

УДК 621.391

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.37.2.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.006)

Моделирование спутниковой сети в среде GPSS World

Д.Ю. Пономарев✉

*Военный инновационный технополис «ЭРА»,
Анапа, Российская Федерация
era_1@mil.ru✉*

Резюме. В работе рассматривается модель комбинированной спутниковой сети, т. е. сети, использующей разновысотные орбиты. Актуальность использования разных высот обусловлена необходимостью предоставления разного вида услуг с учетом расширения зоны обслуживания в верхние широты. Для реализации такого подхода используются спутники как на геостационарной орбите, так и на высокоэллиптической. В связи с высокой сложностью спутниковых сетей для оценки и анализа их характеристик на этапе разработки и проектирования привлекаются различные виды моделирования. При этом аналитическое моделирование таких сетей связано со значительными трудностями. В данной работе используется имитационное моделирование в среде *GPSS World* и основной целью является разработка алгоритма обслуживания запросов пользователей для имитационной модели комбинированной спутниковой сети и оценка вероятностно-временных характеристик данной сети с использованием разработанного алгоритма. Программная реализация алгоритма продемонстрировала возможности *GPSS World* и позволила получить результаты для оценки таких характеристик, как среднее время задержки и вероятность потерь. Полученные результаты могут быть использованы как при анализе существующих спутниковых сетей, так и при проектировании и разработке новых технологий исследуемых сетей.

Ключевые слова: комбинированная спутниковая сеть, имитационное моделирование, алгоритм обслуживания, вероятность потерь, среднее время задержки.

Для цитирования: Пономарев Д.Ю. Моделирование спутниковой сети в среде GPSS World. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2022;10(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1152> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.006

The satellite network modeling in GPSS World

D.Y. Ponomarev✉

*Military Innovative Technopolis ERA,
Anapa, Russian Federation
era_1@mil.ru✉*

Abstract. The study regards the combined satellite network model, which is a network using different altitude orbits. The relevance of employing different altitudes is due to the necessity to provide different types of service, taking into account the expansion of the service area to higher latitudes. To implement this approach, satellites are applied both in geostationary and highly elliptical orbits. Owing to the considerable complexity of satellite network estimation and analysis at the stage of design and construction, various modeling methods are involved. At the same time, analytical modeling of these networks is associated with significant difficulties. In this article, simulation in *GPSS World* is utilized and the main objective is to develop the user request serving algorithm for combined satellite network simulation model and to evaluate probabilistic and temporal characteristics of the network, exploiting the designed algorithm. Software implementation of the algorithm has demonstrated *GPSS World* capabilities and made it possible to obtain results for the evaluation characteristics such as average delay time and loss probability. The findings can be used both in the analysis of existing technologies for satellite networks under review and in the design and development of new ones.

Keywords: combined satellite network, simulation modeling, service algorithm, loss probability, average delay time.

For citation: Ponomarev D.Y. The satellite network modeling in GPSS World. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(2). Available from: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1152> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.006 (In Russ.).

Введение

Современные достижения инфокоммуникаций в области реализации широкополосных услуг, сетей и систем привели к тому, что возникла потребность не только в обеспечении высоких скоростей передачи выше 10 Гб/с, но и поддержке приложений, требовательных к возникающим в сетях связи задержкам [1-3]. При использовании наземной инфраструктуры, даже для мобильных сетей 5G, а в перспективе и 6G, задержки при передаче данных стремятся к минимальному значению. Совсем другая ситуация складывается при использовании ресурсов спутниковых сетей. В таком случае задержка может иметь значительную величину, особенно при использовании высоких орбит [4].

Для уменьшения задержек, а также для снижения вероятности потерь, на практике уже находят применение спутниковые сети на низких орбитах (*StarLink*, *OneWeb* и др.) Однако, в таком случае для предоставления услуг необходимо поддерживать взаимодействие большого количества систем, как в спутниковом, так и наземном сегментах, и обеспечивать управление распределением ресурсов и трафика быстроизменяющейся сложной сети [2, 3, 5, 6]. Естественно, необходимо учитывать и значительное число межспутниковых линий.

Более того, в связи с растущей ролью Арктического региона, особое место занимают спутниковые системы, использующие высокоэллиптические орбиты, позволяющие предоставлять с высокой степенью готовности широкополосный доступ в верхних широтах [7-9]. Использование высокоэллиптических орбит типа «Тундра» позволяет уменьшить сложность управления процессами взаимодействия с абонентскими устройствами, но приводит к увеличению задержек. Для избавления от некоторых недостатков таких сетей рассматриваются варианты построения комбинированных спутниковых систем, т. е. использующих разновысотные орбиты [6, 8, 9].

В связи с высокой сложностью спутниковых сетей с большим числом спутников (низкоорбитальные, комбинированные и т. д.) для оценки и анализа их характеристик на этапе разработки и проектирования привлекаются различные способы моделирования [2-6]. При этом аналитическое моделирование таких сетей связано со значительными трудностями [10]. Поэтому одним из основных средств моделирования рассматриваемых спутниковых сетей является имитационное [2-5].

При проведении имитационного моделирования одной из задач является определение распределения трафика и обеспечение равномерной загрузки отдельных систем [2, 3, 5], но загрузка определяет показатели качества сети, такие как среднее время задержки и вероятность потерь, и при равномерной загрузке качество обслуживания не может быть гарантировано [1, 6, 9]. Кроме того, при исследовании характеристик спутниковых сетей обычно рассматривается уровень агрегации потоков, что не позволяет в полной мере оценить влияние отдельных процедур обслуживания вызовов на показатели качества обслуживания [2-5].

Среда моделирования *GPSS World* позволяет, при соответствующей проработке, обеспечить имитацию отдельных процедур обслуживания вызовов в спутниковой сети, что определяется свойствами среды по детальному описанию процессов взаимодействия

отдельных систем и устройств моделируемой сети. Кроме того, использование *GPSS World* для построения имитационной модели обеспечивает получение оценок вероятностно-временных характеристик моделируемой сети. Стоит отметить, что в отличие от объектно-ориентированных систем имитационного моделирования, например, таких, как *AnyLogic*, *Arena* или *ExtendSim*, процесс формирования имитационной модели на языке *GPSS* необходимо обеспечить соответствующим алгоритмическим обеспечением.

Исходя из вышесказанного, основной целью представленной работы является разработка алгоритма обслуживания запросов пользователей для имитационной модели комбинированной спутниковой сети и оценка вероятностно-временных характеристик данной сети с использованием разработанного алгоритма в среде *GPSS World*. Для достижения поставленной цели необходимо при разработке алгоритма учитывать процедуры обработки вызовов в спутниковой сети и предусматривать при имитационном моделировании в среде *GPSS World* исследование таких характеристик, как вероятность потерь и среднее время задержки.

Объект моделирования

В данной работе рассматривается комбинированная спутниковая сеть, состоящая из спутников, находящихся на орбитах, отличающихся типом и высотой. Группировка на высокоэллиптической орбите (ВЭО) типа «Тундра» или «Кентавр» представлена тремя спутниками для обеспечения постоянного обслуживания в заданном регионе в верхних широтах. Количество спутников определяется рабочей частью орбиты, например, для орбиты типа «Тундра» время нахождения спутника вблизи апогея (высота примерно 40000 км) составляет 8 часов, что позволяет указанной группировкой обеспечить круглосуточное предоставление услуг в заданном районе [7, 8].

На геостационарной орбите (ГСО) находятся еще два спутника (ГСО₁ и ГСО₂) для обеспечения глобальной зоны обслуживания. Для каждого спутника зона обслуживания разбивается на зоны обслуживания отдельными лучами. Зоны обслуживания спутников на ВЭО и ГСО могут частично перекрываться.

Наземный сегмент исследуемой сети представлен двумя земными станциями (ЗС₁ и ЗС₂), обеспечивающими подключение спутникового сегмента к наземным сетям общего пользования.

В качестве услуги сети рассматривается услуга передачи данных. Таким образом, организация сеансов телефонной связи и услуги коротких сообщений обеспечивается прикладным приложением оконечного оборудования и его взаимодействием с сетевым оборудованием оператора. Основными исследуемыми характеристиками являются: среднее время сквозной задержки (*end-to-end delay*), вероятность потерь (*loss probability*), пропускная способность и др.

Укрупненная структурная схема исследуемой сети соответствует представленной в [9]. Спутниковые системы обеспечивают маршруты передачи трафика в направлении «зона обслуживания-земная станция» и обратно. Каждая система, используемая на маршруте распределения трафика в исследуемой комбинированной спутниковой сети, может быть представлена в виде одной или нескольких систем распределения информации в соответствии с ее функциональной ролью в сети [11].

В связи с тем, что спутники на ВЭО находятся в рабочей части орбиты только часть времени и только один спутник (ВЭО) производит в это время обслуживание вызовов, находящихся в зоне обслуживания ВЭО, при моделировании можно использовать взаимодействие только одного спутника на ВЭО с земными станциями.

Это позволит сократить программные затраты при проведении имитационного моделирования процессов обслуживания вызовов абонентов в исследуемой сети.

Алгоритм обслуживания запросов пользователей в комбинированной спутниковой сети

В связи с тем, что имитационная модель формируется в среде *GPSS World*, в описании алгоритма используются понятия и определения, используемые в данной среде моделирования.

Для имитации обслуживания пользователей в рассматриваемой сети инициализируются следующие параметры объектов, переменные и вероятности (Рисунок 1): ресурсы лучей спутников на ВЭО и ГСО, вероятности распределения вызовов по лучам систем (аналогично, для ВЭО и ГСО), максимальное время обслуживания одного запроса (для ВЭО, что связано с возможным выходом спутника из зоны обслуживания и необходимостью обеспечения хэндовера), время нахождения в состоянии поиска свободного ресурса, скорость канала (случайная величина равномерно распределенная в заданных пределах от минимального значения до максимального), объем передаваемых данных (аналогично, равномерно распределенная случайная величина).

На основании переменных, определяемых скоростью канала и объемом передаваемых данных, задается длительность обслуживания для каждого пользовательского запроса. Длительность обслуживания определяется как отношение объема передаваемых данных к скорости канала, выделенного для данного вызова. Длительность обслуживания записывается в параметр транзакта для использования в дальнейшем при прохождении транзакта по модели и для определения длительности занятости ресурса при имитации обслуживания.

Генерация сеансов передачи данных (Рисунок 1) производится с использованием заданного закона распределения. В один из признаков транзактов записывается определенное ранее значение длительности обслуживания, исходя из пропускной способности канала и объема передаваемых данных. Это значение будет использовано при проверке превышения требуемого времени обслуживания максимальному значению и при имитации занятия ресурса.



Рисунок 1 – Алгоритм обслуживания запросов пользователей в сети (начало)
 Figure 1 – User request serving algorithm (beginning)

Далее производится проверка наличия спутника на высокоэллиптической орбите (ВЭО) в зоне видимости для обслуживания данного вызова.

При положительном решении определяется номер луча для данного спутника из доступных для данной зоны обслуживания. В дальнейшем будет приниматься решение о предоставлении конкретного ресурса в выделенном луче, что в реальной системе определяется частотным или другим видом (или совместным использованием) разделения каналов. Далее производится передача на следующий этап обслуживания: соединитель «А» (Рисунок 1).

При отсутствии в зоне видимости спутника на высокоэллиптической орбите вызов передается для обслуживания на спутниковую систему на геостационарной орбите (ГСО): соединитель «Б» (Рисунок 1).

При наличии в зоне действия луча спутника на ВЭО возможности обслуживания спутником на ГСО, что проверяется блоком после соединителя «А» (Рисунок 2), процедура «Выбор спутника» (Рисунок 2) обеспечивает выбор спутника на ВЭО (соединитель «В») или переход к процедуре выбора спутников на ГСО.

При передаче транзакта через соединитель «Б» вызов поступает в блок выбора лучей обслуживания спутниками на ГСО с учетом того, что множества лучей для спутников ГСО₁ или ГСО₂ частично могут перекрываться. Далее, также транзакт переходит к процедуре выбора спутников на ГСО, в которой определяется луч для зоны обслуживания, относящейся к соответствующему геостационарному спутнику.

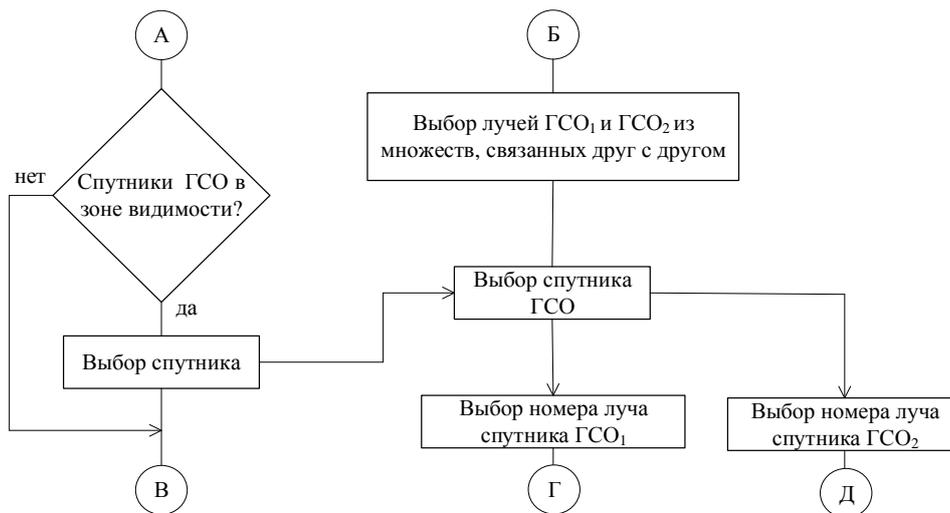


Рисунок 2 – Алгоритм обслуживания запросов пользователей в сети (продолжение)

Figure 2 – User request serving algorithm (continuation)

После процедуры выбора геостационарного спутника (ГСО₁ или ГСО₂) транзакт передается соответственно для выбора номера луча в зоне обслуживания спутника ГСО₁ или спутника ГСО₂. В модели реализовано равновероятное распределение вызовов между спутниками и между лучами, но при необходимости можно изменить параметры модели в зависимости от существующего распределения на конкретной сети.

На Рисунке 3 показан алгоритм процесса обслуживания запроса спутниковой системой на ВЭО (соединитель «В»). Предварительно производится запрос ресурсов спутника и проверка наличия свободных ресурсов.

При отсутствии свободных ресурсов производится перевод запроса в состояние ожидания (состояние поиска свободных ресурсов). При этом запускается таймер ожидания или продолжения ожидания освобождения ресурсов. Транзакт переводится в

режим ожидания. При моделировании в среде *GPSS World* транзакт помещается в очередь, где задерживается на некоторое время до освобождения требуемого ресурса.

В связи с ограниченностью ресурсов спутниковой сети в целом и спутниковых систем в частности в модели введено ограничение на время ожидания освобождения ресурса (время поиска свободных ресурсов). Данное ограничение представлено в модели в виде максимального времени ожидания. Поэтому в алгоритме обслуживания запросов введена проверка на превышение таймера ожидания (Рисунок 3).

При первом поступлении в очередь, в случае если время ожидания в вышеуказанной очереди не превышает максимального значения, транзакт, после заданного временного интервала нахождения в очереди, направляется на проверку наличия свободных ресурсов для его обслуживания. При этом в параметр транзакта заносится информация о том, сколько времени данный транзакт уже провел в очереди. При отсутствии свободных ресурсов таймер ожидания продолжает работу, и транзакт поступает в очередь ожидания освобождения свободных ресурсов.

Цикл постановки в очередь продолжается до тех пор, пока не освободятся необходимые для обслуживания транзакт ресурсы или не будет превышено максимальное время ожидания. Если данное время превышено, то запрос отклоняется и записывается в потери (Рисунок 3: счетчик потерь). После этого транзакт удаляется из модели.

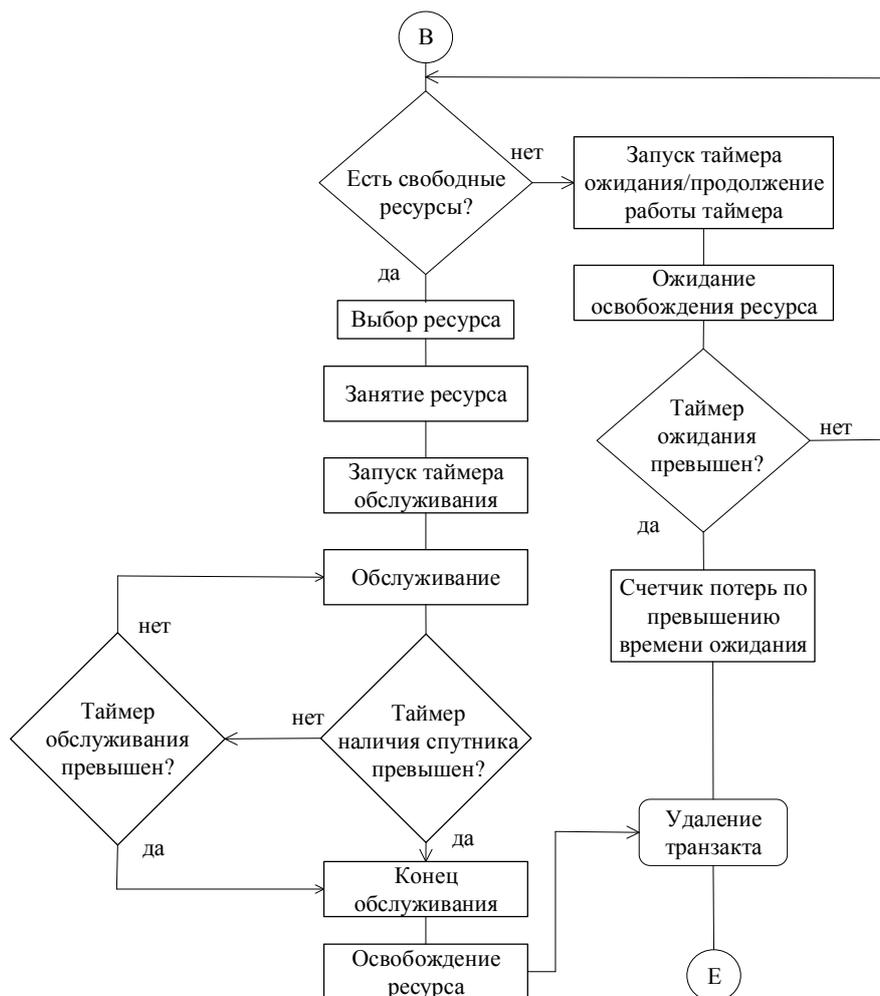


Рисунок 3 – Алгоритм обслуживания запросов пользователей в сети (продолжение)

Figure 3 – User request serving algorithm (continuation)

Если же максимальное время ожидания в данной очереди не превышено, то запрос повторяется.

При наличии свободных ресурсов, транзакту для обслуживания предоставляется определенный ресурс, зависящий от технологии организации абонентских каналов в моделируемой спутниковой сети, и происходит занятие данного выделенного ресурса. При этом в связи с тем, что длительность обслуживания ограничена, с одной стороны, требуемым временем передачи определенного объема информации, а с другой стороны, возможной сменой спутника на ВЭО, в алгоритме введены два условия: по проверке превышения длительности обслуживания (записана в параметре транзакта) и по проверке превышения времени нахождения спутника на ВЭО в данной зоне обслуживания.

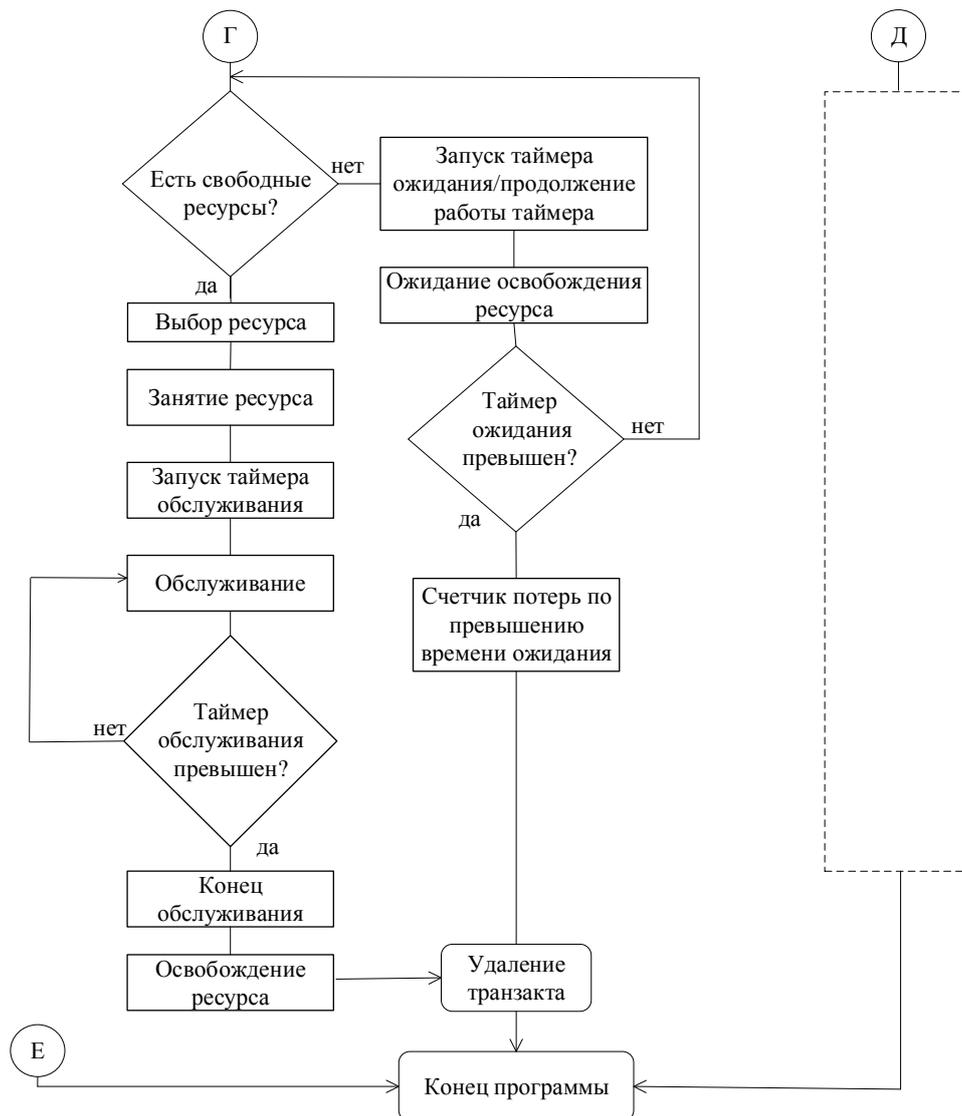


Рисунок 4 – Алгоритм обслуживания запросов пользователей в сети (окончание)

Figure 4 – User request serving algorithm (end)

При превышении времени нахождения спутника в зоне обслуживания обслуживание транзакта прекращается (процедура «Конец обслуживания»), происходит освобождение ресурса и удаление транзакта. Если же вышеуказанное время не превышено, то производится проверка по превышению длительности обслуживания.

Цикл повторяется до тех пор, пока не будет полностью проведено обслуживание или спутник не покинет зону видимости (для непрерывного обслуживания необходимо реализовать процедуры хэндовера).

На Рисунке 4 представлен алгоритм обслуживания запросов в спутниках на ГСО. Алгоритм, показанный пунктиром (от соединителя «Д»), соответствует обслуживанию запросов спутником ГСО₂, который идентичен алгоритму обслуживания запросов спутником ГСО₁, который показан от соединителя «Г». Основное отличие алгоритма для геостационарных систем от алгоритма обслуживания для систем на высокоэллиптической орбите, заключается в отсутствии таймера наличия спутника, так как подразумевается, что при обслуживании вероятность потери спутника ГСО в зоне видимости при стационарности пользователя достаточно мала.

Это приводит к тому, что нет необходимости в процедуре проверки превышения времени наличия спутника в зоне обслуживания (Рисунок 4), и производится только проверка по превышению длительности обслуживания. В остальном алгоритм обслуживания идентичен рассмотренному ранее для систем на высокоэллиптической орбите.

Транзакты после прохождения модели процедуры обслуживания удаляются, на этом выполнение процесса моделирования сети завершается, что продемонстрировано на Рисунке 4.

На языке GPSS для получения статистических данных при большом числе испытаний вводится так называемый блок таймера, позволяющий задавать необходимый временной интервал для проведения эксперимента.

Имитационная модель спутниковой сети

Имитационная модель сформирована в среде GPSS World. В качестве ресурсов моделируемых спутниковых систем были использованы объекты STORAGE (емкостью 150 устройств для моделей геостационарных систем, 50 для высокоэллиптических). В связи с ограниченностью используемой версии GPSS World (максимальное число блоков равно 180) в работе рассматривались 5 лучей для каждой из трех спутниковых систем: ВЭО, ГСО₁ и ГСО₂. Также, при инициализации переменных были определены: таблица времени задержки D , переменная для определения времени нахождения в состоянии поиска ресурса Δ , максимальная длительность обслуживания $T_{обсл, max}$ и максимальное время нахождения в состоянии поиска ресурса $T_{поиск}$.

Таблица времени задержки сформирована с использованием стандартного числового атрибута M1, который содержит информацию о времени нахождения транзакта в модели. Переменная Δ для определения времени нахождения в состоянии поиска ресурса определяется из разности значений двух параметров для каждого транзакта: значения времени нахождения в очереди P2 и момента времени поступления транзакта в сеть P1. Откуда: $\Delta = P2 - P1$. Максимальные значения $T_{обсл, max}$ и $T_{поиск}$ для каждого эксперимента определялись командой «EQU».

При инициализации переменных модели (в нотации GPSS: V – variable) для распределения вызовов по лучам спутниковых систем ВЭО, ГСО₁ и ГСО₂ использованы дискретные функции распределения вероятностей $B(x)$ с равновероятным распределением вызовов между лучами (x – номер луча): function RN1,D5, где RN1 – номер генератора, D5 – тип функции (D – дискретная) и количество определяемых точек (равно 5). Значения функции в заданных точках содержат метки для переходов транзактов.

Непрерывные функции распределения случайных величин использовались для задания пропускной способности канала (функция *throughput*) и требуемого объема данных (функция *capacity*).

Формирование пользовательских запросов производилось с показательным распределением интервалов между вызовами (*exponential*), среднее значение которого использовалось в качестве одного из параметров при исследовании сети (T_{cp}). После создания транзакта в параметр $P10$ записывается частное от деления объема передаваемых данных (*capacity*) на пропускную способность (*throughput*) канала (блок: *assign 10, (V\$capacity/V\$throughput)*), что позволяет определить необходимую длительность обслуживания $T_{обсл}$. Далее, производится безусловный переход (блок *TRANSFER*) по метке, в соответствии с вероятностным распределением $B(x)$, в один из лучей обслуживания спутником на ВЭО или ГСО.

Модули программной модели, описывающие лучи системы на ВЭО, являются однотипными. В каждом модуле определена вероятность перехода на спутники ГСО с использованием вероятностного перехода блока *TRANSFER*. В параметр $P1$ каждого транзакта записывается системный числовой атрибут $C1$. Далее вводится случайная задержка, имитирующая запрос ресурса у спутниковой системы, и обеспечивается проверка (блок *GATE*) наличия свободных ресурсов (условие *SNF – storage not full*) в данном луче спутника.

При наличии свободных ресурсов производится их занятие и передача запроса на модуль имитации земной станции в виде перехода в подпрограмму, в которой происходит равновероятное распределение трафика между двумя ЗС. Ресурсы земных станций занимают в отдельных модулях для каждого спутника: ВЭО, ГСО₁ и ГСО₂. Длительность обслуживания в модулях определяется заданным значением максимальной продолжительности сеанса связи (для ВЭО) и требуемой длительностью, необходимой для передачи данных заданного объема (для ГСО и, в некоторых случаях, для ВЭО). Для спутников на ВЭО, в связи с возможным изменением спутниковой системы при обслуживании и отсутствии межспутникового хэндовера, длительность обслуживания равна максимальному значению (при условии $T_{обсл} \geq T_{обсл, max}$) или требуемому (при выполнении условия $T_{обсл} < T_{обсл, max}$). После обслуживания в модуле земной станции производится возврат из подпрограммы, который приводит к освобождению ресурсов спутниковой системы и передаче транзакта на удаление.

При отсутствии свободных ресурсов спутниковой системы на ВЭО, транзакт передается в модуль ожидания освобождения ресурсов, где производится его постановка в очередь, имитация задержки в очереди, инкремент значения задержки в параметре транзакта $P2$ и проверка переменной Δ на превышение значения $T_{поиск}$. При выполнении условия $\Delta \leq T_{поиск}$ транзакт возвращается в блок проверки свободности ресурсов спутниковой системы, а при превышении значения $T_{поиск}$ ($\Delta > T_{поиск}$) транзакт передается в блок счетчика потерь, реализованный блоком *SAVEVALUE*.

В модулях модели, относящихся к моделям систем на ГСО, определены процедуры аналогичные для моделей систем на ВЭО, за исключением передачи на ожидание и ограничения на длительность обслуживания, что связано с большим (относительно ВЭО) выделяемым ресурсом и отсутствием выхода спутника из зоны обслуживания.

Результаты

Результаты экспериментов с имитационной моделью исследуемой спутниковой сети представлены на Рисунке 5 и Рисунке 6. Основными исследуемыми характеристиками являются: потери транзактов (то есть вызовов от абонентов в связи с

занятостью ресурсов сети, в т. ч. и после ожидания поиска свободного ресурса), среднее время задержки транзакта в сети (подразумевается суммарное время нахождения вызова в сети, включая время ожидания освобождения ресурса и длительность обслуживания). В общем случае, в имитационной модели можно рассматривать и другие характеристики, например, загрузка отдельных систем, пропускная способность и др.

При имитационном моделировании в среде *GPSS World* максимальное время поиска свободного ресурса было принято равным $T_{\text{поиск}} = 150$ мс, что соответствует требованиям к временным показателям качества обслуживания в инфокоммуникационных сетях [1, 6, 11].

В модели спутниковых систем пропускная способность канала (*throughput*) была задана случайной величиной с равномерным распределением от 500 Мб/с до 1000 Мб/с. Требуемый объем передаваемой информации (*capacity*) также являлся случайной равномерно распределенной величиной от 100 МБ до 8 ГБ. Длительности запроса и закрепления (установления соединения) ресурса были приняты равными 0,01 мс и 0,001 мс, соответственно.

Функциональные зависимости, представленные на Рисунках 5-6, определены относительно максимальной длительности обслуживания $T_{\text{обсл, max}}$, связанной с ограничениями на ресурсы спутника на ВЭО. Изменение значения максимальной длительности обслуживания позволяет предотвратить захват ресурса информационно емкими источниками на длительное время и увеличить число обслуживаемых вызовов. В качестве дополнительного параметра рассматривался средний интервал между транзактами $T_{\text{ср}}$, изменение которого приводит к изменению интенсивности поступления вызовов и, соответственно, к изменению поступающей нагрузки в моделируемую спутниковую сеть.

На Рисунке 5 представлена зависимость среднего времени задержки транзакта в сети от максимальной длительности обслуживания по результатам имитационного моделирования комбинированной спутниковой сети в среде *GPSS World*. Как видно из графика, при большой интенсивности нагрузки ($T_{\text{ср}}=0.025$ мс) при $T_{\text{обсл, max}} > 100$ мс происходит перегрузка сети и резкое увеличение среднего времени задержки. Перегрузка означает то, что загрузка отдельных систем и сети в целом достигает или приближается к предельному значению ($\rho = 1$).

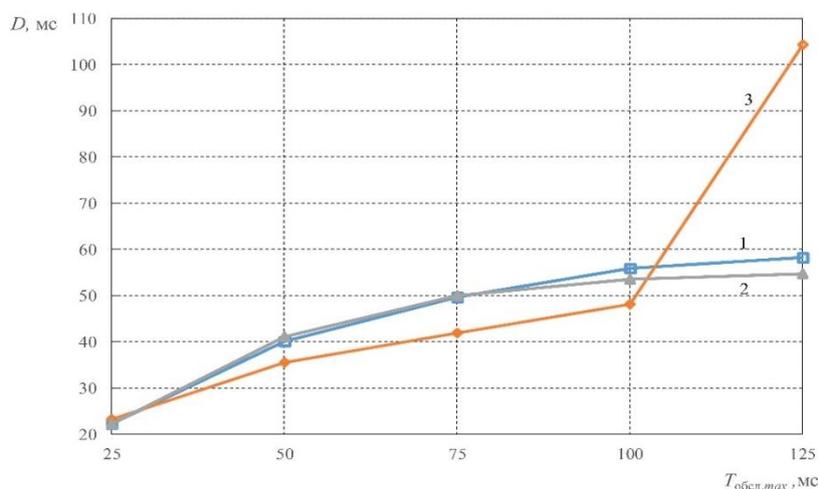


Рисунок 5 – Зависимость среднего времени задержки транзакта в сети от максимальной длительности обслуживания (1 – $T_{\text{ср}}=0.075$ мс, 2 – $T_{\text{ср}}=0.05$ мс, 3 – $T_{\text{ср}}=0.025$ мс)

Figure 5 – Dependence of transaction average delay on the maximum duration of service (1 – $T_{\text{mean}}=0.075$ ms, 2 – $T_{\text{mean}}=0.05$ ms, 3 – $T_{\text{mean}}=0.025$ ms)

Для других значений интенсивности нагрузки ($T_{cp}=0.075$ мс и $T_{cp}=0.05$ мс) среднее время задержки не превышает 60 мс, что обеспечивает достаточный уровень качества обслуживания информационных потоков в моделируемой спутниковой сети. Однако можно предположить, что при увеличении интенсивности нагрузки возможна перегрузка при значениях максимальной длительности обслуживания в интервале (100, 125) мс.

Следует также отметить, что максимальная длительность обслуживания, превышающая значение 125 мс, приводит к снижению общего качества обслуживания в сети и не отвечает требованиям, предъявляемым к современным инфокоммуникационным системам.

На Рисунке 6 представлены результаты моделирования для исследования изменения вероятности потерь транзактов в зависимости от максимальной длительности обслуживания $T_{обсл,max}$. В рассматриваемой модели определяются потери для всей сети в целом без разделения по отдельным системам или причинам отказа в обслуживании. Это связано в первую очередь с ограничениями на количество блоков используемой версии среды *GPSS World*. В дальнейшем планируется рассмотреть вопросы, связанные с оценкой вероятности потерь с различными причинами возникновения.

Как и предполагалось, уменьшение максимальной длительности обслуживания позволяет уменьшить общие потери в сети. При этом, на уровне $T_{обсл,max}$ равной 100 мс можно отметить практическую независимость вероятности потерь от значения длительности $T_{обсл,max}$, что позволяет сделать вывод о достижении предельного значения загрузки сети по вероятности потерь. Также, на данной функциональной зависимости можно видеть, что предельное значение загрузки сети при большой нагрузке (Рисунок 6: линия 3) достигается уже при $T_{обсл,max}=50$ мс, а при уменьшении трафика пороговое значение, при котором наступает перегрузка, увеличивается. Например, для $T_{cp}=0.05$ мс предельное значение достигается при $T_{обсл,max}=100$ мс, а для $T_{cp}=0.025$ мс при $T_{обсл,max}=125$ мс.

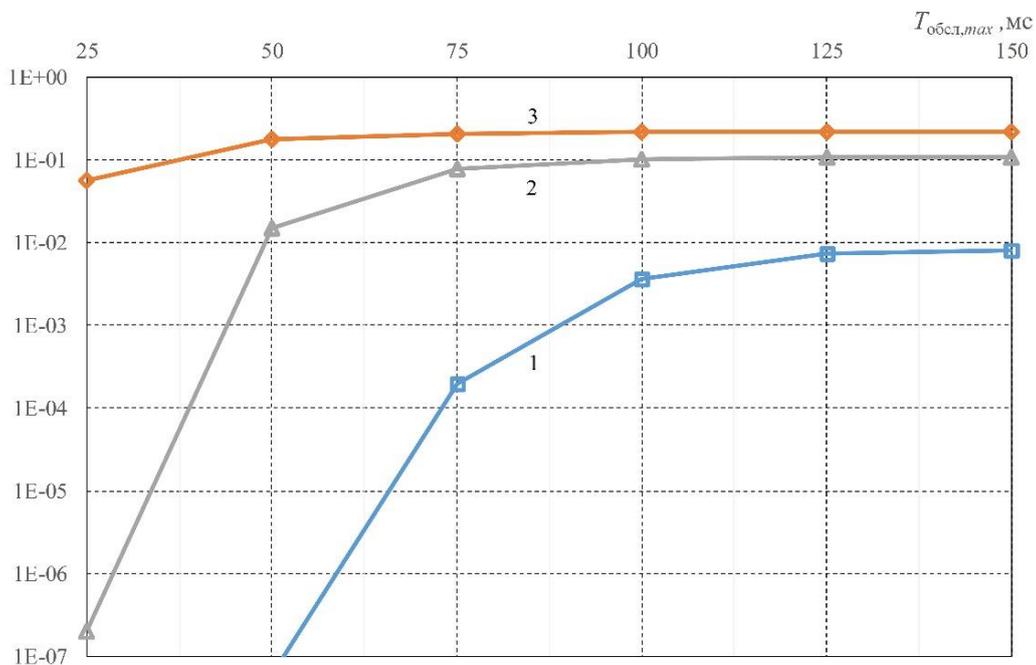


Рисунок 6 – Зависимость вероятности потерь от максимальной длительности обслуживания (1 – $T_{cp}=0.075$ мс, 2 – $T_{cp}=0.05$ мс, 3 – $T_{cp}=0.025$ мс)

Figure 6 – Dependence of network loss probability on the maximum duration of service (1 – $T_{mean}=0.075$ ms, 2 – $T_{mean}=0.05$ ms, 3 – $T_{mean}=0.025$ ms)

Стоит отметить, что при уменьшении максимальной длительности обслуживания увеличение интенсивности трафика вызывает увеличение вероятности потерь на несколько порядков (например, при $T_{\text{обсл, max}}=75$ мс). Это естественно будет приводить к снижению качества обслуживания в моделируемой сети.

Если при уменьшении максимальной длительности обслуживания вероятность потерь снижается, то загрузка систем при этом возрастает. В связи с тем, что в рассматриваемой модели сети поступающая нагрузка равномерно распределяется по спутниковым системам при одном значении максимальной длительности обслуживания, загрузка одного луча спутника на ГСО меньше, чем загрузка луча спутника на ВЭО. В Таблице 1 приведены в качестве примера данные статистического отчета среды *GPSS World* об объектах *Storages* при $T_{\text{cp}}=0,05$ мс и $T_{\text{макс}}=125$ мс. Данные приведены для отдельных систем с целью демонстрации загрузки ресурсов спутниковых систем, находящихся на разных орбитах.

В Таблице 1 ресурсы спутниковых систем на ГСО обозначены как *RES_GEO1B1* (спутник ГСО₁-луч 1), а ресурсы спутников на ВЭО как *RES_H1B1* (спутник ВЭО₁-луч 1). Как видно из представленных результатов при равномерной загрузке и заданном объеме каналов, ресурсы спутника на ВЭО значительно перегружены, а ресурсы спутников на ГСО – недогружены.

Таблица 1 – Статистические данные о ресурсах сети (элемент отчета *GPSS World* об объектах *Storages*)

Table 1 – Statistical data on network resources (from *GPSS World Report*, objects: *Storages*)

| Имя ресурса | Емкость ресурса | Среднее число занятых устройств | Загрузка ресурса |
|-------------------|-----------------|---------------------------------|------------------|
| <i>RES_H1B1</i> | 50 | 49.692 | 0.994 |
| <i>RES_H1B2</i> | 50 | 49.691 | 0.994 |
| <i>RES_H1B3</i> | 50 | 49.705 | 0.994 |
| <i>RES_GEO1B1</i> | 150 | 74.869 | 0.499 |
| <i>RES_GEO1B2</i> | 150 | 74.848 | 0.499 |
| <i>RES_GEO1B3</i> | 150 | 74.372 | 0.496 |
| <i>RES_GEO2B1</i> | 150 | 74.547 | 0.497 |
| <i>RES_GEO2B2</i> | 150 | 74.738 | 0.498 |
| <i>RES_GEO2B3</i> | 150 | 74.752 | 0.498 |

Одним из вариантов решения проблемы перегрузки системы на ВЭО может являться использование механизмов динамического управления распределением трафика в моделируемой сети, что позволит предотвращать ситуации перегрузки ресурсов сети и обеспечить необходимый уровень качества обслуживания.

Заключение

В работе рассматривается имитационная модель комбинированной спутниковой сети. Основными элементами моделируемой сети являются спутниковые системы на высокоэллиптической и геостационарной орбитах. Совместное использование ресурсов таких спутниковых систем позволяет решать комплекс задач: от предоставления широкополосного доступа до обеспечения зоны обслуживания в верхних широтах, что особенно актуально для нашей страны в современных условиях.

В рамках решения поставленной в работе задач произведена разработка алгоритма обслуживания запросов пользователей для имитационной модели с учетом

процедур обслуживания вызовов в спутниковой сети с определенным набором элементов. Алгоритм реализован в виде компьютерной модели в среде *GPSS World*. Программная реализация продемонстрировала возможности *GPSS World* по использованию элементов данной среды имитационного моделирования и позволила получить результаты для отдельных показателей качества обслуживания, таких как среднее время задержки и вероятность потерь.

В дальнейшем возможно расширение функционала компьютерной модели комбинированной сети, например, за счет дополнительного программного обеспечения *GPSS Studio*. Предполагается, что в таком случае можно будет повысить детализацию моделей процессов обслуживания информационных потоков в спутниковых сетях и системах.

В связи с тем, что спутниковые сети и в дальнейшем будут играть значительную роль в развитии инфокоммуникаций, использование комплекса имитационных моделей различного вида позволит решать задачи проектирования новых и уточнения параметров существующих спутниковых сетей и систем. В таком случае, используемый в работе подход позволит решать и перспективные задачи, связанные, например, с моделированием обработки на борту, моделями межспутниковых линий или управлением распределением трафика в глобальной спутниковой сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алешин В.С., Догаев С.Г. Задержки распространения сигналов в сетях спутниковой связи. *T-Comm - Телекоммуникации и Транспорт*. 2019;13(5):4–11.
2. Liu J., Luo R., Huang T., Meng C. A Load Balancing Routing Strategy for LEO Satellite Network. *IEEE Access*. 2020;8:155136–155144.
3. Liu F., Qian G. Simulation Analysis of Network Capacity for LEO Satellite. *International Conference on Computer Science and Management Technology*. 2020:100–104.
4. Zhang H., Wang C.F. Research on Routing Control with Delay Constraint Based on Contact Plan for Integrated Satellite Terrestrial Network. *IEEE 8th International Conference on Information, Communication and Networks*. 2020:155–159.
5. Xu X., Dong C., Liu A. Research on the Adaptation of the Load Balancing Routing to the Flow Dynamics in LEO Constellation Networks. *IEEE 20th International Conference on Communication Technology*. 2020:102–106.
6. Аганесов А.В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков. *Системы управления, связи и безопасности*. 2015;3:92–121.
7. Камнев Е., Гриценко А., Анпилогов В. Системы широкополосного доступа на основе высокоэллиптических спутников: российские проекты. *Технологии и средства связи. Специальный выпуск*. 2019:72–75.
8. Акмоллов А.Ф., Ковальский А.А., Ефимов С.Н. Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разновысотной орбитальной группировки. *Труды учебных заведений связи*. 2020;6(1):22–31.
9. Морозов А.В., Пономарев Д.Ю. Модель распределения трафика в многоуровневой инфокоммуникационной сети специального назначения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=899> (дата обращения 01.02.2022).
10. Кукушкин М.А., Пономарев Д.Ю. Аналитическое представление функционирования космических систем и комплексов. *Вестник Академии военных наук*. 2017;2(59):107–111.

11. Пономарев Д.Ю. Функциональные и математические модели распределения трафика в комбинированной спутниковой сети. *Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА»*. 2021;2(4):29–37.

REFERENCES

1. Aleshin V.S., Dogaev S.G. Signals propagation delays in satellite communication networks. *T-Comm - Telekommunikacii i Transport = T-Comm - Telecommunications and transport*. 2019;13(5):4–11 (In Russ.)
2. Liu J., Luo R., Huang T., Meng C. A Load Balancing Routing Strategy for LEO Satellite Network. *IEEE Access*. 2020;8:155136–155144.
3. Liu F., Qian G. Simulation Analysis of Network Capacity for LEO Satellite. *International Conference on Computer Science and Management Technology*. 2020:100–104.
4. Zhang H., Wang C.F. Research on Routing Control with Delay Constraint Based on Contact Plan for Integrated Satellite Terrestrial Network. *IEEE 8th International Conference on Information, Communication and Networks*. 2020:155–159.
5. Xu X., Dong C., Liu A. Research on the Adaptation of the Load Balancing Routing to the Flow Dynamics in LEO Constellation Networks. *IEEE 20th International Conference on Communication Technology*. 2020:102–106.
6. Aganesov A.V. Analiz kachestva obsluzhivaniya v vozdušno-kosmicheskoj seti svjazi na osnove ierarhicheskogo i decentralizovannogo principov retransljacii informacionnyh potokov. *Sistemy upravleniya, svjazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2015;3:92–121 (In Russ.)
7. Kamnev E., Gricenko A., Anpilogov V. Sistemy širokopolosnogo dostupa na osnove vysokojellipticheskikh sputnikov: rossijskie proekty. *Tehnologii i sredstva svjazi. Special'nyj vypusk*. 2019;72–75 (In Russ.)
8. Akmolov A.F., Koval'skij A.A., Efimov S.N. Predlozheniya po sozdaniju i funkcionirovaniju mnogosputnikovoj sistemy svjazi na osnove raznovysotnoj orbital'noj gruppirovki. *Trudy uchebnyh zavedenij svjazi*. 2020;6(1):22–31 (In Russ.)
9. Morozov A.V., Ponomarev D. The traffic distribution model of the multilevel infocommunication network of special-use. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=899> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.024 (In Russ.)
10. Kukushkin M.A., Ponomarev D.Ju. Analiticheskoe predstavlenie funkcionirovanija kosmicheskikh sistem i kompleksov. *Vestnik Akademii voennykh nauk*. 2017;2(59):107–111 (In Russ.)
11. Ponomarev D. Funkcional'nye i matematicheskie modeli raspredelenija trafika v kombinirovannoj sputnikovoj seti. *Vestnik Voennogo innovacionnogo tehnopolisa*. 2021;2(4):29–37 (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пономарев Дмитрий Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, научно-исследовательский отдел, «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация.

e-mail: era_1@mil.ru

ORCID: [0000-0003-1639-5935](https://orcid.org/0000-0003-1639-5935)

ELIBRARY ID: 145995

Dmitriy Y. Ponomarev, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Senior Researcher, Research Department, Military Innovative Technopolis ERA, Anapa, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 14.03.2022; одобрена после рецензирования 14.04.2022;
принята к публикации 22.04.2022.*

*The article was submitted 14.03.2022; approved after reviewing 14.04.2022;
accepted for publication 22.04.2022.*