

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

А.В. Ануфренко, И.С. Русин, С.А. Якушенко (Санкт-Петербург)

### Введение

В настоящее время во всем мире активно разрабатывается низкоорбитальная система спутниковой связи на искусственных спутниках земли (ИСЗ) для предоставления пользователям глобального высокоскоростного интернета. Система связи содержит множество ретрансляторов связи (РС) на ИСЗ (несколько десятков тысяч) на низких орбитах высотой 300-900 км с межспутниковыми связями.

Глобальная многофункциональная низкоорбитальная система спутниковой связи (МНСС) функционирует в условиях воздействия многочисленных специфических факторов (высокой динамики изменения топологии сети на ИСЗ, ограниченных размеров зоны видимости ИСЗ, высокой скорости обращения ИСЗ вокруг Земли, внешних электромагнитных помех и т. п.).

Негативное воздействие деструктивных факторов на элементы МНСС будет оказывать влияние на показатели качества обслуживания (*quality of service (QoS)*), к которым предъявляются жесткие требования (рекомендация МСЭ-Т У.1541). Таким образом, с одной стороны, при проектировании системы МНСС необходимо учитывать множество факторов ее функционирования, с другой стороны – выполнить жесткие требования, предъявляемые к показателям *QoS*.

Приведенное противоречие требует применения специализированных подходов к обоснованию принимаемых решений при планировании и проектировании элементов МНСС. Одним из таких подходов является имитационное моделирование, которое позволяет получить наиболее достоверные численные результаты необходимых показателей.

### Постановка задачи на моделирование

Имеется МНСС, в состав которой входит  $N$  искусственных спутников земли (ИСЗ) и  $M$  наземных станций. Рассматриваются три варианта ее структурной схемы: без использования наземных станций (рисунок 1,а), с использованием их в качестве ретранслятора между ИСЗ (рисунок 1,б), с использованием их в качестве ретранслятора между другими наземными станциями (рисунок 1,в). Расстояние между ИСЗ на одной орбите и между орбитами варьируется таким образом, чтобы с учетом заданных входных параметров (связности сети, высоты ИСЗ, вида структуры сети и др.) система спутниковой связи обеспечивала полную зону покрытия требуемой территории.

Каждый РС на ИСЗ имеет четыре направления связи (НС), организованных для передачи телетрафика, со скоростью передачи  $V_{lin\_sv}$  и  $V_{nazemn\_lin\_sv}$  для межспутниковых линий связи и наземных линий связи соответственно.

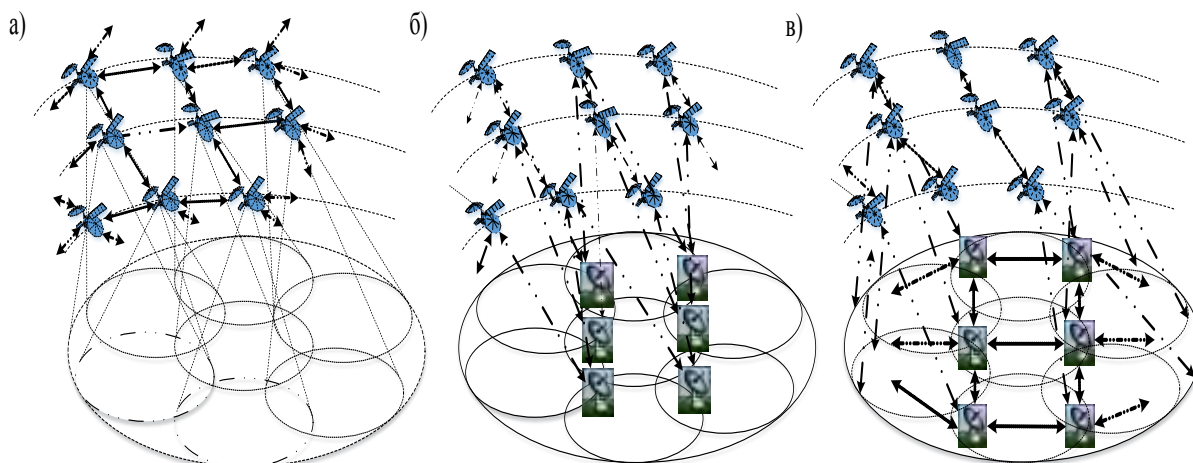


Рис.1 – Варианты структурной схемы МНСС

Интенсивность агрегируемого на РС и наземных станциях телетрафика, поступающего от абонентских терминалов (АТ), зависит от заданных нагрузочных параметров (рисунок 2). Интенсивность генерации трафика описывается классом экспоненциальных законов распределения (пуассоновский закон распределения, экспоненциальный закон распределения), длительность генерации трафика и длительность отсутствия генерации трафика описывается классом субэкспоненциальных законов распределения (закон распределения Парето, Вейбулла, логнормальный и др.) [1].

Положим, что на линии МНСС осуществляется активное воздействие по радиоподавлению системы спутниковой связи, а именно за расчётное время осуществляют эквивалентную компьютерную атаку, с вероятностью подавления  $n$  направлений связи  $P_n$  [2, 3]. Требуется определить влияние нагрузочных, структурных и функциональных параметров элементов МНСС на среднее время задержки пакетов агрегированного трафика и производительность системы спутниковой связи.

Аналитико-имитационные модели МНСС разрабатывались в среде имитационного моделирования GPSS Studio.

#### Ограничения и допущения, принятые в модели

В модели приняты следующие допущения и ограничения:

1. требования к МНСС по достоверности и безопасности выполняются;
2. параметры элементов МНСС задаются согласно рассматриваемому телекоммуникационному оборудованию, используемого в элементах системы;
3. коэффициент Херста рассчитывается на основе известных статистических данных [1];
4. параметры генераторов трафика задаются согласно рисунка 2;
5. под технологией передачи данных наземной части МНСС рассматривается технология *Carrier Ethernet*;
6. расчет весовых коэффициентов линий связи осуществляется с учетом воздействие противника типа «Эквивалентная компьютерная атака» [2, 3];
8. рассматривается первых три уровни модели *OSI*;
9. рассматривается три структуры построения МНСС;
10. емкость буферов узла связи (УС) считается неограниченной.

### Аналитическое описание

Генераторы трафика описываются *On/Off* моделями [1]. С точки зрения системы массового обслуживания, модели генераторов трафика представляют собой неприоритетные, неэкспоненциальные нелинейные разомкнутые двухфазные системы массового обслуживания [4]. Длительности *On* и *Off* периодов в зависимости от вида трафика описываются усеченным распределением Парето, усеченным логнормальным распределением, усеченным распределением Вейбулла. В моделях генераторов трафика учитывается взаимосвязь параметра формы распределения и параметра степени самоподобия – коэффициента Херста [1].

Модели ИСЗ и НС, а также линий связи, являются неприоритетными, экспоненциальными нелинейными разомкнутыми однофазными системами массового обслуживания с ограниченным ожиданием и неординарными потоками. Плотность распределения вероятности времени обработки пакетов телетрафика в элементах МНСС описывается пуассоновским законом распределения [4].

При расчете весовых коэффициентов линий связи МНСС учитывается воздействие эквивалентной компьютерной атаки, интегральная функция распределения вероятностей  $F_t$  и среднее время  $t_{KA}$ , воздействия которой описаны в [2, 3].

### Исходные данные

Исходные данные, учитываемые в модели МНСС, представлены на рисунке 2.

Нагрузочные параметры	
Объем нагрузки (речевой трафик) $Golosov_{sv}$ , Мбайт	Плотность абонентских терминалов, $Plotn_{term}$
	Длительность <i>ON</i> -периода $T_{on}$ , с
Коэффициент Хёрста, $H$	Длительность <i>OFF</i> -периода $T_{off}$ , с
Интенсивность генерации трафика $V_{AT}$ , Кбит/с	Объем нагрузки (трафик данных) $Internet$ , $SMS$ , $MMS$ , $VideoKonferencia$ , $Mesto_{term}$ , Мбайт
Закон распределения интенсивности трафика, $Zak_{Gen}$	Объем нагрузки (видео трафик) $Video_{sv}$ , Мбайт
Структурные параметры	
Расстояние между наземными станциями $rasst_{mezhr}$ , км	Матрица связности $Matrica_b$
	Вид структуры сети $RezhMarsh$
Требуемое количество орбит $treb_{kolvo_{orbit}}$	Количество ИСЗ на орбите $Kol_{ISZ_{Na_{Orbite}}}$
	Высота ИСЗ $H_{isk_{sput}}$ , км
Расстояние между ИСЗ на одной орбите $rasst_{mezhr_{ISZ_{na_{odn_{orb}}}}$ , км	Расстояние между ИСЗ на разных орбитах $rasst_{mezhr_{ISZ}}$ , км
Расстояние между ИСЗ по земле $rasst_{MezhOrbit_{po_{zemle}}}$ , км	
Функциональные параметры	
Среднее время воздействия КА $t_{KA}$ , с	Производительность спутника связи $Pr_{Uzl}$ , Гбит/с
Ширина диаграммы направленности $Shir_{diagr_{napravl}}$ , град	Производительность наземной станции $V_{nazemn_{stan}}$ , Гбит/с
Пропускная способность наземной линии связи $V_{nazemn_{lin_{sv}}}$ , Гбит/с	Интегральная функции распределения вероятности воздействия КА $F_t$
Коэффициент покрытия зоны обслуживания $k_{pokr_{zoni_{obsl}}}$	Пропускная способность межспутниковых линий связи $V_{lin_{sv}}$ , Гбит/с
Зона обслуживания $Zona_{obsl}$	

Рис.2 – Исходные данные модели МНСС

## Имитационная модель

Структурная схема имитационной модели МНСС представлена на рисунке 3.

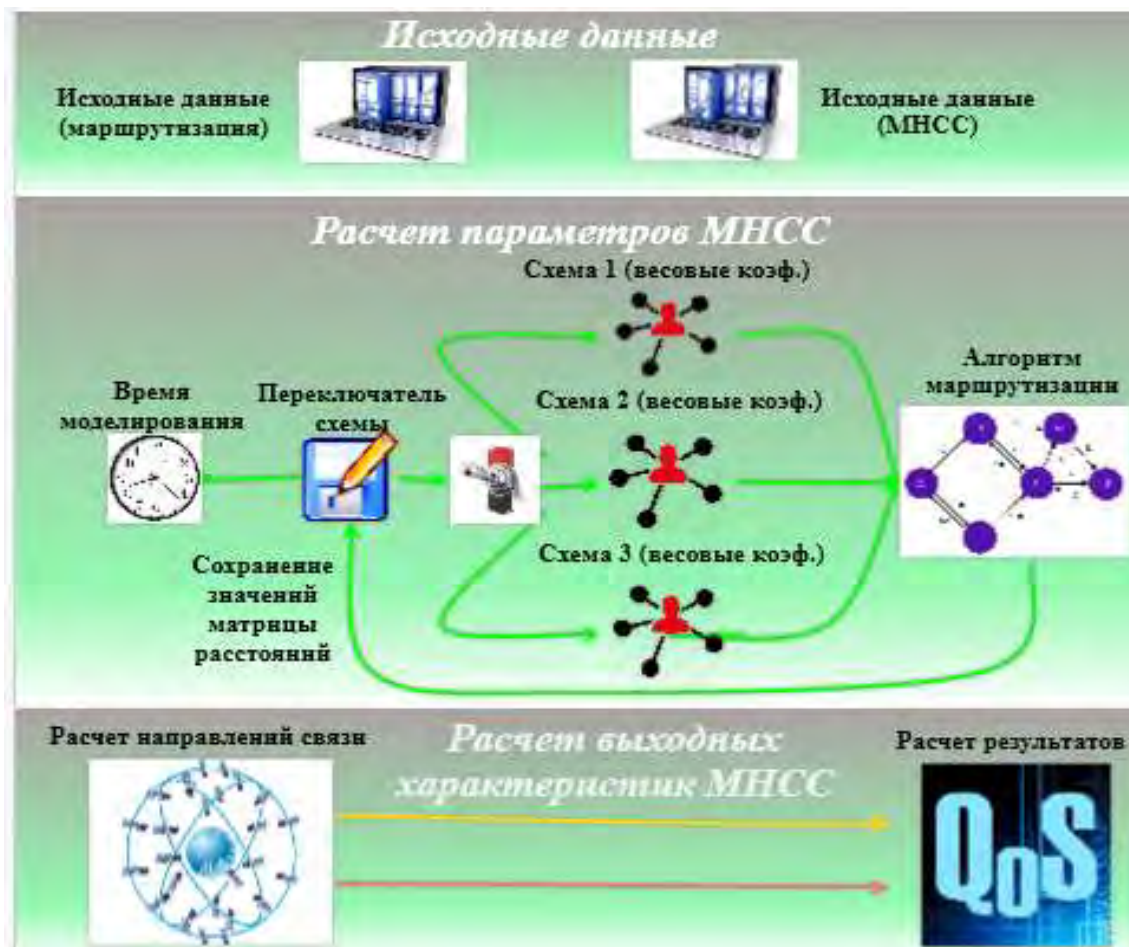


Рис.3 – Структурная схема имитационной модели МНСС

Обобщенная блок-схема основных функциональных блоков модели МНСС представлена на рисунке 4.



Рис.4 – Обобщенная блок-схема основных функциональных блоков модели МНСС

Расчет количества экспериментов и количества прогонов одного эксперимента осуществляется на основе их стратегического и тактического планирования [4].

Задержка трафика в линии связи является весовым коэффициентом линии. При этом на задержку трафика в НС влияет технологические особенности передачи трафика (обработка трафика с учетом технологии *Carrier Ethernet*), а также влияние эквивалентной компьютерной атаки [2, 3].

Расчет кратчайших маршрутов осуществляется на основе алгоритма Дейкстры.

На этапе расчета выходных характеристик МНСС находятся: среднее время задержки пакетов агрегированного трафика, производительность системы спутниковой связи.

На этапе генерации отчетов приложение GPSS Studio осуществляет отображение стандартного отчета GPSS World, а также различных графиков, показывающих влияние заданных параметров элементов МНСС на интересующие выходные характеристики [5].

### Анализ результатов моделирования

Разработанная модель функционирования МНСС позволяет оценить влияние параметров ее элементов на характеристики *QoS*. На рисунках 5 и 6 представлены примеры результатов расчетов, полученных с помощью данной модели.

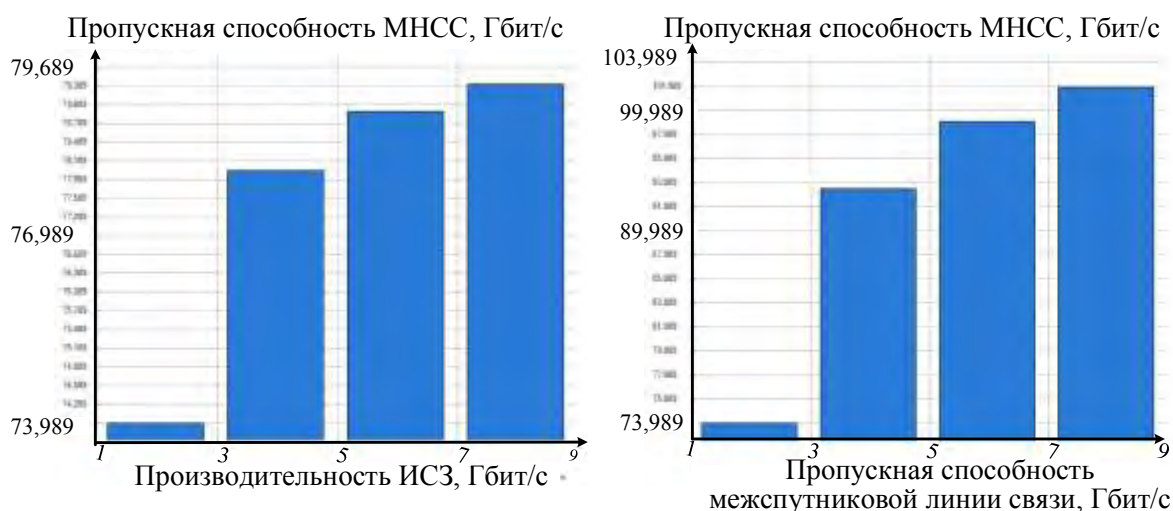


Рис.5 – Графики зависимости пропускной способности МНСС от производительности ИСЗ и пропускной способности межспутниковых линий связи

Анализ графиков (рисунки 5 и 6) позволяет сделать следующие выводы:

1. Пропускная способность сети МНСС увеличивается не пропорционально увеличению, как производительности ИСЗ, так и пропускной способности линий связи, причем изменение пропускной способности линий связи сильнее влияет на пропускную способность МНСС, чем изменение производительности ИСЗ.

2. Увеличение ширины диаграммы направленности ИСЗ увеличивает среднее время задержки пакетов трафика на единицы мс, что не существенно влияет на *QoS*.

3. Увеличение высоты ИСЗ незначительно увеличивает среднее время задержки пакетов трафика (единицы мс) и не существенно влияет на *QoS*.

4. Значительный рост задержки пакетов трафика наблюдается при уменьшении пропускной способности линии связи до 1 Гбит/с и ниже. Задержка может составить от 10 мс и выше, что существенно влияет на ухудшение *QoS*.



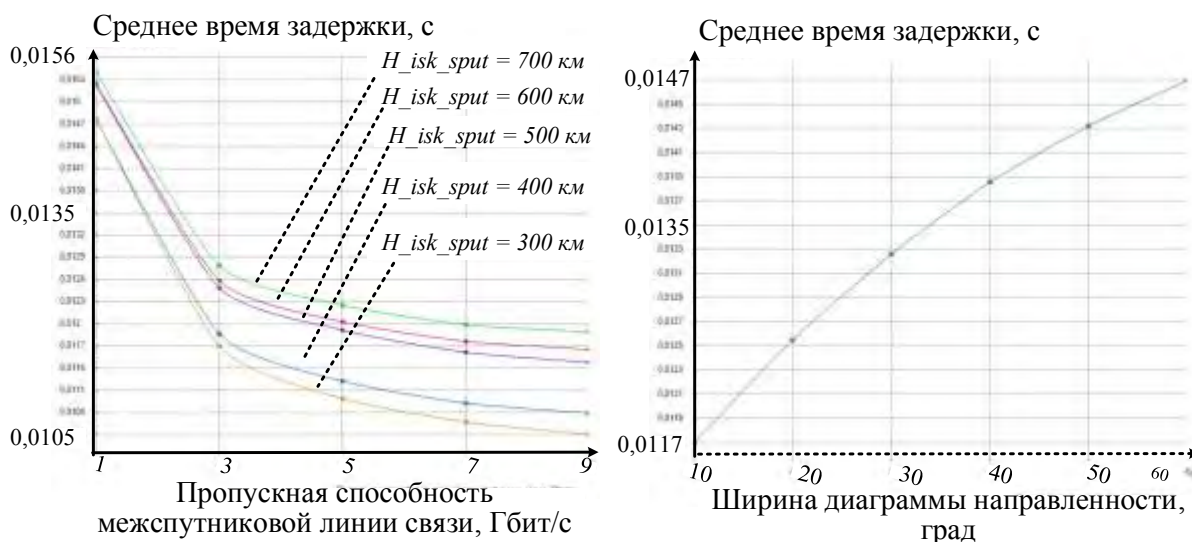


Рис.6 – Графики зависимости среднего времени задержки трафика от пропускной способности межспутниковых линий связи и ширины диаграммы направленности ИСЗ

### Выводы

Имитационное моделирование дает возможность реализации комплексной модели функционирования МНСС, а именно, позволяет учесть большое количество факторов ее функционирования. Разработанная модель МНСС помогает при планировании реальной системы обосновать выбор значений параметров ее элементов с позиции обеспечения заданных требования  $QoS$ .

### Литература

1. **Ануфренко А.В., Канаев А.К.** Предложения по обоснованию требований к характеристикам оборудования узлов пакетной транспортной сети связи. Журнал «Телекоммуникации и транспорт», том 12, выпуск 2. – М.: ООО «Издательский дом Медиа Паблишер», 2018 г. – С. 47-54.
2. **Ануфренко А.В., Канаев А.К., Логин Э.В.** Модель воздействия злоумышленника на фрагмент транспортной сети связи на основе технологии *Carrier Ethernet*. Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. – С.17-25.
3. **Коцыняк М.А., Осадчий А.И., Коцыняк М.М., Лаута О.С., Дементьев В.Е., Васюков Д.Ю.** Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства. – СПб: ЛО ЦНИИС, 2014. – 126 с.
4. **Боев В.Д., Сыпченко Р.П.** Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики. – СПб.: ВАС, 2009. – 436 с.
5. **Девятков В.В.** Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO [Текст]: учеб. пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов; под общ. ред. В. В. Девяткова. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 283 с.