

УДК 629.783

Моделирование приема коллизий сигналов АИС на борту КА

А. М. Кузнецов¹, А. А. Романов², А. А. Романов³

¹аспирант, ²д. т. н., ³д. т. н., проф.

ОАО «Российские космические системы»

e-mail: amk.rss@gmail.com, romulas@mail.ru

Аннотация. При приеме сигналов АИС из космоса существенной проблемой является уменьшение количества принятых сообщений из-за «коллизии сигналов» — одновременного приема нескольких сигналов от разных судов. В данной статье представлен анализ модели АИС и частоты появления коллизий сигналов. Рассчитаны требования к методике обработки сигнала, которая позволит обрабатывать коллизии и тем самым увеличит количество детектированных судов. Проведено сравнение модельных и реальных результатов по количеству детектированных судов.

Ключевые слова: АИС, спутник, мониторинг

Model for Receiving AIS Signals Collisions in Space

A. M. Kuznetsov¹, A. A. Romanov², A. A. Romanov³

¹post-graduate student

²doctor of engineering science

³doctor of engineering science, professor

Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: amk.rss@gmail.com, romulas@mail.ru

Abstract. When AIS signals are received in space onboard the satellite it provides significant problem, so called “messages collision” — receiving several AIS signals simultaneously. This problem results in reducing the number of detected ships. In this article the analysis of AIS model signals and messages collisions are presented. Parameters of collision separating algorithms are researched and potential profit of it usage is presented. Model and real satellite AIS data are compared.

Key words: AIS, satellite, monitoring

Введение

Автоматическая идентификационная система (АИС) — информационная система, предназначенная для повышения безопасности мореплавания, в рамках которой суда обмениваются между собой информацией о навигационном статусе: координатах, векторе скорости и др., а также рейсовой информацией: порт отправления, назначения, степень опасности груза и пр. [1]. Согласно конвенции SOLAS ООН «О безопасности на море» судовая аппаратура АИС обязательна к установке на все крупные грузовые и пассажирские суда [2], таких насчитывается порядка 90 тыс. Суда в открытом море продолжают передавать навигационные сообщения АИС, при этом мощность принимаемых сигналов является достаточной для декодирования сообщений на борту низкоорбитальных КА [3]. Это позволяет производить мониторинг местоположения судов в удаленных от берега акваториях.

Протоколы АИС изначально не были предназначены для приема сигналов на борту КА, поэтому при размещении приемника АИС в космосе сообщения от разных судов могут приходить одновременно, повышая уровень внутриканальной интерференции и образуя «коллизию сигналов» или «коллизию сообщений». Порядок коллизии — это количество сообщений в коллизии. Чем больше сообщений принято в коллизии, тем больше ее порядок.

Сообщения в коллизии искажаются, это не позволяет выделять сообщения с помощью методик, предназначенных для наземных приемников, что приводит к потере информации. При наличии более 2000 судов в ЗРВ КА детектируются не более 20 % судов за 15 мин пролета КА над целевой акваторией, в наиболее загруженных акваториях в ЗРВ попадают порядка 8000 судов [4, 5].

В последнее время все большую актуальность приобретают решения, связанные с адаптацией алгоритмов обработки сигналов АИС к специфическим условиям увеличенной ЗРВ приемника, в том числе к явлению коллизии сигналов. В ряде методик по обработке сигнала [6–8] предлагается совместная обработка двух сообщений в коллизии 2-го порядка на основе принципа максимума правдоподобия. Как известно, при одинаковой цене

ошибки такой подход позволяет добиться минимальной вероятности ошибки [9]. Но при использовании подобного подхода на практике возникают следующие задачи: определение количества дополнительных судов, которые детектируются при разделении коллизий сообщений АИС 2-го порядка, определение минимального порядка коллизии для детектирования заданного процента судов в акватории; сравнение полученных данных с числом судов, детектируемых реальными КА.

В данной статье предложен алгоритм получения оценки порядка коллизии для определения требуемого числа судов в отдельных районах Мирового океана. Данный алгоритм был применен к модели сигнала АИС [10], полученные результаты сравнивались с реальными данными действовавших КА с приемником АИС.

Алгоритм оценки минимального порядка коллизии АИС

В качестве входных параметров алгоритм получения оценки порядка коллизии принимает данные о распределении судов в интересующей пользователя акватории Мирового океана и параметры орбиты спутника с приемником АИС. Выходные данные алгоритма — это массивы, в которых рассчитано, какое количество судов будет детектировано, если с помощью методики обработки коллизии были разрешены все коллизии не более чем N -го порядка.

При расчетах неявно использовалось следующее предположение: если методика позволяет разделить коллизию N сообщений, то та же методика позволяет разделить и коллизию $N - 1$ сообщений.

Первоначальные данные о движении судов в заданной акватории приводятся к распределению судов на регулярной сетке. Акватория разбивается на ячейки $1^\circ \times 1^\circ$, для каждой ячейки в акватории рассчитывается, какое количество судов находится в ней в течение дня. Затем данные суммируются с весовым коэффициентом, полученным исходя из того, сколько часов в сутки судно было в ячейке, и усредняются. Получившееся среднее количество судов для каждой ячейки формирует новое распределение судов.

На первом этапе работы алгоритм на основе параметров орбиты КА и рассчитывает те ячейки, которые попали в ЗРВ КА в начальной точке траектории. Принимающая антенна КА считается всенаправленной, для передающей антенны судна ДНА берется из [11]. Средний период передачи сообщения одним судном составляет 6 с [5]. Поэтому моделирование принятого на КА информационного сигнала ведется с шагом 6 с, вплоть до крайней расчетной точки траектории. На каждом шаге ведется перерасчет ячеек и судов, попавших в ЗРВ КА, и учитывается, сколько пришло сообщений в каждый отдельный слот.

Для расчета требуемых параметров сообщений, нужных для составления статистики распределения сигналов в коллизиях, используется физическая модель распространения сигнала АИС, реализованная в работе [10, 12].

В рамках этой модели для каждого переданного сообщения рассчитывается время прихода на борт КА, мощность принятой энергией сигнала и сдвиг центральной частоты из-за эффекта Доплера.

Полученные данные оформляются в виде таблиц и гистограмм, отражающих количество принятых коллизий N -го порядка. Из этих данных рассчитывается количество принятых сообщений в коллизиях N -го порядка.

Чтобы связать количество принятых сообщений и количество детектированных судов, используется обновляемый массив данных, где для каждого судна отмечается коллизия минимального порядка, в которой от него за интервал моделирования было получено сообщение. Полученный массив позволяет оценить минимальный порядок коллизии, которую надо разрешать для обнаружения заданного числа судов в отдельной акватории Мирового океана.

Из полученных таблиц рассчитывается доля судов, которая может быть обнаружена с использованием методики разделения коллизии 2-го порядка. Чтобы оценить преимущества применения методики, необходимо вычесть из полученного числа детектированных судов те, которые могли быть обнаружены без применения методики разделения коллизий, — только по декодированным сообщениям, которые приняты без коллизий.

Из материалов, опубликованных по результатам работы уже запущенных приемников С-АИС, рассчитывается среднее количество обнаруженных в секунду судов и декодированных сообщений. Эти данные сравниваются с оценкой числа судов, обнаруженных в результате применения методики обработки коллизий сигналов АИС.

Применение алгоритма оценки порядка коллизии АИС на модельных данных

На основе представленного алгоритма оценки минимального порядка коллизии АИС разработано ПМО, которое проверено на данных модели сигнала АИС, принимаемого на борту КА.

Проблема построения модели сигнала АИС, принимаемого на борту КА, подробно изложена в диссертации [12]. Модель, предложенная в [12], используется в данной работе.

Основой модели стало распределение судов, приведенное в PasteMare, которое было дополнено в северных широтах данными, приведенными ФГУП «Морсвязьспутник». Данные по распределению судов, опубликованные по итогам проекта PasteMare, получены с КА с приемником АИС на борту. В силу особенностей работы КА, собиравших сообщения АИС для PasteMare, данные о судах в северных широтах (выше 65° с. ш. и ниже 65° ю. ш.) неполные. Для северных акваторий Российской Федерации плотность распределения судов была восстановлена на основе отчетов о положении судов АИС, находящихся в навигации весной-летом 2013 г., предоставленных ФГУП «Морсвязьспутник».

Для проведения численного эксперимента выбрано несколько акваторий в Мировом океане, сигналы АИС из которых были смоделированы, а затем проанализированы. Акватории выбирались из следующих соображений: акватории вблизи границ Российской Федерации, акватории Мирового океана, содержащие различное число судов, акватории, по которым известны результаты работы КА с приемником АИС на борту. Расположение модельных акваторий обозначено красными прямоугольниками на рис. 1.

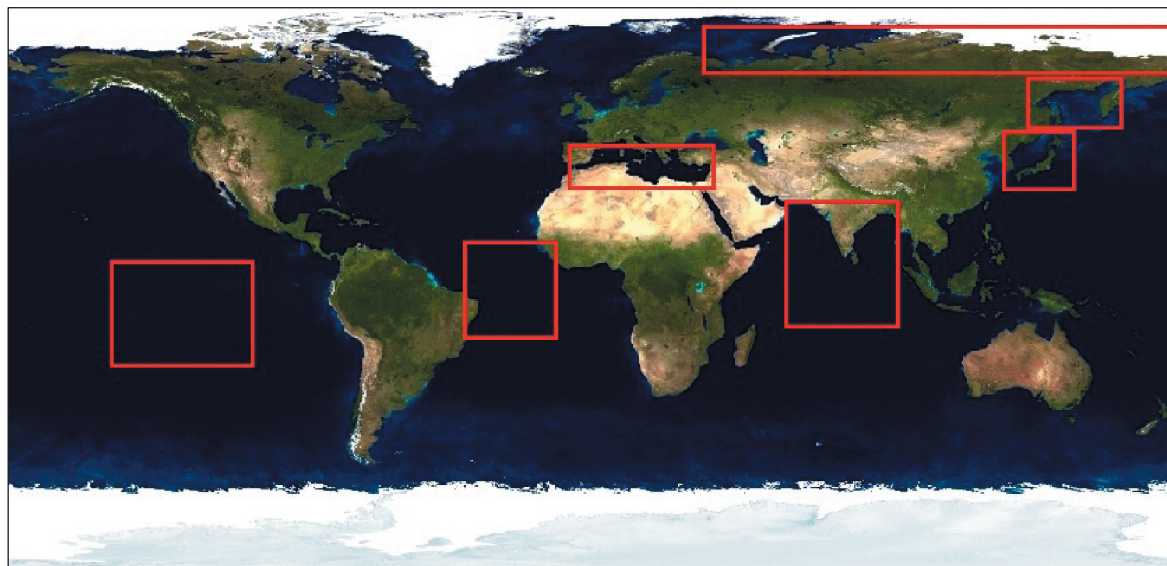


Рис. 1. Местоположение акваторий для получения модельных данных

Таблица 1. Параметры модельных сигналов АИС

Название акватории	Общее число сообщений, ед.	Сообщений принято без коллизий, ед.	Сообщений в коллизии 2-го порядка, ед.
Северная акватория РФ	735 (100 %)	531 (72 %)	180 (24 %)
Акватория Дальнего Востока РФ	40386 (100 %)	5805 (14 %)	8274 (20 %)
Тихий океан	23763 (100 %)	8199 (36 %)	8536 (36 %)
Атлантический океан	82520 (100 %)	2167 (2,6 %)	7728 (9 %)
Средиземное море	212334 (100 %)	26 (0,01 %)	222 (0,1 %)
Желтое море, побережье Японии	306011 (100 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
Индийский океан	338208 (100 %)	231 (0,06 %)	1564 (0,46 %)

При моделировании пролета КА над всеми модельными акваториями наклонение КА принималось равным 90° , направление движения — с юга на север, высота орбиты 670 км, радиус ЗРВ — 2700 км. Высота орбиты взята в качестве средней высоты для запущенных низкоорбитальных космических аппаратов с приемником АИС в период 2002–2014 гг. Наклонение орбиты в 90° применяется для удобства отслеживания движения спутника вдоль меридиана. Статистика по количеству принятых сообщений приведена в табл. 1.

Анализ полученных данных показывает, что максимум количества сообщений, извлеченных из коллизии и правильно декодированных, приходится на акватории со средним числом судов: 750–2300 (акватория Дальнего Востока РФ, Тихий океан,

Атлантический океан). Это связано с распределением сообщений по коллизиям: в регионах со средним числом судов велико количество коллизий 2-го порядка — оно составляет до 35 % от всего числа принятых сообщений.

В районах с малым числом судов (Арктика) ожидаемо мало коллизий, т. к. в эфире достаточно свободных временных слотов для того, чтобы сообщения принимались без наложения друг на друга.

В акваториях с большим числом судов (Средиземное море, Желтое море, побережье Японии) число судов и переданных ими сообщений настолько велико, что принять коллизию даже 2-го порядка — большая удача, число правильно декодированных сообщений, извлеченных из коллизии, близко к нулю.

Таблица 2. Количество детектированных судов при разделении коллизии 2-го порядка

Название акватории/число судов при пролете	Детектировано судов без разрешения коллизий, ед./% от общего числа	Детектировано судов из коллизии 2-го порядка, ед./% от общего числа	Детектировано судов из коллизии 2-го порядка, которые не детектированы без разрешения коллизий, ед./% от общего числа
Северная акватория РФ 151	150 (100 %)	151 (100 %)	1 (<1 %)
Акватория Дальнего Востока РФ 1854	1095 (59 %)	1328 (71 %)	436 (23,5 %)
Тихий океан 750	698 (93 %)	710 (94 %)	25 (3 %)
Атлантический океан 2348	1291 (55 %)	1830 (78 %)	518 (22 %)
Средиземное море 6469	26 (<1 %)	102 (1,6 %)	98 (1,5 %)
Желтое море, побережье Японии 7298	0 (–)	0 (–)	0 (–)
Индийский океан 4880	227 (4 %)	725 (15 %)	558 (11,4 %)

Индийский океан представляет собой смешанную акваторию: на протяжении первых 50 с полета в ЗРВ КА находится небольшое число судов, затем их количество стремительно растет. Этот факт отразился в числе принятых сообщений: 1564 — промежуточная величина между крайне загруженными акваториями, где число сообщений 2-го порядка стремится к 0, и акваториями со средним числом судов, где количество декодированных из коллизий сообщений 2000–4000.

Для расчета количества детектированных судов с помощью методики обработки коллизий 2-го порядка для каждого судна ведется запись, какой минимальный порядок коллизии, где было получено его сообщение.

Если от судна есть хотя бы одно сообщение, принятое без коллизии, то судно считается детектированным без применения методики разделения коллизии. В этом случае его сообщения, извлеченные из коллизии 2-го порядка, не учитываются. Если сообщение от судна было принято в коллизии не менее 2-го порядка, то количество обнаруженных судов при разделении коллизии учитывается как число судов, обнаруженных благодаря использованию методики.

Результаты анализа по количеству детектированных судов, а также оценка потенциального выигрыша при применении методики разделения коллизий изложена в табл. 2.

Анализ таблицы показывает, что наибольший абсолютный выигрыш 22–23 % наблюдается в регионах со средним количеством судов (Атлантический океан, акватория Дальнего Востока РФ). В них велико количество сообщений, извлеченных из коллизий 2-го порядка, а судов, детектированных по сообщениям без коллизий, относительно немного. За счет этого сообщения, извлеченные из коллизии 2-го порядка, играют значительную роль. За счет разделения коллизий доля детектированных судов в этих регионах близка к 80 %.

В Северной акватории РФ и в акватории Тихого океана судов относительно немного, за время полета накапливается достаточно сообщений без коллизий, чтобы детектировать почти каждое судно. При этом в Северной акватории РФ коллизий сообщений почти не наблюдается, а в акватории Тихого океана их достаточно, но их обработка не имеет смысла, т. к. все суда детектируются при обработке сообщений без коллизий.

В загруженных акваториях — Желтое море, побережье Японии и Средиземное море —

преобладают коллизии старших порядков, вероятность детектировать хотя бы небольшое количество судов невелика.

В Индийском океане наблюдается значительное количество судов, сообщения без коллизии приходят достаточно редко, поэтому роль сообщений, выделенных из коллизии 2-го порядка, велика. Эти факты вместе с увеличенным временем обзора приводят к тому, что для этого региона выделенные из коллизии сообщения почти всегда позволяют детектировать новое судно. Но выделенных сообщений не хватает для того, чтобы детектировать 80 % судов.

Совместный анализ табл. 1 и 2 показывает, что, несмотря на большое количество сообщений, извлеченных из коллизий 2-го порядка, число вновь обнаруженных судов во многих акваториях относительно невелико. В тех случаях, когда сообщений без коллизий достаточно много и их количество превышает число всех судов в несколько раз, большая часть судов может быть детектирована по сообщениям без коллизий. В случае акватории Тихого океана и Северной акватории РФ большая часть судов детектируется по сообщениям без коллизий.

Если сообщений в коллизиях 2-го порядка больше, чем сообщений без коллизий, и число последних сопоставимо с количеством судов в акватории или меньше, то после детектирования судов без методики разделения коллизий остается значительная доля недетектированных судов, которая может быть дополнительно обнаружена. Это хорошо видно на примере акваторий Атлантического и Индийского океанов. Часть этих судов как раз и детектируется по сообщениям, извлеченным из коллизий 2-го порядка.

Таким образом, количество новых судов, которые обнаружены по сообщениям, извлеченным из коллизий, и не обнаружены по сообщениям без коллизий, сильно зависит от отношения числа сообщений без коллизий к числу судов. Если число сообщений без коллизий превышает число судов в 5–10 раз, большая часть судов будет детектирована без применения методики разделения коллизий.

Анализ модели сигналов АИС на основе предложенного выше алгоритма показал, что применение методики разделения коллизий 2-го порядка

позволяет дополнительно обнаруживать в акватории до 23 % судов в абсолютном выражении и до 3 раз в относительном. Успешность применения методики зависит от количества судов в акватории и их пространственного распределения. Наилучшие показатели можно ожидать в акваториях со средним числом судов (2500–3500).

Оценка порядка коллизии, которую надо разрешать для определения заданного числа судов в акватории

Полученные в предыдущих параграфах данные были дополнены результатами следующего исследования: коллизии какого порядка должны разрешаться, чтобы детектировать 80 % судов в акватории за время пролета 300 с.

При моделировании пролета КА последовательно помещался в географические точки на земном шаре с шагом 10° , начиная с 0° с.ш., 0° в.д. на высоте 670 км. В каждой точке на протяжении 300 с велась запись сигнала, который затем был проанализирован на предмет количества детектированных судов при разделении всех коллизий сообщений 2, 3, 4-го порядка или без разрешения коллизий. Полученные результаты линейно аппроксимированы и нанесены на географическую карту. Результаты представлены на рис. 2.

Анализ полученных карт показал, что разделение коллизии 4-го порядка позволяет добиться высокого уровня детектированных судов почти для всех акваторий Мирового океана, кроме самых загруженных. К таким относятся: побережье Северной Америки, Средиземное море, моря Восточной и Юго-Восточной Азии.

Численный эксперимент также показал, что конечный результат зависит от траектории пролета КА над акваторией. Например, при пролете КА над Японией с запада в ЗРВ КА попадает 6000–8000 судов в прибрежных водах Китая и Кореи, при пролете с восточной стороны в ЗРВ КА попадают акватории Тихого океана с малой плотностью расположения судов, тогда общее количество судов 3500–4500. В первом случае сложно будет детектировать хотя бы одно судно, во втором часть судов из той же акватории будет обнаружена.

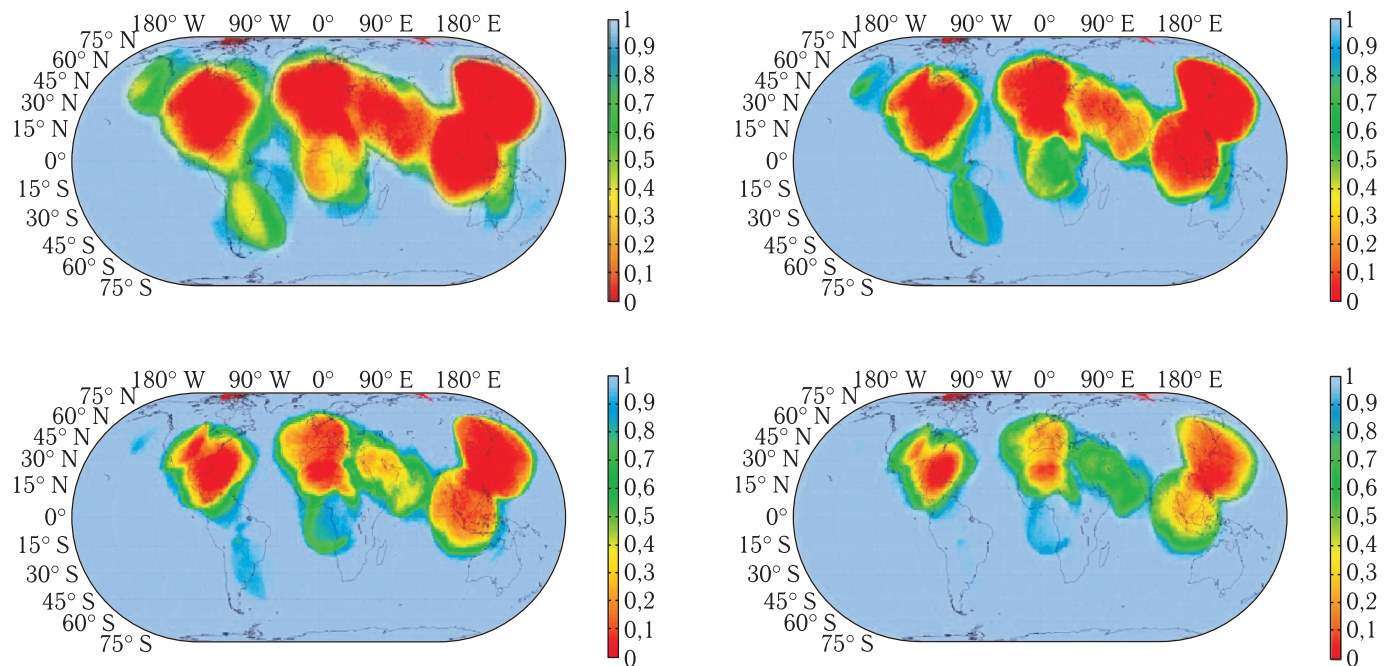


Рис. 2. Доля детектированных судов при условии разделения коллизий N -го порядка. Слева сверху — без разделения, справа сверху — коллизия 2-го порядка, слева внизу — 3-го, справа внизу — 4-го

Таблица 3. Параметры сигналов в коллизии 2-го порядка

Название акватории	Порядок коллизии, которую надо разделять для детектирования 80 % судов в акватории
Северная акватория РФ	0
Акватория Дальнего Востока РФ	2
Средиземное море	6
Тихий океан	0
Желтое море, побережье Японии	8
Индийский океан	4
Атлантический океан	2

Тем не менее, для указанных на рис. 1 акваторий проведены численные эксперименты по анализу гистограмм принятых коллизий сообщений. Используя значения минимального порядка коллизии, для каждой акватории рассчитан процент судов, детектированных при применении методики разделения коллизии N -го порядка. Усредненные оценки порядка коллизии, которую надо разрешать для определения 80 % судов в акватории, приведены в табл. 3.

На основании этих оценок можно сформулировать следующий вывод: методика разделения кол-

лизий 2-го порядка позволяет эффективно детектировать суда (обнаруживать более 80 %) в акваториях со средним количеством судов (до 2500 судов в акватории). При обзоре акваторий с небольшим числом судов (до 800) в использовании методики нет необходимости, если время наблюдения акватории значительное (порядка сотен секунд). В акваториях с большим числом судов (более 6000) необходимо применять другие подходы, позволяющие уменьшить порядок коллизий. Для акваторий с числом судов 3000–5000 методика разделения коллизий 2-го порядка дает существенный,

но недостаточный для детектирования 80 % судов эффект. В таких акваториях может быть эффективным выбором подходящей траектории пролета КА.

Оценка количества детектированных судов при малом времени записи сигнала АИС на борту КА

Численные эксперименты, указанные в предыдущих параграфах, чаще всего проводились при времени записи сигнала 300 с. Хотя для отдельного наблюдателя на Земле время пролета КА при прохождении через зенит от одного края небесной полусферы до другого составляет 900 с, в данной работе считается, что за 300 с параметры принимаемого сигнала меняются несущественно. Таким образом, становится возможно оценить статистические параметры принимаемого сигнала из целевой акватории при примерно постоянных характеристиках.

Но для реальных космических программ время работы приемника АИС может быть меньше из-за ограничений служебных подсистем спутника: скажутся недостаток энергии подсистемы энергоснабжения, малый объем передаваемых данных из-за низкой скорости передачи данных.

Поэтому был проведен численный эксперимент по записи сигнала на 2 каналах АИС над акваторией Дальнего Востока в течение 30 с. Параметры орбиты КА совпадают с параметрами КА в ходе полноценных экспериментов по записи 300 с сигнала.

Материалы, полученные в ходе экспериментов по записи 30 с и 300 с, приведены в табл. 4 и 5.

Анализ приведенных таблиц показывает, что при меньшей длительности записанного сигнала сообщения, извлеченные из коллизии, вносят большую роль в число обнаруженных судов. Это связано с тем, что за короткое время работы не успевает накопиться достаточно сообщений без коллизий, чтобы детектировать достаточное количество судов, и почти каждое сообщение, извлеченное из коллизии, позволяет детектировать новое судно. В этих условиях 309 сообщений, извлеченных

из коллизий 2-го порядка, позволили дополнительно детектировать 286 судов. Число обнаруженных судов увеличилось в 2,5 раза.

Сравнение данных модели АИС и реальных КА с приемником АИС на борту

В 2002–2014 гг. в космос запущено более 30 приемников АИС. По ряду приборов имеется обобщенная статистика: известно, сколько в среднем в сутки детектируется судов, декодируется сообщений. В некоторых случаях приводятся результаты по количеству декодированных за 1 с сообщений. Так как большое количество приборов работает в сеансном режиме, то часть усредненных результатов не отражает цельную картину работы приемников, кроме того, усреднение не позволяет провести анализ отдельных акваторий.

Информация по спутникам AprizeSat-3,4 [13, 14], AISsat-1 [15], NORAIS [16], VesselSat-1,2 [17], EV-1 [18] представлена обобщенными данными, выраженными в среднем количестве детектированных судов и декодированных сообщений в сутки, эти показатели собраны в табл. 6. Данные по среднему количеству сообщений АИС, принятых на КА Orbcomm FM-39, NTS-1, Pathfinder-2, TacSat-2 (с использованием монополярной антенны) [19], TacSat-2 (с использованием фазированной антенной решетки (ФАР)) [19], получены путем умножения среднего количества судов, детектированных в секунду, на количество секунд в сутках.

В то же время для части КА с приемником АИС известны результаты по конкретным акваториям. Большая часть опубликованных данных по результатам работы приемников АИС была приведена в 2010 г. в отчете по итогам эксперимента PasteMare, в рамках которого сделан сравнительный анализ работающих на тот момент приемников КС-АИС [10]. В тестировании принимали участие приемники, установленные на КА NTS-1 (высота орбиты 630 км, наклонение 90°), Pathfinder-2 компании LuxSpace (высота орбиты 720 км, наклонение 98,3°), 2 идентичных спутника FM-39, -37 компании Orbcomm (высота орбиты 670 км, наклонение 48°). Для сравнения выбирались акватории,

Таблица 4. Обработанные сообщения в ходе записи сигнала

Параметр	Значение параметра	Процент от общего числа сообщений	Значение параметра	Процент от общего числа сообщений
Время записи сигнала	30 с		300 с	
Всего сообщений принято	8707	100 %	40386	100 %
Получено сообщений без коллизии	186	2 %	5805	14 %
Получено сообщений в коллизии 2-го порядка	722	8 %	8274	20 %

Таблица 5. Детектированные суда в ходе записи сигнала

Параметр	Значение параметра	Процент от общего числа сообщений	Значение параметра	Процент от общего числа сообщений
Время записи сигнала	30 с		300 с	
Всего судов в ЗРВ	1854	100 %	1854	100 %
Получено судов без разделения коллизии	177	9,5 %	1095	59 %
Детектировано судов при обработке коллизии 2-го порядка	286	15,5 %	1064	57 %
Всего детектировано судов	452	24 %	1452	78 %

Таблица 6. Обобщенные показатели работы приемников АИС

Название КА	Среднее количество принятых сообщений АИС в сут, тыс.	Среднее количество детектированных судов в сут, тыс.
TacSat-2 (монополь)	4*	–
Orbcomm FM-39	11*	–
TacSat-2 (ФАР)	112*	–
Pathfinder-2	158*	–
AprizeSat-3, 4 (суммарно)	460	25
AISsat-1	500	20
NORAIS	350	22
VesselSat-1	900	23
NTS-1	1166*	–
VesselSat-2	1200	30
ExactView-1	1500	45

* — показатели, рассчитанные на основе опубликованных данных

над которыми указанные КА пролетали с разницей по времени не более часа, так чтобы их зоны радиовидимости (ЗРВ) максимально пересекались.

По итогам эксперимента лучшие показатели продемонстрировал КА NTS-1, в результате анализа его данных было детектировано до 2 раз больше

судов, чем для остальных КА, снимавших ту же акваторию в то же время. Количество детектированных судов сильно зависит от географической области и для NTS-1 составляет от 200 до 1100. FM-39, -37 и Pathfinder-2 показали примерно одинаковые результаты, в среднем на 30–40 % хуже,

Таблица 7. Результаты экспериментов по приему сообщений АИС в разных акваториях

Акватория	Количество судов в ЗРВ	Спутники					
		PF-2		FM-39		NTS-1	
		М. о.	Ст. откл.	М. о.	Ст. откл.	М. о.	Ст. откл.
Южная Африка	2000–3000	302	165	218	111	–	–
Тихий океан	1800–2500	433	164	266	142	–	–
Восточное поб. Сев. Америки	3000–4000	373	147	–	–	530	268
Япония	6000–8000	–	–	268	–	1000	–

Таблица 8. Результаты работы различных приемников, полученные в ходе эксперимента над Тихим океаном

КА с приемником АИС	Общее число судов с приемником АИС, обнаруженных в 1 с	Общее число сообщений АИС, декодированных в 1 с
NTS-1	8,35	32,9
Pathfinder-2	0,16	1,85
Orbcomm FM 39	0,09	0,13

чем NTS-1. В отдельных акваториях Pathfinder-2 детектировал на 20% больше судов, чем FM-39, -37. Результаты экспериментов по приему сообщений АИС в разных акваториях приведены в табл. 7.

Как видно из таблицы, в среднем для простых приемников ожидаемое количество детектированных судов составляет 200–250 при наличии в ЗРВ 2000–3000 судов и 300–400 для более совершенных приемников.

В табл. 8 показаны усредненные за 10 пролетов результаты работы приемников над одной и той же областью в Тихом океане вблизи западного побережья США.

Как видно из таблицы, NTS-1 детектировал в 50–90 раз больше судов в единицу времени, чем другие КА. При этом бортовой приемник АИС работал над каждой областью лишь 90 с, что в 7–10 раз меньше, чем на других спутниках, но не проводил обработку сообщений на борту. По команде с Земли КА записывал входящий оцифрованный сигнал длительностью 90 с, который в течение недели передавался на наземные станции связи, декодирование сообщений производилось в лаборатории на Земле. По результатам работы за 7 мес, NTS-1 записал 52 мин оцифрованного сигнала, в котором было декодировано 42 тыс. сообщений от 14 тыс. судов. Это дает в среднем 13,5 декодированных сообщений, 4,5 детектированных судна в 1 с. Видно, что полученные результаты

отличаются от данных, приведенных в табл. 8. Это связано прежде всего с неравномерностью распределения судов в Мировом океане.

Сравнение результатов по количеству декодированных сообщений для КА FM-37, -39 не совсем корректно, потому что для уменьшения трафика с наземной станцией связи спутники фильтруют поступающие сообщения АИС с целью оставить 1–2 от каждого судна за сеанс. Поэтому приемники, установленные на спутниках Orbcomm, можно сравнивать с остальными приемниками только по количеству детектированных судов.

Сигнал из данной области Тихого океана сгенерирован с помощью модели АИС, характеристики полученного сигнала проанализированы для расчета количества декодированных сообщений, разделенных коллизий сигналов и детектированных судов.

Время съемки акватории составило 90 с, координаты начальной точки КА — 30° с. ш., 153° з. д., высота орбиты 670 км, наклонение 90°. Направление движения КА — с юга на север. Основные результаты вместе с рассчитанными относительными характеристиками приведены в табл. 9.

С учетом разделения коллизий общее число судов с приемником АИС, обнаруженных в секунду, — 18, общее число сообщений АИС, декодированных в секунду, — 28. Таким образом, результаты КА NTS-1 по числу обнаруженных судов оказались

Таблица 9. Основные результаты разделения сигналов в акватории Тихого океана с помощью методики разделения коллизий 2-го порядка

Название параметра	Величина параметра	В единицу времени (в 1 с)
Всего сообщений передано	21637	240,4
Всего судов было в ЗРВ КА	1848	–
Декодировано сообщений без разделения коллизий	1111	12,3
Декодировано сообщений с учетом разделения коллизий	2541	28
Детектировано судов без разделения коллизий	852	9,6
Детектировано судов с учетом разделения коллизий	1620	18

улучшенными в 2,1 раза, по числу декодированных сообщений — хуже в 1,2 раза. Если не применять методику разделения коллизий, то число судов, детектированных КА NTS-1, примерно совпадает с предсказанным на модельном сигнале, что говорит о корректности сравнения производительности методик.

Уменьшение количества декодированных сообщений может быть связано с неравномерным усилением антенны NTS-1 на границах ЗРВ [15, 20, 21]. Часть времени в ЗРВ КА попадало большое количество судов, находящихся вдоль береговой линии Северной Америки, это привело к тому, что сигналы от них дополнительно ослаблялись на антенне и воспринимались как шум на фоне более мощных сигналов от судов в открытом океане, поэтому сообщения в коллизии легко декодировались.

Таким образом, на основе материалов о работоспособности реальных КА с приемником АИС подтверждена актуальность применения методик разделения коллизий сообщений АИС 2-го порядка для решения задачи увеличения количества детектированных судов.

Заключение

В данной работе предложен алгоритм получения оценки порядка коллизии для определения требуемого числа судов в отдельных районах Мирового океана. В результате применения данного алгоритма к модели сигнала АИС показано, что разделение коллизий 2-го порядка позволяет дополнительно обнаруживать в акватории до 23 % судов в абсолютном выражении и до 3 раз в относительном.

Применение методики разделения коллизий 2-го порядка при обзоре акватории со средним количеством судов (1000–2500) в течение 300 с позволяет обнаруживать до 80 % судов. При записи сигнала в течение меньшего времени — 30 с — применение методики позволит увеличить абсолютное число обнаруженных судов в 2,5 раза.

Для наиболее загруженных акваторий (6000–8000 судов) необходимо разделять коллизии 6–8 порядка для детектирования 80 % судов. Для акваторий с числом судов 3000–5000 необходимо разделять коллизии 3 и 4 порядков.

Сравнение результатов, полученных при обработке модельного сигнала АИС, с результатами реальных КА с приемником АИС на борту, показали увеличение количества обнаруженных в 1 с судов в 2,1 раз.

Проведенная работа позволила количественно оценить влияние коллизий на число обнаруженных судов при приеме сигнала АИС из космоса. Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании спутниковой АИС.

Список литературы

1. ITU, Recommendation ITU-R M.1371-4: Technical characteristics for an automatic identification system using time-division multiple access in the VHF maritime mobile band. [сайт] <http://www.itu.int> (дата обращения: 10/январь/2013).
2. Международная организация ИМО, конвенция SOLAS. [Веб-узел организации ИМО] <http://www.imo.org> (дата обращения: 10/январь/2013).

3. Международный союз электросвязи, «МСЭ-R М.2084», отчет 2006.
4. Høye G. Observation modelling and detection probability for space-based AIS reception — Extended observation area. Norwegian Defence Research Establishment, FFI/RAPPORT-2004/04390, 2004.
5. Ginesi A., Cervera M. A. On the performance analysis of a satellite-based AIS system // Tenth International Workshop on Signal Processing for Space Communications. — Rhodos, Greece, 2008.
6. Meehan T. J. Joint demodulation of low-entropy narrowband cochannel signals, Naval postgraduate school, Monterey, California. Дисс. NSN 7540-01-280-5500, 2006.
7. Coulon M., Bonacci D., LeMaitre J., Millerioux J.-P., Tourneret R. J.-Y. Prevost Interference mitigation and error correction method for AIS signals received by satellite // 20th European Signal Processing Conference. — Бухарест, 2012.
8. Thibaud Calmettes Jeremie Giraud. Method for demodulating signals from a multi-access system able to collide and equipment for implementing same. Алгоритм US 8,963,587 B2. Май 11, 2011.
9. Скляр Б. Цифровая Связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд. Под ред. А. В. Назаренко. М.: Вильямс, 2007.
10. Романов А. А., Кузнецов А. М. Мониторинг судов в северных широтах Российской Федерации с помощью космического сегмента АИС // XXXVII академические чтения по космонавтике. Москва, 2013. С. 245–248.
11. OHB systems, ESPAIS AIS System Study — Final Report. Отчет ESPAIS-OHB-FR-01, 08.12.2010.
12. Маслов А. П. Моделирование сигнала автоматической идентификационной системы, принимаемого на борту космического аппарата. Дисс. ... на соискание ученой степени магистра. Московский физико-технический институт, 2014.
13. Lorenzini D. A. and CaJacob D. E. Rapid Construction, Launch, and On-Orbit Operation of Two AIS Satellites // 8th Responsive Space Conference. — Лос-Анджелес, 2010.
14. Turner Brinton Space Hardware Firm Doubles Down on Ship Tracking Service // Space News, 2010, с. 14.
15. Skauen T., Eriksen A. N. et al. Tracking Ship Traffic with Space-Based AIS: Experience Gained in First Months of Operations // Waterside Security Conference (WSS), 2010.
16. [Веб-узел компании SpaseQuest] www.spasequest.com (дата обращения: 10/январь/2013).
17. Ruy G., Schwarzenbarth K., van Schie B., Frapé J.-B., Ries Ph., Moser H., Buursink J. VesselSat: Building two Microsatellites in one Year // Proceedings of the 4S (Small Satellites Systems and Services) Symposium. — Портоторо, 2012.
18. [Веб-узел компании ExactEarth] www.exactearth.com (дата обращения: 10/январь/2013).
19. Huffine Ch., Nicholson St., Duffey T. On-orbit results from the TACSAT-2 ACTD target indicator experiment ais payload // The 4S Symposium. Small Satellites Systems and Services. — Нордвейк, 2008.
20. Ole Fredrik Haakonsen Dahl «Space-Based AIS Receiver for Maritime Traffic Monitoring Using Interference Cancellation», Norwegian University of Science and Technology, Диссертация 2006.
21. Høye G., Narheim B., Meland B. J., Eriksen T. Maritime traffic monitoring using a space-based AIS receiver // Acta Astronautica, 2006, № 58. Iss. 10. P. 537–549.