

УДК 621.391

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАФИКА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СЕТЕЙ

Пономарев Д.Ю.

ФГБОУ ВПО Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, Россия (660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31), e-mail: ponomarevdu@yandex.ru

Перспективные технологии спутниковых инфокоммуникаций учитывают растущие потребности общества в информационном обеспечении, что требует использования широкополосных радиочастотных диапазонов, применения низкоорбитальных спутниковых группировок, переноса функций коммутации и маршрутизации на орбиту, повсеместном внедрении межспутниковых линий. Спутниковая сеть представляет собой несколько систем, связанных беспроводными каналами связи, что, естественно, приводит к тому, что структура данной сети является динамически изменяющейся и задача анализа распределения трафика в такой сети значительно усложняется. В работе представлены результаты по разработке модели распределения трафика в спутниковой сети связи, построенной с использованием межспутниковых каналов передачи. Основой модели является контурная тензорная модель, позволяющая обеспечить необходимый уровень загрузки спутниковых систем.

Ключевые слова: спутниковые сети, распределение трафика, тензорный анализ сетей.

MODEL OF THE TRAFFIC DISTRIBUTION FOR PERSPECTIVE INFOCOMMUNICATIONS SATELLITE NETWORKS

Ponomarev D.Y.

Siberian State Aerospace University named after academician M.F.Reshetnev (31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, Russia, 660014), e-mail: ponomarevdu@yandex.ru

Perspective technologies of satellite networks take into account the growing information needs of society. This requires the use of broadband RF bands, the use of low-orbit satellite groups, transfer switching and routing functions to space, widespread use of inter-satellite links. Satellite network consist of several systems with wireless inter-satellite channels. In this case, network structure is dynamically changing and the traffic distribution analysis becomes much more complicated. In this work, we presented the model of the traffic distribution for satellite network with inter-satellite channels. The base of model is the mesh tensor model. This model allows providing the necessary level of satellite system loads.

Keywords: satellite networks, traffic distribution, tensor analysis of networks.

Современные инфокоммуникационные сети формируют единое пространство для обеспечения потребностей пользователей в доступе к различным информационным ресурсам. С целью реализации глобального доступа к таким ресурсам широко используются технологии спутниковых сетей связи. Существующие технологии предоставления услуг связи в спутниковых сетях имеют множество ограничений, которые на сегодняшний день не позволяют на равных конкурировать с наземными сетями. Таким ограничениями являются [2, 3, 8, 9]: низкая пропускная способность, большие задержки линии и коммутации (маршрутизации), что обусловлено спецификой построения спутниковых систем передачи информации.

Перспективные технологии спутниковых сетей предполагают снижение влияния вышеуказанных недостатков путем использования более широкополосных радиочастотных диапазонов [3, 9], применения низкоорбитальных спутниковых группировок [2, 3], переноса функций коммутации и маршрутизации на орбиту [2, 3, 8], повсеместном внедрении межспутниковых линий [1-3, 8]. Реализация данных подходов к построению спутниковых сетей связи позволит обеспечить единое глобальное инфокоммуникационное пространство необходимыми транспортными механизмами.

1. Предварительные сведения

Исследуемая в данной работе перспективная спутниковая сеть передачи информации состоит из четырех равноправных спутниковых систем (рис.1а). Спутниковые системы взаимодействуют друг с другом путем использования межспутниковых линий передачи [1-3,8]. Предполагается, что спутники используют средневысотные или низкие орбиты для снижения времени задержки.

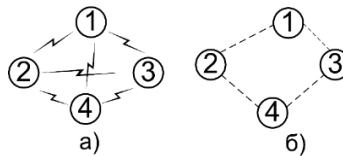


Рис. 1. Структура исследуемой сети

При необходимости, спутниковая сеть может быть построена по полносвязной топологии «каждый с каждым», но в связи с изменяющимися условиями совместного расположения и состояния среды передачи, происходит изменение структуры сети передачи информации. Например, на рис. 1б представлен случай, когда линия между спутниковыми системами 2 и 3 недоступна и тогда связность узлов 1 и 4 будет обеспечиваться организацией обходных маршрутов через узлы 2 и 3. Таким образом, задача состоит в создании модели спутниковой сети, позволяющей в реальном масштабе времени отражать состояние данной сети с целью осуществления возможности по снижению перегрузки сети путем перераспределения трафика по узлам сети.

Исследуемая спутниковая сеть представляет собой несколько систем, связанных беспроводными каналами связи, что, естественно, приводит к тому, что структура данной сети является динамически изменяющейся и задача анализа распределения трафика в такой сети значительно усложняется. Это связано, во-первых, с тем, что оценка распределения трафика в сети обычно производится методами теории массового обслуживания без учета структурных параметров сети; а во-вторых, с плохой формализуемостью таких методов.

Более того, при организации сети передачи данных с динамически изменяющейся топологией необходимо учесть взаимодействие структуры сети и информационных потоков. Учет процессно-структурного взаимодействия классическими методами исследования обычно не производится [4], так как в основном для исследования сетей связи используются теория графов и теория массового обслуживания. Теория графов позволяет исследовать структуру сети без учета влияния процесса обработки информации, а теория массового обслуживания обеспечивает получение вероятностно-временных характеристик систем с неформализованным учетом влияния структуры.

Рассматриваемый в данной работе метод моделирования распределения потоков в перспективных спутниковых сетях позволяет решить задачу учета процессно-структурного взаимодействия с использованием тензорного подхода. При этом обеспечивается хорошая формализация предлагаемого метода [5].

2. Тензорная модель исследуемой сети.

В качестве инварианта использовано выражение загрузки [7], как произведение средней длительности обслуживания на интенсивность потоков в системах распределения информации: $\rho = \bar{t} \lambda$. В таком случае, исходными данными являются предварительные загрузки систем распределения информации и средняя длительность обслуживания. Использование данного метода позволяет найти распределение интенсивностей потоков по сети с учетом ее топологии.

В данном методе рассматривается модель сети, обладающая структурой, состоящей из замкнутых путей (контуров), которая определена, как структура исходной сети. Уравнение поведения исходной сети записывается, как: $\rho_\alpha = t_{\alpha\alpha} \lambda^\alpha$.

Примитивная сеть является декомпозиционной относительно исходной сети модели, является контурной (рис. 2: λ_i – интенсивности информационных потоков, ρ_i – загрузки систем распределения информации, \bar{t}_i – средняя длительность обслуживания) и состоит из несвязанных контуров. Уравнение поведения примитивной сети записывается, как: $\rho_\beta = t_{\beta\beta} \lambda^\beta$. Количество систем (n) в примитивной сети равно количеству систем в исходной сети.

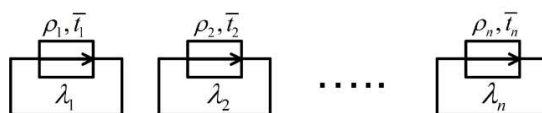


Рис. 2. Пример примитивной контурной сети

Геометрическими объектами, необходимыми для описания такой примитивной сети, являются: вектор интенсивности потоков вызовов в системах Λ , вектор загрузки систем

распределения информации \mathbf{P} , тензор средней длительности обслуживания \mathbf{T} . Тогда, уравнение состояния для примитивной сети, в общем случае, имеет вид: $\mathbf{P} = \mathbf{T}\mathbf{\Lambda}$.

Вспомогательная сеть обеспечивает учет структуры исходной сети при объединении систем примитивной сети и для исследуемых сетей также содержит информацию о путях передачи трафика. Возбуждение вспомогательной сети производится контурными интенсивностями $\lambda^{\beta'}$, вызывающими в сети отклик в виде загрузок сети $\rho_{\beta'}$. Уравнение поведения вспомогательной сети записывается, как: $\rho_{\beta'} = t_{\beta'\beta'} \lambda^{\beta'}$. Во вспомогательной системе координат исходная контурная сеть заменяется контурной сетью, которая формируется при объединении систем, составляющих примитивную сеть.

Далее, необходимо определить тензор и формулы преобразования. Тензор преобразования это геометрический объект, связывающий переменные примитивной и вспомогательной сети. Уравнение преобразования тогда записывается, как: $\lambda^{\beta} = C_{\beta'}^{\beta} \lambda^{\beta'}$ или $\mathbf{\Lambda} = \mathbf{C}\mathbf{\Lambda}'$, где $\mathbf{\Lambda}$ – вектор интенсивности поступления вызовов для примитивной сети; $\mathbf{\Lambda}'$ – вектор контурных интенсивностей поступления вызовов; $C_{\beta'}^{\beta}$ – тензор преобразования интенсивностей потоков. Тензор преобразования определяет преобразование координат при переходе от примитивной к вспомогательной системе.

Элементы строки i тензора $C_{\beta'}^{\beta}$ показывают контурные потоки, проходящие через i систему распределения информации, элементы j столбца содержат информацию о системах, входящих в j контур. Для оценки вероятностно-временных характеристик исследуемой сети необходимо рассматривать контуры, как пути передачи информации от генератора пакетов или сообщений (источник) к приемнику (получателю) информации.

Для нахождения элементов матрицы преобразования в вспомогательной сети рассматриваются контурные интенсивности потоков контуров и для каждой системы они выражаются через интенсивности примитивной сети в соответствии с их местом в исходной.

При этом, для вспомогательной сети уравнение состояния приобретает вид: $\mathbf{P}' = \mathbf{T}'\mathbf{\Lambda}'$. В общем виде уравнение может быть записано, как: $\rho_{\beta'} = t_{\beta'\beta'} \lambda^{\beta'}$.

В связи с тем, что в общем случае модели сетей связи являются ортогональными, то предварительно необходимо привести структуру модели к контурному виду. Для этого необходимо ввести мнимые системы, которые будут обеспечивать выполнение условия

$\sum_j \lambda_{source,j} = \sum_i \lambda_{destination,i}$, и сформируют замкнутые контуры между источником и получателем (в

качестве примера рис. 3: система 1 – источник, система 8 – получатель, система 25 – мнимая). В таком случае, тензор преобразования может быть представлен в виде: $C_{\beta'}^{\beta} = \begin{pmatrix} R_{\beta'}^{\beta} \\ U_{\beta'}^{\beta} \end{pmatrix}$, где $R_{\beta'}^{\beta}$ описывает участие реальных систем в организации путей, $U_{\beta'}^{\beta}$ описывает участие мнимых ветвей.

Для установления формул преобразования геометрических объектов используются следующие предположения. Во-первых, что поток вызовов с одной и той же интенсивностью поступления вызовет при неизменной интенсивности обслуживания одну и ту же загрузку устройств при изменении структуры и можно считать, что будет выполняться соотношение (инвариант) : $\mathbf{P}^T \mathbf{\Lambda} = (\mathbf{P}')^T \mathbf{\Lambda}'$, где переменные со штрихом для вспомогательной структуры сети (содержащей информацию о топологии исходной сети), без штриха для декомпозиционной структуры сети (примитивной сети). Во-вторых, объединение систем в единую сеть не вызывает никаких изменений процесса обслуживания информационного потока, т.е. тогда анализ любой сложной системы (сети) будет связан с определением простейшего элемента, его свойств и переносом алгоритма анализа на всю сложную систему (сеть). В-третьих, изменение структуры сети не предполагает качественное изменение основных соотношений между физическими величинами, описывающими простейший элемент, а определяет только их численное изменение. В тензорной нотации используемый инвариант записывается, как: $\rho_{\beta} \lambda^{\beta} = \rho_{\beta'} \lambda^{\beta'}$. Топология исходной сети учитывается путем использования тензора преобразования \mathbf{C} , связывающего интенсивности поступления в системы примитивной сети и интенсивности поступления в системы вспомогательной сети, как: $\mathbf{\Lambda} = \mathbf{C} \mathbf{\Lambda}'$ или $\lambda^{\beta} = C_{\beta'}^{\beta} \lambda^{\beta'}$. Следовательно, подставляя данное выражение в инвариантное можно определить правила преобразования для вектора загрузки исходной сети через загрузки примитивной или декомпозиционной сети в виде: $\rho_{\beta'} = (C_{\beta'}^{\beta})_i \rho_{\beta}$. Тогда для нахождения правила преобразования для тензора средней длительностей обслуживания, используем уравнение состояния примитивной сети ($\rho_{\beta} = t_{\beta\beta} \lambda^{\beta}$), из которого получаем, что искомое правило определяется, как: $t_{\beta'\beta'} = (C_{\beta'}^{\beta})_i t_{\beta\beta} C_{\beta'}^{\beta}$. Таким образом, уравнение состояния вспомогательной сети приобретает следующий вид:

$$(C_{\beta'}^{\beta})_i \rho_{\beta} = (C_{\beta'}^{\beta})_i t_{\beta\beta} C_{\beta'}^{\beta} \lambda^{\beta}. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) относительно контурных интенсивностей ($\lambda^{\beta'}$) позволит найти распределение трафика в исследуемой спутниковой сети, как:

$$\lambda^{\alpha} = C_{\beta'}^{\alpha} \lambda^{\beta'}. \quad (2)$$

Так как структура вспомогательной сети совпадает со структурой исходной, то $C_{\beta'}^{\alpha} = C_{\beta'}^{\beta}$. Распределение трафика определяется выражением (2), из которого загрузка для каждой системы может быть найдена, как: $\rho_{\alpha} = t_{\alpha\alpha} \lambda^{\alpha}$ или $\mathbf{P} = \mathbf{T}\mathbf{\Lambda}$. Нахождение распределения трафика в сети позволяет найти перегруженные участки и разработать методы перенаправления потоков информации для предотвращения перегрузки. Следовательно, разработанная модель позволит оценить эффективность работы исследуемой сети с целью повышения ее производительности.

3. Численные результаты.

Структура модели исследуемой сети формируется в соответствии с алгоритмом, представленным в [6], с разделением функций каналов передачи и систем обработки. Таким образом в структуре модели (рис. 3) общее число систем составляет 36, двадцать четыре из которых реальные, а 12 мнимые, описывающие пары источник-получатель информации.

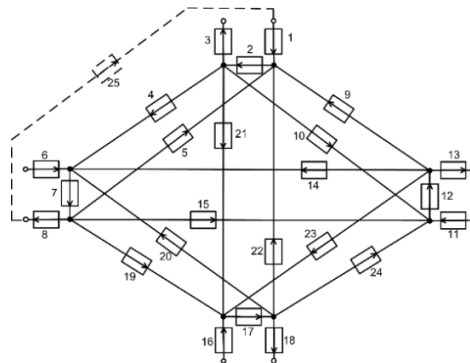


Рис. 3. Структура модели исследуемой сети

Пользовательский трафик поступает на спутниковые системы 1,2,3 и 4 (рис. 1) через системы модели 1,6,11 и 16 (рис. 3) соответственно. Каналы передачи между спутниками 1 и 2 моделируются системами 4,5. Аналогичную роль выполняют системы 9,10 (канал спутник 1-спутник 3); 21,22 (канал спутник 1-спутник 4); 14,15 (канал спутник 2-спутник 3); 19,20 (канал спутник 2-спутник 4); 23,24 (канал спутник 3-спутник 4). Мнимые системы формируют замкнутые контуры. В качестве примера мнимой системы приведена система 25, нагрузка которой определяется трафиком между спутниками 1 и 2. В исследуемой сети заданы основные маршруты передачи (номера указывают номер спутника, рис. 1): 1-2, 1-3, 1-4, 2-1, 2-3, 2-4, 3-1, 3-2, 3-4, 4-1, 4-2, 4-3; и обходные: 1-2-4, 1-3-4, 4-3-1, 4-2-1. Таким образом, формируется 16 маршрутов передачи.

В качестве исходных данных выбраны следующие. Длительность обслуживания во всех системах кроме 2,7,12,17 равна 0.01, в указанных системах длительность выбрана значением 0.001, так как это модели высокоскоростных систем обработки на борту. Предварительные интенсивности определяются исходя из требований по недопустимости перегрузки систем и равны 0.3 для всех систем кроме 1,6,11,16 (данные системы являются источниками трафика), для которых выбраны значения: 0.9 для 1 и 6, 1.2 для 11 и 16.

В таком случае, используя информацию об участии отдельных систем в организации пути можно сформировать матрицу перехода C (здесь не приводится в связи с большой размерностью).

Первые три столбца данной матрицы определяются путями от первого спутника ко второму, третьему и четвертому спутникам. Вторые три столбца устанавливаются путями к первому спутнику от второго, третьего и четвертого спутниковых узлов. С седьмого по двенадцатый столбцы связаны с направлениями передачи с третьего и четвертого спутника. Столбцы тринадцатый и четырнадцатый формируют обходные маршруты с первого спутника к четвертому, а пятнадцатый и шестнадцатый столбцы обеспечивают направления передачи трафика по обходным маршрутам в направлении спутник 4-спутник 1. Ненулевые элементы строки соответствуют участию ветви с номером равным номеру строки в организации пути передачи информации. Нижняя часть матрицы связана с мнимыми ветвями, участие которых в топологии определяется путями передачи информации.

Решение уравнения (1) позволило найти контурные интенсивности для данной сети, и использование выражения (2) обеспечило нахождение распределения трафика в исследуемой сети. Полученное распределение обеспечивает для всех систем загрузку, не превышающую единицы. Например, трафик поступающий от пользователей спутника 1 составил 75.375 у.е., который был распределен по ветвям 4, 10 и 21, как 30.128 у.е., 27.186 у.е. и 18.061 у.е. соответственно, что составило загрузку систем 1, 4, 10, 21: 0.754, 0.301, 0.272, 0.181.

Полученные результаты позволяют о возможности применения контурной модели для анализа распределения трафика в перспективных инфокоммуникационных спутниковых сетях с организацией межспутниковых каналов связи.

Заключение

В связи с тем, что в современных и перспективных спутниковых сетях необходимо управлять большим количеством систем при динамическом изменении топологии сети и обеспечивать обработку множества информационных потоков с заданным качеством обслуживания для каждого типа потока, решение задачи управления эффективным использованием ресурсов сети

значительно усложняется. Тензорный анализ сетей позволяет учитывать процессно-структурное взаимодействие, проявляющееся в сетях, обладает высокой гибкостью применения и обеспечивает хорошую формализуемость проектных процедур для решения данной задачи, что в свою очередь позволяет задать требуемый уровень загрузки систем при динамическом управлении инфокоммуникациями и обеспечить хорошую масштабируемость сети как при внедрении новых услуг, так и при изменении структуры и внедрении новых технологий инфокоммуникационной спутниковой сети.

Список литературы

1. Ковалев А.М., Лямичева Т.Ю., Пономарев Д.Ю. Глобальная инфокоммуникационная сеть с использованием пикоспутников // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 546-548.
2. Мальцев Г. Н. Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи // Информационно-управляющие системы. – 2007. – № 1. – С. 33 – 39.
3. Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных / Под ред. А.И.Галькевича. – Тамбов: ООО «Издательство Юлис», 2011. – 169 с.
4. Петров А.Е. Тензорный метод двойственных сетей. – М. : ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2007. – 496 с.
5. Пономарев Д.Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик сетей массового обслуживания контурным методом тензорного анализа // ФИПС (Роспатент). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – Рег. №2010616674. – Дата: 07.10.2010.
6. Пономарев Д.Ю. Исследование характеристик пакетных сетей узловым методом тензорного анализа // Программные продукты и системы. – 2009. – 4. – С. 65-69.
7. Пономарев Д.Ю. Контурный метод тензорного анализа инфокоммуникационных сетей // Materiály X mezinárodní vědecko - praktická konference «Efektivní nástroj moderních věd – 2014». Matematika. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2014. – S. 68-73.
8. Фатеев В.Ф., Каргу Д.Л. Перспективная сеть передачи данных для локальной группировки малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – 4. – С. 46–50.
9. Sun Zhili. Satellite networking : principles and protocols - Second edition. – The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex : John Wiley & Sons Ltd., 2014. – 508 p.

Рецензенты:

Петров М.Н., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО СибГАУ, г. Красноярск;

Антамошкин А.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры САиИО ФГБОУ ВПО Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск.