

Я.А. СКОРОХОДОВ
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
И НАЗЕМНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВОЗДУШНЫМ
ДВИЖЕНИЕМ**

Скорыходов Я.А. Моделирование функционирования космических и наземных систем наблюдения за воздушным движением.

Аннотация. В настоящее время создаются и постепенно наращиваются орбитальные группировки космических аппаратов с возможностью приема, обработки и ретрансляции сигналов системы ADS-B (от англ. «Automatic Dependent Surveillance — Broadcast» — автоматическое зависимое наблюдение — широковещание), обеспечивающие глобальность и непрерывность наблюдения за воздушным движением. В соответствии с концепцией использования технологии ADS-B каждый участник воздушного движения передает в широковещательном режиме свои идентификационные данные, местоположение и параметры состояния. Так как при разработке системы не предполагалось принимать сигналы на борту космического аппарата, существуют определенные проблемы, связанные с их энергетической доступностью, наличием коллизий сообщений от разных источников, влиянием эффекта Доплера и другими факторами. Разработана имитационная модель системы наблюдения за воздушным движением на основе приема сигналов, содержащих идентификационную и навигационную информацию и передающихся по радиоканалу в широковещательном режиме. Программно реализованные алгоритмы имитационного моделирования позволяют задавать различные ограничения и допущения (используя различные модели распределения источников излучений, пунктов приема сигналов авиационных систем связи, канала передачи информации, распределения частоты и длительности сигналов) и получать оценки целевых показателей функционирования космических и наземных систем обеспечения безопасности движения воздушных судов с учетом различных пространственных и энергетических факторов и условий распространения радиосигналов, а также реального размещения контролируемых объектов и динамики их движения в мировом воздушном пространстве. Приведены методики и примеры использования имитационной модели для расчета целевых показателей функционирования космических и наземных систем авиационного наблюдения.

Ключевые слова: авиационное наблюдение, ADS-B, автоматическое зависимое наблюдение – вещание, математическое моделирование, космические системы, обработка информации.

1. Введение. В последние годы в целях повышения безопасности воздушного движения активно развиваются системы авиационного наблюдения. Наряду с традиционными системами наземного базирования в практику управления воздушным движением внедряются перспективные средства космического базирования [1-5]. Для выработки обоснованных требований или решений при проектировании космических и наземных систем авиационного наблюдения на основе приема сигналов, содержащих идентификационную и навигационную информацию (например, сигналов системы автоматического зависимого наблюдения — радиовещания), а также оптимального планирования

применения уже существующих систем, необходимо выполнение ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, чтобы оценить энергетическую доступность сигналов и влияние на безошибочный прием сообщений других факторов, в частности возможных интерференций сигналов от разных источников [6, 7].

Во всех случаях как для космических, так и для наземных систем проведение натуральных экспериментов является дорогостоящей и не всегда выполнимой операцией. В первом случае высокая финансовая ресурсоемкость экспериментов обусловлена необходимостью оснащения отделяемых элементов ракет-носителей (последних ступеней), разгонных блоков или космических аппаратов (КА) дополнительным оборудованием приема и обработки сигналов, излучаемых на частоте 1090 МГц [8-10]. Для наземной сетевой системы экспериментальные исследования затруднены большой территориальной разнесенностью пунктов наблюдения.

В ряде случаев для принятия решений достаточно использовать результаты математического моделирования. В настоящее время разработано большое количество универсальных и специализированных средств имитационного моделирования, в частности «AnyLogic», «GPSS» [11, 12]. Однако их использование для решения указанной в статье задачи не представляется возможным в силу следующих факторов:

- большое количество источников излучений сигналов (десятки и сотни тысяч);
- неравномерное и неоднородное распределение источников излучений в пространстве, динамически изменяющаяся радиоэлектронная обстановка, что особенно справедливо для воздушных объектов, учитывая высокую скорость их перемещения;
- сложные протоколы передачи информации, в частности, для воздушных судов количество передаваемых сигналов (типов MODE A/C, MODE S) за анализируемых интервал времени обусловлено количеством радиоэлектронных станций, в радиолокационном поле которых движется объект;
- большое количество факторов, влияющих на ослабление сигналов спутниковых радиолиний, ряд из которых плохо формализованы (например, влияние гидрометеоров на распространение электромагнитных волн);
- сложные баллистические модели.

Проблемами моделирования систем управления воздушным движением и планирования использования воздушного пространства в системах организации воздушного движения занимается ряд организа-

ций, в том числе и в России — ФГУП «ГосНИИАС» [13]. В то же время тема моделирования космических систем контроля движения воздушных судов на основе приема сигналов автоматического зависимого наблюдения в опубликованных работах не рассматривалась.

Цель настоящего исследования — разработка имитационно-аналитической модели функционирования систем авиационного наблюдения, которая может быть использована для решения следующих задач:

- оценивания энергетической доступности сигналов для заданной структуры орбитальной группировки (ОГ) или наземной сети и других условий (с учетом различных допущений и ограничений при моделировании) [14];
- оценивания целевых показателей обнаружения судов для заданной структуры космической системы (наземной сети);
- выбора структуры ОГ (параметров размещения сети) для заданных показателей обнаружения воздушных судов.

Правильность результатов моделирования зависит от качества описания реальной действительности в используемых моделях. С целью наиболее адекватного представления моделируемых систем произведен анализ распределения источников излучения сигналов на частоте 1090 МГц и маршрутов их движения, а также факторов, влияющих на распространение сигналов систем авиационного наблюдения.

2. Анализ характеристик воздушного движения. Для оценивания характеристик воздушного движения и разработки статической и динамической моделей распределения источников излучений сигналов на частоте 1090 МГц использовались форматированные данные, включающие координаты воздушных судов в сферической геодезической системе координат, их ICAO (от англ. «International Civil Aviation Organization» — международная организация гражданской авиации) коды и уникальные идентификаторы рейсов, регистрация которых происходила в течение 24 часов каждые 15 минут с веб-сервисов, позволяющих следить за перемещением воздушных судов в режиме реального времени, например интернет-ресурсов Flightradar24, Planefinder, ADS-B Exchange. Результаты регистрации с указанием времени получения информации заносились в базу данных. В простейшем случае база данных может состоять из двух таблиц, содержащих статические и динамические характеристики источников излучений сигналов. Визуализация выборочных данных в геодезической системе координат (СК) представлена на рисунке 1.

Анализ рисунка 1 позволяет выделить регионы с повышенной плотностью воздушного трафика, регионы, где отсутствуют средства авиационного наблюдения или не предоставляется общий доступ к полетным данным, а также основные междугородние и трансконтинентальные маршруты движения воздушных судов. При более детальном анализе можно выделить кластеры сосредоточения воздушных судов, соотнесенные с региональными центрами соответствующих стран.

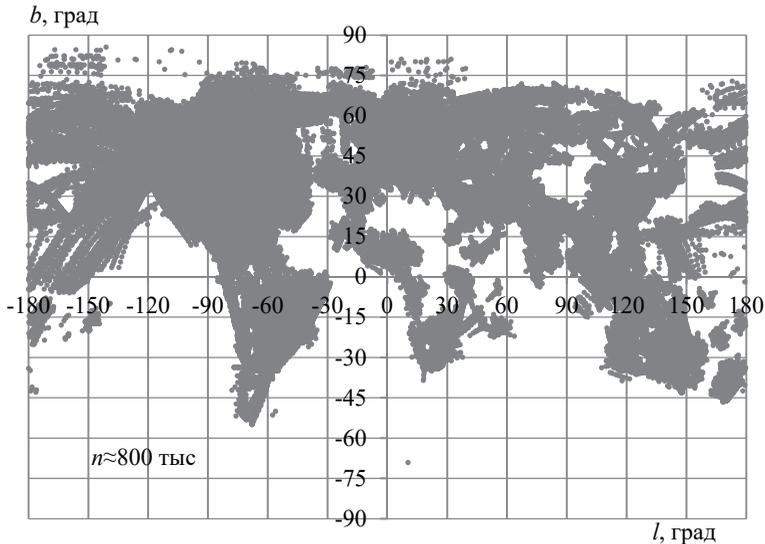


Рис. 1. Визуализация выборочных данных в геодезической СК

Обработка и систематизация полного объема информации позволила оценить обобщенные статистические данные о воздушном трафике. Размер выборки (общее количество полученных сообщений) за указанный интервал времени составил 769855, количество зафиксированных воздушных судов (без учета воздушных судов, не имеющих ICAO кода) — 31666, количество рейсов — 125558. Полигоны частот количества рейсов, совершенных одним воздушным судном за анализируемый интервал времени, и продолжительности рейсов представлены на рисунке 2.

График на рисунке 2а не учитывает 14662 рейсов воздушных судов, не имеющих ICAO кода, что связано с особенностью работы самого интернет ресурса и не позволяет отнести рейс к какому-либо воздушному судну.

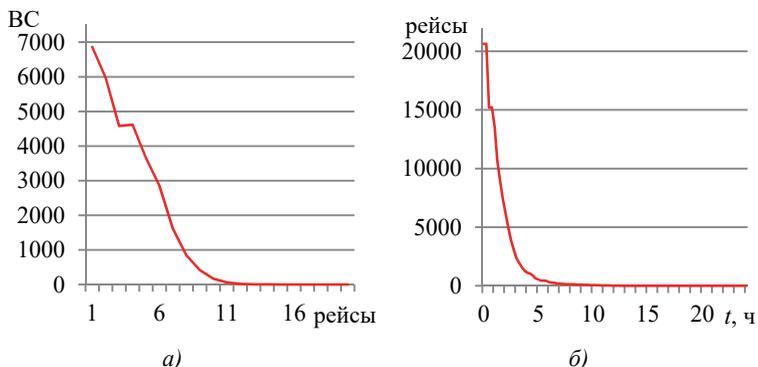


Рис. 2. Полигоны частот: а) количество рейсов, совершенных одним ВС за анализируемый интервал времени; б) продолжительность рейсов

Числовые оценки характеристик воздушного движения за сутки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики воздушного движения

№ п/п	Характеристика	Значение		
		Мин.	Макс.	Среднее
1	Количество источников излучений сигналов на частоте 1090 МГц	7022	9320	8019
2	Количество рейсов, совершенных одним ВС за сутки	1	20	3,5
3	Продолжительность полета ВС, часов	0,25	24	1,2

Минимальное и максимальное значения продолжительности полетов, указанные в таблице 1, в данном случае обусловлены минимальным интервалом регистрации информации и общей длительностью проведения эксперимента.

График изменения значений количества источников излучений сигналов на частоте 1090 МГц в период с 6 января 2018 года по 9 января 2018 года (продолжительность регистрации 84 часа) изображен на рисунке 3. Начало регистрации соответствует 19.00 в московском часовом поясе. Анализ графика показывает, что изменение количества источников излучений имеет периодический характер и зависит от времени суток.

Учитывая периодичность изменения представленных характеристик, можно сделать вывод, что данные суточного мониторинга воздушного движения являются репрезентативными и позволяют на их основе

создать как статическую, так и динамическую модели распределения источников излучений сигналов авиационных бортовых систем связи.

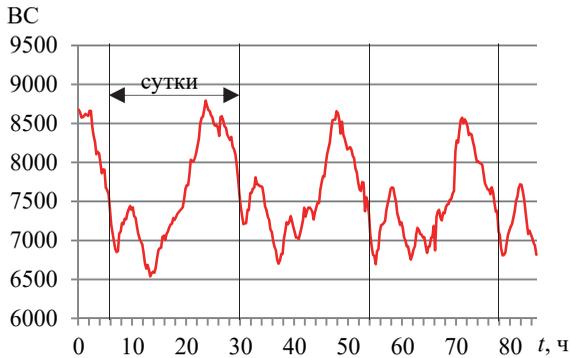


Рис. 3. Количество $N_s(t)$ источников излучений

Кроме того, используя данные, полученные из публичных интернет-ресурсов, можно создать более сложные модели и алгоритмы прогнозирования траектории движения воздушных судов с целью исключения их столкновений и оптимизации управления воздушным движением [15-18].

3. Анализ факторов, влияющих на ослабление сигналов авиационных систем обеспечения безопасности воздушного движения. На ослабление сигналов авиационных систем обеспечения безопасности воздушного движения в реальных условиях влияют различные факторы, к основным из которых следует отнести дальность передачи, атмосферные явления и поляризационные эффекты.

Затухание энергии сигнала в свободном пространстве. Расчет потерь $L_1(d, f)$ передачи при распространении сигнала в свободном пространстве осуществляется по следующей зависимости [19]:

$$L_1(d, f) = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d, \quad (1)$$

где f — частота передачи сообщения, МГц; d — расстояние от источника s_i до приемника r_j , км.

Атмосферные потери. Потери мощности сигнала в атмосфере в основном обусловлены тропосферными кислородом и парами воды, а также дождем и прочими осадками. При моделировании канала связи между воздушным судном и КА атмосферные потери не учитываются, поскольку большая часть полета воздушного судна проходит над слоем атмосферы, содержащим основную часть имеющихся в ней водяно-

го пара и кислорода. Выражение для вычисления ослабления $L_2(f, \beta)$ мощности сигнала в газах атмосферы имеет вид [20]:

$$L_2(f, \beta) = \gamma_{\text{H}_2\text{O}}(f)l_{\text{H}_2\text{O}}(\beta) + \gamma_{\text{O}_2}(f)l_{\text{O}_2}(\beta), \quad (2)$$

где β — угол места; $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}(f), \gamma_{\text{O}_2}(f)$ — погонное ослабление для водяного пара и кислорода соответственно, дБ/км; $l_{\text{H}_2\text{O}}(\beta), l_{\text{O}_2}(\beta)$ — эффективные длины трасс в атмосфере, содержащей водяные пары и кислород, км.

Аналитические аппроксимации для определения коэффициентов $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}(f), \gamma_{\text{O}_2}(f)$ погонного ослабления, зависящие от частоты f сигнала, приведены в [7, 19], выражения эффективных длин трасс $l_{\text{H}_2\text{O}}(\beta), l_{\text{O}_2}(\beta)$ имеются в работе [20].

Угол места β рассчитывается в топоцентрической системе координат, начало которой определяется геодезической широтой $b_{\text{П}}$ и длиной $l_{\text{П}}$ измерительного пункта на поверхности земного эллипсоида, согласно следующему выражению:

$$\beta = \text{asin}(y_{\text{T}}/d), \quad (3)$$

где y_{T} — проекция координат объекта на ось ОУ топоцентрической системе координат (СК).

Математическая формализация распределения гидрометеоров на Земле в целом и динамики атмосферы характеризуется высокой сложностью и является отдельно научной задачей, поэтому влияние атмосферных осадков на распространение электромагнитных волн и ослабление мощности сигналов авиационных систем связи учитывается только в специально оговоренных случаях, например, с целью определения электромагнитной доступности сигналов в экстремальных условиях.

Алгоритм расчета ослабления $L_3(f, \beta, h_0, J)$ сигналов в гидрометеорах (дожде) достаточно подробно приведен в работе [21]. Исходными данными для расчета ослабления $L_3(f, \beta, h_0, J)$ сигнала в дожде являются: угол места β , частота f сигнала, высота h_0 изотермы 0°C над средним уровнем моря, интенсивность дождя J , частотно зависимые коэффициенты для прогнозирования ослабления сигнала в дожде с заданной интенсивностью J . Значения высоты h_0 изотермы 0°C и интенсивности J дождя для региона размещения измерительного пункта

можно взять из справочных данных, в том числе в книге [21] частотно зависимые коэффициенты приводятся в рекомендациях Международного союза электросвязи.

Поляризационные потери суммируются из потерь связанных с расхождением плоскостей поляризаций приемной и передающей антенн, эффектом Фарадея, потерь из-за деполяризации радиоволн в осадках.

Выражение для определения потерь $L_4(\varphi)$ из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенн имеет вид:

$$L_4(\varphi) = -20 \log[\cos(\varphi)], \quad (4)$$

где φ — угол между фокальными осями антенн судна и КА, при $\varphi = \pi/2$ связи не будет.

Угол ψ поворота плоскости поляризации вследствие фазовой дисперсии сигналов, обусловленной эффектом Фарадея, можно приближенно определить по формуле [19]:

$$\psi = 2,32 \cdot 10^{19} / f^2 [1 - 0,91 \cdot \cos(\beta)]^{0,5}, \quad (5)$$

а потери сигнала $L_5(\psi)$:

$$L_5(\psi) = -20 \log[\cos(\psi)]. \quad (6)$$

Деполяризация волн в осадках обусловлена несферичностью формы и траекторией падения частиц гидрометеоров, прежде всего капель дождя. Поглощение радиоволн в гидрометеорах вследствие деполяризации увеличивается прямопропорционально частоте сигнала и является весьма значительным для сигналов с частотой выше 5 ГГц. Поскольку формализация эффекта деполяризации в осадках является достаточно сложной задачей и анализируемая частота существенно меньше 5 ГГц, при моделировании ослабление сигнала из-за деполяризации радиоволн не учитывается.

4. Имитационная модель функционирования систем авиационного наблюдения. Модель функционирования систем авиационного наблюдения составляют частные модели, а именно модель распределения источников излучений сигналов на частоте 1090 МГц, модель распределенных пунктов приема сигналов, баллистические модели, модель канала передачи информации, модель распределения частоты и длительностей сигналов (рисунок 4).

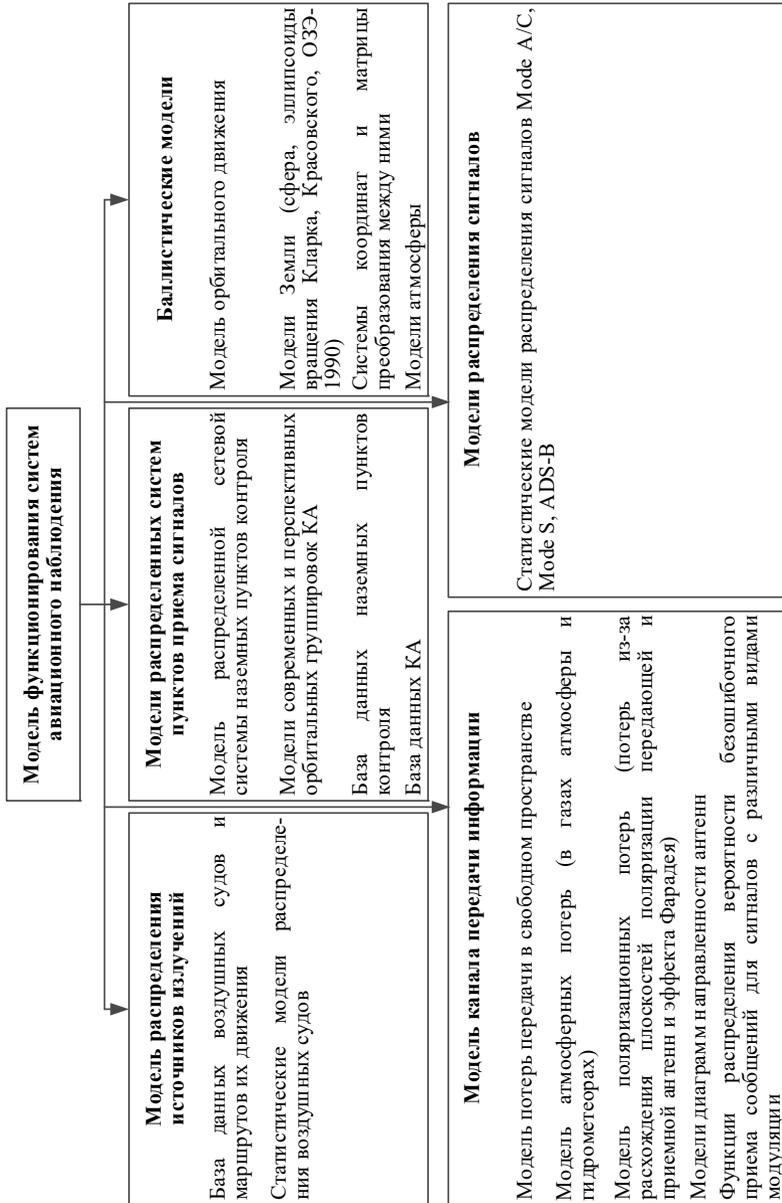


Рис. 4. Состав имитационной модели систем авиационного наблюдения

Модель распределения источников излучений сигналов на частоте 1090 МГц представлена в статическом и динамическом вариантах. Достоинством статической модели распределения источников излучений является простота программной реализации, в тоже время результаты моделирования при условии статической модели, учитывая высокую скорость перемещения воздушных судов, будут адекватными лишь на коротких интервалах времени.

Статическая модель распределения источников излучений представляет собой множество $S = \{s_i, i = 1, \dots, N_S\}$ элементов — источников излучений сигналов на частоте 1090 МГц, каждый из которых характеризуется своим местоположением C_i , заданным в геодезической сферической системе координат. Местоположение воздушных судов может быть задано двумя способами, в первом случае координаты C_i местоположений объектов наблюдения определяются статистически по заданному закону распределения, как правило, равномерному, во втором случае используется «снимок» реального местоположения объектов для заданного момента времени t .

В случае динамической модели распределения источников излучений каждому из элементов $s_i \in S, i = 1, \dots, N_S$ множества контролируемых объектов ставится в соответствие множество полетов $F_i = \{f_{ij}, i = 1, \dots, N_S, j = 1, \dots, n_i\}$ где $n_i = \text{card} \langle F_i \rangle$. В свою очередь полет f_{ij} составляют координаты $C_i(t_k)$ объекта в геодезической сферической системе координат, соотношенные с моментом времени $t_k \in [t_0, t_0 + T]$. Маршруты движения воздушных судов определяются исходя из анализа воздушного трафика за заданный промежуток времени.

Выбор типа модели (статической или динамической) распределения источников излучений определяется, прежде всего, целью моделирования, первый тип может применяться для сравнения результатов имитационного моделирования и аналитических вычислений, предложенных другими авторами [6], второй тип — для получения обоснованных результатов применения систем авиационного наблюдения с учетом неоднородности распределения судов в мировом воздушном пространстве, маршрутов и динамики их движения, а также других факторов.

Модель распределенных систем пунктов приема сигналов включает модель ОГ КА и модель сети наземных пунктов контроля воздушного движения. Модель ОГ КА представлена множеством элементов $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$, структура ОГ задается следующими параметрами: количество плоскостей n , параметры орбит в каждой плоскости (долгота восходящего узла Ω , наклонение i , апогей r_A , перигей r_P , широта перигея ω), количество КА в каждой плоскости, углы, на которые разнесены КА друг относительно друга в одной плоскости.

Модель сети наземных пунктов контроля движения воздушных судов представлена множеством элементов $q_k \in Q$, $k = 1, \dots, N_Q$, каждый из которых характеризуется своим местоположением C_k на земной поверхности.

К *баллистическим моделям* относятся: модель орбитального движения, системы координат и матрицы преобразования между ними, модели Земли. Модель орбитального движения 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. Методы расчета орбитального движения КА являются общеизвестными и приведены в различной научно-методической литературе, например в [22].

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 рисунке 5. В рассматриваемой ОГ 75 КА расположены в 6 плоскостях по 11 в каждой, 9 КА из которых являются резервными [23, 24].

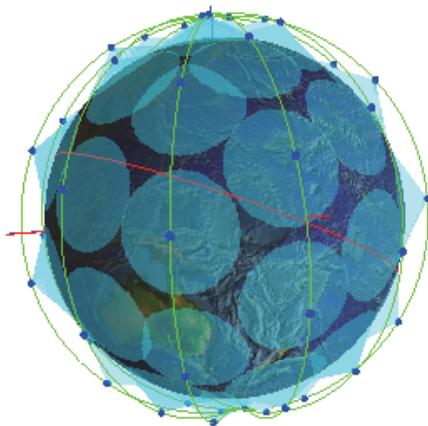


Рис. 5. Трехмерная визуализация ОГ КА «Iridium NEXT»

Модель Земли задается общим земным эллипсоидом с основными геометрическими параметрами: большая полуось $a = 6378,136$ км и коэффициент сжатия $\alpha = 1/298,258$.

Модель канала передачи информации учитывает расстояние $d(s_i, r_j)$ от источника излучения s_i до радиоприемного устройства r_j , временные задержки Δt на распространение сигналов, ослабление

$L_1(d_{ij}, f)$ энергии сигнала в свободном пространстве, где $d_{ij} = d(s_i, r_j)$, f — частота передачи, потери $L_2(f, \beta)$ в газах атмосферы, потери $L_3(\beta, f, h_0, J)$ в гидрометеорах (в специально оговоренных случаях), потери $L_4(\psi)$ из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, потери $L_5(\varphi)$ из-за эффекта Фарадея, характеристики приемопередающих устройств, влияющие на мощность излучаемых сигналов и вероятность безошибочного декодирования сообщений, а также эффект Доплера.

Таким образом, мощность e' сигнала на входе радиоприемного устройства (РПУ) определяется исходя из выражения:

$$e' = e + L_1(d, f) + L_2(f, \beta) + L_3(f, \beta, h_0, J) + L_4(\varphi) + L_5(\psi) + G_{\text{прд}} + G_{\text{прм}}, \quad (7)$$

где $G_{\text{прд}}$, $G_{\text{прм}}$ — коэффициенты направленного действия передающей и приемной антенн соответственно.

Угол β определяется на каждом шаге моделирования и соответствует углу места КА в СК $X_{\text{Св}}Y_{\text{Св}}Z_{\text{Св}}$, начало которой совпадает с центром масс источника сообщений s_i , определяемой геодезической широтой B_i и долготой L_i и высотой H_i над поверхностью земли. Ось $X_{\text{Св}}$ направлена в сторону Северного полюса Земли по касательной к меридиану корабля s_j ; ось $Y_{\text{Св}}$ — по внешней нормали к земному эллипсоиду, а ось $Z_{\text{Св}}$ дополняет систему до правой [25].

Коэффициент $G_{\text{прд}}$ направленного действия определяется для вычисленного на предыдущем шаге угла места β и диаграммы направленности $\mu = \beta \rightarrow G_{\text{прд}}$ типовой авиационной антенны, приведенной в [26].

Диаграмма направленности спутниковой антенны аппроксимируется зависимостью:

$$G_{\text{прм}}(\theta) = G_{\text{МВ}} - 12(\theta/\theta_{-3\text{дВ}})^2, \quad (8)$$

где $G_{\text{прм}}(\theta)$ — коэффициент усиления спутниковой антенны (дБи) при угле отклонения от оси θ (градусов); $G_{\text{МВ}}$ — коэффициент усиления в главном луче спутниковой антенны (дБи); $\theta_{-3\text{дВ}}$ — ширина луча спутниковой антенны по уровню -3 дБ (градусов).

Зависимость вероятности $p_e(m)$ ошибочного декодирования сообщений, состоящих из m бит, от коэффициента SNR сигнал/шум задана отображением $\varphi = SNR \rightarrow p_e(m)$, например, для идеального когерентного и некогерентного приема сигналов с амплитудной модуляцией соответствующие зависимости приведены в книге [27].

Модель распределения сигналов основана на данных, опубликованных Международным союзом электросвязи (комиссией по радиосвязи) в работе [26]. Модель включает сигналы, передаваемые воздушными судами на частоте 1090 МГц (Mode A/C, Mode S, Mode S ADS-B) (таблица 2).

Принимая во внимание две авиационные антенны, расположенные в верхней и нижней частях фюзеляжа, и пренебрегая отраженными от земли сигналами, переданными нижней антенной, следует считать, что излучаются только 40% от указанного в таблице количества сигналов типов MODE A/C, MODE S и 3 сигнала ADS-B в секунду [26, 28].

Таблица 2. Распределение частоты и длительности сигналов, передаваемые воздушными судами на частоте 1090 МГц

Тип воздушного судна	Характеристика		
	Тип сигналов	Максимальная длительность (мкс)	Количество сообщений в секунду
Отвечающие стандартам ИКАО	Режим A/C	20,3	0–120
	Все вызовы в режиме S	64	0–60
	Короткое сообщение в режиме S	64	6–40
	Длинное сообщение в режиме S	120	6–20
	ADS-B/1090 ES	120	6
Не отвечающие стандартам ИКАО	Короткий импульс ВОРЛ	3,5	6–40
	Длинный импульс ВОРЛ	35	6–20

Модель функционирования систем контроля воздушной обстановки реализована в виде комплекса алгоритмов, взаимосвязь которых схематически изображена на рисунке 6.

Комплекс состоит из следующих алгоритмов:

1. Алгоритм статистического моделирования источников излучений.
2. Алгоритм моделирования источников излучений с использованием данных интернет-ресурсов наблюдения за полетами воздушных судов.
3. Алгоритм детектирования сигналов (MODE A/C, MODE S, ADS-B) в секундном интервале t_k .
4. Алгоритм моделирования приема сообщений КА (наземным пунктом контроля) в секундном интервале $t_k \in [t_0, t_0 + T]$.
5. Алгоритм моделирования работы космической системы (сети наземных пунктов) контроля воздушной обстановки.

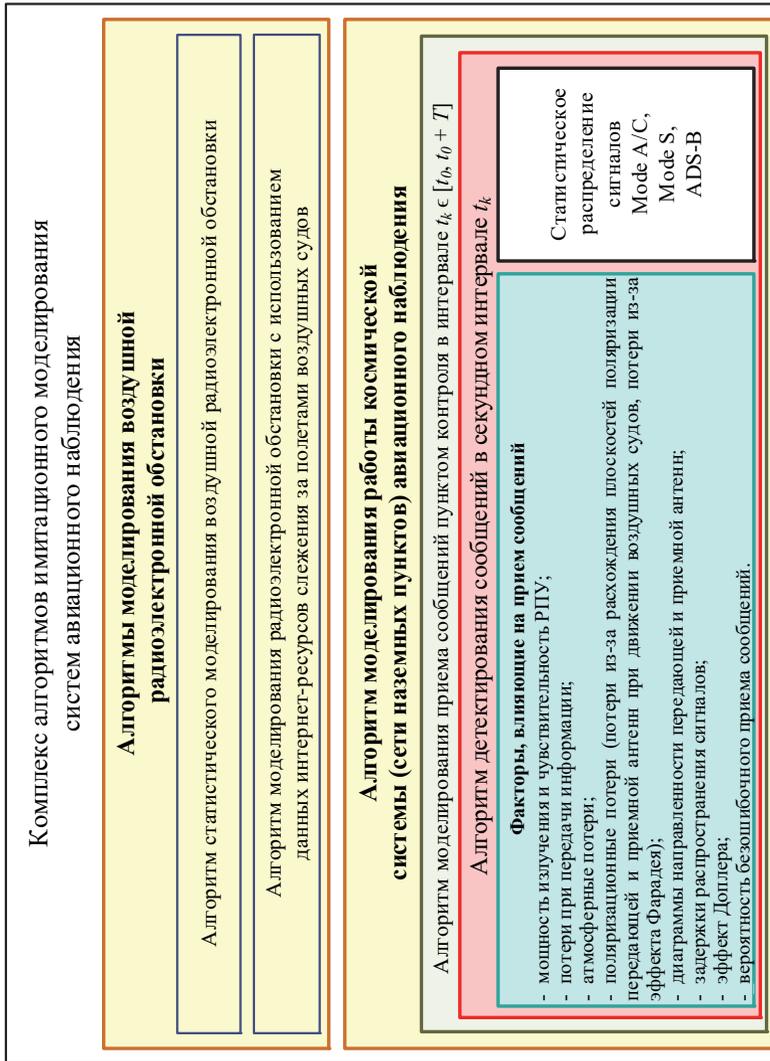


Рис. 6. Комплекс алгоритмов имитационного моделирования функционирования систем авиационного наблюдения

Разработанный комплекс алгоритмов программно реализован. Исходными данными для моделирования космической системы (рассмотрен более сложный случай по сравнению с сетью наземных пунктов) являются время t_0 начала и интервал T моделирования, количество КА в ОГ $R = \{r_j, j = 1, \dots, N_R\}$ и параметры их орбит, множество $S = \{s_i, i = 1, \dots, N_S\}$ воздушных судов и маршруты их движения. Перед началом моделирования каждому из воздушных судов назначается его тип (MODE A/C, MODE S или ADS-B) и мощность e излучения сигналов в зависимости от заданной модели распределения различных типов ретрансляторов по парку воздушных судов в мире [26]. В соответствии с рекомендациями международного союза электросвязи мощность e сигнала, излучаемого авиационным транспондером, принимает значения из множества $\{21 \text{ дБВт}, 24 \text{ дБВт}, 27 \text{ дБВт}, 29 \text{ дБВт}\}$.

В процессе работы программного комплекса для каждого момента времени $t_k \in [t_0, t_0 + T]$ выполняется следующая последовательность шагов:

1) Рассчитываются текущие положения КА $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$, входящих в состав ОГ, по заданным начальным значениями оскулирующих элементов орбиты и координаты воздушных судов;

2) Для КА $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$ определяется энергетическая доступность $v_r(s_i, r_j)$ источников излучений $s_i \in S, i = 1, \dots, N_S$, исходя из условий превышения минимально допустимого угла места $\beta(s_i, r_j)$ КА r_j в системе координат, связанной с местоположением анализируемого источника излучений s_i , и требуемого потока мощности сигналов авиационных систем связи на входе приемника r_j с учетом заданной системы ограничений и допущений (моделей потерь, диаграмм направленности антенн и т.д.);

3) Для всех объектов наблюдения $s_i | v_r(s_i, r_j) = 1$, находящихся в зоне покрытия КА r_j , и момента t , используя статистическую модель распределения частоты излучения и длительности сигналов, передаваемых воздушными судами на частоте 1090 МГц (таблица 2), формируется список $\mathbf{M}_j = \{M_{ji} : s_i | v_r(s_i, r_j) = 1\}$ сообщений, содержащих идентификационную (все типы сообщений MODE A/C, MODE S, ADS-B) и навигационную (только ADS-B) информацию с привязкой к источнику излучения s_i . Моменты начала передачи сообщений генерируется датчиком случайных чисел из определенного диапазона;

4) Для каждого из сообщений в списке \mathbf{M}_j проверяется условие наличия коллизии с сообщениями других судов $s_k \in S, s_i \neq s_k$, учитывая задержки распространения сигналов от различных источников, потери мощности и так далее. Вычисляется вероятность безошибочного прие-

ма сообщения с амплитудной модуляцией для отношения сигнал/шум, где энергия шума при наличии интерференции сигналов соответствует максимальной энергии одного из «мешающих» сообщений;

5) В случае правильного детектирования сообщения $m_z \in M_{ji}$ (любого из типов MODE A/C, MODE S, ADS-B) источник s_i , его передавший, считается идентифицированным, кроме того, если сообщение имеет тип ADS-B — локализованным;

6) Формируется информация как интегрированная за интервал моделирования $t \in [t_0, t_k]$, так и текущая, относящаяся к моменту времени t_k .

Результатом работы комплекса алгоритмов являются целевые показатели функционирования систем авиационного наблюдения, к которым следует отнести:

– зависимость количества $n_1(t, S)$ переданных сообщений судами, находившимися в зоне покрытия хотя бы одного КА (зоне радиовидимости наземного пункта) от времени моделирования t , то есть максимально возможное (потенциальное) количество принятых сообщений;

– зависимость количества $n_2(t, S)$ переданных сообщений, содержащих координаты местоположения, судами, находившимися в зоне покрытия хотя бы одного КА (зоне радиовидимости наземного пункта) от времени моделирования t ;

– зависимость количества $n_3(t, S)$ детектированных сообщений от времени моделирования t ;

– зависимость количества $n_4(t, S)$ детектированных сообщений, содержащих опознавательный код и координаты местоположения, то есть сообщений типа ADS-B, от времени моделирования t ;

– зависимость количества $n_5(t, S)$ воздушных судов, находившихся в зоне покрытия одного из КА (наземных пунктов авиационного наблюдения) и передавших хотя бы одно сообщение, от времени моделирования t , то есть максимально возможное количество идентифицированных воздушных судов;

– зависимость количества $n_6(t, S)$ воздушных судов, находившихся в зоне покрытия одного из КА (наземных пунктов авиационного наблюдения) и передавших хотя бы одно сообщение, содержащее координаты местоположения, от времени моделирования t , то есть максимально возможное количество локализованных воздушных судов;

– зависимость количества $n_7(t, S)$ идентифицированных судов от времени моделирования t ;

– зависимость количества $n_8(t, S)$ обнаруженных судов, то есть судов с локализованным местоположением, от времени моделирования t ;

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

- среднее количество $N_2(T, S)$ переданных сообщений, содержащих координаты местоположения, то есть сообщений типа ADS-B, за интервал моделирования T ;
- среднее количество $N_3(T, S)$ безошибочно принятых сообщений за интервал моделирования T ;
- среднее количество $N_4(T, S)$ безошибочно принятых сообщений ADS-B, содержащих опознавательный код и координаты местоположения, за интервал моделирования T ;
- среднее количество $N_5(T, S)$ судов, передавших хотя бы одно сообщение, за интервал моделирования T ;
- среднее количество $N_6(T, S)$ судов, передавших хотя бы одно сообщение типа ADS-B, за интервал моделирования T ;
- среднее количество $N_7(T, S)$ идентифицированных судов за интервал моделирования T ;
- среднее количество $N_8(T, S)$ обнаруженных судов за интервал моделирования T ;
- среднее количество $N_8(T, S, z)$ обнаруженных судов в зависимости от региона z наблюдения за интервал моделирования T .

Все перечисленные зависимости $n_i(t, S)$, $i = 1, \dots, 8$ также могут быть вычислены в зависимости от витка l (для КА) или другого заданного интервала времени. На практике функциональные зависимости $n_1(t, S)$, $n_2(t, S)$, $n_5(t, S)$, $n_6(t, S)$ и значения $N_1(T, S)$, $N_2(T, S)$, $N_5(T, S)$, $N_6(T, S)$ неизвестны, однако при моделировании систем сбора сведений о движении воздушных судов отношения $n_3(t, S)/n_1(t, S)$, $n_4(t, S)/n_2(t, S)$, $n_7(t, S)/n_5(t, S)$, $n_8(t, S)/n_6(t, S)$ могут говорить о конструктивном и программном превосходстве одной системы по сравнению с другой или выбора наилучшей структуры и параметров.

Имея оценки перечисленных базовых характеристик, можно определить производные характеристики, например требуемые пропускную способность канала связи или объем ЗУ бортовой аппаратуры КА.

Следует отметить, что достоинством разработанной модели является универсальность. Если задать в качестве частных моделей радиоэлектронной обстановки и распределения сигналов модель распределения источников излучения сигналов АИС и модель планирования слотов для передачи сообщений соответственно, представленный модельно-алгоритмический комплекс можно использовать для оценивания целевых показателей функционирования систем автоматической идентификации морских судов [29, 30].

5. Результаты моделирования функционирования космической системы авиационного наблюдения. С целью оценивания ста-

мистических характеристик энергетических параметров сигналов в зоне обзора КА используется статическая модель функционирования КА (без учета орбитального движения) и предполагается равномерное распределение воздушных судов на заданной высоте h в области прямой видимости КА, что позволяет 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.

Статистические характеристики энергетических параметров сигналов для КА с высотой орбиты $h_r = 500$ км и источников излучений, размещенных на высоте $h_s = 10$ км над поверхностью земли, представлены в таблице 3. Максимальное усиление $G_{МВ}$ спутниковой антенны принималось равным 6 дБ, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности $\theta_{3дВ} = 20^\circ$, угол направления максимального усиления относительно оси симметрии 40° .

В таблице в графе «Запас по мощности» через черту указаны значения для приемников с чувствительностями -134 и -117 дБ соответственно [31]. 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 (вероятность битовой ошибки менее 10^{-3}), для приемников с чувствительностью -117 дБ сигналы являются практически недоступными, для передатчиков с максимальной мощностью отношение сигнал/шум составляет всего 4,60 дБ, что соответствует низкой вероятности безошибочного приема сообщений.

Таблица 3. Статистические характеристики энергетических параметров сигналов систем авиационной наблюдения для линии связи между воздушным судном и КА

Характеристика	Максимум суммарных потерь	Минимум суммарных потерь
Суммарные потери, дБ	-186,17	-141,40
Потери $L_1(d_{ij}, f)$ мощности на распространение, дБ	-162,44	-149,50
Потери $L_4(\varphi_{ij})$ из-за расхождения плоскостей поляризации приемной и передающей антенн, дБ	-0,86	-0,02
Угол ψ поворота плоскости поляризации, град.	64,62	32,05
Потери $L_5(f, \beta)$ из-за эффекта Фарадея, дБ	-7,36	-1,44
Коэффициент $G_{прд}$ усиления передающей антенны, дБи	2,08	3,56

Продолжение таблицы 3

Характеристика		Максимум суммарных потерь	Минимум суммарных потерь
Коэффициент $G_{\text{прм}}$ усиления спутниковой антенны, дБи		-17,59	6,00
Запас по мощности, дБ	21	-31,17/-48,17	14,60/-3,40
	24	-28,17/-45,17	17,60/-0,40
	27	-25,17/-42,17	20,60/2,60
	29	-23,17/-40,17	22,60/4,60
Характеристики, поясняющие пространственное положение ИРИ относительно пункта наблюдения			
Расстояние $d(s_i, r_j)$ от источника s_i до приемника r_j , км		2915,38	657,20
Угол β возвышения над горизонтом, град		-3,04	46,28
Угол $\varphi(s_i, r_j)$ между плоскостями поляризации приемной и передающей антенн, град.		25,04	3,79
Угол θ отклонения луча от оси спутниковой антенны, град.		68,04	39,93

Оценивание количества $v_r(S, t)$ источников излучения в зоне покрытия КА проводилось с использованием статической и динамической моделей воздушной радиоэлектронной обстановки:

1. Моделирование движения КА — приемника сигналов авиационных систем связи с 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 $\theta_0 = 0$ град. Модель воздушной радиоэлектронной обстановки включает более 8000 тыс. судов $s_i \in S$, $i = 1, \dots, N_S$, местоположения которых не изменяются за время моделирования [14].

На рисунке 7 изображены графики количества судов $v(S, t)$, находящихся в зоне обзора КА r_j в момент времени t , и количества судов $v_r(S, t)$, находящихся в зоне обзора КА с учетом их энергетической доступности.

Для расчета электромагнитной доступности модель распределения типов авиационных ретрансляторов по их мощности была заимствована из работы [26], пороговое значение для обнаружения принималось равным -134 дБВт, максимальное усиление спутниковой антенны $G_{\text{МВ}} = 6$ дБ, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности $\theta_{-3\text{дВ}} = 20$ град.

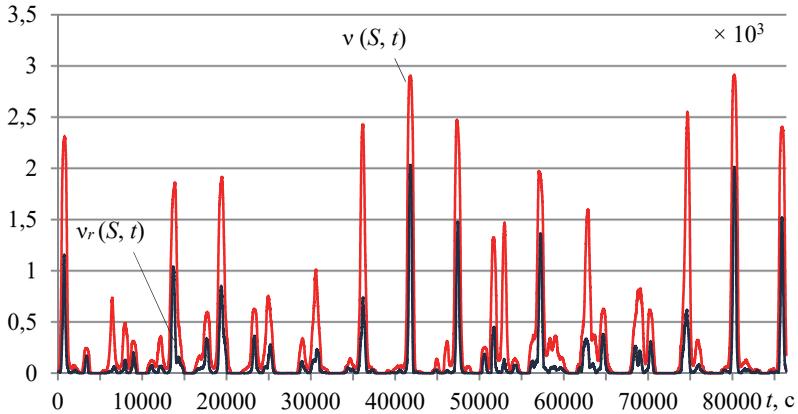


Рис. 7. Количество судов $v(S, t)$, попавших в зону обзора КА, и судов $v_r(S, t)$ в зоне обзора с учетом энергетической доступности

С целью сокращения объема излагаемого материала расчет остальных целевых показателей производится только для динамической модели воздушной РЭО.

2. Основным отличием условий моделирования по сравнению с предыдущим пунктом является применение динамической модели воздушной РЭО, включающей данные о полетах более чем 30 тысяч воздушных судов $s_i \in S$, $i = 1, \dots, N_S$ и более чем 120 тысяч рейсах $f_{ij} \in F_i$, $j = 1, \dots, n_i$, $n_i = \text{card} \langle F_i \rangle$.

Динамическая модель воздушной РЭО реализуется посредством смены местоположений воздушных судов $s_i | a_i(t_k) = 1$, где $a_i(t_k)$ — индикатор активности источника s_i в момент времени t_k , через равные интервалы обновления T_u , то есть при выполнении простейшего условия $t_k \% T_u \equiv 0$ (% — операция деления по модулю). На рисунке 8 представлен график изменения текущего количества $a(S, t)$ активных источников, определяемого выражением:

$$a(S, t_k) = \sum_{s_i \in S} a_i(t_k), \quad t_k \in [t_0, t_0 + T]. \quad (9)$$

Графики изменений количества $v_r(S, t)$ воздушных судов в зоне покрытия КА и коэффициента энергетической доступности $k = v_r(S, t)/v(S, t)$ от текущего положения КА на орбите изображены на рисунке 9.

Визуальное сравнение графиков на рисунках 7 и 9а показывает существенное различие в характере их поведения, что говорит о воз-

возможности использования статической модели РЭО только на коротких интервалах моделирования.

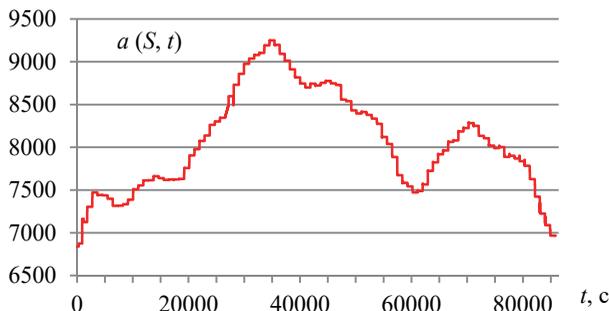


Рис. 8. Количество $a(S, t)$ активных источников излучений сигналов на частоте 1090 МГц

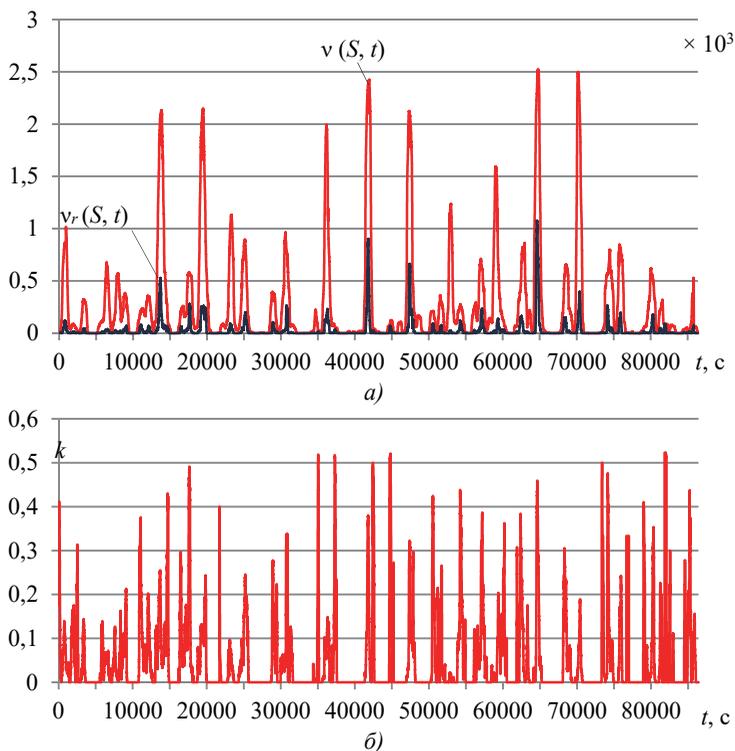


Рис. 9. Анализ радиовидимости: а) количество судов $v(S, t)$, попавших в зону обзора КА, и судов $v_r(S, t)$ в зоне обзора с учетом энергетической доступности; б) коэффициент энергетической доступности

Из анализа графика на рисунке 9б видно, что коэффициент k энергетической доступности не превосходит 50%. В то время как количество судов в зоне обзора КА достигает 3000 единиц, доступными (с энергетической точки зрения) будет не более 1500 тыс.

Результаты моделирования представлены на рисунке 10.

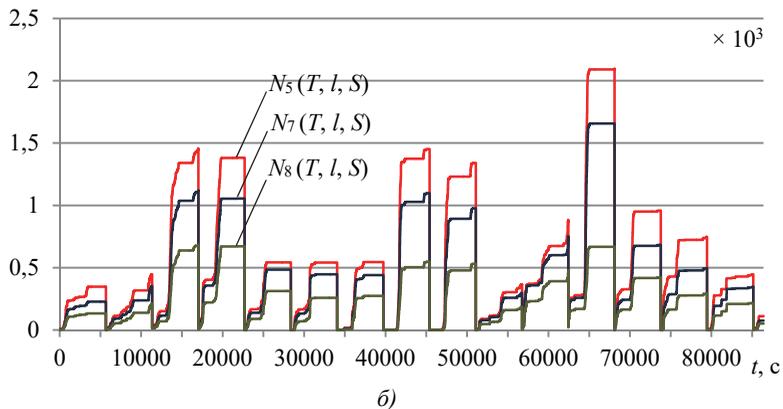
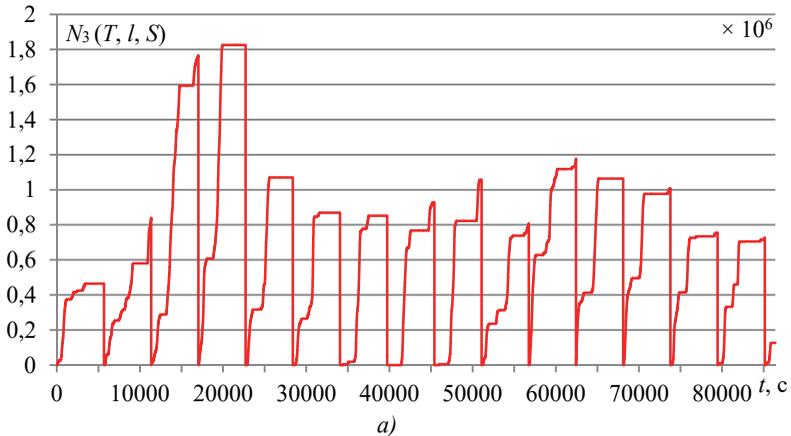


Рис. 10. Результаты моделирования: а) количество $N_3(t, l, S)$ детектированных сообщений всех типов; б) количество $N_5(t, l, S)$ потенциальных, количество $N_7(t, l, S)$ идентифицированных и количество $N_8(t, l, S)$ локализованных ВС

Общее количество моделируемых объектов составляет $N_S = 31666$, максимально возможное (потенциальное) количество

идентифицируемых воздушных судов составляет $N_5(T, S) = 13146$. Отличие примерно в два раза значений N_S и $N_5(T, S)$ обусловлено в основном кратковременностью излучений сигналов или времени полета воздушных судов (от 15 минут), что подтверждается на рисунке 2а. Минимальное значение количества $N_3(T, l, S)$ безошибочно принятых сообщений всех типов за один виток составляет 464907 ($l = 1$), максимальное — 1825714 ($l = 4$), среднее — 1029203, минимальное количество $N_7(T, l, S)$ идентифицированных судов составляет 229 ($l = 1$), максимальное — 1677 ($l = 12$), среднее — 803 штук, минимальное количество $N_8(T, l, S)$ локализованных судов — 114 ($l = 1$), максимальное — 650 ($l = 4$), среднее — 377. Общее количество детектированных сообщений за время моделирования ($T = 86400$ с) составляет $N_3(T, S) = 15205831$, идентифицированных судов $N_7(T, S) = 9198$, локализованных $N_8(T, S) = 4919$.

Результаты моделирования показывают, что вследствие интерференций сигналов существенно снижается количество безошибочно принятых сообщений и идентифицированных воздушных судов [6]. Для разрешения этой проблемы требуются дополнительные схемно-технические решения, например, пространственно-разнесенного приема.

Анализ полученных результатов позволяет определить зависимость среднего количества обнаруженных судов от региона и времени наблюдения T . Очевидно, что наиболее трудными с точки зрения обнаружения воздушных судов, как и ожидалось, являются европейский, китайский и североамериканский регионы. Вероятности обнаружения при указанных выше условиях моделирования за сутки равны 0,41, 0,34 и 0,18 (значения получены с учетом общего количества моделируемых объектов равного 31666) соответственно.

6. Результаты моделирования функционирования наземной системы авиационного наблюдения. *Статистические характеристики энергетических параметров сигналов систем авиационного наблюдения для воздушных судов, размещенных на высоте $h = 10$ км, представлены в таблице 4.*

Значения получены путем статистического анализа энергетических характеристик переданных сигналов объектами, равномерно распределенными в зоне обзора пункта контроля. В вычислениях были приняты следующие допущения: вертикальная поляризация приемной антенны, максимальное усиление $G_{\text{МВ}} = 3$ дБ, ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости $\theta_{3\text{дБ}} = 160^\circ$, интенсивность осадков $J = 59$ мм/ч, высота изотермы 0° над уровнем моря $h_0 = 4,5$ км.

Таблица 4. Статистические характеристики энергетических параметров сигналов системы авиационного наблюдения для линии связи между ВС и НП

Характеристика	Без учета осадков		С учетом осадков		
	Максимум суммарных потерь	Минимум суммарных потерь	Максимум суммарных потерь	Минимум суммарных потерь	
Суммарные потери, дБ	-152,40	-110,95	-152,91	-110,95	
Потери $L_1(d_{ij}, f)$ мощности на распространение, дБ	-144,08	-114,33	-144,08	-114,33	
Потери $L_2(f, \beta)$ в газах атмосферы, дБ	-1,31	-0,02	-1,31	-0,02	
Потери $L_3(\beta, f, h_0, J)$ в дожде, дБ	0,00	-0,00	-0,51	-0,003	
Потери $L_4(\varphi_{ij})$ из-за расхождения плоскостей поляризации приемной и передающей антенн, дБ	-0,01	0,00	-0,01	0,00	
Коэффициент $G_{\text{прм}}$ усиления приемной антенны, дБи	3,00	-1,56	3,00	-1,56	
Коэффициент $G_{\text{прд}}$ усиления авиационной антенны, дБи	-10,00	4,96	-10,00	4,96	
Запас по мощности, дБ	21	2,60/-14,40	44,05/27,05	2,09/-14,91	44,05/27,05
	24	5,60/-11,40	47,05/30,05	5,09/-11,91	47,05/30,05
	27	8,60/-8,40	50,05/33,05	8,09/-8,91	50,05/33,05
	29	10,60/-6,40	52,05/35,05	10,09/-6,91	52,05/35,05
Характеристики, поясняющие пространственное положение ИРИ относительно пункта наблюдения					
Расстояние $d(s_i, r_j)$ от источника s_i до приемника r_j , км	351,83	114,51	351,83	114,51	
Угол β возвышения над горизонтом, град	0,00	60,81	0,00	60,81	
Угол θ отклонения луча от оси главного лепестка авиационной антенны, град	90,00	29,14	90,00	29,14	

Из анализа таблицы видно, что на границе зоны прямой видимости (угол $\beta = 0^\circ$) для РПУ с чувствительностью -117 дБВт сигналы

являются практически недоступными, для РПУ с чувствительностью -134 дБВт и излучений мощностью 29 дБВт без учета осадков чистый запас $10,60$ дБ обеспечивает безошибочный прием 112 -битового сообщения (MODE S ES) с амплитудной модуляцией с вероятностью $0,95$ (при когерентной демодуляции), с учетом осадков запас $10,09$ дБ — с вероятностью $0,92$, для излучений мощностью 27 и менее вероятность правильного приема составляет менее $0,66$. В лучшем случае (взаимном расположении источника и приемника сообщений) имеется гарантированный запас мощности при использовании любого класса передающих и приемных устройств для декодирования сообщений с вероятностью ошибки $p_e < 10^{-3}$.

Оценивание количества $v_r(S, t)$ источников излучения в зоне радиовидимости сети наземных пунктов $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$. Зоны радиовидимости для наземных пунктов контроля определялись следующим образом: сеть источников s_i излучений сигналов мощностью e (мощность e принимается равной $21, 24, 27$ или 29 дБВт [26]) располагалась на высоте h над интересующим регионом с заданными приращениями по широте ΔB и долоте ΔL . Объект s_i считался наблюдаемым $\rho_i = 1$ для заданного пункта r_j контроля, если угол $\beta(s_i, r_j)$ возвышения над горизонтом объекта s_i для пункта r_j контроля больше нуля и мощность переданного сигнала на входе радиоприемного устройства больше порогового значения чувствительности.

Визуализация зон прямой видимости сети наземных пунктов $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$, соотнесённых с местоположением 15 наиболее загруженных аэропортов в европейском регионе, с помощью ГИС OpenStreetMap представлена на рисунке 11.

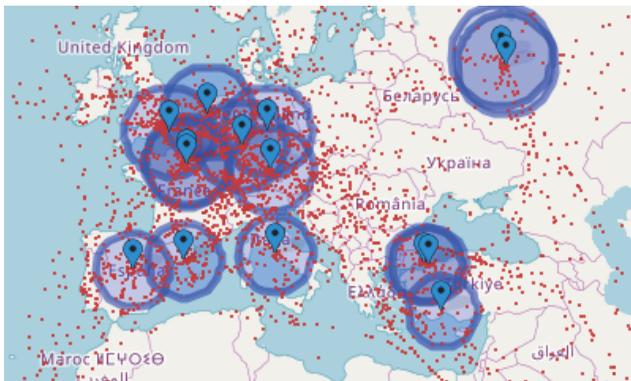


Рис. 11. Визуализация зон видимости наземных пунктов наблюдения для ВС на высоте $h = 10$ км на картографической основе

На рисунке 12 показаны графики изменения количества $v(S, t)$ и $v_r(S, t)$. В моделировании чувствительность РПУ принималась равной -117 дБ, осадки не учитывались. Общее количество обнаруженных объектов за время моделирования составляет 4391.

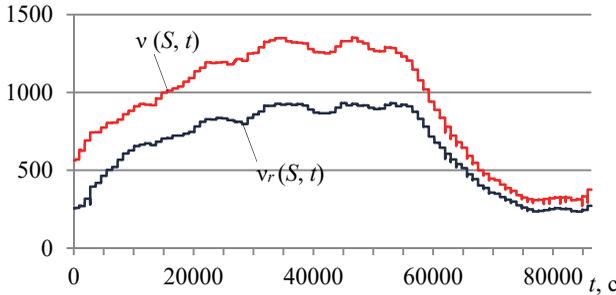


Рис. 12. Количество воздушных судов в зоне видимости сети R

На рисунке 13 представлены числовые показатели функционирования наземной сети, смоделированные по данным открытых источников информации, например, полученных путем веб-скрепинга (парсинга интернет-сайтов Flightradar24, Planefinder, ADS-B Exchange и т.д.).

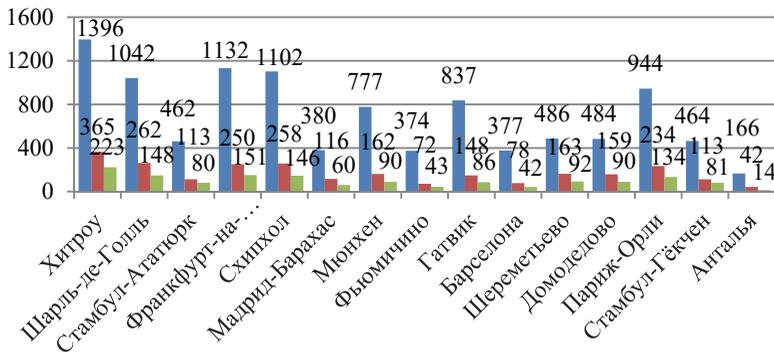


Рис. 13. Показатели $N_8(T, S)$, $\max [v(t, S)]$, $E[v(t, S)]$ функционирования сети наземных пунктов $r_j, j = 1, \dots, 15$

На диаграмме, представленной на рисунке 13, каждому моделируемому пункту наблюдения $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$ соответствует три характеристики, а именно, начиная с левого столбца, общее количество $N_8(T, S)$ обнаруженных объектов за время моделирования $T =$

86400 с, максимальное количество $\max [v(t, S)]$ одновременно наблюдаемых объектов пунктом r_j , среднее количество $E [v(t, S)]$ объектов в зоне радиовидимости пункта r_j . С уменьшением чувствительности РПУ и появлением дополнительных факторов, влияющих на ослабление мощности сигналов, например осадков, перечисленные характеристики снижаются. Результаты моделирования совпадают с данными анализа воздушного движения, предоставленными провайдером аэронавигационных услуг «National Air Traffic Services» [32].

Верификация имитационной модели функционирования космической системы контроля движения воздушных судов проводилась с использованием макета бортовой специальной аппаратуры приема и обработки сигналов системы АЗН-В, размещенного на борту летно-подъемного средства, путем сравнения полученных экспериментальных значений, в частности количества переданных сообщений судами в заданном территориальном районе, количества безошибочно принятых сообщений, количества обнаруженных объектов за заданный интервал времени с результатами имитационного моделирования.

В целом моделирование систем авиационного наблюдения позволяет сформировать технические решения при их проектировании, обосновать принципы планирования применения орбитальной группировки космических аппаратов, определить такие характеристики системы, как частоты обновления информации о местоположении судов, интервала времени от момента получения сообщения до доставки его потребителю, требования к объему бортового запоминающего устройства и скорости передачи информации по каналу связи.

7. Заключение. Разработана и программно реализована имитационная модель, позволяющая получать оценки целевых показателей функционирования космических и наземных систем идентификации и определения местоположения воздушных судов с учетом различных пространственных и энергетических факторов и условий распространения радиосигналов, а также реального размещения контролируемых объектов в мировом воздушном пространстве.

Имитационная модель функционирования может быть использована для подготовки исходных данных и обоснования тактико-технических требований для проектируемых опытных образцов космической и наземной техники, в частности, задавая местоположением наземных пунктов приема и обработки информации, определить требования к объему бортового запоминающего устройства и скорости передачи информации по спутниковому каналу связи.

С целью уменьшения количества интерференций сообщений от различных источников в зоне обзора КА и повышения полноты сведений о движении воздушных судов на определенных типах КА, в част-

ности типа «Iridium NEXТ», устанавливаются активные фазированные антенные решетки, поэтому моделирование приема сигналов авиационных систем связи с учетом диаграмм направленности спутниковых антенн такого типа является одним из направлений дальнейшей работы.

В случае больших объемов данных, 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 массивно-параллельных вычислений.

Литература

1. *Barson J.V.* Automatic Dependent Surveillance-Broadcast – The First Step in the FAA’s Next-Generation Air Transportation System // *Aviation, Space and Environmental Medicine*. 2009. vol. 80. no. 4. pp. 422–423.
2. *Zhang J., Wei L., Yanbo Z.* Study of ADS-B Data Evaluation // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2011. vol. 24. no. 4. pp. 461–466.
3. *Strohmeier M., Schäfer M., Lenders V., Martinovic I.* Realities and Challenges of NextGen Air Traffic Management: The Case of ADS-B // *IEEE Communications Magazine*. 2014. vol. 52. no. 5. pp. 111–118.
4. *Schäfer M. et al.* OpenSky Report 2016: Facts and Figures on SSR Mode S and ADS-B Usage // 35th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2016. pp. 1–9.
5. *Carandente M., Rinaldi C.* Aircon surveillance of the globe via satellite // Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications – Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV). 2014. pp. 53–55.
6. *Van Der Pryn R., Vincent R.* A Simulation of Signal Collisions over the North Atlantic for a Spaceborne ADS-B Receiver Using Aloha Protocol // *Positioning*. 2015. vol. 6. no. 03. pp. 23–31.
7. *Van Der Pryn R., Vincent R.* A Simulation of the Reception of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Signals in Low Earth Orbit // *International Journal of Navigation and Observation*. 2015. 11 p.
8. *Van Der Pryn R., Vincent R.* The CanX-7 Nanosatellite ADS-B Mission: A Preliminary Assessment // *Positioning*. 2017. vol. 08. pp. 1–11.
9. *Brodsky Y., Rieber R., Nordheim T.* Balloon-borne air traffic management (ATM) as a precursor to space-based ATM // *Acta Astronautica*. 2012. vol. 70. pp. 112–121.
10. *Knudsen B.G. et al.* ADS-B in space: Decoder implementation and first results from the GATOSS mission // 14th Biennial Baltic Electronic Conference (BEC). 2014. pp. 57–60.
11. Сайт компании «AnyLogic». URL: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 19.05.2018).
12. Сайт компании «Элина компьютер». URL: <http://elina-computer.ru/static/gpss-world.html> (дата обращения: 19.05.2018).
13. Сайт ФГУП «ГосНИИАС». URL: <https://www.gosniias.ru/> (дата обращения: 19.05.2018).
14. *Скорыходов Я.А., Мальшев Д.В.* Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования // *Информация и космос*. 2017. № 4. С. 137–141.
15. *Baek K., Bang H.* ADS-B based Trajectory Prediction and Conflict Detection for Air Traffic Management // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2012. vol. 13. no. 3. pp. 377–385.

16. *Xi L., Jun Z., Yanbo Z., Wei L.* Simulation Study of Algorithms for Aircraft Trajectory Prediction Based on ADS-B Technology // 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. 2008. pp. 322–327.
17. *Zhang K., Qiao Y., Zhang C.* Trajectory Tracking Using Auto-adaptive Multi-model Filtering Method in ADS-B System // Second International Conference on Robot, Vision and Signal Processing. 2013. pp. 93–97.
18. *Thipphavong D.P., Schultz C.A., Lee A.G., Chan S.H.* Adaptive Algorithm to Improve Trajectory Prediction Accuracy of Climbing Aircraft // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2013. vol. 36. no. 1. pp. 15–24.
19. *Allnutt J.E.* Satellite to Ground Radiowave Propagation: 2nd Edition // The Institution Of Engineering And Technology. 2010. 704 p.
20. *Сомов А.М., Корнев С.Ф.* Спутниковые системы связи // М.: Горячая линия-Телеком. 2012. 244 с.
21. *Кантор Л.Я., Ноздрин В.В.* Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи // М.: НИИР. 2009. 280 с.
22. *Roy A.E.* Orbital Motion // CRC Press. 2004. 544 p.
23. *Gupta O.P.* Global Augmentation of ADS-B Using Iridium NEXT Hosted Payloads // Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). 2011. pp. 1–15.
24. *Garcia M., Dolan J., Hoag A.* Aireon's initial on-orbit performance analysis of space-based ADS-B // Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). 2017. pp. 4A1-1–4A1-8.
25. *Нарманов Г.С.* Основы теории полета космических аппаратов // М.: Машиностроение. 1972. 608 с.
26. Динамические статистические исследования по спутниковому приему сигналов ADS-B для глобального слежения за рейсами гражданской авиации // Всемирная конференция радиосвязи. 2015. 19 с. URL: https://www.itu.int/md/dologin_md.asp?lang=es&id=R15-WRC15-C-0100!!MSW-R (дата обращения: 17.05.2016).
27. *Sklar B.* Digital Communication. Fundamentals and Application: 2nd Edition // Prentice Hall. 2017. 1104 p.
28. *Van Der Prys R., Vincent R.* A Simulation of Reflected ADS-B Signals over the North Atlantic for a Spaceborne Receiver // Positioning. 2016. vol. 7. pp. 51–62.
29. *Скорыходов Я.А., Андреев А.М.* Моделирование функционирования космического сегмента системы автоматической идентификации морских судов // Информационно-управляющие системы. 2018. Т. 93. № 2. С. 36–48.
30. *Скорыходов Я.А., Махров К.Б., Мальшев Д.В.* Имитационная модель функционирования космической системы контроля движения морских судов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2017. С. 23–33.
31. *Werner K., Bredemeyer J., Delovski T.* ADS-B over satellite: Global air traffic surveillance from space // Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications – Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV). 2014. pp. 47–52.
32. Сайт издательского дома «Авиатранспортное обозрение». URL: <http://www.ato.ru/blogs/blog-alekseya-sinickogo/30-tysyach-aviareysov-v-sutki-nad-evroпой> (дата обращения: 19.01.2016).

Скорыходов Ярослав Анатольевич — к-т техн. наук, начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: моделирование процессов и систем специального назначения, теория статистических решений, методы обработки и анализа измерительной информации, теория выбросов траекторий случайных процессов, системы искусственного интеллекта. Число научных публикаций — 30. yaroslavskor@gmail.com; ул. Красного курсанта, 18, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7 (812) 347-9759.

YA.A. SKOROKHOV
**SIMULATION OF SPACE AND GROUND-BASED AVIATION
SURVEILLANCE SYSTEMS FUNCTIONING**

Skorokhodov Ya. A. Simulation of Space and Ground-Based Aviation Surveillance Systems Functioning.

Abstract. At present, the orbital constellations of satellites with the possibility of receiving, processing and relaying the ADS-B («Automatic Dependent Surveillance — Broadcast») system signals that ensure globality and continuity of the air traffic monitoring are being created and gradually enhanced. In accordance with the concept of ADS-B technology usage, each air traffic participant broadcasts its identity, location, and status parameters in broadcast mode. Due to the fact that the system was not designed to receive signals onboard the satellite, there are certain problems related to their energy availability, the presence of collisions of messages from different sources, the effect of Doppler effect and other factors. Developed simulation model of aviation surveillance systems based on the reception of signals containing identification and navigation information and transmitted over the air in the broadcasting mode. Software-implemented simulation algorithms allow to set various constraints and assumptions (radiation sources distribution, aviation communication systems signals receiving points, information transmitting channel, signals frequency and duration distribution models) and obtain the target indicators estimates of the space and ground-based aviation surveillance systems functioning, taking into account various spatial and energy factors and conditions for the radio signals propagation, and controlled objects actual placement and their movement dynamics in the world airspace. Simulation model use methods and examples for calculating the space and ground aviation surveillance systems functioning target indicators are presented.

Keywords: mathematical modeling, aviation surveillance systems, automatic dependent surveillance - broadcasting, space systems, information processing.

Skorokhodov Yaroslav Anatolevich — Ph.D., head of the laboratory (research) of the Military Institute (research), Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: processes and special purposes systems modeling, statistical solutions theory, measurement information processing and analysis methods, random processes trajectories emission theory, artificial intelligence system. The number of publications — 30. yaroslavskor@gmail.com; 18, Krasnogo Kursanta str., St. Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7 (812) 347-9759.

References

1. Barson J.V. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast – The First Step in the FAA’s Next-Generation Air Transportation System. *Aviation, Space and Environmental Medicine*. 2009. vol. 80. no. 4. pp. 422–423.
2. Zhang J., Wei L., Yanbo Z. Study of ADS-B Data Evaluation. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2011. vol. 24. pp. 461–466.
3. Strohmeier M., Schäfer M., Lenders V., Martinovic I. Realities and Challenges of NextGen Air Traffic Management: The Case of ADS-B. *IEEE Communications Magazine*. 2014. vol. 52. no. 5. pp. 111–118.
4. Schäfer M. et al. OpenSky Report 2016: Facts and Figures on SSR Mode S and ADS-B Usage. 35th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2016. pp. 1–9.

5. Carandente M., Rinaldi C. Aireon surveillance of the globe via satellite. Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications – Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV). 2014. pp. 53–55.
6. Van Der Pryt R., Vincent R. A Simulation of Signal Collisions over the North Atlantic for a Spaceborne ADS-B Receiver Using Aloha Protocol. *Positioning*. 2015. vol. 6. no. 03. pp. 23–31.
7. Van Der Pryt R., Vincent R. A Simulation of the Reception of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Signals in Low Earth Orbit. *International Journal of Navigation and Observation*. 2015. 11 p.
8. Van Der Pryt R., Vincent R. The CanX-7 Nanosatellite ADS-B Mission: A Preliminary Assessment. *Positioning*. 2017. vol. 08. pp. 1–11.
9. Brodsky Y., Rieber R., Nordheim T. Balloon-borne air traffic management (ATM) as a precursor to space-based ATM. *Acta Astronautica*. 2012. vol. 70. pp. 112–121.
10. Knudsen B.G. et al. ADS-B in space: Decoder implementation and first results from the GATOSS mission. 14th Biennial Baltic Electronic Conference (BEC). 2014. pp. 57–60.
11. Sajt kompanii «AnyLogic» [The site of the company «AnyLogic»]. Available at: <https://www.anylogic.ru> (accessed: 19.05.2018). (In Russ.).
12. Sajt kompanii «Elina kompiuter» [The site of the company «Elina computer»]. Available at: <http://elina-computer.ru/static/gpss-world.html> (accessed: 19.05.2018). (In Russ.).
13. Sajt FGUP «GosNIAS» [The site of the company «State Research Institute of Aviation Systems State Scientific Center of Russian Federation»]. Available at: <https://www.gosnias.ru/> (accessed: 19.05.2018). (In Russ.).
14. 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 – Information and space*. 2017. vol. 4. pp. 143–147. (In Russ.).
15. Baek K., Bang H. ADS-B based Trajectory Prediction and Conflict Detection for Air Traffic Management. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2012. vol. 13. no. 3. pp. 377–385.
16. Xi L., Jun Z., Yanbo Z., Wei L. Simulation Study of Algorithms for Aircraft Trajectory Prediction Based on ADS-B Technology. 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. 2008. pp. 322–327.
17. Zhang K., Qiao Y., Zhang C. Trajectory Tracking Using Auto-adaptive Multi-model Filtering Method in ADS-B System. Second International Conference on Robot, Vision and Signal Processing. 2013. pp. 93–97.
18. Thippavong D.P., Schultz C.A., Lee A.G., Chan S.H. Adaptive Algorithm to Improve Trajectory Prediction Accuracy of Climbing Aircraft. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2013. vol. 36. no. 1. pp. 15–24.
19. Allnutt J.E. Satellite to Ground Radiowave Propagation: 2nd Edition. The Institution of Engineering and Technology. 2010. 704 p.
20. Somov A.M., Kornev S.F. *Sputnikovye sistemy svjazi* [Satellite Communication Systems]. M.: Gorjachaja linija-Telekom. 2012. 244 p. (In Russ.).
21. Kantor L.Ya., Nozdrin V.V. *Jelektromagnitnaja sovmestimost' sistem sputnikovoj svjazi* [Satellite Communication Systems Electromagnetic Compatibility]. M.: NIIR. 2009. 280 p. (In Russ.).
22. Roy A.E. Orbital Motion. CRC Press. 2004. 544 p.
23. Gupta O.P. Global Augmentation of ADS-B Using Iridium NEXT Hosted Payloads. Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). 2011. pp. 1–15.
24. Garcia M., Dolan J., Hoag A. Aireon's initial on-orbit performance analysis of space-based ADS-B. Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). 2017. pp. 4A1-1–4A1-8.

25. Narimanov G.S. *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Space Vehicles Flight Theory Fundamentals]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1972. 608 p. (In Russ.).
26. Dynamic Statistical Studies on Satellite Reception of the ADS B Signal for Global Flight Tracking for Civil Aviation. World Radiocommunication Conference (WRC-15). 2015. 19 p. Available at: <https://www.itu.int/md/R15-WRC15-C-0100/en> (accessed: 17.05.2016).
27. Sklar B. *Digital Communication. Fundamentals and Application: 2nd Edition*. Prentice Hall. 2017. 1104 p.
28. Van Der Pryt R., Vincent R. A Simulation of Reflected ADS-B Signals over the North Atlantic for a Spaceborne Receiver. *Positioning*. 2016. vol. 7. pp. 51–62.
29. Skorokhodov Ya.A., Andreev A.M. [Modeling the Vessels Automatic Identification System Space Segment Functioning]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2018. Issue 93. vol. 2. pp. 36–48. (In Russ.).
30. Skorokhodov Ya.A., Mahrov K.B., Malyshev D.V. [Imitation model of marine ships traffic control space system functioning]. *Trudy Voенno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo – Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2017. vol. 657. pp. 23–33. (In Russ.).
31. Werner K., Bredemeyer J., Delovski T. ADS-B over Satellite. Global Air Traffic Surveillance from Space. Tyrrhenian International Workshop on Digital communications – enhanced surveillance of aircraft and vehicles. 2014. pp. 47–52.
32. Sajt izdatel'skogo doma «Aviatransportnoe obozrenie» [The site of the publishing house «Air Transport Review»]. Available at: <http://www.ato.ru/blogs/blog-alekseya-sinickogo/30-tysyach-aviareysov-v-sutki-nad-evropoy> (accessed: 19.01.2016). (In Russ.).