

ОТЧЕТ МСЭ-R М.2084*

**Обнаружение сообщений системы автоматической идентификации
с помощью спутников**

(2006)

1 Введение

В начале 1990-х годов Международная организация морских средств маячных служб и служб навигации (IALA) впервые предложила разработать универсальную судовую систему для повышения уровня безопасности на море и эффективности навигации, а также в целях содействия в охране морской окружающей среды. В ответ на это предложение Международная морская организация (ИМО), МСЭ и Международная электротехническая комиссия (МЭК) приняли новую навигационную систему, которая сегодня известна как система автоматической идентификации (AIS), для помощи в достижении этих целей. Основной целью системы AIS является упрощение эффективного обмена навигационными данными между судами и береговыми станциями в целях значительного повышения безопасности мореплавания и содействия улучшению управления и наблюдения за действиями на море. Технические характеристики современной системы AIS, использующей методы многостанционного доступа с временным разделением (TDMA) в диапазоне ОВЧ морской подвижной службы, подробно описаны в Рекомендации МСЭ-R М.1371.

Как описано в этой Рекомендации, система AIS разработана для автономной работы и автоматического обмена короткими сообщениями между судами, береговыми станциями и средствами навигации, главным образом, на расстояниях от 20 до 30 морских миль (NM) (27–56 км), с использованием самоорганизующейся формы TDMA. В состав сообщения включены такие данные, как идентификация, местонахождение и скорость движения судна.

Согласно требованиям Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (SOLAS), установка и применение системы AIS являются обязательными для всех судов валовой вместимостью 300 регистровых тонн и более, задействованных в международных перевозках. В 2008 году все суда валовой вместимостью 500 регистровых тонн или более, задействованных во внутренних перевозках, также должны быть оборудованы системой AIS. Оборудование системы AIS, разработанное в соответствии с этими обязательными требованиями к перевозке, называется оборудованием Класса А. Менее мощный вариант системы, предназначенный для добровольной перевозки, называемый Классом В, в настоящее время находится в стадии разработки. С момента своего внедрения система AIS доказала успешность своего применения для достижения исходных целей, поставленных организацией IALA.

В последнее время появилась потребность в функциях, которые позволили бы обнаруживать и отслеживать суда на расстояниях от берега, значительно превышающих те, что могут быть обеспечены обычными наземными системами ОВЧ связи. Требования к таким дальним применениям, например, более качественная обработка данных о случайном судне, повышенная безопасность и противодействие незаконным действиям, предполагают возможность обнаружения судов на расстояниях 200 NM (370 км) от берега и более.

В настоящем Отчете представлена система обнаружения сообщений AIS с помощью спутников как одно из средств дальнего обнаружения судов. В настоящем Отчете рассматривается ее техническая реализация, исследуется пропускная способность спутника в различных условиях и изучаются возможные методы улучшения пропускной способности спутника. Остальные части данного документа представлены в виде восьми следующих подразделов: эксплуатационные и технические характеристики системы AIS, обзор обнаружения сообщений AIS с помощью спутников, анализ бюджета линии связи, анализ внутрисистемных помех (только Класс А, оба Класса А и В и неоднородное распределение судов), совместимость с распространенными системами подвижной связи, методы улучшения качественных показателей и совместного использования и заключение.

* Настоящий Отчет должен быть доведен до сведения Международной морской организации (ИМО), Международной организации морских средств маячных служб и служб навигации (IALA) и Международного комитета морских радиослужб (CIRM).

2 Эксплуатационные и технические характеристики судовой системы AIS

Для упрощения функционального описания и понимания природы обнаружения с помощью спутников в последующих параграфах приведены основные характеристики обычной наземной системы AIS, описанные в Рекомендации МСЭ-R М.1371.

Система AIS работает как система связи между судами и между судном и берегом, в которой суда, оборудованные системой AIS, периодически передают короткие сообщения TDMA фиксированной длины, содержащие такую информацию о судне, как его идентификация, местонахождение, курс, скорость движения, и другую статусную информацию. Соответствующие приемники AIS на борту судов и береговых станций принимают эту информацию от всех окрестных судов, получая, таким образом, полную картину местных условий, которую они передают на радиолокационные станции и иные средства навигации.

Структура сигнала TDMA основывается на кадре длительностью в одну минуту, разделенном на 2250 временных интервалов, и каждое сообщение номинально занимает один временной интервал. В обычном режиме эти идентификационные сообщения периодически передаются в одном из двух ОВЧ каналах морской службы, которые назначены для этой цели. Местонахождение судна определяется при помощи бортового электронного устройства позиционирования. Синхронизация TDMA осуществляется сигналами, полученными от приемника глобальной спутниковой системы навигации (ГССН), встроенного в станцию AIS. С двумя этими каналами общая пропускная способность системы AIS составляет 4500 одноинтервальных сообщений в минуту.

В основе проекта системы AIS лежит схема доступа, называемая самоорганизующейся TDMA. С помощью этого метода система функционирует без центрального контроллера TDMA, который типичен для схем TDMA с фиксированным присвоением канала. За счет непрерывного контроля сигналов AIS в местных условиях и "объявления" о временном интервале его следующей передачи, выполняется координация всех судов, находящихся в данном месте и участвующих в обмене сообщениями, и минимизируются конфликты, связанные с использованием данного временного интервала. Для определенных типов сообщений используются также и другие схемы доступа TDMA.

Радиочастотные параметры и технические параметры данных системы AIS приведены в таблице 1. Как показано в этой таблице, базовая длина сообщения составляет 256 битов, из которых последние 24 бита служат буфером, который учитывает задержки на распространение и задержки ретранслятора, нестабильность синхронизации и дополнительные биты, появляющиеся в результате битового заполнения. Как правило, 20 последних позиций битов остаются пустыми. Характеристики антенны и параметры связанной с ней линии передачи, которые должны быть установлены на судах, оборудованных системой AIS, как правило, в базовых Рекомендациях МСЭ не определяются, но они приведены здесь для того, чтобы более полно определить характеристики системы AIS. На практике обычно используется два типа антенн, полуволновой ($1/2 \lambda$) диполь и монополь длиной $5/8 \lambda$ с несимметричным питанием, с коэффициентами усиления, лежащими в диапазоне от 2 до 4,5 дБи. С целью сохранения более консервативного подхода в настоящем исследовании предполагается применение полуволнового ($1/2 \lambda$) диполя с максимальным коэффициентом усиления примерно 2 дБи с простой диаграммой направленности в виде приподнятого квадрата косинуса. Тип и длина линии передачи будут разными для разных установок. В настоящем документе предполагаются потери 3 дБ для учета потерь в кабеле и прочих потерь, связанных с судовым передатчиком AIS. Двоичная структура пакета данных "по умолчанию" показана в таблице 2.

ТАБЛИЦА 1

Обзор технических параметров судовой системы AIS

| Параметры AIS | Значения |
|-----------------------------|---|
| Частоты | 161,975 и 162,025 МГц |
| Ширина полосы частот канала | 25 кГц |
| Платформы | Суда Класса А, Суда Класса В, береговые станции, средства навигации |
| Мощность | 12,5 Вт (Класс А); 2 Вт (Класс В) |
| Тип антенны ⁽¹⁾ | $1/2 \lambda$ диполь |

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

| | |
|---|---|
| Коэффициент усиления антенны ⁽¹⁾ | 2 дБи с диаграммой направленности в вертикальной плоскости в виде приподнятого квадрата косинуса; Минимальный коэффициент усиления = -10 дБи |
| Потери в кабеле ⁽¹⁾ | 3 дБ (оценка) |
| Чувствительность приемника | -107 дБм для 20% коэффициента ошибок в пакете (PER) (минимум) -109 дБм для ≤20% PER (типовое значение) |
| Модуляция | 9 600 битовая GMSK |
| Режим многостанционный доступа | TDMA (самоорганизующийся, случайный, фиксированный и с пошаговым изменением) |
| Длина кадра TDMA | 1 минута; 2 250 интервалов |
| Продолжительность интервала TDMA | 26,7 мс; 256 битов (смотри таблицу 2) |
| Типы сообщений | 22 типа |
| Длина сообщения | От 1 до 5 интервалов, причем доминирующий тип – одноинтервальное сообщение |
| Интервал периодичности сообщений | Интервалы передачи от 2 с до 6 мин (смотри таблицу 3) |
| Требуемое защитное отношение D/U | 10 дБ при PER = 20% ⁽²⁾ |

⁽¹⁾ Типовые параметры, не определенные в Рекомендации МСЭ-R М.1371.

⁽²⁾ Параметр, определенный в МЭК 61993-2.

ТАБЛИЦА 2

Двоичная структура пакета данных "по умолчанию"

| | | |
|--------------------------------|--|--|
| Набор мощности | 8 битов | |
| Настроечная последовательность | 24 бита | Необходима для синхронизации |
| Указатель начала | 8 битов | |
| Данные | 168 битов | Длина по умолчанию |
| Циклический код избыточности | 16 битов | Необходим для обнаружения ошибок |
| Указатель окончания | 8 битов | |
| Буфер | 24 бита (как правило, 20 последних позиций битов остаются пустыми) | Необходим для битов заполнения, компенсации задержек распространения и ретранслятора, а также нестабильности |
| Всего | 256 битов | |

Для выполнения различных функций, выполняемых системой AIS, в стандарте определено 22 типа сообщений, которые можно разделить на четыре категории: динамические, статические и рейсовые, административные сообщения и сообщения безопасности, данные. Динамические сообщения, которые передаются периодически, занимают наибольший объем трафика в системе AIS. Ключевой переменной является скорость, с которой различные платформы передают эти периодические сообщения. В стандарте определен диапазон интервалов между отчетами для нескольких типов платформ в зависимости от динамических параметров судна, например, скорости и курса. В таблице 3 показаны интервалы между отчетами для различных платформ.

Как будет показано позже, интервал между отчетами играет важную роль в качественных показателях обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Как показано в таблице 3, интервал между отчетами для судов Класса А меняется в широком интервале от 2 с до 3 мин. в зависимости от динамического состояния судна. Для того чтобы определить средний интервал передачи на протяжении длительного времени для судов Класса А, необходимо знать оценку распределения среди различных ситуаций динамического состояния. В таблице 4 перечислены категории состояний, соответствующие им интервалы между отчетами и дана оценка процентов судов в каждой категории для любого заданного момента времени. На основании этих данных была выполнена общая оценка интервала между отчетами.

ТАБЛИЦА 3

Интервалы между отчетами для сообщений AIS

| Платформа AIS | Интервал между отчетами |
|---|---|
| Динамическая информация: | |
| Береговая станция | Интервал от 3 1/3 до 10 с (номинально 10 с) |
| Судно Класса А | Интервал от 2 с до 3 мин. (в среднем примерно 7 с) (см. таблицу 4) |
| Судно Класса В | Интервал от 5 с до 3 мин. (номинально 30 с) |
| Воздушное судно поиска и спасания | Интервал 10 с |
| Вспомогательные средства навигации | Интервал 3 мин. |
| Статическая и рейсовая информация | Интервал 6 мин. |
| Сообщения безопасности и административные сообщения | По мере необходимости |
| Сообщения данных | По мере необходимости |

ТАБЛИЦА 4

Интервалы между отчетами для судового подвижного оборудования Класса А

| Динамические условия судна | Номинальный интервал между отчетами | Процент от общего количества |
|--|-------------------------------------|------------------------------|
| Судно на якорной стоянке или буксируется со скоростью не более 3 узлов | 3 мин. | 28 |
| Судно на якорной стоянке или буксируется со скоростью более 3 узлов | 10 с | |
| Судно движется со скоростью 0–14 узлов | 10 с | 30 |
| Судно движется со скоростью 0–14 узлов и меняет курс | 3 1/3 с | 12 |
| Судно движется со скоростью 14–23 узла | 6 с | 30 |
| Судно движется со скоростью 14–23 узла и меняет курс | 2 с | |
| Судно движется со скоростью 23 узла | 2 с | |
| Судно движется со скоростью 23 узла и меняет курс | 2 с | |
| В среднем для всех судов | Интервал ~7 с | |

3 Обнаружение сообщений AIS с помощью спутников

В принципе система спутникового обнаружения предполагает использование одного или нескольких спутников на околоземной орбите (LEO) для приема и декодирования сообщений AIS и ретрансляции полученной в результате информации по фидерным спутниковым линиям на земные станции, расположенные в соответствующем месте. Для LEO спутников типичны высоты орбит в диапазоне от 600 до 1000 км. В настоящее время не существует действующей системы обнаружения сообщений AIS с помощью спутников, и эксплуатационные и технические параметры для такой системы не определены. Следовательно, для целей настоящего документа необходимо предположить разумные и технически достижимые параметры.

Первая демонстрационная система будет состоять из одного-единственного спутника (LEO) на полярной орбите высотой 950 км. Для более поздних действующих систем предполагается, что будет использоваться относительно небольшая группировка спутников LEO; следовательно, не будет обеспечиваться непрерывное обслуживание спутниками земной поверхности в данной точке местонахождения судна. Для полного глобального охвата при использовании небольшого числа земных станций требуется применять методы передачи принятых данных AIS с промежуточным накоплением. Однако для обнаружения и контроля судов на расстоянии до нескольких тысяч морских миль от берега большая зона покрытия спутникового луча позволяет загружать данные в реальном времени в течение периода видимости спутника.

Несколько ключевых технических факторов отличают обнаружение сообщений AIS с помощью спутников от обычного обнаружения сообщений AIS, передаваемых между судами и между судном и береговой станцией, особенно чувствительность приемника, диаграмм направленности антенны и требования к надежности. Измеренные параметры, переданные на судовые приемники AIS, показывают, что стандартные приемники, имеющиеся в свободной продаже, как правило, имеют более высокую чувствительность, чем чувствительность приемника, требуемая спецификациями системы AIS. Используя малошумящие усилители (МШУ) и схемы оптимального детектирования, можно добиться дополнительного улучшения чувствительности приемника в спутниковой системе AIS. Однако этим улучшениям препятствует необходимость иметь полосу частот приемника более широкую, чем ширина полосы оптимального приемника, для того чтобы учесть сдвиги Допплера величиной до примерно $\pm 3,5$ кГц. С учетом этих факторов здесь для спутникового приемника системы AIS используется базовая чувствительность = -118 дБм для коэффициента ошибок в пакете (PER) = 1% и = -120 дБм для PER = 20%.

В первой системе будет использоваться спутниковая антенна с широким лучом. Антенны с широким лучом, используемые на спутниках LEO, можно в общем случае разделить на две группы. Одним широко используемым типом является такой, в котором пиковое усиление направлено во все стороны по направлению на горизонт, а меньший коэффициент усиления направлен на подспутниковую точку. У такого типа антенны изменение коэффициента усиления антенны в зависимости от угла отклонения от оси частично компенсирует изменения потерь на распространение, что приводит к менее заметному изменению уровня сигнала с изменением угла отклонения от оси. Другой категорией антенн является более привычный тип, у которого пиковое усиление направлено в подспутниковую точку. Для целей настоящего исследования предполагается использование последнего типа с пиковым усилением = 6 дБи и шириной луча по уровню -3 дБ = 100° . Для диаграммы направленности главного лепестка здесь используется следующая модель, которая часто применяется в исследованиях МСЭ-R:

$$G(\theta) = G_{MB} - 12(\theta/\theta_{3dB})^2,$$

где:

- $G(\theta)$: коэффициент усиления спутниковой антенны (дБи) при угле отклонения от оси θ (градусов)
- G_{MB} : коэффициент усиления в главном луче спутниковой антенны (дБи)
- θ_{3dB} : ширина луча спутниковой антенны по уровню -3 дБ (градусов)

Требования к качественным показателям обнаружения сообщений AIS с помощью спутников также существенно отличаются от требований к аналогичной наземной системе. Целью обычной системы AIS, как и большинства систем связи, является успешный прием и декодирование большей части соответствующих переданных сообщений со средней или высокой надежностью. Для целей контроля движения судов с применением системы обнаружения сообщений AIS с помощью спутников высокой надежности не требуется. Для судов, находящихся на расстоянии нескольких сотен морских миль от берега, может быть достаточным ежечасно обновлять данные о местонахождении судна, а для судов, находящихся еще дальше в море, может быть достаточным обновлять данные о местонахождении судна раз в четыре часа или даже раз в двенадцать часов. Как будет показано далее, внутрисистемные помехи приводят к потерям очень большого числа AIS сообщений, принятых от судов. Например, в течение одного пролета спутника над целью может быть потеряно до 99% или более AIS сообщений судов, и все же цель регулярного обновления данных о местонахождении судна может быть достигнута. Для того чтобы добиться обновления данных о местонахождении судна каждые 12 часов, необходимо успешно декодировать только одно из более чем 360 сообщений, принятых от данного судна в течение этого периода ($\sim 0,3\%$). Это более подробно объясняется далее.

Две частоты в полосе морской подвижной службы, которые назначены каналам для работы наземной системы AIS, не распределены ей на исключительной основе. Эти каналы и соседние с ними каналы распределены и используются в различных районах мира для других применений подвижной службы, включая ОВЧ станции общественной корреспонденции (VPCS) морской подвижной службы и радиосистемы сухопутной подвижной службы. В отличие от обычных наземных систем AIS, которые могут сосуществовать с другими передатчиками на совпадающих частотах при условии географического разделения, луч спутниковой антенны охватывает большую географическую

область, принимая, таким образом, одновременно передачи множества судовых передатчиков AIS, а также подвижных систем, работающих на территориях, удаленных от моря. Спутниковая система AIS должна быть способна успешно работать в условиях помех, создаваемых существующими службами. Качественные показатели спутниковой системы AIS, работающей с существующими службами, рассмотрены в § 9.

В таблице 5 учитывается все вышесказанное и приводятся характеристики спутника системы AIS, использованные в настоящем исследовании.

ТАБЛИЦА 5

Предполагаемые характеристики спутниковой линии системы AIS

| Параметры спутника системы AIS | Значения |
|--|--|
| Спутник | |
| Группировка | От 1 до 6 спутников |
| Высота (км) | 950 |
| Наклонение (градусов) | 82,5 |
| Период (минуты) | 104 |
| Зона покрытия охвата луча | Радиус 3 281 км (на линии горизонта) |
| Антенна | |
| Коэффициент усиления (G_{MB}) (дБи) | 6 |
| Ширина луча ($\theta_{3дБ}$) (градусов) | 100 |
| Диаграмма направленности | $G_{MB} - 12 (\theta/\theta_{3дБ})^2$ |
| Поляризация | Почти круговая |
| Потери из-за преобразования поляризации из круговой в линейную (дБ) | 3 |
| Приемник | |
| Коэффициент шума на входе МШУ (дБ) | 3 |
| Требуемое значение E_b/N_0 для КОБ = 10^{-5} (дБ) | 13, включая потери на аппаратную реализацию |
| Потери в линии/фильтре до МШУ (дБ) | 2,5 |
| Чувствительность на МШУ (дБм) | -118 для коэффициента ошибок в пакете (PER) = 1% -120 для PER = 20% |
| Защитное отношение (для совпадающих по времени сигналов в совпадающем канале) (дБ) | 15 для PER = 1% 10 для PER = 20% |
| Желательный период обновления данных о местонахождении судна | Один пролет спутника над целью, 4 часа и 12 часов |

4 Анализ бюджета линии связи

Одним из базовых качественных показателей любой спутниковой системы связи является бюджет линии связи. Для исследуемого случая он состоит из расчета мощности, принимаемой на спутнике от одного судна, и сравнения с чувствительностью спутника. Если принимаемая мощность превышает чувствительность, т. е. имеет положительный запас, то связь может быть успешно установлена. Используя параметры, которые были определены ранее в настоящем документе для судовых передатчиков AIS и спутниковых приемников AIS, был определен бюджет линии для трассы судно-спутник системы AIS. В таблице 6 описываются применяемые геометрические расчеты и расчеты мощности для обнаружения сообщений AIS от судов Класса А.

ТАБЛИЦА 6

Бюджет линии связи судно-спутник для максимальной дальности

| Параметры | Значения |
|--|----------|
| Геометрия | |
| Высота спутника (км) | 950 |
| Минимальный угол места передачи (градусов) | 0 |
| Угол отклонения от оси спутниковой антенны (градусов) | 60,5 |
| Максимальная наклонная дальность (км) | 3 606 |
| Максимальная горизонтальная дальность (км) | 3 281 |
| Мощность | |
| Мощность передатчика (дБм) | 41,0 |
| Коэффициент усиления передатчика (дБи) | 2,0 |
| Потери на передачу в кабеле и иные потери (дБ) | 3,0 |
| Потери на распространение в свободном пространстве для максимальной дальности (дБ) | 147,8 |
| Потери из-за несовпадения поляризации (дБ) | 3,0 |
| Коэффициент усиления спутниковой антенны на линии горизонта (дБи) | 1,6 |
| Потери в спутниковом РЧ канале/фильтре (дБ) | 2,5 |
| Мощность, принимаемая на спутнике (дБм) | -111,7 |
| Чувствительность спутника для PER = 20% (дБм) | -120,0 |
| Чистый запас (дБ) | 8,3 |

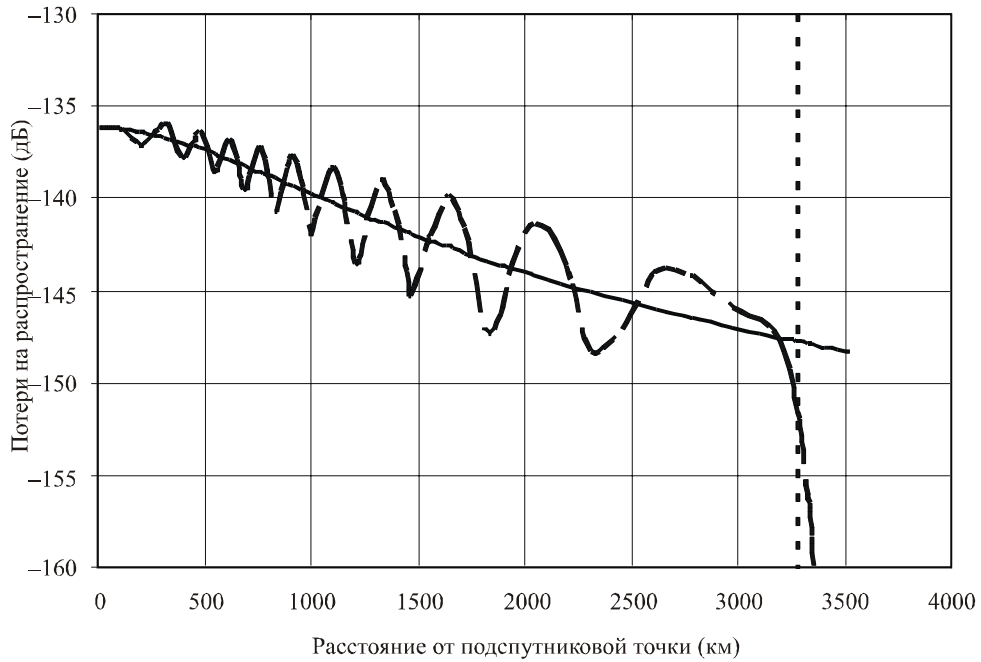
Одним из факторов, который был изучен более подробно, являются потери на распространение для очень малых углов передачи судовых антенн. Для большинства спутниковых систем связи обычным является проектирование системы для некоторого минимального угла места земного терминала над уровнем горизонта, например 3° или 5°, для того чтобы учесть такие технические факторы, как замирания и/или регламентарные ограничения. В настоящем исследовании было найдено, что эти цифры абсолютно неприемлемы для распространения ОВЧ на трассе Земля-спутник над морской поверхностью. С использованием модели распространения радиоволн, разработанной для предсказания потерь на распространение на трассе Земля-спутник был разработан график, изображенный на рисунке 1, показывающий среднюю оценку распространения для спутника на высоте 950 км¹. Этот график был разработан для средних данных, соответствующих умеренным погодным условиям и умеренному состоянию моря. Полученная лепестковая структура данных является результатом периодических усилений и замираний сигнала из-за сложения с синфазным и противофазным сигналом, отраженным от поверхности воды. Как видно из данных, номинальные условия распространения в свободном пространстве на протяжении всей трассы до оптического горизонта находятся в пределах двух дБ, а за пределами этого расстояния потери на распространение быстро увеличиваются.

На рисунке 2 показан результат, полученный из таблицы 5, для описания чистого запаса как функции расстояния от подспутниковой точки на земной поверхности до горизонта. В этих расчетах до земного горизонта используется распространение в свободном пространстве, включая ранее показанную структуру синфазных/противофазных замираний. Частичный ноль непосредственно под спутником является результатом нулевого коэффициента усиления дипольной антенны, используемой на судовых антеннах системы AIS. Поскольку технические параметры бюджета линии связи для судов Класса В в основном идентичны техническим параметрам для судов Класса А, за исключением пониженной мощности, на этом же рисунке показан также и параллельный график, описывающий прием на спутнике для Класса В.

¹ См. <http://flattop.its.bldrdoc.gov/if77.html>.

РИСУНОК 1

Потери на распространение Земля-спутник над морской поверхностью на частоте 162 МГц
(Высота спутника 950 км)

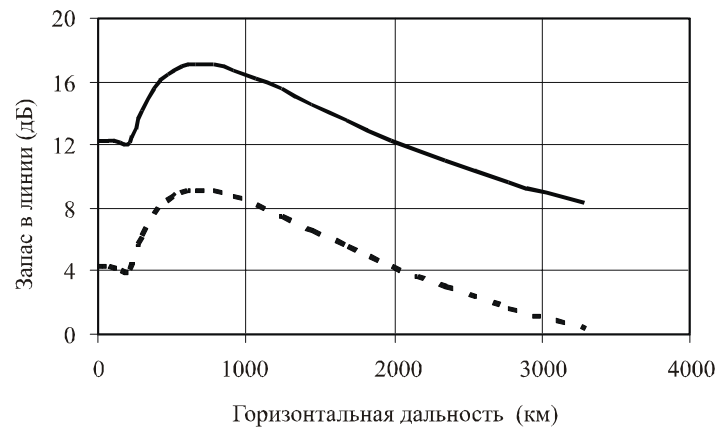


- Потери в свободном пространстве
- · - Потери на распространение
- · - · Предел прямой видимости

Отч. 2084-01

РИСУНОК 2

Запас в линии судно-спутник в зависимости от горизонтальной дальности от подспутниковой точки



- Класс А
- · - Класс В

Отч. 2084-02

Из этих результатов можно сделать вывод, что в большинстве мест нахождения судов в зоне покрытия спутникового луча имеется достаточный запас для обнаружения и декодирования на спутнике сигналов AIS обоих Классов – А и В.

5 Анализ внутрисистемных помех (только Класс А)

Хотя бюджет линии показывает наличие необходимых запасов в линии для обнаружения сообщения AIS от судна Класса А в любой точке зоны покрытия спутникового луча, внутрисистемные помехи существенно ограничивают качественные показатели системы. В дальнейшем рассмотрении описывается три метода количественной оценки ограничений качественных показателей системы из-за внутрисистемных помех.

5.1 Аналитический подход

Как описано ранее, самоорганизующаяся схема TDMA (SOTDMA), используемая в AIS, обеспечивает координацию использования интервалов времени, в результате которой минимизируются конфликты между судовыми и береговыми блоками в данной географической области. Это совершенно иначе для обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Спутник видит множество таких географических областей в пределах луча антенны. Поскольку, как правило, между различными областями нет никакой координации, между многими сигналами, принимаемыми на спутнике, будут возникать коллизии использования интервалов времени. При возникновении коллизии использования какого-либо интервала времени в зависимости от соответствующих уровней мощности могут быть потеряны оба сообщения. С ростом частоты коллизий использования интервалов времени вероятность успешного обнаружения и декодирования данного сообщения судовой системы AIS уменьшается.

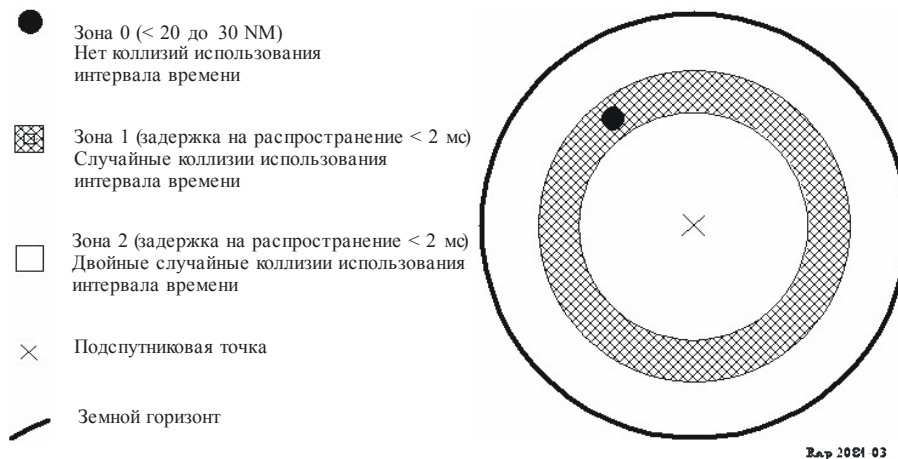
Эти коллизии использования интервалов времени можно рассмотреть в условиях наличия одного-единственного полезного (D) сообщения AIS и одного или нескольких мешающих (U) сообщений AIS. Когда возникает коллизия использования некоторого интервала времени, а суммарное отношение мощностей D/U меньше требуемого значения 10 дБ, это сообщение теряется. Рассматривая сначала только суда Класса А, на рисунке 2 показано, что отношение максимального принятого сигнала AIS к минимальному принятому сигналу AIS будет составлять примерно 9 дБ. Следовательно, для любой возникающей коллизии использования интервалов времени невозможно достичь требуемой величины D/U 10 дБ, что приводит к потере большей части пакетов. Далее описаны возможные методы обработки сигнала на приемнике, которые могут уменьшить потери пакетов.

При определенных условиях во время коллизии использования интервала времени теряется два пакета. Это показано на рисунке 3. На этом рисунке внешний круг изображает зону покрытия луча на поверхности Земли, а центр круга – это точка непосредственно под спутником. Много меньшая черная область изображает область координации AIS. Рассмотрим прием сообщения от судна, находящегося в этой области. Сообщения AIS от других судов, находящихся в этой же области, будут скоординированы друг с другом в результате использования архитектуры SOTDMA; следовательно, ни на местном уровне, ни в спутниковом приемнике AIS не будет возникать никаких коллизий использования интервала времени. Однако сообщения судов, находящихся за пределами этой географической области, но остающихся в пределах большей затененной области, друг с другом скоординированы не будут, что приведет к возникновению случайных коллизий использования интервалов времени и потере некоторой части полезных сообщений. Поскольку различия в задержках распространения до спутника из различных мест нахождения судов в пределах этой зоны не превышают 2 мс, то синхронизация времени с использованием GPS гарантирует эффективную синхронизацию интервалов времени и будет затронут только один интервал времени. Задержка длительностью 2 мс соответствует 20 пустым двоичным позициям в конце сообщения AIS. В белых областях, находящихся за пределами затененной зоны, будут наблюдаться большие различия задержек распространения сигнала до спутника, которые приведут к перекрытию интервалов времени и, в результате, к потере двух интервалов времени.

Если учитывать только суда Класса А и предположить идеальную ситуацию, когда географическое распределение судов в зоне видимости спутника является равномерным, то можно использовать простой аналитический метод расчета статистических показателей, связанных с этим видом внутрисистемных помех.

РИСУНОК 3

Иллюстрация зон коллизий использования интервала времени



Во-первых, рассмотрим обычный случай приема на спутнике одного-единственного сообщения от данного судна, когда кроме него существует только одно судно. Вероятность коллизии пакетов и вероятность успешного обнаружения определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 Q_{1,1} &= k * D_C / 2 \\
 P_{1,1} &= 1 - (k * D_C) / 2 \\
 P_{1,1} &= 1 - (k * (\tau / \Delta T) / 2),
 \end{aligned}$$

где:

- $Q_{1,1}$: вероятность коллизии использования интервала времени (Полезное сообщение от одного судна; периодические мешающие сообщения от одного другого судна)
- $P_{1,1}$: вероятность, как минимум, одного успешного обнаружения без коллизий (1 полезное сообщение; периодические мешающие сообщения от одного другого судна)
- D_C : рабочий цикл передачи сообщений мешающих судов
- k : 0, 1 или 2 для мешающих сообщений от судов, находящихся в зонах 0, 1 или 2
- ΔT : средний интервал передачи сообщений (с)
- τ : длина сообщения (0,0267 с).

Коэффициент 2, включенный в вышеприведенное уравнение, учитывает тот факт, что судовые сообщения AIS передаются поочередно на двух частотах AIS.

Для примера возьмем $\Delta T = 7$ с и рассчитаем сообщение конкурирующего судна из зоны 2, получим:

$$P_{1,1} = 99,6\%$$

Расширив этот пример для случая, когда на спутнике принимается одно сообщение от данного судна среди общего числа N судов, находящихся в зоне его видимости, получим формулу расчета вероятности успешного обнаружения сигнала без коллизий использования интервала времени:

$$P_{1,N} = (P_{1,1})^{N-1}$$

Для общего случая, когда за период времени видимости спутника судно передает M сообщений, вероятность успешного обнаружения, как минимум, одного из переданных сообщений на протяжении периода времени видимости спутника, определяется формулой:

$$P_{M,N} = 1 - [1 - (P_{1,1})^{N-1}]^M,$$

где:

$$M: T_{vis} / \Delta T$$

T_{vis} : период времени видимости спутника

Предположив, что в зоне покрытия спутникового луча суда распределены равномерно, понятно, что некоторые суда могут находиться в одной из зон 0, 1 и 2. Относительное расположение и размеры этих зон для каждого принятого сообщения различны. Учитывая, что размер зоны 0 очень мал, мешающие сообщения из этой зоны будут оказывать минимальное влияние на качество обнаружения помощью спутников, и ими можно пренебречь. Следовательно, среднее значение k будет находиться между 1 и 2. Для случая равномерного распределения судов в зоне покрытия спутникового луча было найдено, что внутрисистемные помехи точно описываются средним значением k примерно 1,6. Продолжая рассмотрение вышеприведенного примера с использованием $k = 1,6$, получим два следующих результата:

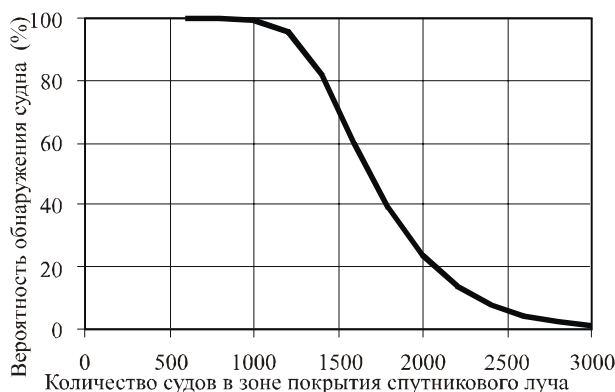
$$P_{1,1000} = 4,8\%$$

$$P_{100,1000} = 99,3\%$$

Вышеописанный аналитический метод соответствует другим исследованиям по данной тематике². На рисунке 4 показан примерный график для простого случая – один спутник и один пролет этого спутника над целью.

РИСУНОК 4

Статистические показатели обнаружения с помощью спутников



Отч. 2084-04

Расчеты, описанные выше, показывают вероятность обнаружения данного судна в течение определенного периода видимости спутника. Иным и, возможно, более полезным статистическим показателем может быть процент обнаруженных судов. Поскольку разумно предположить, что вероятность обнаружения не зависит от того или иного судна, то среднее число обнаруженных судов (S_{ave}) вычисляется по формуле:

$$S_{ave} = N \cdot P_{M,N}$$

Графическое изображение этого значения в процентах от результатов обнаружения всех судов идентично результатам, показанным на рисунке 4, где шкала ординат размечена в процентах обнаруженных судов.

² Хойе, Гудрун К., и др. [без даты] Система AIS космического базирования для Глобального контроля морского движения, Кьеллер, Норвегия: Норвежский департамент военных исследований (FFI).

Третьим интересным статистическим показателем является вероятность того, что все суда, находящиеся в зоне покрытия спутникового луча, будут обнаружены за время данного периода видимости. Этот намного более строгий критерий определяется следующим уравнением:

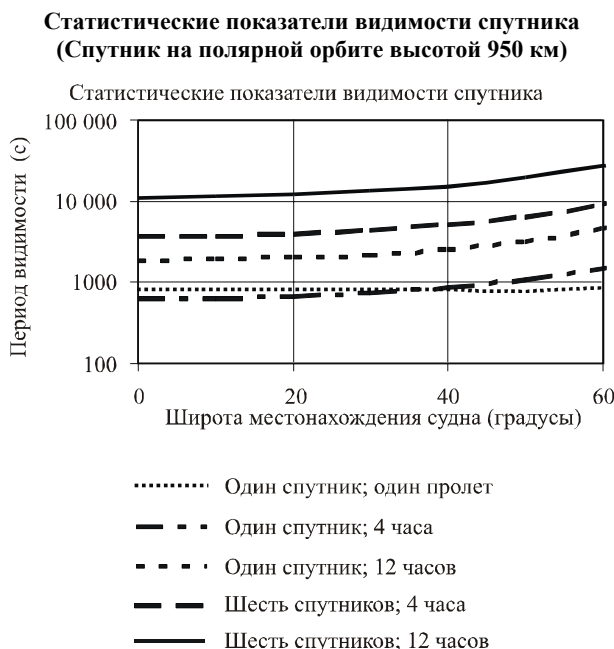
$$P_{All} = (P_{M,N})^N$$

Из-за очень большого значения экспоненты этот график фактически показывает "все" или "ничего". То есть когда вероятность отдельного обнаружения очень близка к 1,0, тогда будет обнаружено 100% судов. Но когда вероятность отдельного обнаружения падает ниже 1,0, вероятность обнаружения 100% судов быстро уменьшается до нуля.

Рассматривая все вышесказанное, становится понятно, что многие переданные сообщения могут быть повреждены и потеряны из-за коллизий использования интервалов времени, и, тем не менее, поставленная цель обновления данных во время данного периода видимости спутника может быть достигнута.

Конечным фактором, который должен быть определен, является период видимости спутника. Для рассматриваемого здесь значения высоты спутника 950 км, период видимости для одного пролета непосредственно над целью составляет примерно 16,8 минут. Однако большая часть пролетов спутника происходит не непосредственно над целью, а при некоторых меньших углах места в зависимости от наклона спутниковой орбиты и широты места нахождения судна. С использованием доступной на рынке модели спутникового анализа были получены средние значения периодов видимости спутника в функции от широты места нахождения судна, что показано на рисунке 5³. На рисунке показаны значения для одного пролета непосредственно над целью, а также средние значения для более продолжительных периодов наблюдения, например, 4 часа и 12 часов. Рассматривается также и зона покрытия нескольких спутников – для группировки из шести спутников, в которой спутники расположены так, чтобы избежать перекрытия зон покрытия на поверхности Земли.

РИСУНОК 5



³ В тексте настоящего Отчета термин "период наблюдения" является взаимозаменяемым с термином "период обновления данных о местонахождении судна", оба эти термина обозначают период времени, в течение которого желательно получить, как минимум, одно обновление данных об идентификации и местонахождении данного судна. Термин "период видимости" обозначает общее число секунд на протяжении периода наблюдения, когда между данным судном и спутником существует прямая видимость.

Для простоты большинство представленных здесь примеров относятся к судам на широте 40° с.ш. В таблице 7 приведены конкретные значения видимости для судов, находящихся на широте 40° с.ш.

ТАБЛИЦА 7

**Статистические показатели видимости спутника
(Спутник на полярной орбите; целевое судно находится на 40° северной широты)**

| Спутниковая группировка | Один пролет | Наблюдение в течение 4 часов | Наблюдение в течение 12 часов |
|-------------------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 спутник | 818 с | 853 с ⁽¹⁾ | 2 560 с |
| 6 спутников | 818 с | 5 118 с | 15 360 с |

⁽¹⁾ Для одной спутниковой группировки 4-часовой период наблюдения является усреднением в течение длительного времени; отметим, что могут существовать периоды длительностью более 9 часов, когда спутник не виден.

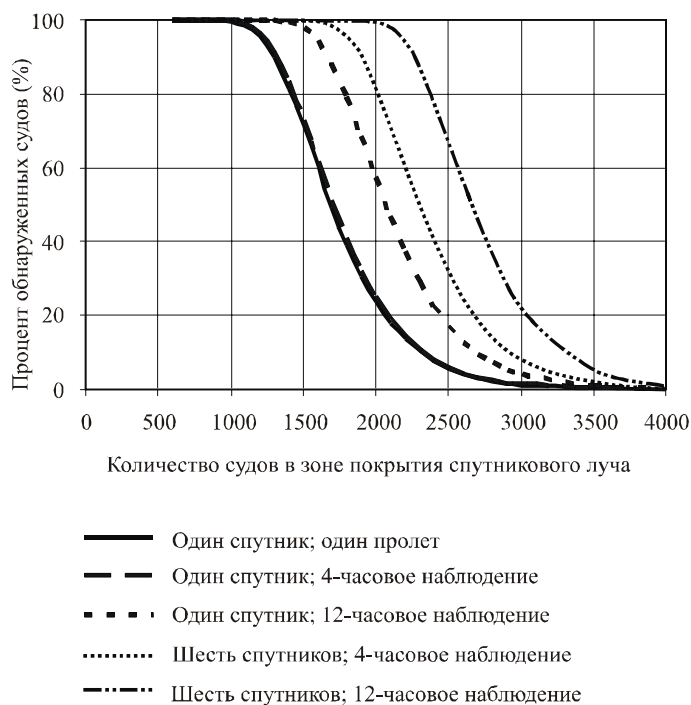
Теперь можно скомбинировать аналитический метод и статистические показатели видимости спутника для описания процента обнаруженных судов и вероятности обнаружения всех судов. На рисунке 6 показаны результаты для типового пролета спутника. В оставшейся части настоящего отчета эти графики будут использоваться в качестве основы для обнаружения с помощью спутников сообщений AIS судов Класса А. На рисунке 7 приведено сравнение с базовым графиком результатов для других периодов наблюдений и для спутниковой группировки из нескольких спутников.

РИСУНОК 6



РИСУНОК 7

**Обнаружение сообщений AIS с помощью спутников
(Сценарии с одним и шестью спутниками)**



Для целей настоящего исследования пропускная способность спутника определяется в двух точках – точке, в которой обнаружено 80% судов, находящихся в зоне покрытия спутникового луча, и точке, в которой обнаружено 100% судов. Следовательно, для описанных выше случаев в таблице 8 показаны значения пропускной способности спутника для различных исследованных случаев.

ТАБЛИЦА 8

**Рассчитанная пропускная способность системы обнаружения сообщений AIS
с помощью спутников
(Спутник на полярной орбите высотой 950 км; судно на широте 40°; обнаружение 80%)**

| Спутниковая группировка | Определение пропускной способности | Один пролет | Наблюдение в течение 4 часов | Наблюдение в течение 12 часов |
|-------------------------|------------------------------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 спутник | 80% | 1 420 судов | 1 430 судов ⁽¹⁾ | 1 790 судов |
| 6 спутников | 80% | 1 420 судов | 2 018 судов | 2 381 судно |
| 1 спутник | 100% ⁽²⁾ | 738 судов | 753 судна | 797 судов |
| 6 спутников | 100% ⁽²⁾ | 738 судов | 1 052 судна | 1 382 судна |

⁽¹⁾ Для одной спутниковой группировки 4-часовой период наблюдения является усреднением в течение длительного времени, отметим, что могут существовать периоды, когда спутник не виден, более 9 часов.

⁽²⁾ Пропускная способность рассчитана для 99,9%.

5.2 Метод моделирования

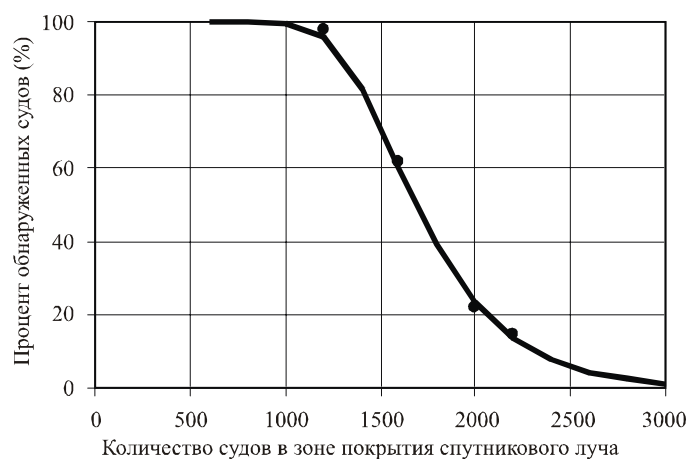
Для изучения ограничений пропускной способности системы обнаружения сообщений AIS с помощью спутников был использован другой подход, в котором применяются методы моделирования Монте-Карло. С использованием электронной таблицы Microsoft Excel[®] была создана база данных, в которой каждая запись содержит технические параметры, описывающие судно, находящееся в зоне покрытия спутникового луча. Рандомизируя ключевые параметры передачи каждого блока AIS и многократно вычисляя результирующую суммарную мощность, принимаемую на спутнике в данном интервале времени, можно получить статистические результаты в том же формате, что и в предыдущем аналитическом методе. Ключевые предположения для метода моделирования Монте-Карло, разработанные для настоящего исследования, следующие:

- Суда равномерно распределены по круговой географической области с радиусом 3281 км и центром в подспутниковой точке.
- Суда ведут передачу, выбирая случайным образом канал AIS 1 или AIS 2 и один из 2250 интервалов времени.
- Каждое судно Класса А ведет передачу с мощностью и средним периодом временных интервалов, которые были указаны ранее.

Кроме вычисления суммарной мощности на спутнике необходимо также рассчитать время задержки на распространение от каждого смоделированного судна, для того чтобы соответствующим образом учесть фактор коллизии использования интервалов времени. Для того чтобы правильно сложить мешающие мощности, принимаемые в течение данного интервала времени полезного сигнала в условиях изменения значений времени задержки распространения, интервал времени полезного сигнала был далее разделен на суб-интервалы времени. В настоящем исследовании было найдено, что достаточную точность можно получить, используя десять суб-интервалов времени, т. е. использование большего числа суб-интервалов времени не приводило к существенному изменению результатов. Первый и последний суб-интервалы из этих десяти суб-интервалов времени длительностью в двадцать битов, представляют собой перекрывающиеся интервалы времени, содержащие в буфере 20 пустых битов. Остальные восемь суб-интервалов времени имеют длительность 27 битов, формируя всего 256 битов. Если суммарная мощность в любом из этих восьми средних суб-интервалов времени приводит к тому, что D/U становится менее 10 дБ, то объявляется о потере сообщения.

Рисунок 8 был создан с использованием реализации этого метода в виде электронной таблицы Microsoft Excel[®]. График показывает несколько точек вычисления данных с использованием метода моделирования по сравнению с базовыми значениями, приведенными на рисунке 5, демонстрируя близкое совпадение.

РИСУНОК 8
Обнаружение сообщений AIS с помощью спутников
Базовый график, полученный с применением метода моделирования



— Аналитический метод
● Метод моделирования

5.3 Стохастический метод

Третьим методом расчета статистических показателей для обнаружения судов Класса А описан в работе Туналея⁴. В этом методе время прибытия на спутник сообщений AIS от судов считается случайной переменной, имеющей Пуассоновское распределение. Выражение, выведенное с использованием этого подхода, имеет ту же общую форму, что и предыдущий аналитический метод, за исключением того, что слагаемое $P_{1,N}$ заменяется следующим выражением:

$$P_{1,N} \approx e^{(-\lambda \tau/2)},$$

где:

λ : $k \cdot (N - 1) / \Delta T$

k : коэффициент, учитывающий коэффициент коллизии двойного интервала времени, как было описано ранее (1.6)

τ : длина сообщения AIS (26,7 мс)

N : количество судов

ΔT : интервал передачи сообщения.

Для случая равномерного распределения судовых передатчиков Класса А легко найти, что результаты, полученные с применением этого метода практически идентичны результатам аналитического метода, который описан ранее в настоящем подразделе. Это можно объяснить, имея в виду следующую аппроксимацию экспоненциальной функции:

$$e^{(-x)} \approx 1 - x \quad \text{для } x \ll 1$$

Путем соответствующей замены этой аппроксимации и перестановки слагаемых было найдено, что аналитический и стохастический методы приводят к получению идентичных уравнений для малых рабочих циклов передачи.

Почти идентичные результаты, полученные с применением трех различных методов анализа, достаточно достоверно подтверждают полученные здесь результаты. В последующем рассмотрении результаты анализа для различных сценариев будут сравниваться с полученными выше базовыми значениями. Учитывая эквивалентность этих трех методов анализа, используется только один метод анализа, который наиболее удобен для описания какого-либо данного сценария.

6 Анализ внутрисистемных помех (оба класса – Класс А и Класс В)

Теперь можно исследовать проблему обнаружения судна Класса А в условиях, когда существуют суда обоих классов – Класса А и Класса В. Для рассмотрения этого случая удобен вышеописанный стохастический метод. Поскольку блоки Класса В имеют меньшую мощность, не каждая коллизия использования интервала времени приведет к потере сообщения. Например, на рисунке 2 можно видеть, что столкновение сообщения AIS от одного судна Класса В, находящегося вдали от подспутниковой точки, с сообщением AIS от судна Класса А, находящегося недалеко от подспутниковой точки, приведет к получению значения D/U, близкого к +17 дБ. Оно значительно превосходит критерий помех, равный 10 дБ, и, следовательно, это сообщение Класса А будет принято безошибочно. Однако при перекрытии множества таких сигналов они могут случайным образом сложиться в точке, где для этого примера произойдет потеря сигнала. Следовательно, описанная ранее простая аналитическая процедура не может быть использована, поскольку в ней предполагается, что каждая коллизия приводит к потере сообщения.

⁴ Доктор Дж. К.И. Туналей [без даты] Стохастическая модель космической AIS.

Для того чтобы использовать стохастическую методику требуются некоторые изменения. В частности, коэффициент λ заменяется следующим выражением

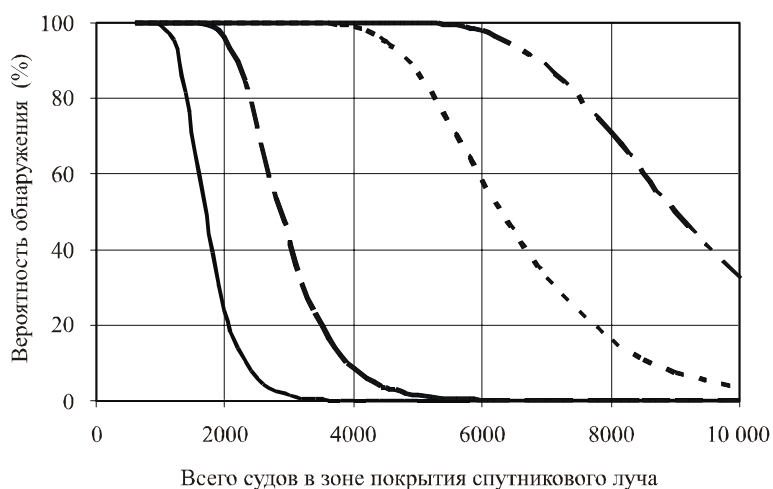
$$\lambda = k_A (N_A - 1) / \Delta T_A + k_B (N_B) / \Delta T_B,$$

в котором подстрочные индексы обозначают соответствующие параметры для Класса А и В. Постоянная k_A имеет то же значение, что и k в более раннем уравнении. Однако постоянную k_B сначала можно только грубо оценить. Она учитывает тот факт, что к потере сообщения приводит только некоторая часть коллизий использования интервала времени Класса В, которая зависит от относительных уровней мощности на спутниковом приемнике. Одним из методов получения более точной оценки постоянной k_B является создание описанной ранее имитационной модели оценки для одной точки данных. Эти результаты были использованы для получения значения $k_B = 1,2$.

На рисунках с 9 по 11 показана вероятность обнаружения сообщения AIS Класса А в условиях наличия сообщений обоих Классов А и В в различных условиях.

РИСУНОК 9

**Вероятность обнаружения в условиях наличия сообщений обоих Классов А и В
(Один спутник; один пролет спутника)***

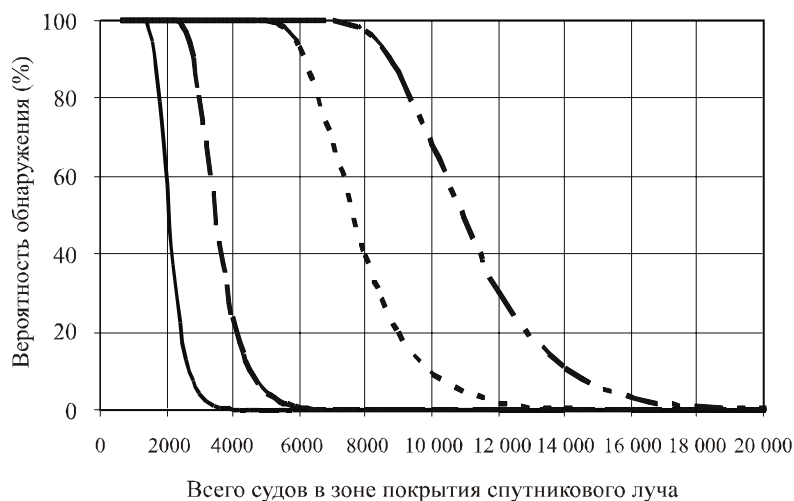


- 100% Класс А; 0% Класс В
- - - 50% Класс А; 50% Класс В
- · - · 10% Класс А; 90% Класс В
- - - 0% Класс А; 100% Класс В

* График, обозначенный "0% Класс А; 100% Класс В", обозначает гипотетический случай ограничений, когда целью является единственное судно Класса А, а все остальные суда имеют Класс В.

РИСУНОК 10

Вероятность обнаружения в условиях наличия сообщений обоих Классов А и В
(Один спутник; 12-часовой период наблюдения)*



- 100% Класс А; 0% Класс В
- 50% Класс А; 50% Класс В
- - - 10% Класс А; 90% Класс В
- - - 0% Класс А; 100% Класс В

* График, обозначенный "0% Класс А; 100% Класс В", обозначает гипотетический случай ограничений, когда целью является одноединственное судно Класса А, а все остальные суда имеют Класс В.

Отч. 2084-10

7 Анализ внутрисистемных помех (неоднородное распределение судов)

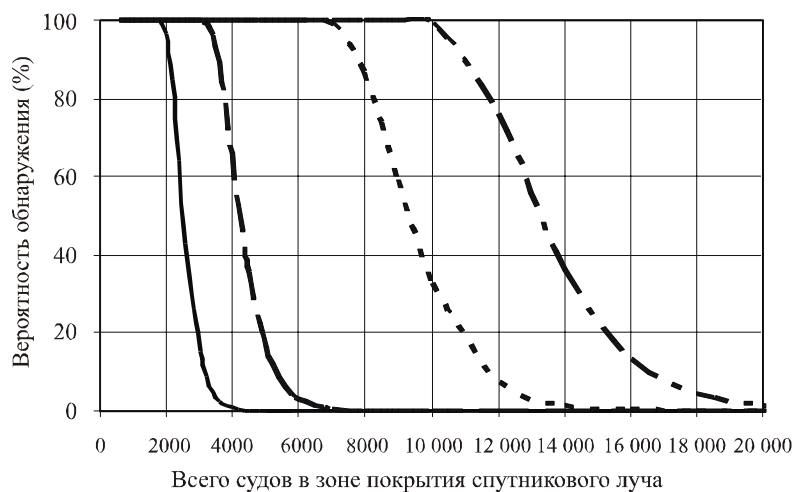
Рассмотренные выше условия существования только судов Класса А и условия существования обоих Классов судов – А и В были разработаны в предположении, что географическое распределение судов в пределах зоны покрытия спутникового луча является постоянным и равномерным. Хотя это предположение упрощает расчеты вероятности обнаружения, такое упрощенное предположение может не соответствовать описанию реальных условий для судов. В целях дальнейшего изучения этого вопроса для настоящего исследования была разработана модифицированная методика моделирования, учитывающая неоднородное распределение судов, которое является более типичным для реальных условий. Однако при выполнении этого было введено множество дополнительных переменных, которые следует учитывать, включая:

- Общее количество судов, оборудованных системой AIS, в мире.
- Географическое положение полезного целевого судна (широта и долгота).
- Всемирное географическое распределение судов, оборудованных системой AIS.
- Информация о наземном следе орбиты спутника.

В настоящем исследовании не было возможности получить достоверную информацию о числе судов, оборудованных системой AIS, которые действуют в мире. В дополнение к требованиям к перевозке в соответствии с SOLAS все большее число крупных частных яхт и рабочих судов оборудуются блоками AIS Класса А. Из различных источников получены оценки этого числа, лежащие в диапазоне от примерно 50 000 до более 80 000. Для целей настоящего исследования использована оценка, в соответствии с которой в 2005 году в мире использовалось 70 000 судов, оборудованных системой AIS Класса А.

РИСУНОК 11

Вероятность обнаружения в условиях наличия сообщений обоих Классов А и В
(Шесть спутников; 12-часовой период наблюдения)*



- 100% Класс А; 0% Класс В
- - - 50% Класс А; 50% Класс В
- . . . 10% Класс А; 90% Класс В
- . - 0% Класс А; 100% Класс В

* График, обозначенный "0% Класс А; 100% Класс В", обозначает гипотетический случай ограничений, когда целью является одноединственное судно Класса А, а все остальные суда имеют Класс В.

Отч. 2084-11

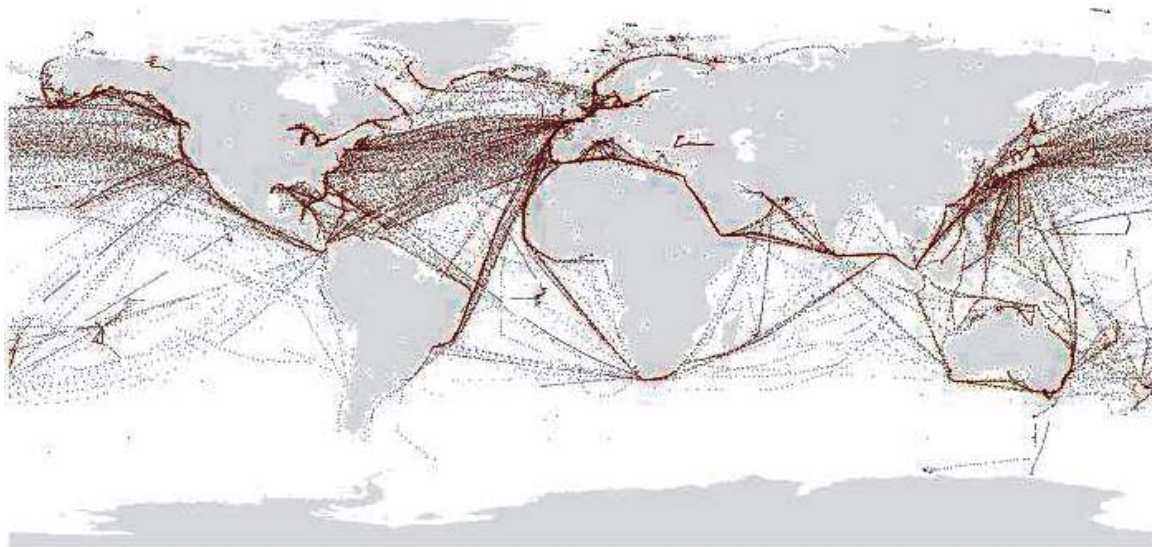
Достаточно очевидно, что местонахождение целевого судна сильно влияет на вероятность обнаружения. Например, судно, находящееся далеко от интенсивно используемых морских путей, может быть обнаружено почти со 100% точностью. И совершенно иная ситуация будет для судна, находящегося вблизи областей, используемых более интенсивно. В настоящем исследовании использовалось целевое судно, находящееся в четырех произвольных местах: были выбраны две точки в 1000 км от берега – от городов Нью-Йорк и Лос-Анджелес в Соединенных Штатах Америки, одна точка вблизи центра Мексиканского залива и одна – в середине Атлантического океана.

Описание географического распределения судов – это нечто более сложное. Одно полезное представление всемирной плотности судов может быть получено из данных о добровольных наблюдениях за погодой, отчеты о которых передаются с судов, находящихся в море. Доступный набор данных на октябрь 2004 года содержит более 80 000 отчетов о наблюдениях за погодой, в которых имеются данные о широте/долготе, полученные приблизительно от 800 судов. Это распределение показано на рисунке 12. Как можно видеть из этих данных, плотность судов, как и следовало ожидать, существенно выше в прибрежных регионах и на основных морских путях и относительно ниже в районах открытого океана. Предполагается, что относительное распределение мест нахождения судов в этих данных дает представление о местах нахождения судов Класса А по всему миру. Это распределение не дает адекватного представления о будущем распределении судов Класса В, поскольку они, как ожидается, будут находиться вблизи прибрежных регионов.

РИСУНОК 12

Пример всемирного распределения судов Класса А

Местоположения судов, ведущих добровольное наблюдение за погодой
Октябрь 2004 г.



Отч. 2084-12

Используя эту базу данных можно сделать первый шаг в исследовании обнаружения судов Класса А с использованием более реалистичного распределения судов по всему миру.

Анализ неоднородного распределения судов может быть выполнен с использованием этих данных и процесса моделирования Монте-Карло аналогично процессу, который описан выше, со следующими дополнительными изменениями:

- Используется случайный набор мест нахождения судов, содержащийся в данных наблюдения за погодой, а не равномерное распределение мест нахождения в пределах зоны покрытия спутникового луча.
- Местоположение спутника меняется пошагово вдоль типовой спутниковой орбиты, проходящей над целевым судном в соответствии с предполагаемыми параметрами спутниковой орбиты.

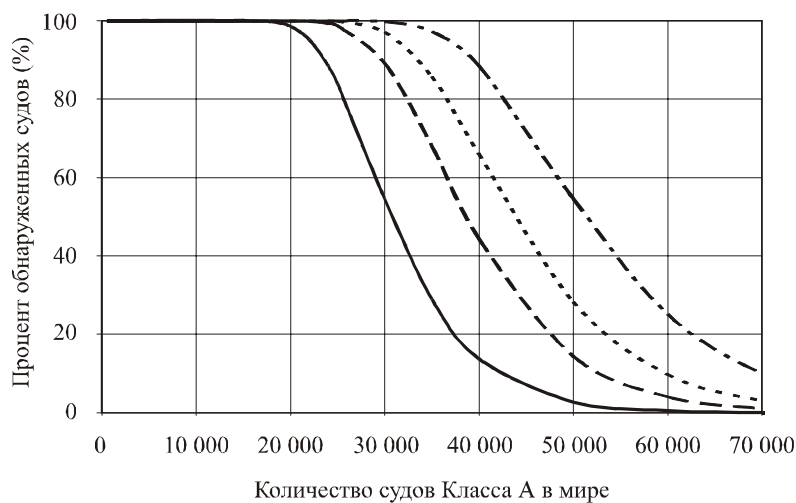
На рисунках с 13 по 16 показана результирующая вероятность обнаружения судна Класса А как функция от числа существующих во всем мире судов, оборудованных системой AIS Класса А, для четырех указанных ранее испытательных точек. Отметим изменение абсциссы – на ней отложено общее число существующих во всем мире судов, оборудованных системой AIS Класса А.

8 Методы – кандидаты для повышения пропускной способности спутника

Представленные здесь результаты анализа демонстрируют техническую возможность и ограниченность пропускной способности при использовании системы обнаружения сообщений AIS с помощью спутников для обеспечения возможности контроля передвижения судов на больших расстояниях. Используя различные сценарии спутниковых группировок и оценки всемирной плотности судов, оборудованных системой AIS Класса А, в настоящем исследовании предполагается, что плотность судов в определенных географических областях, особенно в Северной Атлантике, может превышать проектируемые значения пропускной способности спутника для обработки данных о судах. Были предприняты дальнейшие исследования для изучения различных концепций и методов увеличения пропускной способности спутниковой системы AIS, для того чтобы лучше учесть эти ожидаемые большие значения плотности судов. Для изучения этих различных методов обычно достаточно и более удобно рассматривать проблему с точки зрения равномерного распределения судов. Повышение пропускной способности с применением всемирной базы данных судов, вероятно, будет в процентном исчислении очень похоже на результаты, полученные здесь с использованием равномерного распределения судов. Ниже описано четыре возможных метода.

РИСУНОК 13

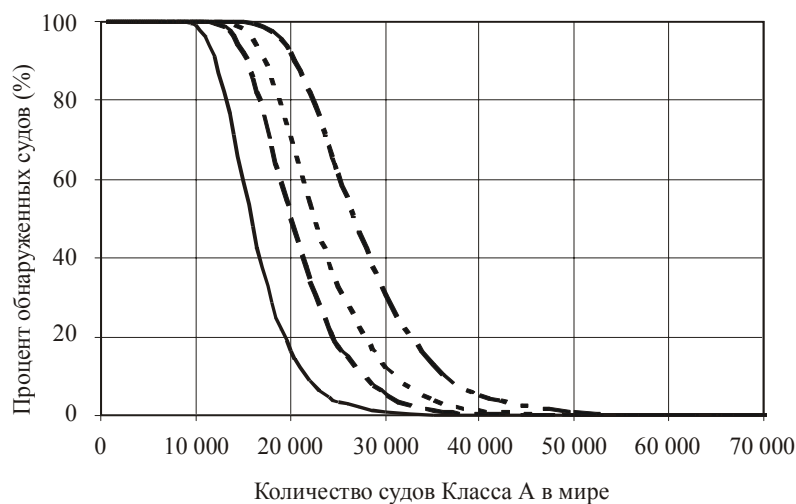
Статистические параметры обнаружения с использованием всемирных данных о судах (Целевое судно располагалось в 1000 км от побережья Лос-Анджелеса, Калифорния, США)



- Один спутник; один пролет спутника
 - - - Один спутник; 12 часов наблюдений
 - · · · · Шесть спутников; 4 часа наблюдений
 - · - · Шесть спутников; 12 часов наблюдений
- Отч. 2084-13

РИСУНОК 14

Статистические параметры обнаружения с использованием всемирных данных о судах (Целевое судно располагалось в 1000 км от побережья Нью-Йорка, Нью-Йорк, США)



- Один спутник; один пролет спутника
 - - - Один спутник; 12 часов наблюдений
 - · · · · Шесть спутников; 4 часа наблюдений
 - · - · Шесть спутников; 12 часов наблюдений
- Отч. 2084-14

РИСУНОК 15

Статистические параметры обнаружения с использованием всемирных данных о судах
(Целевое судно располагалось в Мексиканском заливе)

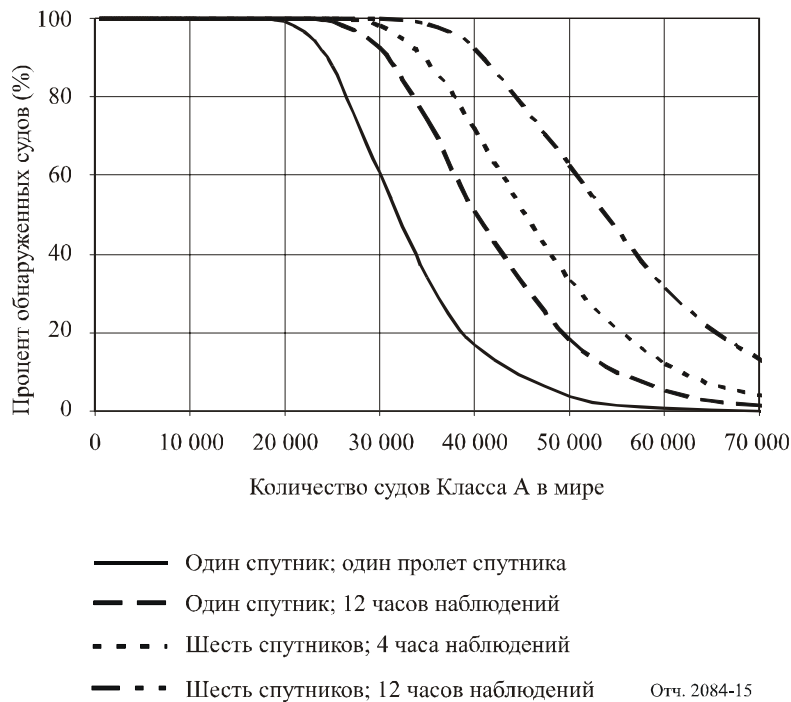
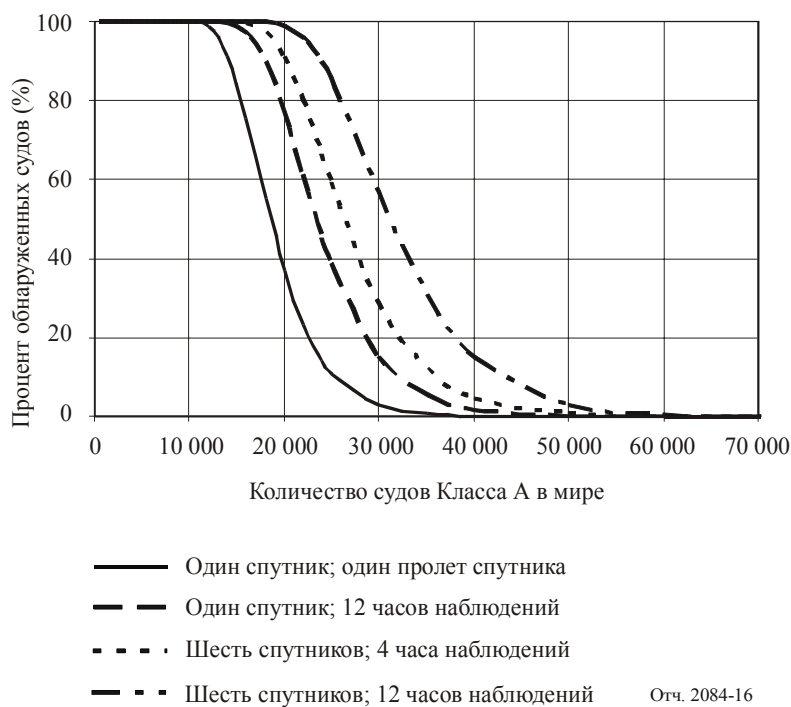


РИСУНОК 16

Статистические параметры обнаружения с использованием всемирных данных о судах
(Целевое судно располагалось в середине Атлантического океана)



8.1 Спутниковая антенна

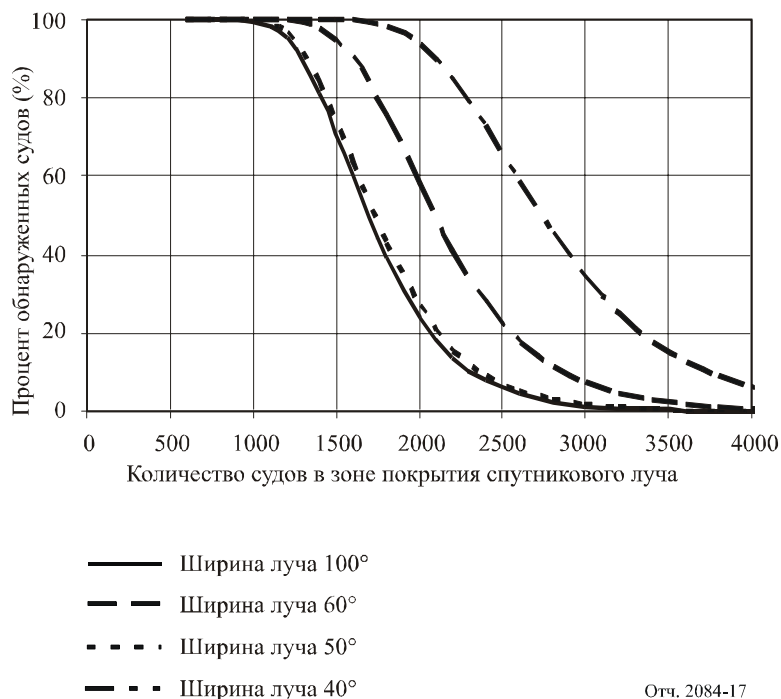
Спутниковая антенна системы AIS, использование которой предполагается в настоящем исследовании, – это антенна с широким лучом (ширина луча 100°), пиковое усиление которой направлено в подспутниковую точку. Была исследована возможность применения антенны с меньшей шириной луча, для того чтобы определить, может ли использование такой антенны обеспечить эффективное увеличение пропускной способности спутника. Уменьшение ширины луча антенны уменьшает количество конкурирующих сообщений судовых AIS на спутнике в любой данный момент времени. Меньшее число сообщений AIS, в свою очередь, повышает вероятность обнаружения, эффективно увеличивая пропускную способность спутника.

Однако имеется два фактора, которые имеют тенденцию снижать возможный прирост пропускной способности спутника. Во-первых, даже несмотря на то что ширина луча по уровню –3 дБ уменьшена, усиление в боковых лепестках в направлении на горизонт может оставаться достаточным для обнаружения конкурирующих судовых сообщений AIS на линии горизонта или вблизи нее. Во-вторых, при меньшей зоне покрытия спутникового луча спутник будет виден с данного целевого судна в течение более короткого периода времени. Из уравнений, приведенных в § 5, видно, что более короткий период времени видимости спутника приводит к уменьшению пропускной способности спутника.

На рисунке 17 показан совокупный эффект этих трех конкурирующих факторов. Как показано, уменьшение ширины луча антенны до 60° или менее увеличивает пропускную способность спутника. Это увеличение пропускной способности спутника, однако, может привести к повышению его стоимости, поскольку для создания меньшей зоны покрытия спутникового луча, по определению, требуется спутниковая антенна большего размера, которая может быть несовместима с концепцией малого LEO спутника.

РИСУНОК 17

Статистические параметры обнаружения для различных значений ширины луча спутниковой антенны
(Один спутник; сценарий с одним пролетом)



8.2 Система сопровождения сдвига Доплера

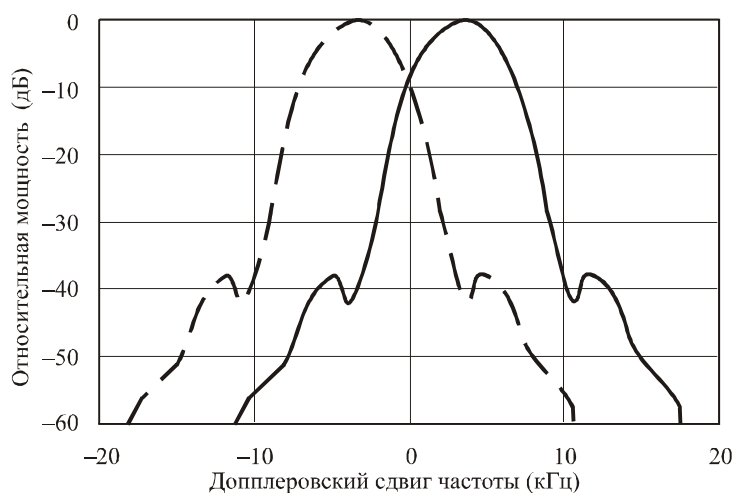
Один из подходов, который реализуется в первом демонстрационном спутнике, заключается в использовании Доплеровского сопровождения. Из-за сдвигов Доплера величиной до $\pm 3,5$, которые возникают в результате движения спутника, ширина полосы спутникового приемника системы AIS должна изначально быть шире, чем оптимальная полоса для модуляции GMSK (Гауссовской минимальной манипуляции). Хотя более широкая полоса частот позволяет принимать полезный

сигнал AIS в любых условиях сдвигов Допплера, она также позволяет принимать в том же канале сигналы AIS всех конкурирующих судов в любых условиях сдвигов Допплера.

Комбинация автоматического сопровождения сдвигов Допплера в полезном сигнале AIS и соответствующая регулировка частоты позволяет использовать приемники с более узкой шириной полосы и, следовательно, обеспечивает некоторую степень развязки с другими сигналами AIS конкурирующих судов, имеющими другие сдвиги Допплера. Хотя нет необходимости описывать здесь подробности методов Допплеровского сопровождения, можно оценить результирующий выигрыш в пропускной способности спутника. На рисунке 18 показаны типичные спектры излучения двух сигналов GMSK со скоростью передачи 9,6 кбит/с, один из которых является полезным сигналом AIS, а другой – конкурирующим сигналом AIS с другим сдвигом Допплера. В результате действия сдвига Допплера сигнал AIS оказывается размещен на 3,5 кГц ниже номинального значения центральной частоты, а мешающий сигнал под действием сдвига Допплера оказывается размещен на 3,5 кГц выше центральной частоты. Следовательно, разница между центральными частотами этих двух сигналов составляет 7 кГц. Именно это различие величин сдвига Допплера дает возможность развязки с конкурирующими сообщениями AIS других судов.

РИСУНОК 18

Полезный и мешающий сигналы AIS с максимальными сдвигами Допплера



Отч. 2084-18

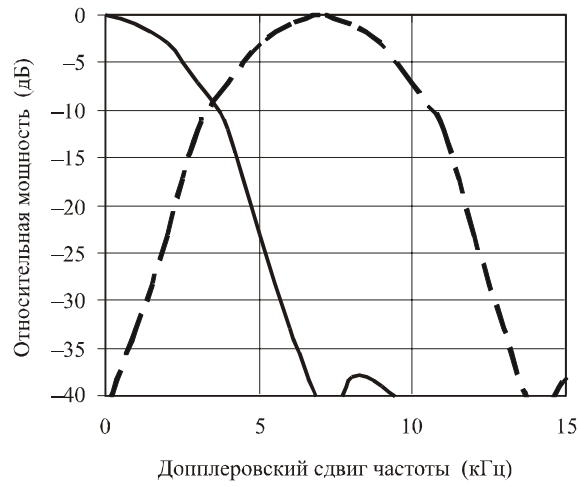
За счет использования сопровождения сдвига Допплера для данного полезного сигнала можно в реальном времени скомпенсировать Допплеровский сдвиг частоты. На рисунке 19 на низких частотах показан тот же пример, что и выше, для которого сдвиг Допплера полезного сигнала определен и скомпенсирован, а также показан мешающий сигнал, который сдвинут по частоте на разницу значений сдвига, а настоящим примере – на 7 кГц.

Пропуская вышеприведенный сигнал через узкополосный фильтр нижних частот, можно добиться существенного уменьшения уровня мешающего сигнала. Однако вышеприведенный пример представляет собой наилучший случай с самой большой разницей в сдвигах Допплера. На основе данных о распределении судов, ожидается, что различие в сдвигах Допплера составит около 2,7 кГц. На рисунке 20 показана результирующая развязка по сдвигам Допплера как функция от различия сдвигов Допплера, которая была получена на прототипе системы.

Для того чтобы оценить эффективность этого метода, требуется применить метод имитационного анализа. Ранее описанная имитационная модель еще более расширяется так, чтобы включить в свой состав расчет Допплеровского сдвига частоты для полезного сигнала AIS и для каждого мешающего сигнала AIS, а также соответствующий уровень мощности понижается на величину, показанную на рисунке 20 для одного пролета спутника. Результаты показаны на рисунке 21.

РИСУНОК 19

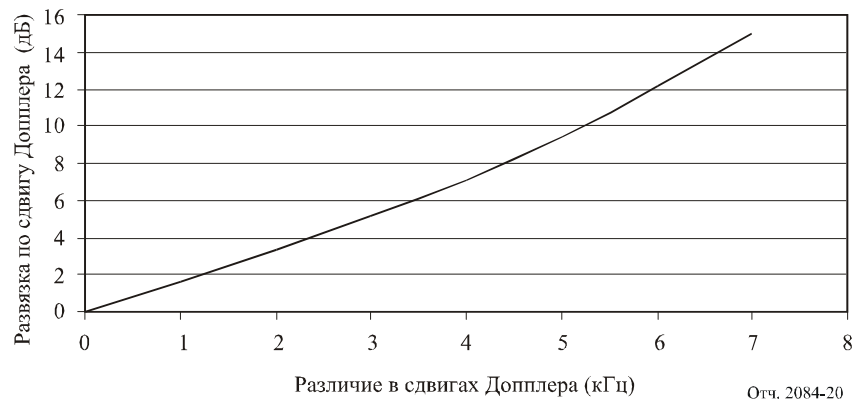
Полезный и мешающий сигналы AIS на низких частотах после компенсации сдвига Доплера



— Излучение полезного сигнала
 - - - Излучение мешающего сигнала
 Отч. 2084-19

РИСУНОК 20

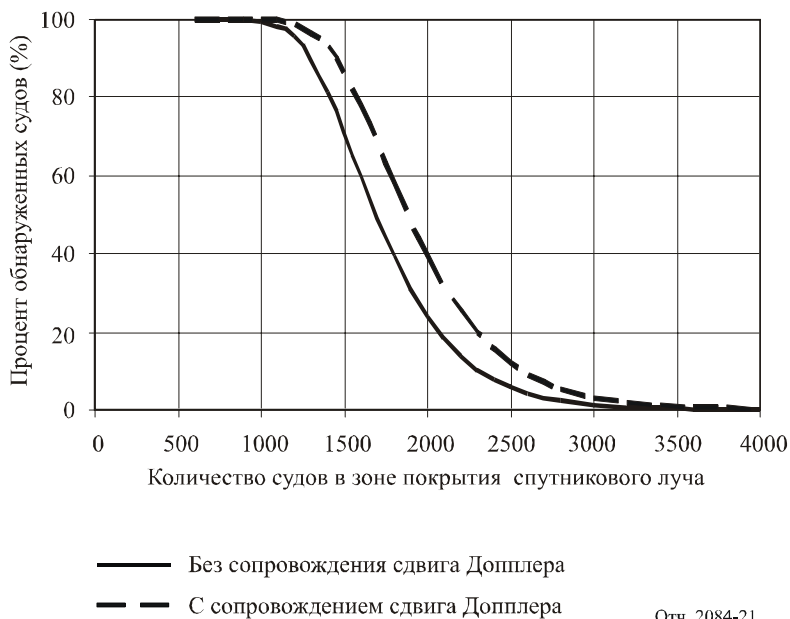
Развязка по сдвигу Доплера после узкополосной фильтрации



Отч. 2084-20

РИСУНОК 21

Статистические параметры обнаружения с помощью спутников с сопровождением сдвига Допплера



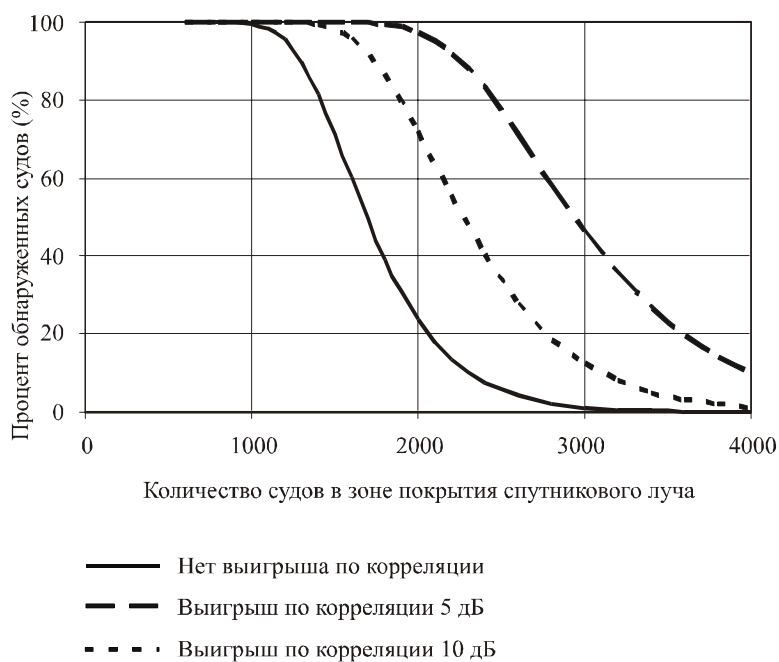
8.3 Корреляционная обработка

Еще один возможный метод улучшения пропускной способности спутника потребует модификации архитектуры спутника для выполнения обработки на борту или для непрерывной передачи на землю данных, полученных в двух каналах AIS, для их обработки на земной станции. Этот метод будет использовать то преимущество, что сообщения AIS, переданные с данного судна, имеют высокую степень корреляции друг с другом. Например, в течение 13-минутного периода видимости, характерного для типичного пролета спутника над целью, данное судно передаст примерно 116 сообщений AIS. Во время этого периода примерно 60% битов будут в точности повторяться в каждом из этих сообщений судовой AIS. В частности, в каждом сообщении повторяется идентификационный код судна MMSI. Путем непрерывного сравнения двух принимаемых сигналов AIS с цифровыми копиями этих сигналов, принятыми во время предыдущего 13-минутного периода видимости, можно достичь некоторого выигрыша от корреляции. Учитывая сравнительно низкие скорости передачи данных в AIS, может быть возможным применение методов коррелятора с массовым параллелизмом для обеспечения непрерывной обработки в реальном времени данных, принятых на линии космос-Земля.

Хотя для определения выигрыша по корреляции, достижимого с применением этого метода, могут потребоваться дополнительные исследования, эффект его влияния на пропускную способность системы обнаружения сообщений AIS можно оценить с помощью спутников. Любой выигрыш по корреляции для полезного сигнала AIS приводит к тому, что с использованием этого метода будет обеспечиваться, в единицах дБ-на-дБ, развязка с другими мешающими сообщениями AIS. Результатом такой развязки будет возможность успешного обнаружения сообщения при меньших отношениях D/U, чем было бы возможно в ином случае, что заметно снижает критерии защиты D/U относительно опорного значения 10 дБ. Используя описанную ранее имитационную модель обнаружения AIS, можно определить влияние изменения критериев защиты D/U на вероятность обнаружения. На рисунке 21а) показано сравнение статистических показателей, полученных при выигрыше по корреляции 5 и 10 дБ, с опорным графиком без корреляционной обработки для одного пролета спутника.

РИСУНОК 21a

Статистические параметры обнаружения сообщений AIS с помощью спутников с корреляционной обработкой



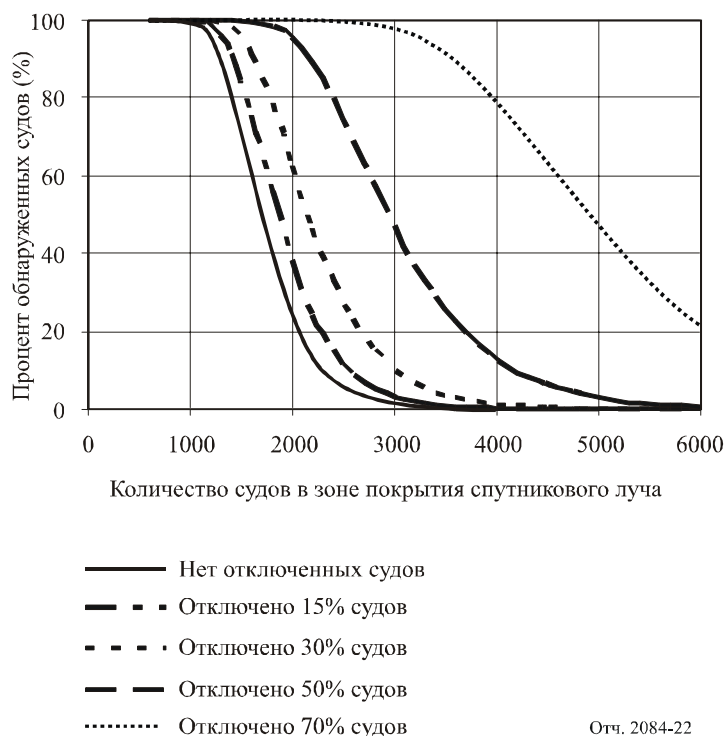
Отч. 2084-21

8.4 Разгрузка от трафика судов, находящихся вблизи побережья

Архитектура системы AIS предоставляет возможность системе AIS береговой станции дать команду судам, находящимся в зоне ее связи, автоматически перевести один из каналов AIS на другую частоту, находящуюся в полосе ОВЧ морской связи. Переключение частоты незаметно для оператора судна и оказывает минимальное влияние на обычные функции связи AIS судно-судно и судно-берег. Использование этого возможного режима работы в сильно загруженных прибрежных областях уменьшит нагрузку на систему обнаружения сообщений AIS с помощью спутников, создаваемую трафиком судов, находящихся вблизи побережья. Следовательно, может быть улучшена вероятность обнаружения с помощью спутников сообщений AIS от судов, находящихся в море. Для проверки этой концепции можно модифицировать данные о береговых станциях в базе данных о распределении судов, определенной ранее на рисунке 12, так, чтобы у них работал бы только канал AIS 1, и выполнить повторный анализ на основе имитационного моделирования. Однако идентификация и модификация судов, находящихся вблизи побережья, в базе данных, содержащей 80 000 записей, является сложной задачей. Отмечено, что из-за очень большой зоны покрытия спутникового луча и рандомизации влияния движения спутника простое изменение того же числа судов из базы данных, а не только судов, находящихся вблизи побережья, приводит практически к такому же результату. На рисунке 22 показаны результирующие вероятности обнаружения, полученные с использованием одного и того же описанного ранее неоднородного распределения судов с различными объемами отключения трафика в канале AIS 2 во время одного пролета спутника. Этот диапазон значений будет учитывать ситуацию, когда команду уйти из канала AIS 2 в альтернативный канал получают только суда вблизи крупных портовых областей, и ситуацию, когда переключаются все суда вблизи берега.

РИСУНОК 22

Статистические параметры обнаружения сообщений AIS с помощью спутников с отключением из канала AIS 2 трафика судов, находящихся вблизи побережья



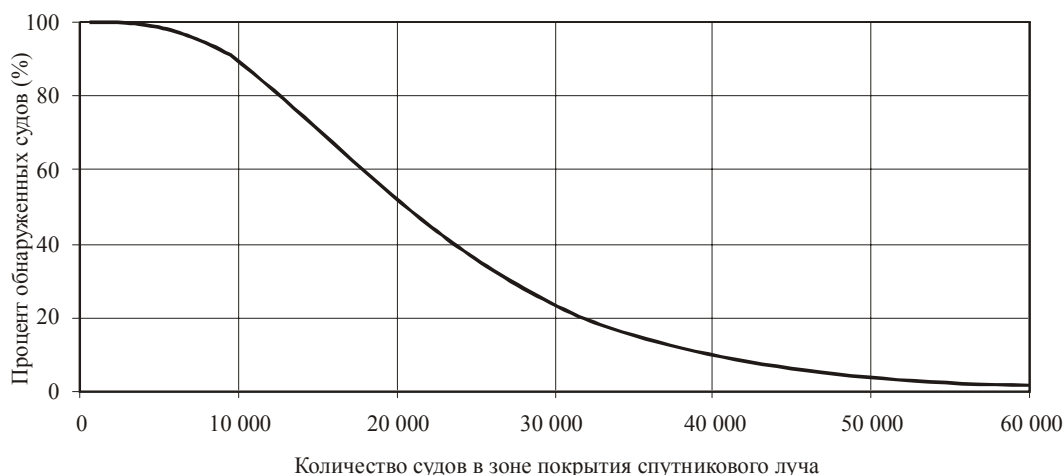
8.5 Долгосрочные исследования/решения

В долгосрочной перспективе может быть практичным одновременно реализовать несколько вышеописанных методов, для того чтобы еще более улучшить обнаружение с помощью спутников.

В качестве альтернативы долговременным исследованиям ИМО вводит возможность использования третьего канала AIS, в котором структура сообщений оптимизирована для работы обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Эта концепция еще не окончательно сформирована в том, что касается возможной полосы частот для работы или конкретного канала, используемого для варианта с третьей частотой. При определении возможных полос частот или каналов для работы и возможности развертывания спутниковой системы AIS в любой заданной полосе частот или канале должна учитываться помеховая обстановка, создаваемая в этих полосах существующими службами. Вне зависимости от рабочей полосы частот пропускную способность спутника может существенно увеличить, если применять более короткие сообщения и более продолжительные периоды передачи. Например, расчеты с использованием описанного ранее аналитического метода показывают, что сообщение длиной 128 битов, передаваемые с интервалом продолжительностью 3 минуты, могут увеличить пропускную способность спутника до более 10 000 судов в зоне покрытия спутникового луча, как показано на рисунке 23. Этот вариант потребует модификации установленной базы и будущих установок судового оборудования AIS.

РИСУНОК 23

Пример спутника с третьим каналом AIS



Отч. 2084-23

9 Совместимость с другими традиционными системами фиксированной и подвижной связи

Две частоты, которые назначены в качестве каналов морской подвижной службы для функционирования наземной системы AIS, не распределены ей на исключительной основе. Эти каналы и соседние каналы распределены и используются в различных регионах мира для других применений подвижной службы, включая ОБЧ станции общественной корреспонденции (VPCS) морской подвижной службы и системы сухопутной подвижной радиосвязи (LMR). Станции VPCS продолжают развиваться в определенных географических районах в ограниченных количествах вдоль прибрежных районов. Большинство администраций приняли решение присваивать эти частоты станциям LMR, которые находятся на достаточном расстоянии от прибрежных районов и судоходных водных путей, для гарантии взаимной совместимости между морской подвижной и сухопутной подвижной службами. Однако, поскольку луч спутниковой антенны охватывает большие географические области, передачи систем подвижной связи, работающих на территориях, удалённых от моря, могут приниматься на спутнике.

Доступные данные о частотных присвоениях показывают, что плотность размещения существующих систем LMR в этих каналах AIS меньше, чем в других каналах полосы 156–162 МГц и она намного ниже плотности, типичной для других частот ОБЧ, распределенных сухопутной подвижной службе.

В следующих разделах описываются качественные показатели обнаружения сообщений AIS с помощью спутников при работе в совпадающих или соседних каналах с системами подвижной связи. В этом исследовании сначала будут рассмотрены простые сценарии с использованием равномерного распределения судов, а затем будет приведено несколько примеров с использованием более реального неоднородного распределения судов, которое было описано ранее.

9.1 Системы подвижной связи в совпадающем канале

Первым шагом исследования совместной работы спутниковой системы AIS с системами подвижной связи является определение технических параметров систем LMR и VPCS. В таблице 10 перечислены типовые технические параметры систем LMR и VPCS. Как видно из этой таблицы, и системы VPCS, и системы LMR могут, как правило, использовать эффективную излучаемую мощность (э.и.м.) на 14 дБ больше, чем судовые передатчики AIS, использующие эти частоты совместно с ними. Эти различия в э.и.м. не представляют проблем для совместимости между двумя наземными службами, если между ними имеется достаточное пространственное разнесение. Однако это совсем не так для обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Как сказано ранее, для спутника LEO зона покрытия спутникового луча на поверхности Земли может иметь радиус около 3281 км. Ежедневно в течение некоторых периодов времени системы подвижной связи, работающие в совпадающем канале и попадающие в этот радиус, будут иметь прямую видимость со спутником.

ТАБЛИЦА 9

Типовые технические параметры систем VPCS и LMR

| Параметр | Станция сухопутной подвижной связи (широкополосная) | Станция сухопутной подвижной связи (узкополосная) | ОВЧ береговая станция общественной корреспонденции |
|----------------------------------|---|---|--|
| Передаваемая э.и.м. | От 37 до 56 дБм (типичное значение 54 дБм) | От 37 до 56 дБм (типичное значение 54 дБм) | 50 дБм |
| Модуляция | 16F3E | 11F3E | 16F3E |
| Сетка частот | 25 кГц | 12,5 кГц | 25 кГц |
| Коэффициент усиления антенны | От 0 до 9 дБд (типичное значение 6 дБд) | От 0 до 9 дБд (типичное значение 6 дБд) | |
| Диаграмма направленности антенны | Всенаправленная | Всенаправленная | Всенаправленная |

Учитывая, что у типовых систем подвижной связи значения э.и.м. более высокие, иногда могут получаться отрицательные значения отношений полезного и мешающего (D/U) сигналов от одной-единственной станции VPCS или LMR, находящейся внутри зоны покрытия спутникового луча. Предварительные исследования показывают, что значения D/U во время существования прямой видимости для типового сценария могут, вероятно, меняться от -17 дБ до $+5$ дБ и иметь среднее значение -6 дБ, причем все они оказываются ниже номинального порога D/U для практического обнаружения сигналов AIS⁵. Среднее значение $D/U = -6$ дБ, рассчитанное в ходе настоящего исследования, согласуется с более высоким значением (на 6 дБ выше) эффективной изотропно-излучаемой мощности (э.и.м.), используемым в настоящем исследовании для передатчика системы подвижной связи по сравнению с судовым передатчиком AIS. В таблице 10 приведен пример расчетов из настоящего исследования для двух пролетов спутника, типового передатчика LMR, находящегося в центральной части Соединенных Штатов Америки, и судна, оборудованного системой AIS, находящегося в Атлантическом океане. Если бы эти передатчики подвижной службы, ведущие передачи в совпадающем канале, должны были работать с рабочим циклом 100%, то был бы сразу сделан предварительный вывод о том, что система обнаружения сообщений AIS с помощью спутников несовместима с другими применениями подвижной службы, работающими в совпадающем канале.

⁵ Для этого исследования была использована следующая упрощенная методика: э.и.м. подвижной службы является постоянной и равна 50 дБм в верхнем полушарии; э.и.м. судовой AIS является постоянной и равна 44 дБм в верхнем полушарии; спутниковая антенна имеет постоянный коэффициент усиления в направлении Земли; развязка по поляризации отсутствует; в течение периодов видимости спутника использовалось распространение в свободном пространстве.

ТАБЛИЦА 10

Примеры расчетов D/U для типовой наземной станции, находящейся в центральной части Соединенных Штатов Америки, и спутника, работающего с судном в Атлантическом океане

| Система в совпадающем канале – на спутник | | | Судно на спутник | | | |
|---|--------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|-------------|
| Азимут (градусов) | Угол места (градусов) | Дальность (км) | Азимут (градусов) | Угол места (градусов) | Дальность (км) | D/U (дБ) |
| Пролет 1 | | | | | | |
| 9,1 | 24,8 | 1 838,9 | 316,7 | 1,5 | 3 470,7 | -11,5 |
| 16,1 | 33,6 | 1 534,4 | 310,3 | 3,4 | 3 274,1 | -12,6 |
| 28,7 | 44,6 | 1 285,6 | 303,1 | 5,0 | 3 115,5 | -13,7 |
| 54,4 | 55,4 | 1 131,2 | 295,3 | 6,2 | 3 001,5 | -14,5 |
| 95,4 | 57,0 | 1 112,1 | 286,9 | 6,9 | 2 937,7 | -14,4 |
| 125,8 | 47,4 | 1 234,7 | 278,2 | 7,0 | 2 927,4 | -13,5 |
| 140,9 | 35,9 | 1 463,6 | 269,7 | 6,5 | 2 971,0 | -12,1 |
| 149,0 | 26,5 | 1 757,3 | 261,6 | 5,4 | 3 066,1 | -10,8 |
| 153,8 | 19,1 | 2 087,8 | 254,1 | 3,9 | 3 207,5 | -9,7 |
| 157,1 | 13,2 | 2 439,3 | 247,4 | 2,1 | 3 388,9 | -8,9 |
| 159,4 | 8,3 | 2 803,1 | 241,4 | 0,1 | 3 603,5 | -8,2 |
| 112,6 | 3,1 | 3 290,4 | 217,1 | 28,2 | 1 693,2 | -0,2 |
| 117,9 | 0,5 | 3 556,0 | 208,7 | 21,1 | 1 982,8 | -0,9 |
| Пролет 2 | | | | | | |
| 93,9 | 0,5 | 3 568,8 | 184,1 | 65,3 | 1 038,1 | 4,7 |
| 87,0 | 1,5 | 3 464,2 | 63,6 | 89,3 | 956,9 | 5,2 |
| 79,8 | 2,1 | 3 401,9 | 7,3 | 64,9 | 1 043,2 | 4,3 |
| 72,4 | 2,3 | 3 384,5 | 6,7 | 45,9 | 1 262,7 | 2,6 |
| 65,0 | 2,0 | 3 413,0 | 6,6 | 32,7 | 1 559,6 | 0,8 |
| 57,8 | 1,4 | 3 486,3 | 6,7 | 23,3 | 1 897,0 | -0,7 |
| 51,1 | 0,3 | 3 601,3 | 6,8 | 16,4 | 2 255,9 | -1,9 |
| 52,6 | 1,5 | 3 477,2 | 3,9 | 18,4 | 2 142,9 | -1,8 |
| 59,9 | 1,3 | 3 487,0 | 7,7 | 25,6 | 1 802,5 | -0,3 |
| 67,0 | 0,9 | 3 536,0 | 13,9 | 35,0 | 1 493,1 | 1,5 |
| 73,8 | 0,1 | 3 622,7 | 25,7 | 47,3 | 1 239,7 | 3,3 |
| 144,3 | 4,7 | 3 122,4 | 230,7 | 5,0 | 3 098,7 | -5,9 |
| 147,3 | 1,2 | 3 472,4 | 225,4 | 2,1 | 3 376,8 | -5,8 |
| 38,5 | 1,1 | 3 514,7 | 358,1 | 8,2 | 2 841,9 | -4,2 |
| 94,2 | 1,5 | 3 457,1 | 201,5 | 65,5 | 1 036,2 | 4,5 |
| 150,9 | 20,4 | 2 021,3 | 255,4 | 4,9 | 3 115,2 | -9,8 |
| 154,7 | 14,3 | 2 366,4 | 248,4 | 3,1 | 3 288,7 | -8,9 |
| 157,4 | 9,3 | 2 725,9 | 242,2 | 1,0 | 3 497,6 | -8,2 |
| 102,9 | 13,2 | 2 445,7 | 261,2 | 30,3 | 1 627,0 | -2,5 |
| 92,5 | 14,8 | 2 347,1 | 279,3 | 32,7 | 1 554,9 | -2,4 |
| 81,3 | 15,3 | 2 315,9 | 298,2 | 31,7 | 1 584,9 | -2,7 |
| 70,3 | 14,7 | 2 354,9 | 314,5 | 28,0 | 1 711,4 | -3,2 |
| 59,9 | 13,1 | 2 460,7 | 326,9 | 22,9 | 1 914,9 | -3,8 |
| 50,9 | 10,9 | 2 625,1 | 336,0 | 17,8 | 2 173,2 | -4,4 |
| 43,2 | 8,2 | 2 837,4 | 342,7 | 13,1 | 2 468,1 | -4,8 |

К счастью, большинство систем подвижной связи функционирует с рабочим циклом передачи менее 100%. На основании результатов эфирных измерений спектра, проведенных в Соединенных Штатах Америки в отдельных участках полосы 138–174 МГц, и данных из других источников передатчики подвижной службы можно разделить на три большие категории – с высоким (30–100%), средним (10–30%) и низким (<10%) рабочим циклом передачи. Примеры для каждой категории приведены в таблице 11.

ТАБЛИЦА 11

Пример рабочего цикла передачи системы подвижной связи

| Высокий рабочий цикл (30–100%) | Средний рабочий цикл (10–30%) | Низкий рабочий цикл (<10%) |
|---|---|---|
| Пейджинговые системы | Многопользовательские системы LMR офисные/производственные ретрансляторы (коллективные ретрансляторы) | Большинство однопользовательских частных систем LMR |
| Канал управления транкинговой системы | Диспетчерская связь общественной безопасности | Большинство административных и правительственных систем LMR |
| Системы радиовещательного типа (например, передача метеосводок) | Каналы связи транкинговой системы | Некоторые типы фиксированных каналов управления LMR |
| Некоторые перевозимые системы телеметрии (например, сейсмические датчики) | Рабочие каналы ОВЧ морской подвижной службы | |
| ОВЧ береговые станции общественной корреспонденции | | |
| Некоторые типы фиксированных каналов управления LMR | | |

Анализ работы передатчиков VPCS и LMR в совпадающем канале с рабочим циклом передачи менее 100% может быть выполнен способом, аналогичным ранее описанному анализу внутрисистемных качественных показателей. Как и при внутрисистемном анализе, ключевыми техническими параметрами, которые требуется рассмотреть, являются э.и.и.м. передатчика, диаграмма направленности антенны по углу места и рабочий цикл передатчика. Анализ влияния передатчиков VPCS/LMR, работающих в совпадающем канале, может быть выполнен простым добавлением в ранее описанную имитационную модель дополнительных передатчиков, использующих соответствующие значения э.и.и.м., параметры антенны и рабочего цикла. В настоящем исследовании использовалась система подвижной связи, имеющая э.и.и.м. = 50 дБм, вертикальную поляризацию и диаграмму направленности антенны по углу места, имеющую вид квадрата косинуса. Использовались параметры AIS, приведенные в таблице 5. Единственным изменением была необходимость учитывать тот факт, что системы подвижной связи работают на одной-единственной частоте, а не на двух частотах передатчиков AIS.

На рисунках с 24 по 28 показаны результаты, полученные при различных условиях для базового сценария "один спутник/один пролет". На рисунке 24 показан процент обнаруженных судов для случая, когда в зоне покрытия спутникового луча находится 1000 судов Класса А, и оба канала AIS используются системами подвижной службы, работающими в совпадающих каналах и имеющими широкий диапазон рабочих циклов передачи. На рисунке 25 показано то же самое, за исключением того, что системами подвижной службы, работающими в совпадающих каналах, используется только один канал AIS 1 или AIS 2. Рисунок 26 – это третий пример, в котором рабочие циклы и системы подвижной службы, работающие в совпадающих каналах, неравномерно распределены между каналами AIS 1 и AIS 2. Рисунок 27 – это пример, в котором спутник эффективно работает с пропускной способностью 1415 судов в основной части луча (т. е. обнаруживается 80% судов), и системы подвижной службы, работающие в совпадающих каналах, используют совместно только один канал AIS. Рисунок 28 аналогичен рисунку 27, за исключением того, что в этом сценарии используется сценарий "6 спутников/12-часовое наблюдение". В таблице 12 приведены критерии, использованные для получения рисунков с 24 по 28.

ТАБЛИЦА 12

Обзор критериев, использованных для получения рисунков с 24 по 28

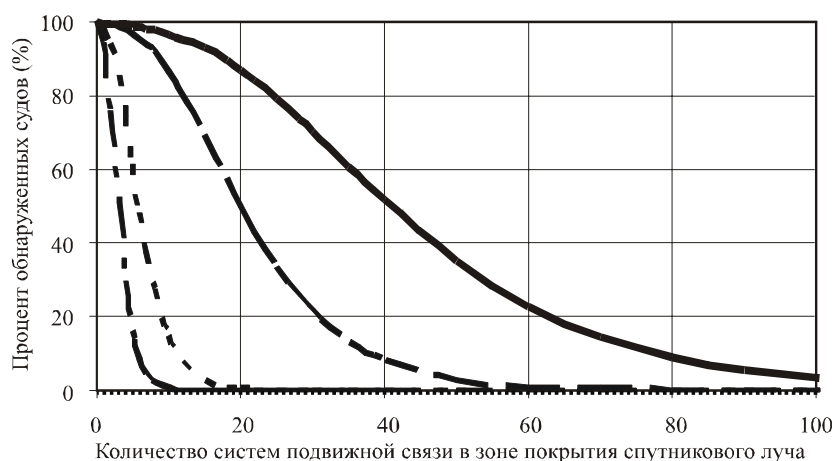
| Рис. | Число спутников | Период наблюдения | Число судов в зоне покрытия спутникового луча | Рабочий цикл системы подвижной связи в канале AIS 1 | Рабочий цикл системы подвижной связи в канале AIS 2 |
|------|-----------------|-------------------|---|---|---|
| 24 | 1 | Один пролет | 1 000 | Различные ⁽¹⁾ | Различные |
| 25 | 1 | Один пролет | 1 000 | Различные | Нет подвижных служб |
| 26 | 1 | Один пролет | 1 000 | Различные | Все 10% |
| 27 | 1 | Один пролет | 1 415 ⁽²⁾ | Различные | Нет подвижных служб |
| 28 | 6 | 12 часов | 2 381 ⁽²⁾ | Различные | Нет подвижных служб |

⁽¹⁾ Различные: все системы подвижной службы, работающие в совпадающих каналах и находящиеся в зоне покрытия спутникового луча, имеют рабочий цикл, показанный на рисунке.

⁽²⁾ Спутник имеет пропускную способность (для обнаружения 80% судов), определенную для данного сценария.

РИСУНОК 24

Статистические параметры качественных показателей обнаружения сигналов AIS с помощью спутников при наличии систем подвижной службы, работающих в совпадающих каналах (Соответствует работе в канале, совпадающем с каждым каналом AIS)



Рабочий цикл систем подвижной связи

..... 100%

- - - 50%

- · - · 30%

- - - 10%

———— 5%

Отч. 2084-24

РИСУНОК 25

Статистические параметры обнаружения сигналов AIS с помощью спутников при наличии систем подвижной службы, работающих в совпадающих каналах
(Работа в одном совпадающем канале AIS)

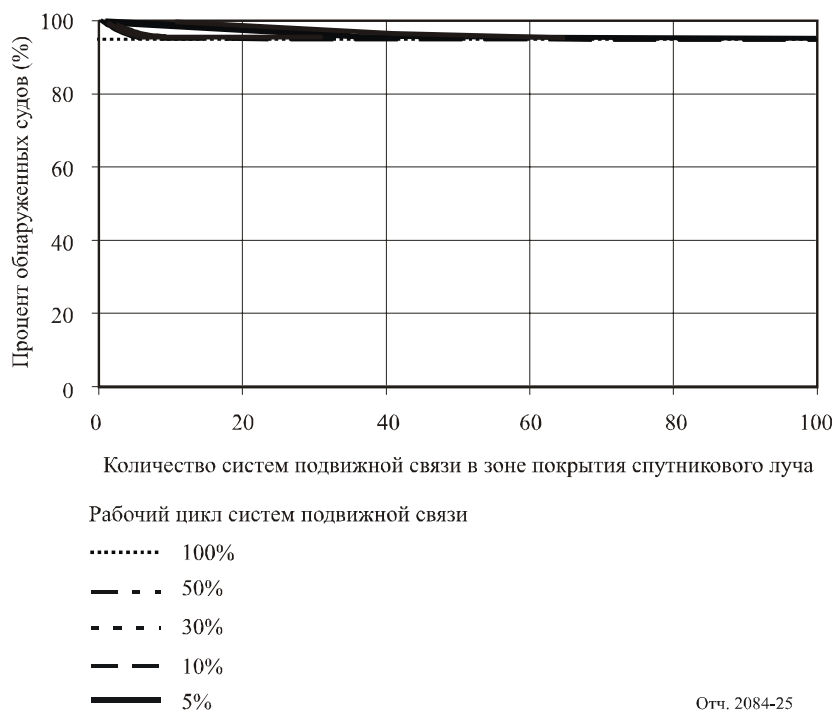


РИСУНОК 26

Качественные показатели обнаружения сигналов AIS с помощью спутников при наличии систем подвижной службы, работающих в совпадающих каналах
(Рабочий цикл 10% только для одного канала)

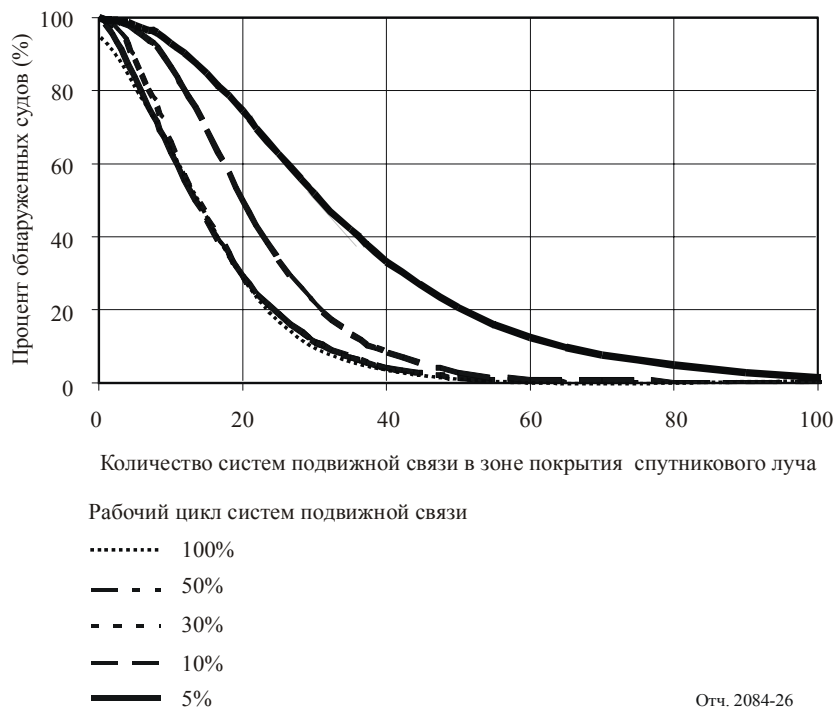


РИСУНОК 27

Качественные показатели обнаружения сигналов AIS с помощью спутников при наличии систем подвижной службы, работающих в совпадающих каналах
(Спутник работает с пропускной способностью (обнаружение 80%); работа в одном совпадающем канале AIS)

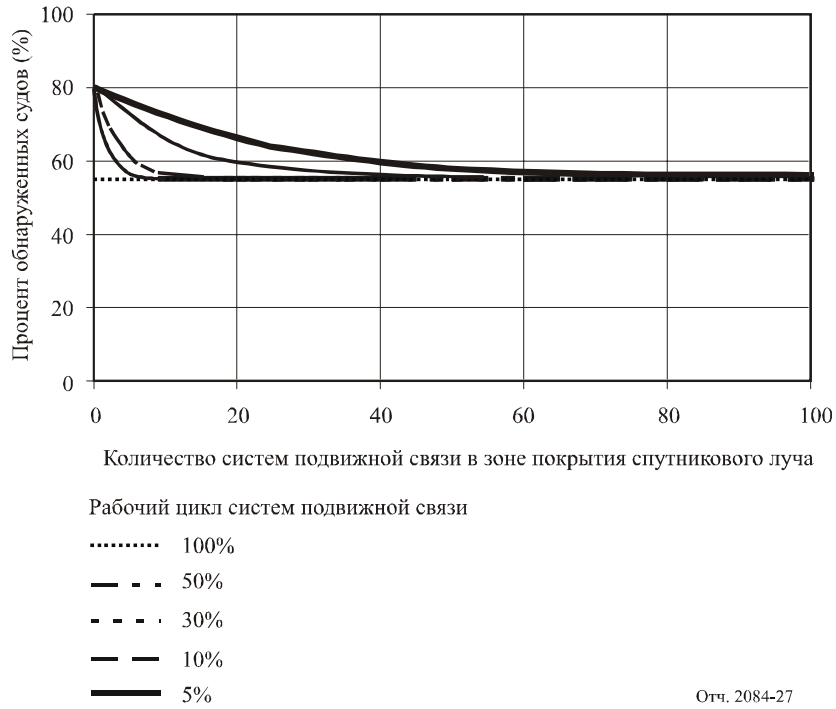
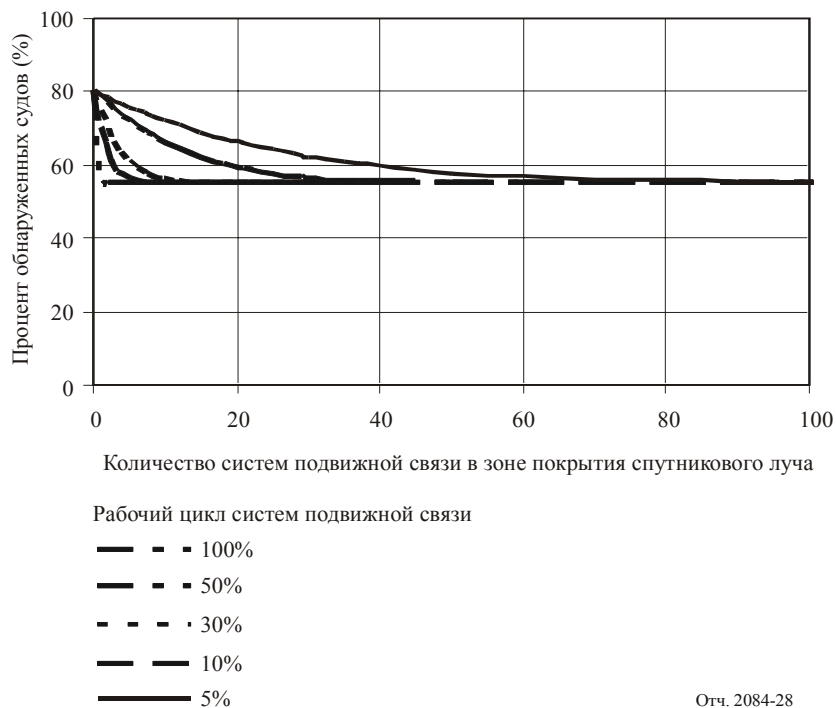


РИСУНОК 28

Качественные показатели обнаружения сигналов AIS с помощью спутников при наличии систем подвижной службы, работающих в совпадающих каналах
(Спутник работает с пропускной способностью (обнаружение 80%); работа в одном совпадающем канале AIS; сценарий с шестью спутниками)



Примеры, показанные на вышеприведенных рисунках, иллюстрируют качественные показатели обнаружения сообщений AIS с помощью спутников при различных предположениях. Из-за многомерной природы этих графиков невозможно рассмотреть все возможные условия. В некоторых администрациях сложились различные ситуации совместного использования этих двух частот, используемых для AIS. В таких ситуациях рисунки 27 и 28 показывают ограниченный случай, когда совместное использование представлено для одного канала AIS, а в другом канале система AIS работает на исключительной основе. Для обоих сценариев с одним спутником и с шестью спутниками эти два рисунка показывают, что наличие в зоне покрытия спутникового луча ограниченного числа систем подвижной службы, работающих в совпадающих каналах и имеющих низкий рабочий цикл передачи, оказывает минимальное влияние на качественные показатели обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Для случая, когда в зоне покрытия спутникового луча находится большее число систем подвижной службы, работающих в совпадающих каналах, обнаружение сообщений AIS с помощью спутников остается возможным, хотя и с меньшим процентом обнаружения судов.

9.2 Совместимость с подвижной службой по соседнему каналу

Как и для всех систем подвижной связи, необходимо также рассмотреть фактор совместного использования спектра с системами, работающими в соседних каналах. Общеизвестно, что при рассмотрении спутниковых систем необходимо учитывать существующие системы, работающие в соседних каналах, которые функционируют в соответствии с существующими требованиями к внеполосным излучениям.

В настоящем исследовании требуется рассмотреть два сценария:

Случай 1: совместимость передатчиков AIS и приемников подвижной службы, работающих в соседнем канале, и

Случай 2: совместимость передатчиков подвижной службы, работающих в соседнем канале, и спутникового приемника.

Первый случай, конечно, не является новой ситуацией, он существует вне зависимости от обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Он уже был исследован и описан в подробном отчете об измерениях и анализе, доступном для широкой общественности в Соединенных Штатах Америки⁶. В этом исследовании рассматривался наихудший случай для сигнала AIS (с интервалом передачи 2 с) и приемников систем подвижной связи, работающих как в режиме с аналоговой модуляцией передачи голоса (ЧМ), так и в режиме цифровой передачи данных. В исследовании сделан вывод о том, что в режиме ЧМ передачи голоса с разносом по частоте на 25 кГц и с антеннами, расположенными на расстоянии 3 м друг от друга, ухудшение качественных показателей было минимальным и не препятствовало нормальной работе системы подвижной связи. Далее в исследовании сделан вывод о том, что для обеспечения совместимости в приемнике системы подвижной связи, когда он работает в режиме цифровой передачи данных, необходимо применять упреждающую коррекцию ошибок. Эти результаты могут быть применены для любой пары соседних каналов на любой частоте в пределах полосы 156–162,025 МГц морской подвижной службы.

Второй случай специфичен для обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Как в случае работы в совпадающих каналах, другие системы подвижной связи также будут работать в каналах, соседних с каналами, используемыми системой AIS. Три канала являются соседними для AIS 1 и AIS 2. Это – 161,950, 162,000 и 162,050 МГц. Изучение соседних каналов вводит в исследование дополнительные параметры, а именно, распределение систем подвижной связи в этих пяти каналах и возможная степень подавления помех соседнего канала в спутниковом приемнике. Основной целью этого изучения соседнего канала является выделение специфического воздействия систем подвижной связи, работающих в соседнем канале, на обнаружение сообщений AIS с помощью спутников.

⁶ Робертс, Марвин С., и др. [февраль 2004 г.] Анализ ЭМС систем EMC Универсальной автоматической идентификационной системы и системы общественной корреспонденции в ОБЧ полосе морской подвижной службы. Совместный центр исследований спектра, Аннаполис, Мэриленд, США.

Подавление помех от соседнего канала: Для того чтобы выполнить требования соответствующих спецификаций МЭК, требуется, чтобы обычные судовые приемники AIS обеспечивали подавление помех от соседнего канала, как минимум, на 70 дБ. Однако приемник спутниковой системы AIS должен быть оптимизирован по максимальной чувствительности и может не иметь возможности обеспечить такой уровень качественных показателей по соседнему каналу. В настоящем исследовании рассматриваются значения подавления помех от соседнего канала, равные 30 дБ, 40 дБ и 50 дБ.

Распределение систем подвижной связи: Поскольку различные администрации могут использовать рассматриваемые здесь пять каналов в системах подвижной связи различными способами, количество систем подвижной связи, работающих в каждом из пяти каналов, в различных географических регионах может меняться в широком диапазоне. Однако в настоящем исследовании не предусмотрено изучение характера использования различных систем подвижной связи в трех соседних каналах. В настоящем исследовании предполагается, что количество систем подвижной связи, работающих в каналах, являющихся соседними по отношению к каналам AIS и находящихся в зоне покрытия спутникового луча, для всех трех каналов одинаково.

Географическое распределение судов, оборудованных системой AIS: Из-за многомерной природы рассматриваемых вопросов ниже рассмотрены случаи только для одной плотности судов, а именно 1000 судов Класса А, оборудованных системой AIS и равномерно распределенных в зоне покрытия спутникового луча.

Результаты: С использованием описанной ранее имитационной модели было исследовано изменение качественных показателей обнаружения сообщений AIS с помощью спутников под воздействием систем подвижной связи, работающих в соседних каналах. Использовалась следующая методика анализа – уменьшение мощности передатчика подвижной связи, работающего соседнем канале, на величину, равную указанному значению подавления помех по соседнему каналу на спутниковом приемнике, дБ на дБ. В таблице 13 перечислены результаты анализа в процентах обнаруженных судов как функции от различных параметров. В этой таблице максимальное число исследованных передатчиков подвижной связи в каждом соседнем канале было равно 240, и максимальный использованный рабочий цикл передачи составлял 30%.

ТАБЛИЦА 13

Результаты исследований для соседнего канала*

| Количество судов | Количество систем подвижной связи на частотах AIS 1 и 2 | Количество систем подвижной связи, работающих в соседних каналах ⁽¹⁾ | Рабочий цикл систем подвижной связи | Подавление помех от соседнего канала | Процент обнаруженных судов |
|------------------|---|---|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 000 | 0 | 0 | – | – | 100% |
| 1 000 | 0 | 40 | 5% | 30 дБ | 100% |
| 1 000 | 0 | 80 | 5% | 30 дБ | 97% |
| 1 000 | 0 | 160 | 5% | 30 дБ | 70% |
| 1 000 | 0 | 240 | 5% | 30 дБ | 15% |
| 1 000 | 0 | 20 | 10% | 30 дБ | 100% |
| 1 000 | 0 | 40 | 10% | 30 дБ | 90% |
| 1 000 | 0 | 80 | 10% | 30 дБ | 60% |
| 1 000 | 0 | 160 | 10% | 30 дБ | 0% |
| 1 000 | 0 | TBD | 30% | 30 дБ | Требуется определить |
| 1 000 | 0 | TBD | 30% | 30 дБ | Требуется определить |
| 1 000 | 0 | 240 | 5% | 40 дБ | 100% |
| 1 000 | 0 | 240 | 10% | 40 дБ | 100% |
| 1 000 | 0 | 160 | 30% | 40 дБ | 100% |
| 1 000 | 0 | 240 | 30% | 40 дБ | 80% |
| 1 000 | 0 | 240 | 30% | 50 дБ | 100% |

* Во всех рассмотренных случаях предполагается равномерное географическое распределение судов, оборудованных системой AIS, и систем подвижной связи, расположенных в области покрытия луча спутниковой антенны.

⁽¹⁾ Количество систем подвижной связи в каждом из трех каналов, соседних для каналов AIS 1 и AIS 2.

Как и ожидалось, результаты анализа показывают, что качественные показатели обнаружения сообщений AIS с помощью спутников в присутствии систем подвижной связи, сосуществующих в соседних каналах, сильно зависят от степени подавления помех от соседнего канала, достижимой на спутниковом приемнике, и от рабочего цикла передачи систем подвижной связи. Анализ показывает, что при подавлении помех от соседнего канала только на 30 дБ качественные показатели обнаружения сообщений AIS с помощью спутников могут ухудшиться даже при наличии умеренного числа систем подвижной связи, сосуществующих в соседних каналах. При подавлении помех от соседнего канала на 40 дБ обнаружение сообщений AIS с помощью спутников становится намного более устойчивым к воздействию помех от систем подвижной связи, сосуществующих в соседних каналах. При подавлении помех от соседнего канала на 50 дБ не обнаружено никакого снижения качественных показателей в пределах исследуемого диапазона значения параметров.

10 Вывод

В настоящем Отчете вводится концепция обнаружения сообщений AIS с помощью спутников для современной наземной системы AIS и показана, при заданном наборе предположений, техническая реализуемость и пропускная способность спутниковых приемников AIS, которые должны будут работать в условиях наличия большого числа судов, оборудованных системой AIS. Рассмотрено пять сценариев, в которых определено число спутников, оборудованных системой AIS (1 и 6 спутников) и период времени, допустимый для обновления данных о месте нахождения судна (от одного пролета спутника до 12 часов). Пропускная способность спутников (определенная для обнаружения 80% судов) для этих сценариев лежит в диапазоне от 1415 до 2380. Анализ, выполненный с использованием типового всемирного распределения судов, оборудованных системой AIS, показал, что следует ожидать, что плотности судов во многих регионах мира будут превышать рассчитанные пределы пропускной способности системы AIS.

Исследованы четыре возможных метода увеличения пропускной способности спутника, которые по отдельности демонстрируют повышение пропускной способности на величину до 175%.

В этом исследовании изучена работа в совпадающих каналах систем AIS и других систем подвижной связи для двух каналов, присвоенных системе AIS. Из-за большой зоны покрытия луча спутниковой антенны системы подвижной связи, функционирующие на расстоянии в несколько тысяч километров от судоходных путей, могут влиять на качественные показатели обнаружения сообщений AIS с помощью спутников. Результаты показали, что система обнаружения сообщений AIS с помощью спутников может сосуществовать с ограниченным числом работающих в совпадающих каналах систем подвижной связи, имеющих малый рабочий цикл. Далее результаты показали, что система обнаружения сообщений AIS с помощью спутников намного более устойчива, когда совместно используется только один канал, совпадающий с каналом AIS.
