

УДК 629.783:681.3

**Т. В. ЛАБУТКИНА, В. А. ЛАРИН, В. В. БЕЛИКОВ,
А. В. БОРЩЁВА, А. А. ТИХОНОВА, Д. И. ДЕРЕВЯШКИН**

Днепропетровский национальный университет, Украина

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СПУТНИКОВОЙ СЕТИ КОММУТАЦИИ ПАКЕТОВ С РАЗНОВЫСОТНЫМИ ОРБИТАЛЬНЫМИ СЕГМЕНТАМИ

Представлена имитационная модель спутниковой сети коммутации пакетов, построенной на разновысотных орбитальных группировках космических аппаратов, предназначенная для анализа нагрузки и маршрутизации данных на начальных этапах проектирования спутниковой системы. Моделируется топология сети и нагрузка в узлах сети. Для моделирования нагрузки введено понятие состояния загрузки узла. Это понятие основано на том, что объем накопителя узла разбит на принятое число уровней. Состояние узла определяет число заполненных уровней накопителя. Изменение состояния загрузки накопителя узла моделируется как процесс размножения и гибели, вызванный обменом нагрузки с наземными пользователями системы и потоком транзитной нагрузки через узел.

Ключевые слова: имитационная модель, спутниковая сеть коммутации пакетов, спутниковая система с разновысотными орбитальными группировками, топология сети, нагрузка в узле сети, процесс размножения и гибели.

Введение

Анализ современного состояния спутниковых систем позволяет делать описанные далее предположения относительно путей развития систем с межспутниковыми линиями связи.

В настоящее время в спутниковых системах связи линии межспутниковой связи реализованы в основном в системах на низких орбитах. Для этих систем наличие или отсутствие межспутниковой связи – один из важных признаков, определяющих концепцию системы. Примеры реализаций и проектов систем с межспутниковыми линиями связи (например, Iridium, Teledesic) и без межспутниковых линий (например, Iridium, Teledesic) описаны в работе [1]. Сравнительный анализ этих двух концептуальных технических решений есть в работах [1,2]. В частности, отмечаются описанные далее преимущества и недостатки систем с межспутниковыми линиями. Основным недостатком систем связи с межспутниковыми линиями – сложность реализации связей в космическом сегменте. К преимуществам спутниковых систем с межспутниковыми линиями относятся следующие. Во-первых, для их орбитальной группировки требуется меньшее число космических аппаратов, чем для систем без межспутниковых линий при такой же высоте орбит и такой же территории обслуживания, что обусловлено достаточностью однократного покрытия обслуживаемой территории. Во-вторых, для систем с межспутниковыми линиями необходимо меньшее число наземных коммутационных центров, чем в системах без

межспутниковых линий. В-третьих, вход пользователей в систему может быть обеспечен из любого местоположения наземной станции на обслуживаемой территории.

Достоинства спутниковых систем со связями между космическими аппаратами продолжают привлекать к ним интерес разработчиков. Этот интерес поддерживается также появлением дополнительных причин, обуславливающих целесообразность связей в орбитальном сегменте. Во-первых, рассматриваются концепции многоспутниковых систем (в общем случае различного назначения), управление космическими аппаратами которых реализуется на основе передачи управляющей информации по межспутниковым линиям в космическом сегменте. Во-вторых, решение целевых задач спутниковыми системами дистанционного зондирования Земли и навигации все больше требует взаимодействия между космическими аппаратами, которое эффективно осуществлять в космосе. В-третьих, может быть целесообразным комплексное использование нескольких систем различного назначения – например, систем дистанционного зондирования Земли (в наиболее полномасштабном варианте – глобального непрерывного обзора) и систем связи, космические аппараты которых принимают информацию от спутников дистанционного зондирования и реализуют ее передачу, как наземным станциям, так и другим космическими аппаратам дистанционного зондирования Земли. Такое решение может быть обосновано тем, что космические аппараты систем связи обычно с заданной точностью стабилизированы в

положении неизменной угловой ориентации, а угловая ориентация космических аппаратов дистанционного зондирования Земли может изменяться согласно программе съемки. Поэтому целесообразно разгрузить космические аппараты дистанционного зондирования Земли от решения задач транспортировки информации.

Все большее внимание в настоящее время привлекают спутниковые системы связи, в которых реализована техника коммутации пакетов (различные варианты таких систем, с межспутниковыми линиями и без, представлены в работах [1-3]). Ярким примером системы с межспутниковыми линиями связи и техникой коммутации пакетов является система Teledesic ([1]). В работе [2] отмечается актуальность внедрения в спутниковую связь сетевых информационных технологий, и при этом выделяется два важнейших направления: во-первых, интеграция спутниковой связи с наземными сетями передачи данных, во-вторых, организация связи по спутниковым каналам с использованием сетевых технологий. Анализируются различные аспекты реализации в спутниковых системах технологий сети интернет. В том числе, – новые концептуальные варианты архитектуры сети и принципов ее функционирования ([4]), применение в спутниковых сетях IP протоколов, особенности маршрутизации данных в спутниковых сетях и предлагаемые алгоритмы их реализации ([5,6]). Существует ряд проблем реализации технологий коммутации пакетов в спутниковой сети (эти проблемы отмечены, например, в работе [2]). Одна из них заключается в том, что узлы сети, через которые наземные пользователи могут войти в спутниковую сеть (космические аппараты, находящиеся в зоне радиовидимости наземной станции), являются доступными наземным станциям в течение ограниченного времени, а далее их сменяют другие узлы. Это создает трудности при решении задачи маршрутизации данных, адаптивной к нагрузке в узлах сети, требует алгоритмов маршрутизации, ориентированных на преодоление этой проблемы.

Вторая серьезная проблема реализации спутниковых сетей коммутации пакетов – нестабильность во времени их топологии, в том числе – необходимость решения проблемы «переключения связей». Суть проблемы в следующем (иллюстрация к ней представлена на рис. 1). Пусть в космическом сегменте спутниковой системы у всех космических аппаратов номинальные орбиты имеют одну и ту же форму и одинаковое наклонение. Если в момент времени t_1 космический аппарат 1 (КА1) связывается с космическим аппаратом 2 (КА2), находящимся в боковой орбитальной плоскости справа, то для связи КА1 использует передающее устройство

«правой боковой связи», а КА2 – приемное устройство «левой боковой связи». В момент времени t_2 , наступивший после того как эти космические аппараты пройдут точки пересечения их траекторий с линией пересечения орбитальных плоскостей (P_1 для КА1 и P_2 для КА2, назовем эти точки «узловыми», а пару точек – «узлом переключения»), космический аппарат КА2 оказывается слева от космического аппарата КА1. Это требует соответствующей смены устройств левой и правой боковых связей. В некоторой окрестности узла переключения возможны перерывы связи.

В настоящее время в космический сегмент большинства спутниковых систем связи (с межспутниковыми коммуникациями и без) входят космические аппараты на «однородных» орбитах, – значения эксцентриситета, высоты перигея, наклона орбиты и аргумента перигея одинаковы для всех номинальных орбит космических аппаратов. Во многих случаях размещение космических аппаратов в орбитальном сегменте по типу колец (значение долготы восходящего узла номинальной орбиты одинаково для нескольких космических аппаратов, то есть в одной номинальной орбитальной плоскости находятся несколько космических аппаратов).

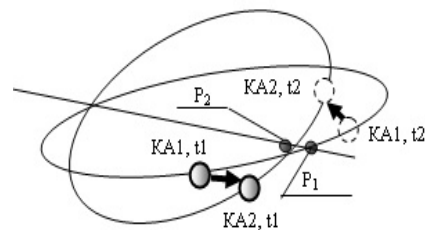


Рис. 1. К пояснению переключения связей между космическими аппаратами

Реализуются проекты и выдвигаются концепции новых систем, в орбитальных группировках которых несколько подгруппировок космических аппаратов на однородных орбитах. К числу реализованных проектов с несколькими орбитальными подгруппировками относятся система связи Ellipso и система связи и передачи данных Orbcom (описание этих систем приведено в работе [1]). Это системы без межспутниковых линий. Использование двух орбитальных группировок продиктовано желанием наилучшим образом учесть неравномерность размещения пользователей на обслуживаемой территории (в системе Ellipso космические аппараты находятся на круговой экваториальной орбите и на эллиптических средневысотных орбитах, а в системе Orbcom – на круговых орбитах с разными наклонениями).

Предлагаются альтернативные подходы к созданию спутниковых систем связи с несколькими разновысотными орбитальными группировками в космическом сегменте. Например, в работе [7] в качестве перспективного варианта рассматривается система с двумя разновысотными орбитальными группировками без межспутниковых линий. Использование орбит разной высоты продиктовано желанием избежать проблем спутниковых систем без межспутниковых линий связи. В работе [4] представлена концепция спутниковой системы, построенной на разновысотных орбитальных сегментах, в которых космические аппараты различных сегментов разделены по уровню решаемых задач (космические аппараты низкого сегмента обеспечивают организацию доступа к сети, космические аппараты средневысокого сегмента выполняют агрегацию потоков данных между низким и высоким сегментами, космические аппараты высокого сегмента решают задачи обработки потоков данных и глобального управления сетью). В работе [8] анализируются перспективы использования систем с оптическими линиями связи между космическими аппаратами и приводится пример такой системы, реализованной на разновысотных орбитальных группировках.

Предметом исследования данной статьи являются спутниковые системы с межспутниковыми линиями, в которых реализованы сетевые технологии коммутации пакетов. При этом предлагается рассмотреть наиболее общий вариант такой сети, который в недалеком будущем может быть востребован, – сети, реализованной на нескольких разновысотных орбитальных группировках (рис. 2).

Использование спутниковых сетей коммутации пакетов с несколькими разновысотными орбитальными группировками космических аппаратов может быть продиктовано следующими соображениями.

Во-первых, использование разновысотных орбитальных группировок позволит оптимизировать потоки данных в сети с учетом расстояний между связываемыми пользователями. Информация между относительно близко расположенными пользователями будет отправляться по низкому сегменту сети, а между относительно удаленными пользователями – по более высокому. Это обеспечит прохождения меньшего числа узлов сети для удаленных пользователей, что существенно, так как прохождение каждого из узлов сети приводит в общем случае к задержкам в узлах.

Во-вторых, использование низких сегментов сети даст возможность входа в сеть пользователям с низкой энергетикой передающих устройств, предоставляет «трамплин» для этих пользователей.

В-третьих, использование сегментов сети с ма-

лой разностью высот орбит позволит строить орбитальные сегменты спутниковых сетей с наклонными орбитами таким образом, чтобы разнести в пространстве направления на узлы переключения связей для двух «соседствующих» орбитальных подгруппировок системы (это может быть обеспечено путем выбора различных наклонений орбит в таких системах). В этом случае в области узла переключения боковых связей одной подгруппировки можно «переводить» информацию в соседнюю, более высокую или более низкую подгруппировку, в которой узел переключения удален в пространстве от «обходимого информацией» узла переключений.

В-четвертых, спутниковая сеть может связать между собой несколько разновысотных систем связи, каждая из которых используется для обмена информацией с космическими аппаратами одной из систем дистанционного зондирования Земли. Это обеспечит комплексный учет информации, поступающей от спутников систем дистанционного зондирования Земли в общем случае различных принципов функционирования, позволит реализовывать комплексную обработку информации не только в наземных центрах, но и в космических аппаратах, приведет к созданию глобальных мультизадачных спутниковых систем [9, 10].

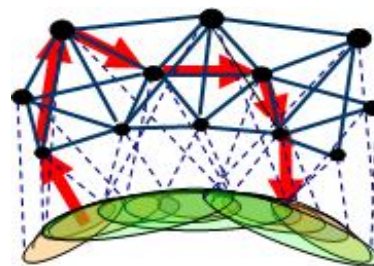


Рис. 2. Путь пакета данных по спутниковой сети с разновысотными сегментами

В-пятых, связав между собой несколько разновысотных спутниковых сетей коммутации пакетов, можно обеспечить более гибкое управление потоками данных. Пользователи сети могут иметь предпочтительный доступ к одному из сегментов сети, но при повышенной нагрузке в узлах одного из сегментов потоки нагрузки могут перераспределяться, обеспечивая движение информации через другие сегменты сети.

Рассмотрение различных концепций спутниковых сетей пакетной передачи данных, в том числе, построенных на разновысотных орбитальных группировках, требует анализа различных аспектов их функционирования. В том числе – процессов изменения загруженности узлов сети и маршрутизации данных, то есть исследования спутниковой сети как сети массового обслуживания. Спутниковые сети

относятся к сложным системам. Эффективным приемом анализа сложных систем является их имитационное моделирование. При этом необходимы как модели, которые с высокой степенью подробности воспроизводят процессы в моделируемой системе, так и упрощенные, которые предназначены для анализа ряда показателей функционирования системы в зависимости от ее основных параметров и условий функционирования. Главное достоинство упрощенных моделей – существенно меньшие затраты времени на моделирование для получения средних значений показателей функционирования системы, что обеспечивает целесообразность использования таких моделей на начальных этапах проектирования. Упрощенные имитационные модели могут быть «узконаправленными» – предназначены для анализа одного или нескольких аспектов функционирования исследуемого объекта. Такая модель предложена в данной работе.

1. Цель статьи

Представить разработанную упрощенную имитационную модель спутниковой сети, построенной на разновысотных орбитальных группировках, предназначенную для анализа процессов маршрутизации данных и изменения нагрузки в узлах сети на начальных этапах проектирования (в том числе – на этапах концептуальной проработки различных вариантов глобальных спутниковых сетей).

2. Анализ подходов к моделированию сетей коммутации пакетов, в том числе сетей, узлами которых являются космические аппараты

Условно разграничим имитационные модели сетей коммутации пакетов (в том числе спутниковых сетей), предназначенные для исследования процессов маршрутизации и изменения нагрузки в узлах сети на точные и упрощенные. К точным моделям отнесем такие, в которых нагрузка, входящая в сеть, моделируется с точностью до длительностей пакетов и их адресации, длительность пакета полагается неизменной при его движении от узла к узлу. В этих моделях сетей воспроизводится движение пакетов через сеть с учетом времени пребывания пакета в накопителе каждого из проходимых им узлов.

Для моделей, отнесенных к упрощенным, учитывается введенное Л. Клейнроком упрощающее положение о случайном изменении длительности пакетов при их движении от узла к узлу [11]. В таких моделях нагрузка, входящая в сеть моделируется с точностью до параметров потоков, входящих в

узлы сети, и вероятностей адресации этой нагрузки к другим узлам сети. Моделирование такой сети может основываться на определении значений параметров потоков, входящих в узлы сети, и «разложении» их по транзитным узлам текущих кратчайших путей до узлов назначения, вероятность адресации к которым известна [12]. Сложность применения подобного подхода для моделирования нагрузки в спутниковой сети в том, что положение адресата определяет его местонахождение на поверхности Земли, а доступные для адресата узлы сети (космические аппараты), которые рассматриваются как узлы назначения, – меняются.

В данной работе предложен подход к упрощенному моделированию нагрузки и маршрутизации в спутниковой сети, который позволяет частично преодолеть описанную выше проблему.

3. Предлагаемая имитационная модель спутниковой сети

3.1. Общее описание модели

Моделируется спутниковая сеть коммутации пакетов. Узлами сети являются космические аппараты спутниковой системы. В орбитальной группировке космических аппаратов в общем случае можно выделить N_{gr} подгруппировок. В каждую k -ую подгруппировку входит n_k космических аппаратов на однородных орбитах (номинальные значения эксцентриситета e_k , высоты перигея h_{pk} , наклона орбиты i_k и аргумента перигея ω_k одинаковы для всех космических аппаратов подгруппировки). В каждой k -й подгруппировке n_k номинальных орбитальных плоскостей, в каждой l -й плоскости – n_{kl} космических аппаратов. Для всех космических аппаратов l -й плоскости k -й подгруппировки одинаковое значение долготы восходящего узла Ω_{kl} . У m -го космического аппарата l -й плоскости k -й подгруппировки значение момента времени прохождения перигея τ_{klm} . Орбитальные параметры космических аппаратов и их число выбраны таким образом, чтобы каждая из орбитальных подгруппировок обеспечивала, по меньшей мере, однократное непрерывное покрытие всей поверхности Земли или заданной области широт.

Для построения топологии сети и моделирования нагрузки в узлах сети используется также сквозная нумерация узлов сети. Каждому узлу, представляющему собой m -й космический аппарат l -й орбитальной плоскости k -й орбитальной подгруппировки ставится в соответствие его номер j ,

идентифицирующий его при сквозной нумерации (соответственно орбиту каждого j -го космического аппарата определяют параметры $e_j = e_k$, $h_{pj} = h_{pk}$, $i_j = i_k$, $\omega_j = \omega_k$, $\Omega_j = \Omega_{kl}$, $\tau_j = \tau_{klm}$).

Полагается, что угловая ориентация космического аппарата не изменяется с течением времени (он точно стабилизирован в заданном угловом положении). Являясь узлом спутниковой сети, космический аппарат постоянно поддерживает связи с рядом соседних узлов. В общем случае космический аппарат может постоянно поддерживать шесть типов связей, которые можно разбить на три группы (рис. 3): связи первой группы – с космическими аппаратами, которые находятся в более высокой или более низкой орбитальной группировке (типы связей 1 и 2 соответственно); связи второй группы – с космическими аппаратами, которые находятся в боковых орбитальных плоскостях одного сегмента слева и справа (типы связей 3 и 4), связи третьей группы – с космическими аппаратами, которые находятся в одной орбитальной плоскости спереди и сзади (типы связей 5 и 6). Устройство связи, которое реализует связь q -го типа ($q = \overline{1,6}$), не может быть использовано для реализации связей другого типа. В общем случае космический аппарат для реализации связи q -го типа может использовать n_{cq} устройств. Одно устройство связи q -го типа создает программно управляемую линию связи (луч фазированной антенной решетки или оптическую линию связи). Геометрия линий связи с точки зрения расположения их друг относительно друга в задаче моделирования не учитывается.

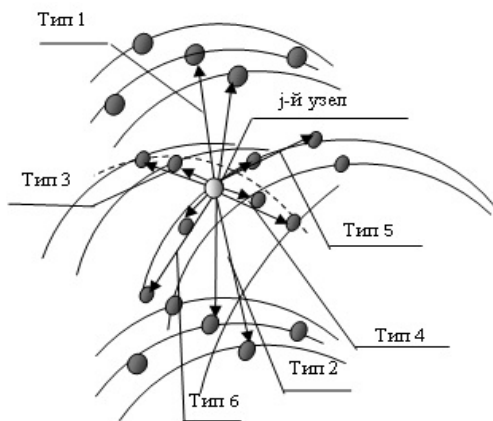


Рис. 3. К пояснению межспутниковых связей в орбитальном сегменте системы

Программное управление ориентацией линии связи осуществляется с использованием известных с заданной точностью значений эфемерид космических аппаратов. Полагается, что линия связи всегда

точно ориентирована по кратчайшему направлению от передающего космического аппарата к принимающему (в частности, соединяет две материальные точки, в качестве которых рассматриваются космические аппараты).

Направление линии связи от j -го к i -му космическому аппарату при программном управлении ее ориентацией в работах [13,14] предложено задавать двумя углами (A_q и γ_q), которые различаются в зависимости от группы связей q . Для определения углов A_q и γ_q вводится в рассмотрение опорная плоскость, в качестве которой рассматривается одна из плоскостей барицентрической орбитальной системы $ox_{bj}y_{bj}z_{bj}$, связанной с j -м космическим аппаратом (начало системы координат совпадает с центром масс космического аппарата, ось oz_{bj} направлена вдоль радиуса-вектора в сторону ее возрастания, ось oy_{bj} – по бинормали к траектории и сонаправлена с вектором кинетической энергии космического аппарата, ось ox_{bj} дополняет систему до правой).

Угол A_q отсчитывается против часовой стрелки в опорной плоскости от положительного направления младшей из осей барицентрической орбитальной системы координат, принадлежащих этой плоскости. Диапазон значений угла A_q – от 0 до 360 градусов. Угол γ_q представляет собой абсолютное значение угла между опорной плоскостью и направлением на космический аппарат, с которым реализуется связь. Диапазон значений угла γ_q – от γ_{grq} до 90 градусов, где γ_{grq} определяется из конструктивных особенностей космического аппарата и устройства, реализующего связь. Значения углов A_q и γ_q рассчитываются с использованием значений координат орбитальной барицентрической системы.

При определении направления межсегментной связи в качестве опорной плоскости рассматривается плоскость мгновенного местного горизонта (плоскость $ox_{bj}y_{bj}$), при определении боковых связей в одном сегменте – плоскость орбиты (плоскость $ox_{bj}z_{bj}$), при определении связей в одной орбитальной плоскости – плоскость, проходящая через радиус-вектор космического аппарата и бинормаль к траектории (плоскость $oy_{bj}z_{bj}$). Обязательное условие реализации связи типа q между j -м и i -м космическими аппаратами (это условие можно рассматривать как основное ограничение на реализа-

цию связи) определяется значением координаты i -го космического аппарата в орбитальной барицентрической системе j -го космического аппарата по оси, перпендикулярной опорной плоскости. В случае связи типа 1 координата z_{bj} должна быть больше нуля (i -й космический аппарат должен находиться над плоскостью местного горизонта j -го космического аппарата), в случае связи типа 2 эта координата должна быть меньше нуля (i -й космический аппарат должен находиться под плоскостью местного горизонта j -го космического аппарата). Для связи типа 3 значение координаты y_{bj} должно быть меньше нуля (i -й космический аппарат должен находиться слева от плоскости орбиты j -го космического аппарата), а для связи типа 4 – отрицательным (что соответствует нахождению i -го космического аппарата справа). При реализации связи типа 5 значение координаты x_{bj} больше нуля, а при реализации связи типа 6 – меньше.

Полагается, что между узлами спутниковой сети существует дуплексная связь. Таким образом, i -й и j -й узлы соединяют две независимые линии, по одной из которых нагрузка передается в соседний узел, а по другой – поступает в узел. В сети реализуется техника коммутации пакетов. Маршрутизация данных в сети – табличная, адаптивная к нагрузке в узлах сети. Определение значений маршрутных таблиц осуществляется на основе выбора путей наименьшей стоимости для каждой пары узлов. Входящей и исходящей линиям дуплексной связи могут назначаться различные стоимости.

Каждый узел имеет накопитель, в котором поступившая в него информация ожидает отправки по нужному исходящему направлению. Объем накопителя одинаков для каждого из узлов. Объем накопителя может измеряться в единицах находящейся в нем информации или числом пакетов средней длительности, или в единицах времени, которое потребовалось бы для непрерывной передачи находящихся в нем пакетов по одному исходящему направлению.

Все узлы сети с точки зрения действующих для них правил сетевой технологии – равноправны. Учет расположения узлов в различных сегментах сети может осуществляться при назначении стоимостей линиям связи, соединяющим узлы сети, находящиеся в разновысотных группировках.

В общем случае устройство связи космического аппарата может непостоянно использоваться для реализации связи с одним и тем же космическим аппаратом спутниковой сети. Устанавливаемая с

помощью этого устройства линия связи может «переключаться» с одного космического аппарата на другой. Принимается, что переключение устройства связи с одного космического аппарата на другой происходит мгновенно. При этом переключения связи продиктованы только изменением физических условий реализации связи, – моделируется сеть, топология которой не адаптивна к нагрузке в узлах сети (космический аппарат не переключает свои коммуникационные линии связи с одного космического аппарата на другой в зависимости от степени загруженности узла, к которому ведет линия). На топологию сети влияют только перегрузки в узлах сети. При высокой загрузке накопителя узла линии связи, ведущие в узел, временно исключаются из структуры сети, и нагрузка перестает поступать в узел.

3.2. Моделирование топологии сети

В основе моделирования топологии сети – моделирование движения космических аппаратов. Так как разработанная имитационная модель предназначена для начальных этапов проектирования спутниковых сетей и предполагает упрощенное моделирование сетевых процессов, нет необходимости в использовании достаточно полных математических моделей, описывающих движение космических аппаратов. Достаточно ограничиться математической моделью, которая отличается от кеплеровой только тем, что в ней учтена некорректируемая прецессия орбитальных плоскостей космических аппаратов, вызванная возмущающей силой, обусловленной несферичностью Земли. При этом вековое изменение долготы восходящего узла предлагается рассчитывать на основе упрощенных выражений, предложенных в работе [15]. При необходимости для описания движения космических аппаратов может быть использована более полная модель, в которой кроме некорректируемой прецессии орбитальных плоскостей учтены и периодические изменения значений орбитальных параметров, обусловленные несферичностью Земли.

На каждом шаге по времени моделирования t рассчитываются текущие координаты космических аппаратов в геоцентрической экваториальной системе, гринвичской системе и барицентрических орбитальных системах. С использованием значений координат космических аппаратов в барицентрической орбитальной системе для каждого космического аппарата (соответствующего узла спутниковой сети) определяются его связи, которые он реализует в текущий момент времени с другими космическими аппаратами.

При определении связей учитываются ограни-

чения на реализацию связей, которых в наиболее простом случае два. Первое ограничение – по дальности (расстояние l_{ij} между i -м и j -м узлами сети не должно превышать заданное граничное значение l_{grq} , которое определяется на основе информации об энергетических характеристиках устройств связи типа q). Второе ограничение, фактически, определяет сектор, в котором может быть реализована связь типа q . Как отмечалось выше, абсолютное значение угла γ_q между опорной плоскостью для связи типа q и направлением на космический аппарат должно быть больше значения γ_{grq} , то есть

$$\gamma_q \geq \gamma_{grq} \quad \gamma_q < \left[\gamma_{grq}, \frac{\pi}{2} \right].$$

Полагается что, в одной орбитальной плоскости космический аппарат реализует n_{c5} связей с ближайшими космическими аппаратами спереди от него и с n_{c6} ближайшими сзади (целесообразно $n_{c5} = n_{c6}$).

Для определения связей в боковых орбитальных плоскостях могут быть предложены два подхода. Пусть, например, космический аппарат может устанавливать n_{c3} боковых связей с космическими аппаратами, находящимися в одном с ним сегменте в орбитальных плоскостях, расположенных слева от его орбитальной плоскости. Согласно первому подходу для связи выбираются по одному космическому аппарату из n_{c3} ближайших к его орбитальной плоскости плоскостей, находящихся слева. При этом в каждой орбитальной плоскости выбирается тот из находящихся в ней космических аппаратов, который ближе всего к космическому аппарату, который устанавливает связь. Аналогично реализуются n_{c4} связей с космическими аппаратами в орбитальных плоскостях, находящихся справа (целесообразно $n_{c3} = n_{c4}$). Согласно второму подходу, для реализации n_{c3} боковых связей слева выбираются n_{c3} ближайших космических аппаратов, находящихся в соседней орбитальной плоскости слева. Аналогично реализуется правая боковая связь. Возможно также сочетание двух описанных подходов.

Множество возможных вариантов реализации межсегментных связей отличается значительным многообразием и основывается на ранжированных приоритетах, выбранных проектировщиками системы.

Пусть для связей типа 1 типа 2 у космического аппарата используются n_{c1} и n_{c2} устройств соот-

ветственно. Приведем примеры некоторых из возможных вариантов межсегментных связей. Во-первых, можно полагать, что космический аппарат связывается только с космическими аппаратами ближайших по высоте подгруппировок. Во-вторых, связь может устанавливаться с космическими аппаратами ряда подгруппировок, в том числе – всех подгруппировок. Возможен вариант, когда все n_{c1} (или n_{c2}) устройств будут использоваться для связей с космическими аппаратами в любой из более высоких (или более низких) орбитальных подгруппировок. Возможно «закрепление» каждого из устройств для реализации связей с космическими аппаратами одной из орбитальных подгруппировок.

Определение межсегментных связей космического аппарата предполагает рассмотрение комплекса требований, на основе которых формируется программа переключений устройства связи с одного космического аппарата на другой. К числу таких требований относятся перечисленные далее. Во-первых, для каждой линии связи требуется минимизировать число ее переключений с одного космического аппарата на другой. Во-вторых, предпочтительно реализовывать связь между теми космическими аппаратами, которые движутся сонаправленно, (у которых угол между векторами скоростей меньше 90 градусов). В-третьих, при наличии у космических аппаратов нескольких устройств межсегментных связей одного типа необходимо равномерно распределить между космическими аппаратами одного сегмента связи с космическими аппаратами другого сегмента.

Разработка принципов формирования программ переключения является частью концептуальной проработки конкретной реализации системы. Оптимизация программ переключения связей между космическими аппаратами разновысотных группировок требует глубокого анализа для каждого из вариантов построения спутниковых сетей, что не входит в задачи исследований, представленные в данной статье. Наиболее простой алгоритм выбора межсегментных связей типа 1 (или типа 2) заключается в следующем. Устройство связи j -го космического аппарата устанавливает связь с тем из космических аппаратов более высокого (или более низкого) сегмента сети, удовлетворяющих условиям реализации связи (доступных для реализации связи), который будет удовлетворять этим условиям больше других. Определение текущей структуры связей реализуется с учетом глобальной информации о сети, – у i -го космического аппарата, выбираемого j -м космическим аппаратом для установления с ним связи типа q , должно быть свободное принимающее устройств связи того же типа.

3.3. Моделирование нагрузки в узлах сети

Вводится понятие «состояние узла». Для этого объем накопителя условно разбивается на принятое число n_L уровней заполнения, одинаковое для каждого узла сети. Будем говорить, что j -й узел находится в состоянии q , если в q -ом уровне накопителя есть пакеты данных, а уровень $(q+1)$ еще полностью пуст (то есть, узел находится в состоянии заполнения q -го уровня). На рис. 4 представлена группа узлов сети, находящихся в двух соседних сегментах (k -м и $(k+1)$ -м), накопители этих узлов разбиты на уровни, для каждого узла показано заполнение уровней накопителя, то есть состояние загрузки узла.

Процесс изменения состояния загрузки узла предложено моделировать как процесс размножения и гибели. В этом случае переход из состояния q возможен только в два соседних состояния $(q+1)$ и $(q-1)$, если q не является граничным состоянием. Состояние $q=0$ соответствует пустому накопителю. Длительности интервалов времени между сменами соседних состояний – случайные величины с экспоненциальным законом распределения, параметры которых λ_{bj} и λ_{sj} соответственно (единица измерения λ_{bj} и λ_{sj} – число смен состояния загрузки узла в единицу времени). Состояние сети в момент времени t определяют состояния загрузки всех n ее узлов.

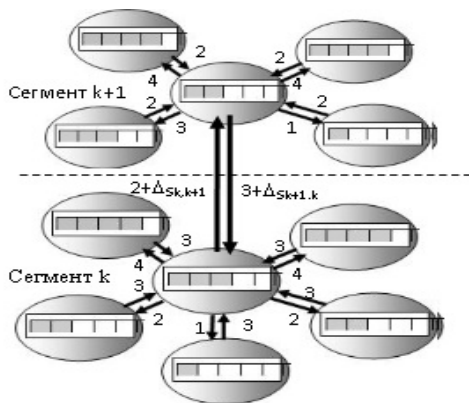


Рис. 4. К пояснению состояния загрузки узла сети и назначения стоимостей линий связи

Таким образом, моделируются n потоков событий, каждый j -й поток представляет последовательность моментов времени смены состояний j -го узла. Параметр этого потока определяется выражением

$$\lambda_j = \lambda_{bj} + \lambda_{sj}.$$

Сумма потоков событий, каждый из которых – последовательность моментов времени изменения состояния загрузки одного из узлов сети, представляет собой поток изменений состояния сети. Все рассматриваемые потоки событий – пуассоновские. При моделировании смены состояния загрузки узла учитывается, что ее обуславливают два фактора. Во-первых, – смена состояния загрузки узла происходит вследствие движения через него неадресованной ему нагрузки (транзитной нагрузки). Параметры потоков смены загрузки узла в большую и в меньшую стороны при движении через него потоков транзитной нагрузки – λ_{btj} и λ_{stj} соответственно. Во-вторых, – смену состояния загрузки узла вызывает обмен нагрузкой с наземными пользователями. Параметры потоков смены загрузки узла в большую и в меньшую стороны вследствие поступления нагрузки от наземных пользователей и ухода к наземным пользователям – λ_{bej} и λ_{sej} соответственно. Смена состояния загрузки узла моделируется как наложение двух независимых потоков событий, обусловленных двумя описанными выше факторами. В этом случае справедливы следующие выражения

$$\lambda_{bj} = \lambda_{btj} + \lambda_{bej},$$

$$\lambda_{sj} = \lambda_{stj} + \lambda_{sej}.$$

Моделирование смены состояния загрузки узла, вызванное обменом нагрузкой с наземными пользователями, реализуется следующим образом. Разобьем территорию обслуживания на участки. Для каждого j -го космического аппарата, принадлежащего k -му сегменту сети, в текущий момент времени моделирования t определяется участок, в который попадает его подспутниковая точка. В зависимости от того, над каким участком w находится космический аппарат, а также от состава узлов сети, доступных в этот момент времени абонентам на участке w , рассчитывается текущее значение параметра потока изменения состояния загрузки узла в большую сторону (λ_{bej}) и параметра потока изменения состояния загрузки узла в меньшую сторону (λ_{sej}).

Связь параметра потока λ_{bej} с нагрузкой, поступающей в сеть от наземных пользователей, предлагается в первом приближении определять следующим образом (рис. 5). Для каждого участка w

задано среднее значение параметра потока нагрузки λ_{cw} , поступающей в сеть от находящихся на нем наземных пользователей в определенный отрезок времени суток согласно отсчету времени на этой территории (отрезок, который является шагом разбиения интервала времени суток). Полагается, что в пределах этого отрезка времени значение параметра потока входящей нагрузки постоянно. Единица измерения интенсивности входящей нагрузки λ_{cw} – число пакетов информации, поступающих в сеть от наземных пользователей в единицу времени. Значения λ_{cw} формируются как исходные данные, для их хранения предлагается сформировать двухмерный массив, первое измерение которого определяет номер участка обслуживаемой территории при сквозной нумерации участков, второе – номер соответствующего отрезка времени в сутках в часовом поясе участка.

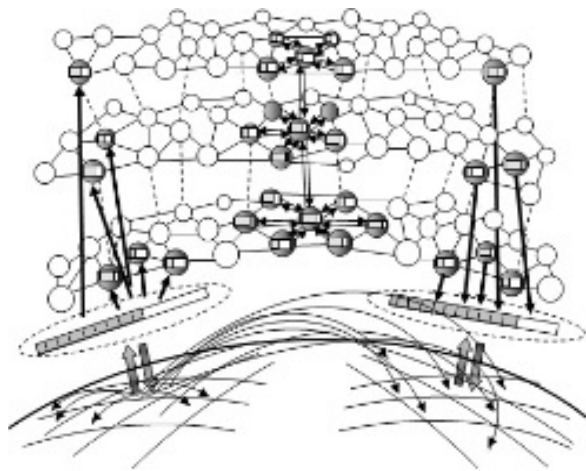


Рис. 5. К пояснению моделирования сети

Вводится понятие суммарного накопителя узлов, подспутниковые точки которых находятся на территории w (рис. 5). Эти узлы могут принадлежать как различным сегментам сети, так и одному сегменту сети. Пусть таких узлов z_u . При принятом допущении об одинаковом объеме накопителей всех узлов и одинаковом числе уровней разбиения каждого накопителя объем суммарного накопителя равен сумме объемов накопителей z_u узлов, число уровней разбиения суммарного накопителя равно $z_u n_L$, число заполненных уровней – сумме заполненных уровней этих z_u узлов.

Задается связь между значением λ_{cw} интенсивности нагрузки, поступающей в сеть, и параметром потока λ_{wb} смены состояния загруженности суммарного накопителя в большую сторону (связь может определяться уравнением или табличной за-

висимостью). Следует еще раз подчеркнуть, что значение λ_{cw} представляет собой среднее число пакетов, входящих в суммарный накопитель от наземных пользователей, а значение λ_{wb} – соответствующее этому среднее число изменений в большую сторону стояния загруженности суммарного накопителя. Параметр потока λ_{wb} раскладывается на параметры потоков λ_{wbj} увеличения состояний загруженности каждого j -го из z_u узлов, накопителя которых складывают суммарный накопитель ($\lambda_{wb} = \sum_{j=1}^{z_u} \lambda_{wbj}$, $\lambda_{wbj} = k_j \lambda_{wb}$). При этом доля k_j параметра λ_{wbj} в параметре λ_{wb} определяется согласно принятому для конкретного варианта сети правилу.

Приведем несколько возможных подходов к распределению параметра потока λ_{wb} между z_u узлами. Определение значений k_j может быть реализовано с учетом закрепления сегментов входа в сеть за категориями пользователей и известной долей нагрузки от этой категории пользователей. При определении значения k_j может также учитываться адаптивность направления потоков входящей нагрузки к загруженности узлов. В том числе может быть учтена загруженность накопителя каждого из z_u доступных пользователям узлов, или средняя загруженность узлов в сегменте сети, которому принадлежит j -й узел, или средняя загруженность группы ближайших к j -му узлу узлов, находящихся с ним в одном сегменте сети.

Определенное описанным выше способом значение λ_{wbj} представляет собой искомое значение параметра λ_{bej} изменения состояния загруженности накопителя j -го узла в большую сторону, обусловленное поступающей от пользователей нагрузкой в момент времени нахождения его над участком w территории обслуживания $\lambda_{bej} = \lambda_{wbj}$.

Для определения параметра потока λ_{sej} смены состояния загруженности j -го узла в меньшую сторону вследствие выхода нагрузки к наземным пользователям предлагается аналогичный подход. Для каждого участка w определена вероятность p_{wv} адресации поступающей от него информации в каждый участок v ($\sum_v p_{wv} = 1$). Полагается, что вся нагрузка проходит через сеть и выходит на участках-адресатах. Это позволяет для каждого участка

w рассчитать интенсивность λ_{gw} нагрузки, выходящей из сети к пользователям участка w

$$\lambda_{gw} = \sum_v p_{vw} \lambda_{cv},$$

где p_{vw} – вероятность адресации информации от участка v к участку w .

Полагается, что нагрузка выходит к пользователям сети на участке w через описанный суммарный накопитель, включающий в себя накопители z_u доступных этим пользователям узлов сети. Таким образом, λ_{gw} – интенсивность нагрузки, выходящей из суммарного накопителя.

Задается соответствие значений интенсивности нагрузки λ_{gw} параметру потока λ_{ws} смены загрузки в меньшую сторону суммарного накопителя. Параметр потока λ_{ws} смены состояния загрузки суммарного накопителя раскладывается на составляющие для z_u узлов – на параметры потоков λ_{wsj} уменьшения загрузки накопителей каждого

j -го из этих узлов ($\lambda_{ws} = \sum_{j=1}^{z_u} \lambda_{wsj}$, $\lambda_{wsj} = k_j \lambda_{ws}$).

Принятое правило разложения включает в себя учет вероятности выхода нагрузки, поступившей в суммарный накопитель участка w для передачи наземным пользователям, через узлы k -го сегмента. Эти вероятности для конкретного варианта сети определяются на основе введенного рационального правила учета «закрепления» сегментов сети за определенными категориями пользователей при известной доле каждой категории в общем составе пользователей участка w . Кроме того, при определении вероятностей адресации информации, выходящей к узлам k -го сегмента, может учитываться средняя загруженность узлов этого сегмента сети или средняя загруженность группы узлов k -го сегмента, находящихся над участком территории w . Если в группе узлов z_u , из которых пользователи на участке w получают нагрузку, есть несколько узлов, принадлежащих k -му сегменту сети, то отводимая для этих узлов доля параметра потока λ_{ws} раскладывается между ними в равной пропорции.

Следует отметить, что подход к разложению на составляющие параметра потока λ_{wb} увеличения состояния загруженности суммарного накопителя основан на строгих рациональных рассуждениях, а подход к разложению параметра потока λ_{ws} смены загрузки суммарного накопителя в меньшую сторону является довольно условным. Он не учитывает процессов движения информации через сеть, вос-

производит моделируемый объект со слабой адекватностью, основывается на допущении, что при нахождении узлов над участком территории w в них уже доставлена нагрузка, адресованная пользователям на этом участке. Однако на самых ранних этапах проектирования может быть полезна и модель с невысокой точностью моделирования нагрузки.

Дискретизация значений параметров потоков входящей нагрузки, обусловленная привязкой значений к определенным участкам обслуживаемой территории, – упрощающее положение. В реальных системах границы смены значений достаточно «размыты». Однако при моделировании воспроизводится реакция системы, подобная такой, которая была бы без дискретизации. Это обусловлено тем, что момент времени наступления следующей смены состояния загрузки суммарного накопителя моделирует с учетом значения параметра потока изменений для того участка территории, над которым находится космический аппарат. В момент времени, когда наступит это изменение, космический аппарат может находиться уже над другим участком территории, для которого определено другое значение параметра потока.

Моделирование смены состояния загруженности накопителя, обусловленное обменом нагрузкой между узлами, реализуется следующим образом. Пусть уровень загрузки сети таков, что в случае относительно равномерного распределения нагрузки в узлах сети, накопитель каждого узла с вероятностью близкой к единице не пустой. Будем полагать, что если в узле имеется нагрузка, она будет постоянно выходить из него. Ожидание отправки по наилучшему исходящему направлению не приводит к тому, что ряд исходящих линий при этом остается пустыми. Предполагается, что алгоритм маршрутизации данных либо полностью исключает подобные ситуации либо делает их настолько редкими и кратковременными, что при моделировании с невысокой степенью детализации процессов их рассмотрением можно пренебречь. Такая трактовка позволяет ввести в рассмотрение среднюю скорость изменения состояния загрузки узла в меньшую сторону λ_b , обусловленную выходом транзитной нагрузки. В этом случае параметр потока изменения состояния загруженности узла в меньшую сторону вследствие выхода из него транзитной нагрузки – $\lambda_{stj} = \lambda_b$.

Пусть у j -го узла M_j соседних узлов i , соответственно, M_j исходящих линий, каждая из которых ведет в один из этих узлов. Принятый в сети алгоритм маршрутизации обеспечивает распределение транзитной нагрузки, выходящей из узла по ис-

ходящим направлениям. При моделировании реализуется наиболее простой базовый принцип назначения стоимостей линий между соседними узлами для реализации алгоритма выбора кратчайших путей. Исходя из того, что чем более загружен узел, тем меньше транзитной нагрузки в него направляется, стоимость s_{ij} линии, ведущей из j -го узла в соседний i -й узел, полагается равной состоянию q_i загруженности накопителя i -го узла ($s_{ji} = q_i$). На рис. 4 возле каждого направления дуплексной связи показана стоимость соответствующей линии, которая равна состоянию загруженности узла сети, к которому она ведет (числу заполненных уровней узла.) При пустом накопителе узла стоимость ведущей в него линии полагается равной 1, как и при нахождении его в состоянии загруженности 1.

Для межсегментной связи (связи между узлами, входящими в различные разновысотные сегменты сети) базовая стоимость линии, ведущей от j -го узла к i -му, назначаемая на основе загруженности узла, к которому ведет линия, может корректироваться поправкой Δ_s . На рис. 4 показано введение следующих поправок: для линии, ведущей от узла k -го сегмента сети к узлу $(k+1)$ -го сегмента (поправка $\Delta_{s_{k,k+1}}$), и линии, ведущей от узла $(k+1)$ -го сегмента сети к узлу k -го сегмента (поправка $\Delta_{s_{k+1,k}}$). Возможны несколько вариантов назначения значения добавки Δ_s : 1) величина Δ_s полагается равной нулю, то есть все связи между узлами сети равноправны; 2) значение Δ_s – постоянная величина с положительным или отрицательным знаком в зависимости от задачи «поощрить» межсегментные связи или «препятствовать» им (если назначенная величина Δ_s с отрицательным знаком превосходит по модулю определяемую нагрузкой стоимость линии, то поправка Δ_s не вносится, а стоимость линии полагается равной наименьшему возможному значению 1); 3) Δ_s – переменная величина с положительным или отрицательным знаком, которая рассчитывается на основе среднего значения загруженности узлов сегмента сети, к которому она ведет.

При моделировании смены состояния загруженности узлов для каждой линии, ведущей из j -го узла в соседний i -й узел, рассчитывается коэффициент k_{ji} , который определяет долю нагрузки, исходящей из j -го узла по направлению к i -му. Вход нагрузки от j -го узла в соседний i -й узел обеспечивает увеличение загрузки накопителя i -го узла. Согласно такой модели сети смена состояния загрузки

каждого j -го узла в большую сторону вследствие поступления нагрузки от соседних узлов происходит с параметром

$$\lambda_{bj} = \sum_{i=1}^{M_j} k_{ij} \lambda_b,$$

где k_{ij} – коэффициент, определяющий долю нагрузки i -го узла, поступающей в j -й узел. Если в течение некоторого времени сохраняется неравенство $\lambda_{bj} > \lambda_{stj} = \lambda_b$, накопитель узла переходит в состояние полной загрузки, и поступление нагрузки в узел блокируется.

При моделировании сети расчет текущих значений k_{ji} для линий, исходящих из j -го узла, предлагается реализовывать на основе одного из описанных ниже подходов. Первый, достаточно грубо базируется на следующих рассуждениях. Чем больше стоимость линии, ведущей из j -го узла сети в соседний i -й узел, назначаемая для реализации алгоритмов выбора кратчайших путей, тем меньше вероятность, что этот элементарный отрезок пути войдет в состав кратчайшего пути между парой любых двух узлов сети, и тем меньшая доля нагрузки будет направлена по этому отрезку пути из j -го узла. Поэтому коэффициент k_{ji} определяется с использованием значений стоимостей s_{ji} линий, выходящих j -го узла:

$$k_{ji} = \frac{1/s_{ji}}{\sum_{v=1}^{M_j} 1/s_{jh_v}},$$

где h_v – номер узла, к которому ведет v -я исходящая линия из узла w .

Второй подход к расчету k_{ji} более полно учитывает процесс маршрутизации в сети. На каждом шаге по времени моделирования определяются пути наименьшей стоимости от j -го узла до каждого узла сети, отличного от j -го (при числе узлов сети n таких путей $(n-1)$). Далее для каждой исходящей линии от j -го узла к соседнему i -му определяется число n_{ji} кратчайших путей, проходящих через это направление. Доля нагрузки, направляемая из j -го узла к i -му, полагается равной доле кратчайших путей, проходящих через это исходящее направление.

ние, в общем числе кратчайших путей, выходящих из j -го узла:

$$k_{ji} = \frac{n_{ji}}{(n-1)}.$$

4. Программная реализация имитационной модели

В данном разделе представлено краткое описание организации оперативной памяти и алгоритма моделирования для разработанного варианта программной реализации имитационной модели, рассмотрены особенности программной реализации имитационной модели и перспективы ее использования.

4.1 Краткое описание организации оперативной памяти и алгоритма моделирования

Как отмечалось выше, при моделировании используется два варианта идентификации космического аппарата. Для установления взаимно-однозначного соответствия между ними реализован двухмерный массив $msod$. Номер столбца массива отвечает номеру узла сети (космического аппарата) при сквозной нумерации. Три элемента столбца содержат для соответствующего космического аппарата определяющие его значения номера сегмента, номера орбитальной плоскости в сегменте и номера среди космических аппаратов в орбитальной плоскости.

На каждом шаге моделирования рассчитываются текущие координаты космических аппаратов в геоцентрической экваториальной системе и гринвичской системе. Текущие координаты космических аппаратов в геоцентрических системах сохраняются в четырехмерных массивах, в которых первые три измерения используются для задания номера сегмента, номера плоскости в сегменте и номера космического аппарата в плоскости, а четвертое, – определяет номер координаты. Также рассчитываются координаты всех космических аппаратов в барицентрических орбитальных системах, связанных с каждым из космических аппаратов. Координаты барицентрических систем сохраняются в трехмерном массиве, где первое измерение – номер узла, соответствующего космическому аппарату, с которым связана барицентрическая система, второе, – номер узла, соответствующего космическому аппарату, координаты которого определены в этой системе, третье – номер соответствующей координаты.

С использованием значений координат барицентрической орбитальной системы на основе принятых правил выбора космических аппаратов для

связи и с учетом ограничений на реализацию связи определяются текущие значения элементов двухмерного массива топологии сети $mtpol$. Массив $mtpol$ организован следующим образом. Если линия связи от i -го узла к j -му отсутствует, то элемент i,j массива $mtpol$ содержит значение 0. Если от i -го узла сети к j -му установлена линия связи на передачу информации, то в этом элементе массива записан номер вида связи.

Текущая информация о нагрузке в узлах сети записана в одномерном массиве $mstat$. Номер ячейки соответствует номеру узла сети, содержимое ячейки, – текущее состояние загруженности узла (число заполненных уровней его накопителя). На основе информации о топологии сети (массив $mtpol$) и состояниях загруженности узлов сети (массив $mstat$) поддерживается двухмерный массив $mnet$, в котором представлена глобальная информация о сети: описана топология сети и значения стоимостей линий связи между смежными узлами сети. Если линия связи, ведущая от i -го узла к j -му отсутствует, то элемент i,j массива $mnet$ содержит значение «бесконечность» (число, значение которого превышает максимально возможное значение стоимости любого пути между двумя любыми узлами сети). Если по направлению от i -го узла к j -му реализована линия связи на передачу информации, то элемент i,j массива $mnet$ содержит значение стоимости этой линии связи, которое определяется по описанному в предыдущем разделе правилу на основе текущей информации массива $mstat$.

На основе информации массива $mnet$ реализуется расчет кратчайших путей (путей наименьшей стоимости) между каждой парой узлов сети. На основе полученных результатов составляются маршрутные таблицы узлов сети, которые сохраняются в трехмерном массиве $mtab$. Первое измерение массива используется для задания номера узла, в котором хранится таблица, второе и третье измерения определяют элемент маршрутной таблицы. Номер строки маршрутной таблицы соответствует номеру узла, который является получателем информации, первый и второй элементы строки – номер соседнего узла, в который отправляется информация по кратчайшему пути, и стоимость этого кратчайшего пути соответственно.

Моделирование смены состояния загруженности узла в большую или в меньшую сторону осуществляется с использованием информации одномерных массивов $mtime_bt$, $mtime_st$, $mtime_be$, $mtime_se$. Номер j ячейки массива соответствует номеру узла сети. Содержимое ячейки – значение момента времени, в который произойдет следующая соответствующая смена состояния загруженности j -го узла. Моделируются четыре возможных варианта

смены состояний. Следующий момент времени смены состояния загруженности узла в большую сторону вследствие движения через этот узел транзитной нагрузки записан в массиве $mtime_bt$, а момент следующей смены состояния загруженности узла в меньшую сторону вследствие движения транзитной нагрузки, – в массиве $mtime_st$. Момент следующей смены состояния загруженности узла в большую сторону, обусловленной обменом информацией с наземными пользователями, записан в массиве $mtime_bt$, а момент времени следующей смены состояния в меньшую сторону вследствие обмена информацией с наземными пользователями записан в массиве $mtime_st$. На каждом шаге моделирования для всех узлов сети проверяется условие наступления каждого из четырех перечисленных событий, представляющих собой вариант смены состояния загруженности узла. Если текущий момент времени превышает значение момента времени, записанного для узла j в j -й ячейке любого из четырех описанных выше массивов, то моделируется соответствующая смена состояния загруженности узла. Если шаг изменения времени выбран таким, что на одном и том же шаге может произойти несколько изменений состояния загруженности узла, то изменение состояния узла воспроизводится как суммарный результат этих изменений. Если произошло изменение состояния загруженности узла, обусловленное одной из четырех вышеназванных причин, в ячейку под номером j соответствующего массива записывается значение момента времени, когда должно произойти следующее изменение подобного вида. Этот момент времени моделируется путем прибавления к текущему моменту времени сгенерированной программой случайной величины с экспоненциальным законом распределения. Параметр экспоненциального закона представляет собой интенсивность соответствующей смены состояния загруженности j -го узла: λ_{btj} и λ_{stj} – параметры смен состояния в большую и в меньшую сторону вследствие прохождения транзитной нагрузки через узел; λ_{bej} и λ_{sej} – параметры смен состояния в большую и в меньшую сторону вследствие обмена нагрузкой с наземными пользователями. Текущие значения параметров λ_{btj} , λ_{stj} , λ_{bej} , λ_{sej} для узлов сети сохраняются в одномерных массивах $lambt$, $lamst$, $lambe$, $lamse$ соответственно (номер ячейки в этих массивах равен номеру узла, содержимое – значение интенсивности смены состояния узла). Значения элементов массивов $lambt$, $lamst$, $lambe$, $lamse$ на каждом шаге моделирования поддерживаются соответствующими текущему состоянию сети и расположению ее узлов над участками обслуживаемой территории.

В предложенном варианте имитационной модели интенсивность λ_{stj} смены j -го узла в меньшее состояние вследствие выхода транзитной нагрузки при хотя бы одном заполненном уровне накопителя – постоянная величина. Таким образом, j -ый элемент массива $lamst$ может содержать одно из двух значений: $\lambda_{stj} = \lambda_b$ при непустом накопите узла, и 0 при пустом. Текущее значение λ_{btj} интенсивности изменения состояния загрузки j -го узла в большую сторону вследствие поступления в него транзитной нагрузки, сохраняемое в массиве $lambt$, определяется описанным в предыдущем разделе способом на основе информации о связях между узлами сети и стоимостей этих связей.

Значения элементов массивов $lambe$, $lamse$ определяются на каждом шаге моделирования следующим образом. Территория обслуживания разбита на участки, каждому из них присвоен номер. В конкретной упрощенной реализации имитационной модели полагается, что территория обслуживания представляет собой поверхность Земли в заданной области широт. Эта область разбита на относительно равные участки (шаги разбиения обслуживаемой области по широте равны, шаг разбиения по долготе увеличивается от одной широты разбиения к другой с приближением участка к полюсу, в частности, – увеличивается пропорционально отношению двух соседних широт разбиения). Информация об участках разбиения сохраняется в двухмерном массиве $mland$. Номер столбца w соответствует номеру участка. В столбце четыре элемента. В них записаны значения максимальной и минимальной географической широты участка, максимальной и минимальной долготы. В представляемой реализации модели не задается определенное в пакетах на единицу времени значение параметра потока нагрузки от наземных пользователей каждого w -го участка. Для каждого w -го участка задано значение λ_{wb} интенсивности смены в большую сторону состояния загруженности абстрактного суммарного накопителя узлов сети, находящихся над этим участком. Значения интенсивности λ_{wb} определяется для интервалов времени, на которые разбит суточный интервал времени w -го участка. Значение интенсивностей λ_{wb} сохраняются в двухмерном массиве $lamlandb$. Номер строки массива $lamlandb$ соответствует номеру w участка территории, номер элемента строки соответствует номеру часового интервала в сутках на этой территории. В представляемой реализации модели всего два часовых интервала, соответствующих градации день-ночь.

Для космических аппаратов с использованием координат гринвичской системы определяются гео-

графические координаты их подспутниковых точек (географические широта и долгота). Эти координаты сохраняются в одномерных массивах mip , $mlamp$ (номер ячейки массива – номер узла сети, содержимое ячейки, – значение соответствующей координаты). Для каждого участка территории определяется текущий список узлов сети, подспутниковые точки которых попадают на территорию данного участка. Эта информация сохраняется в двухмерном массиве $mlanduz$. Номер строки массива соответствуют номеру участка, строка содержит текущий список узлов, находящихся над этим участком. Значение интенсивности увеличения загрузки суммарного накопителя w -го участка, записанное в ячейке w массива $lamlandb$, разбивается на основе принятого правила на составляющие между узлами, находящимися над этим участком территории. Полученные составляющие вписываются в соответствующие этим узлам ячейки массива $lambe$.

Интенсивности смены загруженности суммарного накопителя в меньшую сторону рассчитываются на каждом шаге моделирования с учетом текущих значений интенсивностей смены загруженности суммарного накопителя в большую сторону, записанных в массиве $lamlandb$, и вероятностей адресации поступающей нагрузки, значения которых записаны в двумерном массиве mp . Ячейка w, v массива mp содержит значение вероятности адресации к участку v информации, поступившей на участке w . Текущие значения интенсивностей λ_{vs} уменьшения состояния загруженности суммарного накопителя узлов, находящихся над v -м участком обслуживаемой территории, записываются в массив $lamlands$. Значение интенсивности увеличения загрузки суммарного накопителя v -го участка, записанное в ячейке v массива $lamlandb$, разбивается на основе принятого правила на составляющие между узлами, находящимися над этим участком территории. Полученные составляющие вписываются в соответствующие этим узлам ячейки массива $lamse$.

Если несколько узлов сети на одном шаге моделирования меняют свои состояния, то полагается, что смена их состояний происходит синхронно. Все изменения топологии сети на одном шаге моделирования также полагаются синхронными, происходящими одновременно с изменениями нагрузки в узлах сети. Пусть на текущем шаге моделирования произошли изменения топологии сети (хотя бы одна линия связи, направленная от i -го узла к j -му узлу, появилась или перестала связывать эти узлы). В соответствии с этими изменениями вносятся изменения в матрицу топологии сети $mtopol$ и матрицу глобальной информации о сети $mnet$. Пусть на текущем шаге моделирования произошли изменения нагрузки в узлах сети (хотя бы один узел изменил

свое состояние), соответствующие изменения вносятся в массив состояний сети $mstat$ и матрицу глобальной информации о сети $mnet$. Если было зафиксировано хотя бы одно изменение любого вида, рассчитываются новые значения кратчайших путей и обновляются маршрутные таблицы каждого из узлов, сохраняемые в массиве $mtab$. Если моделировать процесс более подробно с учетом последовательности срабатывания узлов и изменения топологии, то моменты времени, в которые происходит каждое изменение, необходимо расположить по возрастанию и последовательно моделировать реакцию сети на каждое из них.

Имитационная модель реализована в среде программирования Delphi.

4.2 Особенности программной реализации и ее применение

Представленный частный случай имитационной модели может иметь множество модификаций, определяемых совокупностью выбранных вариантов построения текущей топологии сети, правил распределения входной и выходной нагрузки при взаимодействии пользователей сети с доступными им узлами, правил назначения стоимостей линий связи для алгоритма выбора кратчайших путей. В основе имитационной модели достаточно простой алгоритм, который требует несущественной доработки для реализации любой из возможных модификаций. В каждом из вариантов программных реализаций варьируемыми параметрами являются параметры орбитального сегмента, базовые значения параметров потоков событий, представляющих собой смену состояний загруженности узлов сети, а также базовые значения для назначения стоимостей линий связи между узлами.

Предложенный подход к моделированию не предусматривает анализ конкретных вариантов алгоритмов маршрутизации данных в сети, в которых необходим учет информации с точностью до пакетов (в том числе, разделение их на управляющие и информационные). Однако этот подход дает возможность, сократив время моделирования на несколько порядков по сравнению с упомянутыми более точными моделями, анализировать влияние выбранных концепции построения орбитального сегмента и выбранных стратегий маршрутизации на распределение нагрузки между узлами сети (в отдельных сегментах сети и во всей сети), на маршруты в сети между парами конечных пользователей при различных вариантах их местоположений, а также на деревья кратчайших путей в сети.

Программная реализация позволяет рассмотреть отдельно дуг от друга два процесса смены со-

стояния загрузки узлов сети. Во-первых, для замкнутой сети, для узлов которой заданы состояния начальной загрузки, может моделироваться «циркуляция» нагрузки между узлами. Это позволяет видеть влияние выбранной стратегии маршрутизации на уравнивание загрузки узлов сети. Во-вторых, можно моделировать только смену состояния загрузки узлов сети вследствие обмена нагрузкой с наземными пользователями. При этом при совместном моделировании этих двух процессов они не полностью оторваны друг от друга, а «сцеплены» через состояние загрузки узла сети, которое учитывается при выборе маршрута следования информации.

В задачу статьи не входит анализ различных вариантов реализации сети, приводятся лишь некоторые результаты моделирования, представленные на рис. 6-9 для сети с космическими аппаратами на околокруговых орбитах, в которой 4 сегмента (сегмент 1 – 110 космических аппаратов, высота орбиты 700 км; сегмент 2 – 80 космических аппаратов, высота орбиты 1400 км; сегмент 3 – 56 космических аппаратов, высота орбиты 10000 км; сегмент 4 – 42 космических аппаратов, высота орбиты 21000 км). Число уровней разбиения накопителя узла – 25. На рис. 6 представлено одно из окон моделирующей программы, на котором показана текущая загрузка накопителя для каждого из узлов сети, а также изменение во времени загрузки накопителя выбранного узла и окружающих его узлов.

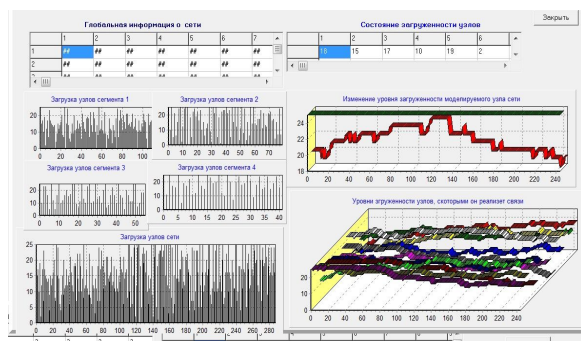


Рис. 6. Окно текущих результатов моделирования

На рис. 7-9 показано изменение во времени средней нагрузки в узлах каждого из четырех сегментов сети, измеряемое числом n_z заполненных уровней накопителя узла. Начальное заполнение узлов сети смоделировано случайным образом при условии равноправности каждого из узлов.

На рис. 7 и 8 представлен случай замкнутой сети, в которой нет обмена информацией с наземными пользователями. На рис. 7 показаны результаты для равноправных связей между узлами сети, стоимость которых зависит только от загрузки узлов, к которым они ведут, а на рис. 8 показан

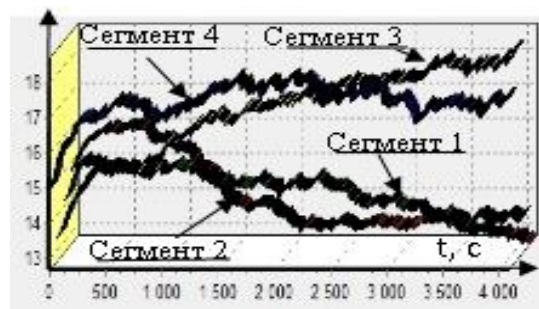


Рис. 7. Средняя загрузка узлов сегментов разомкнутой сети при равноправных связях

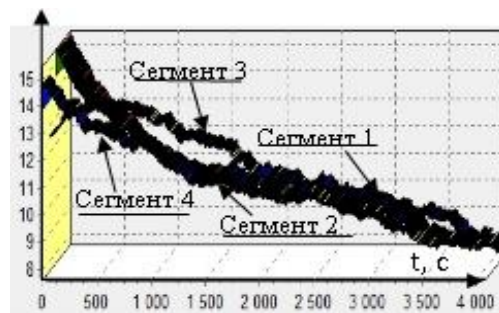


Рис. 8. Средняя загрузка узлов сегментов разомкнутой сети при корректировке стоимостей межсегментных связей

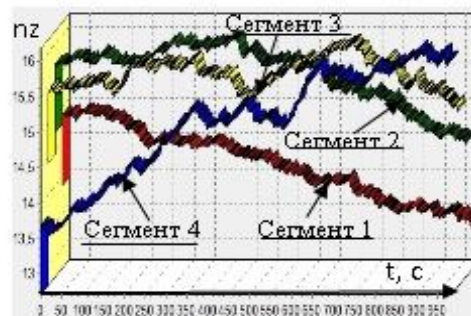


Рис. 9. Средняя загрузка узлов сегментов замкнутой сети

случай, в котором линии связи, ведущей в соседний сегмент, добавляется значение 1, если средняя нагрузка в сегменте, в который она ведет, превышает на 1 нагрузку в сегменте, в котором находится узел отправляющий информацию. В случае равноправных связей средняя нагрузка существенно возрастает в верхних сегментах, прежде всего потому, что на выбор пути следования информации влияют как стоимости отрезков путей, так и число отрезков путей, которых при движении в верхних сегментах меньше. В случае управления потоками за счет управления стоимостями межсегментных связей средние значения загрузки узлов всех сегментов сети становятся близкими по значениям.

На рис. 9 показано изменение средней загрузки разомкнутой сети при совместном воспроизведении процессов изменения загрузки в

узлах сети, обусловленных движением транзитной нагрузки и обменом нагрузкой с наземными пользователями.

Заклучение

Предложенная имитационная модель, относящаяся к классу упрощенных, является достаточно грубой даже для этого класса моделей. Это связано, прежде всего, с тем, что результаты моделирования процессов изменения нагрузки в узлах сети, вызванных прохождением через них потоков транзитной нагрузки и обменом нагрузкой с наземными пользователями, достаточно слабо «сцеплены» между собой. В том числе, в данной модели плохо отражено перераспределение нагрузки в сети вследствие изменения адресации потоков в зависимости от расположения узлов над территорией местонахождения адресатов. Однако эта имитационная модель в первом приближении отражает основные процессы в сети, позволяет с малыми затратами времени на моделирование выявить «критические ситуации», связанные с блокировками узлов, вызванными неравномерностью нагрузки и ограниченностью ресурсов сети. Использование предложенной модели будет полезно для анализа спутниковых сетей на начальных этапах их проектирования, при исследовании различных концептуальных решений по созданию спутниковых сетей.

Необходимо также отметить, что при описанном подходе к моделированию область разбиения территории на участке должна быть сравнима по размерам (приблизительно равна) мгновенной зоне обслуживания космического аппарата самого высокого сегмента. Это приводит к необходимости увеличивать шаг разбиения территории, в случае использования средневысотных и высоких орбит. Решение этой проблемы требует соответствующей доработки предложенной модели, которая приведет к некоторому ее усложнению.

Литература

1. Невдяев, Л. М. *Персональная спутниковая связь* [Текст] / Л. М. Невдяев, В. В. Смирнов. – М. : Эко-Трендз, 1998. – 215 с.
2. Мальцев, Г. Н. *Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи* [Текст] / Г. Н. Мальцев // Информационно-управляющие системы. – 2007. – № 1. – С. 33 – 39.
3. *Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных* [Текст] / Под ред. А. И. Галькевича. – Тамбов : ООО «Издательство Юлис», 2011. – 169 с.
4. Ковалев, А. М. *Глобальная инфокоммуникационная сеть с использованием пикоспутников* [Текст] / А. М. Ковалев, Т. Ю. Лямичева, Д. Ю. Пономарев // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 546-548.
5. Sun, Zhili. *Satellite networking: principles and protocols* [Text] / Zhili Sun. – The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex : John Wiley & Sons Ltd., 2014. – 508 p.
6. *Satellite and next generation networks: QoS issues* [Text] / S. Combes, O. Alphand, P. Berthou, T. Gayraud // Journal of space communications. – 2015. – Vol. 20, Iss. 3-4. – P. 101-119.
7. Кожевников, Е. А. *Комбинированные сети спутниковой связи при одновременном использовании высокоорбитальных и низкоорбитальных группировках* [Электронный ресурс] / Е. А. Кожевников, А. А. Спириин / Сборник статей по материалам XXVII Международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Россия, г. Новосибирск, 30 октября 2013 г.). – Режим доступа: <http://sibac.info/10929>. – 12.12.2015.
8. Королев, Б. В. *Технология работы космической оптической линии связи для повышения оперативности управления и получения информации потребителем в процессе функционирования космических средств* [Текст] / Б. В. Королев / Космическая техника и технологии. – 2014. – № 1 (4). – С. 39-47.
9. *Глобализация спутниковых систем – путь к эффективному практическому использованию космоса. Передача информации по глобальной спутниковой сети* [Текст] / Т. В. Лабуткина, С. М. Омегаги, А. Т. Боранбаева, Д. Т. Сагидолдин // Наукові читання «Дніпровська орбіта – 2012» : Збірник доповідей. – Дніпропетровськ : НЦАОМ, 2012. – С. 210-212.
10. Борицова, О. В. *Экологические аспекты использования спутниковых сетей связи с разновысотными орбитальными группировками, глобализация спутниковых систем* [Текст] / О. В. Борицова, Т. В. Лабуткина, А. А. Тихонова // Наукові читання «Дніпровська орбіта – 2015» : Збірник доповідей. – Дніпропетровськ : НЦАОМ, 2015. – С. 104-107.
11. Шварц, М. *Сети связи: протоколы моделирование и анализ* [Текст] / М. Шварц. – М. : Наука, Гл. ред. Физ.-мат. литературы, 1992. – 608 с.
12. *A Simulation Model of a Satellite Data Transmission Network* [Text] / T. V. Labutkina, V. O. Larin, V. V. Belikov, S. Y. Kondous, Y. V. Bezruchko // 55th International Astronautical Congress, 4 – 8 Oct. 2004, Vancouver. – Article IAC-04-U.3.b.04.
13. Борицёва, А. В. *Моделирование кинематики составной линии связи между космическими аппаратами спутниковой сети с разновысотными орбитальными группировками* [Текст] / О. В. Борицёва, Т. В. Лабуткина // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки : Збірник наукових праць. – 2015. – Т. XVII. – С. 9-25.

14. *Kinematic Models of Communication Lines «Space Vehicle –Space Vehicle» and «Space Vehicle – Surface Station – Space Vehicle» for Designing Satellite Systems [Text] / T. V. Labutkina, O. M. Petrenko, V. O. Larin, V. V. Belikov // 65st International Astronautical Congress, 29 september – 3 october 2014, Toronto, Canada. – Article IAC-14-D1.6.11.*

15. *Основы теории полета космических аппаратов [Текст] / под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. – М. : Машиностроение, 1972. – 608 с.*

References

1. Nevdyayev, L. M., Smirnov V. V. *Personal'naya sputnikovaya svyaz'* [Personal satellite communications]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 1998. 215 с.

2. Mal'tsev, G. N. Setevye informatsionnye tekhnologii v sovremennykh sputnikovyykh sistemakh svyazi [Network information technologies in modern satellite communication systems]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and Control System*, 2007, no. 1. pp. 33 – 39.

3. *Nizkoorbital'naya kosmicheskaya sistema personal'noi sputnikovoi svyazi i peredachi dannykh* [Low-orbit space system for personal satellite communication and data transmission] (Russ. ed.: Gal'kevich, A. I.). Tambov, OOO «Izdatel'stvo Yulis» Publ., 2011. 169 p.

4. Kovalev, A. M., Lyamicheva, T. Yu., Ponomarev, D. Yu. *Global'naya infokommunikatsionnaya set' s ispol'zovaniem pikosputnikov* [Global infocommunication network using picosatellites]. *Sovremennye problemy radioelektroniki : sb. nuchn. tr.* [Modern Problems of Radio Electronics: collection of scientific works]. Krasnoyarsk, Sib. Feder. University Press Publ., 2014. pp. 546-548.

5. Sun, Zhili. *Satellite networking: principles and protocols*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons Ltd. Publ., 2014. 508 p.

6. Combes, S., Alphan, O., Berthou, P., Gayraud, T. *Satellite and next generation networks: QoS issues*. *Journal of space communications*, 2015, vol. 20, iss. 3-4, pp. 101-119.

7. Kozhevnikov, E. A., Spirin, A. A. *Kombinirovannye seti sputnikovoi svyazi pri odnovremennom ispol'zovanii vysokoorbital'nykh i nizkoorbital'nykh gruppirovkakh* [Combined satellite network while using vysokoorbital'nykh and low-orbit groupings]. *Sbornik statei po materialam XXVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike», Rossiya, g. Novosibirsk, 30 oktyabrya 2013 g.* [Collected articles on materials XXVII International scientific-practical conference "Engineering - From Theory to practice", Russia, Novosibirsk, October 30, 2013]. Available at: <http://sibac.info/10929> (accessed 12.12.2015).

8. Korolev, B. V. *Tekhnologiya raboty kosmicheskoi opticheskoi linii svyazi dlya povysheniya operativnosti upravleniya i polucheniya informatsii*

potrebitelem v protsesse funktsionirovaniya kosmicheskikh sredstv [Space optical communications line technology aimed at a more responsive control and prompter delivery of data to the end user during space operations]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space technology and technology*, 2014, no. 1 (4), pp. 39-47.

9. Labutkina, T. V., Otegali, S. M., Boranbaeva, A. T., Sagidoldin, D.T. *Globalizatsiya sputnikovyykh sistem – put' k effektivnomu prakticheskomu ispol'zovaniyu kosmosa*. *Peredacha informatsii po global'noi sputnikovoi seti* [Globalization of satellite systems - the path to effective practical use of space. Transmission of information on the global satellite network]. *Naukovi chitannya «Dniprovs'ka orbita – 2012» : Zbirnik dopovidei* [Scientific reading "Dnepr orbit - 2012" : Collection of reports]. Dnepropetrovsk: NTSAOM Publ., 2012, pp. 210-212.

10. Borshchova, O. V., Labutkina, T. V., Tikhonova, A. A. *Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya sputnikovyykh setei svyazi s raznovysotnymi orbital'nymi gruppirovkami, globalizatsiya sputnikovyykh sistem* [Ecological aspects of the use of satellite networks with orbital raznovysotnykh groups, globalization of satellite systems]. *Naukovi chitannya «Dniprovs'ka orbita – 2015» : Zbirnik dopovidei* [Scientific reading "Dnepr orbit - 2015" : Proceedings]. Dnepropetrovsk, NTSAOM Publ., 2015. – S. 104-107.

11. Shvarts, M. *Seti syazi: protokoly modelirovanie i analiz* [Communication Networks: protocols modeling and analysis]. Moscow, Science, Ch. red. fiz.-mat. Literature Publ., 1992. 608 p.

12. Labutkina, T. V., Larin, V. O., Belikov, V. V., Kondous, S. Y., Bezruchko, Y. V. *A Simulation Model of a Satellite Data Transmission Network*. *55th International Astronautical Congress*, 4 – 8 Oct. 2004, Vancouver, Article IAC-04-U.3.b.04.

13. Borshcheva, A. V., Labutkina, T. V. *Modelirovanie kinematiki sostavnoi linii svyazi mezhdru kosmicheskimi apparatami sputnikovoi seti s raznovysotnymi orbital'nymi gruppirovkami* [Kinematics simulation an integral link between the spacecraft with the satellite network raznovysotnykh orbital groupings]. *Systemne proektuvannya ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoyi tekhniki – System design and analysis of aerospace engineering*, 2015, vol. 18, pp. 9-25.

14. Labutkina, T. V., Petrenko, O. M., Larin, V. O., Belikov, V. V. *Kinematic Models of Communication Lines «Space Vehicle –Space Vehicle» and «Space Vehicle – Surface Station – Space Vehicle» for Designing Satellite Systems*. *65st International Astronautical Congress*, 29 september – 3 october 2014, Toronto, Canada. – Article IAC-14-D1.6.11.

15. *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of theory of flight spacecraft] (Russ. ed.: Narimanova G. S., Tikhonravova M. K.). Moscow, Mechanical engineering Publ., 1972. 608 p.

Поступила в редакцію 14.01.2016, рассмотрена на редколлегии 18.02.2016

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СУПУТНИКОВОЇ МЕРЕЖІ КОМУТАЦІЇ ПАКЕТІВ З РІЗНОВИСОТНИМИ ОРБІТАЛЬНИМИ СЕГМЕНТАМИ

Т. В. Лабуткіна, В. О. Ларін, В. В. Бєліков, О. В. Борщова, О. А. Тихонова, Д. І. Дерев'яшкін

Запропоновано імітаційну модель супутникової мережі комутації пакетів, яку побудовано на різновисотних орбітальних угрупованнях космічних апаратів, що призначено для аналізу навантаження і маршрутизації даних на початкових етапах проектування супутникової системи. Моделюється топологія мережі і навантаження у вузлах мережі. Для моделювання навантаження введено поняття стану навантаження вузла. Це поняття засновано на тому, що обсяг накопичувача вузла розподілений на прийняте число рівнів. Стан вузла визначає кількість заповнених рівнів накопичувача. Зміна стану завантаження накопичувача вузла мережі моделюється як процес розмноження і загибелі, спричинений обміном навантаження з наземними користувачами системи і потоками транзитного навантаження скрізь вузол.

Ключові слова: імітаційна модель, супутникова мережа комутації пакетів, супутникова система із різновисокими орбітальними угрупованнями, топологія мережі, навантаження вузла мережі, процес розмноження та загибелі.

A SIMULATION MODEL OF A PACKET SWITCHING SATELLITE NETWORK WITH DIFFERENT ORBIT HEIGHTS SEGMENT

T. V. Labutkina, V. A. Larin, V. V. Belikov, A. V. Borscheva, A. A. Tihonova, D. I. Derevyashkin

A simulation model of a packet switching satellite network based on a satellite constellation with different orbit heights is presented. The model is meant for analysis of load and data routing at the initial stages of designing of a satellite constellation. Topology of the network and the load in its nodes are modeled. The notion of load of a node is introduced for modeling. This notion is based on division of the node store on an accepted number of levels. The state of a node is determined by the number of filled levels of the store. The change of the load of a node store is modeled as a process of reproduction and dying out caused by the exchange of load with the surface users of the system and the transit load flow through the node.

Keywords: simulation model, packet switching satellite network, satellite constellation, orbital groups of different heights, network topology, load of a network node, process of reproduction and dying out.

Лабуткіна Тат'яна Вікторівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. систем автоматизованого управління, Дніпропетровський національний університет імені Олеса Гончара, e-mail: tvlabut@ukr.net.

Ларин Владимир Алексеевич – канд. техн. наук, проф., проф. каф. систем автоматизованого управління, Дніпропетровський національний університет імені Олеса Гончара.

Бєліков Владимир Вікторович – старш. преп. каф. систем автоматизованого управління, Дніпропетровський національний університет імені Олеса Гончара.

Борщова Александра Владимировна – студент каф. систем автоматизованого управління, Дніпропетровський національний університет імені Олеса Гончара.

Тихонова Александра Андреевна – студент каф. систем автоматизованого управління, Дніпропетровський національний університет імені Олеса Гончара.

Дерев'яшкін Дмитрий Іванович – студент каф. систем автоматизованого управління, Дніпропетровський національний університет імені Олеса Гончара.

Labutkina Tatiana Victorovna – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Automatic Control Systems Department, Physics and Technology Faculty, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, e-mail: tvlabut@ukr.net.

Larin Vladimir Alekseevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Automatic Control Systems Department, Physics and Technology Faculty, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.

Belikov Vladimir Viktorovich – Senior Teacher, Automatic Control Systems Department, Physics and Technology Faculty, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.

Borshchova Aleksandra Vladimirovna – student, Automatic Control Systems Department, Physics and Technology Faculty, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.

Tykhonova Aleksandra Andreivna – student, Automatic Control Systems Department, Physics and Technology Faculty, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.

Dereviashkin Dmitriy Ivanovich – student, Automatic Control Systems Department, Physics and Technology Faculty, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.