

Модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах. Часть 2. Режим случайного множественного доступа с подтверждением приема пакетов¹

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 05.08.2025 г. Принята 10.10.2025 г.

Аннотация—Разработана модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах в режиме случайного множественного доступа с подтверждением приема пакетов. Модель позволяет оценить задержку доставки и долю потерянных пакетов от датчиков IoT с учетом особенностей размещения датчиков по территории зоны обслуживания сети, характеристик орбитальной группировки космических аппаратов, параметров антенн бортовых ретрансляторов и датчиков. Модель построена в среде Matlab в виде сценариев подготовки исходных данных, имитации процесса функционирования сети и обработки статистики. Проведены численные эксперименты по оценке доли потерянных пакетов.

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_472

1. ВВЕДЕНИЕ

В [1] разработана модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах в режиме одностороннего случайного множественного доступа. В такой сети датчики IoT передают пакеты с данными о состоянии контролируемых объектов, которые принимаются и ретранслируются на наземные региональные станции космическими аппаратами (КА), доступными в текущий момент времени из мест дислокации датчиков. Моменты передачи разными датчиками не скоординированы между собой, и при приеме пакетов КА, которые доступны нескольким одновременно передающим датчикам, имеют место коллизии. Наборы доступных каждому датчику КА остаются неизменными лишь в течение достаточно коротких интервалов, измеряемых единицами минут, пока тот или иной КА не покинет зону доступности, или новый КА не войдет в нее. Эти наборы для разных датчиков могут совпадать частично или полностью, либо вообще не пересекаться. Тем не менее, при частичном пересечении наборов даже в случае одновременной передачи пакетов несколькими датчиками возможен успешный прием пакета на КА, который доступен лишь одному из передающих датчиков. При односторонней передаче пакетов на датчик не поступает информация о результатах доставки пакета на региональную станцию. Очевидно, если бы такая информация

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

была, то можно было бы снизить долю недоставленных пакетов, хотя при этом возникали бы некоторые задержки доставки.

Далее рассматривается сеть с подтверждением приема пакетов. Подразумевается, что региональные станции в случае успешного приема пакетов отправляют соответствующим датчикам пакеты-квитанции. Если после передачи пакета датчик в течение определенного времени не получает квитанцию, принимается решение, что пакет не доставлен, и осуществляется повторная передача со случайной задержкой, как это делается в системах случайного множественного доступа типаALOHA. Качество обслуживания трафика в такой сети оценивается средней задержкой доставки пакетов W и долей потерянных пакетов π , которые не доставлены за максимально допустимое число повторов. Указанные показатели зависят как от размещения датчиков по территории зоны обслуживания сети и интенсивностей возникновения потребностей в передаче пакетов, так и от динамики изменения во времени множеств доступных каждому датчику наборов КА, которые в свою очередь определяются координатами датчиков, параметрами орбитальной группировки КА, а также параметрами, задающими условия доступности КА для приема пакетов от датчиков. Учет такого большого количества параметров, влияющих на показатели W и π , осложняет задачу моделирования сети. При этом 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 делают задачу моделирования процессов функционирования сети актуальной, как в научном, так и в практическом аспекте. Решение этой задачи является целью настоящей статьи.

Существует широкий круг публикаций, посвященных системам случайного множественного доступа, в которых могут возникать коллизии и применяются различные процедуры их разрешения. Основные общие результаты приведены, например, в [2–4]. Есть ряд работ, посвященных оценке характеристик передачи данных в известных наземных сетях IoT, например, [5–14]. Анализируются принципы построения сетей IoT в целом [5, 6], отдельные типы сетей [8–11], оценивается эффективность методов доступа и разрешения коллизий [10–12]. Работы, однако, не учитывают специфику функционирования спутниковой сети на базе низколетящих КА, связанную с высокой динамикой изменения доступности КА для датчиков и возможными вариантами их расположения по территории зоны обслуживания сети. Учет такой специфики затрудняет построения аналитических моделей. Однако, при этом эффективным средством решения подобных задач является имитационное моделирование [1, 2], позволяющее в наибольшей степени учесть основные особенности построения и функционирования сетей.

Метод имитационного моделирования и используется в настоящей статье. Для достижения поставленной цели в разделе 2 дается описание модели, а в разделе 3 приводятся численные результаты оценки показателей качества обслуживания трафика от возможных характеристики сети.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель строится на тех же принципах, что и для режима одностороннего случайного множественного доступа [1]. Отличие, однако, обусловлено тем, что пакеты, потерянные при доставке вследствие отсутствия доступных КА или коллизий при приеме на всех таких КА, подлежат повторной передаче максимально до $N_{\text{прд}}$ раз через некоторый промежуток времени случайной продолжительности. С целью учета этого фактора (рисунок 1):

- расширено количество полей записи в список передаваемых пакетов (СПП);

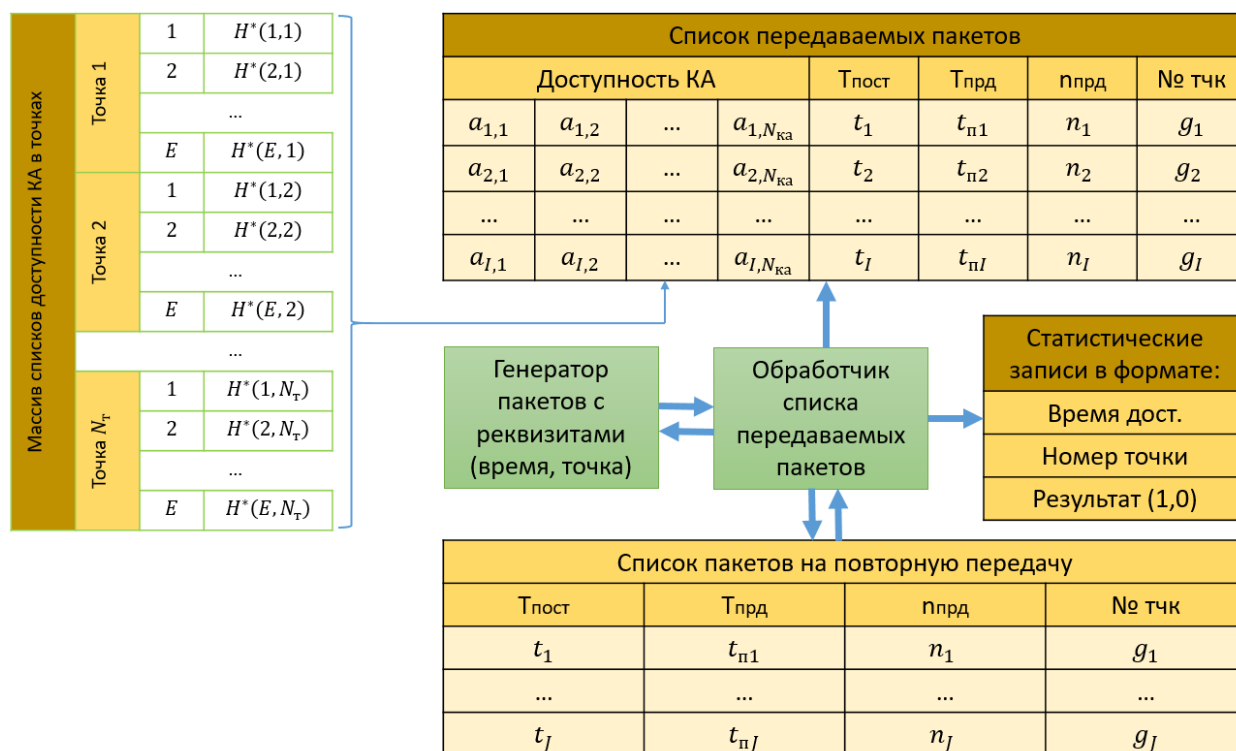


Рис. 1. Основные информационные и программные блоки, используемые в сценарии имитации процесса функционирования сети и набора статистики, и их взаимодействие между собой

– добавлен список пакетов на повторную передачу (СППП).

В частности, в запись СПП добавлены поля:

- время начала передачи пакета $T_{\text{прд}}$;
- количество попыток передачи $n_{\text{прд}}$.

Для новых пакетов поле $T_{\text{прд}}$ устанавливается равным времени поступления пакета в сеть $T_{\text{пост}}$ и $n_{\text{прд}} = 1$. Порядок определения факта доставки пакета совпадает с описанным в [1]. В случае потери пакета при $n_{\text{прд}} < N_{\text{прд}}$ осуществляется вычисление интервала до следующей попытки передачи, которая включает фиксированное время ожидания подтверждения приема пакета $T_{\text{подтв}}$ и случайную составляющую $\Delta t_{\text{сл}}$, зависящую от выбранной процедуры разрешения коллизий. Модель допускает смену процедуры. Однако, в качестве базовой процедуры принято $\Delta t_{\text{сл}} = K T_{\text{п}} r$, где K – некоторое фиксированное число, например, $K = 15$, $T_{\text{п}}$ – продолжительность передачи пакета, r – равномерно распределенное на интервале $(0,1)$ случайное число. Соответственно, время повторной передачи пакета $t'_{\text{пи}}$ вычисляется из предыдущего $t_{\text{пи}}$ с помощью соотношения

$$t'_{\text{пи}} = t_{\text{пи}} + T_{\text{подтв}} + K T_{\text{п}} r. \quad (1)$$

Запись о недоставленном пакете исключается из СПП и заносится в СППП со старыми временем поступления и номером точки, а также модифицированным в соответствии с выражением (1) временем передачи $T_{\text{прд}} = t'_{\text{пи}}$ и увеличенным на единицу параметром $n_{\text{прд}}$. Записи в СППП сортируются в порядке возрастания времени начала повторной передачи.

Поскольку поток пакетов на передачу является суммой потока новых пакетов и потока повторно передаваемых пакетов, в модели есть два источника пакетов, включая (рисунок 1):

- генератор пакетов на передачу, формирующий пуассоновские потоки новых пакетов из точек, как и в [1];
- список повторно передаваемых пакетов, содержащий времена передачи, которые вычислены в соответствии с соотношением (1).

Выбор очередного пакета для передачи производится путем сравнения времени поступления следующего нового пакета τ и времени передачи $t_{п1}$ из СПП, т.е. $t_{оч} = \min(\tau, t_{п1})$. Однако, поскольку обработка состояния сети осуществляется только в моменты поступления пакетов на передачу, здесь должна быть учтена возможность изменения значения $t_{оч}$ после очистки СПП от записей, соответствующих уже переданным пакетам, и переноса данных о потерянных пакетах в СПП. Это может произойти, если пакет, передача которого завершилась его потерей, попадает в СПП со временем повторной передачи $t'_{пi} < t_{п1}$ и оказывается первым в СПП. Для учета указанного обстоятельства необходимо уточнение $t_{оч}$ после очистки СПП от пакетов, передача которых завершена. Здесь отметим, что диапазон значений поля $T_{прд}$ в СПП не превосходит $T_{п}$, а $T_{подтв} > 2T_{п}$, и поэтому повторная передача пакета не может создавать коллизий для пакетов, которые в текущий момент записаны в СПП. Такие коллизии могут иметь место только от вновь поступающих пакетов.

Укрупненный алгоритм работы имитационной модели и его детализация в части обработки СПП и СППП представлены на рисунках 2 и 3.

Комментируя представленный укрупненный алгоритм, отметим, что объем выборки, т. е. количество передававшихся пакетов $N_{в}$, устанавливается из расчета, чтобы отклонение теоретических значений показателей качества от значений, полученных при моделировании, не превышало единиц процентов. Результат доставки положительный, если хотя бы на одном из доступных КА не было коллизий. Кроме того, в [1, 15, 16] приведено описание процедур:

- генерации времени начала передачи и точки привязки очередного нового пакета;
- определения фактов коллизий на отдельных КА и результата доставки пакета;
- определения набора доступных для заданной точки КА в зависимости от модельного времени.

Для оценки показателей качества по набранной статистике из всего множества S записей о переданных пакетах выделяется подмножество $S_{д}$ записей, для которых результат доставки положительный. Пусть количество элементов в множестве $S_{д}$ равно $N_{д}$. Тогда с учетом накопленных данных по временам поступления t_s и моментов начала успешной передачи $t_{пs}$ каждого из $s \in S_{д}$ пакетов среднее время доставки пакета определяется соотношением:

$$W = \frac{\sum_{s \in S_{д}} (t_{пs} - t_s)}{N_{д}} + T_{п}, \quad (2)$$

а доля потерянных пакетов π вычисляется в виде:

$$\pi = 1 - \frac{N_{д}}{N_{в}}. \quad (3)$$

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведения численных экспериментов выполним оценки показателей качества и сравним их с показателями для сетей IoT с односторонним случайным множественным доступом [1]. Как и в [1], примем, что орбитальная группировка сети содержит двенадцать



Рис. 2. Укрупненный алгоритм работы имитационной модели

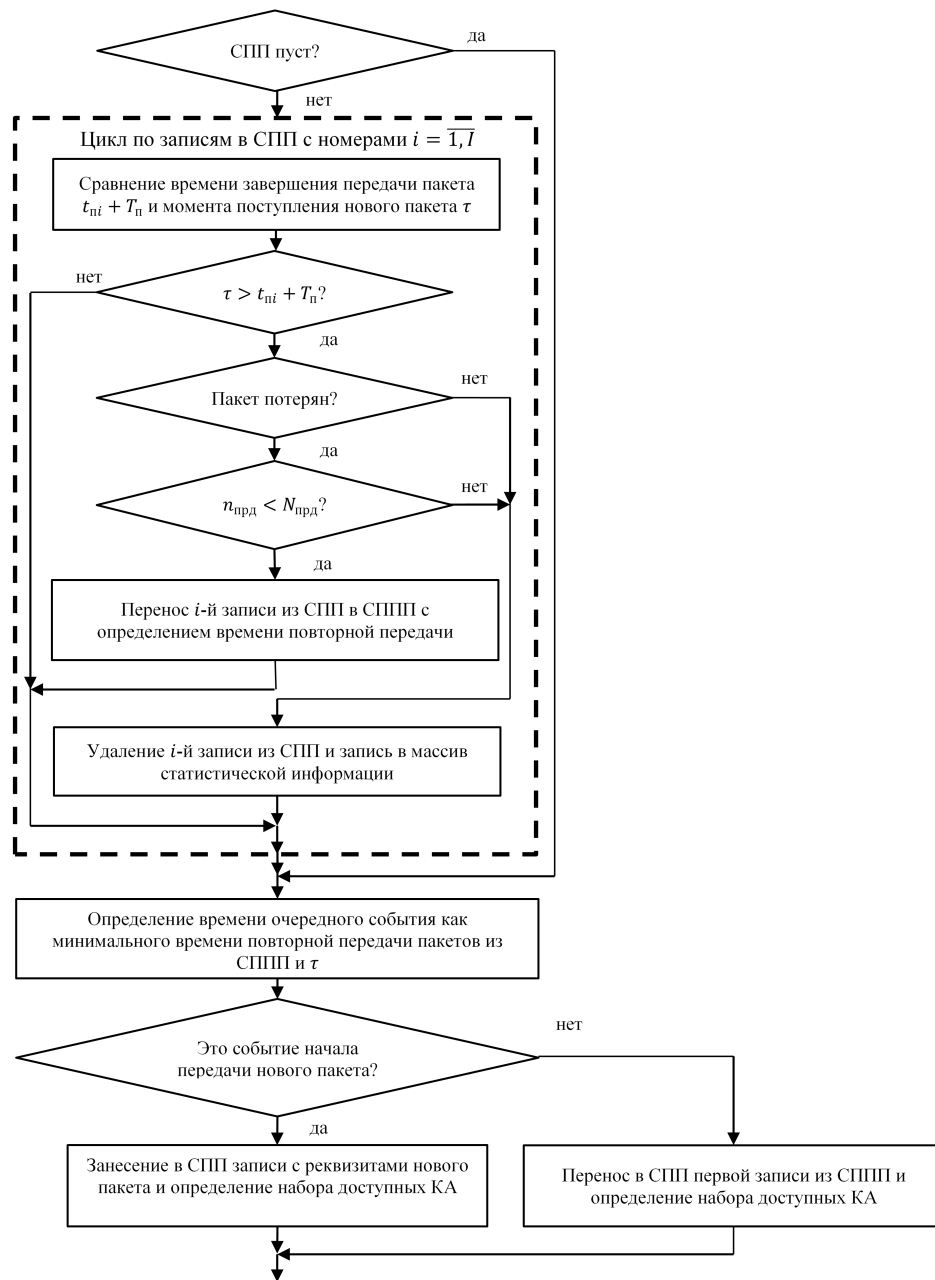


Рис. 3. Фрагмент алгоритма работы имитационной модели в части обработки СПП и СППП

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° . Положим $T_{\Pi}=80$ мс, $T_{\text{подтв}}=1$ с, $K=15$ и $N_{\text{прд}}=15$. Рассмотрим, как и в [1], три варианта размещения датчиков IoT на территории РФ, каждый из которых представлен $N_T = 100$ точками, в окрестности которых находятся датчики:

1. относительно равномерное распределение;
2. размещение в европейской части РФ;
3. размещение в арктическом регионе вдоль Северного морского пути.

Будем также полагать, что интенсивности передачи пакетов датчиками, соотносящихся с каждой точкой, одинаковы.

По аналогии с [1] проведено построение доверительных интервалов (ДИ) для средней задержки доставки пакетов, в которые с вероятностью 0,95 попадают теоретические значения W . Примеры ДИ для случая относительно равномерного распределения датчиков по территории РФ представлены в таблице 1. Объем выборки составил 2,6 млн.

Таблица 1. Результаты построения ДИ для средней задержки доставки пакетов W в зависимости от интенсивности потока пакетов λ в сети

Интенсивность λ , пакетов/с	11	12	13	14	15
Среднее значение, с	0,3916	0,4408	0,4996	0,5719	0,6693
Половина ДИ, с	0,0042	0,0041	0,0073	0,0084	0,0124
Нижняя граница ДИ, с	0,3873	0,4367	0,4922	0,5635	0,6570
Верхняя граница ДИ, с	0,3958	0,4449	0,5069	0,5802	0,6817

Видно, что отличие теоретических значений от средних оценок W не превышают 2%. Аналогичные результаты получаются и для доли потерянных пакетов π . Следовательно оценки показателей, полученные при имитационном моделировании, могут использоваться для решения практических задач.

Далее перейдем к рассмотрению результатов численного анализа для перечисленных выше вариантов размещения датчиков. Для каждого варианта получены:

- зависимости доли потерянных пакетов π по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ как для сети с подтверждением доставки пакетов, так и без подтверждения [1];
- зависимость средней задержки доставки пакетов W по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ ;
- распределение по точкам привязки датчиков значений показателя W на фоне карты РФ с цветовой индикацией посредством насыщенности цвета маркеров точек и с указанием относительных величин W в процентах для точек, где превышено среднее значение задержки по сети;
- множества точек, для которых доля потерянных пакетов превышает пороговое значение $\pi_{\text{пор}} = 0,001$, с указанием для таких точек относительного превышения $\pi_{\text{пор}}$ в процентах.

3.1. Относительно равномерное распределение по территории РФ

Результаты численного анализа иллюстрируются рисунками 4 - 7.

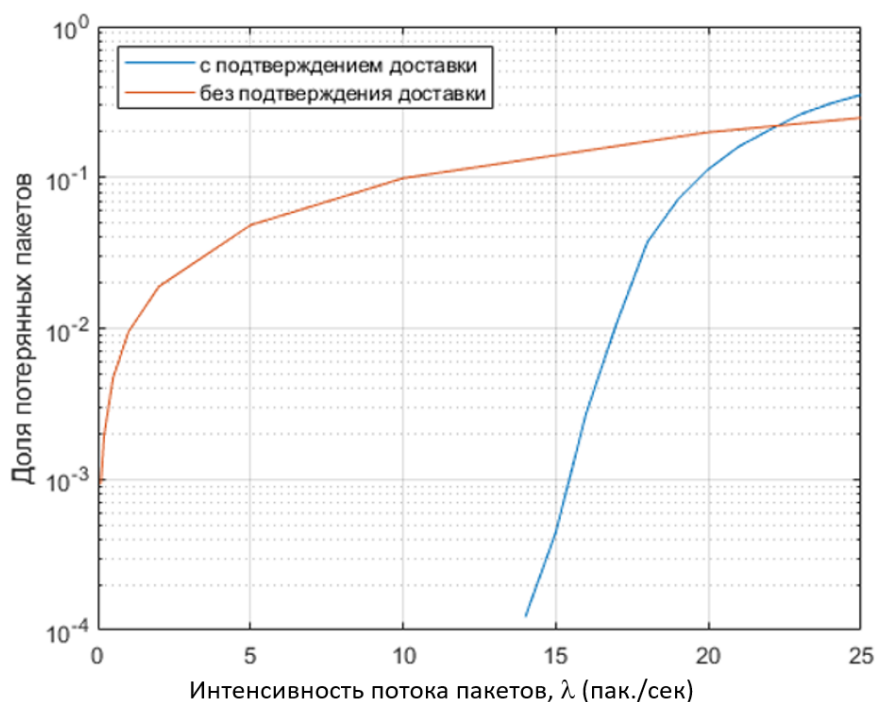


Рис. 4. Зависимости доли потерянных пакетов π по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ как для сети с подтверждением доставки пакетов, так и без подтверждения для варианта размещения датчиков по всей территории РФ

Для рассматриваемой сети потеря пакета имеет место в том случае, если все $N_{\text{прд}}$ попыток передачи были неудачными. При низких интенсивностях поступления пакетов λ , когда неудачные попытки редки, с высокой вероятностью успешная передача будет в одной из следующих попыток. Поэтому доля потерянных пакетов π мала. Однако, с увеличением λ количество повторно передаваемых в сети пакетов и число попыток их передачи существенно возрастают, что ведет к росту показателя π . Это видно из рисунка 4. При $\lambda \geq 22$ пакета/с режим без подтверждения обеспечивает даже лучшее значение π , которое, правда, превышает 0,2, т. е. не является практически пригодным. Но если брать по уровню $\pi = 0,01$, то режим с подтверждением допускает величину λ примерно до 17 пакетов/с, а режим без подтверждения только до 1 пак./с, т. е. имеет место преимущество по допустимой нагрузке режима с подтверждением более чем на порядок. Что касается средней задержки доставки пакетов W , то здесь зависимость от интенсивности λ аналогична, при λ , превышающем 16-17 пакетов/с, наблюдается быстрый рост W с увеличением λ .

Для анализа зависимостей показателей π и W от варианта распределения датчиков по территории РФ принято $\lambda = 15$ пак./с, когда $\pi \approx 0,0005$ и $W \approx 0,7$ с, и вычислены значения этих показателей для каждой точки. Из рисунка 6 видно, что превышение средней задержки доставки пакетов для отдельных точек над показателем для сети имеет место там, где концентрация точек выше, а именно, в средней полосе европейской части и в западной Сибири. Это превышение может быть более чем в два раза. Еще более критична к концентрации точек величина доли потерянных пакетов. Из рисунка 7 следует, что в европейской части РФ

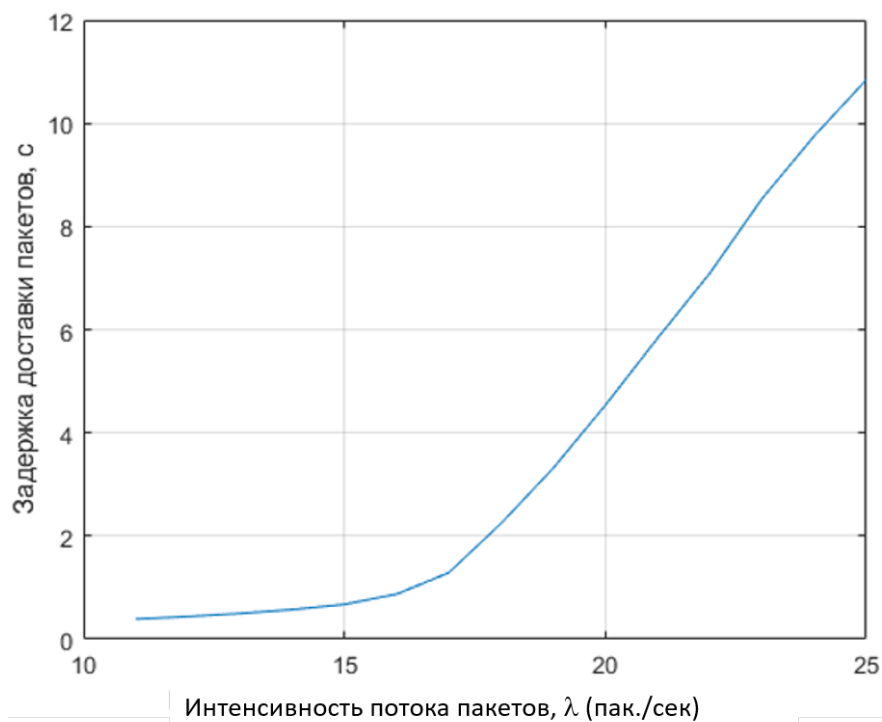


Рис. 5. Зависимость средней задержки доставки пакетов W по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ для варианта размещения датчиков по всей территории РФ

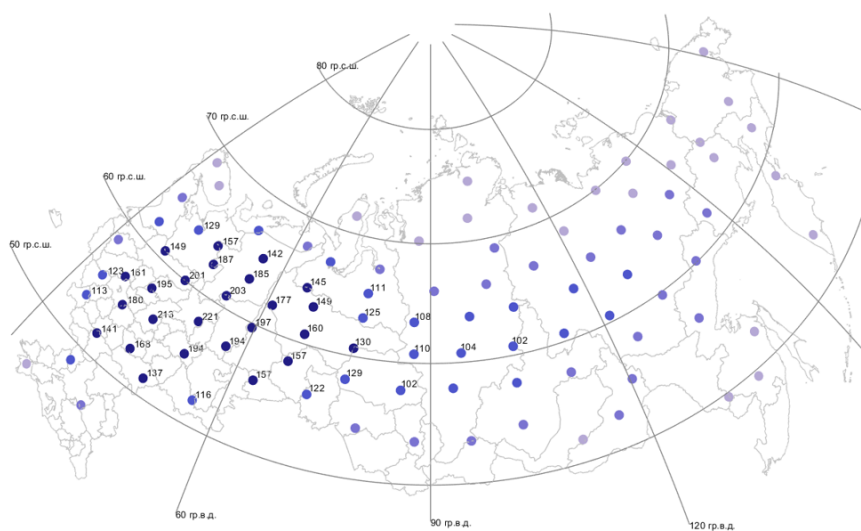


Рис. 6. Распределение по точкам привязки датчиков значений показателя W на фоне карты РФ с цветовой индикацией посредством насыщенности цвета маркеров точек и с указанием относительных величин W в процентах для точек, где превышено среднее значение задержки по сети, для варианта размещения датчиков вдоль СМП

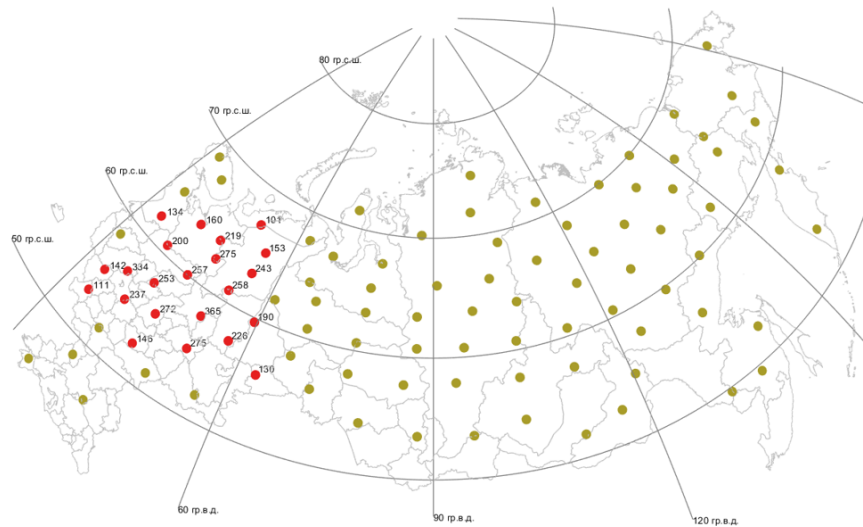


Рис. 7. Множество точек, для которых доля потерянных пакетов превышает пороговое значение $\pi_{\text{пор}} = 0,001$, с указанием для таких точек относительного превышения $\pi_{\text{пор}}$ в процентах для варианта размещения датчиков по всей территории РФ

превышение этого показателя над пороговым значением $\pi_{\text{пор}} = 0,001$ может быть более чем в 3,5 раза, т. е. в семь раз больше чем в среднем по сети.

3.2. Размещение в европейской части РФ

Результаты численного анализа иллюстрируются рисунками 8 - 11.

Характер зависимостей показателей π и W от интенсивности λ (рисунки 8 и 9) такой же, как и для предыдущего распределения. Однако, максимальная величина λ , при которой $\pi \leq 0,01$, уже существенно ниже и составляет примерно 6,5 пак./с. Это можно объяснить более высокой концентрацией датчиков в сравнении с предыдущим случаем.

Для анализа распределения показателей π и W по точкам принято $\lambda = 6$ пак./с, когда $\pi \approx 0,003$ и $W \approx 0,8$ с. Превышение средней задержки доставки пакетов для отдельных точек над показателем для сети в центральной части зоны обслуживания (рисунок 10) составляет почти до двух раз. Высокая концентрация датчиков обуславливает наличие большого количества точек, где выявлено превышение над пороговым значением $\pi_{\text{пор}} = 0,001$, которое может достигать до шести раз (рисунок 11).

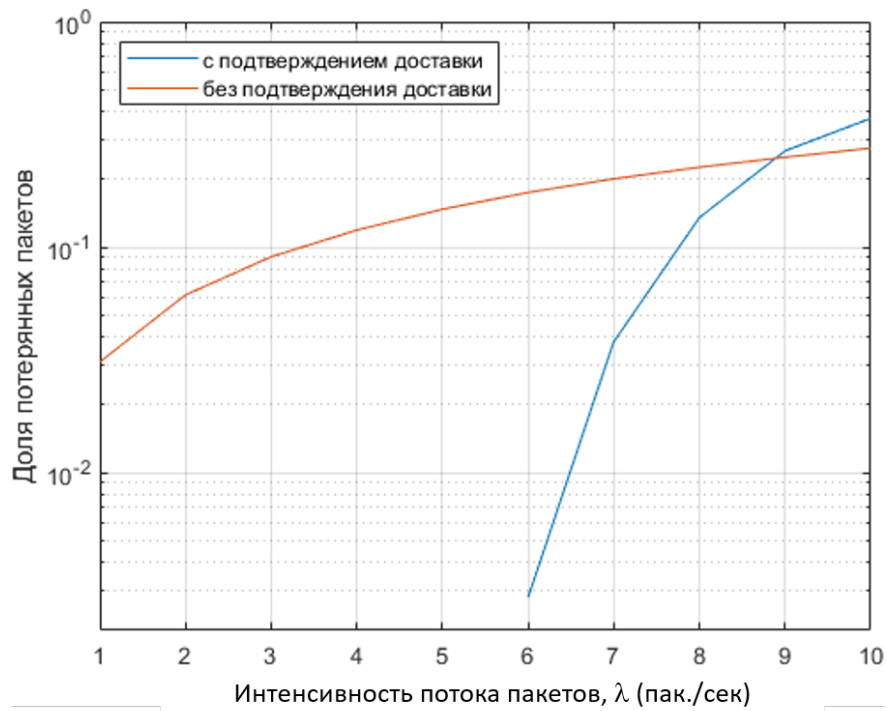


Рис. 8. Зависимости доли потерянных пакетов π по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ как для сети с подтверждением доставки пакетов, так и без подтверждения для варианта размещения датчиков в европейской части РФ

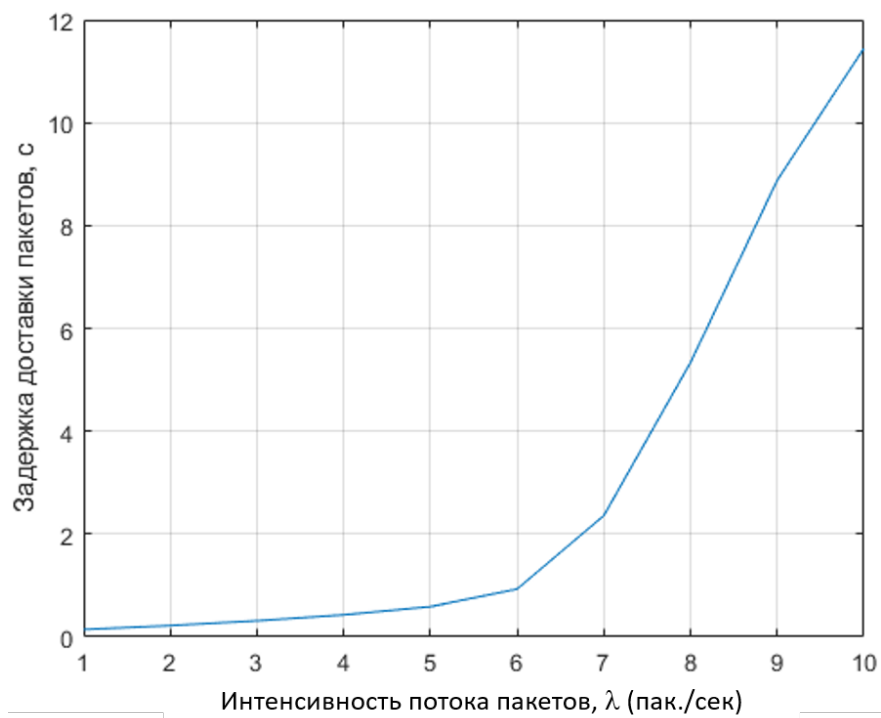


Рис. 9. Зависимость средней задержки доставки пакетов W по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ для варианта размещения датчиков в европейской части РФ

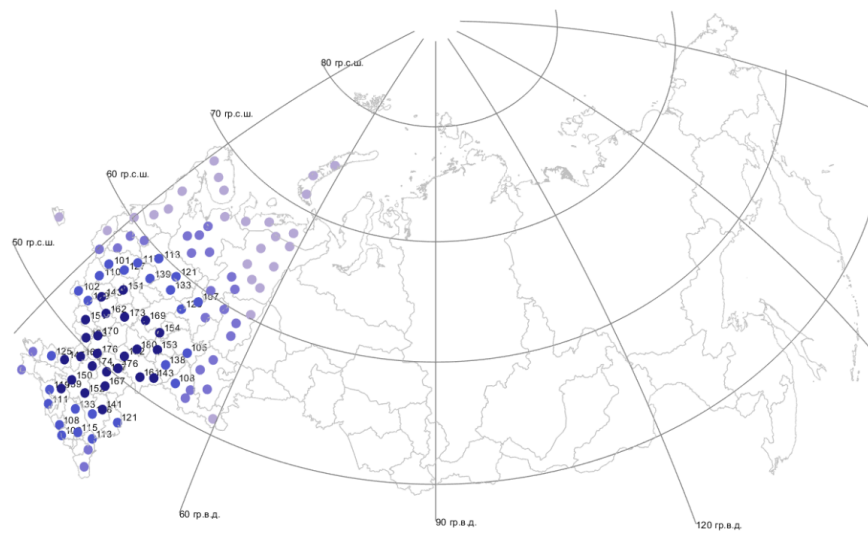


Рис. 10. Распределение по точкам привязки датчиков значений показателя W на фоне карты РФ с цветовой индикацией посредством насыщенности цвета маркеров точек и с указанием относительных величин W в процентах для точек, где превышено среднее значение задержки по сети, для варианта размещения датчиков в европейской части РФ

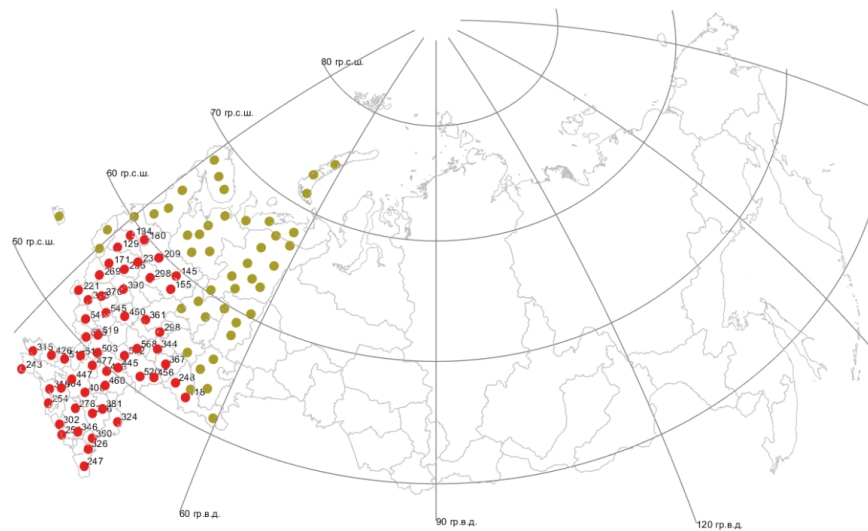


Рис. 11. Множество точек, для которых доля потерянных пакетов превышает пороговое значение $\pi_{\text{пор}} = 0,001$, с указанием для таких точек относительного превышения $\pi_{\text{пор}}$ в процентах для варианта размещения датчиков в европейской части РФ

3.3. Размещение в арктическом регионе вдоль Северного морского пути (СМП)

Результаты численного анализа иллюстрируются рисунками 12- 15.

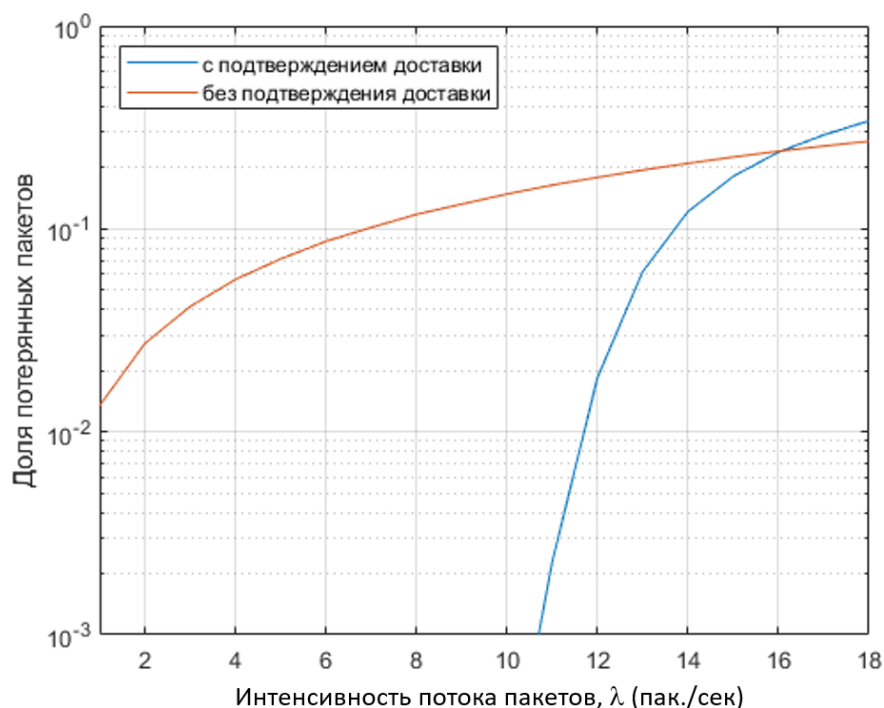


Рис. 12. Зависимости доли потерянных пакетов π по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ как для сети с подтверждением доставки пакетов, так и без подтверждения для варианта размещения датчиков вдоль СМП

Из рисунков 12 и 13 видно, что данный вариант имеет промежуточные характеристики в сравнении с двумя предыдущими. Хотя концентрация датчиков примерно такая же, как и во втором варианте, но их размещение в северных широтах обуславливает доступность большего количества КА для приема и ретрансляции пакетов. Доля потерянных пакетов $\pi \leq 0,01$ обеспечивается при величине λ до 11 пакетов/с.

Для получения статистики по точкам на рисунках 14 и 15 принято $\lambda = 10$ пак./с. При этом $\pi = 0,00018$ и $W = 0,64$ с. Превышение средней задержки доставки пакетов имеет место для точек в средней части СМП. Для отдельных точек в этой части превышено и пороговое значение $\pi_{\text{пор}} = 0,001$.

Сравнение всех трех вариантов распределения датчиков по территории зоны обслуживания сети по общесетевым параметрам π и W в зависимости от интенсивности λ иллюстрируется рисунками 16 и 17. Эти рисунки подтверждают выводы, сделанные для каждого варианта отдельно, и демонстрируют, что учет характера распределения датчиков имеет принципиальное значение.

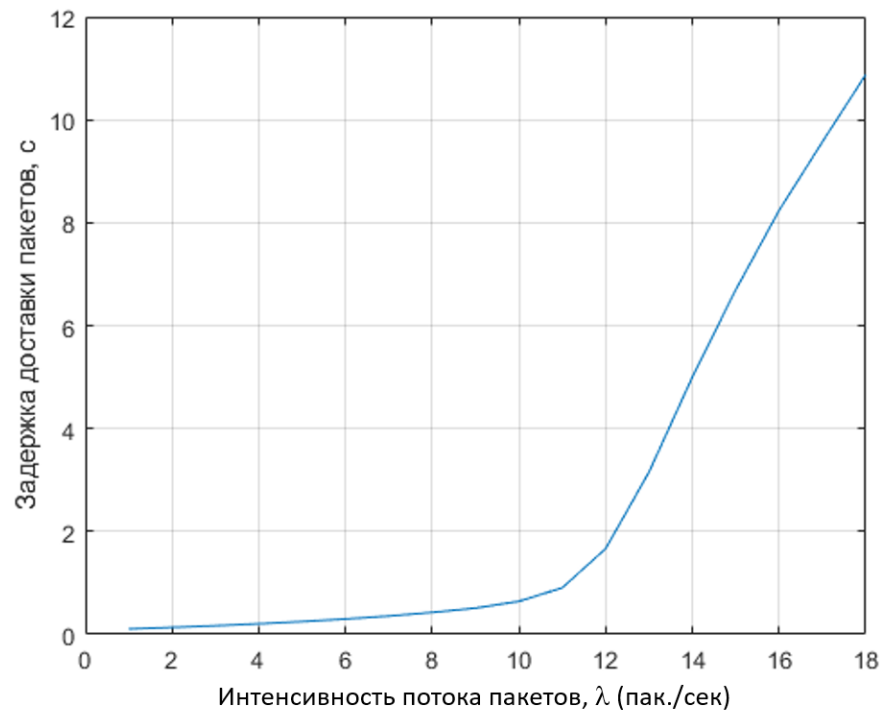


Рис. 13. Зависимость средней задержки доставки пакетов W по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ для варианта размещения датчиков вдоль СМП

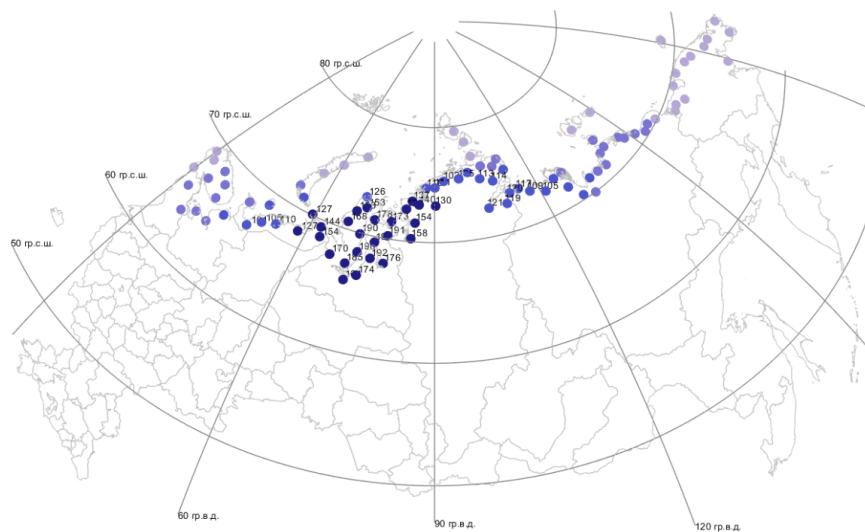


Рис. 14. Распределение по точкам привязки датчиков значений показателя W на фоне карты РФ с цветовой индикацией посредством насыщенности цвета маркеров точек и с указанием относительных величин W в процентах для точек, где превышено среднее значение задержки по сети, для варианта размещения датчиков вдоль СМП

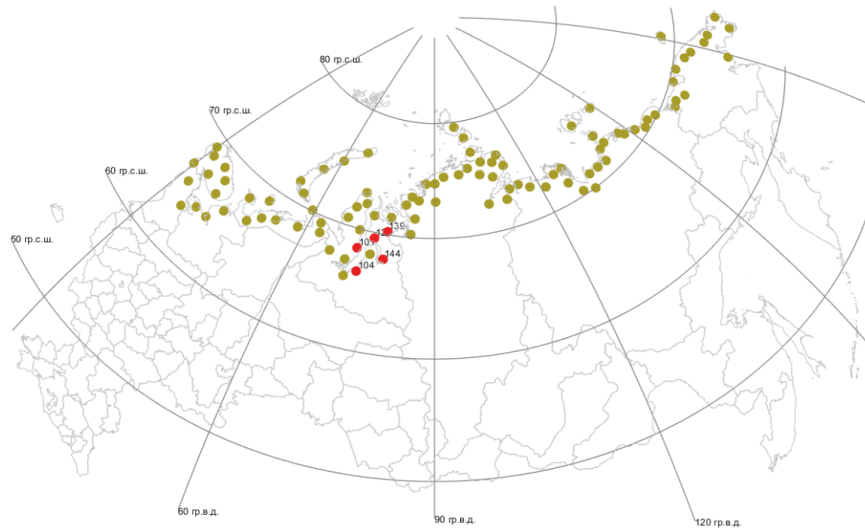


Рис. 15. Множество точек, для которых доля потерянных пакетов превышает пороговое значение $\pi_{\text{пор}} = 0,001$, с указанием для таких точек относительного превышения $\pi_{\text{пор}}$ в процентах для варианта размещения датчиков вдоль СМП

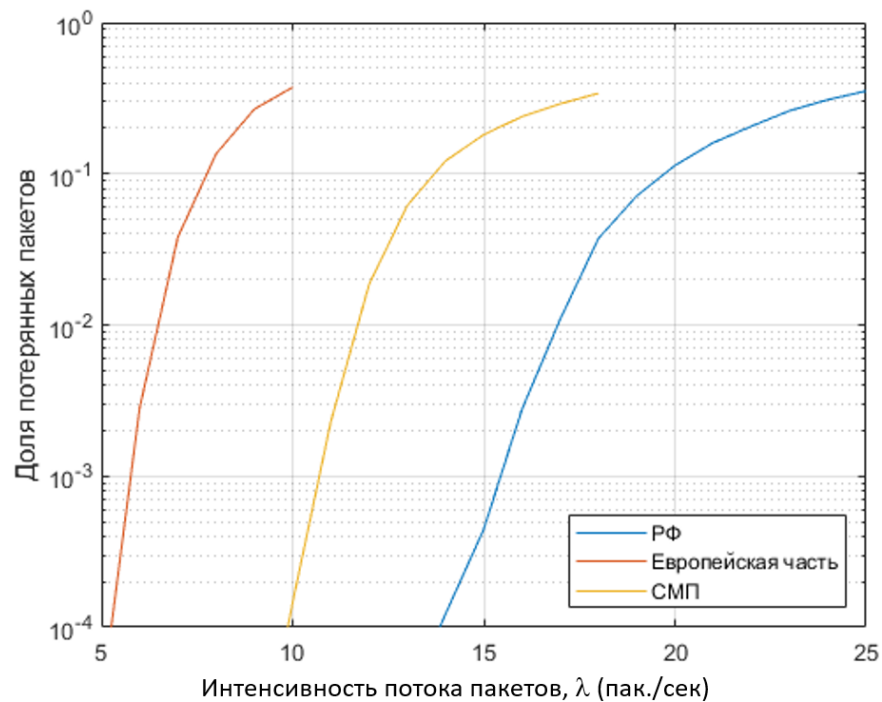


Рис. 16. Зависимости доли потерянных пакетов π по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ для трех вариантов распределения датчиков по территории зоны обслуживания

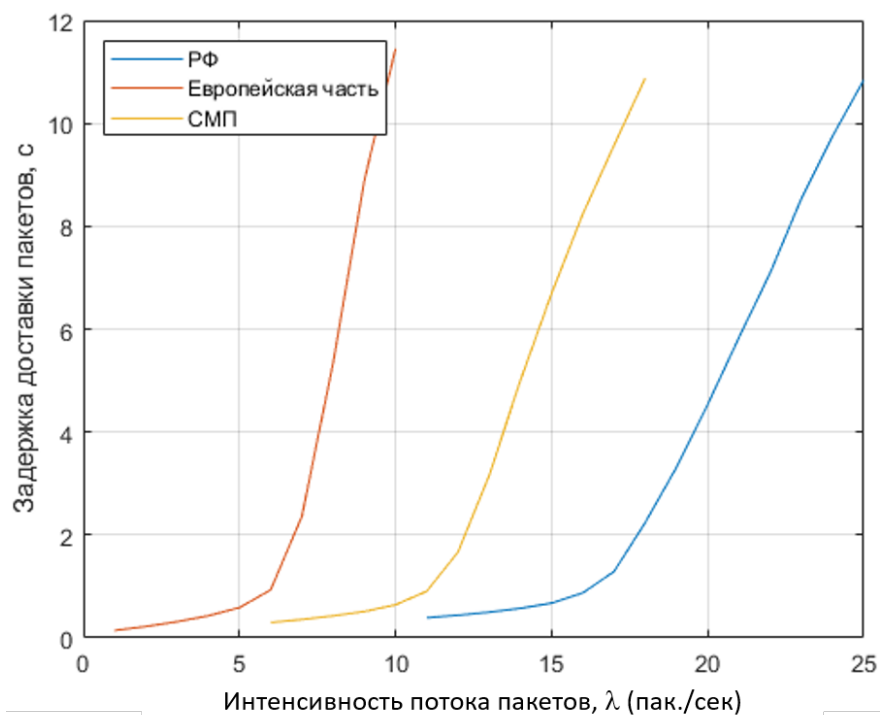


Рис. 17. Зависимости средней задержки доставки пакетов W по сети в целом от суммарной интенсивности потока пакетов λ для трех вариантов распределения датчиков по территории зоны обслуживания

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная имитационная модель передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах в режиме случайного множественного доступа с подтверждением приема пакетов позволяет оценить долю потерянных пакетов и среднюю задержку доставки пакетов с учетом особенностей размещения датчиков по территории зоны обслуживания сети, характеристик орбитальной группировки КА, параметров антенн бортовых ретрансляторов и датчиков. Модель выполнена на языке Matlab в виде сценариев подготовки исходных данных, имитации процесса функционирования сети и обработки статистики. Численные эксперименты подтвердили, что в зависимости от варианта размещения датчиков величины показателей качества обслуживания трафика в сети могут изменяться в несколько раз. При этом значения показателей зависят от региона зоны обслуживания сети. Выполненное сравнение с режимом односторонней передачи показало, что при заданном ограничении по максимальной доле потерянных пакетов допустимая интенсивность входного потока пакетов в сети с подтверждением приема пакетов может быть увеличена более чем на порядок. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А.О. Модель сети передачи данных IoT на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах. Часть 1. Режим одностороннего случайного множественного доступа. Информационные процессы – 2025. – Т. 25 – № 3 – С. 456–471.
2. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 868 с.

3. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Л.Клейнрок. – М.: Мир, 1979. – С. 600.
4. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. – С. 544.
5. Росляков А.В., Ваяшин С.В., Гребешков А.Ю. Интернет вещей. Учебное пособие. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), 2015. – 136 с.
6. Глушак Е.В., Куприянов А.В. Введение в Интернет вещей. Учебное пособие – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 104 с.,
7. Аббас С. А., Чернокульский В. В. Средства моделирования динамических сетей интернета вещей // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», – 2020, –№ 7, – С. 62-69.
8. Степанов Н.В. Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Том 17. – №11. С. 11-26.
9. Лячек Ю. Т., Мутанна М. С. Распределение трафика в сети LoRaWAN // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», – 2020, –№ 5, – С. 73-77.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Maslov A.A., Sebekin G.V., Stepanov S.N., Shchurkov A.O., Vasilyev A. Model of processes for joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic in a network of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites. // T-Comm, Vol. 18, no.3 – 2024, pp. 41–49.
14. Маслов А.А., Себекин Г.В., Степанов М.С., Степанов С.Н., Щурков А. О. Модель резервирования канального ресурса при обслуживании разнородного трафика в сети маломощных мобильных абонентских терминалов на базе КА с высокой пропускной способностью. Информационные процессы – 2024. – Т. 24 – № 1 – С. 1–15.
15. 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.
16. 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.

An IoT data network model based on spacecraft in low circular orbits. Part 2. Random multiple access mode with packet acceptance confirmation

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

A simulation model of an IoT data transmission network based on spacecraft in low circular orbits in random multiple access mode with packet reception confirmation has been developed. The model makes it possible to estimate the delay in delivery and the proportion of lost packets from IoT sensors, taking into account the specifics of the placement of sensors in the network's service area, the characteristics of the spacecraft's orbital constellation, and the antenna parameters of on-board repeaters and sensors. The model is implemented in the Matlab environment in the form of scenarios for preparing source data, simulating the network operation process and processing statistics. Numerical experiments have been conducted to estimate the proportion of lost packets.

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