

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 517.9

С.Н. Назаров

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕАЛИЗАЦИИ РЕСУРСОВ РЕТРАНЛЯЦИОННЫХ УЗЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБМЕН В ГИБРИДНОЙ СЕТИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Назаров Сергей Николаевич, кандидат технических наук, окончил Военную академию связи им. С.М. Буденного, адъюнктуру Ульяновского высшего военного инженерного училища связи. Докторант Ульяновского государственного технического университета, доцент кафедры информатики Ульяновского высшего авиационного училища гражданской авиации (института). Имеет статьи и публикации в области моделирования систем и сетей беспроводной передачи информации. [e-mail: art3456@rambler.ru].

Аннотация

Рассмотрен приближенный метод анализа спутниковых сетей связи на низкой орбите. Данный метод позволяет оценить влияние основных системных параметров низкоорбитальной спутниковой системы связи (НССС), как элемента гибридной сети беспроводной передачи информации (ГСБПИ) с наиболее динамично изменяющейся топологией, на вероятностно-временные характеристики информационного обмена в таких сетях связи.

Ключевые слова: спутниковая связь на низкой орбите, алгоритмы маршрутизации, зона радиовидимости, протокол чистая АЛОНА, протокол многостанционный доступа, межспутниковые каналы.

Sergey Nikolaevich Nazarov, Candidate of Engineering, graduated from the Military Communications Academy named after S. Budenny, finished his post-graduate study at Ulyanovsk Higher Military Communications Engineering College, doctoral student at Ulyanovsk State Technical University, Associate Professor at the Informatics Chair at Ulyanovsk Higher Civil Aviation School; author of articles and publications in the field of modeling of systems and networks of wireless data transfer. e-mail: art3456@rambler.ru.

Abstract

The article deals with an approximate analysis method for low-orbit satellite communications network. The present method contributes to the evaluation of influence of basic system parameters of low-orbit satellite communications system as a unit of hybrid network of wireless data transfer in case of dynamically varying topology, on probability and time features of information exchange in such communications networks.

Key words: low-orbit satellite communications, routing algorithms, radio-visibility allowed band, protocol pure Aloha, multiple-access protocol, inter-satellite channels.

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее развитие телекоммуникационных технологий будет направлено на создание ГСБПИ, которая строится на основе современных технологий беспроводной передачи информации: сетей радиосвязи декаметрового

диапазона, сетей широкополосного доступа, сетей спутниковой связи [1, 2].

Из анализа функционирования подсетей видно, что ГСБПИ формально может быть представлена трехуровневой структурой: первый уровень составляют центральные земные станции, центры коммутации, узлы обслуживания

сетевых соединений (CSN – connectivity service network), серверы управления радиодоступом; второй уровень иерархии формируют базовые станции радиодоступа, спутниковые ретрансляторы на геостационарной орбите и низкоорбитальные, узлы доступа (ASN – access service network); третий уровень формируют абонентские станции (АС), которые могут быть фиксированными, мигрирующими, мобильными. АС могут объединяться в локальные сети и осуществлять доступ к узлам коммутации (УК) второго уровня в режиме многостанционного доступа или как отдельные станции по выделенным каналам. Передача информации между АС и УК второго уровня осуществляется по беспроводным каналам. Несколько разнесенных в пространстве УК второго уровня могут устанавливать соединение с одной АС в режиме разнесенного приема сигнала [1–5].

Каналы доступа АС к УК ГСБПИ подвержены замираниям. Наиболее эффективным средством борьбы с замираниями является разнесенный прием сигнала [2, 6–11]. В спутниковых сетях связи – это одновременный доступ земной (абонентской) станции к нескольким спутникам-ретрансляторам (СР) на низкой орбите; прием сигнала от СР на геостационарной орбите несколькими земными станциями; одновременный прием несколькими пространственно разнесенными базовыми станциями сигнала от одной АС в сети радиосвязи декаметрового диапазона и в сети широкополосного доступа.

Таким образом, ГСБПИ представляет собой сложную совокупность взаимосвязанных технологий, подсетей и стандартов, реализующую в себе алгоритмы централизованного и распределенного управления [1, 2, 8]. Подчинение такой сети единой цели, как удовлетворение потребностей пользователей в предоставлении им телекоммуникационных услуг с требуемым качеством и стоимостью, является проблемой, для решения которой

требуется рассмотрение вопросов, структурированно показанных на рисунке 1.

Постановка задачи

Одной из важнейших задач, требующих решения в ГСБПИ, является маршрутизация. В отличие от проводных сетей связи топология ГСБПИ и характеристики информационных потоков изменяются чаще, а величина этих изменений в течение даже нескольких десятков секунд может быть очень существенной. Наиболее динамичной является низкоорбитальная сеть спутниковой связи [7].

Маршрутизация включает в себя две основные компоненты: определение оптимальных маршрутов между источником и адресатом и передача информации по выбранному маршруту. Алгоритмы маршрутизации содержат, как правило, следующие процедуры: измерение и оценивание параметров сети; принятие решения о рассылке служебной информации; расчет таблиц маршрутизации; реализация принятых маршрутных решений. Теоретической основой маршрутизации является решение задачи поиска маршрутов между вершинами во взвешенном графе. В этом случае моделью сети связи является ориентированный граф $G(V, E)$, в котором узлы представлены вершинами V , а множество каналов (линий) связи – ветвями (дугами, ребрами) E . Каждой m -й ветви присваивается w_m – вес, равный стоимости пропуска трафика по данной линии связи. Тогда задача маршрутизации формулируется как поиск пути с минимальным весом между каждой парой узлов. При этом вес маршрута вычисляется как сумма весов каждой линии связи, входящей в маршрут. В сети между i и j узлами может существовать K маршрутов. Задача поиска оптимального маршрута заключается в минимизации стоимостной функции по всем возможным маршрутам и представляется как:



Рис. 1. Структура вопросов, рассматриваемых при решении проблемы построения ГСБПИ

$$D_{kj} = \sum_{m \in k_{ij}} w_m, D_{ij} = \min_K D_{k_{ij}}, \quad (1)$$

где D – вес k -го маршрута между узлами i и j ;

$D_{ij}^{k_{ij}}$ – стоимость оптимального маршрута между узлами i и j .

При разработке алгоритмов маршрутизации учитываются следующие показатели эффективности: оптимальность, простота и низкие непроизводительные затраты, живучесть и стабильность, быстрая сходимости, гибкость. В связи с динамически изменяющейся топологией сети и вероятностно-временными характеристиками информационного обмена при исследовании НССС необходимо решать задачи использования различных протоколов многостанционного доступа и алгоритмов маршрутизации одновременно.

Для НССС, как сети с изменяющейся топологией, целесообразно рассматривать динамические алгоритмы маршрутизации: по кратчайшему пути с адаптацией к изменению топологии; по минимуму задержки доставки сообщений; адаптивный алгоритм краткосрочного прогнозирования. В качестве протоколов многостанционного доступа целесообразно рассмотреть следующие [12–14]: модифицированный протокол ALOHA с захватом; протокол глобального расписания с централизованным или распределенным управлением.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Решение задачи осуществляется в два этапа. На первом этапе осуществляется построение модели топологии

сети с использованием адекватной баллистической модели орбитальной группировки. На втором этапе определяются вероятностно-временные характеристики информационного обмена.

Этап построения модели топологии сети характеризуется тем, что на нем определяются вероятности существования совместных зон радиовидимости СР между собой. Пусть два произвольных СР движутся по круговым орбитам с высотами r_1 и r_2 ($r_i = R_3 + H_i$, где R_3 – радиус Земли, H_i – высота орбиты i -го ретранслятора), наклонениями φ_1 и φ_2 , начальными фазами α_1 и α_2 и периодами обращения $T_{об1}$ и $T_{об2}$, соответственно. В этом случае периоды обращения СР определяются как:

$$T_{обi} = (2\pi / \mu)(R_3 + H_i)^{3/2}, \quad (2)$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – гравитационная постоянная Земли, $i = 1, 2$ [7].

Квадрат расстояния между двумя произвольными ретрансляторами определяется как:

$$R^2 = [r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2(\sin \Theta_1 \sin \Theta_2 \cos \Delta\varphi + \cos \Theta_1 \cos \Theta_2)], \quad (3)$$

где $\Theta_i = \omega_i t + \alpha_i$, $\omega_i = 2\pi / T_{обi}$, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Время начала и окончания зон радиовидимости произвольных ретрансляторов определяется решением уравнения (4) при помощи численных методов.

$$t_{ji} = \arccos \left[\frac{\frac{r_j^2 + r_i^2 - R^2}{2r_jr_i} - \sin(\omega_i t + \alpha_i) + \sin(\omega_j t + \alpha_j) \cos \Delta\varphi}{\cos(\omega_i t + \alpha_i)} + 2\pi n - \frac{\alpha_i}{\omega_i} \right], \quad (4)$$

где j и i – номера рассматриваемых ретрансляторов.

Выражение (4) имеет решение, если выражение (5) не выполняется [12–14].

$$\frac{\frac{r_j^2 + r_i^2 - R^2}{2r_jr_i} - \sin(\omega_i t + \alpha_i) + \sin(\omega_j t + \alpha_j) \cos \Delta\varphi}{\cos(\omega_i t + \alpha_i)} > 1. \quad (5)$$

$\{t_i\}$ – множество решений уравнения (5),

где $i = 1, 2 \dots K_{ji}$, причем $0 < t_i < T_{Пji}$;

$T_{Пji}$ – наименьшее общее кратное периодов обращения ретрансляторов j и i соответственно;

K_{ji} – количество зон взаимной радиовидимости за период $T_{Пji}$;

$\Delta T_{Пji}$ – суммарное время пребывания рассматриваемых ретрансляторов в зонах совместной радиовидимости определяется выражением (6):

$$\Delta T_{Пji} = \sum_{z=1}^{K_{ji}} \Delta t_z, \quad (6)$$

где $\Delta t_z = t_{кz} - t_{нz}$, $t_{кz}$ и $t_{нz}$ – время окончания и начала i -й зоны радиовидимости рассматриваемой пары ретрансляторов, которые рассчитываются по (4), причем должно

выполняться неравенство $t_{кz} \leq \Delta T_{Пji}$ [7].

Если неравенство (7) выполняется, то $t_z = t_{нz}$, в противном случае $t_z = t_{кz}$.

$$r_j^2 + r_i^2 - 2r_j r_i (\sin \Theta_1 + \sin \Theta_2 + \cos \Theta_1 \cos \Theta_2) > R^2. \quad (7)$$

Количество зон радиовидимости i -го ретранслятора со всеми остальными СР определяется выражением (8):

$$K_i = \sum_{j \in \Omega} K_{ij} \frac{T_{\Pi s}^i}{\Delta T_{\Pi ji}}, i \neq j, 0 \leq j \leq M, \quad (8)$$

где K_{ij} – количество зон радиовидимости i -го и j -го ретрансляторов на периоде их повторения $T_{\Pi ji}$;

$T_{\Pi s}^i$ – наименьшее общее кратное всех периодов повторения зон радиовидимости всех ретрансляторов с i -м ретранслятором;

Ω – множество ретрансляторов, имеющих совместные зоны радиовидимости с i -м ретранслятором.

Среднее число соседних ретрансляторов для i -го определяется по соотношению (9):

$$K_{si} = \sum_{k \in \Omega} K_k^i \frac{\Delta T_{ik}}{T_{\Pi s}}, k \neq i, \quad (9)$$

где K_k^i – число зон радиовидимости i -го и k -го ретрансляторов продолжительностью T_{ik} , где ΔT_{ik} определяется по (6).

Вероятность того, что у i -го ретранслятора в произвольный момент времени окажется соседом m -й ретранслятор, рассчитывается как [7]:

$$P_{im} = \frac{\Delta T_{\Pi jm}}{T_{\Pi im}}. \quad (10)$$

При определении вероятностно-временных характеристик информационного обмена в НССС ограничимся исследованием волнового алгоритма маршрутизации и протокола доступа чистая АЛОНА, используемых в межспутниковых каналах. Как известно, при волновом методе маршрутизации каждое сообщение, принятое в i -м узле ретрансляции, передается всем соседним с ним узлам (ретрансляторам). Поэтому все сообщения, принятые в i -м узле, увеличивают интенсивность информационных потоков в каждой выходящей из узла линии

связи на λ_i^* – величину интенсивности входного потока сообщений в i -м узле, так как каждое сообщение, принятое от абонентов зоны радиовидимости i -го узла, должно обязательно пройти через все радиолнии сети связи [7, 13, 14]. Тогда выходной трафик произвольного i -го ретранслятора равен:

$$\lambda_{ie} = \lambda_i^* + \left[\sum_{j=1}^M \lambda_j^* (1 - q_{ij}) \right] \left[1 - \prod_{k=1}^M (1 - P_{ik}) \right], \quad (11)$$

где P_{ik} – вероятность того, что у i -го ретранслятора в произвольный момент времени окажется соседом m -й ретранслятор, определяется из (10),

$q_{ij} = 1 - P_{ij}$ – вероятность того, что i и j СР в произвольный момент времени не окажутся соседними.

На вход j -го СР поступают информационные пакеты от соседних с ним ретрансляторов с интенсивностью S_j , значение которой определяется как:

$$S_j = \sum_{i=1}^M P_{ij} \lambda_{ie}, j \in \Omega. \quad (12)$$

Пусть G_j – суммарный трафик на входе приемника j -го ретранслятора (с учетом повторно передаваемых пакетов из-за конфликтов, наложений, искажений), поток пакетов от каждого ретранслятора – пуассоновский. Вероятность того, что при передаче пакета от j -го ретранслятора на всех соседних с ним ретрансляторах произойдут конфликты, равна:

$$\prod_{i=1}^M P_{ij} (1 - e^{-2G_j}), j \neq i, j \in \Omega, \quad (13)$$

G_j определяется как:

$$G_j = S_j + G_j \prod_{i=1}^M P_{ij} (1 - e^{-2G_j}), j \neq i, j \in \Omega. \quad (14)$$

Обобщение соотношения (14) для всей сети в целом представляется в виде системы из M нелинейных уравнений [7] для определения интенсивностей $G_i, 1 \leq i \leq M$:

$$\left\{ \begin{aligned} G_i &= S_i + G_i \left\{ \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M P_{ij} (1 - e^{-2G_j}) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j \\ k \neq i}}^M (1 - P_{ik}) + \sum_{j=1}^M \sum_{l=j+1}^M P_{ij} P_{il} (1 - e^{-2G_j}) (1 - e^{-2G_l}) * \right. \\ & * \left. \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j \neq i \neq l}}^M (1 - P_{ik}) + \sum_{j=1}^M \sum_{l=j+1}^M P_{ij} P_{il} P_{im} (1 - e^{-2G_j}) (1 - e^{-2G_l}) (1 - e^{-2G_m}) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j \neq i \neq l \neq m}}^M (1 - P_{ik}) + \dots \right\} \\ & \dots \dots \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Интенсивности частных входных трафиков от каждого ретранслятора для произвольного j -го СР при условии, что допускается несколько повторных передач пакетов, которые вступили в конфликт, определяется выражением [7]:

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ie} P_{ij} e^{-2G_j} \left\{ 1 + \prod_{k=1}^M P_{jk} (1 - e^{-2G_k}) + \prod_{k=1}^M P_{jk}^2 (1 - e^{-2G_k})^2 + \dots \right\}, \quad (16)$$

где значения e^{-2G_k} , $1 - e^{-2G_k}$ – это вероятности успешной и конфликтной передачи пакета, соответственно.

Пусть фактический трафик (трафик с учетом повторно передаваемых пакетов) от всех ретрансляторов одинаков, т. е. $G_i = G_j = G$ за $t_n = \frac{l}{C}$ – время передачи одного

пакета, где l – длина пакета (объем сообщения), C – скорость передачи сообщений по каналу связи, при которой удовлетворяются заданные требования к вероятности ошибки на символ. Тогда нормированный (относительно времени передачи пакета) поток сообщений от произвольного ретранслятора равен:

$$S = G \sum_{i=0}^{K-1} C_M^i G^i (1-G)^{M-i}, \quad (17)$$

где $C_M^i = M! / [i!(M-i)!]$;

$$\sum_{i=0}^{K-1} C_M^i G^i (1-G)^{M-i} - \text{вероятность бесконфликтной}$$

передачи пакета.

Средние задержки передачи пакета в произвольном i -м СР определяются выражением [12]:

$$T_i = \frac{St^2}{2(1-St)} + \frac{l}{S} + \tau + E \left(2\tau + \frac{l}{S} \left(1 + \frac{L+I}{2} \right) \right), \quad (18)$$

где $t = 2\tau + \frac{l}{S} \left(1 + \left(\frac{L+I}{2} \right) \right);$

L – случайный интервал задержки повторной передачи пакета;

$$E = \left[\sum_{i=0}^{K-1} C_M^i G^i (1-G)^{M-i} \right]^{-1} - I - \text{среднее число}$$

передач одного пакета до успешного его приема;

$$S = G \sum_{i=0}^{K-1} C_M^i G^i (1-G)^{M-i} - \text{нормированный (от-}$$

носительно времени передачи пакета) поток сообщений от произвольного ретранслятора;

τ – принудительная средняя величина розыгрыша момента переретрансляции принятых сообщений.

Для полносвязной низкоорбитальной сети связи средняя сетевая задержка доставки сообщений вычисляется как [7, 12]:

$$T = n \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\lambda} T_i, \quad (19)$$

где $n = \frac{\lambda}{\gamma}$ – средняя длина маршрута (среднее число транзитных участков или межспутниковых линий связи);

λ – полный трафик в сети, который определяется как сумма трафиков каждой радиолинии λ_{ij} ;

$$\gamma = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \gamma_{jk} - \text{полный внешний (входной) трафик,}$$

поступающий в сеть;

γ_{jk} – среднее значение трафика, поступающего в сеть из узла j и предназначенного узлу k ;

N – число линий связи в сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе положений, представленных в работах [7, 12, 13, 14], рассмотрен приближенный метод анализа низкоорбитальных сетей связи. Данный метод позволяет оценить влияние основных системных параметров НССС, как элемента ГСБПИ с наиболее динамично изменяющейся топологией, на вероятностно-временные характеристики информационного обмена в таких сетях связи. Он может быть использован для анализа подсетей ГСБПИ, построенных на основе технологий широкополосного доступа, радиосвязи декаметрового диапазона с определенными доработками.

Результаты, полученные при использовании данного метода при сравнительном анализе средней задержки передачи информации в НССС с волновым алгоритмом маршрутизации и алгоритмом выбора кратчайшего пути [7], показали, что при использовании протокола чистая ALOHA в качестве протокола многостанционного доступа выигрывает в средней задержке доставки пакетов в НССС с использованием алгоритма маршрутизации по кратчайшим маршрутам по сравнению с волновым алгоритмом наблюдался только при низких интенсивностях входного трафика. Это объясняется тем, что при больших интенсивностях входного трафика в НССС с рассматриваемыми алгоритмами маршрутизации в сети наступает перегрузка каналов связи, функционирующих при поддержке протокола чистая ALOHA, так как пропускная способность данного протокола не превышает 18% [7, 12]. Вследствие этого все преимущества алгоритма кратчайшего пути были ликвидированы недостатками низкопроизводительного протокола многостанционного доступа. Следовательно, для надежной доставки пакетов АС в НССС необходимо обеспечивать несколько точек доступа опорной сети СР. Это можно осуществить использованием разнесенного приема.

Возможности адаптации рассмотренного метода к различным технологиям построения подсетей ГСБПИ, учета в нем разнесенного приема сигнала от АС на нескольких СР будут рассмотрены в следующих работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Назаров С.Н. Оценка характеристик гибридной беспроводной сети передачи информации с использованием методов теории очередей // Автоматизация процессов управления. – № 3 (17). – 2009. – С. 60–64.
2. Назаров С.Н., Шагарова А.А. Реализация механизмов разнесенного приема в гибридной сети беспроводной передачи информации // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 3. – С. 91–96.
3. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.

4. Вишнеvский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М. : Техносфера, 2009. – 472 с.

5. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В. С. Сюваткин [и др.]; под ред. В. В. Крылова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 368 с.

6. Назаров С.Н. Моделирование и разработка алгоритмов функционирования сети радиосвязи декаметрового диапазона с применением сети вынесенных радиоцентров-ретрансляторов: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18, 05.12.13 / Назаров Сергей Николаевич. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 190 с.

7. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи : учеб. пособие. – М. : Альпина Паблшер, 2004. – 536 с.

8. Назаров С.Н. Применение алгоритмов разнесенного приема сигналов в гибридных сетях беспровод-

ной передачи информации // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Радиофизика и радиотехника. – 2010. – № 152. – С. 121–124.

9. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.

10. Кловский Д.Д., Соифер В.А. Обработка пространственно-временных сигналов (в каналах передачи информации). – М. : Связь, 1976. – 206 с.

11. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н., Фарбинович М.Я. О частотно-пространственных резервах диапазона декаметровых волн // Радиотехника. – 1978. – № 6. – С. 100–101.

12. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М. : Мир, 1979. – 600 с.

13. Шварц М. Сети ЭВМ: Анализ и проектирование. – М. : Радио и связь, 1981. – 336 с.

14. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М. : Мир, 1989. – 544 с.