Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования

The analysis of ADS-B signals energy availability to low-space satellites with use of statistical modeling

Скороходов / Skorokhodov Y.
Ярослав Анатольевич
(yaroslavskor@gmail.com)
кандидат технический наук.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского»
(ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ,
начальник лаборатории (НИ) ВИ(НИ).
г. Санкт-Петербург

Малышев / Malyshev D.
Денис Владимирович
(demalyshev@yandex.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник лаборатории (НИ) ВИ(НИ).
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: системы авиационного наблюдения – aviation surveillance systems; автоматическое зависимое наблюдение в режиме радиовещания – automatic dependent surveillance-broadcast; обработка информации – information processing; статистическое моделирование – statistical modeling.

В статье представлены результаты анализа энергетической доступности системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов. Отличительной особенностью предложенного подхода является использование статистических и имитационных моделей, что позволяет рассчитывать бюджет канала передачи информации и моделировать прием сообщений с учетом различных факторов: расстояния, времени на распространение, диаграммы направленности, эффекта Доплера, расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, вероятности безошибочного приема сообщений. Получены экстремальные значения мощности сигнала на входе детектора для заданной высоты орбиты при различных значениях мощности передатчика и запаса по мощности для различных значений чувствительности радиоприемного устройства, а также зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения) воздушных судов от региона наблюдения.

The article presents the results of the ADS-B system energy availability analysis for low-Earth orbit satellites. A main feature of the proposed approach is the use of statistical and simulation models. This made it possible to take into account various factors in the calculating of the information transfer channel budget and simulate receiving messages: distance, propagation time, radiation patterns, Doppler effect, divergence of transmitting and receiving antennas polarization planes, probability of error-free reception of messages. Signal power extreme values at the detector input for a given orbit height for different transmitter power and power margin values for different sensitivity values of the radio receiving device was obtained. Dependence of the available aircraft number (from the energy point of view) from the monitoring region was also obtained.

Введение

В настоящее время рядом развитых стран широко внедряются спутниковые системы слежения за воздушным движением, основанные на приеме и ретрансляции сигналов системы АЗН-В (автоматическое зависимое наблюдение в режиме радиовещания). АЗН-В представляет собой систему авиационного наблюдения, предназначенную для контроля и обеспечения безопасности движения воздушных судов и является элементом современной аэронавигационной инфраструктуры. Как и ряд других подобных систем (вторичный обзорный радилокатор, мультилатерация), АЗН-В позволяет более эффективно использовать воздушное пространство.

Наблюдение за воздушным движением с использованием наземных пунктов не позволяет осуществлять контроль состояния воздушных судов в удаленных регионах (расположенных на расстоянии более 400 км от береговых линий) и оперативно реагировать на возникновение нештатных и аварийных ситуаций. Как правило, время поступления сообщений ADS-C (от англ. «Automatic dependent surveillance – contract» – автоматическое зависимое наблюдение с ограниченным доступом) от самолетов, движущихся в океаническом воздушном пространстве, составляет от 15 до 25 минут [1], сообщений ACARS (от англ. «Aircraft Communications Addressing and Reporting System» – адресно-отчётная система авиационной связи) – 10 минут. За десятиминутный интервал времени воздушные суда пролетают около 150 км, что не позволяет принимать своевременные решения, а причины ряда аварийных ситуаций и катастроф до сих пор остаются неизвестными.

Развертывание орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) с возможностью приема,

4-2017.indd 137 12.12.2017 11:25:56

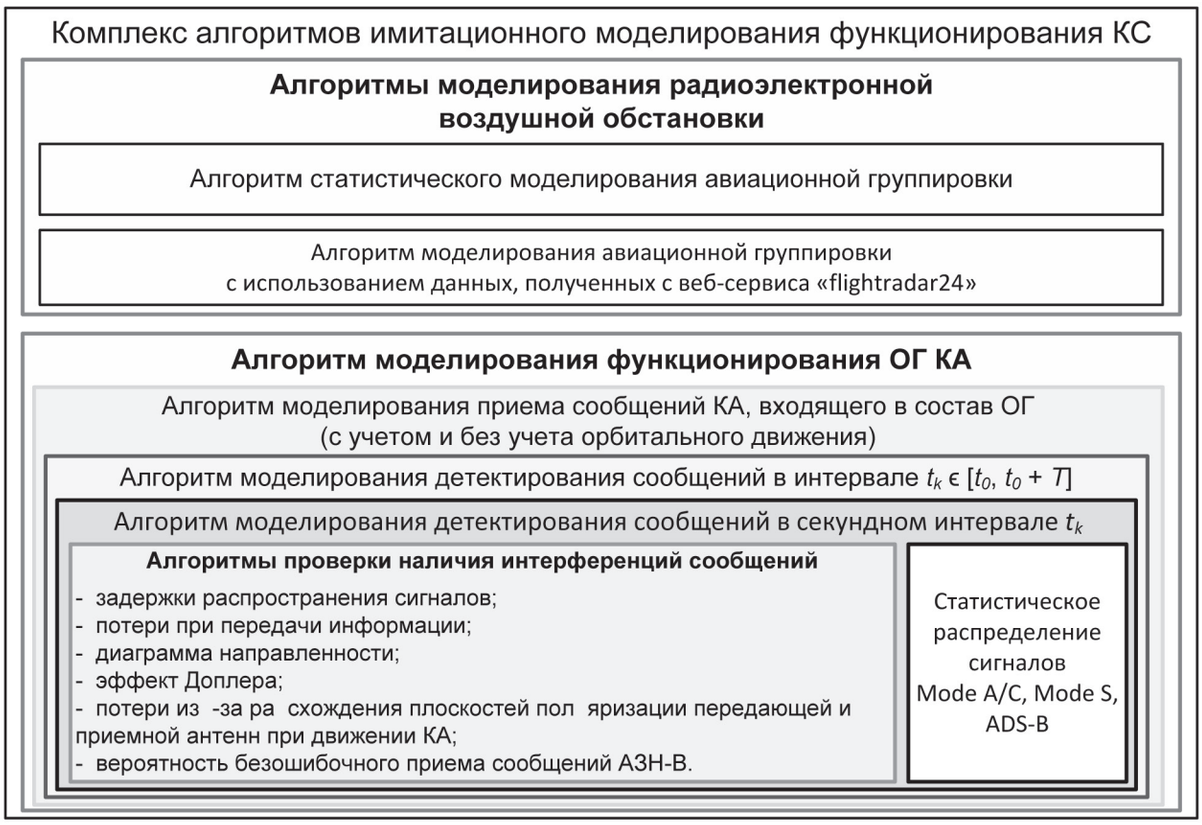

Рис. 1. Комплекс алгоритмов имитационного моделирования функционирования космической системы

обработки и ретрансляции сигналов АЗН-В позволит осуществлять непрерывный мониторинг движения воздушных судов в глобальном масштабе. В связи с тем, что при разработке системы не предполагалось осуществлять прием сигналов на борту КА, существуют определенные проблемы, связанные с их энергетической доступностью, наличием коллизий сообщений, влиянием эффекта Доплера и др.

Цель настоящего исследования заключается в оценивании энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных КА. В большинстве случаев энергетические параметры сигналов представляют в форме зависимостей ослабления по мощности сигналов от дальности и/или с учетом чувствительности приемника и вида модуляции в форме зависимостей вероятности битовой или пакетной ошибки (они являются взаимнооднозначны) от уровня сигнал/шум. В данном случае учитывается один фактор (расстояние между транспондером и приемником сообщений), а при определении потерь передачи антенны принимаются изотропными.

В статье представлены результаты вычислений запаса по мощности сигналов АЗН-В для заданной высоты орбиты с использованием методов статистического моделирования. Отличием предложенного подхода от классического, в котором учитывается только ослабление мощности сигнала при его распространении в свободном пространстве, является возможность варьировать системой ограничений и допущений в зависимости от целей моделирования. Это достигается благодаря применению новой методики анализа энергетической доступности на основе методов статистического и имитационного моделирования.

Имитационная модель функционирования космической системы контроля движения воздушных судов

Модель функционирования космической системы контроля движения воздушных судов, включающая частные модели: модель ОГ КА, модель орбитального движения, модель воздушной радиоэлектронной обстановки, модели приемопередающих устройств сигналов АЗН-В, реализована в виде комплекса алгоритмов, взаимосвязь которых схематически изображена на рис. 1.

Разработанный комплекс алгоритмов позволяет задавать различные ограничения и допущения (расстояние, время на распространение, диаграмма направленности, эффект Доплера, расхождение плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, веро-

4-2017.indd 138 12.12.2017 11:25:56

ятность безошибочного приема сообщения) и получать оценки целевых показателей функционирования космической системы (КС) в условиях, максимально приближенных к действительности.

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

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

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

– оценивания энергетической доступности сигналов для различных параметров орбитального движения КА и других условий (с учетом различных допущения и ограничения при моделировании).

В данной работе модель использовалась для расчета статистических характеристик энергетических параметров сигналов системы АЗН-В.

Оценивание статистических характеристик энергетических параметров сигналов системы АЗН-В

Предлагаются два сценария проведения моделирования. В первом случае используется статическая модель функционирования КС и предполагается равномерное распределение воздушных 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 радиоэлектронной обстановки в мировом воздушном пространстве, что дает возможность получить зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения) судов от региона наблюдения.

1. Воздушные суда распределены равномерно в зоне обзора КА на высоте 10 км над земной поверхностью. Модель Земли – ОЗЭ–1990 (большая полуось a = 6378136 м., коэффициент сжатия $\alpha = 1/298{,}258$).

Статистические характеристики энергетических параметров сигналов системы АЗН-В для КА на круговой орбите с высотой h = 300 км представлены в таблице 1.

В таблице в графе «Запас по мощности» через черту указаны значения для приемников с чувствительностями –134 и –117 дБ соответственно [2]. Значения получены путем статистического анализа энергетических характеристик переданных сигналов объектами, равномерно распределенными в зоне обзора КА. Из анализа таблицы видно, что на границе зоны видимости КА сигналы являются энергетически недоступными как для приемника с чувствительностью –117 дБ, так и с –134 дБ. В лучшем случае для приемников с чувствительностью –134 дБ имеется гарантированный запас мощности для любого класса передающих устройств, для приемников с чувствительностью –117 дБ сигналы являются практически недоступными, для передатчиков мощностью 29 дБ запас составляет всего 4 дБ, что соответствует низкой вероятности безошибочного приема сообщений.

2. Моделирование движения КА – приемника сигналов АЗН-В с параметрами орбиты: долгота восходящего узла $\Omega = 0$ град.; наклонение $i = 98$ град.; апогей $r_А = 300$ км.; перигей $r_П = 300$ км.; широта перицентра $\omega = 0$ град. Интервал моделирования составляет сутки (86400 с.), время t_0 начала моделирования соответствует поло-

Таблица 1

Статистические характеристики энергетических параметров сигналов системы АЗН-В

Характеристика		Минимум	Максимум
Суммарные потери, дБ		–181,22	–141,73
Расстояние $d(s_i, r_j)$ от источника s_i до приемника r_j, км		6468,29	427,516
Потери мощности на распространение $L_1(d_{ij}, f)$, дБ		–169,364	–145,768
Угол возвышения над горизонтом, град		–27,47	43,13
Коэффициент усиления антенны, дБ		–5,99	4,03
Угол между плоскостями поляризаций приемной и передающей антенн $\phi(s_i, r_j)$, град.		59,39	2,68
Потери из-за расхождения плоскостей поляризации приемной и передающей антенн $L_2(\phi_{ij})$, дБ		–5,86	–0,001
Запас по мощности, дБ	21	–26/–43	13,27/–3,73
	24	–23/–40	16,27/–0,73
	27	–20/–37	19,27/2,27
	29	–18/–35	21,27/4,27

4-2017.indd 139 12.12.2017 11:25:56

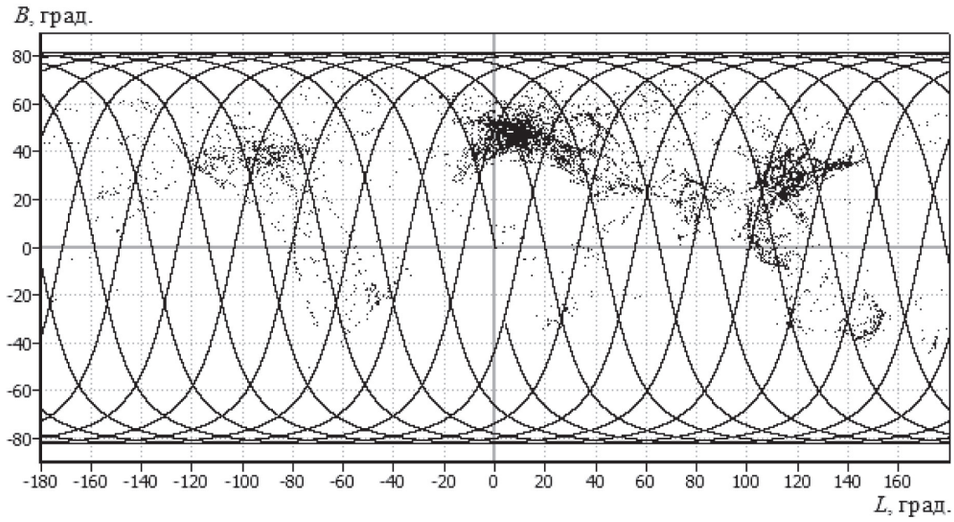

Рис. 2. Воздушная радиоэлектронная обстановка в мире

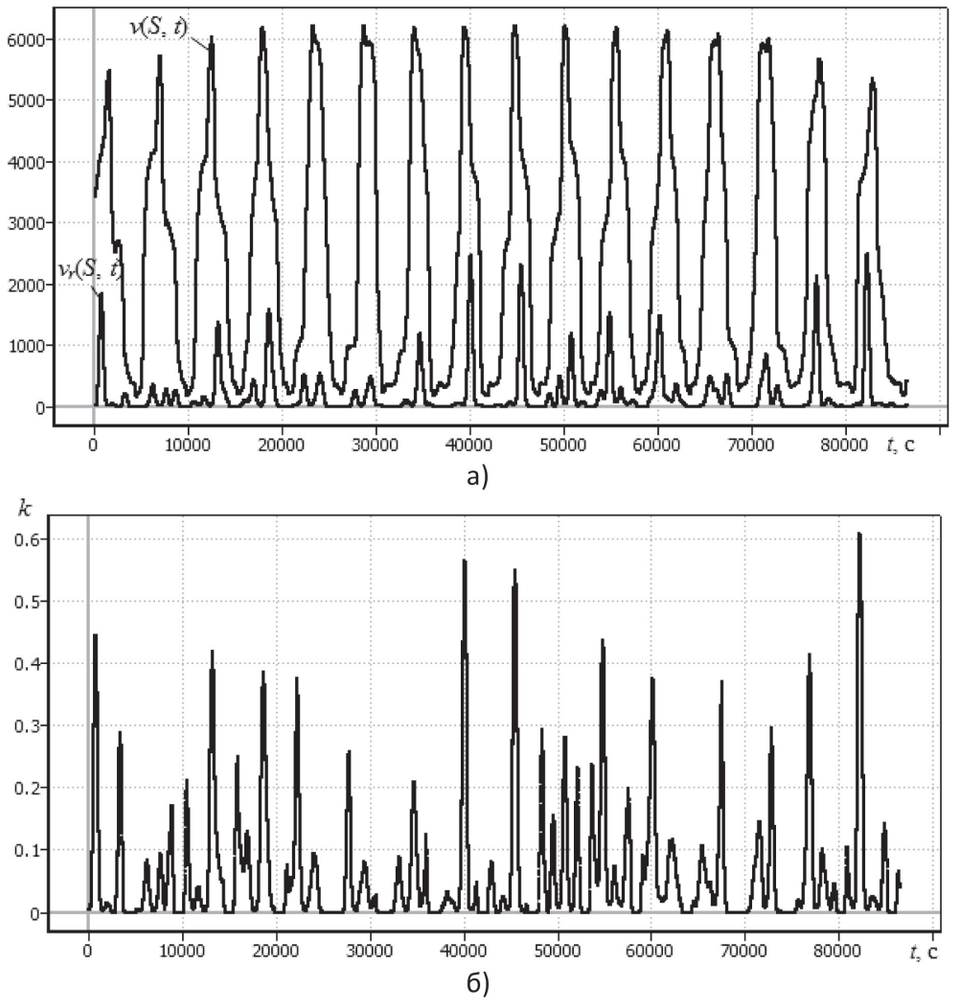

Рис. 3. Анализ радиовидимости: а) – количество судов ν(S, t), попавших в зону обзора КА, и судов $\nu_r(S, t)$ в зоне обзора с учетом энергетической доступности; б) – коэффициент энергетической доступности

4-2017.indd 140 12.12.2017 11:25:57

жению КА на орбите с истинной аномалией $\theta_0 = 0$ град.

Данные о местоположении воздушных судов (координаты в геодезической сферической системе координат), их скорости и курса передвижения получены с веб-сервера «Flightradar24» (https://www.flightradar24.com) на заданный момент времени. Представленная модель размещения источников излучений сигналов АЗН-В позволяет учитывать неоднородность размещения воздушных судов в мировом воздушном пространстве.

Модель воздушной радиоэлектронной обстановки, включающая около 8 тыс. источников излучений сигналов АЗН-В, и трасса полета КА с заданными параметрами орбиты изображены на рис. 2.

На рис. 3-а изображены графики количества судов $\nu(S, t)$, находящихся в зоне обзора КА r_j в момент времени t, и количества судов $\nu_r(S, t)$, находящихся в зоне обзора КА с учетом их энергетической доступности. График зависимости коэффициента энергетической доступности $k = \nu_r(S, t)/\nu(S, t)$ от текущего положения КА на орбите изображен на рис. 3-б.

Из анализа графика на рис. 3-б видно, что коэффициент энергетической доступности не превосходит 60%. При проведении моделирования пороговое значение ослабления по мощности сигналов принималось равным −117 дБм. В то время как в зоне обзора КА наблюдается свыше 6000 судов, доступными (с энергетической точки зрения) будет не более 2500. Тем не менее это достаточно большое количество и, учитывая загруженность канала другими типами сообщений (Mode A/C, Mode S) [3], требуются схемно-технические решения (например, пространственно-разнесенного приема), чтобы снизить вероятность интерференций сообщений.

Заключение

В работе представлены результаты анализа энергетической доступности сигналов АЗН-В для низкоорбитальных КА. В отличие от классического подхода, в котором энергетические параметры сигналов представляют в форме зависимостей вероятности безошибочного приема сообщений от дальности источника излучений, в подходе на основе статистического моделирования учитывается комплекс факторов (расстояние, время на распространение, диаграмма направленности, эффект Доплера, расхождение плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, вероятность безошибочного приема сообщения), которые существенно влияют на энергетическую доступность переданных сигналов и безошибочный прием сообщений.

Показано, что для радиоприемных устройств с чувствительностью −134 дБ в лучшем случае (взаимном расположении источника и получателя сигналов) имеется гарантированный запас мощности для любого класса передающих устройств, что позволяет осуществлять регистрацию и декодирование сообщений системы АЗН-В на борту КА. Получена зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения) воздушных судов от текущего положения КА для заданной орбиты. В ряде регионах для уменьшения вероятности возникновения коллизии сообщений требуются дополнительные схемно-технические решения.

Литература

1. Динамические статистические исследования по спутниковому приему сигнала ADS-B для глобального слежения за рейсами гражданской авиации // Всемирная конференция радиосвязи. – Женева, Швейцария. – 2015. – 19 с.

2. Werner, K. ADS-B over Satellite. Global air traffic surveillance from space / K. Werner, J. Bredemeyer, T. Delovski // Digital communications – enhanced surveillance of aircraft and vehicles. – 2014. – 6 p. – DOI: 10.1109/TIWDC-ESAV.2014.6945446.

3. Руководство по авиационному наблюдению // Международная организация гражданской авиации. – 2010. – 318 с. – ISBN 978-92-9231-970-0.

4-2017.indd 141 12.12.2017 11:25:57