

А. А. Сорокин, В. Н. Дмитриев

ОПИСАНИЕ СИСТЕМ СВЯЗИ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ СЕТИ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ «МЕРЦАЮЩЕГО» ГРАФА

Введение

Положение «Связь всегда и везде» стало одной из концепций International Mobile Telecommunication (ИМТ-2000). Однако в настоящее время затруднено обслуживание абонентов систем мобильной связи на крупных подвижных объектах (КПО) – кораблях, самолетах или поездах. Использование систем космической связи для обслуживания большого количества абонентов на КПО ограничивается определенными сложностями при увеличении пропускной способности и высокой стоимостью спутниковой связи. Учитывая данные недостатки, Satellite Working Group описала требования к развитию систем космической связи, согласно которым системы космической связи должны использоваться там, где невозможно применение других систем связи общего пользования (ССОП). Одним из направлений реализации данных требований стала разработка способов обслуживания КПО при помощи ССОП. Способы реализуются за счет расположения на КПО подсистем доступа (ПД) абонентского оборудования и подсистем ретрансляции (ПР) для связи ПД между собой и ССОП [1–6].

Класс сетей связи, в которых изменение топологии происходит из-за перемещения ПД и ПР, получил название систем связи с динамической топологией сети (ССДТС) [7]. Реализация ССДТС сдерживается проблемами обеспечения передачи информации с заданными параметрами качества из-за постоянных изменений топологии сети. Для устранения трудностей разрабатываются специальные протоколы канального и сетевого уровней. Для разработки и анализа протоколов используются различные топологические модели ССДТС [7–11]. Как показывает литературный обзор, в настоящее время математический аппарат, описывающий наземные ССДТС, находится в стадии разработки и совершенствования.

В связи с вышеизложенным **целью исследований** были разработка и анализ модели системы связи с динамической топологией сети на основе дискретно-временного подхода.

Характеристика известных дискретно-временных топологических моделей

В основу топологических моделей систем связи заложена теория графов. Согласно теории графов, система связи представляется в виде графа $G(V, E)$, где V – множество вершин графа (сетевые узлы), а E – множество ребер графа (каналы между сетевыми узлами). По полученному графу строятся таблицы маршрутизации (ТМ). При работе ССДТС изменение расстояний между узлами приводит к изменению характеристик каналов и, как следствие, к устареванию ТМ. Для описания ССДТС используются два вида моделей, основанных на теории графов: модель дискретного времени (МДВ) – для описания систем спутниковой связи [9] и модели, основанные на теории случайных графов – для описания самоорганизующихся систем связи [10].

В МДВ топология космической системы связи представляется как периодически повторяющийся ряд S «снимков» длительностью Δt . Каждому «снимку» соответствует граф $G = (V, E)$, где V – постоянный набор узлов (спутников), а E – набор каналов связи между спутниками. В модели принимается, что за время Δt характеристики каналов связи между спутниками не изменяются [9].

Топология самоорганизующихся систем связи, согласно наиболее общей модели, представляется в виде графа $H = (W, F)$, где W – множество узлов, а F – множество ребер. При переходе заданной топологии из состояния n в состояние $n+1$ равновероятно появление любого графа $H' = (W, F)$ из множества возможных графов, которые можно получить из комбинации доступных узлов и ребер [10].

Методы описания движения узлов сети наложили особенности на алгоритмы работы протоколов маршрутизации, используемых в спутниковых и самоорганизующихся системах связи. Для систем спутниковой связи, описываемых при помощи МДВ, производится расчет конечного множества ТМ для заданного периода повторения топологических изменений группировки –

алгоритм DT-DVTR (Discrete Time-Dynamic Virtual Topology Routing) [11]. В самоорганизующихся системах связи используются алгоритмы постоянной корректировки ТМ, например протокол DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector), или расчета маршрута при поступлении заявки на обслуживание, например протокол AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) [8]. При организации связи между КПО МДВ неприменима из-за невозможности определить длительность периода повторения топологических изменений группировки объектов. Модели, основанные на теории случайных графов, неприменимы из-за некорректности использования данного математического аппарата для описания перемещений группировки КПО, т. к. КПО имеют заданный маршрут и график движения. Следовательно, требуется создание новой топологической модели, на базе которой будет разрабатываться и анализироваться работоспособность протоколов маршрутизации для ССДТС, использующих в качестве узлов сети КПО.

Основные положения разрабатываемой топологической модели

Для сравнения особенностей перемещения искусственных спутников земли (ИСЗ) и КПО, по результатам анализа [5, 12], составлена табл. 1. Отличия в перемещении КПО и ИСЗ вызывают ограничения в применимости МДВ для построения ТМ в ССДТС, использующих в качестве узлов КПО. Главное отличие в топологических изменениях группировок КПО и ИСЗ – отсутствие периода повторения топологических состояний, что приводит к неопределенности при расчете длительности времени стационарных состояний системы и определении количества ТМ, которые необходимо предварительно рассчитать, т. к. число КПО в группировке постоянно изменяется.

Таблица 1

Сравнительный анализ характеристик движения ИСЗ и КПО

Параметр	КПО	ИСЗ
Наличие траектории перемещения	Существует рекомендованный путь	Траектория рассчитана заранее
Периодичность	Не наблюдается	Есть период
Стабильность количества объектов	Изменяется из-за сезонности	Рассчитывается заранее
Восполняемость группировки	Может только прогнозироваться	Резерв рассчитан заранее
Устойчивость на траектории	Подвержены влиянию климатических условий	Рассчитывается заранее
Разнородность в скоростях	Присутствует	На одной орбите перемещаются с одинаковой скоростью
Причины выхода из группировки	Специфика работы	Деструктивные факторы

С учетом отличительных особенностей перемещения КПО от ИСЗ предлагается представить топологию ССДТС в виде статического графа с постоянным числом вершин и изменяемым количеством ребер. Закон изменения состава ребер определяется в зависимости от характеристик движения КПО. Считается, что между изменениями топологического состояния система связи находится в стационарном состоянии:

$$\forall t \in [0; +\infty) \exists \Delta t_n = t_n - t_{n-1} \text{ и } t \in (t_{n-1}; t_n) \text{ и } G_n(t) = G(\Delta t_n), \quad (1)$$

где Δt_n – время стационарного состояния системы; t_{n-1} – время начала стационарного состояния; t_n – время окончания стационарного состояния; $\{G(\Delta t)\}$ – состояние статического графа, описывающее топологию системы связи в момент времени Δt_n .

Последовательность топологических изменений сети представляется в виде конечной последовательности состояний статического графа:

$$\{G(\Delta t)\} = G(\Delta t_0) \rightarrow G(\Delta t_1) \rightarrow \dots \rightarrow G(\Delta t_n). \quad (2)$$

Каждое последующее состояние графа отличается от предыдущего на определенное приращение $\Delta G(V, E_{\text{перех}})$:

$$G(\Delta t_n) = G(\Delta t_{n-1}) \cup \Delta G(V, E_{\text{перех}}), \quad (3)$$

где $\Delta G(V, E_{\text{перех}})$ – приращение к графу $G(\Delta t_{n-1})$, необходимое для перехода в состояние графа $G(\Delta t_n)$, а $E_{\text{перех}}$ – ребра, добавляемые (или исключаемые) приращением $\Delta G(V, E_{\text{перех}})$.

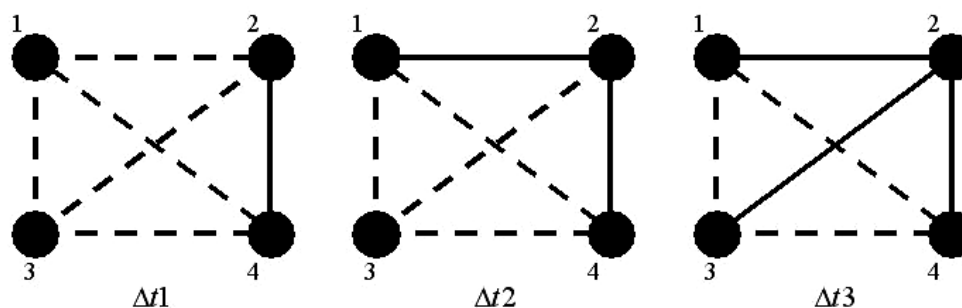
Последовательность дискретных топологических состояний (2), с учетом (3), описывается графом, эволюционирующим по определенному закону. Закон эволюции топологии графа определяется параметрами движения узлов сети и характеристиками каналов связи между узлами. Эволюция графа заключается в появлении и исчезновении ребер между парами узлов.

Использование предлагаемого описания топологических изменений применительно к решениям задач сетевого уровня означает, что ССДТС представляется в виде системы связи со статической топологией, работающей в режиме «открытия» и «закрытия» каналов. Протокол маршрутизации, работающий на сетевом уровне данной системы связи, должен обеспечивать поиск альтернативных маршрутов при переходе системы связи из одного топологического состояния к последующему. Необходимым условием работоспособности ССДТС является обеспечение связности графа сети в моменты перехода, описываемые формулой (2). С учетом формулы (3) при переходе системы из одного топологического состояния в последующие отсутствует необходимость перерасчета ТМ для всей сети, производится только корректировка отдельных элементов ТМ с учетом изменения топологии сети.

Согласно методике определения времени открытия и закрытия каналов связи гарантированного качества, описанной в [7], принимается, что топология системы изменяется только при открытии и закрытии каналов. Следовательно, за интервал стационарности (ИС) Δt принимается время между изменением топологии системы. Методика определения ИС сводится к последовательности операций:

1. Формирование базы данных характеристик движения объектов.
2. Расчет времени открытия и закрытия каналов между каждой парой узлов.
3. Сортировка полученных числовых характеристик времени открытия и закрытия каналов по возрастанию.
4. Определение ИС как отрезка времени между событиями (открытие или закрытие каналов между любой парой узлов).

Пример последовательности топологических изменений показан на рисунке, где пунктиром отображаются «закрытые» каналы, а сплошной линией – «открытые» каналы.



Последовательность топологических изменений ССДТС

В процессе моделирования топологии средствами программных пакетов Network Simulator 2.31 (NS-2.31) и Network Animator (NAM) появляющиеся ребра (каналы, пригодные для передачи информации с заданными параметрами качества) были окрашены в черный цвет, а исчезающие ребра (каналы, не соответствующие заданным параметрам качества) окрашивались в красный. При моделировании данного процесса каналы связи (ребра графа) между узлами последовательно изменяли окраску, что приводило к двухцветному «мерцанию» топологии сети. В связи с этим данной топологической модели целесообразно дать название «модель "мерцающего" графа».

Оценка работоспособности системы связи с динамической топологией сети, описываемой моделью «мерцающего» графа

В рамках исследований для моделирования системы связи использовались следующие программные продукты: среда имитационного моделирования Network Simulator 2.31 – для описания работы сети, задания параметров трафика, каналов и других характеристик сети; программа анимации результатов моделирования Network Animator; программа-графопостроитель TraceGraph – для определения количественных характеристик результатов моделирования сети;

табличный процессор OpenOfficeCalc – для выполнения промежуточных математических расчетов. В качестве рабочей станции использовался Pentium 4, core 2 (тактовая частота 3 GHz), DDR 2 GB, под управлением операционной системы Linux Debian.

Общее число узлов в системе – 6, 12, 20, число узлов, генерирующих трафик с постоянной скоростью 2 Мбит/с, 4, 7, 18. Скорость движения каждого узла – 3 ед./с, расстояние гарантированного установления соединения между узлами – 150 ед., время моделирования – 120 с. В качестве протокола транспортного уровня использовался протокол UDP (User Datagram Protocol), не гарантирующий доставку информационных пакетов, а для перенаправления информационных пакетов по меняющейся топологии сети – динамический протокол маршрутизации. Остальные параметры топологии сети приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики топологии исследуемых систем

Узел	Начальные координаты, ед.		Скорость движения узлов, ед./с	Угол с ОХ, град
	x	y		
1	0	0	3	0
2	-100	0	3	0
3	-200	0	3	0
4	-300	0	3	0
5	-400	0	3	0
6	400	100	3	180
7	500	100	3	180
8	600	100	3	180
9	700	100	3	180
10	800	100	3	180
11	400	300	3	225
12	500	400	3	225
13	600	500	3	225
14	700	600	3	225
15	800	700	3	225
16	-100	200	3	315
17	-200	300	3	315
18	-300	400	3	315
19	-400	500	3	315
20	-500	600	3	315

Для проведения моделирования топологии из 6 узлов выбраны узлы № 1–3, 6–8. При дальнейшем моделировании топология сети состояла из 12 узлов № 1–3, 6–8, 11–13, 16–18, затем была смоделирована система связи из 20 узлов. В ходе экспериментов по сети осуществлялась непрерывная передача данных без потерь и разрывов соединений между узлами-отправителями и узлами-получателями, остальные численные значения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты моделирования топологии из 6, 12 и 20 узлов

Оцениваемый параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
	Значения		
Число узлов	6	12	20
Число сгенерированных пакетов	101 789	251 218	478 246
Число отброшенных пакетов	36	48	59
Число потерянных пакетов	12	98	235
Вероятность потери информационного пакета	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$6,13 \cdot 10^{-4}$
Средняя задержка передачи информационного пакета от узла отправителя – узлу получателю, с	0,029	0,036	0,043

Сравнение результатов табл. 3 и допустимых значений параметров качества обслуживания мультимедийного трафика, полученных Европейским исследовательским центром в области телекоммуникаций и указанных в [13], определяет область применения смоделированных систем связи. Если протоколами более высоких уровней не производится дублирование потерянных инфор-

мационных пакетов, то смоделированные системы пригодны для передачи голосовой и видеоинформации, для организации процесса передачи данных нужно использовать протоколы, обеспечивающие гарантию доставки информационных пакетов. Увеличение потерь информационных пакетов из-за увеличения количества топологических изменений происходит из-за того, что в протоколе маршрутизации отсутствует информация о том, когда произойдет топологическое изменение, и перенаправление информационного потока происходит после «обрыва» канала связи.

Обобщая результаты моделирования, можно сделать выводы о работоспособности модели в условиях, когда движение сетевых узлов прогнозируемо (ИСЗ и КПО), а доступ к каналному ресурсу в сети является детерминированным (существует заранее распределенный частотный, временной или кодовый ресурс). Требования по наличию детерминизма в доступе к каналному ресурсу сети на данном этапе ограничивают область использования модели «мерцающего» графа в области моделирования самоорганизующихся систем связи (ad hoc сетей).

Выводы

Анализ топологических моделей показал, что использование модели дискретного времени и модели, основанной на методах теории случайных графов, недостаточно корректно для описания систем связи, в которых в качестве узлов используются КПО.

Разработанная модель «мерцающего» графа позволила провести оценку работоспособности системы связи с динамической топологией сети, где в качестве сетевых узлов используются КПО, на которых предоставляются мультимедийные телекоммуникационные услуги.

При помощи модели «мерцающего» графа могут быть описаны системы с динамической топологией сети, в которых в качестве сетевых узлов используются КПО с прогнозируемой траекторией перемещения. Примерами подобных подвижных объектов являются самолеты, корабли, поезда.

Оценка работоспособности смоделированных систем показала их пригодность для передачи трафика реального времени со скоростью 2 Мбит/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
2. Кантор Л. Я. Расцвет и кризис спутниковой связи // Электросвязь. – 2007. – № 7. – С. 19–23.
3. Дмитриев В. Н., Сорокин А. А. Возможности повышения экологической безопасности систем глобальной связи // Информационные технологии в современном мире: сб. – Ч. 5. – Таганрог: ТРТУ, 2006. – С. 41–44.
4. Сорокин А. А. Анализ методов построения беспроводных магистральных каналов связи // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008. – № 8. – С. 230–232.
5. Горностаев Ю. М., Соколов В. В., Невдяев Л. М. Перспективные спутниковые системы связи. – М.: Горячая линия – Телеком; МЦНТИ, 2000. – 132 с.
6. Пат. на изобретение 2341896. Способ мобильной связи между подвижными и стационарными объектами // Дмитриев В. Н., Сорокин А. А.; опубл. 20.12.2008.
7. Дмитриев В. Н., Сорокин А. А., Пиццин О. Н. Системы связи с динамической топологией сети. Информационные системы и технологии: проблемы и перспективы. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 59–118.
8. Amitava Mukherjee, Somprakash Bandyopadhyay, Debashis Saha. Location Management and Routing in Mobile Wireless Networks. – Artech House Boston • London, 2003. – 250 p.
9. Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks // IEEE. Journal on Selected Areas in Communications. – 1997. – 15 (8). – P. 1636–1648.
10. Ramin Hekmat. Ad-hoc networks: Fundamental properties and network topologies; Technology, The Netherlands and Rhyzen Information and Consulting Services, Zoetermeer, the Netherlands, 2006.
11. Sujit R. Baliga. Technical Report «Design of a Space Based Internet Emulation System». Project Sponsor: NASA Glenn Research Center Copyright © 2002: The University of Kansas Center for Research / https://www.itcc.ku.edu/publications/documents/Baliga2002_24350-05%20Baliga.pdf.
12. Юдин Ю. И., Сотников И. И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 9, № 2. – С. 200–208.
13. Телекоммуникационные системы и сети // В. В. Величко, Е. А. Субботин, В. П. Шувалов, А. Ф. Ярославцев / учеб. пособие: в 3 т. Т. 3. – Мультисервисные сети / под ред. проф. В. П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с.

Статья поступила в редакцию 30.09.2009

**DESCRIPTION OF COMMUNICATION SYSTEMS
WITH DYNAMIC NETWORK TOPOLOGY BY MEANS
OF MODEL "FLICKERING" GRAPH**

A. A. Sorokin, V. N. Dmitriev

The analysis of the models describing topological changes in communication systems is carried out. As a result of the analysis it is defined, that the given models are inapplicable for the description of communication systems with dynamic network topology where as network units large mobile objects (planes, ships, trains) are used. Taking into account the features of displacement of a group of large mobile objects criteria of new topological model are developed. According to the given model the dynamic topology is represented as static in which opening and closing of network channels take place.

Key words: dynamic topology, moveable object, communication system, model, graph, discrete condition.