

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАФИКА В МЕЖСПУТНИКОВЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ КОНТУРНЫМ МЕТОДОМ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ¹

DETERMINATION OF THE OPTIMAL DISTRIBUTION OF TRAFFIC IN INTERSATELLITE COMMUNICATION CHANNELS BY THE CONTOUR METHOD ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMUM BANDWIDTH

**D. Abramchik
K. Gaipov
I. Krikunov
N. Shpiger**

Summary. The subject of research in this article is a satellite system for remote sensing of the Earth, for which it is necessary to calculate the optimal traffic flow through the satellite–Earth station and satellite–satellite communication channels, which would require a minimum amount of bandwidth of these channels. This study is of great interest, since such systems in the modern world are used in most spheres of human life. It follows from this that finding the optimal parameters for the satellite–Earth station and satellite–satellite communication channels affects the efficiency of the system, and therefore the completeness and quality of the information transmitted from satellites to Earth. Some scheme is considered, which is an example of a satellite system for which a mathematical model was compiled using the contour method. The mathematical model was developed based on the assumptions of a deterministic information flow, which made it possible to reduce the formulation of the problem to a linear objective function and constraints. Thanks to the obtained model, a sample of possible flow values and bandwidth of communication channels was obtained, taking into account the limitation of their sum, when setting flow values on the satellite — Earth station channels.

Keywords: satellite communication, traffic distribution, contour method.

Абрамчик Даниил Дмитриевич

Сибирский государственный университет науки
и технологии им. академика М.Ф. Решетнева
abramchik_daniil@mail.ru

Гаипов Константин Эдуардович

Ведущий научный сотрудник научной лаборатории
Спутниковые телекоммуникационные системы;
кандидат тех. наук, Сибирский государственный
университет науки и технологии им. академика
М.Ф. Решетнева

Крикунов Илья Леонидович

Младший научный сотрудник научной
лаборатории Спутниковые телекоммуникационные
системы, Сибирский государственный университет
науки и технологии им. академика М.Ф. Решетнева

Шпигер Никита Владимирович

Сибирский государственный университет науки
и технологии им. академика М.Ф. Решетнева

Аннотация. Предметом исследования в данной статье является спутниковая система для дистанционного зондирования Земли, для которой необходимо произвести расчеты оптимального прохождения трафика по каналам связи спутник — земная станция и спутник — спутник, при которой требовалась бы минимальная сумма пропускных способностей данных каналов. Данное исследование представляет большой интерес, поскольку такие системы в современном мире находят применение в большинстве сфер человеческой жизни. Из этого следует, что нахождение оптимальных параметров для каналов связи спутник — земная станция и спутник — спутник влияет на эффективность использования системы, а значит на полноту и качество передаваемой информации со спутников на Землю. Рассмотрена некоторая схема, представляющая собой, пример спутниковой системы, для которой была составлена математическая модель, с помощью использования метода контуров. Математическая модель разрабатывалась исходя из предположений детерминированного информационного потока, что позволило свести постановку задачи к линейной целевой функции и ограничениям. Благодаря полученной модели, был получен образец возможных значений потоков и пропускных способностей каналов связи, с учетом ограниченности их суммы, при задании значений потоков на каналах спутник — земная станция.

Ключевые слова: спутниковая связь, распределение трафика, контурный метод.

¹ Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева

Спутниковые системы для дистанционного зондирования Земли (далее ДЗЗ) являются незаменимым инструментом изучения и постоянного мониторинга нашей планеты, помогающий эффективно использовать и управлять её ресурсами [1]. Данные системы позволяют производить сбор и передачу информации с территорий, где из-за особенностей поверхности Земли проведение оптоволоконной связи является труднодоступным. Они могут использоваться для изучения природных ресурсов Земли и решения задач метеорологии [2], а также множество других задач [3]. Для решения таких задач в России корпорация «Роскосмос» разрабатывает проект «Сфера». Планируется, что благодаря этому проекту будет создана самая современная система коммуникаций и мониторинга, включающая в себя существующую и перспективную космическую инфраструктуру [4]. Поскольку данные технологии нашли большое применение в различных сферах человеческой жизни, то задачи оптимизации трафика в системах ДЗЗ является приоритетной.

Однако, в процессе эксплуатации, в системах ДЗЗ могут возникнуть проблемы, из-за которых сбор и передача информации будут происходить с ошибками. Например, недостатком применения современных средств ДЗЗ является низкая оперативность получения информации [5]. Некоторые наблюдения трудно интегрировать в космосе (например, облака), а также использование данных становится экономически неэффективным при единичных исследованиях небольших территорий [6]. Существует проблема пересечения областей покрытия космических аппаратов (далее КА). Она наиболее характерна для негеостационарных спутниковых систем связи (далее, НГССС), поскольку туда обычно входят системы на круговых низких и средних орбитах [6]. Если абоненты находятся в покрытии одного КА, то этот аппарат напрямую обеспечивает связь между ними. В случае если абоненты находятся в области покрытия разных КА, то возникает необходимость в передаче их данных от одного КА другому. Существует два способа решения данной проблемы:

1. Увеличение числа земных станций (далее ЗС). Из-за различных особенностей поверхности Земли, такой способ является очень затруднительным.
2. Связать КА межспутниковыми линиями в полную спутниковую сеть (если не учитывать связи с абонентскими терминалами, находящимися за пределами радиовидимости), чтобы каждый КА ССС мог связаться с другим любым КА ССС через другие КА, не обращаясь к ЗС [7], [8]. В данной сети возникает проблема маршрутизации.

Информационное взаимодействие между спутниками группировки и между спутниками и наземными станциями является неотъемлемым элементом авто-

номного планирования и управления [9]. Эта взаимодействие представляет собой каналы связи по которым все КА передают информацию друг другу и затем передается на ЗС. Поэтому получаемую информацию от каждого спутника системы ДЗЗ, можно представить в виде потока трафика, идущего по каналам до спутников, связанных с ЗС. Причем каждый канал связи может использоваться для нескольких маршрутов в этом случае суммарное требование маршрутов к пропускной возможности канала может превышать остаточную пропускную способность [10]. Расчет оптимального распределения может позволить обеспечивать более надежную и эффективную передачу данного трафика.

Постановка задачи

Имеется некоторая схема расположения КА, которая является примером системы ДЗЗ (рис. 1). Предполагается, что большинство КА имеет постоянную связь между собой, а также некоторые из аппаратов имеют постоянную связь с ЗС. Пропускная способность в каналах связи спутник — спутник одинаковы, также, как и в каналах спутник — Земля. Необходимо сформировать математическую модель для расчета оптимального распределения трафика.

Решение

Представим данную схему в виде направленного графа (рис. 2), вершинами являются КА и Земля, каналы связи представлены направленными ребрами.

В данном случае для формирования математической модели возможно использовать несколько способов, представленных в исследованиях [11], [12] и [13], которые основаны на тензорном методе [14]. Рассмотрим формирование с помощью контурного метода. Согласно данному методу сеть представляется как совокупность геометрических объектов в пространстве и размерность определяется топологией сети. Из этого следует, что преимуществом является простота алгоритма получения математической модели, решение которой, в зависимости от поставленных ограничений, обеспечивает оптимальное распределение трафика между сайтами. Поскольку каждый источник, генерирующий трафик, является независимым от других источников, то поток в каждом ребре, создаваемый i -м источником, будет выражен линейной комбинацией контурных интенсивностей для соответствующего источника. Под контурной интенсивностью, понимается поток, циркулирующий в линейно-независимом контуре графа. Контурная интенсивность, создаваемая источником i численно равна потоку в соответствующей

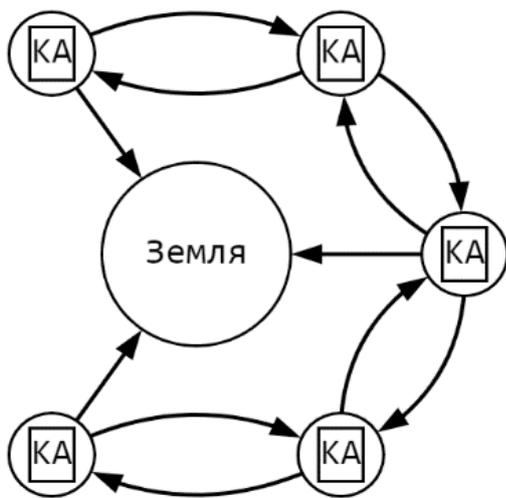


Рис. 1. Пример некоторой системы ДЗЗ

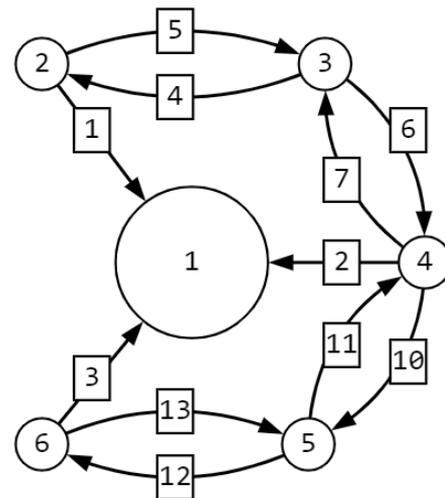


Рис. 2. Представление системы ДЗЗ в виде направленного графа

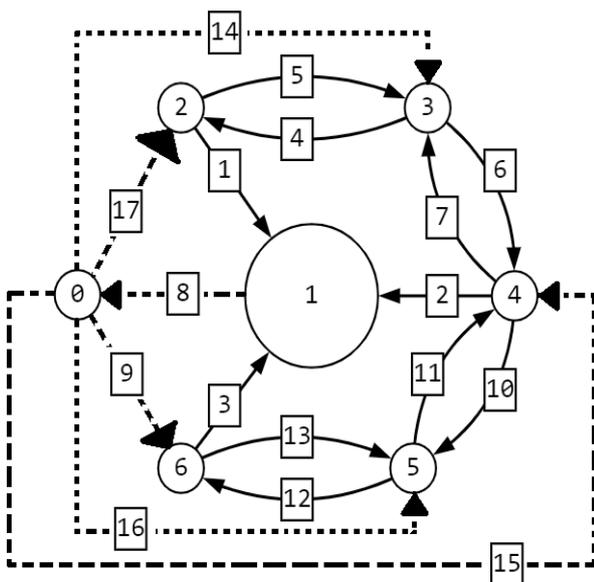


Рис. 3. Новый граф, полученный путем добавления дополнительной вершины

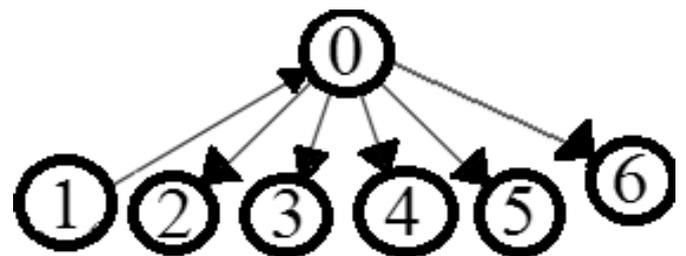


Рис. 4. Дерево полученного на рисунке 3 графа

хорде [15]. Чтобы воспользоваться контурным методом решения необходимо привести имеющуюся схему к замкнутому виду. Для удобства введем дополнительную, нулевую, вершину (рис. 3) и соединим её со всеми остальными. Поскольку суммы потоков, которые поступают в сеть и выходят из неё, равны между собой, то это эквивалентно объединению рёбер истоков и стоков между собой как показано на рисунке 3. В данном случае ребра 9, 14, 15, 16, 17 являются ребрами истоков, а ребро 8 является ребром стока.

Поскольку количество контурных интенсивностей равно количеству хорд, для их поиска необходимо определить дерево данного графа (рис 4).

Ребра, содержащиеся в дереве графа, являются его ветвями. Все остальные ребра являются хордами. Количество линейно-независимых контуров в графе определяется его цикломатическим числом $\nu = n - m + p$, где n число ребер графа, m — число узлов в графе, p — число несвязанных компонент графа, в данном случае

$$\Lambda n' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \times \begin{pmatrix} \lambda n_1 \\ \lambda n_2 \\ \lambda n_3 \\ \lambda n_4 \\ \lambda n_5 \\ \lambda n_6 \\ \lambda n_7 \\ \lambda n_{10} \\ \lambda n_{11} \\ \lambda n_{12} \\ \lambda n_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda n_1 \\ \lambda n_2 \\ \lambda n_3 \\ \lambda n_4 \\ \lambda n_5 \\ \lambda n_6 \\ \lambda n_7 \\ \lambda n_{10} \\ \lambda n_{11} \\ \lambda n_{12} \\ \lambda n_{13} \\ \lambda n_1 + \lambda n_2 + \lambda n_3 \\ \lambda n_3 - \lambda n_{12} + \lambda n_{13} \\ \lambda n_4 - \lambda n_5 - \lambda n_6 + \lambda n_7 \\ \lambda n_2 + \lambda n_6 - \lambda n_7 - \lambda n_{10} + \lambda n_{11} \\ \lambda n_{10} - \lambda n_{11} + \lambda n_{12} - \lambda n_{13} \\ \lambda n_1 - \lambda n_4 + \lambda n_5 \end{pmatrix}$$

Рис. 7

последние шесть элементов показывают значение потоков в ветвях создаваемые источником n.

Для определения суммарного потока по всем ребрам необходимо просуммировать вектора $\Lambda n'$.

$$\Lambda_{\Sigma} = \sum \Lambda n'$$

Из вектора Λ_{Σ} берем строки, относящиеся к потокам в хордах, в нашем случае это первые 11 строк, и формируем следующую систему неравенств:

$$\begin{pmatrix} \lambda 9_1 + \lambda 14_1 + \lambda 15_1 + \lambda 16_1 + \lambda 17_1 \\ \lambda 9_2 + \lambda 14_2 + \lambda 15_2 + \lambda 16_2 + \lambda 17_2 \\ \lambda 9_3 + \lambda 14_3 + \lambda 15_3 + \lambda 16_3 + \lambda 17_3 \\ \lambda 9_4 + \lambda 14_4 + \lambda 15_4 + \lambda 16_4 + \lambda 17_4 \\ \lambda 9_5 + \lambda 14_5 + \lambda 15_5 + \lambda 16_5 + \lambda 17_5 \\ \lambda 9_6 + \lambda 14_6 + \lambda 15_6 + \lambda 16_6 + \lambda 17_6 \\ \lambda 9_7 + \lambda 14_7 + \lambda 15_7 + \lambda 16_7 + \lambda 17_7 \\ \lambda 9_{10} + \lambda 14_{10} + \lambda 15_{10} + \lambda 16_{10} + \lambda 17_{10} \\ \lambda 9_{11} + \lambda 14_{11} + \lambda 15_{11} + \lambda 16_{11} + \lambda 17_{11} \\ \lambda 9_{12} + \lambda 14_{12} + \lambda 15_{12} + \lambda 16_{12} + \lambda 17_{12} \\ \lambda 9_{13} + \lambda 14_{13} + \lambda 15_{13} + \lambda 16_{13} + \lambda 17_{13} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} R_1 \\ R_1 \\ R_1 \\ R_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где R_1 — пропускная способность каналов спутник — Земля, R_2 — пропускная способность каналов спутник — спутник.

Формула (1) показывает, что пропускная способность каналов должна всегда быть больше либо равна интенсивности трафика, протекающего через них.

Для ребер являющихся стоками необходимо указать, что их значения не отрицательны, в нашем случае это означает, что 12-й элемент векторов $\Lambda n'$ больше либо равен нулю, $\lambda n_1 + \lambda n_2 + \lambda n_3 \geq 0 \forall n$, отметим что данное условие не обязательно, так как в сети нет потерь, следовательно поток в стоке от источника n будет равен значению потока в источнике.

Структура спутниковой сети ДЗЗ такова, что значения потоков в ветвях, которые являются ребрами источниками, является известной величиной, эти значения определяются исходя из объема генерируемой информации, создаваемой спутником ДЗЗ. В данном примере имеется пять источников, данные от которых поступают в сеть по ребрам 9, 14, 15, 16 и 17. Также очевидно, что потоки, создаваемые определенным источником, не могут создавать нагрузку на ребра, через которые поступают данные от других источников, то есть эти потоки равны нулю, исходя из сказанного можно сформировать следующую систему уравнений используя элементы с 13 по 17 из матриц $\Lambda n'$:

$$\begin{pmatrix} \lambda 9_3 - \lambda 9_{12} + \lambda 9_{13} \\ \lambda 9_4 - \lambda 9_5 - \lambda 9_6 + \lambda 9_7 \\ \lambda 9_2 + \lambda 9_6 - \lambda 9_7 - \lambda 9_{10} + \lambda 9_{11} \\ \lambda 9_{10} - \lambda 9_{11} + \lambda 9_{12} - \lambda 9_{13} \\ \lambda 9_1 - \lambda 9_4 + \lambda 9_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 50 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda 14_3 - \lambda 14_{12} + \lambda 14_{13} \\ \lambda 14_4 - \lambda 14_5 - \lambda 14_6 + \lambda 14_7 \\ \lambda 14_2 + \lambda 14_6 - \lambda 14_7 - \lambda 14_{10} + \lambda 14_{11} \\ \lambda 14_{10} - \lambda 14_{11} + \lambda 14_{12} - \lambda 14_{13} \\ \lambda 14_1 - \lambda 14_4 + \lambda 14_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$\lambda 9_1 = 0; \lambda 9_2 = 0; \lambda 9_3 = 50; \lambda 9_4 = 0; \lambda 9_5 = 0; \lambda 9_6 = 6,667; \lambda 9_7 = 6,667; \lambda 9_{10} = 0; \lambda 9_{11} = 0; \lambda 9_{12} = 0; \lambda 9_{13} = 0; \lambda 14_1 = 20; \lambda 14_2 = 0; \lambda 14_3 = 0; \lambda 14_4 = 20; \lambda 14_5 = 0; \lambda 14_6 = 0; \lambda 14_7 = 0; \lambda 14_{10} = 0; \lambda 14_{11} = 0; \lambda 14_{12} = 0; \lambda 14_{13} = 0; \lambda 15_1 = 0; \lambda 15_2 = 30; \lambda 15_3 = 0; \lambda 15_4 = 0; \lambda 15_5 = 0; \lambda 15_6 = 0; \lambda 15_7 = 0; \lambda 15_{10} = 0; \lambda 15_{11} = 0; \lambda 15_{12} = 0; \lambda 15_{13} = 0; \lambda 16_1 = 3,333; \lambda 16_2 = 20; \lambda 16_3 = 16,667; \lambda 16_4 = 3,333; \lambda 16_5 = 0; \lambda 16_6 = 3,333; \lambda 16_7 = 0; \lambda 16_{10} = 23,333; \lambda 16_{11} = 0; \lambda 16_{12} = 16,667; \lambda 16_{13} = 0; \lambda 17_1 = 43,333; \lambda 17_2 = 16,667; \lambda 17_3 = 0; \lambda 17_4 = 0; \lambda 17_5 = 16,667; \lambda 17_6 = 0; \lambda 17_7 = 16,667; \lambda 17_{10} = 0; \lambda 17_{11} = 0; \lambda 17_{12} = 6,667; \lambda 17_{13} = 6,667; R_1 = 66,667; R_2 = 23,333$

Рис. 8

$$\begin{pmatrix} \lambda 15_3 - \lambda 15_{12} + \lambda 15_{13} \\ \lambda 15_4 - \lambda 15_5 - \lambda 15_6 + \lambda 15_7 \\ \lambda 15_2 + \lambda 15_6 - \lambda 15_7 - \lambda 15_{10} + \lambda 15_{11} \\ \lambda 15_{10} - \lambda 15_{11} + \lambda 15_{12} - \lambda 15_{13} \\ \lambda 15_1 - \lambda 15_4 + \lambda 15_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 30 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda 16_3 - \lambda 16_{12} + \lambda 16_{13} \\ \lambda 16_4 - \lambda 16_5 - \lambda 16_6 + \lambda 16_7 \\ \lambda 16_2 + \lambda 16_6 - \lambda 16_7 - \lambda 16_{10} + \lambda 16_{11} \\ \lambda 16_{10} - \lambda 16_{11} + \lambda 16_{12} - \lambda 16_{13} \\ \lambda 16_1 - \lambda 16_4 + \lambda 16_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 40 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda 17_3 - \lambda 17_{12} + \lambda 17_{13} \\ \lambda 17_4 - \lambda 17_5 - \lambda 17_6 + \lambda 17_7 \\ \lambda 17_2 + \lambda 17_6 - \lambda 17_7 - \lambda 17_{10} + \lambda 17_{11} \\ \lambda 17_{10} - \lambda 17_{11} + \lambda 17_{12} - \lambda 17_{13} \\ \lambda 17_1 - \lambda 17_4 + \lambda 17_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 60 \end{pmatrix}$$

Последним ограничением является то что значения пропускных способностей каналов является не отрицательной величиной, то есть $R_1 \geq 0$ и $R_2 \geq 0$.

Далее определяем целевую функцию как суммы пропускных способностей, с условием минимума, межспутникового канала и канала спутник — ЗС

$$f(\lambda n_m, R_1, R_2) = R_1 + R_2 \rightarrow \min$$

Отметим, что в более общем виде можно разбить все каналы на G групп, и задать, что скорости каналов в рамках этой группы одинаковые, в этом случае целевая функция будет выглядеть следующим образом:

$$f(\lambda n_m, R_1, \dots, R_G) = \sum_{i=1}^G R_i \rightarrow \min$$

И в результате получим значения потоков в каналах, а также пропускных способностей каналов, представленные на рис. 8.

Заключение

С помощью данной математической модели и заданными потоками на ветвях, можно определить оптимальное распределение трафика по каналам связи системы ДЗЗ. Таким образом, в результате моделирования получается, что пропускная способность межспутникового канала должна быть равна $R_2=23,333$ ед.инф/с, а скорость между спутником и наземной станцией должна быть $R_1=66.667$ ед.инф/с. Предложенная математическая модель является базовой, так как может быть расширена путем добавления дополнительных ограничений на загрузку каналов, задержки и/или потери информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дистанционное зондирование Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/24707/>
2. Хабаров Д.А., Адиев Т.С., Попова О.О., Чугунов В.А., Кожевников В.А. Анализ современных технологий дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-tehnologiy-distsionnogo-zondirovaniya-zemli/viewer>
3. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие; Москва, 2010. 536 стр.
4. Проект «Сфера» переходит к практической реализации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/33771/>
5. Привалов А.Е., Федяев В.В., Бугайченко П.Ю. «Применение многоакцентных технологий для построения имитационных моделей многоспутниковых орбитальных группировок дистанционного зондирования земли» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47151733>
6. Михаленко Е.Б., Беляев Н.Д., Боголюбова А.А., Вилькевич В.В., Загрядская Н.Н., Ковязин А.В. Инженерная геодезия. Использование современного оборудования для решения геодезических задач: учеб. пособие; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013. 98 стр.

7. Иванов В.И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-tsentralizovannoy-mnogoputevoy-marshrutizatsii-s-balansirovkoj-nagruzki-v-negeostatsionnoy-sputnikovoy-sisteme-svyazi-s-mejsputnikovymi-linijami>
8. Аганесов А.В., Макаренко С.И. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе mesh-технологий [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26281305>
9. Карсаев О.В. Имитационное моделирование автономного управления группировкой малых спутников [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-avtonomnogo-upravleniya-gruppirovkoj-malyh-sputnikov/viewer>
10. Карсаев О.В. Концептуальная модель маршрутизации данных в многоспутниковой низкоорбитальной системе связи [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnaya-model-marshrutizatsii-dannyh-v-mnogosputnikovoy-nizkoorbitalnoy-sisteme-svyazi/viewer>
11. Гутковская О.Л., Пономарев Д.Ю. Контурный метод анализа сетей VPN: Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1 Стр. 343.
12. Гутковская О.Л., Пономарев Д.Ю. Узловой метод анализа сетей VPN: Фундаментальные исследования. 2015. № 11–5 Стр. 875–881.
13. Гутковская О.Л., Пономарев Д.Ю. Ортогональный метод анализа сетей VPN: Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7–1. Стр. 30–37.
14. Крон Г. Тензорный анализ сетей. — М.: Сов. радио, 1978. — 719 с.
15. Гутковская О.Л. Топологический метод формирования математической модели телекоммуникационной сети на основе матрицы контуров [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/topologicheskij-metod-formirovaniya-matematicheskoy-modeli-telekommunikatsionnoy-seti-na-osnove-matritsy-konturov/viewer>

© Абрамчик Даниил Дмитриевич (abramchik_daniil@mail.ru),

Гаипов Константин Эдуардович, Шпигер Никита Владимирович .

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва