

УДК 621.396

## Модель функционирования подсистемы управления в широкополосной сети спутниковой связи с многопараметрическим распределением ресурса ретранслятора С-диапазона

**Model of the control subsystem functioning in a broadband satellite communication network with a multiparametric resource allocation of a C-band repeater**

**Парфенов / Parfenov M.**

Михаил Сергеевич

(mikhail.parfenov.88.88@bk.ru)

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала

Советского Союза С.М. Буденного» МО РФ,

адъюнкт научно-исследовательского центра.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** пользователи – users; обмен данными – data exchange; сеть спутниковой связи – satellite communication network; ретранслятор связи – communication repeater.

В представленной работе исследуются процессы обслуживания сообщений управляющей подсистемы в широкополосной сети спутниковой связи для объектов системы передачи данных, функционирование которой базируется на информационном обмене при разных сценариях интенсивности нагрузки сети. Предложены формулировка и решения оптимизационных задач управления распределением ресурса ретранслятора (РТР) по целевому функционалу, описывающему математическое ожидание совокупной ценности (значимости, полезности) сообщений, переданных в установленные сроки.

The presented work studies the processes of servicing messages of the control subsystem in a broadband satellite communication network for objects of the data transmission system, the functioning of which is based on information exchange under different scenarios of the network load intensity. Formulation and solutions of optimization problems of the management of the distribution of the resource of the repeater (RTR) by the target functional describing the mathematical expectation of the total value (significance, utility) of the messages transmitted in the established terms are offered.

### Введение

Актуальность разработки систем, включающих пользователей (группы пользователей), взаимодействующих между собой и с другими объектами, связана с потенциальной эффективностью применения таких групп для решения прикладных задач в разнообразных областях: технологических процессах,

медицине, образовании, системах безопасности и т. д. [1–8]. Работа множества пользователей основана на их взаимодействии друг с другом и с иными элементами системы, которое поддерживается каналами обмена данными. В условиях увеличения масштабов систем, усложнения их функций и роста объемов передаваемых данных предполагается задействование для множества абонентов каналов связи различных типов. Обладая известными преимуществами и уникальными характеристиками, в ряде сценариев спутниковые каналы связи, в частности широкополосная спутниковая сеть связи (ШССС), оказываются наиболее предпочтительными (а иногда и единственно возможными) для обеспечения функционирования системы обмена данными (СОД). Их применение, однако, требует решения ряда специфических задач, от которых зависит эффективность и целесообразность предлагаемых архитектурных решений. В этом контексте ключевое значение приобретают задачи построения подсистемы управления распределением ресурса ретранслятора (РТР), которым в научно-технической литературе уделяется значительное внимание: в [1–6, 9–15] описаны технические реализации доступа к информационным ресурсам, предоставляемым через РТР на ИСЗ, а в [1–6, 9–12] обоснованы перспективные направления развития систем и алгоритмов управления сетевым доступом. В отличие от указанных подходов, настоящее исследование сфокусировано на создании обобщенной модели для анализа вероятности своевременной доставки сообщений, позволяющей формулировать и решать задачи анализа и оптимизации управляющей подсистемы с точки зрения достижения максимальной эффективности СОД, оцениваемой через полезность осуществленного обмена сообщениями между пользователями. Вводимое понятие полезности обмена определяется как суммарный вес

своевременно переданных пакетов данных, назначаемый для каждого сообщения пунктом управления связью (ПУС) на основании сведений о его типе и направлении передачи.

На базе предложенной модели формулируются задачи анализа и оптимизации подсистемы управления распределением ресурса РТР и её компонентов: потока заявок (требований на обслуживание) и сервера обслуживания (исполнения этих требований).

### Структура ШССС. Функции ПУС

ШССС состоит из ретранслятора, размещённого на искусственном спутнике Земли, абонентских радиотерминалов (с возможностью различных вариантов применения) и централизованного сервера обработки данных. Структурная схема системы управления, представленная на рис. 1, демонстрирует принцип организации доступа: пунктирными линиями обозначены каналы служебного обмена, а сплошными – линии информационного взаимодействия между элементами системы. В рамках данного исследования процедура организационного доступа, направленная на верификацию и легитимизацию пользователей, не рассматривается. Предполагается, что перечень авторизованных абонентов задан априори и выступает в качестве исходных данных для задачи оптимизации управления распределением ресурса РТР.

Участники СОД получают статус легитимных пользователей на основании решений, принимаемых ПУС ШССС в ходе процедуры организационного доступа – процесса легитимизации абонентов, осуществляемого либо до начала функционирования системы, либо в её рабочем режиме.

ПУС, взаимодействуя с системой управления пользователями, реализует следующие ключевые функции:

- регистрация и отзыв статуса легитимности пользователей;
- актуализация приоритетных характеристик пользователей;
- корректировка приоритетов, присваиваемых различным типам сообщений;
- мониторинг текущего состояния ШССС и передача соответствующей информации в систему управления пользователями;
- предоставление РС данных о динамически обновляемых приоритетах;
- комплексная оценка состояния ШССС, включая работоспособность её элементов и параметры служебных и информационных потоков;
- вычисление так называемого критериального значения приоритета (КЗП) – порогового уровня важности запроса на использование ресурса, при котором достигается максимальная эффективность функционирования СОД;
- доведение установленного КЗП до конечных пользователей;
- при поступлении запроса, соответствующего или превышающего КЗП, – выделение ресурса связи (при его наличии);
- обратная связь с пользователем по итогам обработки его запроса.

Со стороны пользователей реализуются следующие действия:

- сообщение управляющему объекту о возможности (или невозможности) передачи конкретного типа сообщения через ШССС с учётом установленного КЗП;
- в случае положительного решения – использование выделенного ретранслятором ресурса для передачи сообщения.

Анализ перечисленных функций позволяет однозначно идентифицировать типы сообщений, цирку-

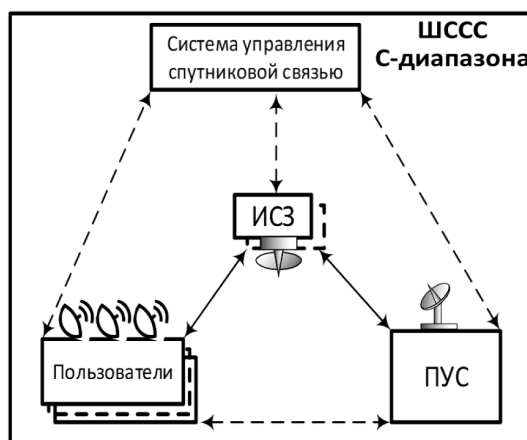


Рис. 1. Структурная схема системы управления ШССС

лирующих между участниками взаимодействия в рамках подсистемы управления распределением ресурса ШССС.

ПУС ШССС проектируется как интегрированный компонент системы управления пользователями и формализуется на этапе её разработки. Информация, поступающая от ПУС и необходимая для определения приоритетности передаваемых сообщений (пакетов данных), используется в качестве исходных параметров при решении задач анализа и оптимизации подсистемы управления распределением ресурса РТР.

Способ формирования весового показателя передаваемого сообщения (пакета) поясняется на примере. Пусть  $w_i, c_k$  – значения показателя приоритетности (важности) соответственно  $i$ -участника и пакета данных  $k$ -типа, тогда в качестве КЗП для передаваемого пакета  $k$ -типа в информационном  $(i,j)$ -направлении может выступать неравенство:  $w_i + w_j + c_k \geq w^*$ , где  $w^*$  – КЗП (оптимизированное значение).

В качестве исходных данных задачи оптимизации управления распределением ресурса РТР можно принять:

- $w(i, j, k)$  – весовой показатель пакета  $(i, j, k)$ -типа;
- $\lambda_{ijk}$  – интенсивность потока пакетов данных  $(i, j, k)$ -типа;
- $\rho, \mu$  – интенсивность обработки запросов (заявок на обслуживание) и передачи пакетов данных (информационного обмена);

–  $\tau_{(i,j,k)}$  – максимально допустимое время задержки пакета данных  $(i, j, k)$ -типа.

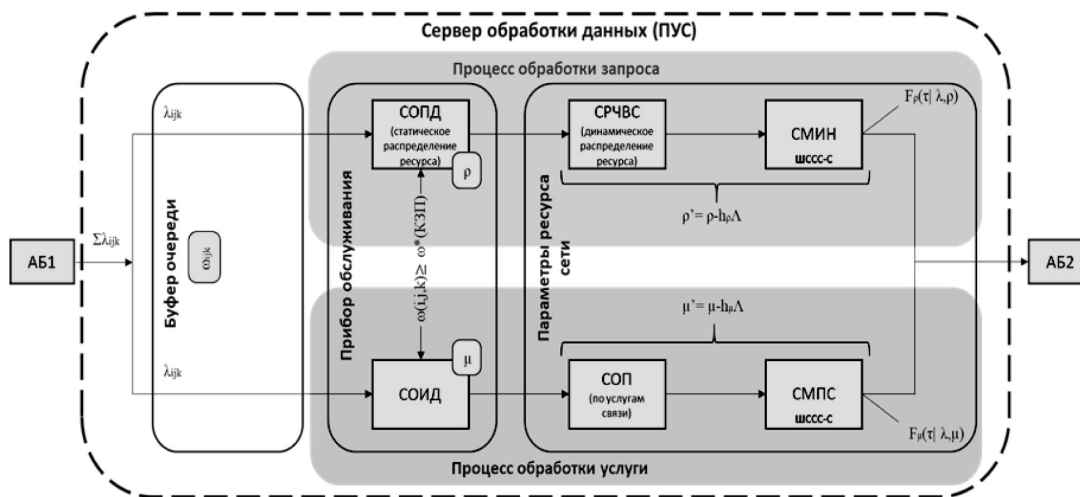
При известных значениях указанных величин для реализованного в ШССС способа обмена сообщениями можно определить:

- зависимость  $\Lambda_{ijk}(w^*)$ , характеризующую интенсивность потока заявок, ограниченного условием  $w(i, j, k) \geq w^*$ ;
- функции распределения вероятностей (ФРВ) времени обработки запроса и передачи пакета данных по каналу, соответственно обозначаемые выражениями:  $F_p(\tau | \lambda, \rho), F_\mu(\tau | \lambda, \mu)$ .

В рамках постановки задачи оптимизации подсистемы управления распределением ресурса РТР целевая функция формулируется как математическое ожидание суммарного веса тех пакетов данных, передача которых завершена своевременно – то есть без нарушения заданных временных рамок. Соответствующее выражение имеет вид:

$$Q(w^* | \rho, \mu) = \sum_{i,j,k} w(i, j, k) \Lambda_{ijk}(w^*) [F_p * F_\mu](\tau^* | \Lambda_{ijk}(w^*), h_p, \rho, h_\mu, \mu), \tag{1}$$

где:  $\tau^*$  – предельно допустимое время задержки пакета данных,  $[*]$  – оператор свертки ФРВ,  $h_p, h_\mu$  – коэффициенты, отражающие долю ресурса, расходуемого на обработку заявки в служебной и информационной



- АБ – абонент; СОПД – сегмент обработки первичных данных;
- СОИД – сегмент обработки исходных данных;
- СРЧВС – сегмент распределения частотно-временных слотов;
- СОП – сегмент обработки потребностей;
- СМИН – сегмент мониторинга интенсивности нагрузки;
- СМПС – сегмент мониторинга пропускной способности

Рис. 2. Функциональная структура сервера обработки данных (ПУС)

составляющих соответственно. Таким образом, задача оптимизации управляющей подсистемы сводится к поиску такого критериального значения приоритета, которое максимизирует данный функционал:

$$Q(w^* | \rho, \mu) \rightarrow \max_w \quad (2)$$

При анализе (разработке, модернизации) реальной системы могут возникать ситуации, приводящие к постановкам частных задач, вытекающих из (2):

$$Q_\rho(w^* | \rho) = \sum_{i,j,k} w(i, j, k) \Lambda_{ijk}(w^*) F_\rho(\tau^* | h_\rho \Lambda_{ijk}(w^*), \rho) \rightarrow \max_w \quad (3)$$

$$Q_\mu(w^* | \mu) = \sum_{i,j,k} w(i, j, k) \Lambda_{ijk}(w^*) F_\mu(\tau^* | h_\mu \Lambda_{ijk}(w^*), \mu) \rightarrow \max_w \quad (4)$$

Задача (3) направлена на оптимизацию подсистемы управления распределением ресурса на этапе обработки запроса (совершенствование служебной компоненты) и актуальна при уже существующей, фиксированной реализации ШССС с заведомо эффективной информационной компонентой. Задача (4), напротив, заключается в оптимизации распределения ресурса в информационной компоненте при условии достаточности ресурса служебной компоненты.

На этапе проектирования ШССС, а также при наличии возможности перераспределения ресурса между служебной и информационной компонентами в действующей системе полезной может быть задача оптимизации распределения общего ресурса  $r$  между ними:

$$Q(w^* | \rho, \mu) \rightarrow \max_{\rho, \mu} \quad (5)$$

где  $h_\rho \rho + h_\mu \mu = h_\Sigma r, h_\Sigma = h_\rho + h_\mu$ .

Решение общей оптимизационной задачи, объединяющей (2) и (5), с типовыми ФРВ [13, 14, 15] приводит к логичному результату  $h_\rho \rho = h_\mu \mu$ , указывающему на целесообразность распределения общего ресурса пропорционально затратам на обработку служебного и информационного запросов. При пропорциональном распределении ресурса задача (2) может быть преобразована к виду:

$$Q(w^* | r / h_\Sigma) = \sum_i w'(i) \Lambda_i(w^*) [F_r(\tau^* | \Lambda_i(w^*), r)] \rightarrow \max_w \quad (6)$$

где  $w'(i)$  – вес (ценность)  $i$ -типа сообщения (в общем списке),  $\Lambda_i(w^*)$  – интенсивность реализованного потока сообщений  $i$ -типа.

В отличие от классического экспоненциального распределения [1], в данной работе применяется гамма-распределение, которое является более общим случаем и позволяет более точно моделировать реальные процессы в системах массового обслуживания.

Функция гамма-распределения:

$$F(x | m, d) = \frac{1}{\Gamma(m) d^m} \int_0^x t^{m-1} e^{-t/d} dt, \quad (6)$$

где:

- $m$  – параметр формы;
- $d$  – параметр масштаба.

### Свертка случайных величин

Общее время доставки пакета  $t_\Sigma = t_\rho + t_\mu$  представляет собой сумму двух независимых случайных величин. ФРВ для этой суммы рассчитывается с помощью операции свертки  $F_\Sigma = F_\rho * F_\mu$ , данная операция раскрывается следующим выражением:

$$F_\Sigma(\tau) = (F_\rho * f_\mu)(\tau) = \int_0^\tau F_\rho(\tau-t) f_\mu(t) dt, \quad (7)$$

где:

- $F_\rho$  – ФРВ времени обработки запроса;
- $f_\mu$  – плотность распределения времени передачи пакета.

Использование свертки является допустимым методом, так как он точно моделирует физический процесс, при котором времена обработки и передачи складываются. Аппроксимация же общего времени, при которой время обработки и время передачи условно ограничиваются одним и тем же полным лимитом  $\tau^*$ , не имеет четкого вероятностного обоснования и приводит к погрешности вычислений, что показано на рис. 6.

Алгоритм вычислений:

1. Инициализация параметров системы и сценариев.
2. Расчет весовых коэффициентов для различных типов сообщений.
3. Определение оптимального порога  $w^*$  для каждого сценария.
4. Вычисление свертки ФРВ методом численного интегрирования.
  - Метод 1: численное интегрирование свертки ФРВ времени обработки и передачи  $F_\Sigma(\tau) = (F_\rho * f_\mu)(\tau)$ .
  - Метод 2: аппроксимация общего времени гамма-распределением, чьи параметры  $(m_\Sigma, d_\Sigma)$  найдены через моменты:

$$m_\Sigma = \frac{(m_\rho d_\rho + m_\mu d_\mu)^2}{m_\rho d_\rho^2 + m_\mu d_\mu^2}$$

$$d_\Sigma = \frac{m_\rho d_\rho^2 + m_\mu d_\mu^2}{m_\rho d_\rho + m_\mu d_\mu}$$

5. Расчет целевой функции и дисперсии методом Монте-Карло.
6. Визуализация результатов в виде графиков и таблиц.

### Параметры сценариев

Были исследованы 4 сценария работы подсистемы управления распределением ресурса РТР:

1. Нормальная нагрузка:
  - время обработки запроса:  $m_p=2.0, d_p=0.8$ ;
  - время передачи пакета:  $m_\mu=1.5, d_\mu=1.0$ .
2. Высокая нагрузка:
  - время обработки запроса:  $m_p=1.5, d_p=1.2$ ;
  - время передачи пакета:  $m_\mu=2.0, d_\mu=0.8$ .
3. Низкая нагрузка:
  - время обработки запроса:  $m_p=3.0, d_p=0.5$ ;
  - время передачи пакета:  $m_\mu=2.5, d_\mu=0.6$ .
4. Сбалансированная:
  - время обработки запроса:  $m_p=2.0, d_p=1.0$ ;
  - время передачи пакета:  $m_\mu=2.0, d_\mu=1.0$ .

**Результаты расчетов**

**Анализ графиков**

На графиках зависимости  $Q(w^*)$  от порога  $w^*$  наблюдаются следующие закономерности:

1. Пик целевой функции присутствует для всех сценариев.
2. Оптимальное значение  $w^*$  варьируется от 0.35 до 0.55.
3. Форма кривых соответствует теоретическим ожиданиям.
4. Дисперсия минимальна в области оптимальных значений  $w^*$ .
5. Взаимосвязь параметров системы.

*Входные параметры:*

- количество пользователей:  $N = 100$ ;
- суммарный ресурс системы:  $r = 1.0$ ;
- коэффициенты распределения:  $h_p = 0.5, h_\mu = 0.5$ ;
- параметры гамма-распределения для различных сценариев.

*Выходные параметры:*

- вероятность своевременной доставки с учетом важности сообщений;
- математическое ожидание веса доставленных пакетов  $Q(w^*)$ ;
- дисперсия целевой функции для оценки точности;
- оптимальное значение порога  $w^*$  для каждого сценария.

Из графика зависимости целевой функции  $Q(w^*)$  от порога приоритета  $w^*$  (рис. 3) допустимо сделать выводы:

1. Для всех сценариев нагрузки наблюдается чётко выраженный максимум целевой функции, что подтверждает существование оптимального значения критериального порога приоритета  $w^*$ .
2. При низкой нагрузке оптимальное  $w^* = 0,55$  – система может позволить себе обрабатывать только самые важные сообщения.
3. При высокой нагрузке оптимальное  $w^* = 0,35$  – снижение порога позволяет увеличить пропускную способность за счёт включения в обработку менее приоритетных, но всё ещё важных сообщений.
4. Форма кривых соответствует ожидаемому поведению: сначала рост  $Q(w^*)$  (рис. 5) за счёт отбора ценных сообщений, затем спад из-за чрезмерного ограничения потока.

Из графика зависимости дисперсии  $Q(w^*)$  (рис. 4) следуют заключения:

1. Дисперсия минимальна в окрестности оптимального  $w^*$ , что свидетельствует о стабильности и надёжности решения.
2. При отклонении от оптимального порога дисперсия возрастает, что указывает на повышенную чувствительность системы к колебаниям трафика.
3. Это подтверждает целесообразность адаптивной настройки  $w^*$  в режиме реального времени.

Из графика зависимостей  $Q(t^*)$  (рис. 5) следует сделать выводы:

1. Целевая функция монотонно возрастает с увеличением  $t^*$ , поскольку расширение временного окна повышает вероятность своевременной доставки.
2. При  $t^* \geq 12$  наблюдается насыщение: дальнейшее увеличение задержки почти не влияет на эффективность.
3. Это позволяет выбирать рациональные условия к задержке при проектировании систем – нет смысла задавать слишком большие  $t^*$ .

Сравнение методов расчёта позволяет заключить:

1. Использование операции свёртки даёт более

Таблица 1

**Сводные данные оптимизации**

Сценарий	Оптимальное $w^*$	Максимальное $Q(w^*)$	Дисперсия
Нормальная нагрузка	0.45	0.20799	0.003398
Высокая нагрузка	0.35	0.181248	0.003428
Низкая нагрузка	0.55	0.217732	0.004132
Сбалансированная	0.40	0.190900	0.003604

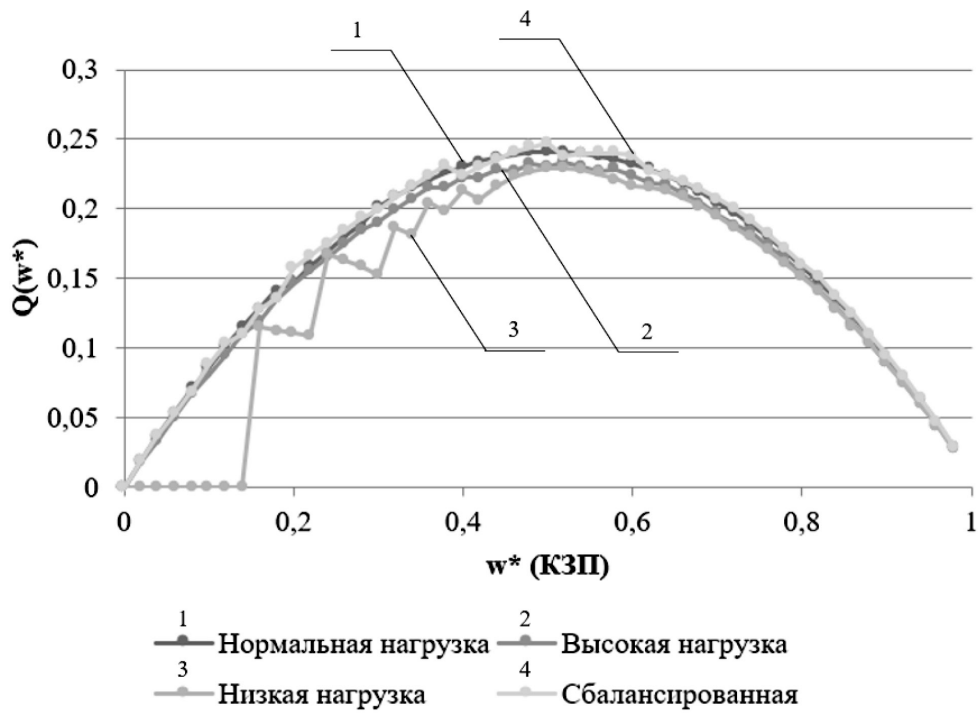


Рис. 3. Зависимость  $Q(w^*)$  от  $w^*$  для разных сценариев ( $t=8$ )



Рис. 4. Дисперсия  $Q(w^*)$  для разных сценариев ( $t^* = 8$ )

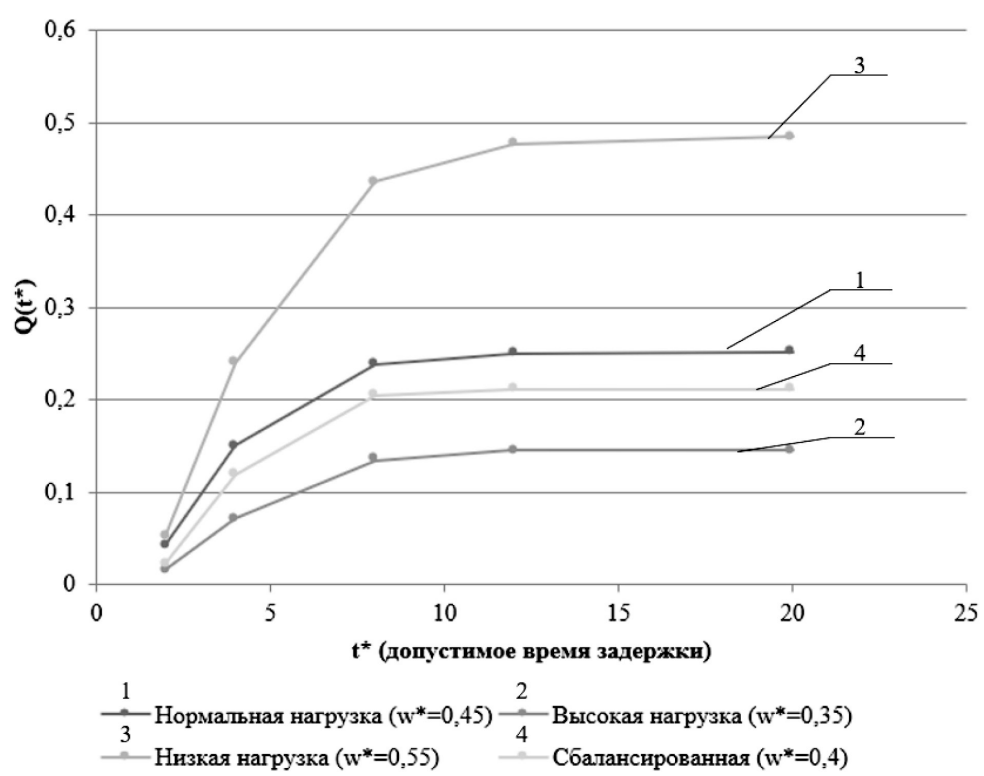


Рис. 5. График зависимостей  $Q(t^*)$  для оптимальных  $w^*$

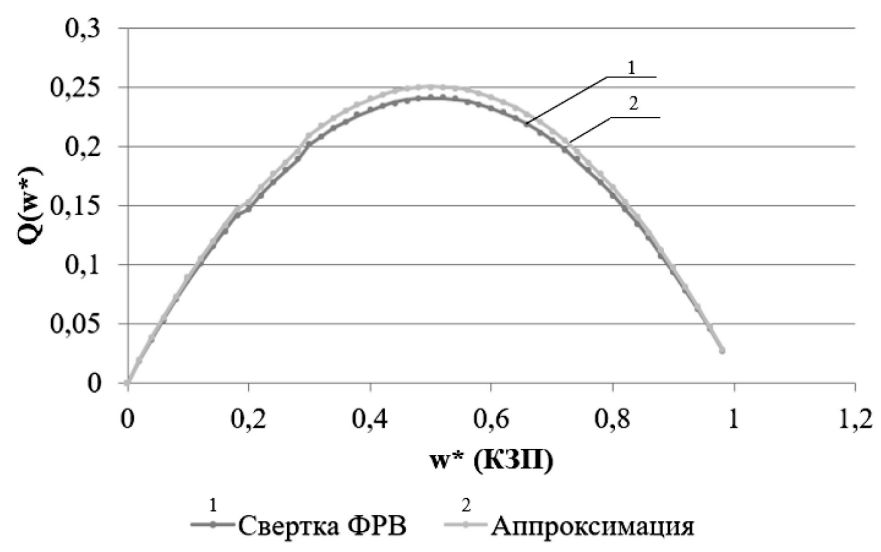


Рис. 6. Сравнение методов расчета: свертка vs аппроксимация

точную и физически корректную оценку вероятности своевременной доставки, поскольку учитывает суммарное время обработки и передачи как сумму двух случайных величин.

2. Подход, основанный на предположении о независимом выполнении обоих этапов в пределах общего лимита времени, завышает значение  $Q(w^*)$  (особенно в области максимума), что может привести к некорректным управленческим решениям.

3. Разница между методами особенно заметна при средних значениях  $w^*$ , когда система наиболее чувствительна к точности моделирования.

## Выводы

### Научно-теоретические выводы:

1. *Зависимость оптимального порога от нагрузки:* при увеличении нагрузки системы оптимальное значение  $w^*$  снижается (с 0.55 при низкой нагрузке до 0.35 при высокой нагрузке) для минимизации конфликтов доступа.

2. *Эффективность гамма-распределения:* использование гамма-распределения позволяет более адекватно моделировать реальные процессы в системах связи по сравнению с экспоненциальным распределением, поскольку оно может учитывать различные формы распределения времени обслуживания.

3. *Значение операции свертки:* применение операции свертки функций распределения (ФРВ) для расчета общего времени доставки пакета является принципиально важным элементом модели. Общее время доставки  $\Sigma = t_p + t_{tr}$  представляет собой сумму двух независимых случайных величин: времени обработки запроса и времени передачи. Вероятность того, что эта

сумма не превысит допустимую задержку  $\tau^*$ , математически определяется именно сверткой их ФРВ  $F_{\Sigma} = F_p * F_{tr}$ . Использование же подхода, при котором предполагается независимое выполнение условий  $t_p \leq \tau^*$  и  $t_{tr} \leq \tau^*$ , является менее точным, поскольку эти события статистически зависимы в рамках общей временной рамки  $\tau^*$ . Такой подход приводит к завышенной оценке целевой функции  $Q(w^*)$ , что показано на рис. 6. Таким образом, свертка обеспечивает физически и математически обоснованное моделирование, повышающее достоверность результатов оптимизации.

4. *Стабильность решения:* дисперсия целевой функции минимальна в области оптимальных значений  $w^*$ , что подтверждает надежность и устойчивость полученного решения.

### Практические рекомендации

1. Адаптивное управление: на основе полученных результатов рекомендуется реализовать в ПУС адаптивный алгоритм управления порогом  $w^*$  в реальном времени. Для этого система должна непрерывно или периодически (например, раз в несколько секунд) оценивать текущую нагрузку на каналы служебного (P) и информационного ( $\mu$ ) обмена. Оценка нагрузки может производиться по интенсивности поступающих заявок  $\Lambda$  и средней занятости каналов. В зависимости от измеренных параметров система должна автоматически выбирать и устанавливать одно из предварительно рассчитанных оптимальных значений  $w^*$  (0.55 для низкой, 0.45 для нормальной, 0.35 для высокой нагрузки). Это позволит поддерживать эффективность СОД близкой к максимальной при изменяющихся условиях работы.



Рис. 7. Сравнение эффективности по сценариям нагрузки

2. Формирование (использование) оптимальных значений КЗП:

- при нормальной нагрузке:  $w^* = 0.45$ ;
- при высокой нагрузке:  $w^* = 0.35$ ;
- при низкой нагрузке:  $w^* = 0.55$ ;
- для сбалансированной системы:  $w^* = 0.40$ .

3. Мониторинг дисперсии: высокая дисперсия  $Q(w^*)$  может указывать на нестабильность работы системы.

Для подтверждения обоснованности и достоверности представленной модели была разработана программа расчета вероятности своевременной доставки сообщений в широкополосной сети спутниковой связи с использованием гамма-распределения времени обработки запросов на доступ к ресурсу ретранслятора С-диапазона для проведения численных экспериментов (свидетельство № 2026612927 от 02 февраля 2026 г.). В отличие от других программ проводился сравнительный анализ эффективности фиксированного и адаптивного критериального значения приоритета сообщения. Результаты достоверно позволяют определить стратегии управления доступом для различных сценариев нагрузки (нормальная, высокая, низкая, сбалансированная), что представлено на рис. 7.

Адаптивное управление порогом  $w^*$  в зависимости от сценария нагрузки обеспечивает прирост эффективности:

- до 15 % при низкой нагрузке;
- от 1 до 9% при нормальной и сбалансированной нагрузке;
- примерно 0,15 % при высокой нагрузке (когда система и так работает на пределе).

Это подтверждает практическую ценность разработанной модели для создания интеллектуальных алгоритмов управления ресурсом ретранслятора.

## Заключение

Разработанная математическая модель позволяет эффективно оптимизировать подсистему управления распределением ресурса с учетом весовых коэффициентов важности сообщений. Использование гамма-распределения и операции свертки обеспечивают высокую адекватность модели реальным процессам в системах связи, что подтверждается сравнением с менее точными методами. Полученные результаты демонстрируют выраженную зависимость оптимальной стратегии управления от нагрузки системы и могут быть использованы для проектирования адаптивных систем управления распределением ресурса.

## Перспективы дальнейших исследований

1. Учет миллиметрового диапазона волн. Работа в этих диапазонах, характеризующихся большей пропускной способностью, но и сильной зависимостью от атмосферных условий (дождь, туман), требует

введения в модель вероятностного компонента, описывающего доступность канала. Кроме того, использование многолучевых антенн открывает задачу оптимизации не только во временной, но и в пространственной области.

2. Адаптация модели для низкоорбитальных спутниковых группировок (LEO). Высокая подвижность спутников, частые «хэндоверы» и изменение зоны покрытия требуют учета временных и пространственных вариаций в интенсивности нагрузки  $\lambda_{ijk}$ , что усложнит модель, но повысит ее применимость для современных систем.

Важность рассмотренных подходов к управлению распределением ресурса существенно возрастает при функционировании ШССС в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий, обуславливающих необходимость наряду с мерами помехозащиты линий спутниковой связи [8, 11, 12] использовать специальные алгоритмы управления распределением ресурса РТР [13,14].

## Литература

1. Курашев, З.В. Модель алгоритма управления доступом пользователей к сети широкополосной спутниковой связи на основе перераспределения ресурса в процессе функционирования / З.В. Курашев, М.С. Парфенов, А.М. Чуднов // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024) : Сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. В 2 томах (Санкт-Петербург, 03–05 декабря 2024 г.). – 2025. – С. 644–649.
2. Зинкин, С.В. Особенности многостанционного доступа с временным разделением каналов в системах спутниковой связи / С.В. Зинкин, А.Н. Мурсаев // Наука, техника и образование. – 2021. – № 7 (82). – С. 11–15.
3. Сомов, А.М. Спутниковые системы связи : учебное пособие для вузов / А.М. Сомов, С.Ф. Корнев. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2012 – 244 с.
4. Контролируемый многомодельный доступ к среде беспроводных сетей передачи данных / Г.А. Аниканов, П.М. Коновальчик, В.М. Моргунов, В.А. Овчаров // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 1 (38). – С. 246–286.
5. Перегудов, М.А. Модель централизованной синхронизации элементов цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA / М.А. Перегудов, А.С. Стешковой // Труды СПИИРАН. – 2020. – № 19 (1). – С. 128–154.
6. Промыслов, В.Г. Модель доступности на основе теории сетевого исчисления для системы потоковой системы обработки данных / В.Г. Промыслов // Управление большими системами. – 2024. – № 110. – С. 113–148.
7. Новиков, Е.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении / Е.А. Новиков // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2 (69). – С. 79–86.

8. Терентьев, В.М. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи / В.М. Терентьев, И.Б. Паращук. – Санкт-Петербург : ВАС, 1995. – 195 с.
9. Чуднов, А.М. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех / А.М. Чуднов, Б.И. Положинцев, Я.В. Кичко // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 12. – С. 33–47.
10. Пономарёв, Д.Ю. Имитационная модель обслуживания вызовов в спутниковой сети с учётом использования частотного ресурса / Д.Ю. Пономарёв, А.А. Демичева, К.Е. Гаипов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 4 (43). – С. 29.
11. Чуднов, А.М. Оптимизация гарантированной скорости передачи информации псевдослучайными сигналами с рандомизированной базой в условиях преднамеренных помех / А.М. Чуднов, Я.В. Кичко, Л.П. Сапунова // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 3. – С. 263–270.
12. Чуднов, А.М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем / А.М. Чуднов. – Санкт-Петербург : ВАС им. С.М. Буденного, 2021. – 193 с.
13. Новиков, О.А. Прикладные вопросы теории массового обслуживания / О.А. Новиков, С.И. Петухов. – Москва : Советское радио, 1969 – 400 с.
14. Овчаров, Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания / Л.А. Овчаров. – Москва : Машиностроение, 1969. – 322 с.
15. Степанов, С.Н. Модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и трафика данных на линиях доступа / С.Н. Степанов, Д.С. Тху // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – Т. 5, № 7. – С. 140–143.