

Моделирование процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите. II

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 01.04.2025 г. Принята 01.07.2025 г.

Аннотация—Для имитационной и численной моделей процессов обслуживания абонентов в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите проведено численное исследование зависимостей показателей качества от входных параметров моделей. Предложены приближенные оценки показателей качества. Проанализирована точность оценок, полученных с использованием аналитических моделей и приближенных оценок, в сравнении с оценками на основе имитационной модели. Определены области эффективного использования приближенных оценок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Космические аппараты на низкой круговой орбите, каналный ресурс, мультисервисный трафик, трафик реального времени, эластичный трафик, абонентские терминалы.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_2_151

1. ВВЕДЕНИЕ

В сети на базе космических аппаратов (КА) на низкой круговой орбите количество доступных абонентам КА для обмена данными с региональными станциями изменяется во времени, что является важным фактором, осложняющим оценку показателей качества обслуживания мультисервисного трафика, передаваемого в сети. Особенно важна оценка показателей качества для районов с высокой концентрацией абонентов. Это потребовало разработки имитационных и аналитических моделей процессов обслуживания абонентов в сети для таких районов, которая выполнена в [1]. К основным факторам, которые учтены при построении моделей относятся:

- разнородность обслуживаемого в сети трафика, включающего наряду с трафиком реального времени нескольких типов эластичный трафик данных, допускающий изменение скорости передачи в процессе обслуживания заявки;
- особенности построения орбитальной группировки КА;
- параметры антенн, определяющие размеры зон радиовидимости для КА и абонентов;
- ограниченность ресурса пропускной способности каждого КА;
- географические координаты района дислокации абонентов.

В [1] даны формальные определения основным показателям качества совместного обслуживания заявок, к которым относятся доля необслуженных заявок и среднее время доставки

файла. Построена имитационная модель дискретно-событийного класса, использующая расчетный поток пролетов КА над абонентами, который формируется с учетом параметров орбитальной группировки и географических координат района дислокации абонентов. Аналитическая модель разработана на основе многомерных ступенчатых марковских процессов, что стало возможным благодаря замене потока пролетов КА над абонентами на марковский процесс с эквивалентными параметрами в части вероятностей состояний и интенсивностей переходов между состояниями.

Модели могут использоваться не только для взаимной проверки путем получения примерно одинаковых оценок показателей качества на одних и тех же исходных данных, но и для расширения области входных параметров. В частности, аналитическую модель удобно использовать при относительно небольшом количестве состояний сети (до миллиона). Имитационное моделирование бывает необходимым, когда количество состояний сети велико (превышает миллион), и расчеты на основе аналитической модели невозможны из-за ограниченности памяти компьютера. Однако, оценка показателей качества с помощью имитационной модели, как правило, сопряжена с большими временными затратами, что обуславливает актуальность задачи разработки приближенных оценок, которые могут быть выполнены оперативно. Определение области исходных данных, на которой приближенные оценки обеспечивают приемлемую точность, может быть осуществлено сравнением этих оценок с результатами имитационного и аналитического моделирования. С учетом перечисленных обстоятельств целями настоящей статьи являются численное исследование свойств имитационной и аналитической моделей, а также получение приближенных оценок показателей качества и определение области их возможного применения.

Для достижения поставленных целей в разделе 2 дается описание сети и приводятся исходные данные для расчетов. В разделе 3 осуществляется анализ имитационной модели, а в разделе 4 аналитической модели. Раздел 5 посвящен приближенной оценке показателей качества обслуживания трафика в сети.

2. ОПИСАНИЕ СЕТИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Как и в [1], полагается, что орбитальное построение сети предусматривает использование некоторого количества равномерно разнесенных колец (орбитальных плоскостей) с одинаковым наклоном и одним и тем же числом КА в каждом кольце, которые распределены по кольцу через равные промежутки. Ресурс одного КА примем равным $\nu_{\text{ка}}$ единицам канальной скорости. Соответственно, ресурс, который может использоваться для предоставления сервисов абонентам, равен $\nu_{\text{ка}}n(t)$, где $n(t)$ - количество доступных КА в момент времени t . Полагаем также, что абоненты компактно размещены в окрестности точки с заданными координатами, и всем им доступны для получения сервисов одни и те же КА.

Потоки заявок на передачу трафика каждого типа являются пуассоновскими и имеют интенсивности λ_k ($k = 1, 2, \dots, K$) и λ_e . Обслуживание одной заявки на передачу трафика реального времени требует выделения b_k единиц ресурса на случайное время, имеющее экспоненциальное распределение с параметром μ_k . Пусть $i_k(t)$ - число обслуживаемых заявок на предоставление сервиса k в момент времени t . Для эластичного трафика данных на обслуживание каждой заявки выделяется равный максимально возможный ресурс в диапазоне от b_{\min} до b_{\max} . Время обслуживания одной заявки с минимальной скоростью (т.е. при выделении ресурса b_{\min}) является экспоненциально распределенным с параметром μ_e . Обозначим через $d(t)$ число обслуживаемых заявок на передачу данных в момент времени t . Динамика изменения состояния сети описывается случайным процессом $r(t) = (i_1(t), \dots, i_K(t), d(t), n(t))$, определенном на конечном пространстве состояний S , куда входят состояния $s = (i_1, \dots, i_K, d, n)$.

Оценке при моделировании подлежат показатели качества:

- доли необслуженных заявок на передачу трафика реального времени $\pi_k, k = 1, \dots, K$, и эластичного трафика данных π_e ;
- среднее время доставки файла W .

В качестве примера рассмотрим сеть на базе низколетящих КА, в которой обслуживаются два типа трафика реального времени, низкоскоростной (НС) и высокоскоростной (ВС), а также эластичный трафик передачи данных (ПД). Характеристики трафика, поступающего из района компактного размещения абонентов, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики трафика в сети

Параметр	Значение
Ресурс на обслуживание НС заявки, b_1	1
Ресурс на обслуживание ВС заявки, b_2	4
Максимальный ресурс на обслуживание ПД заявки, b_{max}	8
Минимальный ресурс на обслуживание ПД заявки, b_{min}	2
Интенсивность обслуживания НС заявок, μ_1	0,3 мин ⁻¹
Интенсивность обслуживания ВС заявок, μ_2	0,15 мин ⁻¹
Интенсивность обслуживания заявок на ПД при передаче на минимальной скорости, μ_e	0,3 мин ⁻¹
Интенсивность поступления НС заявок, λ_1	0,3 мин ⁻¹
Интенсивность поступления ВС заявок, λ_2	0,15 мин ⁻¹
Интенсивность поступления заявок на ПД, λ_e	0,3 мин ⁻¹

При этом ресурс одного КА $\nu_{ка}$ изменяется в диапазоне от 4 до 10. Правило выбора прерываемых сеансов в случае уменьшения количества доступных КА и возникновения ситуации недостаточности ресурса для продолжения обслуживания активных абонентов определим следующим образом:

- типы трафика различаются по приоритетности: наиболее высокий приоритет имеет НС трафик реального времени, за ним следует эластичный трафик ПД, и ВС трафик реального времени имеет самый низкий приоритет;
- прерывание обслуживания заявок осуществляется с использованием пошаговой процедуры с проверкой на каждом шаге условия достаточности ресурса. Сначала последовательно прерываются сеансы передачи трафика низшего приоритета (ВС трафика), затем трафика, следующего по приоритетности (эластичного трафика), и, наконец, трафика высшего приоритета (НС трафика).

Примем для расчетов, что орбитальная группировка сети содержит двенадцать колец по двадцать два КА в каждом кольце. Следует иметь в виду, что среднее количество доступных абоненту КА $n_{ср}$ зависит от наклона орбиты и широты дислокации абонента $\phi_{ша}$ (рисунок 1). Видно, что при увеличении наклона максимум зависимости $n_{ср}$ от $\phi_{ша}$ смещается в сторону северных широт. Поэтому для РФ, где большое количество потребителей именно в северных широтах хороши большие углы наклона орбит. Примем для расчетов, что наклонение равно 89°. Далее, при заданном наклонении величина $n_{ср}$ весьма чувствительно к $\phi_{ша}$. Поэтому работу модели проверим на двух широтах $\phi_{ша}=20^\circ$ с. ш. и $\phi_{ша}=60^\circ$ с. ш., где значение $n_{ср}$ различается примерно в два раза.

3. АНАЛИЗ РАБОТЫ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Имитационная модель использует расчетный поток пролетов КА над абонентами, который формируется на основании процедур, описанных в [1]. На рисунке 2 представлены зависимости

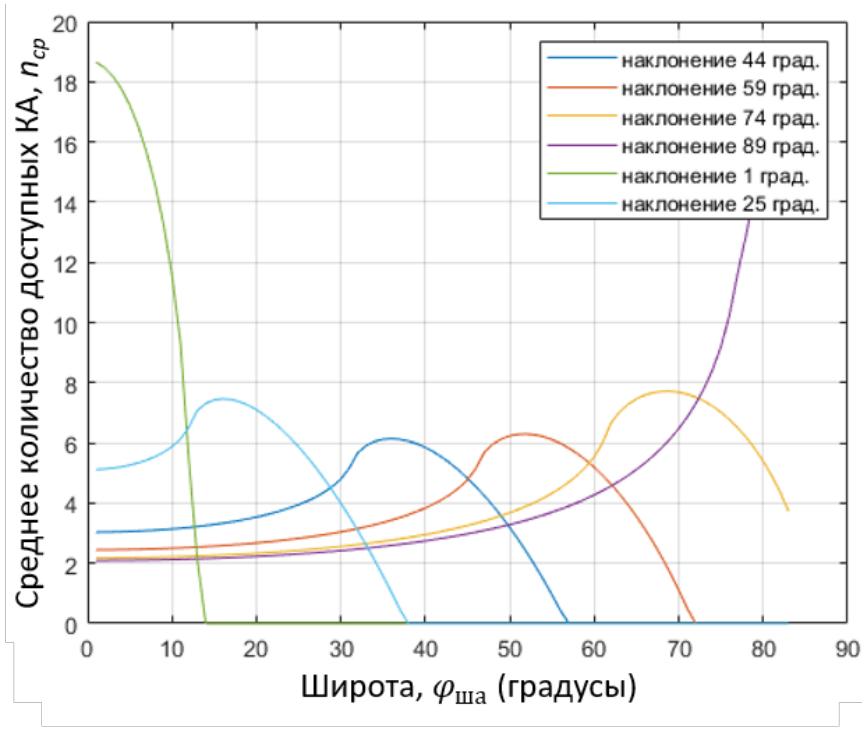


Рис. 1. Зависимость среднего числа доступных КА n_{cp} от широты размещения абонентов $\phi_{ша}$ для различных наклонений орбит КА

количества доступных КА от времени $n(t)$ в течение суток для случаев $\phi_{ша}=20^\circ$ с. ш. и $\phi_{ша}=60^\circ$ с. ш. Видно, что зависимости $n(t)$ содержат некую регулярную составляющую.

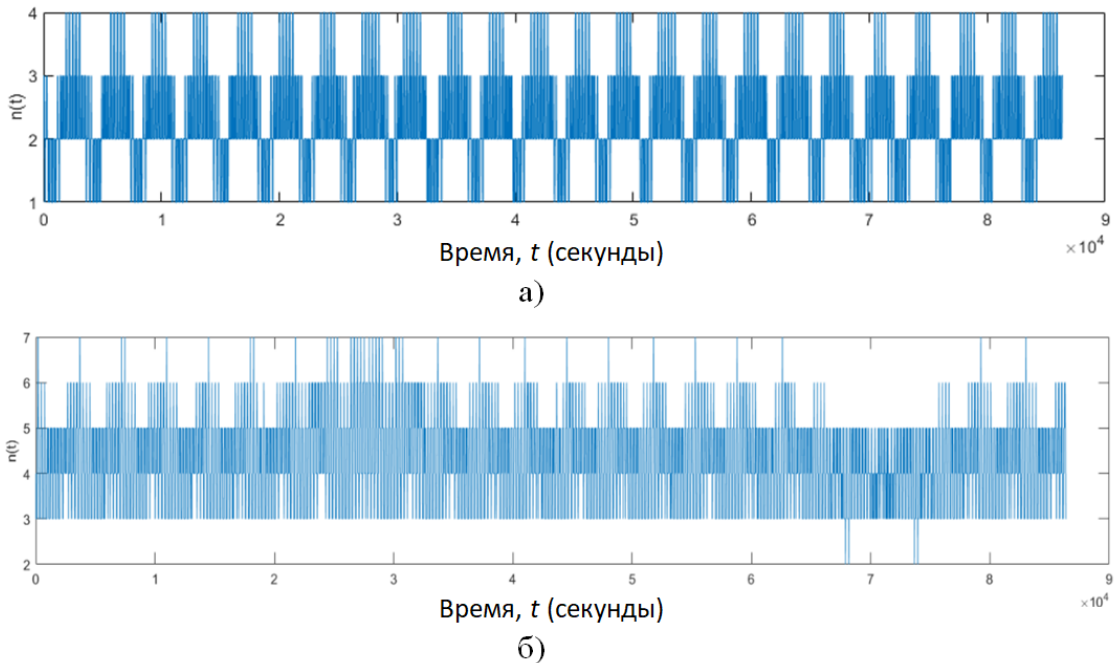


Рис. 2. Зависимость количества доступных КА от времени ; в течение суток: (а) - для $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш.; (б) - для $\phi_{ша}=60^\circ$ с.ш.

На рисунке 3 для примера представлены гистограммы распределения времени доступности t_d определенного числа КА ((а) – двух КА, (б) – трех КА) на суточном интервале для $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш.

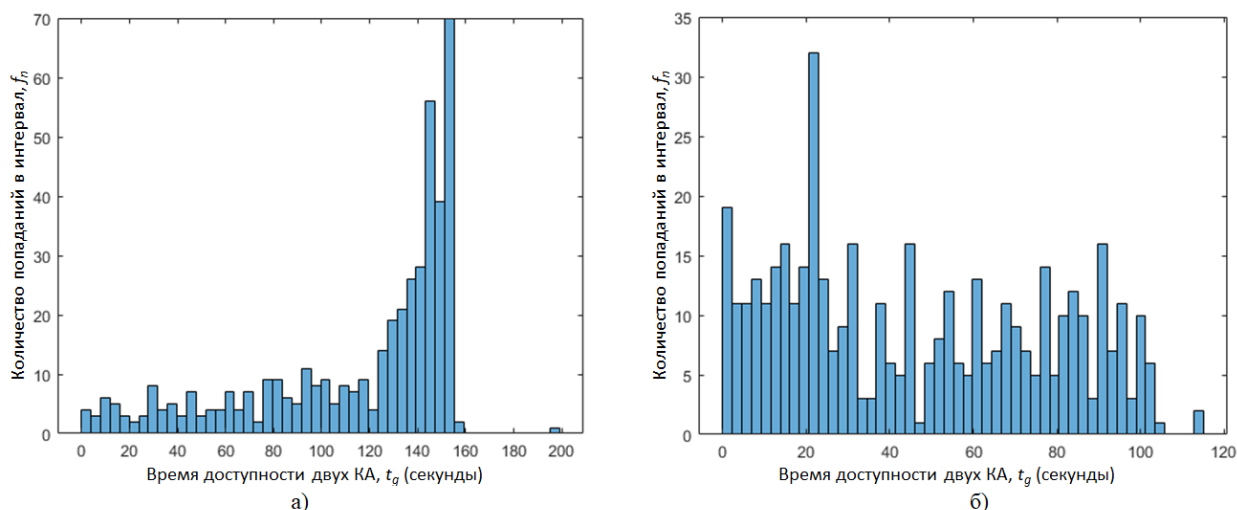


Рис. 3. Гистограммы распределения времени доступности на суточном интервале для $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш.: (а) - двух КА; (б) - трех КА

Здесь диапазон изменения t_d разделен на равные интервалы (4 с для рисунка 3а и примерно 2,5 с для рисунка 3б). Полученные реализации t_d в зависимости от их величины попадают в тот или иной интервал. Количества попаданий f_n отображаются на рисунке 3 по оси ординат. Формы гистограмм позволяют сделать вывод, что распределения времен доступности существенно отличны от экспоненциального.

Корректный учет отмеченных особенностей $n(t)$ представляет трудности при аналитическом моделировании, но возможен в рамках имитационного моделирования.

Проведем анализ сходимости результатов моделирования и построим доверительные интервалы оценок показателей качества с помощью подхода, изложенного в [2] и основанного на использовании таблиц распределения Стьюдента. В соответствии с рекомендациями [2] примем, что количество интервалов набора статистики составляет 26, причем первый интервал не учитывается, чтобы исключить влияние на результаты оценок переходных процессов в сети. Объем выборки на одном интервале примем равным 100000 (заявок данных), т. е. общий объем выборки составляет два с половиной миллиона. Результаты оценивания показателей качества и построения доверительных интервалов для случая $\phi_{ша}=60^\circ$ с. ш. иллюстрируются рисунками 4 и 5, а также таблицей 2.

Видно, что относительная погрешность оценивания (отношение половины доверительного интервала к среднему значению) при долях необслуженных заявок более 0,001 не превышает 3-5%, а при оценке среднего времени доставки файлов – 0,2%. Таким образом, точность оценивания показателей является приемлемой. Соответствующие зависимости доли необслуженных заявок и среднего времени доставки файлов от ресурса КА $\nu_{ка}$ при $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш. иллюстрируются рисунками 6 и 7 (в легенде на рисунке 6 и следующих рисунках НТ означает НС трафик,

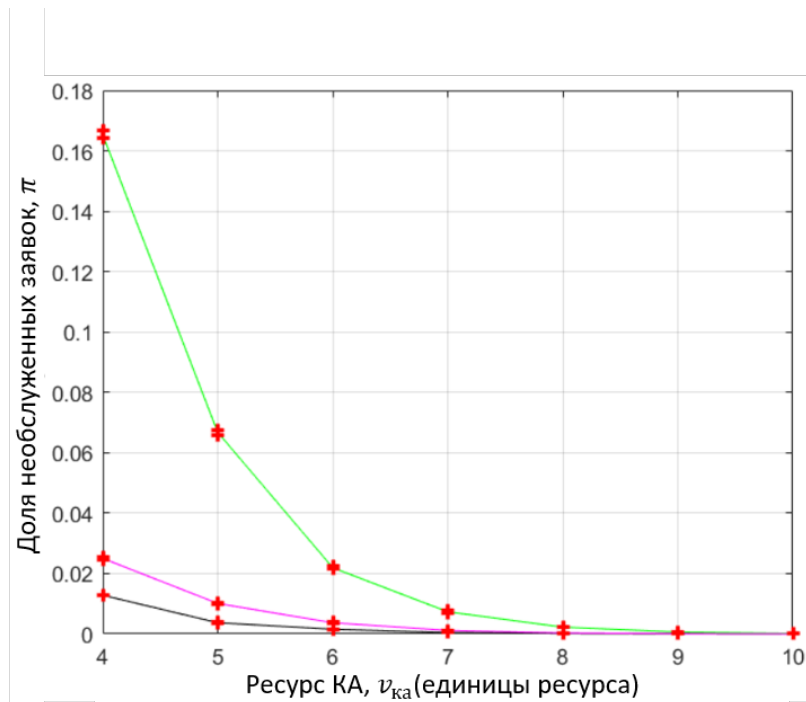


Рис. 4. Зависимости от ресурса одного КА ($\nu_{ка}$) доли необслуженных заявок для разных типов трафика (НС – черная линия (π_1), ВС – зеленая линия (π_2), данные – сиреневая линия (π_e)) с указанием доверительных интервалов (красный цвет) при доверительной вероятности 0,95 при $\phi_{ша}=60^\circ$ с. ш.

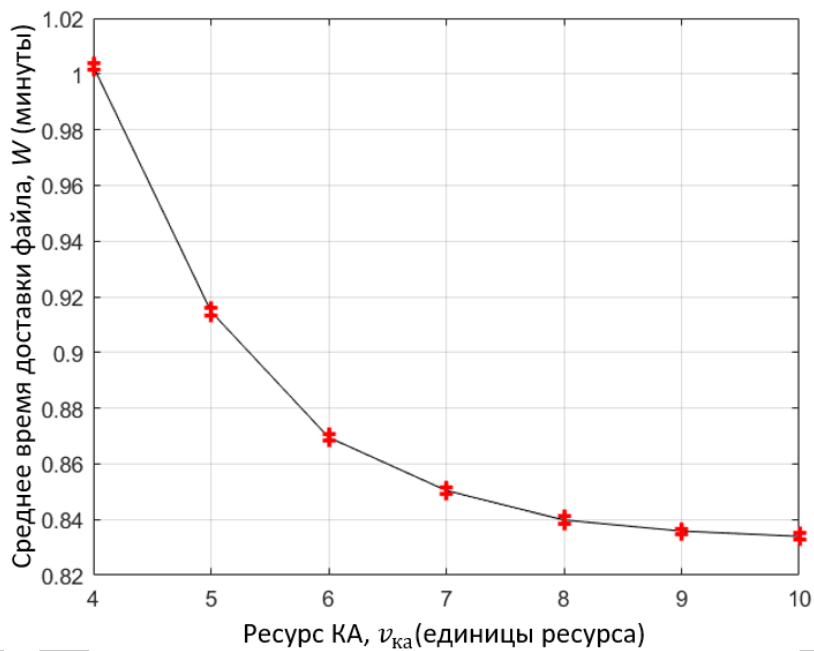


Рис. 5. Зависимости от ресурса одного КА ($\nu_{ка}$) среднего времени доставки файла с указанием доверительных интервалов (красный цвет) при доверительной вероятности 0,95 при $\phi_{ша}=60^\circ$ с. ш.

Таблица 2. Результаты оценивания показателей качества и построения доверительных интервалов для случая нахождения абонентов при $\phi_{ша}=60^\circ$ с.ш.

Ресурс, $\phi_{ка}$	4	5	6	7	8	9	10
Доля необслуженных заявок на передачу низкоскоростного трафика реального времени (π_1)							
Среднее	0,012838	0,003719	0,001554	0,000464	0,00015	3,52E-05	9,99E-06
Ниж.гр.	0,012675	0,003632	0,001507	0,000433	0,000132	2,58E-05	5,87E-06
Верх.гр.	0,013002	0,003807	0,001601	0,000495	0,000168	4,46E-05	1,41E-05
Доля необслуженных заявок на передачу высокоскоростного трафика реального времени (π_2)							
Среднее	0,165349	0,066773	0,021935	0,007342	0,002253	0,000658	0,000175
Ниж.гр.	0,16407	0,065966	0,021491	0,007063	0,00212	0,000576	0,000133
Верх.гр.	0,166629	0,067581	0,022378	0,007622	0,002386	0,000741	0,000217
Доля необслуженных заявок на передачу эластичного трафика данных (π_e)							
Среднее	0,025044	0,010104	0,003705	0,001168	0,000324	8,32E-05	2,04E-05
Ниж.гр.	0,024769	0,009966	0,003611	0,001111	0,000294	7,00E-05	1,45E-05
Верх.гр.	0,025318	0,010243	0,003799	0,001225	0,000354	9,64E-05	2,63E-05
Среднее время доставки файла (минут)							
Среднее	1,002706	0,914734	0,86952	0,850413	0,839817	0,835846	0,833966
Ниж.гр.	1,001568	0,913338	0,868435	0,849277	0,838586	0,834877	0,832957
Верх.гр.	1,003845	0,916129	0,870605	0,85155	0,841047	0,836815	0,834976

ВТ – ВС трафик и ЭТ – трафик ПД). Причем на рисунке 7 среднее время доставки файла дано в сравнении со случаем $\phi_{ша}=60^\circ$ с.ш.

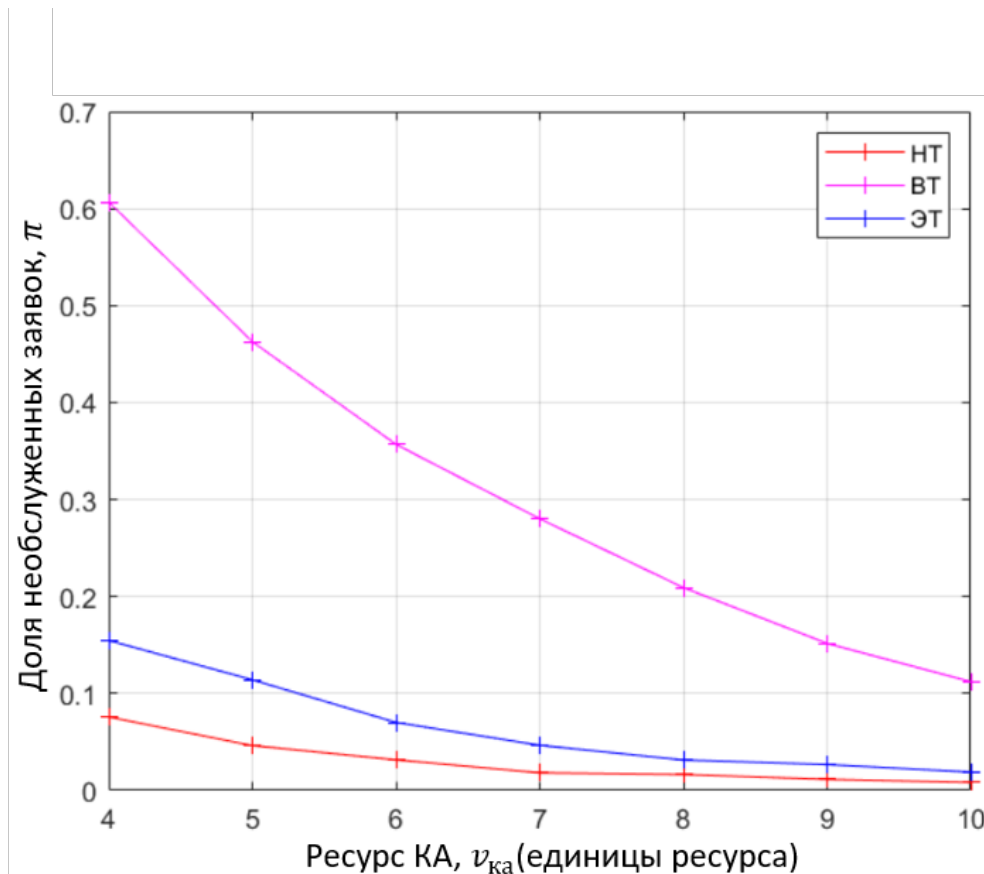


Рис. 6. Зависимости доли необслуженных заявок от ресурса КА $\nu_{ка}$ при $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш.

Видно, что показатели качества обслуживания трафика при $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш. хуже, чем при $\phi_{ша}=60^\circ$ с.ш. Это объясняется меньшим числом доступных КА (от 1 до 4 КА при $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш. и от 2 до 7 КА при $\phi_{ша}=60^\circ$ с.ш.). Здесь, в частности, заметны особенности действия правила выбора прерываемых сеансов в случае уменьшения количества доступных КА. Например, при $\nu_{ка}=8$ величина π_e составляет около 0,031, а π_2 около 0,21, т. е. отличие почти в 7 раз. Все дело в структуре потерь. Для высокоскоростного трафика потери включают вероятность отказа в доступе 0,08 и вероятность прерывания обслуживания 0,13, а для эластичного трафика данных 0,031 и 0,0004 соответственно. Таким образом, обслуживание заявок высокоскоростного трафика прерывается существенно (более чем на два порядка) чаще чем обслуживание заявок на передачу данных.

4. АНАЛИЗ РАБОТЫ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В соответствии с [1] аналитическая модель строится в предположении о допустимости замены расчетного потока пролетов марковским процессом. Определим параметры этих процессов для случаев $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш. и $\phi_{ша}=60^\circ$ с.ш. по процедуре, описанной в [1].

Для случая $\phi_{ша}=20^\circ$ с.ш. зависимость $n(t)$ представлена на рисунке 2.а. Количество доступных КА изменяется в диапазоне от 1 до 4. Характеристики интервалов доступности различного количества КА иллюстрируются таблицей 3.

Матрица количества переходов между состояниями видимости заданного числа КА представлена в таблице 4.

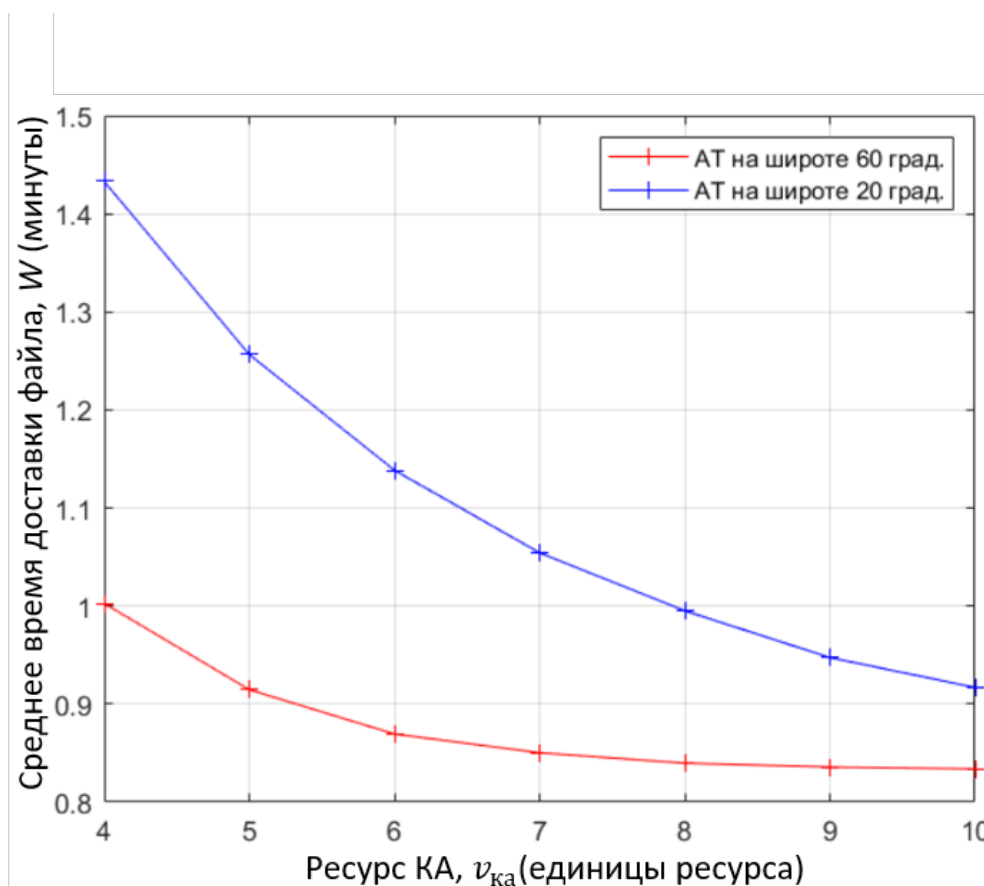


Рис. 7. Зависимости среднего времени доставки файлов от ресурса КА ($\nu_{ка}$) при $\phi_{ша} = 20^\circ$ с. ш. и $\phi_{ша} = 60^\circ$ с.ш.

Таблица 3. Характеристики интервалов доступности различного количества КА для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

Количество доступных КА	1	2	3	4
Время нахождения в состоянии (с)	9506	51887	20741	4265
Количество интервалов	128	450	446	124
Средняя продолжительность состояния (с)	74,27	115,30	46,40	34,40
Оценка вероятности пребывания в состоянии	0,1100	0,6006	0,2401	0,0494

Таблица 4. Матрица количества переходов между состояниями доступности заданного числа КА Q для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

Q	1	2	3	4
1	9378	128	0	0
2	128	51437	322	0
3	0	322	20295	124
4	0	0	124	4141

Матрица интенсивностей переходов между состояниями «эквивалентного» марковского процесса, сформированная с учетом данных таблицы 4 по соотношениям из [1], представлена в таблице 5.

Таблица 5. Матрица интенсивностей переходов между состояниями (событий в секунду) $\Lambda^{ка}$ для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

$\Lambda^{ка}$	1	2	3	4
1	-0,0135	0,0135	0	0
2	0,0025	-0,0087	0,0062	0
3	0	0,0156	-0,0216	0,0060
4	0	0	0,0291	-0,0291

Косвенной проверкой допустимости замены $n(t)$ на подобный «эквивалентный» марковский процесс является решение системы уравнений равновесия для матрицы из таблицы 5 и сравнение оценок вероятностей состояний с последней строкой таблицы 3. Решая систему с учетом условия нормировки, получаем вероятности состояний, представленные в таблице 6.

Таблица 6. Вероятности состояний, полученные в результате решения системы уравнений равновесия для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

Количество доступных КА	1	2	3	4
Оценка вероятности пребывания в состоянии в результате решения системы уравнений	0,1101	0,6009	0,2397	0,0494
Оценка вероятности пребывания в состоянии из таблицы 3	0,1100	0,6006	0,2401	0,0494

Видно, что оценки, полученные обоими способами, отличаются менее чем на 1%. Таким образом, марковский процесс, аппроксимирующий реальный процесс изменения количества доступных КА, имеет практически такие же характеристики в части доли времени пребывания в отдельных состояниях. Аналогичным образом строится матрица интенсивностей переходов между состояниями «эквивалентного» марковского процесса для случая $\phi_{ша} = 60^\circ$ с.ш. (таблица 7).

Таблица 7. Матрица интенсивностей переходов между состояниями (событий в секунду) процесса для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

$\Lambda^{ка}$	2	3	4	5	6	7
2	-0,14286	0,14286	0	0	0	0
3	0,00017	-0,01379	0,01362	0	0	0
4	0	0,01472	-0,03671	0,02199	0	0
5	0	0	0,01520	-0,02221	0,00701	0
6	0	0	0	0,03177	-0,03700	0,00522
7	0	0	0	0	0,09867	-0,09867

Сформированные матрицы переходов между состояниями (таблицы 5 и 7), а также исходные данные, приведенные в разделе 2, позволяют составить и численно решить систему уравнений равновесия для сети. Также как и имитационная модель, аналитическая модель обеспечивает определение не только доли необслуженных заявок каждого типа, но и ее составляющих, связанных с отказом в обслуживании из-за недостаточности свободного ресурса в момент поступления заявок, и с прерыванием обслуживания при уменьшении количества

доступных КА. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш. представлены в таблице 8 и на рисунках 8 и 9.

Таблица 8. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

Тип модели	Ресурс КА, $\nu_{ка}$						
	4	5	6	7	8	9	10
Вероятности отказа в обслуживании для НС трафика, π_1^{ref}							
Числ.	0,07601	0,04661	0,03140	0,01774	0,01611	0,01116	0,00814
Имит.	0,07510	0,04623	0,03161	0,01828	0,01650	0,01152	0,00841
Вероятности отказа в обслуживании для ВС трафика, π_2^{ref}							
Числ.	0,31253	0,20640	0,14802	0,10581	0,07570	0,05282	0,03935
Имит.	0,31540	0,20995	0,15186	0,11066	0,07948	0,05484	0,04110
Вероятности отказа в обслуживании для трафика ПД, π_e^{ref}							
Числ.	0,13443	0,10370	0,06540	0,04366	0,02979	0,02548	0,01818
Имит.	0,13376	0,10419	0,06624	0,04529	0,03104	0,02665	0,01900
Вероятности прерывания обслуживания для НС трафика, π_1^{int}							
Числ.	0,000677	0,000132	1,85E-05	2,43E-06	2,61E-07	2,82E-08	2,55E-09
Имит.	0,000704	0,000146	2,04E-05	2,00E-06	0	0	0
Вероятности прерывания обслуживания для ВС трафика, π_2^{int}							
Числ.	0,26842	0,23715	0,19438	0,16546	0,12682	0,09535	0,07038
Имит.	0,29124	0,25279	0,20497	0,16952	0,12971	0,09687	0,07113
Вероятности прерывания обслуживания для трафика ПД, π_e^{int}							
Числ.	0,01850	0,00903	0,00359	0,00124	0,00039	0,00013	0,00004
Имит.	0,02098	0,00994	0,00399	0,00139	0,00043	0,00015	0,00004

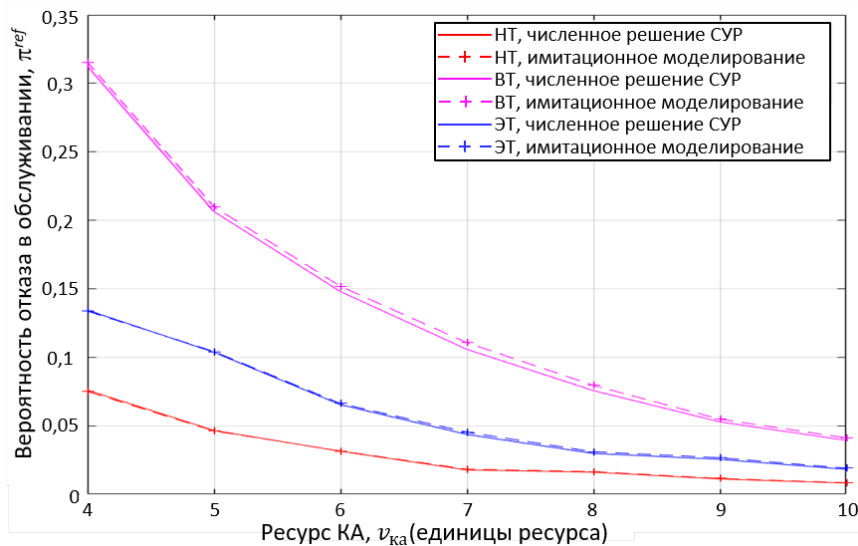


Рис. 8. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования при определении вероятности отказа в обслуживании при поступлении заявок π_k^{ref}, π_e^{ref} для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

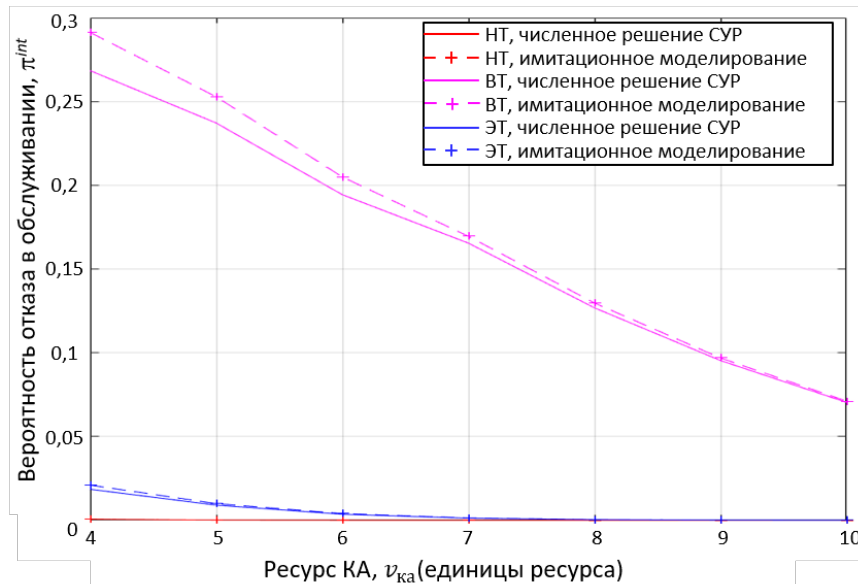


Рис. 9. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования при определении вероятности прерывания обслуживания при наступлении событий уменьшения количества КА π_k^{int}, π_e^{int} для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

Здесь для детализации анализа доли необслуженных заявок π_k, π_e определяются с учетом причин не обслуживания, включающих отказ в приеме на обслуживание при поступлении (π_k^{ref}, π_e^{ref}) и прерывание обслуживания (π_k^{int}, π_e^{int}). Видно, что результаты численного и имитационного моделирования достаточно близки друг к другу и различаются на единицы процентов при оценке π_k^{ref}, π_e^{ref} . Результаты оценки π_k^{int}, π_e^{int} также различаются менее чем на 10% в области, где значения вероятностей превосходят 10^{-3} , т.е. когда их следует учитывать при решении практических задач. При принятом правиле выбора прерываемых сеансов естественно наибольшая вероятность прерывания сеанса имеет место для ВС трафика, как самого неперспективного. При этом соответствующие вероятности для трафика ПД меньше более чем на порядок, а для НС трафика практически равны нулю.

Для случая $\phi_{ша} = 60^\circ$ с.ш. сравнительные результаты численного и имитационного моделирования при определении доли необслуженных заявок иллюстрируются рисунком 10. Здесь также видим наибольшую погрешность численных результатов для наименее перспективного высокоскоростного трафика реального времени (до 20%) и меньшую погрешность (единицы процентов) для других видов трафика.

Высокая степень соответствия численных оценок среднего времени доставки файла результатам имитационного моделирования (рисунок 11) имеет место как для широты 60° с.ш., так и для широты 20° с.ш. Отличие составляет менее 1%.

5. ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА В СЕТИ

Наряду с оценкой показателей качества с использованием аналитического и имитационного моделирования интерес представляют упрощенные приближенные оценки, позволяющие сократить объем вычислений. При построении таких оценок часто (например, в [3–6]) вычисляют вероятности состояний сети с использованием стационарных вероятностей состояний более простых сетей или совокупностей макросостояний. В нашем случае наиболее естественным для получения приближенных оценок является предположение, что на интервалах функ-

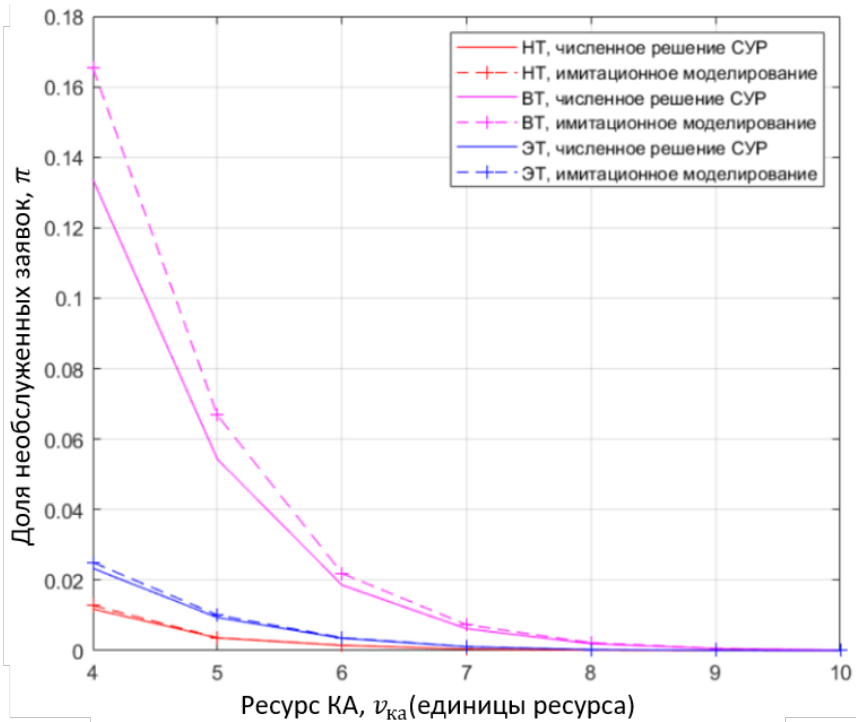


Рис. 10. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования при определении доли необслуженных заявок π_k, π_e в зависимости от ресурса одного КА ν_{ka} для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

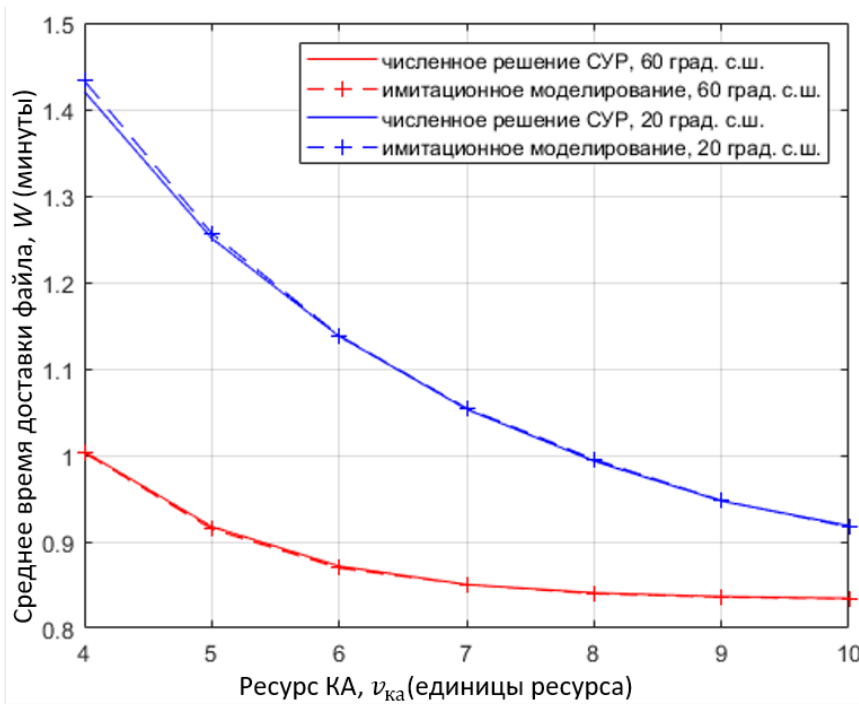


Рис. 11. Сравнение результатов численного и имитационного моделирования в части оценки среднего времени доставки файла W в зависимости от ресурса одного КА ν_{ka} для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш. $\phi_{ша} = 60^\circ$ с.ш.

ционирования сети, когда количество доступных абонентам КА n ($n = n_{min}, n_{min} + 1, \dots, n_{max}$) неизменно, вероятности состояний сети можно оценивать, как вероятности состояний сети, в которой абонентам всегда доступны n КА, т.е.

$$p(i_1, \dots, i_K, d, n) \approx p_n^{ka} p_n^*(i_1, \dots, i_K, d), \quad (1)$$

где $p(i_1, \dots, i_K, d, n)$ – вероятность нахождения исследуемой сети в состоянии $p(i_1, \dots, i_K, d, n)$; p_n^{ka} – доля времени, в течении которого абонентам доступно ровно n КА ($\sum_{n=n_{min}, \dots, n_{max}} p_n^{ka} = 1$); $p_n^*(i_1, \dots, i_K, d)$ – вероятность нахождения сети с ресурсом обслуживания $\nu_{ка} n$ в состоянии $p(i_1, \dots, i_K, d)$.

Это позволяет использовать для вычисления оценок $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K, \pi_e$ и W ранее разработанные мультисервисные модели эрланговского типа [2] и определять их в виде:

$$\begin{aligned} \pi_k &= \sum_{n=n_{min}, \dots, n_{max}} \pi_k^{(n)} p_n^{ka}, k = 1, 2, \dots, K, \\ \pi_e &= \sum_{n=n_{min}, \dots, n_{max}} \pi_e^{(n)} p_n^{ka}, \\ W &= \sum_{n=n_{min}, \dots, n_{max}} W^{(n)} p_n^{ka}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\pi_k^{(n)}$ – доля необслуженных заявок на передачу трафика реального времени k -го типа при постоянной видимости n КА и $\pi_e^{(n)}$ – соответствующая вероятность для заявок на передачу трафика данных;

$W^{(n)}$ – среднее время доставки файла при постоянной доступности n КА;

p_n^{ka} – доля времени, в течении которого абонентам доступны ровно n КА

($\sum_{n=n_{min}, \dots, n_{max}} p_n^{ka} = 1$).

При таком предположении, конечно, не учитываются потери заявок из-за прерывания обслуживания при снижении количества доступных КА, а, соответственно, и процедура выбора прерываемых сессий с учетом важности типов сервисов. Это может вносить дополнительную погрешность в оценки, т.к. согласно приведенным выше расчетам средняя продолжительность интервала времени доступности неизменного количества КА составляет от полминуты до двух минут, т.е. изменение количества КА будет иметь место для большинства сессий обслуживания абонентов. Сравнительные оценки показателей качества, полученные приближенным методом, а также путем имитационного и аналитического моделирования, для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш., приведены в таблице 9 и на рисунках 12 и 13.

Видно, что погрешность приближенной оценки доли необслуженных заявок для низкоскоростного трафика реального времени и трафика передачи данных невелика, особенно в актуальной зоне значений долей ($\pi \leq 0,02 - 0,03$), в конкретном случае при $\nu_{ка} \geq 8$, т. е. когда нагрузка в эрлангоканалах невелика по отношению к общему ресурсу. Однако, приближенная оценка доли необслуженных заявок для высокоскоростного трафика реального времени отличается от других оценок и существенно занижена. И это объясняется тем обстоятельством, что данный тип трафика имеет самый низкий приоритет, и при уменьшении количества доступных КА сохранение остальных сессий осуществляется за счет прерывания сессий этого типа.

Приближенная оценка среднего времени доставки файлов (рисунок 13) несколько завышена. Это можно объяснить увеличением вероятности прерывания сессии передачи файла с

Таблица 9. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования, а также приближенных оценок для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

Тип оценки	Ресурс КА, $\nu_{ка}$						
	4	5	6	7	8	9	10
Доля необслуженных заявок на передачу низкоскоростного трафика реального времени, π_1							
Числ.	0,0767	0,0467	0,0314	0,0177	0,0161	0,0112	0,0081
Имит.	0,0758	0,0464	0,0316	0,0183	0,0165	0,0115	0,0084
Прибл.	0,1168	0,0689	0,0464	0,0260	0,0203	0,0127	0,0094
Доля необслуженных заявок на передачу высокоскоростного трафика реального времени, π_2							
Числ.	0,5810	0,4435	0,3424	0,2713	0,2025	0,1482	0,1097
Имит.	0,6066	0,4627	0,3568	0,2802	0,2092	0,1517	0,1122
Прибл.	0,4022	0,2676	0,1858	0,1269	0,0865	0,0577	0,0410
Доля необслуженных заявок на ПД, π_e							
Числ.	0,1529	0,1127	0,0690	0,0449	0,0302	0,0256	0,0182
Имит.	0,1547	0,1141	0,0702	0,0467	0,0315	0,0268	0,0190
Прибл.	0,1926	0,1443	0,0877	0,0582	0,0368	0,0285	0,0192
Среднее время доставки файла, W (в минутах)							
Числ.	1,4207	1,2508	1,1375	1,0532	0,9932	0,9470	0,9184
Имит.	1,4330	1,2565	1,1385	1,0543	0,9952	0,9475	0,9170
Прибл.	1,6404	1,4266	1,2725	1,1500	1,0610	0,9955	0,9542

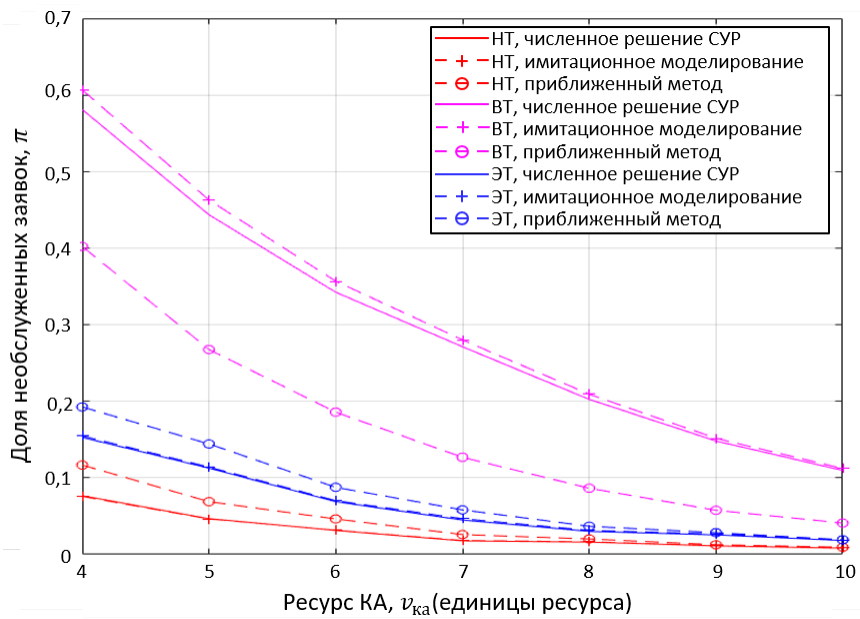


Рис. 12. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования, а также приближенных оценок доли необслуженных заявок для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

ростом объема файла, которое не учитывается в приближенном методе. Погрешность оценки составляет 5-15% и имеет тенденцию к снижению с увеличением ресурса одного КА.

Подобные соотношения между оценками характерны и для случая $\phi_{ша} = 60^\circ$ с. ш. (рисунки 14 и 15).

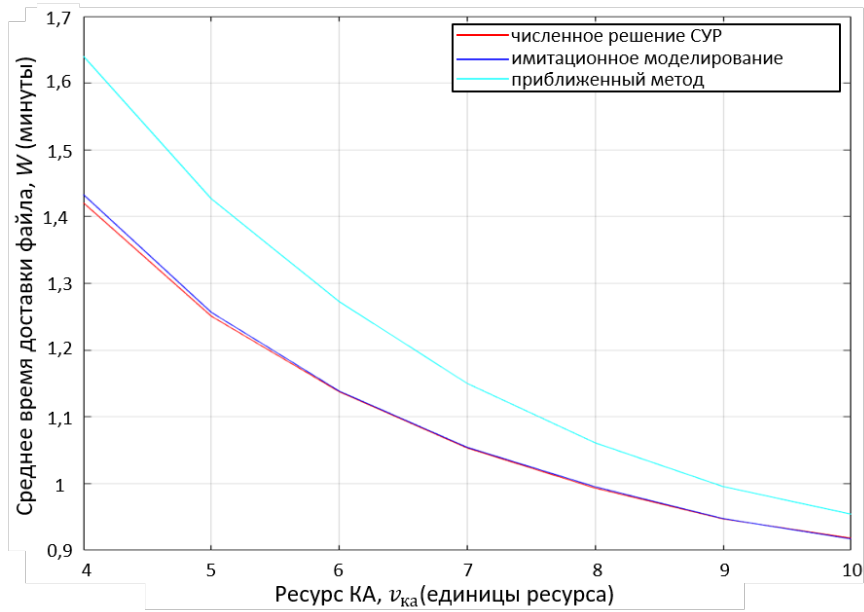


Рис. 13. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования, а также приближенных оценок среднего времени доставки файла для случая $\phi_{ша} = 20^\circ$ с.ш.

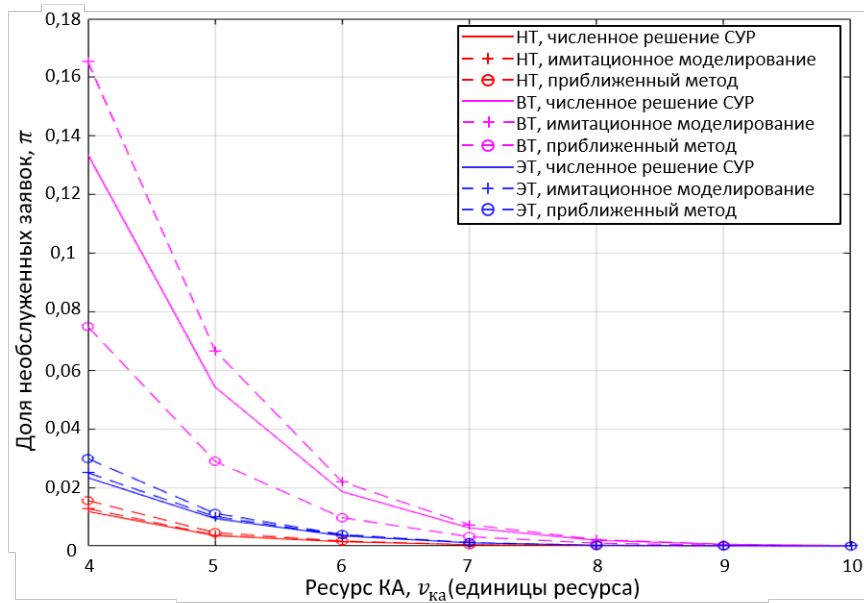


Рис. 14. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования, а также приближенных оценок доли необслуженных заявок для случая $\phi_{ша} = 60^\circ$ с.ш.

При малых значениях $\nu_{ка}$ (4-5 единиц ресурса), приближенная оценка доли необслуженных заявок на передачу ВС трафика дает большую погрешность ($>50\%$). Однако при этом и погрешность численной оценки довольно велика (около 20%). Тем не менее, в актуальной зоне значений долей необслуженных заявок ($\pi \leq 0,02 - 0,03$) приближенные оценки пригодны для использования. Погрешности оценки среднего времени доставки файлов при низких нагрузках, когда $\nu_{ка} \geq 8$, невелики и составляют менее 1%.

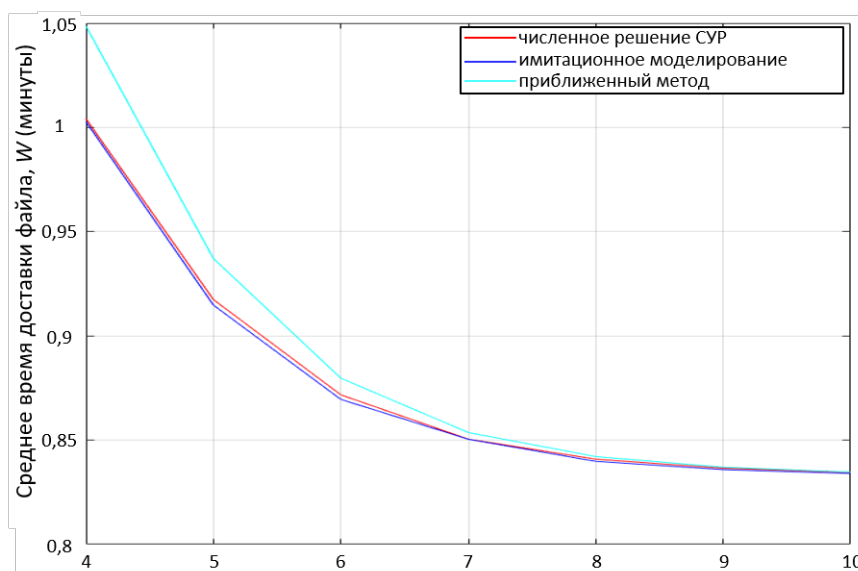


Рис. 15. Сравнительные результаты численного и имитационного моделирования, а также приближенных оценок среднего времени доставки файла для случая $\phi_{ша} = 60^\circ$ с.ш.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели обслуживания мультисервисного трафика в сети передачи данных на базе космических аппаратов на низкой круговой орбите для практически важного случая высокой концентрации абонентов в ограниченном районе пригодны для использования при разработке систем управления связью таких сетей. В частности, имитационная и аналитическая модели дают хорошо согласованные результаты оценки показателей качества, включающих доли необслуженных заявок на передачу отдельных видов трафика реального времени и эластичного трафика данных, а также среднее время доставки файла, что подтверждает допустимость замены потока пролетов КА над абонентами марковским процессом с аналогичными интенсивностями переходов между состояниями. Для предложенных приближенных оценок определены области их эффективного использования, где погрешность вычисления показателей качества не превышает единиц процентов. Их применение позволяет существенно сократить время вычисления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Степанов С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 868 с.
3. Степанов С.Н., Степанов М.С. Приближенный метод оценки характеристик совместного обслуживания трафика реального времени и эластичного трафика данных в мультисервисных узлах доступа // Автомат. и телемех., – 2023, – № 11, – С. 93-114.
4. Степанов С.Н. Модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и данных. II // АиТ, 2011. – № 5. – С. 139-147.
5. Себекин Г.В., Маслов А.А., Щурков А.О. Моделирование совместного обслуживания мультисервисного трафика реального времени и эластичного трафика данных в сетях на базе космических

аппаратов с высокой пропускной способностью // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2024. – Т. 22. – № 2. – С. 11-22.

6. 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.

Model for Reserving Channel Resource for the Joint Maintenance of Real-time Traffic and Elastic Data Traffic in a Network of Low-power Mobile Subscriber Terminals Based on High-Throughput Satellites in Geostationary or Highly Elliptical Orbits

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

Reserving a channel resource in networks of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites makes it possible to increase the efficiency of network planning and management functions by either equalizing losses of different types of applications or creating advantages for transmitting more important traffic. To assess the quality of service provision in networks with resource reservation, it is necessary to develop mathematical models that should take into account the main features of networks, including the joint maintenance of several types of real-time traffic and elastic data traffic, uneven placement of terminals in local zones, a limited number of them, the possibility of simultaneous servicing by each terminal of requests for two types of traffic, one of which is elastic data traffic, the other is real-time traffic, the limit on the speed of information transfer by the terminal. The purpose of the work is to solve the modeling problem taking into account the listed factors. The model is based on multidimensional stepwise Markov processes. A list of tasks that can be solved using them is defined, including both the tasks of determining the minimum required network resource to meet specified quality requirements, and the tasks of finding preferred resource distributions between local zones according to the criterion of minimizing the average time for servicing data transfer requests. Numerical examples of task solving are presented. The developed models can be used to build information transmission network management systems based on high-throughput satellites.

KEYWORDS: high-throughput satellites, channel resource, multiservice traffic, real-time traffic, elastic traffic, mobile subscriber terminals, resource reservation.