП) на ГКА.

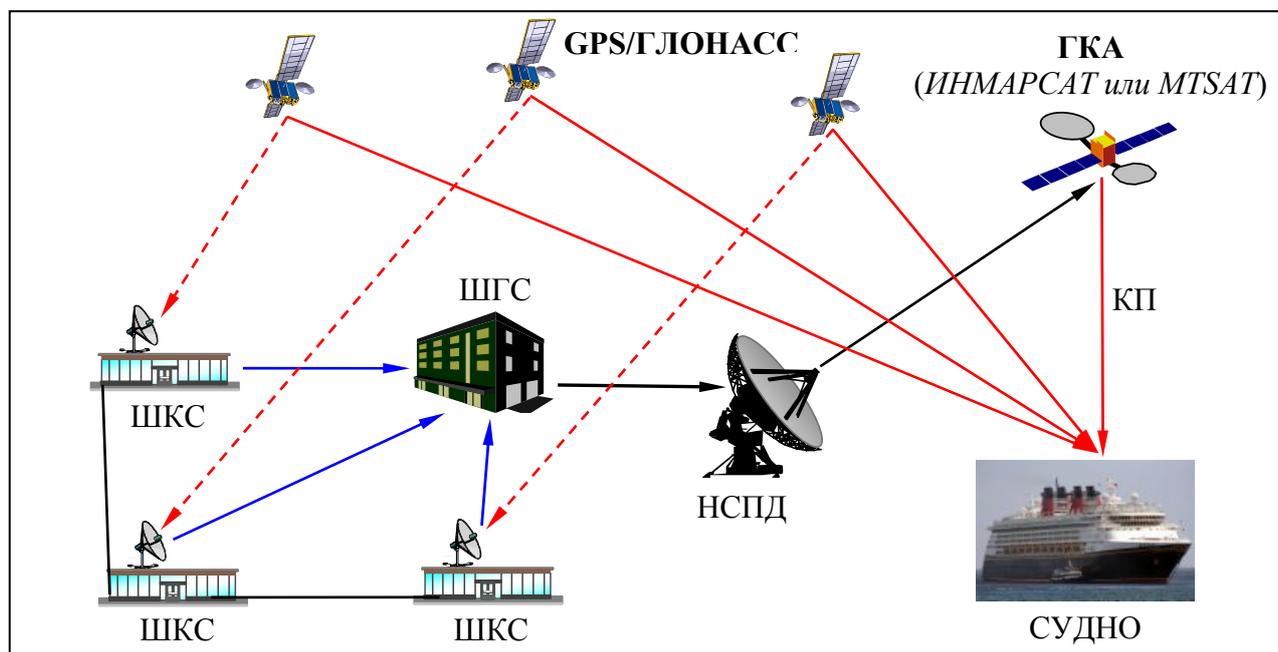


Рис. 2. Схема общей структуры системы ШДПС

Система ШДПС выполняет следующие функции: сбор данных о состоянии навигационного поля; определение ионосферных коррекций; определение и уточнение параметров орбит спутников; контроль целостности КА; определение коррекций орбит и временных поправок для КА; обеспечение работоспособности и собственного нормального функционирования; увеличение числа навигационных спутников за счёт использования ГКА; формирование дифференциальной корректирующей информации; распространение информации о целостности и корректирующих поправок потребителям.

Основное различие между видами ШДПС заключается в зоне охвата и действия (см. рис. 1), а также в обеспечении различных значений среднеквадратической погрешности (СКП) при местоопределении судна.

В таблице 1 показан результат сравнения точности местоопределения трёх видов ШДПС ($СКП_{шдпс}$) с допустимой точностью по требованию ИМО А.815(19) 1995г. ($СКП_{треб} \leq 10$ м с $P = 95\%$). На рис. 3 построена сравнительная диаграмма трёх видов ШДПС по значениям эффективности, рассчитанным с помощью СКП:

$$\mathcal{E}\% = \frac{СКП_{треб} - СКП_{шдпс}}{СКП_{треб}} \times 100 \quad (1)$$

Таблица 1

Требуемая точность обсервации ($СКП_{треб}$), (м)	Фактическая точность местоопределения ШДПС ($СКП_{шдпс}$), (м)		
	WAAS	EGNOS	MSAS
10	2,5	2,0	3,5
Эффективность (Э%)	75%	80%	65%

Точность определения координат системы ШДПС находится в пределах 1-3,5м, что значительно лучше точности номинального режима ГЛОНАСС и тем более GPS. Это удовлетворяет не только всем требованиям к навигационному обеспечению судов, но и может быть применено при решении задач точной навигации, разведке полезных ископаемых и т. д. Эффективность, определяемая с помощью СКП при использовании EGNOS (80%) выше, чем эффективность при использовании системы WAAS (75%) и MSAS (65%), в 1,2 раза и в 1,8 раза, соответственно. Существенную роль в обеспечении высокой эффективности ШДПС по СКП играет качество информационных каналов радиолиний GPS/ГЛОНАСС и ИНМАРСАТ.

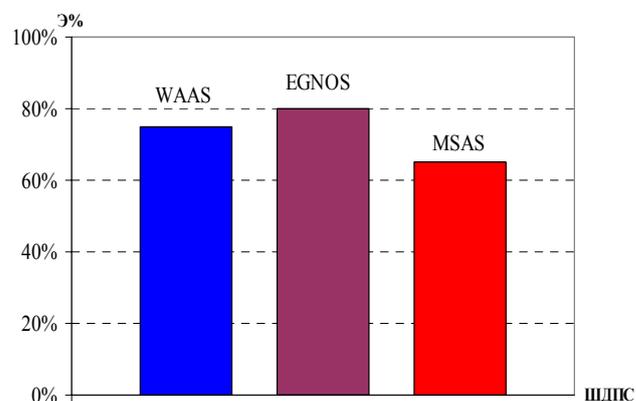


Рис. 3. Сравнительная диаграмма трёх видов ШДПС по эффективности

Системы EGNOS и MSAS практически охватывают большую часть европейской и азиатской территории России (см. рис. 1). В работе представлены основные направления работ по созданию ШДПС для совершенствования радионавигационного обеспечения.

В третьей главе проанализированы помехозащищённость (ПЗ), электромагнитная совместимость (ЭМС) и ЭМЗИК ШДПС в случае воздействия помех. Представлены направления и методы улучшения ЭМЗИК радиолиний ШДПС. При этом выбираются критерии оценки качества сигналов и информационных каналов ШДПС - поле поражения сигнала и коэффициент $K_{ЭМЗ}$.

В работе рассмотрены источники возможных радиопомех и основные источники погрешностей в дифференциальных подсистемах, а также их влияние на качество приема сигнала и точность навигационных параметров. При этом учитываются рассчитанные потери энергии радиосигнала в атмосфере. Эти проблемы связаны со снижением точности и надёжности местоопределения судов, т.е. приводят к снижению показателей безопасности мореплавания.

ЭМС и ПЗ, оперируя одними и теми же параметрами, могут достаточно ёмко характеризовать качество той или иной радиолинии или радиосистемы. Однако более комплексной оценкой качества линий радиосвязи и местоопределения может служить электромагнитная защищённость их информационных каналов.

При решении задач анализа и синтеза структуры сигналов при воздействии помех качественная оценка структурного различия сигналов и помех представляется нормированным коэффициентом взаимного различия (КВР).

В отличие от ЭМС и ПЗ, ЭМЗИК базируется на топологических вариациях проекций сечений КВР применяемых в ШДПС полезных сигналов в условиях воздействия помех, т.е. на поле поражения сигнала. Уровень сечения КВР (С) определяется по формуле (2):

$$C = g_{0r\text{дон}}^2 = \frac{\delta_{\text{дон}}}{h_{\text{П}}^2} \quad (2)$$

где $h_{\text{ш}}^2$ - энергетика помехи; $\delta_{\text{доп}}$ - величина, характерная для систем, оптимальных и субоптимальных в каналах с шумами, но работающих в условиях одновременного воздействия шумов и помех, при превышении которого вероятность ошибки в системе недопустимо ухудшается: $P \geq P_{\text{доп}} = 10^{-1}; 10^{-2}$.

Во всех случаях вероятность ошибки поэлементного приема находится в функциональной зависимости от коэффициента взаимного различия (КВР).

Поле поражения сигнала (ППС) или площадь поля поражения сигнала (ПППС) является мерой суждения о качестве не только используемых в радиоприемах ШДПС сигналов, но и о качестве самой ШДПС, её электромагнитной защищенности. При этом полем поражения сигнала называется площадь проекции сечения двумерного нормированного КВР сигнала и помех на уровне, определяемом допустимой и требуемой вероятностью ошибки при поэлементном приёме, а также мощностью помехи.

В эталонной модели взаимодействия открытых систем по стандарту МЭК/ИСО 7498-2 принята 7-уровневая иерархия функций взаимодействия. В целях обеспечения ЭМЗИК радиоприемов на различных уровнях, можно определить некоторые направления решения проблемы. К ним относятся:

1. Динамическое формирование сигналов и протоколов их передачи при повышении помехоустойчивости на физическом уровне.
2. Динамическое управление защитой радиоприемов: оперативное, своевременное распознавание помех и принятие мер на канальном уровне.
3. Адаптивное управление частотными, маршрутными и аппаратурными ресурсами.

В работе рассмотрены методы улучшения ЭМЗИК ШДПС (см. рис. 4), включающие следующие признаки: этапы жизненного цикла создания радиоэлектронных средств связи; системный подход к решению задач электромагнитной защищенности; технический и организационный способ применения; используемый ресурс.

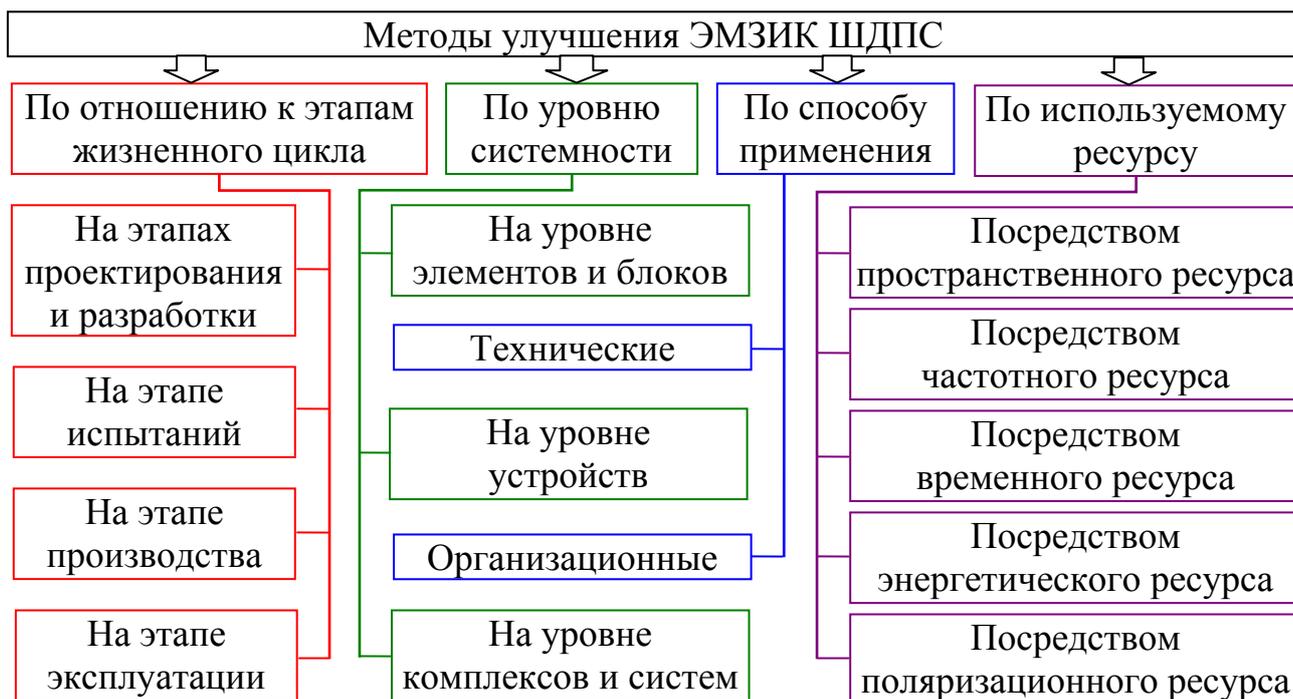


Рис. 4. Методы улучшения ЭМЗИК ШДПС

Для комплексной оценки качества радиолиний ШДПС, в том числе их электромагнитной совместимости, применяется критерий “поле поражения сигнала”. Этот критерий позволяет объединить и структурные различия полезных сигналов и помех, и статистические параметры канала, и оценку решающей схемы приемника.

Критерием оценки электромагнитной защищённости информационных каналов радиолинии может являться и коэффициент $K_{ЭМЗ}$, определяемый с помощью ПППС. Коэффициент $K_{ЭМЗ}$ численно равен дополнению значения коэффициента простоя радиолинии $K_{П}$ до «1». Коэффициент $K_{П}$ представляет собой геометрическую вероятность неработоспособности радиолинии в результате воздействия помехи и определяется как вероятность энергетического подавления радиолинии $P_{ЭН}$, которая является отношением оцениваемой ПППС (\hat{S}_r) к максимальной ПППС ($\hat{S}_{r\max}$):

$$K_{ЭМЗ} = 1 - K_{П} = 1 - \frac{\hat{S}_r}{\hat{S}_{r\max}} \quad (3)$$

Таким образом, для обеспечения точности обсервации судна задача повышения качества радиолиний в ШДПС за счёт улучшения ЭМЗИК часто сводится к выбору лучших сигналов, обеспечивающих при воздействии помех минимальную ПППС и высокий коэффициент ЭМЗИК ($K_{ЭМЗ}$).

В четвертой главе рассматривается влияние ЭМЗИК ШДПС на точность обсервации судна. Разработана имитационная модель ЭМЗИК систем ГЛОНАСС и ИНМАРСАТ в условиях воздействия помех. Осуществлено прогнозирование влияния ЭМЗИК ШДПС на время восстановления радиолинии.

Оценить степень ЭМЗИК, принадлежащих радиолиниям ШДПС в направлениях «GPS/ГЛОНАСС – ШКС», «НСПД – КА ИНМАРСАТ» и «КА ИНМАРСАТ – судно», позволяет методика с использованием критериев “площадь поля поражения сигнала” и коэффициента $K_{ЭМЗ}$, т.е. разработана имитационная модель ЭМЗИК ШДПС в условиях воздействия помех.

Вначале вычисляем двухмерные нормированные КВР (g_0^2) и ПППС при воздействии на метку времени систем ГЛОНАСС и ИНМАРСАТ узкополосных помех. Метка времени ГЛОНАСС представляет собой синхронизирующую 30-символьную последовательность $\{a_m\}_{GL}$: 111110001101110101000010010110 и метка времени ИНМАРСАТ имеет 32-символьную кодовую последовательность $\{a_m\}_{IN}$: 01001000010101110110001111100110. Соответствующие указанным помехам и сигналам зависимости КВР имеют вид модели (4):

$$g_0^2(x, y) = \frac{1}{N^2} \left| \frac{\sin \pi x (y-1)}{\pi x} \sum_{n=1}^N \exp j(\psi_m - 2\pi n x) - \frac{\sin \pi x y}{\pi x} \exp(-j\pi x) \sum_{n=1}^{N-1} \exp j(\psi_m - 2\pi n x) \right|^2 \quad (4)$$

где T - длительность элементарного сигнала; $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$; $x = \frac{\Delta\Omega}{\omega_0}$; $y = \frac{\Delta t}{T}$; $x \in [-1, 1]$;

$y \in [-1, 1]$; $\psi_m = a_m \pi$, $a_m \in \{0, 1\}$ - кодовая последовательность m -го варианта сигнала.

При незамирающих противоположных сигналах и замирающей сосредоточенной помехе вероятность ошибки в рассматриваемом случае определяется по формуле (5):

$$P = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{\sqrt{2h}}{\sqrt{1 + h_{\text{п}}^2 g_0^2}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\Phi(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\alpha e^{-U^2/2} dU$ - функция Крампа. Из этого выражения следует:

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{2h_0^2}{[\Phi^{-1}(1 - 2P_{\text{доп}})]^2} - 1 \quad (6)$$

где $\Phi^{-1}(1 - 2P_{\text{доп}})$ - функция, обратная $\Phi(1 - 2P_{\text{доп}})$;

h_0^2 - величина h_c^2 , необходимая в канале только с флуктуационным шумом для получения требуемого значения вероятности ошибки ($P_{\text{треб}}$). Полагая $P_{\text{треб}} = 5 \cdot 10^{-6}$, что соответствует $h_0^2 = 10$, а также $P_{\text{доп}} = 10^{-1}$ на основании (6) получим значение $\delta_{\text{доп}} = 10$. Считая $h_{\text{п}}^2 = 30; 10^2; 3 \cdot 10^2; 10^3$, по формуле (2) получаем 4 уровня сечения КВР (С), соответственно: $C = g_{\text{ог доп}}^2 = 0,3(\text{а}); 0,1(\text{б}); 0,03(\text{в}); 0,01(\text{г})$.

Пользуясь пакетом прикладных программ "MathCad", были произведены расчёты КВР по формуле (4), получены рельефы двумерных нормированных КВР (см. рис. 5 и рис. 6) и ПППС метки времени системы ГЛОНАСС и системы ИНМАРСАТ (см. рис. 7 и рис. 8).

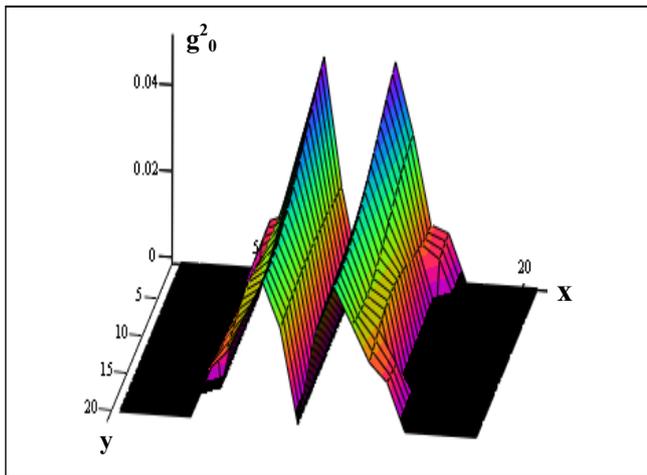


Рис. 5. КВР сигнала ГЛОНАСС при воздействии узкополосной помехи

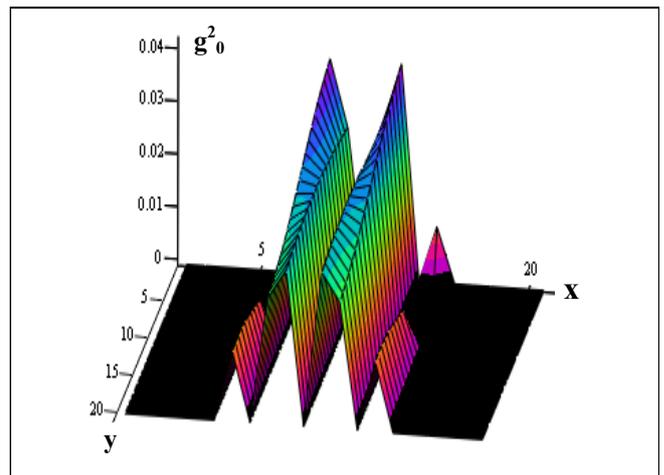


Рис. 6. КВР сигнала ИНМАРСАТ при воздействии узкополосной помехи

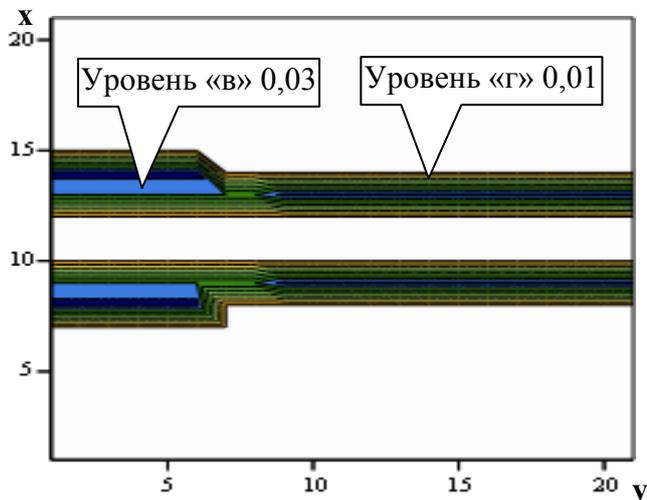


Рис. 7. ПППС сигнала ГЛОНАСС при воздействии узкополосной помехи

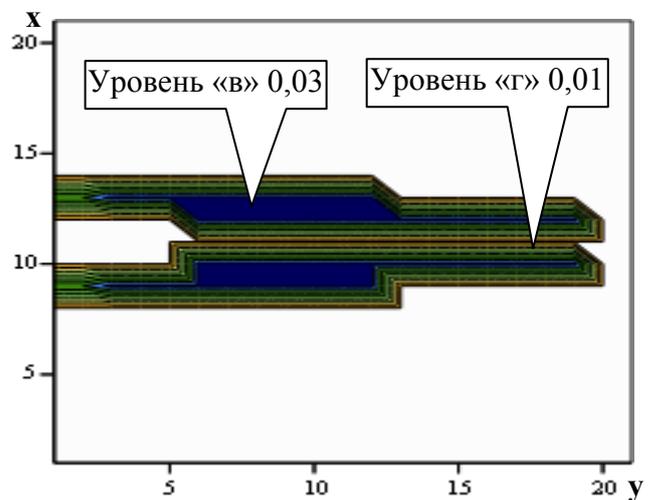


Рис. 8. ПППС сигнала ИНМАРСАТ при воздействии узкополосной помехи

При этом рассчитанные коэффициенты $K_{ЭМЗ}$ ГЛОНАСС на четырёх вышеуказанных уровнях КВР следующие: $K_{ЭМЗ а} = 1,00$; $K_{ЭМЗ б} = 1,00$; $K_{ЭМЗ в} = 0,88$; $K_{ЭМЗ г} = 0,58$, а также коэффициенты $K_{ЭМЗ}$ ИНМАРСАТ: $K_{ЭМЗ а} = 1,00$; $K_{ЭМЗ б} = 1,00$; $K_{ЭМЗ в} = 0,88$; $K_{ЭМЗ г} = 0,76$.

Таким образом, при воздействии узкополосных помех только в случае значительной энергетики помехи ($h_{\Pi}^2 = 10^3$) коэффициент $K_{ЭМЗ}$ значительно ухудшается, уменьшаясь до 58% (мы оцениваем по наихудшему варианту). При этом коэффициент $K_{ЭМЗ}$ ИНМАРСАТ больше, чем коэффициент $K_{ЭМЗ}$ ГЛОНАСС.

В случае воздействия на метку времени системы ГЛОНАСС ретранслированной помехи получаем рельеф двухмерного нормированного КВР по формуле (7):

$$g_0^2(x, y') = \frac{1}{N^2} \left| \exp \left\{ -j \frac{\pi x}{N} [1 - (y' - k)] \right\} \cdot \frac{\sin \left\{ \frac{\pi x}{N} [1 - (y' - k)] \right\}}{\frac{\pi x}{N}} \cdot \sum_{n=1}^{N-k} a_n a_{n+k} \exp \left[-j \frac{2\pi x}{N} (n-1) \right] + \right. \\ \left. + \exp \left[-j \frac{\pi x (y' - k)}{N} \right] \cdot \frac{\sin \left\{ \frac{\pi x}{N} (y' - k) \right\}}{\frac{\pi x}{N}} \cdot \sum_{n=1}^{N-(k+1)} a_n a_{n+k+1} \exp \left[-j \frac{2\pi x}{N} n \right] \right|^2 \quad (7)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{N\tau_0}$; $x = \frac{\Delta\Omega}{\omega_0}$; $y' = \frac{\Delta t}{T}$; $x \in [-1, 1]$; $y' \in [-1, 1]$; $|k| = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

Считая, что в радиолинии имеют место независимые рэлеевские замирания сложного сигнала и ретранслированной помехи, а также число составляющих в частотно-временной матрице $M = 3$, согласно выражению для вероятности

ошибки, получаем:
$$\delta_{\text{дон}} = \sqrt[M]{\frac{P_{\text{дон}}}{C_{2M-1}^M} \cdot h_0^2} - 1 \quad (8)$$

где h_0^2 - величина h_c^2 , необходимая для обеспечения в канале только с флуктуационным шумом требуемого значения вероятности ошибки ($P_{\text{треб}}$). Полагая $P_{\text{треб}} \approx 10^{-4}$, что соответствует $h_0^2 = 40$, а также $P_{\text{доп}} = 10^{-2}$, из (8) имеем $\delta_{\text{доп}} \approx 3$. Применяя формулу (2) и считая $h_{\Pi}^2 = 10$; 30 ; 10^2 ; $3 \cdot 10^2$, получаем те же уровни сечения КВР, что и в случае воздействия узкополосных помех.

В работе проводится оценка зависимости ЭМЗИК ШДПС от изменения соотношений дистанций связи и помех при воздействии помех. Произведя расчёты двухмерных нормированных КВР, используем затем формулу (9) для расчёта энергетики помехи:

$$h_{\Pi}^2 = \frac{P_{\text{пер}\Pi} G_{\text{пер}\Pi} G_{\text{пр}\Pi}(\alpha)}{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}} \left(\frac{r_{CB}}{r_{\Pi}} \right)^2 h_c^2 \quad (9)$$

где $P_{\text{пер}\Pi}$, $P_{\text{пер}}$ - мощности передатчика помех и “полезного” передатчика космического аппарата; $G_{\text{пер}\Pi}$, $G_{\text{пер}}$ - коэффициенты усиления антенн (КУА) передатчика помех и “полезного” передатчика, соответственно; $G_{\text{пр}}$ - КУА приемника; $G_{\text{пр}\Pi}(\alpha)$ - КУА приемника, принимающего помеху под углом α ; r_{CB}/r_{Π} - отношение дистанции связи к дистанции помех; h_c^2 - величина энергетики сигнала.

Найдя допустимые уровни сечения КВР и определяя на них площади полей поражения сигналов строчной синхронизации (метки времени) $\hat{S}_r = f(h_{\Pi}^2)$, с помощью программ “MS Excel” и “MathCad” находим:

$$C = g_{0\text{дон}}^2 = f(P_{\text{ош.дон}}, h_{\Pi}^2, r_{CB}/r_{\Pi}, h_0^2) \quad (10)$$

Учитывая формулу (3) для вычисления коэффициента $K_{ЭМЗ}$ и “сопрягая” C с $K_{ЭМЗ}$, получаем математическую модель (11):

$$K_{ЭМЗ} = f(C, P_{\text{ош. доп}}, h_{\Gamma}^2, r_{\text{св}}/r_{\Gamma}, h_0^2, P_{\text{пер}}, P_{\text{перП}}, G_{\text{пер}}, G_{\text{перП}}, G_{\text{пр}}, G_{\text{прП}}(\alpha)) \quad (11)$$

При этом используем величину $\delta_{\text{доп}} = 10$ для случая воздействия узкополосных помех (см. формулу 6) и $\delta_{\text{доп}} \approx 3$ для случая воздействия ретранслированных помех (см. формулу 8). Применяя формулу (9), задавая значения отношению $P_{\text{перП}}/P_{\text{пер}}$: 0,5; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0, а также $G_{\text{прП}}(\alpha)/G_{\text{пр}}$: 0,5; 0,6; 0,8; 0,9 и считая $G_{\text{перП}} \approx G_{\text{пер}}$, получаем различные значения $h_{\text{п}}^2$, а значит, и различные значения уровней сечения КВР (C), а также соответствующие им коэффициенты $K_{ЭМЗ}$ при следующих величинах $r_{\text{св}}/r_{\Gamma}$: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0.

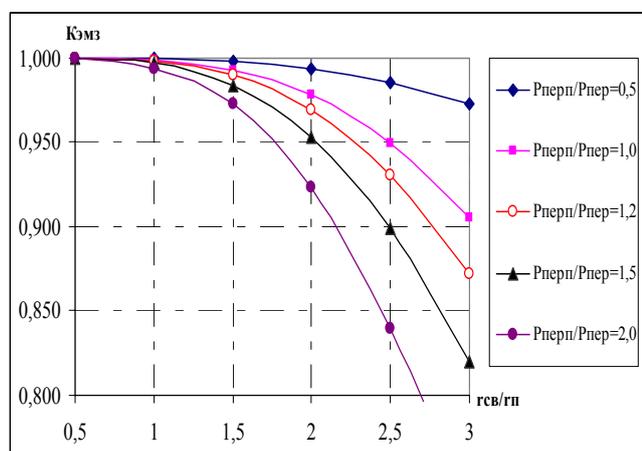
В таблицах 2 и 3 для примера представлены некоторые результаты расчетов $K_{ЭМЗ}$ на радиолинии системы ГЛОНАСС при воздействии узкополосных помех (УП) и ретранслированных помех (РП), соответственно, а также на рис. 9 построены графики зависимостей $K_{ЭМЗ} = f(r_{\text{св}}/r_{\Gamma})$.

Таблица 2

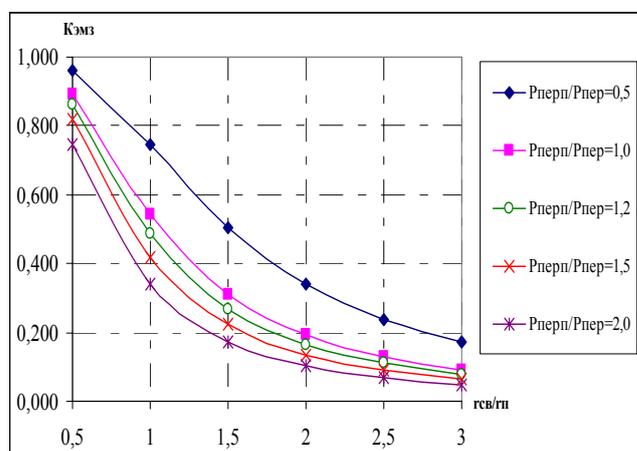
$G_{\text{прП}}(\alpha)/G_{\text{пр}}$	$h_{\text{с}}^2$	$r_{\text{св}}/r_{\Gamma}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
		$P_{\text{перП}}/P_{\text{пер}}$	Коэффициент $K_{ЭМЗ}$					
0,9	40	0,5	1,000	1,000	0,998	0,994	0,986	0,973
		1,0	1,000	0,999	0,993	0,978	0,950	0,905
		1,2	1,000	0,998	0,990	0,969	0,931	0,872
		1,5	1,000	0,997	0,984	0,953	0,899	0,820
		2,0	1,000	0,994	0,973	0,923	0,840	0,733

Таблица 3

$G_{\text{прП}}(\alpha)/G_{\text{пр}}$	$h_{\text{с}}^2$	$r_{\text{св}}/r_{\Gamma}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
		$P_{\text{перП}}/P_{\text{пер}}$	Коэффициент $K_{ЭМЗ}$					
0,9	40	0,5	0,963	0,747	0,505	0,340	0,238	0,174
		1,0	0,892	0,541	0,311	0,193	0,130	0,092
		1,2	0,862	0,485	0,269	0,165	0,110	0,078
		1,5	0,817	0,419	0,223	0,135	0,089	0,063
		2,0	0,747	0,340	0,174	0,103	0,068	0,048



а)



б)

Рис. 9. Графики зависимостей $K_{ЭМЗ} \text{ ГЛОНАСС} = f(r_{\text{св}}/r_{\Gamma})$ при воздействии: а) УП и б) РП

Анализируя таблицы и рисунки, следует отметить, что при $r_{св}/r_{п} = 1$; $P_{перп}/P_{пер} = 1$; $G_{прп}(\alpha)/G_{пр} = 0,9$; $h^2_0 = 40$, в случае воздействия узкополосных помех $K_{эмз} = 0,999$. При таких же условиях, но при воздействии ретранслированных помех $K_{эмз} = 0,541$. Если $r_{св}/r_{п} = 0,5$, $K_{эмз} = 0,892$ при ретранслированной помехе, а электромагнитная защищённость радиолиний ГЛОНАСС при узкополосной помехе абсолютна, т.е. $K_{эмз} = 1$.

В таблице 4 для примера показаны результаты расчетов $K_{эмз}$ на радиолинии ИНМАРСАТ при воздействии узкополосных помех, а также на рис. 10 построены графики зависимостей $K_{эмз} = f(r_{св}/r_{п})$. При одинаковых условиях (т.е. $r_{св}/r_{п} = 1$; $P_{перп}/P_{пер} = 1$; $G_{прп}(\alpha)/G_{пр} = 0,9$; $h^2_0 = 40$), но в случае воздействия узкополосной помехи коэффициент $K_{эмз}$ ИНМАРСАТ составляет 0,987.

Таблица 4

$G_{прп}(\alpha)/G_{пр}$	h^2_c	$r_{св}/r_{п}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
			Коэффициент $K_{эмз}$					
0,9	40	0,5	1,000	0,996	0,984	0,961	0,929	0,889
		1,0	0,999	0,987	0,954	0,903	0,841	0,773
		1,2	0,998	0,982	0,941	0,880	0,809	0,733
		1,5	0,998	0,975	0,921	0,847	0,764	0,681
		2,0	0,996	0,961	0,889	0,796	0,699	0,608

Таким образом, зависимость ЭМЗИК радиолиний ШДПС от изменения отношений $r_{св}/r_{п}$ в условиях воздействия узкополосной помехи не столь значительна, как при ретранслированной помехе в области $r_{св}/r_{п} \in 0,5 \div 1,5$. Поэтому узкополосная помеха имеет либо слабое воздействие на радиолинии ШДПС, либо вообще не влияет на функционирование радионавигационных линий. При тех же условиях функционирования ретранслированные помехи наносят спутниковой радионавигационной системе значительный урон, и её электромагнитная защищённость требует существенного повышения.

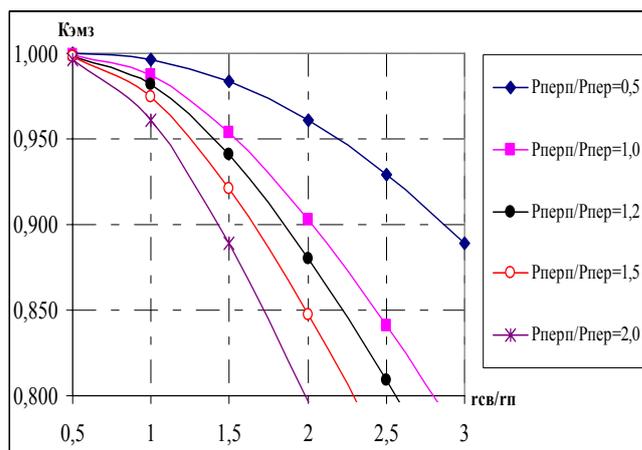


Рис. 10. Графики зависимостей $K_{эмз}$ ИНМАРСАТ от $r_{св}/r_{п}$ при воздействии УП.

Результаты подробных расчётов значений C и $K_{эмз}$ по программе “MS Excel” при $h^2_c = 10$; 20; 40 при воздействии узкополосных и ретранслированных помех для радиолинии ГЛОНАСС и в случае воздействия узкополосных помех для радиолинии ИНМАРСАТ, а также графики изменения C и $K_{эмз}$ при различных величинах $r_{св}/r_{п}$; $P_{перп}/P_{пер}$; $G_{прп}(\alpha)/G_{пр}$; h^2_0 приведены в приложениях диссертации.

В работе оценка влияния ЭМЗИК ШДПС на время восстановления их нормального функционирования основывается на использовании математической теории надёжности. С одной стороны, можно рассматривать влияние времени восстановления радиолинии (τ) и допустимого времени прохождения информации в системе ($T_{доп}$) на коэффициент $K_{эмз}$, а с другой стороны, зная коэффициент $K_{эмз}$,

можно прогнозировать и время восстановления радиолинии при заданном времени $T_{\text{доп}}$. Время восстановления в системе ШДПС определяется по формуле:

$$\tau = \gamma \times T_{\text{доп}} = \left(\frac{1}{K_{\text{ЭМЗ}}} - 1 \right) \times T_{\text{доп}} \quad (12)$$

Результаты подробных расчётов значений τ представлены в таблице 5, при этом на рис. 11 построены графики зависимостей $\tau = f(K_{\text{ЭМЗ}})$ при различных $T_{\text{доп}}$.

Таблица 5

$K_{\text{ЭМЗ}}$	$\gamma = \frac{1}{K_{\text{ЭМЗ}}} - 1$	$\tau = \gamma \times T_{\text{доп}}$				
		$T_{\text{доп1}} = 1$	$T_{\text{доп2}} = 2$	$T_{\text{доп3}} = 3$	$T_{\text{доп4}} = 4$	$T_{\text{доп5}} = 5$
0,90	0,1111	0,1111	0,2222	0,3333	0,4444	0,5555
0,91	0,0989	0,0989	0,1978	0,2967	0,3956	0,4945
0,92	0,0870	0,0870	0,1740	0,2610	0,3480	0,4350
0,93	0,0753	0,0753	0,1506	0,2259	0,3012	0,3765
0,94	0,0638	0,0638	0,1276	0,1914	0,2552	0,3190
0,95	0,0526	0,0526	0,1052	0,1578	0,2104	0,2630
0,96	0,0417	0,0417	0,0834	0,1251	0,1668	0,2085
0,97	0,0309	0,0309	0,0618	0,0927	0,1236	0,1545
0,98	0,0204	0,0204	0,0408	0,0612	0,0816	0,1020
0,99	0,0101	0,0101	0,0202	0,0303	0,0404	0,0505
1,00	0	0	0	0	0	0

Анализируя данные таблицы 5 и графики рисунка 11, можно сделать следующий вывод. При различных величинах $T_{\text{доп}}$ зависимость τ от коэффициента $K_{\text{ЭМЗ}}$ также близка к линейной. Для уменьшения времени восстановления в радиосистеме надо увеличивать коэффициент $K_{\text{ЭМЗ}}$, т.е. не только обеспечить электромагнитную совместимость радиолиний, но и повысить точность обсервации судна, а также эффективность безопасности мореплавания.

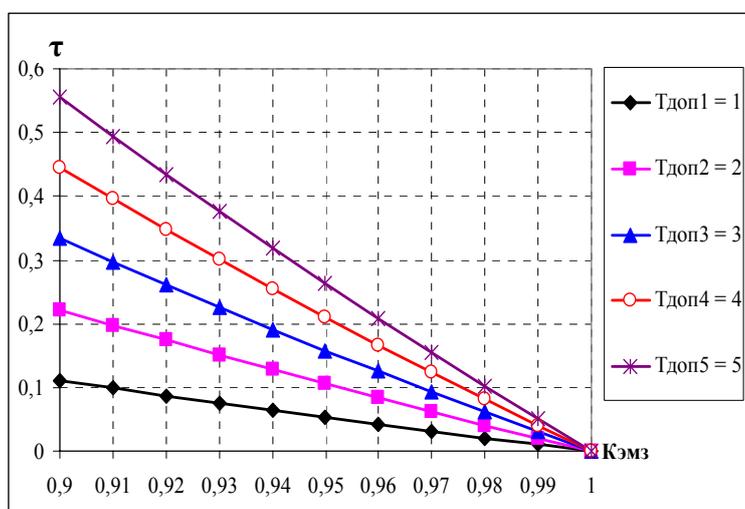


Рис. 11. Графики зависимостей $\tau = f(K_{\text{ЭМЗ}})$ при заданных различных величинах $T_{\text{доп}}$.

Например, при увеличении $K_{\text{ЭМЗ}}$ от 0,96 до 0,97 (на 1%) величина τ уменьшается: при $T_{\text{доп1}} = 1$ мин - от 0,0417 до 0,0309, т.е. на 1,08%; при $T_{\text{доп2}} = 2$ мин - от 0,0834 до 0,0618, т.е. на 2,16%; при $T_{\text{доп3}} = 3$ мин - от 0,1251 до 0,0927, т.е. на 3,24%; при $T_{\text{доп4}} = 4$ мин - от 0,1668 до 0,1236, т.е. на 4,32%; при $T_{\text{доп5}} = 5$ мин - от 0,2085 до 0,1545, т.е. на 5,40%.

В случае нарушения и сбоев в работе ШДПС, которые могут произойти из-за воздействия помех, а также из-за увеличения энергетических потерь в свободном пространстве, требуемая точность обсервации судна не обеспечивается, т.е. безопасность мореплавания снижается.

Математическое моделирование в этой области следует увязывать, прежде всего, с одной стороны, с выбором количественных критериев навигационной безопасности мореплавания, а с другой стороны, с выбором количественных критериев электромагнитной защищённости информационных каналов ШДПС.

Итак, выбираем в качестве критериев оценки точности обсервации судна не только вероятность безопасного плавания, но и коэффициент электромагнитной защищённости радиолиний дифференциальных поправок. На основании этого выбора критериев вероятность обеспечения точности обсервации судна ($P_{ТО}$) может быть определена по формуле (13):

$$P_{ТО} = P_{бп} \times K_{ЭМЗ} \quad (13)$$

где $P_{бп}$ - вероятность безопасного плавания при плавании среди навигационных опасностей определяется по формуле (14): $P_{бп} = 1 - \exp\left(\frac{D}{M}\right)^{-2}$ (14)

где D - кратчайшее расстояние до ближайшей навигационной опасности;

M - радиальная среднеквадратичная погрешность.

Расчёт вероятности $P_{бп}$ по формуле (14) производился с помощью таблицы 4.18 МТ-2000 по аргументам D и M . Например, для обеспечения достаточно высокой вероятности безопасного плавания в районе с несколькими навигационными опасностями, равной $P_{бп} = 0,982$, и для обеспечения $M = 0,2$ морских миль D должно быть не меньше 0,4 морских миль. Такое же значение $P_{бп}$ имеет место при $M = 0,4$ и $D = 0,8$, при $M = 0,6$ и $D = 1,2$, при $M = 0,8$ и $D = 1,6$, при $M = 1,0$ и $D = 2,0$.

Результаты расчётов значений вероятностей $P_{ТО}$ представлены в таблице 6. На рис. 12 построены графики зависимостей $P_{ТО} = f(K_{ЭМЗ})$ при нескольких табличных значениях $P_{бп}$ (из таблицы 4.18 МТ-2000).

Таблица 6

$P_{бп}$	Коэффициент $K_{ЭМЗ}$										
	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
	$P_{ТО}$										
0,763	0,687	0,694	0,702	0,710	0,717	0,725	0,732	0,740	0,748	0,755	0,763
0,859	0,773	0,782	0,790	0,799	0,807	0,816	0,825	0,833	0,842	0,850	0,859
0,923	0,831	0,840	0,849	0,858	0,868	0,877	0,886	0,895	0,905	0,914	0,923
0,961	0,865	0,875	0,884	0,894	0,903	0,913	0,923	0,932	0,942	0,951	0,961
0,982	0,884	0,894	0,903	0,913	0,923	0,933	0,943	0,953	0,962	0,972	0,982

Как видно из таблицы 6 и графиков рисунка 12, при заданных различных табличных величинах $P_{бп}$ зависимость вероятности $P_{ТО}$ от $K_{ЭМЗ}$ также близка к линейной, повысить точность обсервации судна возможно за счёт более высокой электромагнитной защищённости радиолиний дифференциальных поправок.

Например, требования ИМО к точности обсервации судов в стеснённых условиях плавания могут быть исполнены с вероятностью 95%, при табличной величине $P_{бп} = 0,982$, вероятность электромагнитной защищённости радиолиний дифференциальных поправок определяется так:

$$K_{эмз} = \frac{P_{то}}{P_{бп}} = \frac{0,950}{0,982} = 0,967 \quad (15)$$

То же самое значение $P_{то}$ при меньшей величине $P_{бп}$ (допустим, $P_{бп} = 0,961$) может быть обеспечено за счёт принятия мер по увеличению коэффициента электромагнитной защищённости радиолиний дифференциальных поправок, а именно:

$$K_{эмз} = \frac{P_{то}}{P_{бп}} = \frac{0,950}{0,961} = 0,989 \quad (16)$$

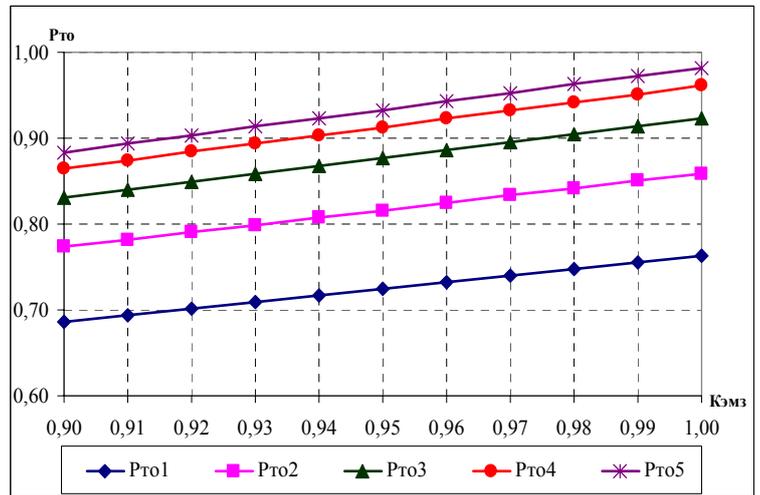


Рис. 12. Графики зависимостей $P_{то} = f(K_{эмз})$ при заданных различных табличных значениях $P_{бп}$.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе представлено новое решение актуальной научной задачи повышения точности обсервации судна на основе использования новых критериев оценки качества сигналов и информационных каналов в ШДПС и взаимосвязи их с навигационной безопасностью мореплавания, а также разработки имитационной модели ЭМЗИК ШДПС при воздействии помех. В результате работы получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ условий использования дифференциального режима СРНС GPS/ГЛОНАСС. При этом показаны достоинства и недостатки каждого дифференциального метода, а также пути реализации дифференциального режима в широкозонных, региональных и локальных дифференциальных подсистемах. Проведенный анализ особенностей подсистем ШДПС (WAAS, EGNOS и MSAS) показал, что в основном, принципы построения, функционирования и структурная организация этих подсистем почти одинаковы. Основное различие между видами ШДПС заключается в зоне охвата и действия, а также в обеспечении различных значений среднеквадратической погрешности при местоопределении судна.
2. Обосновано использование новых, конструктивных критериев оценки качества сигналов и информационных каналов в ШДПС - поля поражения сигнала и коэффициента ЭМЗИК ($K_{эмз}$). При этом показаны основные направления и методы улучшения ЭМЗИК ШДПС.
3. Предложена имитационная модель ЭМЗИК, включающая информационные каналы системы ГЛОНАСС и ИНМАРСАТ при воздействии помех.
4. Разработана методика оценки влияния ЭМЗИК ШДПС на время восстановления их нормального функционирования. Иначе говоря, решена задача прогноза времени восстановления радиолинии в системе ШДПС в зависимости от коэффициента ЭМЗИК ($K_{эмз}$).
5. Разработана методика оценки влияния электромагнитной защищённости информационных каналов ШДПС на точность обсервации судна.

IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, предусмотренных «Перечнем изданий ВАК»:

1. Вишневецкий Ю.Г., Фам Ки Куанг. Оценка общей эффективности автоматизированной системы управления движением судов. «Программные продукты и системы» № 2(82), Тверь, 2008, С. 59-60.
2. Вишневецкий Ю.Г., Фам Ки Куанг., Мисник Е.А. Анализ воздействия взаимных помех на спутниковую радионавигационную систему ГЛОНАСС. «Вопросы радиоэлектроники». Вып. 1, М., 2010, С. 117-120.

В других изданиях:

3. Фам Ки Куанг. Проблемы улучшения электромагнитной защищённости информационных каналов ШДПС в АСУДС. «Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов» № 12, Курск, 2008, С.70-71.
4. Вишневецкий Ю.Г., Фам Ки Куанг. Оценка взаимосвязи навигационной безопасности мореплавания и электромагнитной защищённости информационных каналов ШДПС. «Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов» № 1, Курск, 2009, С. 124-125.
5. Вишневецкий Ю.Г., Фам Ки Куанг. О выборе критериев для оценки влияния электромагнитной защищённости информационных каналов ШДПС на навигационную безопасность мореплавания. «Мобильные телекоммуникации» № 1, М., 2009, С. 34-35.
6. Фам Ки Куанг., Мисник Е.А. Предпосылки использования ШДПС для совершенствования радионавигационного обеспечения России. - Материалы межвузовской научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной 200-летию транспортного образования в России «Водный транспорт России: история и современность». Книга 3.- СПб.: СПГУВК, 2009. - С. 122-125.
7. Вишневецкий Ю.Г., Фам Ки Куанг. Оценка точности местоопределения и безопасности плавания судна в дифференциальном режиме работы. «Аспирант и Соискатель» (Спутник +), № 2, М., 2009, С. 92-94.
8. Вишневецкий Ю.Г., Фам Ки Куанг. О влиянии электромагнитной защищённости радиолиний ШДПС на время их восстановления. «Журнал университета водных коммуникаций». Вып. 4, СПГУВК, 2009. - С. 154-157.
9. Вишневецкий Ю.Г., Фам Ки Куанг., Мисник Е.А. Электромагнитная защищённость информационных каналов ШДПС в условиях воздействия узкополосных помех. - Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». - СПб.: СПГУВК, 2009. - С. 105-107.

Печатается в авторской редакции

Подписано к печати: 12.01.2010.
Лицензия № 000283 от 19.10.1998.
Уч.-изд.л. 1,28

Сдано в производство: 12.01.2010.
Формат 60×84 1/16 Усл.-печ.л. 1,3
Тираж 60 экз. Заказ № 172

Отпечатано в типографии ФГОУ ВПО СПГУВК
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2