

УДК 621.390

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ

Я. А. Скороходов^а, канд. техн. наук, yaroslavskor@gmail.com

А. М. Андреев^а, канд. техн. наук, доцент, aandreev961@yandex.ru

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

Введение: натурные эксперименты с отделяемыми элементами ракет-носителей (последними ступенями), разгонными блоками и космическими аппаратами в целях оценивания потенциальных возможностей приема сигналов автоматической идентификационной системы в космосе дорогостоящи. В ряде случаев для выработки обоснованных решений при проектировании космической системы, а также для планирования применения орбитальной группировки достаточно использовать результаты моделирования. **Цель:** разработка имитационной модели функционирования космической системы автоматической идентификации морских судов. **Результаты:** разработана и программно реализована имитационная модель, позволяющая получать оценки целевых показателей функционирования космических систем идентификации и определения местоположения морских судов с учетом различных пространственных и энергетических факторов и условий распространения радиосигналов, а также реального размещения контролируемых объектов в акватории Мирового океана и прибрежных зонах. Варьируя системой ограничений и допущений, с помощью модели можно, с одной стороны, сравнивать результаты моделирования с аналитическими вычислениями, а с другой стороны, получать оценки целевых показателей функционирования космических систем в условиях, максимально приближенных к действительности. Адекватность разработанных моделей и алгоритмов подтверждается экспериментальными исследованиями системы автоматической идентификации морских судов. **Практическая значимость:** представленная модель может быть использована для решения следующих задач: оценивания количественных показателей качества обнаружения судов для заданной структуры орбитальной группировки космических аппаратов, выбора параметров орбитальной группировки космических аппаратов для заданных показателей обнаружения морских судов, оценивания энергетической доступности сигналов для различных параметров орбитального движения космического аппарата и других условий.

Ключевые слова — автоматическая идентификационная система, обработка информации, имитационное моделирование, космические аппараты.

Цитирование: Скороходов Я. А., Андреев А. М. Моделирование функционирования космического сегмента системы автоматической идентификации морских судов// Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 36–48. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

Citation: Skorokhodov Ya. A., Andreev A. M. Modeling the Space Segment of Sea Vessel Identification System. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 36–48 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

Введение

В настоящее время актуальным и востребованным является создание спутниковой автоматической идентификационной системы (АИС), позволяющей обеспечить глобальность и непрерывность мониторинга движения морских судов [1–3]. Это связано с постоянным увеличением морского трафика и ужесточением требований безопасности движения кораблей, а также необходимостью противодействовать терроризму. За последние 10 лет проведено более 40 натурных экспериментов с использованием отделяемых элементов ракет-носителей (ступеней и разгонных блоков) и космических аппаратов (КА) в целях оценивания потенциальных возможностей приема сигналов АИС в космосе [4, 5].

В наши дни создаются и постепенно наращиваются орбитальные группировки КА с возможностью приема, обработки и ретрансляции сигналов АИС, которые внедряются в систему обеспе-

чения безопасности движения морских судов и становятся ее неотъемлемой частью. Самый большой задел в этой области принадлежит компании Iridium Communications Inc. (США), имеющей на данный момент орбитальную группировку из 50 КА Iridium NEXT (планируется всего 75 КА). В России в 2014 г. был запущен КА «Ресурс-П» № 2, на борту которого в качестве дополнительной нагрузки установлен радиокomплекс, предназначенный для приема радиосигналов с морских судов и автоматической идентификации последних. Полученные с его помощью экспериментальные данные были детально проанализированы [1, 5].

Натурные исследования с использованием экспериментальных КА или средств выведения являются дорогостоящей операцией. Порой для выработки обоснованных решений, а также планирования применения орбитальной группировки в будущем достаточно результатов математического моделирования. В работе пред-

ставлена имитационная модель функционирования космической системы (КС) контроля движения морских судов (модель надводной радиоэлектронной обстановки включает свыше 500 тыс. морских судов — источников сообщений АИС).

Имитационная модель функционирования КС автоматической идентификации морских судов

В обобщенном виде состав и элементы модели функционирования КС автоматической идентификации морских судов представлены на рис. 1.

Модель надводной радиоэлектронной обстановки (распределения источников излучений АИС) представлена множеством элементов $s_i \in S$, $i = 1, \dots, N$, каждый из которых соответствует источнику излучения и характеризуется его местоположением C_i на земной поверхности. Модель является статической, т. е. местоположения объектов наблюдения за время моделирования не изменяются. Предлагаются два способа к размещению источников излучений: в первом случае координаты C_i местоположений объектов наблю-

дения определяются статистически по заданному закону распределения, как правило, равномерному; во втором случае используется «снимок» реального местоположения объектов для заданного момента времени, который может быть получен с веб-сервисов слежения за передвижением морских судов, таких как MarineTraffic или VesselFinder [6, 7].

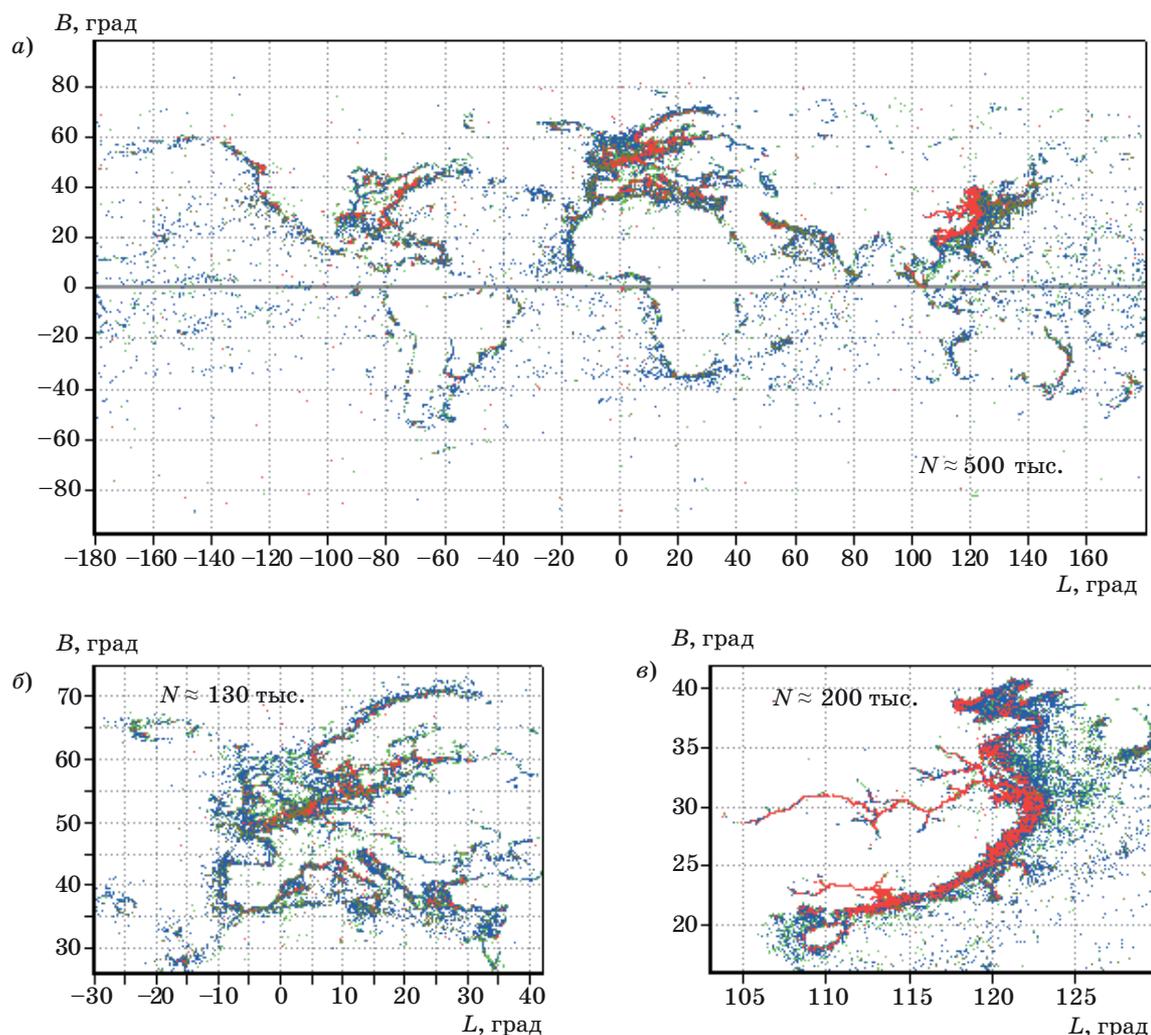
Выбор способа размещения источников излучений определяется прежде всего целью моделирования. Первый способ может применяться для сравнения результатов имитационного моделирования с результатами аналитических вычислений, предложенных другими авторами, а также анализа энергетической доступности сигналов [8], второй способ — для получения обоснованных результатов применения КС с учетом неоднородности распределения судов на земной поверхности и других факторов.

Расположение судов, оснащенных транспондерами АИС классов А и В на карте земной поверхности в целом, а также отдельно в регионах, характеризующихся наибольшей плотностью размещения судов, схематически представлено на рис. 2, а–в. Использована следующая цветовая схема: красным цветом обозначены суда со



■ **Рис. 1.** Модель функционирования системы автоматической идентификации морских судов

■ **Fig. 1.** The vessels automatic identification functioning system model



■ **Рис. 2.** Распределение источников излучений АИС: *а* — земная поверхность в целом; *б* — регионы Средиземного и Северного морей; *в* — Южно-Китайское море
 ■ **Fig. 2.** AIS radiation sources distribution: *a* — earth’s surface as a whole; *b* — Mediterranean and North Seas regions; *c* — South China Sea

скоростью передвижения $v > 23$ уз; желтым — $v \in (14;23]$ уз; синим — $v \in (3;14]$ уз; зеленым — $v < 3$ уз. Данные о местоположении судов, их скорости, курсе передвижения и массо-габаритных характеристиках получены с веб-сервера MarineTraffic [6] в период с 13.05.2017 г. по 17.05.2017 г.

Модель распределенных систем пунктов приема сообщений включает модель орбитальной группировки (ОГ) КА и модель сети наземных пунктов контроля движения морских судов. Модель ОГ КА представлена множеством элементов $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$, структура ОГ задается следующими параметрами: количеством плоскостей n , параметрами орбит в каждой плоскости (долготой восходящего узла Ω , наклонением i , апогеем r_a , перигеем r_p , шириной перицентра ω), количеством КА в каждой плоскости, углами, на

которые разнесены КА друг относительно друга в одной плоскости.

Модель сети наземных пунктов контроля движения морских судов представлена множеством элементов $q_k \in Q, k = 1, \dots, N_Q$, каждый из которых характеризуется своим местоположением C_j на земной поверхности. Моделирование функционирования распределенной сетевой системы наземных пунктов является отдельной научно-технической задачей и в данной работе не рассматривается. В представленных базах данных КА и наземных пунктов содержится актуальная информация о характеристиках бортовых и наземных средств приема и передачи сигналов АИС.

Модель орбитального движения, относящаяся к баллистическим, задана отображением $\eta: C_j(t_k) \rightarrow C_j(t_{k+1})$, где $C_j(t_k), C_j(t_{k+1})$ — положение КА r_j в моменты t_k и t_{k+1} соответственно. Модель яв-

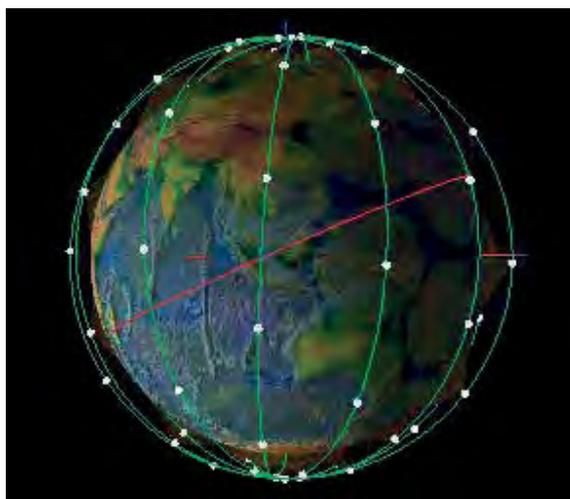
ляется динамической. Методы расчета орбитального движения КА являются общеизвестными и приведены, например, в работах [9, 10]. Для проверки корректности работы моделей ОГ КА и орбитального движения в разработанном программном комплексе имитационного моделирования реализован компонент трехмерной визуализации функционирования КС. Визуальное представление функционирования КС на примере ОГ КА Iridium NEXT изображено на рис. 3. В рассматриваемой ОГ 75 КА расположены в шести плоскостях по 11 в каждой и девять КА являются резервными. Модель Земли задается общим земным эллипсоидом с основными геометрическими параметрами: большая полуось $a = 6378,136$ км, коэффициент сжатия $\alpha = 1/298,258$.

Модель канала передачи информации учитывает расстояние $d(s_i, r_j) = d_{ij}$ от источника излучения s_i до радиоприемного устройства r_j , временные задержки Δt на распространение сигналов, ослабление мощности $L_1(d_{ij}, f)$ сигналов при их распространении в свободном пространстве, потери $L_2(\varphi)$ из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, эффект Доплера, диаграмму направленности передающей антенны и вероятность безошибочного приема сообщений.

Мощность E принятого сигнала радиоприемным устройством КА рассчитывается с использованием выражения

$$E = e + L_1(d_{ij}, f) + L_2(\varphi) + G,$$

где e — мощность излучения; G — коэффициент направленного действия.



■ **Рис. 3.** Трехмерная визуализация ОГ КА Iridium NEXT

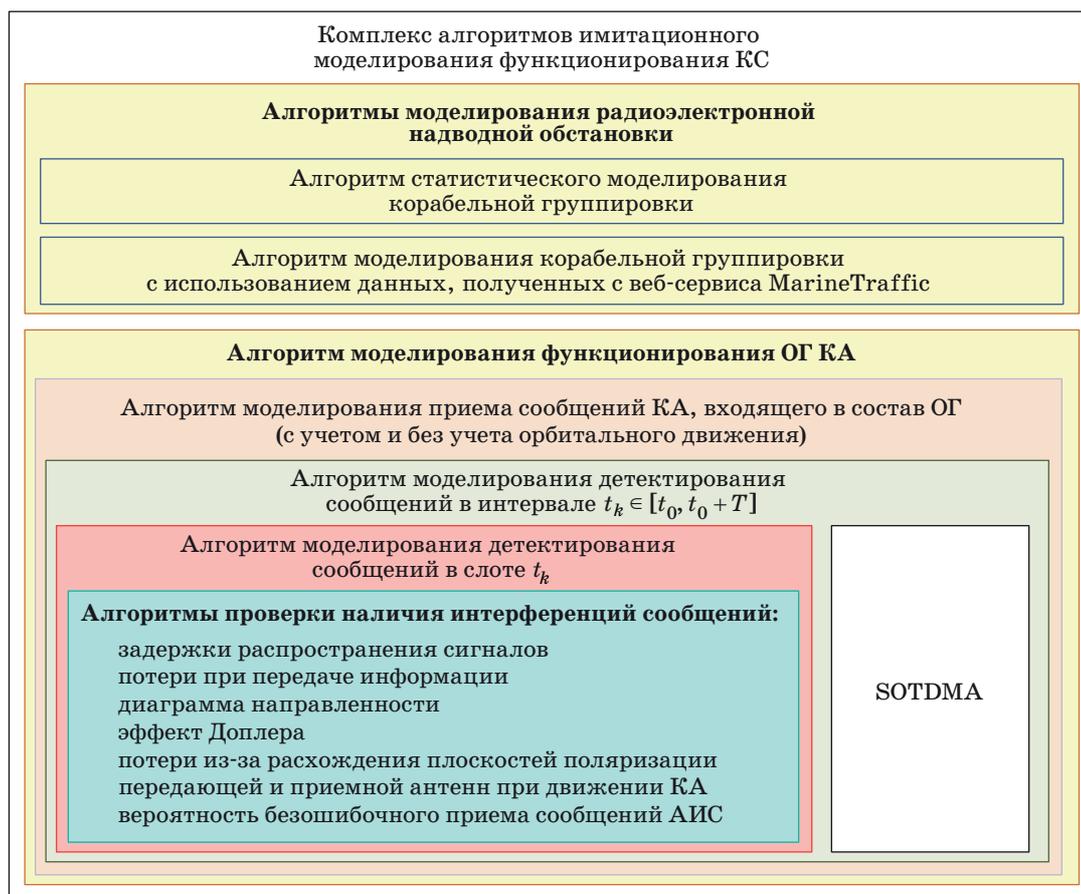
■ **Fig. 3.** The satellites Iridium NEXT constellation three-dimensional visualization

В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи [11] мощность сигнала для транспондеров класса А составляет 12 Вт (40,7 дБм), класса В — 2,5 Вт (34,0 дБм). Коэффициент направленного действия задается отображением $\mu: b \rightarrow G$, представляющим собой диаграмму направленности антенны АИС. Угол b возвышения КА над горизонтом определяется на каждом шаге моделирования и соответствует углу места КА в топоцентрической пунктовой системе координат $X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$, начало которой совпадает с центром размещения корабля — источника сообщений АИС s_i на поверхности земного эллипсоида, определяемой геодезической широтой B_i и долготой L_i . Ось X_{Π} направлена в сторону Северного полюса Земли по касательной к меридиану корабля s_i ; ось Y_{Π} — по внешней нормали к земному эллипсоиду, а ось Z_{Π} дополняет систему до правой [12].

Модель распределения сигналов реализуется специальным алгоритмом планирования задействования слотов для передачи сообщений каждой станцией SOTDMA (Self-Organized Time-Division Multiple Acces), исключающим по возможности коллизии сообщений, т. е. прием двух и более сообщений в одном слоте в районе прямой видимости морских судов [1, 13]. Считается, что доступ к каналу передачи информации осуществляется только с помощью алгоритма SOTDMA, т. е. суда работают в автономном (непрерывном) режиме, при этом фаза первого кадра длительностью одна минута завершена, а суда не меняют скорость и курс передвижения в течение интервала наблюдения.

Модель функционирования КС контроля движения морских судов реализована в виде комплекса алгоритмов, взаимосвязь которых схематически изображена на рис. 4. Разработанный комплекс алгоритмов позволяет задавать различные ограничения и допущения (задержки распространения сигналов, потери при передаче информации, диаграмму направленности, эффект Доплера, расхождение плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, вероятность безошибочного приема сообщения) и получать оценки целевых показателей функционирования КС в условиях, максимально приближенных к действительности.

Разработанный комплекс алгоритмов программно реализован. Исходными данными для моделирования являются время t_0 начала и интервал T моделирования, координаты морских судов в сферической геодезической системе координат, количество КА в ОГ и параметры их орбит, местоположение, скорость и курс передвижения морских судов — источников излучений сигналов АИС. Перед началом моделирования каждому из морских судов назначается множество сло-



■ **Рис. 4.** Комплекс алгоритмов имитационного моделирования функционирования КС
 ■ **Fig. 4.** Algorithms complex for space system functioning simulation

тов $T_i = \{t_1, \dots, t_{n_i}\}$, $n_i = \text{card}\langle T_i \rangle$ передачи сообщений исходя из их динамических характеристик (скорости и курса передвижения) [11].

В процессе работы программного комплекса для каждого тайм-слота $t_i \in [t_0, t_0 + T]$ выполняется следующая последовательность шагов:

1) рассчитывается текущее положение КА $r_j \in R$, $j = 1, \dots, M$, входящих в состав ОГ, по заданным начальным значениям оскулирующих элементов орбиты;

2) для КА $r_j \in R$, $j = 1, \dots, N_R$ определяется энергетическая доступность $v_r(s_i, r_j)$ источников излучений $s_i \in S$, $i = 1, \dots, N$ исходя из условий превышения минимально допустимого угла места $b(s_i, r_j)$ КА r_j в топоцентрической системе координат, связанной с местоположением анализируемого источника излучений s_i , и требуемого потока мощности сигналов АИС на входе приемника r_j с учетом потерь передачи в свободном пространстве, диаграммы направленности типовой судовой антенны АИС, потерь из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенны;

3) для всех объектов наблюдения $s_i | v_r(s_i, r_j) = 1$, находящихся в зоне покрытия КА r_j , проверяется

условие задействования анализируемого тайм-слота t_k для передачи сигнала и наличия коллизии с сообщениями других судов $s_k \in S$, $s_i \neq s_k$, с учетом задержки распространения сигналов от различных источников. Вычисляется вероятность безошибочного приема однослотового сообщения АИС, состоящего из 256 бит, с частотной модуляцией для отношения сигнал/шум, где энергия шума при наличии интерференции сигналов соответствует максимальной энергии одного из «мешающих» сообщений.

В случае больших объемов данных (при количестве источников излучений, составляющих надводную радиоэлектронную обстановку, свыше 500 тыс.), моделирование для ОГ, состоящих из 15 и более КА, может занимать достаточно продолжительное время, несмотря на распараллеливание вычислений для каждого КА отдельно с учетом ресурсов процессора (количества ядер). По этой причине в дальнейшем планируется разработать алгоритмы моделирования с использованием технологии массово-параллельных вычислений.

Результатом работы комплекса алгоритмов являются целевые показатели функционирова-

ния системы контроля движения морских судов, к которым следует отнести:

— количество $v_r(S, t)$ доступных (с энергетической точки зрения) судов от текущего положения одного или нескольких КА $r_j \in R, j = 1, \dots, M$ на орбите с заданными параметрами [8];

— зависимость количества $n_1(t, S)$ переданных сообщений от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_1(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

— зависимость количества $n_2(t, S)$ безошибочно принятых сообщений от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_2(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

— зависимость количества $n_3(t, S)$ судов, передавших хотя бы одно сообщение о своем местоположении, от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_3(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

— зависимость количества $n_4(t, S)$ обнаруженных судов от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_4(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

— среднее количество $N_1(T, S)$ переданных сообщений за интервал моделирования T ;

— среднее количество $N_2(T, S)$ безошибочно принятых сообщений за интервал моделирования T ;

— среднее количество $N_3(T, S)$ судов, передавших хотя бы одно сообщение о своем местоположении, за интервал моделирования T ;

— среднее количество $N_4(T, S)$ обнаруженных судов за интервал моделирования T ;

— среднее количество $N_4(T, S)$ обнаруженных судов в зависимости от региона наблюдения за интервал моделирования T .

Результаты имитационного моделирования функционирования КС автоматической идентификации морских судов

В целях анализа энергетической доступности сигналов АИС (оценивания количества $v_r(S, t)$ наблюдаемых судов от текущего положения одного или нескольких КА $r_j \in R, j = 1, \dots, M$ на орбите с заданными параметрами) предлагается два сценария проведения моделирования. В первом случае используется статическая модель функционирования КС (без учета орбитального движения) и предполагается равномерное распределение морских судов в зоне обзора КА, что позволит оценить экстремальные (минимальное и максимальное) значения мощности сигнала на входе

детектора при различных значениях мощности передатчика и запас по мощности с учетом различных значений чувствительности радиоприемного устройства. Во втором случае используется модель КА с учетом орбитального движения и реальной надводной радиоэлектронной обстановки, что дает возможность получить зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения) судов от региона наблюдения.

С учетом сказанного моделировались следующие сценарии.

1. Морские суда распределены равномерно в зоне обзора КА на земной поверхности. Модель Земли — ОЗЭ-1990 (большая полуось $a = 6378,136$ км, коэффициент сжатия $\alpha = 1/298,258$).

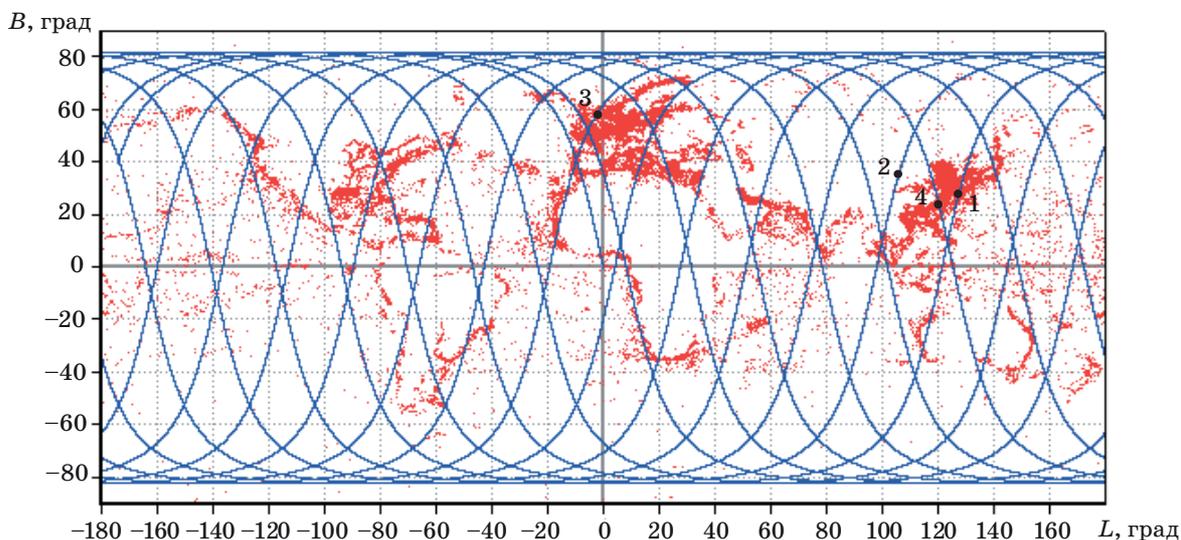
Статистические характеристики энергетических параметров сигналов системы АИС для КА на круговой орбите с высотой $h = 450$ км представлены в таблице (в графе «Запас по мощности» через черту указаны значения для приемников с чувствительностями -118 и -107 дБм соответственно). Значения получены путем статистического анализа энергетических характеристик сигналов, переданных объектами, равномерно распределенными в зоне обзора КА. Из анализа таблицы видно, что на границе зоны видимости КА сигналы являются доступными для приемника с чувствительностью -118 дБм, в то время как для приемника с чувствительностью -107 дБм даже при мощности переданного сигнала, равной $40,7$ дБм, запас составляет всего $5,2$ дБм, что соответствует вероятности безошибочного приема сообщения АИС для некогерентного демодулятора, близкой к нулю. При значении угла возвышения над горизонтом свыше 70 град сигналы являются энергетически недоступными для приемника с чувствительностью как -107 дБм, так и -118 дБм. В лучшем случае (взаимном расположении источника и приемника сигналов) для радиоприемного устройства с чувствительностью -118 дБм имеется гарантированный запас мощности для любого класса передающих устройств, для приемников с чувствительностью -107 дБм сигналы являются практически недоступными для передатчиков мощностью 34 дБм, — запас составляет всего $3,7$ дБм, что соответствует низкой вероятности безошибочного приема сообщений.

2. Моделирование движения КА — приемника сигналов АИС с параметрами орбиты: долгота восходящего узла $\Omega = 0$ град; наклонение $i = 98$ град; апогей $r_a = 450$ км; перигей $r_{II} = 450$ км; широта перицентра $\omega = 0$ град. Интервал моделирования составляет сутки ($86\,400$ с), время t_0 начала моделирования соответствует положению КА на орбите с истинной аномалией $\theta_0 = 0$ град.

Точками на рис. 5, где изображены местоположения объектов наблюдения — источников сообщений АИС и трасса полета КА с заданными

- Статистические характеристики энергетических параметров сигналов АИС для КА на круговой орбите с высотой $h = 450$ км
- AIS signals energy parameters statistical characteristics for satellite in a circular orbit with a height $h = 450$ km

Характеристика	Граница зоны видимости	Максимум суммарных потерь	Минимум суммарных потерь	Средние суммарные потери	
Суммарные потери, дБм	-142,495	-149,833	-137,312	-139,999	
Расстояние $d(s_i, r_j)$ от источника s_i до приемника r_j , км	2406,520	481,738	787,129	1570,680	
Потери мощности на распространение $L_1(d_{ij}, f)$, дБ	-144,218	-130,247	-134,457	-140,458	
Угол возвышения над горизонтом, град	0,357	68,401	31,945	9,901	
Коэффициент усиления антенны, дБи	2,000	-19,583	-2,813	0,688	
Угол между плоскостями поляризаций приемной и передающей антенн $\varphi(s_i, r_j)$, град	20,653	1,484	5,622	13,110	
Потери из-за расхождения плоскостей поляризации приемной и передающей антенн $L_2(\varphi_{ij})$, дБ	-0,577	-0,00292	-0,0419	-0,229	
Запас по мощности, дБм	34,0	9,495 / -1,495	2,167 / -8,833	14,688 / 3,688	12,001 / 1,001
	40,7	16,205 / 5,205	8,867 / -2,133	21,388 / 10,388	18,701 / 7,701

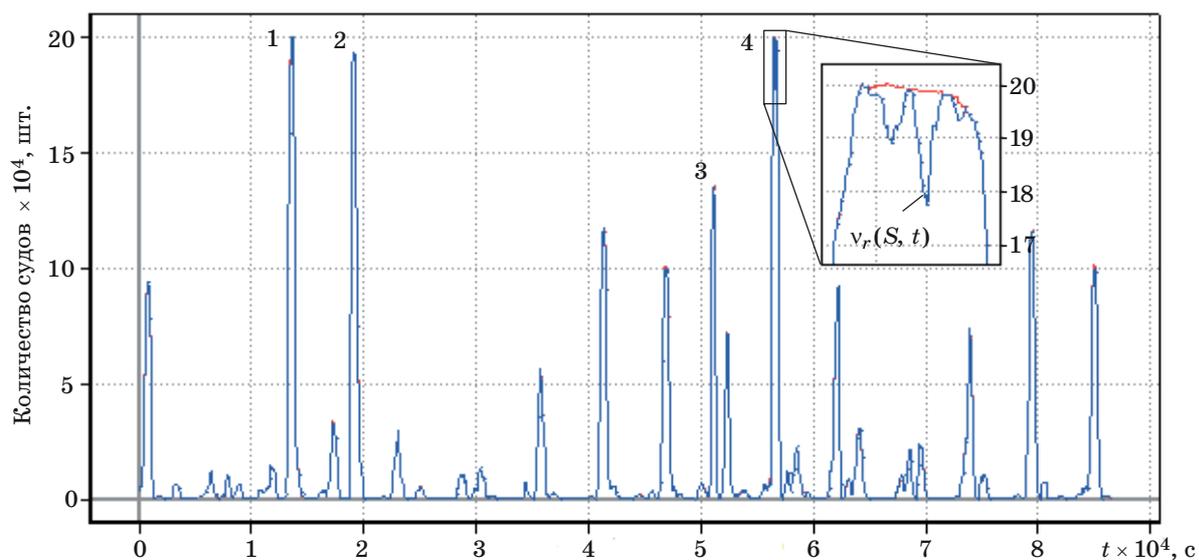


■ Рис. 5. Распределение источников излучений АИС на земной поверхности и трасса полета КА
 ■ Fig. 5. The AIS signals emission sources distribution on the Earth and satellite trace

параметрами, обозначены положения КА, в которых наблюдается наибольшее количество видимых (с энергетической точки зрения) морских судов.

На рис. 6 представлены графики количества судов $v(S, t)$, находящихся в зоне обзора КА r_k , и количества судов $v_r(S, t)$, находящихся в зоне

обзора КА, с учетом их энергетической доступности, где S — множество анализируемых судов $s_i \in S, i = 1, \dots, N, t$ — момент моделирования $t \in [t_0, t_0 + T]$. Цифры 1–4 на рис. 5 и 6 являются взаимно однозначными. Отсутствие радиовидимости судов обусловлено направленными свойствами передающих антенн АИС. Так как диа-



■ **Рис. 6.** Количество судов $v(S, t)$, попавших в зону обзора КА, и судов $v_r(S, t)$ в зоне обзора с учетом энергетической доступности

■ **Fig. 6.** The number of ships $v(S, t)$ in the satellite view area, and ships $v_r(S, t)$ in the view area, taking into account the energy availability

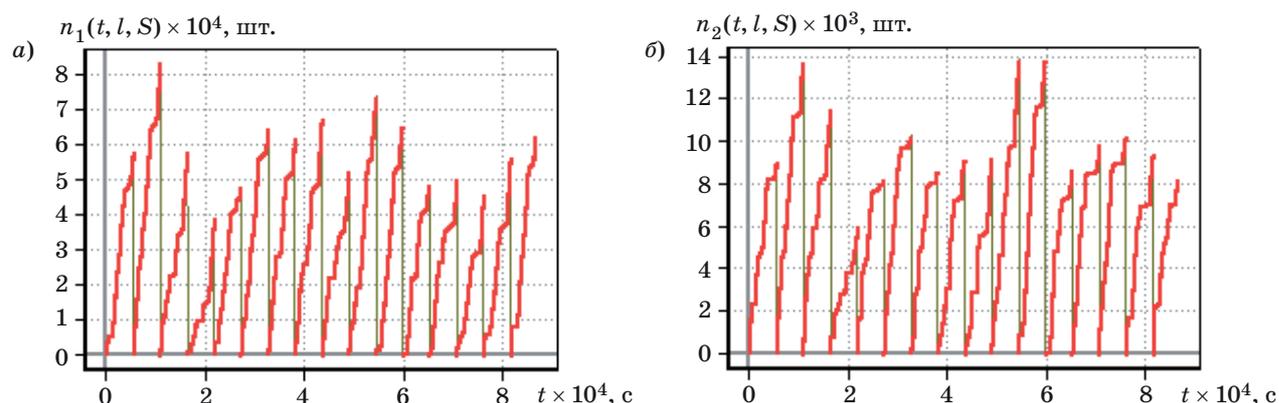
грамма направленности типовой антенны АИС представляет собой тор, сигналы, излучаемые кораблями, для которых КА находится в зените или близко к этой точке, ослабляются ниже заданного порогового значения мощности приема. Анализ зависимости, приведенной на рис. 6, показывает, что коэффициент энергетической доступности не принимает значения менее 80 %. При проведении моделирования пороговое значение ослабления по мощности сигналов принималось равным -108 дБм, что соответствует вероятности ошибки приема однослотового сообщения АИС, состоящего из 256 бит, равной 20 % (при этом чувствительность радиоприемного устройства равна -118 дБм). Данное значение рекомендовано Международной комиссией по электросвязи [14, 15].

Следует отметить, что максимальное количество $v_r(S, t)$ радиовидимых судов сильно колеблется в зависимости от региона, наблюдаемого КА. Регионами с наибольшим количеством радиовидимых судов являются районы Северного и Средиземного морей и район Южно-Китайского моря, при этом значение $v_r(S, t)$ достигает 120 тыс. и 199 тыс. кораблей соответственно. Это достаточно большое количество, и, учитывая загруженность канала сообщениями, требуются схемно-технические решения (например, пространственно-разнесенного приема), чтобы снизить вероятность интерференций сообщений. Результаты моделирования в виде графиков зависимостей количества $n_1(t, l, S)$ безошибочно принятых сообщений и количества $n_2(t, l, S)$ обнаруженных судов от времени моделирования t и

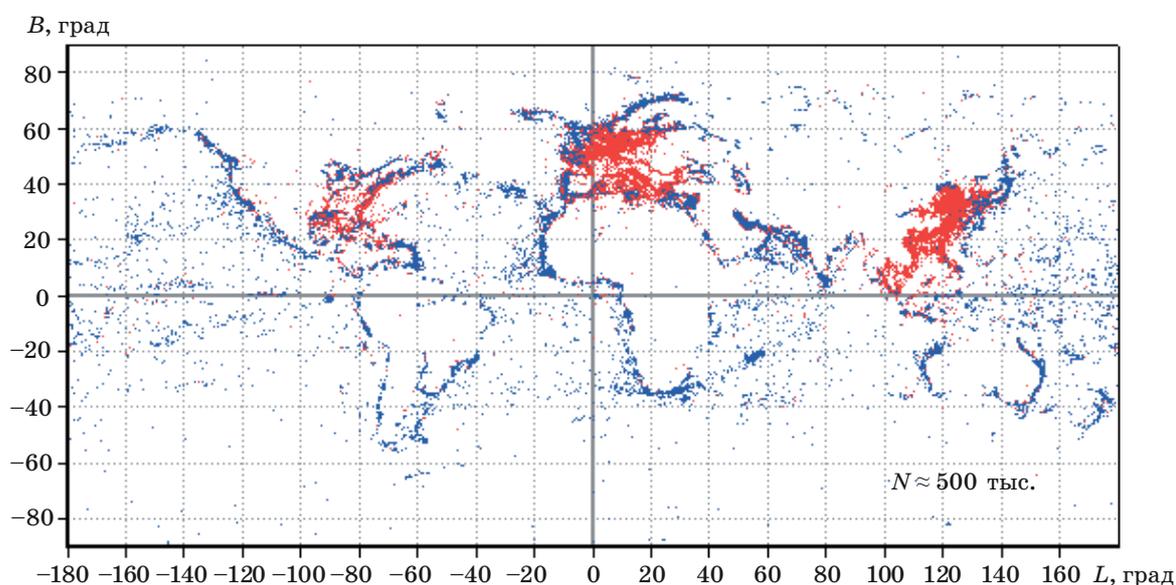
текущего витка $l = 1, \dots, 15$ для КА на круговой орбите с высотой $h = 300$ км (высота орбиты снижена для уменьшения вероятности коллизии сообщений) представлены на рис. 7, а и б.

Минимальное значение количества безошибочно принятых сообщений составляет 38 540 ($l = 4$), максимальное — 83 247 ($l = 2$), среднее — 57 634, минимальное количество обнаруженных судов за один виток составляет 5963 ($l = 4$), максимальное — 13 776 ($l = 10$), среднее — 10 021 шт. Общее количество детектированных сообщений за время моделирования ($T = 86\,400$ с) составляет $N_1(T, S) = 926\,458$, общее количество обнаруженных судов $N_2(T, S) = 65\,812$. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, опубликованными в открытых источниках информации, в том числе в работе [1]. Схема расположения обнаруженных (синие) и не обнаруженных (красные) судов представлена на рис. 8. Анализ полученных результатов позволяет определить зависимость среднего количества обнаруженных судов от региона и времени наблюдения T . Очевидно, что наиболее трудными с точки зрения обнаружения корабельных группировок, как и ожидалось, являются регионы Средиземного и Северного морей и регион Южно-Китайского моря. На рисунке видно, что имеются «слепые» зоны из-за высокой загруженности канала передачи информации и интерференции сообщений.

С использованием полученных оценок целевых показателей возможно обосновать ряд схемно-технических решений, например, задаваясь местоположением наземных пунктов приема и



■ **Рис. 7.** Результаты моделирования для КА на круговой орбите с высотой $h = 300$ км: *а* — количество $n_1(t, l, S)$ принятых сообщений; *б* — количество $n_2(t, l, S)$ обнаруженных судов
 ■ **Fig. 7.** The simulation results for a satellite in a circular orbit with a height $h = 300$ км: *a* — the received messages number $n_1(t, l, S)$; *б* — the detected ships number $n_2(t, l, S)$



■ **Рис. 8.** Визуализация местоположений обнаруженных морских судов на земной поверхности
 ■ **Fig. 8.** Detected vessels locations on the Earth's surface visualization

обработки информации, определить требования к объему бортового запоминающего устройства и скорости передачи информации.

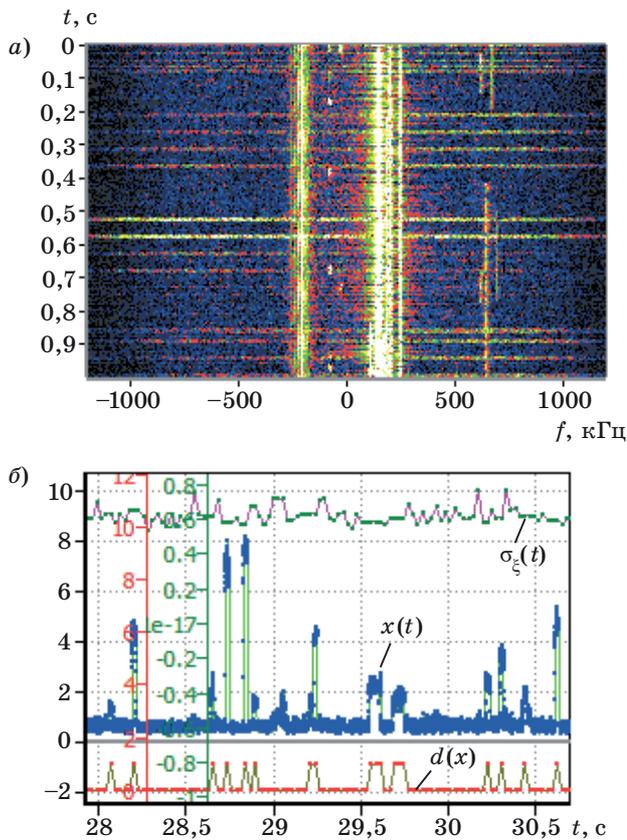
Экспериментальные исследования и верификация имитационной модели функционирования системы автоматической идентификации морских судов

Адекватность разработанной имитационной модели подтверждается статистически незначительным отличием полученных с использованием имитационного моделирования оценок среднего количества обнаруженных объектов наблюдения

с результатами аналитических выражений, предложенных другими авторами [14, 16, 17]. Также в целях верификации предлагаемой модели проводился натурный эксперимент с использованием авиационного макета бортовой специальной аппаратуры приема и обработки сигналов АИС.

Эксперимент проводился в три этапа. Первый этап включал проверку работоспособности всех составных частей макета и оценивание технических характеристик радиоприемного устройства. На втором этапе проводилась запись радиосигналов на стационарных наземных пунктах и на летно-подъемном средстве в различных режимах и конфигурациях макета. Обработка полученных экспериментальных данных и анализ результатов составляли суть третьего этапа.

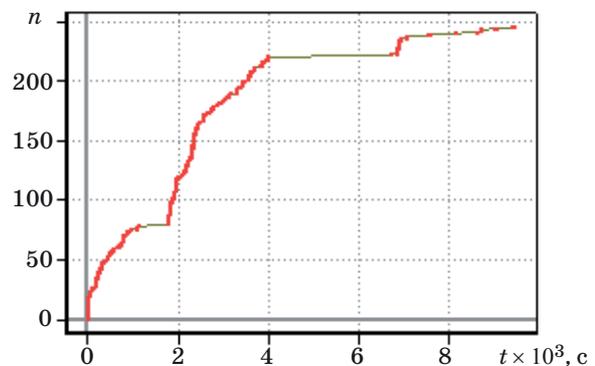
Результаты обработки оцифрованного радиосигнала с использованием созданного специального программно-математического обеспечения представлены на рис. 9. На рис. 9, а изображена частотно-временная развертка сигнала, записанного на летно-подъемном средстве в районе Финского залива, с центральной частотой $f_0 = 162,050$ МГц и шириной полосы $\omega = 2,4$ МГц длительностью 1 с и шириной окна дискретного преобразования Фурье 0,42(6) мс (1024 отчета), анализ которой позволяет выделить помехи как распределенные по всей полосе частот (белый шум), так и сконцентрированные на определенных частотах (паразитные излучения бортовой аппаратуры летно-подъемного средства и излучение обзорных радиолокаторов аэродрома), что в целом говорит о сложной сигнально-шумовой обстановке. На частотах, смещенных относительно центральной частоты f_0 на -25 и -75 кГц, также отчетливо видны сигналы АИС. Определение количества переданных сигналов АИС выполнялось с использованием «плавающего» порогового значения отношения сигнал/шум на анализируемом интервале времени, адаптирующегося к текущему уровню энергии $\sigma(t)$ шу-



■ **Рис. 9.** Анализ оцифрованного радиочастотного сигнала: а — частотно-временная развертка; б — энергетический обнаружитель
 ■ **Fig. 9.** Digitized radio frequency signal analysis: а — time-frequency scan; б — energy detector

ма. На рис. 9, б изображены амплитуда отфильтрованного сигнала на частоте $f_1 = 161,975$ МГц и шириной $\omega = 9,6$ кГц, график текущего значения энергии $\sigma(t)$ шума и решающая функция $d(x)$, принимающая значение 1, если в слоте есть сигнал, иначе 0.

Количество безошибочно принятых сообщений оценивалось по результатам работы программно реализованного демодулятора GMSK и декодера АИС сообщений. Определены зависимости числа декодированных сообщений от значения коэффициента усиления малошумящего усилителя при различных конфигурациях макета бортовой специальной аппаратуры в наземных и летных условиях его эксплуатации. Экспериментально полученная зависимость количества n обнаруженных судов от времени t наблюдения изображены на рис. 10. Разрывы на графике обусловлены переключениями режимов работы аппаратуры, а также перерывами между полетами. Общая продолжительность наблюдения составляет около 90 мин. Значения количества переданных сообщений АИС, полученные с использованием имитационной модели, статистически незначимо отличаются от значений соответствующих характеристик в условиях реальной надводной обстановки. В то же время количество безошибочно принятых сообщений существенно отличается от соответствующей характеристики, полученной в результате моделирования. Это обусловлено неидеальностью демодулятора (в моделировании принимается идеальная зависимость вероятности безошибочного приема сообщений от уровня сигнал/шум для некогерентного демодулятора), сложной шумовой обстановкой в зоне аэродрома и электромагнитным излучением бортовой аппаратуры летно-подъемного средства. Перечисленные факторы снижают вероятность безошибочного приема сообщений.



■ **Рис. 10.** Зависимость количества обнаруженных объектов от времени наблюдения
 ■ **Fig. 10.** Detected objects number dependence on the observation time

В целом результаты эксперимента подтверждают адекватность модели и возможность ее применения для расчета показателей функционирования систем автоматической идентификации морских судов.

Заключение

Отличительной особенностью представленной имитационной модели спутниковой автоматической идентификационной системы является возможность задавать различные ограничения и допущения (модель распределения источников излучений, модель планирования задействования слотов для передачи сообщений, модель канала распространения сигналов), что, с одной стороны, позволяет сравнивать результаты моделирования с оценками, полученными другими авторами, в том числе и с помощью аналитических выражений, а с другой стороны, получать оценки целевых показателей функционирования КС в условиях, максимально приближенных к действительности.

Имитационная модель функционирования КС может быть использована для решения следующих задач:

— оценивания энергетической доступности сигналов для различных вариантов структур ОГ

КА и других условий (с учетом различных допущений и ограничений при моделировании);

— оценивания количественных показателей обнаружения судов для заданной структуры ОГ КА;

— выбора параметров ОГ КА для заданных показателей обнаружения морских судов;

— подготовки исходных данных и обоснования тактико-технических требований для проектируемых опытных образцов космической техники, в частности, задаваясь местоположением наземных пунктов приема и обработки информации, можно определить требования к объему бортового запоминающего устройства и скорости передачи информации.

Корректность работы предложенных алгоритмов моделирования функционирования КС автоматической идентификации морских судов подтверждается проверкой статистических гипотез о равенстве полученных экспериментальных значений количества переданных сообщений судами в заданном территориальном районе, количества безошибочно принятых сообщений, количества обнаруженных объектов за заданный интервал времени и результатов имитационного моделирования, что позволяет говорить об успешном решении поставленной задачи.

Литература

1. Кузнецов А. М., Романов А. А., Романов А. А. Моделирование приема коллизий сигналов АИС на борту КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 1. С. 25–36.
2. Chen Y. Detection Probability Analysis of Space-Based Ais Signal by Using Geometrical Model // Journal of Shipping and Ocean Engineering. 2014. Vol. 4. P. 161–171.
3. Høyе G., Eriksen T., Meland B.J., Narheim G. Space-Based Ais for Global Maritime Traffic Monitoring // Acta Astronautica. 2008. Vol. 62. P. 240–245.
4. Trong T. V., Dinh Q. T., Van T. D., Quang H. P., Nguyen H. Constellation of Small Quick-Launched and Self-Deorbiting Nano-Satellites with AIS Receivers for Global Ship Traffic Monitoring // Proc. 2nd Nano-Satellite Symp., Tokyo, Japan, March 2011. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:424564/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).
5. Романов А. А., Романов А. А., Тюлин А. Е. Мало-размерные космические аппараты мониторинга подвижных объектов ОАО «Российские космические системы»: состояние и перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 1. С. 3–10.
6. Marine Traffic. Визуализация местоположений морских судов в реальном времени на карте земной поверхности. <https://www.marinetraffic.com/ru> (дата обращения: 05.11.2016).
7. VesselFinder. Визуализация местоположений морских судов в реальном времени на карте земной поверхности. <https://www.vesselfinder.com> (дата обращения: 05.11.2016).
8. Скороходов Я. А., Малышев Д. В. Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования // Информация и космос. 2017. № 4. С. 143–147.
9. Нариманов Г. С. Основы теории полета космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1972. — 608 с.
10. Суханов А. А. Астродинамика. — М.: Ин-т космических исследований РАН, 2010. — 201 с.
11. Технические характеристики системы автоматической идентификации, использующей многостанционный доступ с временным уплотнением каналов в полосе ОБЧ морской подвижной службы. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-4-201004-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 10.09.2016).
12. Лысенко Л. Н. Наведение и навигация баллистических ракет. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 669 с.
13. Menghui Y., Yongzhong Z., Li F. Collision and Detection Performance with Three Overlap Signal Colli-

- sions // Space-Based AIS Reception: Proc. of 11th Intern. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, Liverpool, United Kingdom, Jun. 25–27, 2012. P. 1641–1648.
14. REPORT ITU-R M.2084. Satellite Detection of Automatic Identification System Messages. <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2084> (дата обращения: 05.09.2016).
15. REPORT ITU-R M.2169. Improved Satellite Detection of AIS. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2169-2009-PDF-E.pdf (дата обращения: 05.09.2016).
16. Mendes S., Amado S., Teresa V., Scorzolini A., Perini V., Sorbo A. Satellite AIS — an End-to-End Simulation Approach // Proc. 11th Intern. WS on Simulation & EGSE Facilities for Space Programmes, Noordwijk, Netherlands, Sept. 28–30, 2010. <https://indico.esa.int/indico/event/109/session/15/contribution/48/material/0/0.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).
17. Chen Y. Research on Detection Probability of Space-based AIS for Real Scenarios. <http://ijssst.info/Vol-17/No-30/paper3.pdf> (дата обращения: 05.09.2016). doi: 10.5013/IJSSST.a.17.30.03

UDC 621.390

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

Modeling the Space Segment of Sea Vessel Identification SystemSkorokhodov Ya. A.^a, PhD, Tech., yaroslavskor@gmail.comAndreev A. M.^a, PhD, Tech., Associate Professor, aandreev961@yandex.ru^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Live experiments with detachable elements (final stages) of carrier rockets, transfer orbit stages and satellites in order to evaluate the potential for receiving automatic identification system signals in space are expensive. In some cases, using results of mathematical modeling is sufficient to obtain well-founded solutions for space system design and to plan the application of an orbital constellation in the future. **Purpose:** Developing a simulation model of space system functioning for automatic identification of sea vessels. **Results:** We have developed and implemented a simulation model which allows you to estimate the target indicators of space systems for sea vessel identification and locating, taking into account various spatial and energy factors and conditions for radio signal propagation, as well as the actual location of the controlled objects in the World ocean or coastal zones. With this model, varying its constraints and assumptions, you can, on the one hand, to compare the simulation results with analytical calculations and, on the other hand, to obtain estimates of space system target indicators under conditions as close to reality as possible. The adequacy of developed models and algorithms is confirmed by experimental studies of a sea vessel automatic identification system. **Practical relevance:** The presented model can be used to solve the following problems: estimating quantitative indicators of vessel detection quality for a given orbital constellation structure; selecting orbital constellation parameters for given indicators of sea vessel detection; evaluating the energy availability of the signals for various orbital motion parameters and other conditions.

Keywords — Automatic Identification System, Information Processing, Simulation Modeling, Space Systems.

Citation: Skorokhodov Ya. A., Andreev A. M. Modeling the Space Segment of Sea Vessel Identification System. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 36–48 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

References

- Kuznetsov A. M., Romanov A. A., Romanov A. A. Model for Receiving AIS Signals Collisions on Space. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 25–36 (In Russian).
- Chen Y. Detection Probability Analysis of Space-based AIS Signal by Using Geometrical Model. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 2014, vol. 4, pp. 161–171.
- Hoye G., Eriksen T., Meland B. J., Narheim G. Space-based AIS for Global Maritime Traffic Monitoring. *Acta Astronautica*, 2008, vol. 62, pp. 240–245.
- Trong T. V., Dinh Q. T., Van T. D., Quang H. P., Nguyen H. Constellation of Small Quick-Launched and Self-Deorbiting Nano-Satellites with AIS Receivers for Global Ship Traffic Monitoring. *Proc. 2nd Nano-Satellite Symp.*, Tokyo, Japan, March 2011. Available at: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:424564/FULLTEXT01.pdf> (accessed 05 September 2016).
- Romanov A. A., Romanov A. A., Tyulin A. E. Small Satellites for Vessels and Airplanes Monitoring in JSC “Russian Space System”: Status and Perspectives. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 3–10 (In Russian).
- Marine Traffic*. Available at: <https://www.marinetraffic.com/ru> (accessed 05 November 2016).
- VesselFinder*. Available at: <https://www.vesselfinder.com> (accessed 05 November 2016).
- Skorokhodov Ya. A., Malyshev D. V. The Analysis of ADS-B Signals Energy Availability to Low-Space Satellites with Use of Statistical Modeling. *Informatsiia i kosmos*, 2017, no. 4, pp. 143–147 (In Russian).
- Narimanov G. S. *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Space Vehicles Flight Theory Fundamentals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 608 p. (In Russian).
- Sukhanov A. A. *Astrodinamika* [Astrodynamics]. Moscow, Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN Publ., 2010. 201 p. (In Russian).
- Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time-Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Band*. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1371-3-200706-S/en> (accessed 10 September 2016).
- Lysenko L. N. *Navedenie i navigatsiia ballisticheskikh raket* [Ballistic Missiles Guidance and Navigation]. Moscow, MGTU im. N. E. Baubana Publ., 2007. 669 p. (In Russian).

13. Menghui Y., Yongzhong Z., Li F. Collision and Detection Performance with Three Overlap Signal Collisions. *Proc. of 11th Intern. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications "Space-based AIS Reception"*, Liverpool, United Kingdom, Jun. 25–27, 2012, pp. 1641–1648.
 14. *REPORT ITU-R M.2084. Satellite Detection of Automatic Identification System Messages*. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2084> (accessed 05 September 2016).
 15. *REPORT ITU-R M.2169 Improved Satellite Detection of AIS*. Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2169-2009-PDF-E.pdf (accessed 05 September 2016).
 16. Mendes S., Amado S., Teresa V., Scorzolini A., Perini V., Sorbo A. Satellite AIS — an End-to-End Simulation Approach. *Proc. 11th Intern. WS on Simulation & EGSE Facilities for Space Programmes*, Noordwijk, Netherlands, September 28–30, 2010. Available at: <https://indico.esa.int/indico/event/109/session/15/contribution/48/material/0/0.pdf> (accessed 05 September 2016).
 17. Chen Y. *Research on Detection Probability of Space-based AIS for Real Scenarios*. Available at: <http://ijssst.info/Vol-17/No-30/paper3.pdf> (accessed 05 September 2016). doi:10.5013/IJSSST.a.17.30.03
-

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющихся в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.
