

# **СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Я.А. Скороходов, В.И. Архангельская (Санкт-Петербург)**

## **Введение**

В течение последних десяти лет активно развиваются и внедряются в систему обеспечения безопасности мореплавания технологии и системы идентификации и определения местоположения морских судов, сбора сведений о маршрутах и динамике их движения, в частности, автоматическая идентификационная система (АИС) [1]. АИС обеспечивает существенную экономию энергетических ресурсов, оптимизируя маршруты движения морских судов в режиме реального времени, своевременное оповещение при возникновении нештатных и аварийных ситуаций, более эффективное осуществление логистических и портовых операций с учетом высокоточных прогнозов прибытия судов, а также контроля рыболовной деятельности и другие функции.

Несмотря на наличие специализированных интернет-ресурсов, например [6], предоставляющих возможность следить за перемещением морских судов гарантии полноты, оперативности и достоверности получаемых сведений фактически отсутствуют, в связи с чем использование перечисленных сервисов в критически важных отраслях народного хозяйства сопряжено с определенным риском и многие суверенные государства планируют иметь независимый информационный доступ к передаваемым в радиоэфир данным.

Единственным способом контроля движения морских судов в Мировом океане, а также прибрежных зонах иностранных государств является прием сигналов АИС с помощью спутников. Проведение натурных исследований с использованием экспериментальных космических аппаратов (КА) или средств выведения, например разгонных блоков, является дорогостоящей операцией. В ряде случаев для выработки обоснованных решений, а также планирования применения орбитальной группировки в будущем достаточным является использование результатов математического моделирования.

Целью работы является разработка модельно-алгоритмического комплекса оценивания показателей качества (полноты и оперативности доведения информации и др.) функционирования космических систем (КС) автоматической идентификации морских судов и подхода к оптимальному выбору их проектно-баллистических характеристик.

## **1. Тенденции развития спутниковых систем автоматической идентификации морских судов**

В настоящее время актуальным и востребованным является создание спутникового сегмента системы автоматической идентификации морских судов, позволяющей обеспечить глобальность и непрерывность мониторинга движения морских судов. Развитие микроэлектроники способствовало широкому внедрению многоспутниковых систем малых и сверхмалых КА, в том числе с полезной нагрузкой, обеспечивающей прием, обработку и ретрансляцию сигналов АИС. Учитывая относительно недорогую стоимость изготовления и запуска наноспутников, достаточно широкий перечень стран имеют или планируют иметь спутниковую систему автоматической идентификации морских судов, обеспечивающую независимый информационный доступ к передаваемым в радиоэфир данным.

Систематизация сведений о составе и характеристиках космических средств контроля движения морских судов позволила сделать вывод, что наибольшей динамикой их развитие характеризуется в США, планирующих иметь в составе национальной группировки КА не менее 5 подобных систем (Iridium NEXT, AprizeSat, Lemur-2, Orbcom OG2, Perseus-M), а также повышенный интерес, проявляют Германия, Канада, Норвегия, Китай, Дания, Испания, Китай, Индонезия, Япония. В России в 2014 г. был запущен КА «Ресурс-П» № 2, на борту которого в качестве дополнительной нагрузки установлен радиокомплекс, предназначенный для приёма радиосигналов с морских судов и их автоматической идентификации.

Существующие и перспективные орбитальные группировки (ОГ) КА с возможностью приема и обработки сигналов АИС (КА – АИС) различаются по баллистической структуре и по количеству входящих в их состав КА в широком диапазоне. Прежде всего, это обусловлено тем, что орбитальная структура определяется основным назначением системы, а прием сигналов АИС является дополнительной функцией КА (например, «Iridium NEXT»), или приоритетностью наблюдения за определенным географическим районом («LAPAN-A2», «VesselSat-1,-2»).

Моделирование сложных технических систем является одним из этапов в процессе их проектирования и создания, предназначенным для обоснования схемно-конструкторских решений, от которых в дальнейшем зависит эффективность целенаправленного применения создаваемых образцов техники.

Сложность моделирования космических систем наблюдения за движением воздушных и морских судов обусловила выбор моделей для оценивания целевых показателей их функционирования в пользу имитационных [2, 3, 4, 5].

## 2. Имитационная модель функционирования космической системы автоматической идентификации морских судов

Структура разработанной модели функционирования КС изображена на рис. 1.

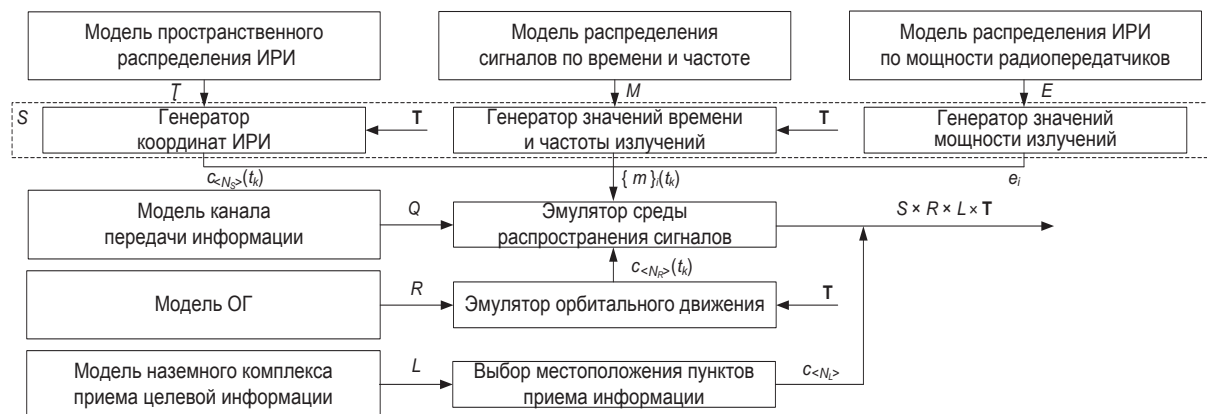


Рис. 1. Структура модели функционирования КС автоматической идентификации морских судов

Модель радиоэлектронной обстановки является подмножеством декартова произведения множеств

$$S \subset I \times T \times M \times E, \quad (1)$$

где  $I$  – индексное множество;

$T$  – множество трасс движения морских судов;

$M$  – множество сигналов;

$E$  – множество значений мощности радиопередатчиков.

Множество  $\mathcal{T}$  трасс движения источников радиоизлучений (ИРИ) есть подмножество  $C \times T = \{ (c, t) \mid c \in C, t \in T \}$ ,

где  $C = \{ (b, l, h) : -90 \leq b \leq 90, -180 \leq l \leq 180, h \in \mathcal{R}^+ \}$  – множество координат ИРИ в геодезической системе координат,

$T = [t_0, t_0 + \tau]$ ,  $t_0$  – момент начала моделирования,

$\tau$  – интервал моделирования, т.е. трасса  $t \in \mathcal{T}$  есть множество  $\{ c(t_k) \}$  координат, соотнесенных с моментом времени  $t_k \in [t_0, t_0 + \tau]$ ,

$\mathcal{R}^+$  – множество положительных рациональных чисел. Трассы движения ИРИ определяются из анализа воздушного или морского трафика за определенный промежуток времени [2].

Множество  $M$  сигналов есть подмножество  $T \times D \times F = \{ (t, d, f) : t \in \mathcal{R}^+, d \in D, f \in F \}$ ,  $D$  – множество значений длительности сигналов,  $D = \{ 26,7 \text{ мс} \}$ ,  $F$  – множество значений частоты передачи сигналов,  $F = \{ 161,975 \text{ МГц}, 162,025 \text{ МГц} \}$ .

Множество значений мощности радиопередатчиков  $E = \{ 2,5 \text{ Вт}, 12,5 \text{ Вт} \}$ .

Модель ОГ определяется множеством  $R \subset J \times C \times T = \{ (\Omega, i, r_a, r_p, \omega, \theta, t) : 0 < \Omega < 360, 0 < i < 180, r_a, r_p \in \mathcal{R}^+, 0 < \omega < 360, 0 < \theta < 360, t \in \mathcal{R}^+ \}$ , где  $J$  – индексное множество,  $J = \{ 1, \dots, N_R \}$ ,  $\Omega$  – долгота восходящего узла,  $i$  – наклонение орбиты,  $r_a$  – высота апогея,  $r_p$  – высота перигея,  $\omega$  – широта перицентра,  $\theta$  – истинная аномалия.

Структура ОГ описывается множеством  $c_{<N_R>}(t_0) = \{ c_j(t_0) : j \in J \}$ , где  $c(t_0) = [\Omega, i, r_a, r_p, \omega, \theta(t_0)]$ ,  $N_R$  – количество моделируемых КА, входящих в состав ОГ.

Модель  $Q$  канала передачи информации является аналитической и определяет потери энергии сигналов исходя из взаимного расположения источников радиоизлучения и КА.

Модель наземного комплекса приема целевой информации задается множеством  $L = \{ c_z \mid z = 1, \dots, N_L \}$  координат местоположения наблюдательных пунктов.

Математическая постановка задачи оценивания показателей качества функционирования КС автоматической идентификации и определения местоположения морских судов можно сформулировать следующим образом. При заданных множествах  $S$ ,  $R$  и  $L$  и ограничениях  $Q$  найти отображение  $\lambda$

$$\lambda : S \times R \times L \times \mathbf{T} \xrightarrow{Q} \mathbf{Y},$$

где  $\mathbf{Y}$  – где вектор показателей качества функционирования КС,  $\mathbf{T}$  – множество моментов времени,  $\mathbf{T} = \{ t_0, t_0 + 1, \dots, t_0 + \tau \}$ .

### 3. Алгоритм оценивания показателей качества функционирования космических систем автоматической идентификации морских судов

Алгоритм состоит из нескольких этапов. На предварительном этапе формируется множество ИРИ  $S \subset I \times \mathcal{T} \times E \times F$ , т.е. каждому из ИРИ  $s_i$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ) в соответствии с заданными распределениями назначаются координаты  $c_i$  (трассы  $\mathcal{T}_i$ ), мощность  $e_i$  и частота  $f_i$  излучений.

В процессе моделирования для каждого момента времени  $t_k \in \mathbf{T}$  выполняется следующая последовательность действий:

1) рассчитывается текущее положение КА  $r_j \in R$ ,  $j = 1, \dots, N_R$ , входящих в состав ОГ, по заданным начальным значениями оскулирующих элементов орбиты и координаты активных ИРИ  $s_i \mid a_i(t_k) = 1, \sum_{i=0}^{N_S} a_i(t_k) < N_S$ ;

2) проверяется условие  $t_k \% t_u(i) = 0$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ), где  $t_u(i) \in T_u = \{ (3, \dots, 7) * 60 \}$  – время резервирования временных слотов. Для ИРИ  $s_i \mid t_k \% t_u(i) = 0$  выполняется алгоритм планирования использования тайм-слотов – SOTDMA, значение  $t_u$  интервала обновления для каждого объекта генерируется датчиком случайных чисел, результатом выполнения алгоритма является множество  $T_i = \{ t_1, \dots, t_{n_i} \}$ ,  $n_i = \text{card}(T_i)$  индексов слотов, принадлежащее объекту  $s_i$ ;

3) для КА  $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$  определяется пространственно-энергетическая доступность  $v_r(s_i, r_j)$  источников излучений  $s_i$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ) исходя из условий превышения минимально допустимого угла места  $\beta(s_i, r_j)$  КА  $r_j$  в топоцентрической системе координат, связанной с местоположением анализируемого источника излучений  $s_i$ , и требуемого потока мощности сигналов АИС на входе приемника  $r_j$  в соответствии с заданной моделью среды распространения сигналов, мощностью излучений и чувствительностью радиоприемного устройства;

4) для всех объектов наблюдения  $s_i \mid v_r(s_i, r_j) = 1$ , находящихся в зоне покрытия КА  $r_j$ , выполняется алгоритм генерирования сигналов и формируется список  $\mathbf{M}_j = \{ M_{ji} : v_r(s_i, r_j) = 1 \}$  сообщений с привязкой к источнику излучения  $s_i$  и его характеристикам (мощности передатчика и др.);

5) для каждого из сообщений в списке  $\mathbf{M}_j$  проверяется условие наличия коллизии с другими сообщениями  $m_{ji}, m_{jk}$ , где  $m_{ji}, m_{jk} \in \mathbf{M}_j, i, k = 1, \dots, |\mathbf{M}_j|, i \neq k$ , учитывая задержки распространения сигналов от различных источников, потери мощности и т.д. Принимается решение о безошибочном приеме сообщения в зависимости от отношения сигнал/шум, где энергия шума при наличии интерференции сигналов соответствует максимальной энергии одного из «мешающих» сообщений;

6) в случае правильного детектирования сообщения источник  $s_i$ , его передавший, считается идентифицированным;

7) формируется информация как интегрированная за интервал моделирования  $t \in [t_0, t_k]$ , так и текущая, относящаяся к секунде  $t_k$ .

Результатом работы алгоритма являются целевые показатели  $\mathbf{Y}$  функционирования систем контроля движения воздушных и морских судов [2, 3, 4, 5].

#### **4. Результаты практической апробации разработанных моделей и алгоритмов**

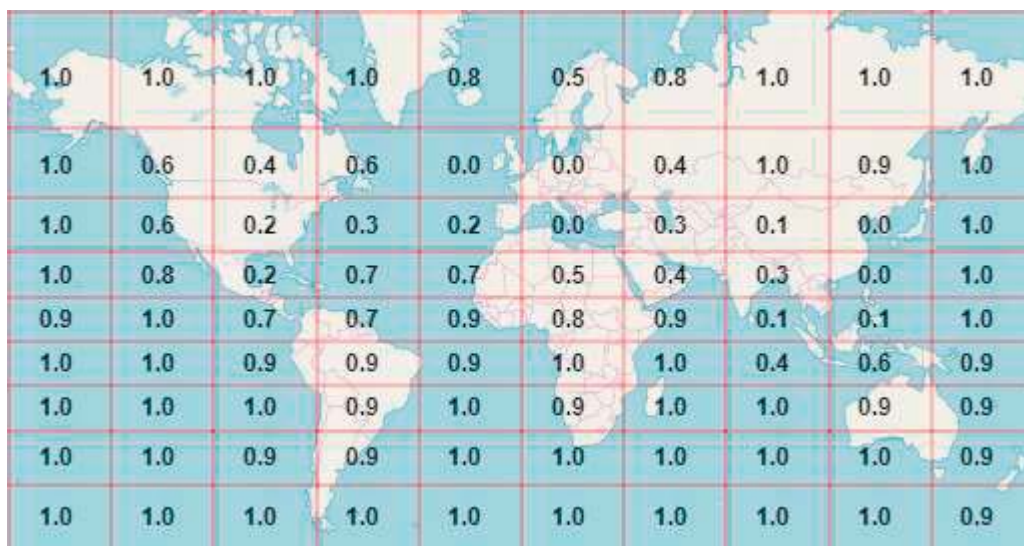
В качестве демонстрации работы представленных модели и алгоритма произведен расчет целевых показателей функционирования космической системы контроля движения морских судов. В соответствии со сведениями, опубликованными на интернет-сайтах [6], количество зарегистрированных объектов (как морских судов, так и объектов специального назначения) с установленным оборудованием АИС, на текущий момент составляет свыше 900 тыс., однако за сутки в среднем наблюдается около 160 тыс.

Моделировалось движение КА со следующими параметрами орбиты:

- долгота восходящего узла  $\Omega = 0$  град;
- наклонение  $i = 98$  град;
- апогей  $r_A = 500$  км;
- перигей  $r_{\Pi} = 500$  км;
- широта перицентра  $\omega = 0$  град.

Интервал моделирования составляет сутки ( $T = 86400$  с.), время  $t_0$  начала моделирования соответствует положению КА на орбите с истинной аномалией  $\theta_0 = 0^\circ$ .

Полнота добывания сведения может быть выражена как относительное количество обнаруженных объектов от региона наблюдения (рис. 2).



**Рис. 2. Отношения числа обнаруженных судов к общему числу судов в регионе наблюдения**

Также рассчитываются и другие показатели функционирования [2]. Оперативность доведения информации определяется как интервал времени от момента получения до момента передачи данных о местоположения ИРИ на наземный специальный комплекс.

#### **Заключение**

Разработаны модель и алгоритм оценивания показателей качества функционирования космических систем автоматической идентификации воздушных и морских судов, которые могут быть использованы для подготовки исходных данных и обоснования тактико-технических требований для проектируемых опытных образцов космической техники.

#### **Литература**

1. **Андреев А.М.** Анализ развития спутниковой автоматической идентификационной системы мониторинга движения судов. Ч. 2. Средства мониторинга // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 652. С. 7-15.
2. **Скорухов Я.А., Андреев А.М.** Моделирование функционирования космического сегмента системы автоматической идентификации морских судов. Информационно-управляющие системы, вып. 2 (93), 2018 г. Стр. 36–48. doi: 10.15217/issn1684-8853.2018.2.36.
3. **Скорухов Я.А., Махров К.Б., Малышев Д.В.** Имитационная модель функционирования космической системы контроля движения морских судов. Труды ВКА имени А.Ф. Можайского, вып. 657, 2017 г. Стр. 23-33.
4. **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. Доступно по ссылке: <https://indico.esa.int/indico/event/109/session/15/contribution/48/material/0/0.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).
5. **Chen Y.** Research on Detection Probability of Space-based AIS for Real Scenarios. Доступно по ссылке: <http://ijssst.info/Vol-17/No-30/paper3.pdf> (дата обращения: 05.09.2016). doi: 10.5013/IJSSST.a.17.30.03.
6. Marine Traffic (online). Доступно по ссылке: <https://www.marinetraffic.com/ru> (дата обращения: 05.11.2016).