

На правах рукописи

КАЩЕЕВ Алексей Анатольевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕСУРСОВ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СЕТЕЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**

05.13.13 – «Телекоммуникационные системы и компьютерные сети»

05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» на кафедре радиотехнических систем и филиале ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - «ОКБ «Спектр».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кошелев Виталий Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Куприянов Александр Ильич**

доктор технических наук, профессор **Шибанов Александр Петрович**

Ведущая организация: ООО «Научно-производственная фирма «Гейзер», г. Москва.

Защита диссертации состоится 29 апреля 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 при Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, аудитория 235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Телков И.А.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Создание единого информационного пространства сопровождается бурным развитием геостационарных сетей спутниковой связи (далее – сеть спутниковой связи), значительный вклад в исследование которых внесли как отечественные ученые – Зубарев Ю.Б., Кукк К.И., Кантор Л.Я., Шахгильдян В.В., Варакин Л.Е., Дорофеев В.М. и др., так и зарубежные – Спилкер Д., Прокис Д., Мидлтон Д., Файнстен Л., Голомб С. и др.

Постоянное увеличение информационных потоков и потребителей информации приводит к необходимости расширения сети спутниковой связи, которое ограничивается высокой стоимостью земных станций спутниковой связи (далее – земная станция) с одной стороны, и дороговизной аренды частотно-энергетического ресурса (далее – ресурс) геостационарного спутника-ретранслятора (далее – спутник-ретранслятор) – с другой.

Решению приведенной проблемы посвящены работы Егорова Н.В., Кантора Л.Я., Талызина Н.В., Томского В.С., Федорова Д.А., где рассматривается вопрос оптимального выбора параметров земных станций по критерию минимизации стоимости комплекта «передатчик – антенный пост» при заданных технических требованиях к сети спутниковой связи. Однако здесь оптимизируемая математическая модель не учитывает ряд параметров, присущих сетям спутниковой связи последнего поколения в целом:

- характеристики протоколов передачи информации (объем информационных кадров, соотношение полезной и служебной информации в кадре, механизмы передачи информации и т.д.);
- вид помехоустойчивого кодирования;
- скорость помехоустойчивого кодирования;
- тип передаваемой информации (голосовая информация и данные);
- вероятность ошибки передаваемой информации;
- число абонентских источников земных станций (телефонные аппараты, персональные электронно-вычислительные машины);
- кратность фазовой манипуляции сигналов,

что сопровождается неточностью полученных результатов. Также, согласно основным принципам системного анализа о единстве оптимизируемой системы, предлагается в качестве критерия оптимизации использовать стоимость владения сетью, который учитывает суммарные затраты как на оборудование земных станций, так и на аренду ресурса спутника-ретранслятора.

Таким образом, в условиях ограниченного финансирования бюджетных организаций, в интересах которых создаются многие современные сети спутниковой связи, актуальной является задача оптимального выбора параметров сети по критерию минимизации стоимости ее владения при заданных технических требованиях.

Цель работы

Целью работы является повышение эффективности использования частотных и энергетических ресурсов геостационарных сетей спутниковой связи.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- разработана методология технико-экономической оптимизации выбора параметров сетей спутниковой связи;
- проведен анализ и выбор методов цифрового спектрального анализа для оценки телефонной нагрузки голосового трафика;
- разработана математическая модель сети спутниковой связи передачи голосовой информации¹;
- разработана математическая модель сети спутниковой связи передачи данных;
- математически сформулирована и решена задача технико-экономической оптимизации выбора параметров сетей спутниковой связи передачи голосовой информации и передачи данных при заданных ограничениях на внешние параметры модели сети.

Методы исследования

В работе широко применялись математические методы теории массового обслуживания, цифрового спектрального анализа, математической статистики, вычислительной математики, нелинейного программирования. Приведенные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на ПЭВМ в среде MatLab.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель сети спутниковой связи передачи голосовой информации, учитывающая влияние объема кадра протокола канального уровня FrameRelay и обеспечивающая возможность повышения частотной эффективности сети до 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации 10^{-6} ;
- разработана математическая модель сети спутниковой связи передачи данных, учитывающая влияние информационных характеристик протокола транспортного уровня ТСР и обеспечивающая возможность повышения частотной эффективности сети до 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации $4 \cdot 10^{-6}$;
- получены алгоритмы оптимального выбора внутренних параметров математических моделей сетей спутниковой связи по критерию минимизации стоимости владения сетью, обеспечивающие возможность повышения информационной эффективности сети спутниковой связи передачи голосовой информации на 24 % и данных – на 3,5 % при

¹ Здесь и далее по тексту под голосовой информацией понимается речевая информация.

вероятностях ошибки передаваемой информации 10^{-6} и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

Практическая ценность работы

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах на создание систем спутниковой связи в интересах Министерства обороны Российской Федерации в Федеральном государственном унитарном предприятии “Особое конструкторское бюро “Спектр” (ФГУП “ОКБ “Спектр”).

Представленные в работе математические выражения и алгоритмы могут применяться на этапах эскизного и технического проектирования сетей спутниковой связи с целью минимизации стоимости владения последних при прочих равных технических условиях.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Научно-техническая конференция “Методы и устройства формирования сигналов в информационных системах”, г. Рязань, 2004.
2. 30-я межвузовская научно-практическая конференция “Информационно-телекоммуникационные технологии”, г. Рязань, 2004.
3. Всероссийский научно-практический семинар “Сети и системы связи”, г. Рязань, 2005.
4. Научная сессия МИФИ “Компьютерные науки. Информационные технологии”, г. Москва, 2005.
5. 14-я международная научно-техническая конференция “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”, г. Рязань, 2005.
6. Научная сессия МИФИ “Компьютерные науки. Информационные технологии”, г. Москва, 2006.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ. Из них 3 статьи в научных печатных изданиях, рекомендованных ВАК России, 1 статья в межвузовском сборнике научных трудов, 11 тезисов докладов на конференциях.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 117 наименований и 3 приложений. Диссертация содержит 129 страниц, в том числе 11 таблиц и 67 рисунков.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту диссертации выносятся следующие положения:

- математическая модель сети спутниковой связи передачи голосовой информации, учитывающая влияние объема кадра протокола канального уровня FrameRelay и обеспечивающая возможность повышения частотной эффективности сети до 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации $10P^{-6}$;

- математическая модель сети спутниковой связи передачи данных, учитывающая влияние информационных характеристик протокола транспортного уровня TCP и обеспечивающая возможность повышения частотной эффективности сети до 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации $4*10^{-6}$;

- алгоритмы оптимального выбора внутренних параметров математических моделей сетей спутниковой связи по критерию минимизации стоимости владения сетью, обеспечивающих возможность повышения информационной эффективности сети спутниковой связи передачи голосовой информации на 24 % и данных – на 3,5 % при вероятностях ошибки передаваемой информации 10^{-6} и $4*10^{-6}$ соответственно.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводятся основные сведения о геостационарной сети спутниковой связи (классификация, топологии построения, методы многостанционного доступа к спутнику-ретранслятору, обобщенная структурная схема земной станции, модель взаимодействия открытых систем и ее протоколы, основные энергетические зависимости линии спутниковой связи).

В соответствии с основными принципами системного подхода разработана методология технико-экономической оптимизации сети спутниковой связи (рис.1).

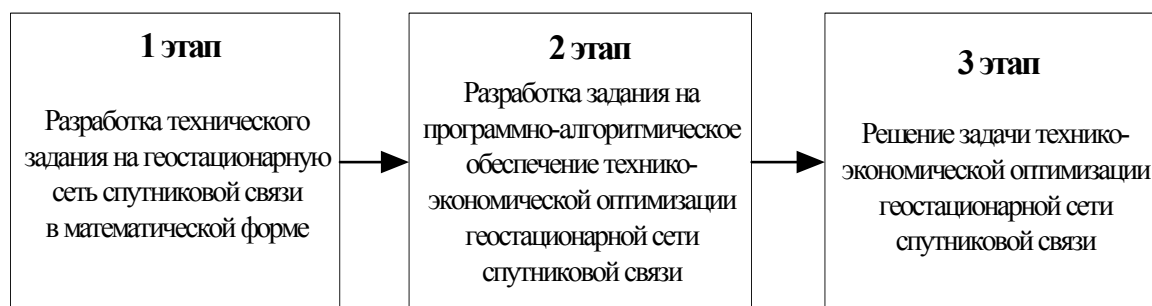


Рисунок 1 – Методология технико-экономической оптимизации сети спутниковой связи

На **первом этапе** определены внешние параметры модели сети спутниковой связи $Y = [C_{ij}, C_{ji}, P_{ij}, P_{ji}, N_i]$ и ограничения общего вида на пропускную способность линии спутниковой связи, вероятность ошибки передаваемой информации и количество абонентов земной станции:

$$F_Y = \begin{cases} C_{ij} = C_{ij \text{ зад}}, C_{ji} = C_{ji \text{ зад}}, \\ P_{ij} \leq P_{ij \text{ зад}}, P_{ji} \leq P_{ji \text{ зад}}, \\ N_i = N_{i \text{ зад}}, \end{cases} \quad (1)$$

где C_{ij}, C_{ji} - пропускная способность линии спутниковой связи от i -земной станции к j -й и от j -й земной станции к i -й соответственно; P_{ij}, P_{ji} - вероятность ошибки передаваемой информации от i -й земной станции к j -й и от j -ой земной станции к i -ой соответственно; N_i - количество абонентов, подключенных к i -ой земной станции.

В качестве критерия оптимизации сети спутниковой связи определена стоимость владения сетью C_Σ , целевая функция которой состоит из стоимости оборудования земных станций и аренды ресурса спутника-ретранслятора:

$$C_\Sigma = \min_X \left[\sum_{i=1}^M (C_i^{3C} + C_i^a \cdot T) \right], \quad (2)$$

где C_i^{3C} - стоимость i -й земной станции, у.е.; M - количество земных станций в сети спутниковой связи; C_i^a - стоимость аренды ресурса спутника-ретранслятора i -й земной станции в год, у.е.; T - длительность эксплуатации сети спутниковой связи, год.

На **втором этапе** определен вектор внутренних параметров $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}]$ модели сети спутниковой связи:

$$\begin{cases} x_{i1} = P_{i \text{ пер зс}}, x_{i2} = D_i, x_{i3} = m_i, x_{i4} = r_i, \\ x_{i5} = V_{ik}, x_{i6} = V_{i \text{ TCP}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $P_{i\text{перзс}}$ и D_i – мощность передатчика и диаметр антенны i -й земной станции; m_i – кратность фазовой манипуляции сигнала i -й земной станции; r_i – скорость помехоустойчивого кодирования i -й земной станции; V_{ik} – объем информационного кадра протокола канального уровня FrameRelay i -ой земной станции; V_{iTCP} – объем TCP окна i -й земной станции.

Применяя основные энергетические зависимости для линии спутниковой связи и обозначения (3), ограничения на внешние параметры модели сети спутниковой связи (1) могут быть представлены через внутренние параметры в следующем виде:

$$F_X = \begin{cases} \frac{16R_1^2 l_{1\text{дон}} \kappa \Delta f_{ш.зс} (x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}) a(P_c / P_{ш\Sigma})}{\gamma Q_{прб} \eta_{пер.зс} \eta_{прб}} \leq x_{i1}^2 x_{i2}^2, \\ \frac{16R_2^2 l_{2\text{дон}} \kappa T_{\Sigma зс} \Delta f_{ш.б} (x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}) b((P_c / P_{ш\Sigma}))}{\gamma E_{пер.б}} \leq x_{i2}^2, \end{cases} \quad (4)$$

где обозначения параметров приведены в диссертационной работе.

Аппроксимация статистических данных стоимости годовой аренды ресурса отечественных спутников-ретрансляторов и стоимости оборудования земных станций отечественных фирм-производителей и поставщиков, позволяет представить целевую функцию C_Σ в следующем аналитическом виде:

$$C_\Sigma = \min_X \left[\sum_{i=1}^M \left(110,69 + 210,23 x_{i1} - 22,26 x_{i2} + 922,58 x_{i2}^2 + 4 \cdot 10^3 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \Delta f_{ia} (x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}) \cdot T \right) \right], \quad (5)$$

где $\Delta f_{ia} (x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6})$ – ширина арендуемой полосы частот ресурса спутника-ретранслятора для i -й земной станции.

Таким образом, совокупность ограничений (4) и целевой функции (5) является задачей технико-экономической оптимизации выбора параметров сети спутниковой связи, решение которой осуществляется **на третьем этапе** методами нелинейного программирования, при этом оптимизируемые математические модели сетей имеют следующие ограничения:

- топология построения сети – “точка-точка”;

- метод доступа к спутнику-ретранслятору – с частотным разделением каналов на постоянной основе;
- земные станции имеют одинаковые информационные, энергетические и механические характеристики;
- тип канала спутниковой связи – симметричный, дуплексный;
- арендуемый ресурс спутника-ретранслятора удовлетворяет условию частотно-энергетического баланса;
- протокол передачи голосовой информации – FrameRelay;
- транспортный протокол передачи данных – TCP.

Во второй главе осуществляется выбор методов цифрового спектрального анализа для оценки телефонной нагрузки голосового трафика, разработка математических моделей сетей спутниковой связи передачи голосовой информации и данных с последующей оценкой их выходных параметров.

Оценка телефонной нагрузки методами цифрового спектрального анализа заключается в аппроксимации ее относительного среднесуточного распределения $g(t)$ спектральной плотностью мощности $\hat{g}(t)$ (рис. 2). Здесь ММЭ – метод максимальной энтропии.

Критерием соответствия значений g и \hat{g} является среднеквадратическая ошибка аппроксимации:

$$\sigma^2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (g_i - \hat{g}_i)^2, \quad (6)$$

где g_i и \hat{g}_i - значение i -го отсчета телефонной нагрузки и ее оценки соответственно.

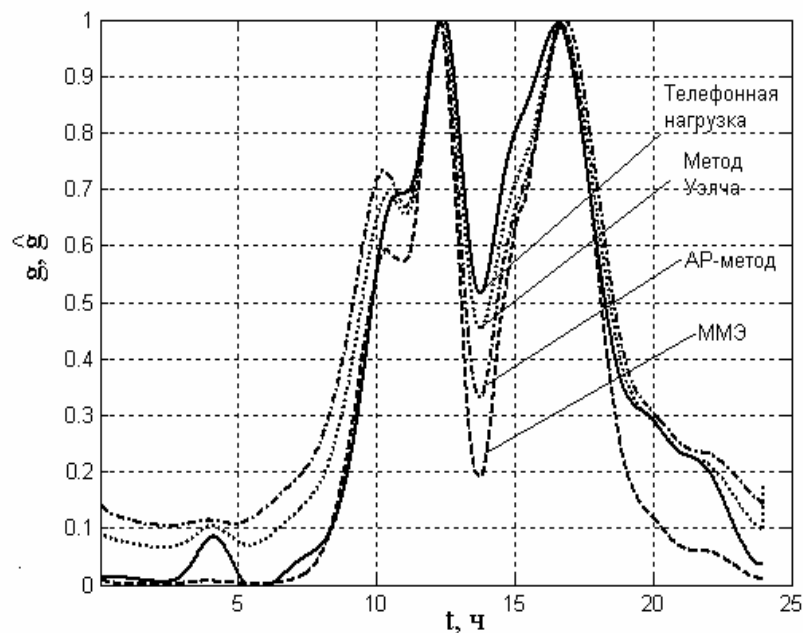


Рисунок 2 - Относительное среднесуточное распределение телефонной нагрузки и ее оценок

Для объективности выбора методов цифрового спектрального анализа применяется уровень потерь голосовой информации I , который для обеспечения надлежащего качества связи должен удовлетворять условию $I \leq 0,04$. Параметр I определяется как:

$$I = \begin{cases} 1 - \frac{G}{\hat{G}} & \text{при } G \geq \hat{G}, \\ 0 & \text{при } G < \hat{G}, \end{cases} \quad (7)$$

где $G = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L g_i$ - средневзвешенная сумма величины g ;

$\hat{G} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \hat{g}_i$ - средневзвешенная сумма величины \hat{g} ; $\frac{G}{\hat{G}}$ - достоверность

передачи голосовой информации; L - количество отсчетов анализируемой последовательности данных.

Результаты исследования формулы (7) показывают, что для оценки телефонной нагрузки в случае коротких анализируемых последовательностей данных (при $L \leq 1024$) рекомендуется выбирать авторегрессионный метод (АР-метод), а в случае длинных (при $L > 1024$) – метод Уэлча:

$$\hat{g}(t) = \begin{cases} \frac{T\rho}{P_{\max} e_p^T(t) a a^T e_p} & \text{при } L \leq 1024, \\ \frac{1}{P_{\max} J} \sum_{v=0}^{J-1} P_v(t) & \text{при } L > 1024, \end{cases} \quad (8)$$

где e_p - вектор комплексных синусоид; e_p^T - транспонированный вектор комплексных синусоид; a^T - транспонированный вектор параметров весовых коэффициентов авторегрессионного фильтра; P_{\max} - максимальная спектральная плотность мощности в час наибольшей нагрузки; J - количество фрагментов в анализируемой последовательности; P_v - спектральная плотность мощности взвешенного v -го фрагмента данных; ρ - дисперсия белого шума.

В рамках составления ограничений на сеть спутниковой связи передачи голосовой информации к задаче технико-экономической оптимизации разработана математическая модель сети с применением протокола FrameRelay, получившего широкое распространение вследствие

отсутствия дополнительных задержек на повторную передачу искаженных кадров.

Основными входными параметрами модели является вектор внутренних $X = [P_{перзс}, D, m, r, V_K]$ и внешних параметров $Y = [C, p, N]$, а выходными – вектор $Z = [R^{FR}, \Delta f_{зс}^{FR}, V_{K_{min}}, V_{K_{max}}, V_{K_{opt}}]$.

Здесь R^{FR} - средняя скорость передачи голосовой информации; $\Delta f_{зс}^{FR}$ - ширина спектра голосовой информации; $V_{K_{min}}$, $V_{K_{max}}$ и $V_{K_{opt}}$ - минимальный, максимальный и оптимальный объемы канального кадра FrameRelay; N – число абонентов земной станции.

Математическая модель сети спутниковой связи передачи голосовой информации рассматривается в форме аналитических зависимостей между ее выходными, внутренними и внешними параметрами:

$$R^{FR}(V_K) = \frac{C \hat{g}(t) q_{чнн}}{n_{max}} (1-p)^k; \quad (9)$$

$$\Delta f_{зс}^{FR}(V_k) = \frac{1,3 C R^{FR}(V_K) (1-p)^K}{n_{max} r \log_2 m}; \quad (10)$$

$$V_{K_{max}}(p) = V_{K_{opt}}(p) = \begin{cases} V_K^{max} & \text{при } V_{K_{max}} \geq V_K^{max}, \\ k' p^{-1} & \text{при } V_{K_{max}} < V_K^{max}; \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{K_{min}}(N) = \begin{cases} V_K^{min} & \text{при } V_{K_{min}} \leq V_K^{min}, \\ \sum_{i=0}^R a_i N & \text{при } V_{K_{min}} > V_K^{min}, \end{cases} \quad (12)$$

где $q_{\text{чнн}}$ - телефонная нагрузка голосового трафика в час наибольшей нагрузки; n_{max} - максимальное количество временных каналов в кадре FrameRelay; k' - коэффициент пропорциональности, значения которого приведены в диссертационной работе; $R=10$ - порядок полинома; a_i - коэффициенты полинома; $V_K^{\text{min}} = 7$ байт и $V_K^{\text{max}} = 4096$ байт - минимальный и максимальный объемы кадра, определяемые стандартом FRF.

Применение оптимального объема канального кадра $V_{K_{opt}}$ по сравнению с минимальным $V_{K_{min}}$ позволяет повысить частотную эффективность сети спутниковой связи передачи голосовой информации d на 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации 10^{-6} (таблица 1) и пропорционально ей снизить затраты на аренду ресурса спутника-ретранслятора.

Таблица 1 – Значения частотной эффективности сети спутниковой связи передачи голосовой информации и частотного выигрыша от применения оптимального объема канального кадра

| p | γ_{min} , бит/с Гц | γ_{opt} , бит/с Гц | d , % | $V_{K_{opt}}$, байт |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|---------|----------------------|
| 10^{-4} | 1,5 | 1,890 | 26,00 | 65 |
| $6*10^{-5}$ | 1,5 | 1,980 | 32,00 | 107 |
| $4*10^{-5}$ | 1,5 | 2,020 | 34,66 | 161 |
| 10^{-5} | 1,5 | 2,090 | 39,30 | 642 |
| $6*10^{-6}$ | 1,5 | 2,100 | 40,00 | 1069 |
| $4*10^{-6}$ | 1,5 | 2,110 | 40,67 | 1603 |
| 10^{-6} | 1,5 | 2,114 | 41 | 4096 |

Для составления ограничений на сеть спутниковой связи передачи данных к задаче технико-экономической оптимизации разработана математическая модель сети с применением ТСП - протокола транспортного уровня модели взаимодействия открытых систем.

Входными параметрами математической модели являются вектор внутренних $X = \left[P_{\text{пер зс}}, D, m, r, V_{\text{TCP}}, V_{\text{SEG}}, N, \lambda, \mu \right]$ и внешних $Y = \left[C, p, N \right]$ параметров, а выходными параметрами - вектор $Z = \left[R_{\text{TCP}}, \Delta f_{\text{зс}}^{\text{TCP}}, T_{\text{TCP}}, V_{\text{TCP}_{opt}} \right]$. Здесь λ - средняя интенсивность поступления сегментов ТСП-протокола от каждого абонента; μ - средняя

интенсивность обслуживания сегментов; R_{TCP} – средняя скорость передачи данных TCP окна; T_{TCP} – время передачи данных TCP окна; Δf_{3c}^{TCP} – ширина спектра данных TCP окна; $V_{TCP_{opt}}$ – оптимальный объем TCP окна².

В основе построения модели применяется система массового обслуживания вида М/М/1/∞ с одним прибором обслуживания, конечной группой абонентов (источники сообщений), показательными распределениями времени между двумя последовательно поступающими сегментами и времени обслуживания.

Математическая модель сети спутниковой связи передачи данных рассматривается в форме аналитических зависимостей между ее выходными, внутренними и внешними параметрами:

$$T_{TCP} = \left[2 \left(T_{sp} + \frac{\sum_{K=1}^N K p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^K \frac{N!}{(N-K)!}}{\lambda \left(N - \sum_{K=1}^N K p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^K \frac{N!}{(N-K)!} \right)} \right) + \frac{V_{TCP}}{C} \right] (1-p)^{-V_{TCP}} ; \quad (13)$$

$$R_{TCP} = \frac{V_{TCP}}{T_{TCP}} = \frac{\min(V_{TCP}, 2CT_{TCP})}{2(T_{SP} + 2T_{BUF}) + \frac{V_{TCP}}{C}} ; \quad (14)$$

$$\Delta f_{3c}^{TCP} = \frac{1,3R_{TCP}}{r \log_2 m} ; \quad (15)$$

$$V_{TCP_{opt}} = \begin{cases} V_{TCP}, & V_{TCP} \geq 2T_{TCP}C, \\ 2T_{TCP}C, & V_{TCP} \leq 2T_{TCP}C, \end{cases} \quad (16)$$

где $T_{sp} \approx 0,3$ с – время распространения сигнала между ЗС в одном направлении; k – число сегментов в системе; $p_0 = \left[\sum_{k=0}^N \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N!}{(N-k)!} \right]^{-1}$ – вероятность отсутствия в системе сегментов; T_{BUF} – время задержки сегмента в буфере каналообразующего оборудования.

В ранее опубликованных работах оценка оптимального объема TCP окна осуществлялась по формуле (17) и не учитывала вероятности ошибки передаваемой информации по линии спутниковой связи и количество абонентов N земных станций.

² Оптимальный объем TCP окна выбирается по критерию максимального использования пропускной способности линии спутниковой связи при заданных ограничениях на внутренние и внешние параметры модели.

$$V'_{TCP_{opt}} = 2T_{sp}C. \quad (17)$$

Применение оптимального объема ТСР окна по формуле (16) позволяет повысить частотную эффективность сети спутниковой связи d на 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации $4 \cdot 10^{-6}$ (таблица 2) по сравнению с ранее используемой оценкой (17).

Таблица 2 – Значения частотной эффективности сети спутниковой связи передачи данных и частотного выигрыша от применения оптимального объема ТСР окна

| p | γ'_{opt} , бит/с Гц | γ_{opt} , бит/с Гц | d , % | $V_{TCP_{opt}}$, байт |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|---------|------------------------|
| 10^{-8} | 0,98 | 0,98 | 0 | 47104 |
| 10^{-7} | 0,95 | 0,95 | 0 | 47104 |
| 10^{-6} | 0,67 | 0,68 | 0,70 | 47100 |
| $2 \cdot 10^{-6}$ | 0,46 | 0,48 | 4,30 | 35328 |
| $4 \cdot 10^{-6}$ | 0,22 | 0,31 | 41 | 21504 |

В третьей главе математически сформулирована и решена задача технико-экономической оптимизации выбора параметров сетей спутниковой связи передачи голосовой информации и данных, по результатам которой определена информационная эффективность сетей.

Широко распространенные классические методы выбора параметров сетей спутниковой связи заключаются в расчете мощности передатчика и диаметра антенны по известным характеристикам спутника-ретранслятора и земным станциям. Существенным недостатком приведенных методов является отсутствие количественно определенного критерия оптимизации, что способствует неэффективному использованию энергетических и частотных ресурсов геостационарных сетей спутниковой связи. Для устранения приведенного недостатка выбор параметров сети предлагается осуществлять в соответствии с методологией технико-экономической оптимизации, приведенной на рис.1.

Для сети спутниковой связи передачи голосовой информации задача технико-экономической оптимизации в математической форме получена в виде целевой функции (18) и совокупности ограничений в виде неравенств (19) посредством применения оценок выходных параметров модели сети:

$$C_{\Sigma} = \min_X \left[2 \times \left(\begin{array}{l} 110,69 + 210,23 \cdot x_1 - 22,26 \cdot x_2 + 922,58 \cdot x_2^2 + 4 \cdot 10^3 \cdot x \\ \times \frac{1,3 C (1-p)^5 k T \widehat{g}(t) q}{(C - N_{sl}) x \log_2 x} \end{array} \right) \right]; \quad (18)$$

$$F_X = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,3 C (1-p)^5 k \widehat{g}(t) q}{(C - N_{sl}) x \log_2 x} \cdot \frac{16 R_1^2 L_{1\text{дон}} \kappa a (P/P_c)_{\Sigma}}{\gamma Q_{\text{прб}} \eta_{\text{перзс}} \eta_{\text{прб}}} \leq x_1 x_2^2, \\ \frac{1,3 C (1-p)^5 k \widehat{g}(t) q}{(C - N_{sl}) x \log_2 x} \cdot \frac{16 R_2^2 L_{2\text{дон}} \kappa T_{\Sigma \text{зс}} b (P/P_c)_{\Sigma}}{\gamma E_{\text{перб}}} \leq x_2^2, \\ V_{K_{\min}} \leq x_5 \leq V_{K_{\max}}; x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max}; 2 \leq x_3 \leq 8; 1/2 \leq x_4 \leq 7/8, \end{array} \right. \quad (19)$$

где $x_{2\min}$ - минимальный диаметр антенны, определяемый требованиями технического задания на весогабаритные параметры станции; $x_{2\max}$ - максимальный диаметр антенны, определяемый требованиями регламента государственного предприятия «Космическая связь» для VSAT – станций (для С – диапазона – 5 м, для Ku–диапазона – 3,5 м); V_{sl} – объем служебной информации канального кадра; N_n - количество кадров, передаваемых за 1 с.

Для сети спутниковой связи передачи данных задача технико-экономической оптимизации в математической форме составлена в виде целевой функции (20) и совокупности ограничений в виде неравенств (21):

$$C_{\Sigma} = \min_X \left[2 \cdot \left(\begin{array}{l} 110,69 + 210,23 \cdot x_1 - 22,26 \cdot x_2 + 922,58 \cdot x_2^2 + 4 \cdot 10^3 \cdot x \\ \times \frac{C}{R_{TCP}(x_3, x_4, x_6)} \Delta f_D \cdot T \end{array} \right) \right]; \quad (20)$$

$$F_X = \left\{ \begin{array}{l} \frac{C}{R_{TCP}(x_3, x_4, x_6)} \Delta f_D \frac{16 R_1^2 L_{1\text{дон}} \kappa a(P_c/P_{u\Sigma})}{\gamma Q_{\text{прб}} \eta_{\text{перзс}} \eta_{\text{прб}}} \leq x_1 x_2^2, \\ \frac{C}{R_{TCP}(x_3, x_4, x_6)} \Delta f_D \frac{16 R_2^2 L_{2\text{дон}} \kappa T_{\Sigma\text{зс}} b(P_c/P_{u\Sigma})}{\gamma E_{\text{прб}}} \leq x_2^2, \\ V_{TCP_{\min}} \leq x_6 \leq V_{TCP_{\max}}; \quad x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max}; \quad 2 \leq x_3 \leq 8; \quad 1/2 \leq x_4 \leq 7/8, \end{array} \right. \quad (21)$$

где $V_{TCP_{\min}}$ и $V_{TCP_{\max}}$ - минимальный и максимальный объемы TCP окна;

Δf_D - требуемая ширина полосы пропускания линии спутниковой связи для передачи данных.

Выбор внутренних параметров сети спутниковой связи в результате технико-экономической оптимизации по сравнению с классическими методами выбора, применяемыми ранее, позволяет повысить информационную эффективность сети:

- для сети спутниковой связи передачи голосовой информации – на 24 % при вероятности ошибки передаваемой информации 10^{-6} ;
- для сети спутниковой связи передачи данных – на 3,5 % при вероятности ошибки передаваемой информации $4 \cdot 10^{-6}$.

В заключении приводятся краткие результаты, полученные в ходе проведения научных исследований в рамках диссертационной работы, а также рассматривается их практическая реализация.

Основные результаты

В диссертационной работе получены следующие аналитические и прикладные результаты:

- разработана математическая модель геостационарной сети спутниковой связи передачи голосовой информации, обеспечивающая возможность повышения частотной эффективности сети до 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации 10^{-6} ;
- разработана математическая модель геостационарной сети спутниковой связи передачи данных с применением системы массового обслуживания вида M/M/1//N, обеспечивающая возможность повышения частотной эффективности сети до 41 % при вероятности ошибки передаваемой информации $4 \cdot 10^{-6}$;
- получены алгоритмы оптимального выбора внутренних параметров математических моделей геостационарных сетей спутниковой связи по

критерию минимизации стоимости владения системой, обеспечивающие возможность повышения информационной эффективности геостационарной сети спутниковой связи передачи голосовой информации на 24 % и передачи данных – на 3,5 % при вероятностях ошибки передаваемой информации 10^{-6} и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Кащеев. А.А. Анализ влияния информационного объема канального кадра на выбор параметров подвижных земных станций // Мобильные системы.– 2006.– №4.– С. 100-103.

2. Кащеев А.А. Оценка скорости передачи информации по линии спутниковой связи на транспортном уровне // Мобильные системы.– 2007.– №4.– С. 28-30.

3. Кащеев А.А., Кошелев В.И. Использование ресурсов в системах спутниковой связи // Мобильные системы.– 2007.– №11.– С. 54 - 59.

В других изданиях:

4. Кащеев А.А. Техничко-экономическая оптимизация земных станций сети спутниковой связи С-диапазона // Методы и устройства формирования сигналов в информационных системах: межвуз. сб. – Рязань, 2004. – С. 123-127.

5. Кащеев А.А. Техничко-экономическая оптимизация средств доступа к удаленному абоненту телекоммуникационной сети передачи данных по спутниковому каналу связи // 30-я межвуз. научно-практическая конференция “Информационно-телекоммуникационные технологии”. – Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи имени маршала Советского Союза М.В. Захарова, 2004. – С. 58-61.

6. Кащеев А.А. Анализ энергетических показателей отечественной космической группировки спутников-ретрансляторов для передачи информации по глобальной телекоммуникационной сети // 30-я межвузовская научно-практическая конференция “Информационно-телекоммуникационные технологии”. – Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи имени маршала Советского Союза М.В. Захарова, 2004. – С. 61-64.

7. Кащеев А.А. Оптимальное проектирование сети спутниковой связи с применением методов штрафных функций // Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов в 15 томах. Т.14. – М.: МИФИ, 2005 – С. 63-64.

8. Кащеев А.А. Системный подход к проектированию сети спутниковой связи // Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов в 15 томах. Т.14. – М.: МИФИ, 2005 – С. 61-62.

9. Кащеев А.А. Системный анализ сети радиосвязи с применением методов нелинейного программирования // Всероссийский научно-практический семинар “Сети и системы связи”. – Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи имени маршала Советского Союза М.В. Захарова, 2005. – С. 31-32.

10. Кащеев А.А. Выбор параметров земных станций при передаче голосового трафика на канальном уровне по спутниковым линиям связи // 14-я международная научно-техническая конференция “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. – Рязань: Рязанская государственная радиотехническая академия, 2005. – С. 88-89.

11. Кащеев А.А., Хлебников Н.Ю. Влияние объема информационного кадра канального уровня на спектр голосового трафика в спутниковой связи // 14-я международная научно-техническая конференция “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. – Рязань: Рязанская государственная радиотехническая академия, 2005. – С. 95-97.

12. Кащеев А.А., Кошелев В.И. Оценка скорости передачи голосовой информации при переменном объеме информационного кадра в спутниковых системах связи // Научная сессия МИФИ. Т. 15. Конференция “Молодежь и наука”. Компьютерные науки. Информационные технологии. Экономика и управление. М.: МИФИ, 2006 – С. 82-83.

13. Кащеев А.А., Кошелев В.И. Влияние информационных характеристик голосового трафика на выбор параметров земных станций // Научная сессия МИФИ. Т. 15. Конференция “Молодежь и наука”. Компьютерные науки. Информационные технологии. Экономика и управление. М.: МИФИ, 2006 – С. 79-81.

14. Кащеев А.А., Лукьянов О.В. Выбор оптимального объема кадра при передаче информации в системах спутниковой связи // Всероссийский научно-практический семинар “Сети и системы связи”. – Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи имени маршала Советского Союза М.В. Захарова, 2006. – С. 137-139.

15. Лукьянов О.В., Кащеев А.А., Лукашов Н.А. Территориально-распределенная сеть передачи измерительной информации по спутниковым линиям связи с применением технологии DVB-RCS // 14-я международная научно-техническая конференция “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. – Рязань: Рязанская государственная радиотехническая академия, 2005. – С. 98-99.