

Модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах.

Часть 1. Режим одностороннего случайного множественного доступа¹

А. А. Маслов*, Г. В. Себекин*, М. С. Степанов**, С. Н. Степанов**,
А. О. Щурков*,

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва

**Московский технический университет связи и информатики, Москва

Поступила в редколлегию 25.07.2025 г. Принята 10.10.2025 г.

Аннотация—Разработана модель передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах в режиме одностороннего случайного множественного доступа. Она позволяет оценить долю потерянных пакетов вследствие возникновения коллизий с учетом особенностей размещения датчиков по территории зоны обслуживания сети, характеристик орбитальной группировки космических аппаратов, параметров антенн бортовых ретрансляторов и датчиков. Модель выполнена в среде Matlab в виде сценариев подготовки исходных данных, имитации процесса функционирования сети и обработки статистики. Проведены численные эксперименты по оценке доли потерянных пакетов для различных вариантов размещения датчиков по территории РФ и отдельного региона зоны обслуживания сети.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космические аппараты на низкой круговой орбите, датчик IoT, случайный множественный доступ, коллизии при передаче пакетов, имитационная модель.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_3_456

1. ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается сеть передачи данных IoT на базе космических аппаратов (КА) на низких круговых орбитах в режиме одностороннего случайного множественного доступа. Размещенные на территории зоны обслуживания сети датчики IoT осуществляют формирование пакетов данных с информацией о состоянии контролируемых объектов и отправку этих пакетов с заданной интенсивностью через линейные КА в центры мониторинга потребителей. Следствием пространственной разобщенности датчиков и большого количества КА в орбитальной группировке, измеряемого десятками и сотнями, при относительно низкой, до нескольких тысяч км, высоте орбиты является то обстоятельство, что сигналы разных датчиков принимаются и ретранслируются различными наборами КА, которые могут не совпадать между собой полностью или частично. Пример такого несовпадения иллюстрируется рисунком 1. Здесь синие линии ограничивают секторы доступности КА для датчиков и соответствуют минимально допустимым углам места в направлении от датчика на КА. При этом наборы доступных КА постоянно изменяются.

¹ Работа первого, второго и пятого авторов выполнена в МФТИ, Физтех при финансовой поддержке Фонда НТИ в рамках Договора №70-2025-000804 от 26.05.2025

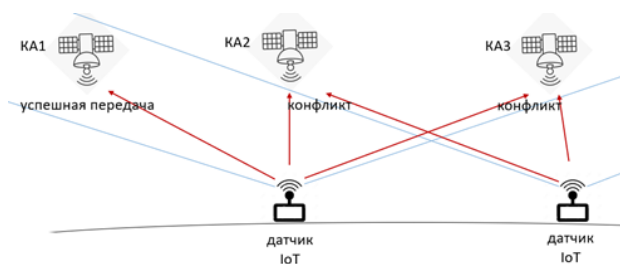


Рис. 1. Несовпадение наборов КА, через которые могут приниматься и ретранслироваться сигналы разных датчиков

Работа датчиков не скоординирована, и в сети возможны коллизии, обусловленные наложением пакетов при приеме КА. Коллизия возникает, если конкретный КА доступен нескольким датчикам (рисунок 1), передающим пакеты, начало приема которых на КА отличается не более чем на время, равное продолжительности передачи пакета T_p (рисунок 2).

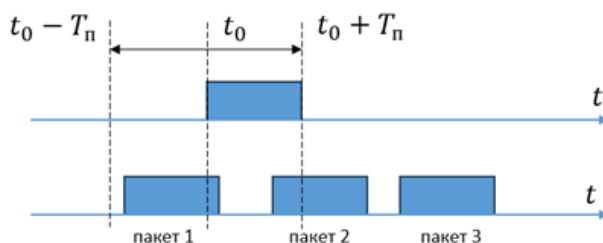


Рис. 2. Примеры наложения пакетов при приеме КА

В частности, на рисунке 2 показаны примеры возникновения коллизий для пакета с началом приема в момент t_0 , отмеченного на верхней временной оси, с пакетами 1 и 2, моменты начала приема которых принадлежат интервалу $(t_0 - T_p, t_0 + T_p)$. При этом пакет 3 коллизий не вызывает. Успешная доставка пакета имеет место, если коллизия отсутствовала хотя бы на одном КА, принявшем и ретранслировавшем данный пакет.

Естественным показателем качества функционирования для такой сети является доля потерянных вследствие коллизий пакетов π . Величина π зависит от размещения датчиков по территории зоны обслуживания, интенсивностей их работы и графиков пролета КА над каждым датчиком. Указанные графики, в свою очередь, определяются параметрами орбитальной группировки КА, их бортовых ретрансляторов и датчиков. Учет такого большого количества параметров, влияющих на показатель π , осложняет задачу моделирования сети. В то же время, модель необходима как разработчикам, так и операторам сети, чтобы проанализировать, какие последствия будут иметь те или иные мероприятия по наращиванию или снижению численности датчиков, назначению их рабочих параметров, чтобы в результате оценить приемлемость и предпочтительность вариантов развития сети.

Перечисленные обстоятельства обуславливают актуальность задачи моделирования сети. Решение этой задачи является целью настоящей статьи.

Существует достаточно широкий круг публикаций, посвященных системам случайного множественного доступа (СМД). Фундаментальные результаты приведены, например, в [1–3]. Как правило, исследования направлены на поиск эффективных процедур разрешения конфликтов, что позволяет снизить задержку доставки пакетов, увеличить скорость передачи. Здесь, однако, предполагается, что абоненты получают информацию о фактах возникновения

конфликтов. Есть ряд работ, посвященных оценке характеристик передачи данных непосредственно в сетях IoT, например, [4–8], анализу методов доступа в них [9–11]. Работы, однако, не учитывают специфику функционирования спутниковой сети, связанную с высокой динамикой изменения доступности КА для датчиков в зависимости от их местоположения. В случаях, подобных рассматриваемому, когда построение аналитических моделей затруднено, эффективным средством является имитационное моделирование [1], позволяющее в наибольшей степени учесть характерную для сети специфику. Такой подход и используется в настоящей статье. Для достижения поставленной цели в разделе 2 дается описание модели, а в разделе 3 приводятся численные результаты оценки зависимостей доли потерянных пакетов от интенсивности потока пакетов для трех различных вариантов размещения датчиков на территории РФ для сети, построенной на базе орбитальной группировки с 264 КА.

2. ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Для каждого обслуживаемого в сети датчика ретрансляторами являются КА, доступные в момент передачи пакета. Будем полагать, что доступность КА ограничена минимально допустимым углом α места в направлении от датчика к КА. Углу α однозначно соответствует максимально допустимый угол γ между направлениями из центра Земли на датчик и на КА. Из несложных тригонометрических соотношений, применяемых к плоскому треугольнику, образованному датчиком, КА и центром Земли, получаем

$$\gamma = \arccos \frac{r \cdot \cos \alpha}{r + h} - \alpha, \quad (1)$$

где r – радиус Земли и h – высота орбиты КА. Если передача пакета имела место в момент времени t , то КА был доступен при условии, что текущее значение угла γ_t между направлениями из центра Земли на датчик и на КА было не больше γ . Введем обозначение координат, определяющих величину γ_t :

- $\varphi_{\text{ш}}^{\text{дт}}$ и $\varphi_{\text{д}}^{\text{дт}}$ – широта и долгота датчика;
- $\varphi_{\text{ш}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t), \varphi_{\text{д}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t)$ – текущие широта и долгота проекции на Землю КА с номером $n_{\text{ка}}$, $n_{\text{ка}} = 1, 2, \dots, N_{\text{ка}}$, где $N_{\text{ка}}$ – число КА в орбитальной группировке.

Применяя к сферическому треугольнику, образованному датчиком, точкой проекции КА на Землю и Северным полюсом, сферическую теорему косинусов, имеем

$$\gamma_t(\varphi_{\text{ш}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t), \varphi_{\text{д}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t), \varphi_{\text{ш}}^{\text{дт}}, \varphi_{\text{д}}^{\text{дт}}) = \arccos(\sin \varphi_{\text{ш}}^{\text{дт}} \sin \varphi_{\text{ш}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t) + \cos \varphi_{\text{ш}}^{\text{дт}} \cos \varphi_{\text{ш}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t) \cos(\varphi_{\text{д}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t) - \varphi_{\text{д}}^{\text{дт}})). \quad (2)$$

Множество КА, доступных датчику с координатами $(\varphi_{\text{ш}}^{\text{дт}}, \varphi_{\text{д}}^{\text{дт}})$ в момент времени t , определяется соотношением

$$S_{\text{дт}}(t) = \{n_{\text{ка}} : \gamma_t(\varphi_{\text{ш}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t), \varphi_{\text{д}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t), \varphi_{\text{ш}}^{\text{дт}}, \varphi_{\text{д}}^{\text{дт}}) \leq \gamma, n_{\text{ка}} = 1, 2, \dots, N_{\text{ка}}\}. \quad (3)$$

Порядок расчета $\varphi_{\text{ш}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t), \varphi_{\text{д}}^{\text{ка}}(n_{\text{ка}}, t), n_{\text{ка}} = 1, 2, \dots, N$, с учетом наклона орбиты, равномерного разбоя колец и КА в каждом кольце, а также того, что КА делает полный оборот вокруг Земли за рассчитанный период обращения, а Земля вращается вокруг своей оси с угловой скоростью 360° в сутки, описан в [13, 14].

Здесь необходимо сделать замечание, что расчет $S_{\text{дт}}(t)$ в процессе моделирования поступления пакетов может привести к кратному увеличению требуемого времени, поэтому указанные

вычисления целесообразно провести заранее с некоторым шагом по времени $\Delta\tau$. Величину $\Delta\tau$ можно выбирать из условия, что она существенно меньше средней продолжительности интервала доступности отдельного КА датчику, и потому в течение $\Delta\tau$ набор доступных КА практически неизменен. В рассматриваемом в разделе 3 численном примере среднее время доступности КА измеряется минутами, а $\Delta\tau = 1$ с. Далее, хранить при моделировании множества $S_{\text{дт}}(t)$ для каждого датчика при количестве датчиков, измеряемом десятками и сотнями тысяч, также весьма затратно с точки зрения расхода памяти. Поэтому будем считать, что на относительно компактной территории, значительно меньшей мгновенной зоны обслуживания отдельного КА, из любой точки этой территории доступен в каждый момент времени одинаковый набор КА. Количество таких точек N_T может быть довольно большим. Например, в приведенном в разделе 3 численном примере 100 точек на территории РФ. Таким образом, при моделировании будем считать, что:

- датчики находятся в окрестности одной из N_T точек;
- для каждой точки $k = 1, 2, \dots, N_T$ рассчитаны списки доступных КА $\mathbf{H}^*(e, k)$ в моменты времени $e\Delta\tau$, $e = 1, 2, \dots, E$, $E = \left\lfloor \frac{T_{\text{мод}}}{\Delta\tau} \right\rfloor$, где $T_{\text{мод}}$ – время моделирования.

Кроме того, в представляющей интерес области параметров время распространения сигналов от датчика до КА существенно меньше времени передачи пакета $T_{\text{п}}$, поэтому далее указанным временем распространения пренебрежем.

Модель реализована в среде Matlab и включает сценарии:

- подготовки исходных данных, т. е. координат точек, интенсивностей λ_k , $k = 1, 2, \dots, N_T$, передачи пакетов из них, а также массива списков доступных КА с шагом по времени $\Delta\tau$;
- имитации процесса функционирования сети и набора статистики;
- обработки статистики.

Основным является сценарий имитации процесса функционирования сети и набора статистики, который использует (рисунок 3):

- генератор пакетов (далее генератор);
- обработчик списка передаваемых пакетов (далее обработчик);
- список передаваемых пакетов;
- массив списков доступности КА в точках;
- массив статистических записей.

Работа модели осуществляется циклически до накопления требуемого количества переданных пакетов. Каждый цикл включает генерацию пакета с использованием генератора и обработку операций по имитации его передаче в сети с помощью обработчика.

Генератор обеспечивает формирование пуассоновского потока с интенсивностью $\lambda = \sum_{k=1}^{N_T} \lambda_k$, т. е. последовательную генерацию интервалов псевдослучайной длительности, которая имеет экспоненциальное распределение с параметром λ . Время поступления пакета $t_{\text{п}}$ вычисляется, как сумма предшествующих интервалов. Генератор также определяет точку $g_{\text{п}}$, к которой относится пакет, с использованием датчика равномерно распределенных случайных чисел на интервал $(0, 1)$. Пакет соотносится с точкой k^* , если сгенерированное число попало в полуинтервал $\left[\frac{\sum_{k=1}^{k^*-1} \lambda_k}{\lambda}, \frac{\sum_{k=1}^{k^*} \lambda_k}{\lambda} \right)$. Отметим, что при $\lambda_k = \frac{\lambda}{N_T}$, $k = 1, 2, \dots, N_T$, номер точки определяется, как равномерно распределенное целое случайное число в диапазоне от 1 до N_T . Если использовать такое допущение при моделировании, регионы с более высокой плотностью



Рис. 3. Основные информационные и программные блоки, используемые в сценарии имитации процесса функционирования сети и набора статистики, и их взаимодействие между собой

размещения датчиков должны включать большее число точек. Итак, результатом каждого обращения к генератору являются реквизиты очередного пакета $(t_{\text{п}}, g_{\text{п}})$, которые передаются в обработчик.

Обработчик выполняет следующие операции:

- исключение из списка пакетов, время приема которых завершено, т. е. для которых время начала передачи меньше $t_{\text{п}} - T_{\text{п}}$, и формирование по ним статистических записей;
- выявление возможных коллизий на доступных КА и включение в список передаваемых пакетов.

Для добавления пакета в список передаваемых пакетов обработчик выбирает из массива списков доступности КА список для точки $g_{\text{п}}$ с номером $\lceil \frac{t_{\text{п}}}{\Delta\tau} \rceil$. Далее осуществляется формирование строки записи, которая кроме $t_{\text{п}}$ и $g_{\text{п}}$ включает вектор признаков доступности КА для данного пакета $\vec{a}_{\text{п}} = (a_{\text{п},1}, a_{\text{п},2}, \dots, a_{\text{п},N_{\text{ка}}})$. Элементы этого вектора, как и векторов, уже включенных в список передаваемых пакетов, могут принимать три значения:

- значение 0 — соответствующий КА не используется для ретрансляции пакета;
- значение 1 — соответствующий КА используется для ретрансляции пакета и коллизии при приеме на текущий момент не выявлены;
- значение -1 — на соответствующем КА выявлена коллизия.

Сначала состояние вектора $\vec{a}_{\text{п}}$ инициализируется нулями. Затем единицы проставляются для компонент $\vec{a}_{\text{п}}$, соответствующих номерам КА в выбранном списке доступности КА и проводится проверка наличия конфликтов с пакетами, уже внесенными в список передаваемых пакетов, с номерами записей $i = 1, 2, \dots, I$, где I — текущее количество передаваемых пакетов. Естественно, проверка выполняется, если $I > 0$. Для каждой единичной компоненты $\vec{a}_{\text{п}}$ с номером $n_{\text{ка}}$ анализируются признаки $a_{1,n_{\text{ка}}}, a_{2,n_{\text{ка}}}, \dots, a_{I,n_{\text{ка}}}$. Если среди них выявлены значения 1 или -1 , т. е. КА уже используется, признак устанавливается в -1 , и одновременно задается $a_{\text{п},n_{\text{ка}}} = -1$. Строка $(a_{\text{п},1}, a_{\text{п},2}, \dots, a_{\text{п},N_{\text{ка}}}, t_{\text{п}}, g_{\text{п}})$ заносится в список передаваемых пакетов под номером $I + 1$. Таким образом, записи в списке передаваемых пакетов упорядочены по времени. Признаки $a_{i,n_{\text{ка}}}$, $i = 1, 2, \dots, I + 1$, $n_{\text{ка}} = 1, 2, \dots, N_{\text{ка}}$ образуют матрицу, в каждом столбце которой при отсутствии коллизий на КА может быть одна единица и остальные нули или при наличии коллизий есть -1 и остальные нули, но нет единиц. Очевидно, пакет доставлен успешно, если на момент его исключения из списка, т. е. при выполнении условия $t_i + T_{\text{п}} < t_{\text{п}}$, где i номер строки таблицы $i = 1, 2, \dots, I$, среди элементов матрицы $a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,N_{\text{ка}}}$ есть хотя бы одна единица. В случае нахождения таких элементов обработчик записывает в массив статистических записей информацию об успешной доставке пакета. Иначе в данный массив заносится информация о недоставке пакета. Отметим, что при таком подходе учитывается и случай, когда список доступных КА для точки пуст. При этом вектор $\vec{a}_{\text{п}}$ содержит только нулевые компоненты, пакет не ретранслируется ни одним КА и не создает коллизий при одновременной передаче с другими пакетами.

Разработанный алгоритм сценария имитации процесса функционирования сети и набора статистики представлен на рисунках 4 и 5.

Поскольку в массиве статистических записей присутствует информация о привязке пакетов к точкам, доли потерянных пакетов могут вычисляться как для сети в целом, так и по выбранным наборам точек. Если, к примеру, требуется найти долю потерянных пакетов для региона, который задается координатами центра $\varphi_{\text{ш}}^{\text{per}}, \varphi_{\text{д}}^{\text{per}}$ и радиусом R_{per} , то множество номеров точек, по которым обрабатывается статистика, по аналогии с соотношениями (2) и (3) определяется в виде:

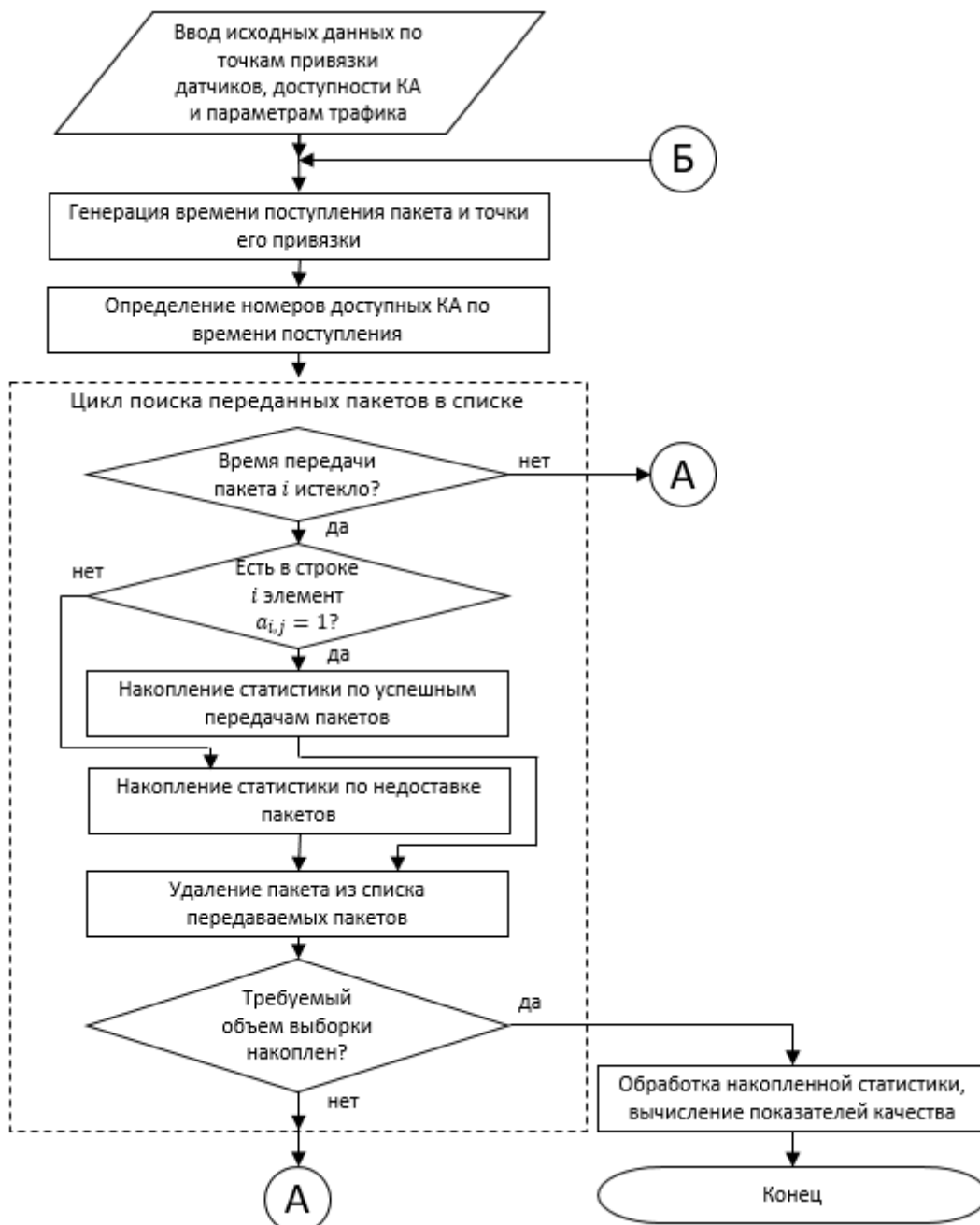


Рис. 4. Алгоритм работы сценария имитации процесса функционирования сети и набора статистики (начало)



Рис. 5. Алгоритм работы сценария имитации процесса функционирования сети и набора статистики (окончание)

$$S_{\text{дт}}(t) = \left\{ k : \gamma_{\text{пер}} \left(\varphi_{\text{ш}}^{(k)}, \varphi_{\text{д}}^{(k)}, \varphi_{\text{ш}}^{\text{пер}}, \varphi_{\text{д}}^{\text{пер}} \right) \leq \frac{R_{\text{пер}}}{r}, k = 1, 2, \dots, N_{\text{т}} \right\}, \quad (4)$$

где

$$\gamma_{\text{пер}} \left(\varphi_{\text{ш}}^{(k)}, \varphi_{\text{д}}^{(k)}, \varphi_{\text{ш}}^{\text{пер}}, \varphi_{\text{д}}^{\text{пер}} \right) = \arccos \left(\sin \varphi_{\text{ш}}^{(k)} \sin \varphi_{\text{ш}}^{\text{пер}} + \cos \varphi_{\text{ш}}^{(k)} \cos \varphi_{\text{ш}}^{\text{пер}} \cos \left(\varphi_{\text{д}}^{(k)} - \varphi_{\text{д}}^{\text{пер}} \right) \right), \quad (5)$$

и $\left(\varphi_{\text{ш}}^{(k)}, \varphi_{\text{д}}^{(k)} \right)$, $k = 1, 2, \dots, N_{\text{т}}$, координаты точек.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим три варианта размещения датчиков IoT на территории РФ, каждый из которых представлен $N_{\text{т}} = 100$ точками, в окрестности которых находятся датчики, в т. ч.:

- относительно равномерное распределение (рисунок 6);
- размещение в европейской части РФ (рисунок 7);
- размещение в арктическом регионе вдоль Северного морского пути (рисунок 8).

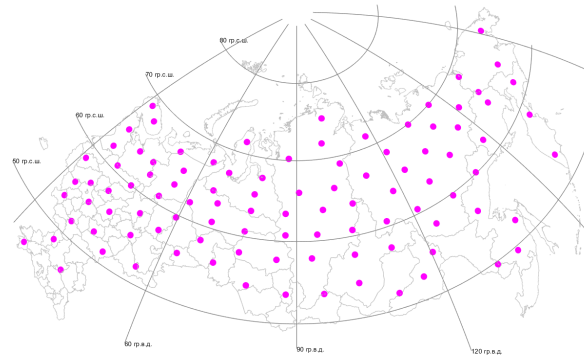


Рис. 6. Относительно равномерное распределение датчиков IoT по территории РФ

При выполнении расчетов будем полагать, что интенсивности передачи пакетов датчиками, соотносящихся с каждой точкой, одинаковы.

Примем также для расчетов, что орбитальная группировка сети содержит двенадцать колец по двадцать два КА в каждом кольце, высота орбит 750 км, наклонение орбит 89° . Минимально допустимый угол места для антенны датчика в направлении КА, при котором еще возможна передача пакета через этот КА, составляет 30° . Время передачи пакета составляет 80 мс, что примерно соответствует характеристикам каналов сети LoRaWAN, построенных на основе микросхем фирмы Semtech [12], включающим коэффициент расширения спектра $SF = 8$, ширину полосы $\Delta F = 250$ КГц, объем данных в пакете 63 байта, скорость кодирования $4/5$, длину преамбулы 8 символов, скорость передачи 10,937 кбит/с.

Возможный вид мгновенных зон обслуживания КА иллюстрируется рисунком 9. Видно, что зоны покрывают всю территорию РФ. Причем с увеличением широты количество одновременно доступных для передачи пакетов КА возрастает.

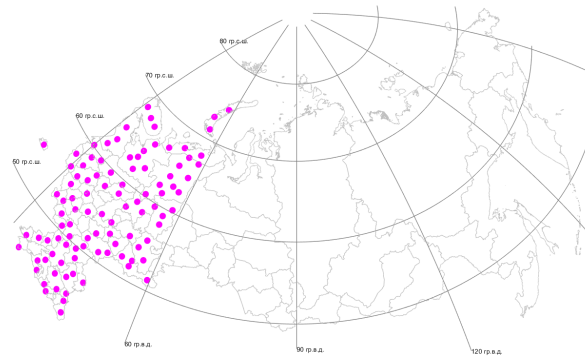


Рис. 7. Размещение датчиков IoT в европейской части РФ

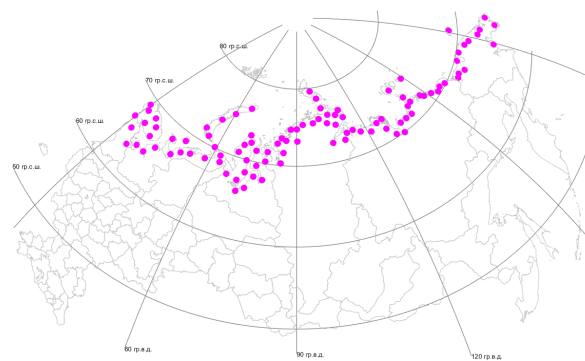


Рис. 8. Размещение датчиков IoT в арктическом регионе

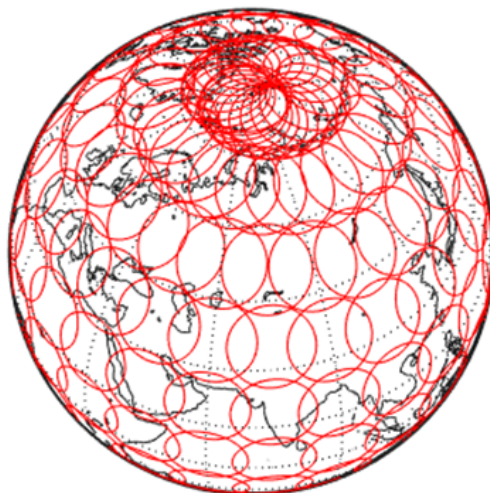


Рис. 9. Возможный вид мгновенных зон обслуживания КА орбитальной группировки сети

Сначала определим, насколько оценки показателя π , полученные при моделировании, могут отличаться от теоретических значений π . С этой целью построим доверительные интервалы (ДИ), используя методику, описанную в [1]. При построении ДИ общий объем выборки 2,6 млн разделен на 26 циклов по 100 тысяч попыток передачи пакетов. Для каждого цикла выполнены оценки среднего значения π , затем вычислена оценочная дисперсия, и с использованием таблиц распределения Стюдента получены верхняя и нижняя границы ДИ для уровня доверия 0,95. Результаты представлены на рисунке 10 и в таблице 1.

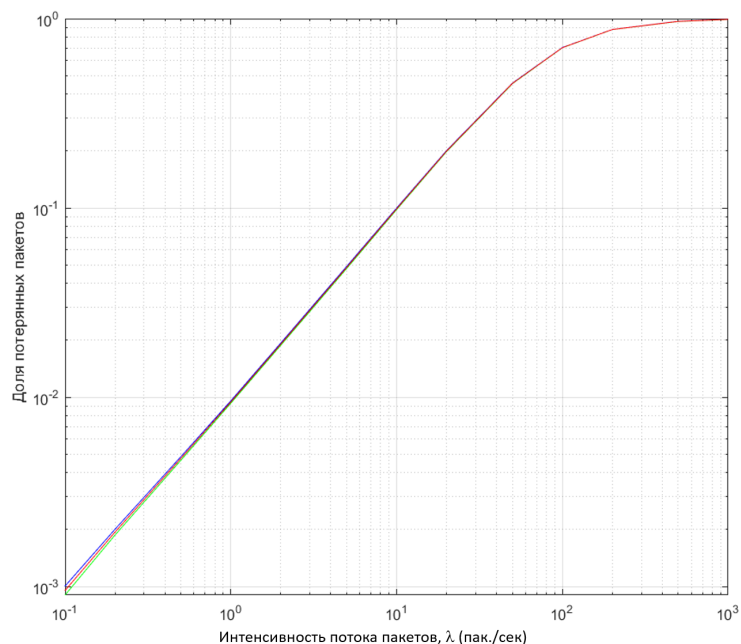


Рис. 10. Зависимость доли потерянных пакетов π от интенсивности потока пакетов в сети λ

Таблица 1. Результаты построения ДИ для доли потерянных пакетов π в зависимости от интенсивности потока пакетов λ в сети

Интенсивность λ , пак./с	0,1	0,2	0,5	1	2	5
Среднее значение π	0,00095	0,00194	0,00475	0,00943	0,01905	0,04851
Нижняя граница ДИ для π	0,00090	0,00187	0,00465	0,00929	0,01880	0,04790
Верхняя граница ДИ для π	0,00100	0,00200	0,00485	0,00956	0,01931	0,04912
Максимальная относительная погрешность, %	5,448	3,520	2,197	1,431	1,335	1,260

На рисунке 10 среднее значение оценки по всей выборке показано красным цветом, а верхняя и нижняя границы ДИ синей и зеленой линиям. Видно, что различить эти линии визуально можно лишь при низких интенсивностях $\lambda < 1$ пак./с. При $\lambda \geq 1$ пак./с линии сливаются в одну. Это подтверждают и данные таблицы 1, в последней строке которой дана максимальная относительная погрешность оценки, равная отношению половины ширины ДИ к среднему значению оценки. Эта погрешность убывает с ростом λ и при $\lambda \geq 1$ пак./с составляет немногим более процента. Таким образом, точность оценки показателя π по результатам моделирования пригодна для решения практических задач.

Расчеты зависимостей показателя π от интенсивности λ выполнены для всех трех вариантов размещения датчиков IoT на территории РФ (рисунок 11). Наименьшее значение π для любой интенсивности входного потока обеспечивается для варианта относительно равномерного распределения датчиков по территории РФ. Несколько худшее значение π , примерно на

30%, обеспечивается для размещения датчиков вдоль Северного морского пути. Наихудший вариант по величине π – это размещение датчиков в европейской части. Здесь величина π примерно в три раза больше, чем для первого варианта, т. е. различие на 200%. Объяснить небольшое увеличение π для варианта размещения датчиков вдоль Северного морского пути можно тем, что, хотя плотность размещения датчиков там и высокая, но и велико и количество доступных КА.

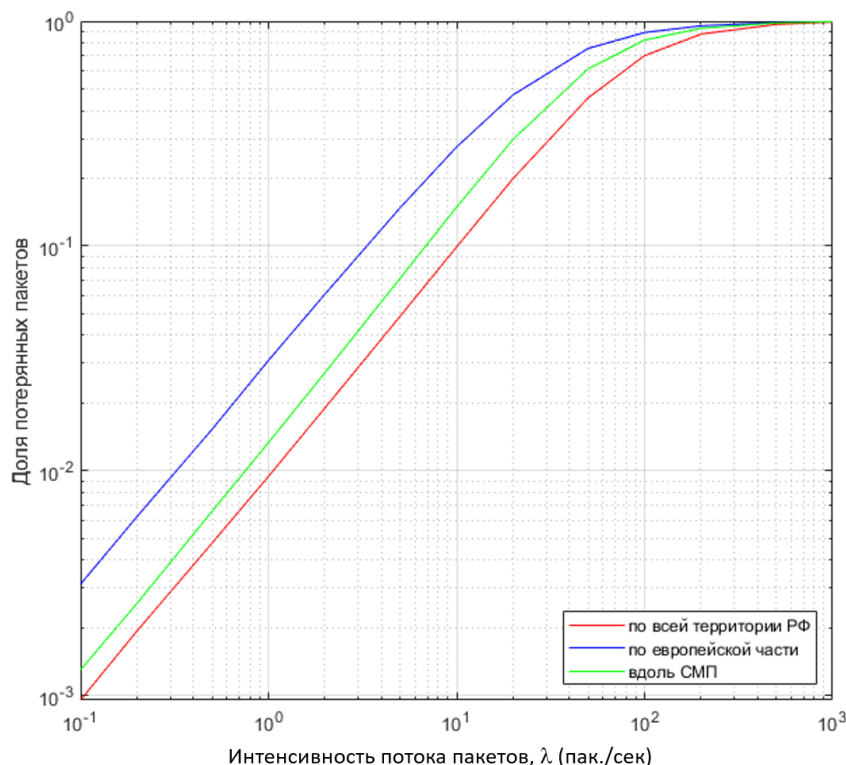


Рис. 11. Зависимости доли потерянных пакетов π от интенсивности входного потока пакетов в сети λ для различных вариантов размещения датчиков на территории РФ

Собственно, для потребителей данных IoT больший интерес представляет величина π не по сети в целом, а из региона, где расположены их датчики. Приведем пример оценки π для Московского региона в форме круга с центром в Москве и радиусом 500 км. Результаты определения множества точек для региона в соответствии с соотношениями (4) и (5) иллюстрируются рисунком 12, а зависимости π от λ показаны на рисунке 13.

Видно, что при низких интенсивностях входных потоков пакетов доля потерянных пакетов в Московском регионе превосходит показатель по сети более чем на 60%. Для детализации учета влияния размещения датчиков по территории зоны обслуживания на показатели качества обозначим через $\pi^{(n_T)}$ долю потерянных пакетов, переданных датчиками, которые соотнесены с точкой $n_T = 1, 2, \dots, N_T$, и введем региональный поправочный коэффициент $K_{\pi}^{(n_T)} = (\pi^{(n_T)} / \pi) 100\%$, имеющий смысл относительной величины доли потерь в процентах для конкретной точки в сравнении с долей потерь по сети. Совокупность значений $K_{\pi}^{(n_T)}$ для точек с долей потерь, превышающей средние по сети, иллюстрируется рисунком 14.

Потребители данных IoT могут определить долю потерь в интересующей точке по значению π для сети и региональному поправочному коэффициенту. Естественно, подход к оценке $\pi^{(n_T)}$ с использованием поправочных коэффициентов имеет смысл лишь в случае, если подтвердить

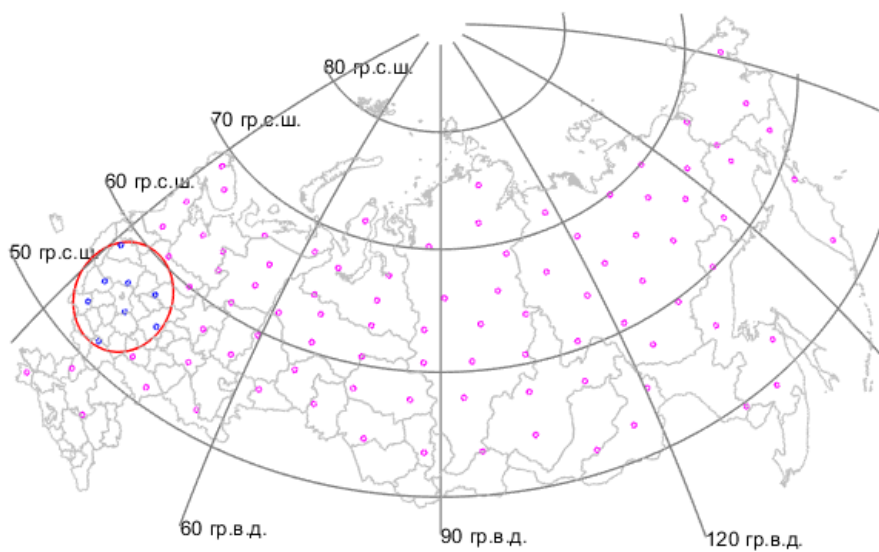


Рис. 12. Множество точек, попавших в Московский регион

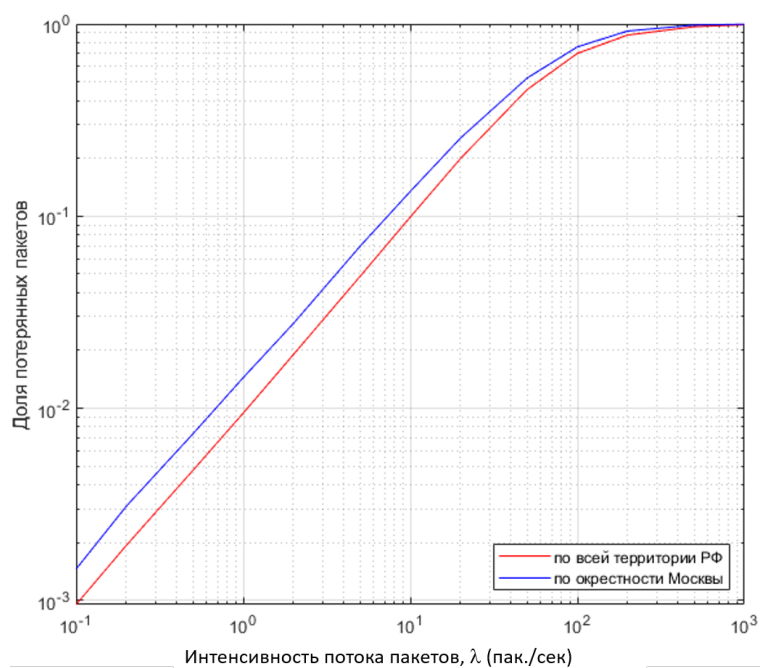


Рис. 13. Зависимости доли потерянных пакетов π от интенсивности входного потока пакетов в сети λ для Московского региона

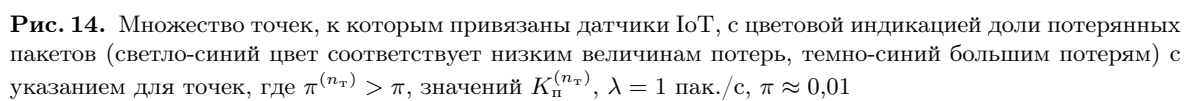


График зависимости поправочного коэффициента от интенсивности потока пакетов, λ (пак./сек). На графике представлены данные для трех точек измерения: Точка 62 (синяя линия с кругами), Точка 52 (оранжевая линия с кругами) и Точка 79 (желтая линия с кругами). Ось X (горизонтальная) обозначает интенсивность потока пакетов λ в диапазоне от 0.6 до 1.5. Ось Y (вертикальная) обозначает поправочный коэффициент в диапазоне от 0 до 200. Точка 62 имеет самые высокие значения, колеблющиеся между 160 и 180. Точка 52 имеет значения в диапазоне от 100 до 120. Точка 79 имеет самые низкие значения, колеблющиеся между 15 и 25.

Интенсивность потока пакетов, λ (пак./сек)	Поправочный коэффициент (Точка 62)	Поправочный коэффициент (Точка 52)	Поправочный коэффициент (Точка 79)
0.6	168	100	15
0.7	165	103	16
0.8	158	108	25
0.9	178	107	23
1.0	162	111	22
1.1	168	105	23
1.2	176	104	23
1.3	167	118	24
1.4	168	110	21
1.5	181	107	21

Видно, что с изменением интенсивности λ величины $K_{\Pi}^{(n_{\tau})}$ претерпевают некоторые колебания, однако, резких изменений не отмечено. Обработка данных по величинам $K_{\Pi}^{(n_{\tau})}$ при значениях $\pi^{(n_{\tau})} > \pi$ показывает, что колебания составляют от 5 до 15% относительно сред-

него значения. Это позволяет использовать подход к предварительной оценке доли потерь в регионах на основе поправочных коэффициентов.

Все приведенные результаты расчетов свидетельствуют о том, что при оценке показателя π обязательно должны учитывать особенности размещения датчиков по территории зоны обслуживания сети. Также оценки π следует выполнять и для отдельных регионов зоны обслуживания. Отсутствие учета указанных факторов может привести к ошибкам на сотни процентов.

Полученные нагрузочные зависимости позволяют также дать оценку пропускной способности сети. В частности, если потребителю необходимо, чтобы вероятность потери пакетов не превышала порогового значения $\pi_{\text{пор}}$, то по этому пороговому значению можно определить максимальную интенсивность передачи пакетов в сети. Так для $\pi_{\text{пор}} = 0,01$ из рисунка 11 получаем, что максимальная интенсивность составляет примерно 1 пак./с или 86400 пак./сутки. Если КА имеет характеристики, аналогичные восьмиканальной базовой станции LoRaWAN, то сеть способна работать при интенсивности порядка 690 тысяч пакетов/сутки. Если каждый датчик передает 2-3 пакета в сутки, то максимальное количество датчиков в сети может быть 230-345 тысяч и, соответственно, в каждой точке по 2300-3450 датчиков.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная имитационная модель передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах в режиме одностороннего случайного множественного доступа позволяет оценить долю потерянных пакетов вследствие возникновения коллизий с учетом особенностей размещения датчиков по территории зоны обслуживания сети, характеристик орбитальной группировки КА, параметров антенн бортовых ретрансляторов и датчиков. Модель выполнена в среде Matlab в виде сценариев подготовки исходных данных, имитации процесса функционирования сети и обработки статистики. Численные эксперименты для сети на базе 264 КА подтвердили, что для различных вариантов размещения датчиков доля потерянных пакетов может изменяться в несколько раз. При этом данный показатель принимает различные значения и для разных регионов зоны обслуживания сети. Модель может быть использована для решения задач как разработчиков, так и операторов спутниковых сетей для оценки возможности и целесообразности проведения мероприятий по изменению характеристик и режимов работы сетей. Во второй части статьи [15] планируется рассмотреть сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах, работающие в режиме случайного множественного доступа с подтверждением приема пакетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 868 с.
2. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Л.Клейнрок. – М.: Мир, 1979. – С. 600.
3. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. – С. 544.
4. Росляков А.В., Ваяшин С.В., Гребешков А.Ю. Интернет вещей. Учебное пособие. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), 2015. – 136 с.
5. Глушак Е.В., Куприянов А.В. Введение в Интернет вещей. Учебное пособие – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 104 с.,
6. Аббас С. А., Чернокульский В. В. Средства моделирования динамических сетей интернета вещей // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», – 2020, – № 7, – С. 62-69.

7. Степанов Н.В. Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Том 17. – №11. С. 11-26.
8. Лячек Ю. Т., Мутанна М. С. Распределение трафика в сети LoRaWAN // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», – 2020, – № 5, – С. 73-77.
9. Банков Д.В., Ляхов А.И., Павлова И.Д., Хоров Е.М. Об эффективности методов доступа к каналу с прослушиванием несущей в сетях NB-Fi. Информационные процессы – 2022. – Т. [22] – № [3] – С. 177–186.
10. Банков Д.В., Левченко П.А., Ляхов А.И., Хоров Е.М. Анализ эффективности метода доступа к каналу в сетях NB-Fi. Информационные процессы – 2021. – Т. [21] – № [4] – С. 231–243.
11. Троегубов А.Ю., Логинов В.А., Ляхов А.И., Хоров Е.М. Исследование метода разрешения коллизий в сетях NR-U при использовании многоканального доступа типа А. Информационные процессы – 2022. – Т. [22] – № [4] – С. 394–403.
12. Сайт компании Semtech. Design Support LoRa Calculator [Электронный ресурс] – URL: <https://www.semtech.com/design-support/lora-calculator> (дата обращения 28.03.2025).
13. Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О. Моделирование процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите. I. Информационные процессы – 2024. – Т. [24] – № [4] – С. 335–349.
14. Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О. Моделирование процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите. II. Информационные процессы – 2025. – Т. [25] – № [2] – С. 151–168.
15. Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О. Имитационная модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах. Часть 2. Режим случайного множественного доступа с подтверждением приема пакетов. Информационные процессы – 2025. – Т. [25] – № [3] – С. 472–489.

An IoT Data Network Model Based on Spacecraft in Low Circular Orbits. Part 1. One-way Random Multiple Access Mode

A. A. Maslov, G. V. Sebekin, M. S. Stepanov, S. N. Stepanov, A. O. Shchurkov

A simulation model of IoT data transmission based on spacecraft in low circular orbits in one-way random multiple access mode has been developed, which makes it possible to estimate the proportion of lost packets due to collisions, taking into account the specifics of sensor placement in the network service area, characteristics of the spacecraft's orbital constellation, antenna parameters of on-board repeaters and sensors. The model is implemented in the Matlab language in the form of scenarios for preparing source data, simulating the process of network operation and processing statistics. Numerical experiments have been conducted to estimate the proportion of lost packets for various sensor placement options across the territory of the Russian Federation and a separate region of the network's service area.

KEYWORDS: spacecraft in low circular orbit, IoT sensor, random multiple access, packet transmission collisions, simulation model.