

УДК 629.783:681.3

Т. В. Лабуткина¹, А. В. Бабанина¹, Н. М. Сотничек^{1,2},
И. А. Саенко¹, А. В. Дымченко¹

¹Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара,

² ПАО Укртелеком

КОНЦЕПЦИЯ СПУТНИКОВОЙ СЕТИ КОММУТАЦИИ ПАКЕТОВ С НАЗЕМНЫМ, АВИАЦИОННЫМ И КОСМИЧЕСКИМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ СЕГМЕНТАМИ

Представлена концепция спутниковой сети коммутации пакетов с наземными, авиационными и космическими абонентами, построенной на разновысотных орбитальных группировках. основополагающие решения концепции направлены на преодоление проблем, обусловленных следующими причинами: 1) динамическая топология сети; 2) динамический состав узлов, доступных абонентам сети; 3) контроль текущего места нахождения абонентов для адресации данных.

Ключевые слова: спутниковая сеть коммутации пакетов, спутниковая сеть с разновысотными орбитальными группировками, спутниковая сеть связи с наземным, авиационным и космическим пользовательскими сегментами, потоки сетевой нагрузки.

Запропонована концепція супутникової мережі комутації пакетів з наземними, авіаційними і космічними абонентами, яка побудована на різновисоких орбітальних угрупованнях. основоположні рішення концепції спрямовані на подолання проблем, які обумовлені такими причинами: 1) динамічна топологія мережі; 2) динамічний склад вузлів, доступних абонентам мережі; 3) контроль поточного місця знаходження абонентів для адресації даних.

Ключові слова: супутникова мережа комутації пакетів, супутникова мережа з різновисокими орбітальними угрупованнями, супутникова мережа з наземними, авіаційними і космічними сегментами користувачів, потоки мережного навантаження.

The concept of a satellite packet switching network with ground, aeronautical and space users, constructed in different orbital orbits, is presented. The fundamental solutions of the concept are aimed at overcoming the problems caused by the following reasons: 1) dynamic network topology; 2) the dynamic composition of nodes available to network subscribers; 3) monitoring the current location of subscribers for addressing data.

Keywords: satellite packet switching network, satellite network with various altitude orbital groups, satellite communication network with ground, aviation and space user segments, network loads.

Введение. В настоящее время активно рассматриваются различные технические решения в области развития возможностей спутниковых систем связи. В том числе все большее внимание привлекает создание спутниковых систем, в которых реализованы технологии Internet [3,4,6,7,14-18]. Перспективны технические решения по реализации этих систем на основе

использования межспутниковых связей (сеть, узлами которой являются космические аппараты, поднимается в космос [6-9]).

При этом все чаще выдвигаются концепции спутниковых сетей, использующих космические аппараты, находящиеся в разновысотных орбитальных группировках (концепции спутниковых сетей с несколькими разновысотными сегментами) [8,9]. Аргументы использования разновысотных орбитальных сегментов спутниковой сети можно подразделить на две группы. Аргументы первой группы напрямую связаны с оптимизацией путей следования передаваемой информации и управлением сетевой нагрузкой. К аргументам этой группы можно отнести следующие: 1) через низкоорбитальные группировки земные пользователи сети с низкой энергетикой получают доступ к более высоким сегментам; 2) использование разновысотных сегментов даст возможность оптимизировать потоки нагрузки, отправляя пакеты через узлы низких сегментов к близким пользователям, а через узлы высоких сегментов – к дальним; 3) применение разновысотных сегментов позволит быстрее сглаживать как локальные флуктуации нагрузки, так и крупные неравномерности («перекосы») ее распределения в сети; 4) некоторые из сегментов могут быть адаптированы для взаимодействия с одним из классов абонентов сети и использоваться с приоритетами для этих пользователей, а увязка всех сегментов в единую сеть будет служить для балансирования нагрузки в целом по сети с пользой для всех абонентов [11]. Вторая группа аргументов касается повышения эффективности процессов управления спутниковой сетью, которые влияют на качество решения ее целевых задач. В частности, в ряде работ, например, [7,8] предлагается возложить на узлы высоких сегментов некоторые функции контроля сети и управления сетью, а также оптимизировать сетевые процессы за счет разбиения функций транспортировки данных и передачи служебной информации между разновысотными сегментами сети.

Разобьем потребителей услуг спутниковой сети связи на три класса [12,13]. К первому классу отнесем наземных пользователей и медленных воздушных (например, аэростаты). Ко второму классу отнесем объекты авиации (управляемые летательные аппараты – самолеты и вертолеты, а также беспилотники) и назовем их авиационными или быстрыми воздушными. Пользователей первого и второго класса, находящихся в пределах земной атмосферы, будем называть земным. К третьему классу отнесем космические аппараты, которые используют ресурсы спутниковой сети связи для обмена информацией с наземными станциями или между собой (используют ее как средство транспортировки данных). Будем называть пользователей третьего класса космическим пользовательским сегментом спутниковой сети связи. В составе космического пользовательского сегмента могут быть космические аппараты дистанционного зондирования Земли, метеорологические и исследовательские спутники. Сеть связи, которую используют перечисленные

выше абоненты, будем называть сетью транспортировки информации (или транспортной сетью связи).

Пользователи каждого класса могут создавать свои сети, реализуя связи вне спутниковой сети транспортировки информации. К таким сетям относятся следующие: 1) сети наземных абонентов; 2) радиосети авиационных пользователей; 3) в ходе решения целевой задачи спутники дистанционного зондирования Земли или исследовательские спутники могут поддерживать непосредственные связи внутри относительно компактной группировки (кластера спутников). Принципы функционирования перечисленных сетей в общем случае будут отличаться от принципов функционирования спутниковой сети транспортировки данных. Отметим также, что транспортную сеть связи и космические аппараты ее космического пользовательского сегмента можно рассматривать как гибридную спутниковую систему, объединяющую в себе спутниковые системы разного назначения.

Данная статья посвящена разработке концепции спутниковой сети связи с абонентами трех перечисленных выше классов, в которой реализована техника коммутации пакетов. Концепция разработана на основе синергии результатов анализа проблем создания таких сетей и подходов к их решению, представленных в работах различных авторов (в том числе, в работах [1-3,6-9, 15-18]).

Анализ литературы, формулировка проблем. Выделим три основных проблемы реализации спутниковой сети коммутации пакетов. *Первая проблема* – динамическая топология сети [6,14]. Устройство межспутниковой связи космического аппарата необходимо переключать с одного космического аппарата на другой, если тот космический аппарат, с которым велась связь, выходит из зоны, доступной для реализации связи. Изменение топологии сети и перерывы связи, которые могут возникать при переключении устройств связи с одного космического аппарата на другой, приводят к сложности задачи маршрутизации данных и к появлению ситуаций возможного торможения нагрузки в окрестности узлов, переключающих связи.

Вторая проблема – динамический состав узлов сети, доступных абоненту [6]. Вследствие орбитального движения космических аппаратов транспортной сети множество космических аппаратов, доступных для связи с участка территории, на котором (или над которым в области атмосферы) находится объект, являющийся адресатом. Если потребитель услуги транспортной сети – космический аппарат, то вследствие движения космического аппарата-абонента и космических аппаратов транспортной спутниковой сети, состав узлов транспортной спутниковой сети, с которыми он может реализовывать связь, также изменяется.

Третья проблема – необходимый для адресации информации контроль текущего положения абонента сети (положение абонента в общем случае изменяется в пределах совокупной зоны обслуживания системы). При адресации положение абонента первого или второго класса может определяться, например, номером зоны территории (соты), на которой (или над

которой) он находится. Для адресации информации к абоненту космического сегмента (космическому аппарату) необходима информация о составе узлов сети, транспортирующей информацию, с которыми этот абонент может реализовывать связь непосредственно при приеме получаемых им блоков данных. Предполагается, что в системе тысячи абонентов, но контроль их текущего положения при маршрутизации не должен приводить к такому увеличению числа служебных пакетов в сети, которое сделает нерациональным ее использование. Пути решения этой проблемы предлагаются, например, в работе [7].

Цель статьи. Разработать концепцию спутниковой сети коммутации пакетов, построенную на разновысотных орбитальных группировках, используемую наземными, авиационными и космическими абонентами. Основополагающие решения концепции должны быть направлены на преодоление сложностей реализации функционирования сети, обусловленных тремя основными проблемами: 1) динамическая топология сети; 2) динамический состав узлов, доступных абонентам сети; 3) контроль текущего положения абонентов для адресации данных.

Материалы исследований. Концепция многосегментной спутниковой сети связи, в которой реализована техника коммутации пакетов.

Представим описание наиболее общего варианта орбитальной группировки (полигруппировки), на которой построена спутниковая сеть. В составе сети N узлов (космических аппаратов). В полигруппировке можно выделить n_{gr} подгруппировок, которые будем рассматривать как сегменты сети. В каждой k -й подгруппировке N_k космических аппаратов. Каждый космический аппарат по своей принадлежности закреплен за подгруппировкой и при функционировании подгруппировку не изменяет. Примем, что зоны высот, в которых находятся орбиты двух подгруппировок (два сегмента сети), не пересекаются. Подгруппировки спутниковой сети можно подразделить по зонам высот, в которых находятся орбиты их космических аппаратов, на три класса: низкоорбитальные, средневысотные и высокоорбитальные. В системе может быть несколько подгруппировок каждого класса. Орбитальная структура подгруппировки обеспечивает глобальное покрытие Земли или покрытие заданной области широт (покрытие может быть однократным или большей кратности). Космические аппараты подгруппировки связаны в единую сеть, которая является сегментом всей сети. Между всеми сегментами сети существуют связи – непосредственные или через другие сегменты. Все сегменты сети могут выполнять функции транспортировки данных (рис. 1).

Каждый космический аппарат спутниковой сети стабилизирован в неизменной угловой ориентации относительно осей барицентрической орбитальной системы координат и постоянно включен в состав спутниковой сети, устанавливая межспутниковые линии связи – программно управляемые

лучи фазированных антенных решеток или оптические линии связи. Базовый метод наведения устройств приема и передачи информации – программный.

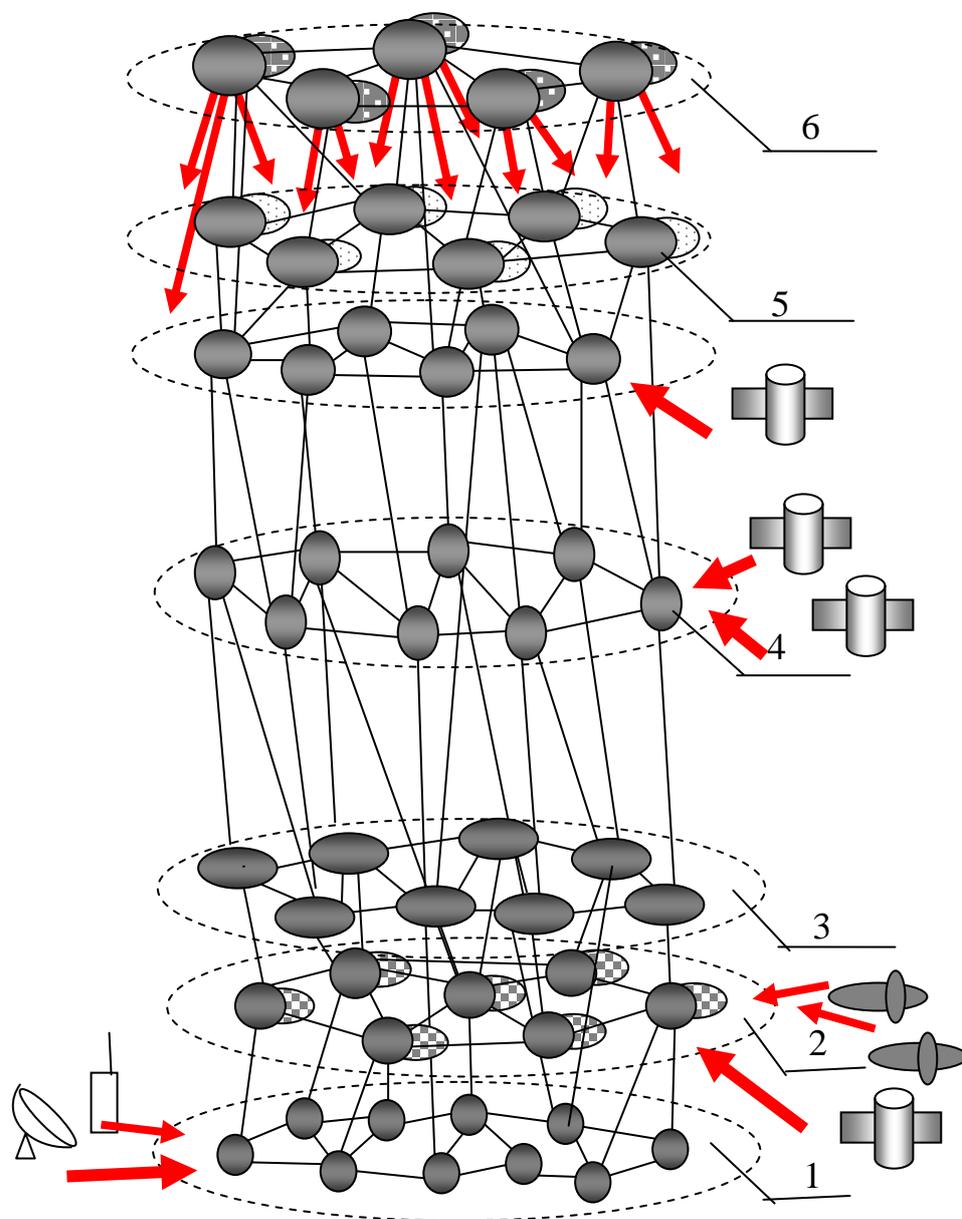


Рис. 1. К пояснению концепции сети: а) типы связей; б) уровни заполнения накопителя; в) схематическое изображение примера реализации сети транспортировки информации: 1 – низкоорбитальный сегмент, адаптированный для входа низкоэнергетических наземных пользователей; 2 – низкоорбитальный сегмент, предназначенный для авиационных пользователей; 3 – низкоорбитальный сегмент с дополнительной функцией контроля изменения текущего положения абонентов; 4 – средневысотный сегмент, используемый для транспортировки данных и обмена информацией с космическим пользовательским сегментом; 5 – высокий сегмент транспортировки данных; 6 – высокий сегмент ведения абонентов; 7 – высокий сегмент, транслирующий служебную информацию,

Однако точность его может быть повышена за счет использования автоматически управляемой «поднастройки» по уровню принимаемого сигнала (то есть за счет реализации комбинированного наведения).

Космический аппарат может реализовывать связи шести типов. Разобьем эти типы на три группы [4,10,11]. Связи первой группы (назовем их связями узлов на разновысотных орбитах или просто разновысотными) космический аппарат устанавливает с теми космическими аппаратами, которые находятся над или под плоскостью его мгновенного местного горизонта (типы 1 и 2 соответственно). Принимается, что межсегментные связи могут быть только типов 1 или 2 (с космическими аппаратами более высоких или более низких сегментов соответственно). Связи второй группы (назовем их боковыми) – с космическими аппаратами в одном орбитальном сегменте в боковых орбитальных плоскостях слева и справа от орбитальной плоскости космического аппарата, который реализует связи (типы 3 и 4 соответственно). Связи третьей группы (назовем их связями в орбитальной плоскости) – с космическими аппаратами, находящимися в той же номинальной орбитальной плоскости, что и связываемый с ними космический аппарат (типы 5 и 6 соответственно).

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. Более строго основные условия использования устройства связи q -го типа можно сформулировать так: космический аппарат, с которым устанавливается связь q -го типа должен находиться в секторе реализации связи этого типа.

Для определения условия нахождения i -го космического аппарата в секторе реализации связи q -го типа j -м космическим аппаратом могут быть использованы базовая плоскость и базовая ось связанной с ним барицентрической орбитальной системы координат $X_{brj} Y_{brj} Z_{brj}$ [10,11]. Для связей типов 1 и 2 базовая плоскость – плоскость мгновенного местного горизонта j -го космического аппарата, а базовая ось – OZ_{brj} . Для связей типов 3 и 4 базовая плоскость – бинормальная, а базовая ось – OY_{brj} . Для связей типов 5 и 6 базовая плоскость – трансверсальная, а базовая ось – OX_{brj} . Полагается, что сектор реализации связи симметричен относительно базовой оси. Положение сектора связи относительно базовой плоскости (в какую сторону от нее он направлен) определяет знак координаты базовой оси. Размер сектора можно определять граничным значением возможного угла u_{gr} отклонения линии связи от базовой оси (большим этого угла отклонение быть не может) или максимальным значением угла γ_{gr} между базовой плоскостью и линией связи (меньше этого значения угол высоты i -го космического аппарата над базовой плоскостью j -го космического аппарата быть не может).

Как и большинство односегментных спутниковых сетей связи подгруппировка космических аппаратов сегмента спутниковой сети может быть построена на однородных орбитах, – для k -й подгруппировки на однородных орбитах номинальные значения эксцентриситета e_k , большой полуоси a_k , наклона орбиты i_k и аргумента перигея ω_k одинаковы для всех космических аппаратов, а различаются только значения долготы восходящего узла Ω_k (это значение одинаково лишь для космических аппаратов в одной номинальной орбитальной плоскости) и момента времени прохождения перигея τ_k .

В более общем случае сегмент сети может быть построен на неоднородных орбитах. Например, неоднородные орбиты в сегменте сети могут быть использованы для решения проблемы реализации боковых связей в окрестности узловых точек (точек пересечения траекторий космических аппаратов с линией пересечения их орбитальных плоскостей). Суть проблемы в том, что если космический аппарат поддерживает связь с помощью бокового устройства (например, типа 3 или 4) с другим космическим аппаратом, то после прохождения узловых точек необходимо использовать боковое устройства другого типа (4 или 3 соответственно для приведенного примера). Поэтому пару узловых точек, находящихся с одной стороны от центра Земли, будем называть узлом переключения. На участках орбит в окрестности узловых точек связь не реализуема (космические аппараты проходят «мертвую зону»). При прохождении участков мертвой зоны будет «торможение нагрузки», для избегания которого необходимо учитывать в алгоритме маршрутизации то, что некоторые исходящие линии узла временно не будут использованы.

К числу подходов к решению этой проблемы можно отнести выбор такой орбитальной структуры подгруппировки на неоднородных орбитах, которая позволит сгладить проявление негативного эффекта «мертвых зон» в окрестности узлов переключений. Можно привести следующие примеры возможных решений по выбору орбитальных структур: 1) узлы переключений разнесены в пространстве путем выбора различных значений наклонов орбитальных плоскостей (одно и то же значение наклона повторяется с принятой кратностью для последовательно пронумерованных орбитальных плоскостей), 2) продолжительность участков орбит, на которых существует «мертвая зона» может быть уменьшена при использовании боковых связей космических аппаратов на орбитах, которые несколько различаются по высоте (одно и то же значение высоты повторяется с принятой кратностью для последовательно пронумерованных орбитальных плоскостей); 3) эффект «мертвой зоны» может быть практически исключен, если орбитальные плоскости одного сегмента сети разнести по высоте и для связи между космическими аппаратами в различных плоскостях сегмента вместо боковых связей (типа 3 и 4) использовать устройства типа 1 и 2, как и для межсегментных связей.

В данной статье не будем останавливаться на подробном анализе реализации описанных технических решений по выбору структуры

орбитальной подгруппировки, на которой строится сегмент сети. Отметим лишь, что возможны варианты, в которых накапливающиеся изменения разности значений долготы восходящего узла для орбит с различными наклонениями или отставание одного космического аппарата от другого вследствие разности высот их орбит не корректируются. Для этого вся группировка должна быть симметричной, а изменения в относительном расположении космических аппаратов будут учитываться в расчетной модели при программном управлении линиями связи. При достижении изменениями порогового значения и ухода космического аппарата из зоны реализации связи при симметричной структуре орбитальной группировки произойдет переключение связи на другой космический аппарат, который вследствие текущих изменений займет его место в этой зоне.

Выше изложенное приводит к более общему пониманию подгруппировки космических аппаратов, на которой построен сегмент спутниковой сети. В подгруппировке космических аппаратов сегмента сети можно выделить несколько субподгруппировок, построенных на однородных орбитах (n_{sk} субподгруппировок в каждой k -й подгруппировке). Разделение полигруппировки (космического сегмента, на котором построена вся сеть) на подгруппировки (включая с некоторым запасом по составу включаемых в нее узлов щие в себя субподгруппировки) определено спецификой использования каждой подгруппировки в комплексной реализации сети. В частности, если в системе предусмотрено несколько низкоорбитальных сегментов, то один из них может быть адаптирован для связи с низкоэнергетическими земными пользователями, а другой – для передачи данных авиационных абонентов. Это означает, что блоки данных близких авиационных пользователей будут в основном передаваться с использованием предназначенного для них низкого сегмента. При связи удаленных друг от друга авиационных объектов или объектов авиации с удаленными наземными центрами управления полетами – их пакеты будут переводиться в высокие сегменты. При этом для выравнивания потоков нагрузки данные авиационного сегмента пользователей могут передаваться в любом сегменте с сохранением высшей приоритетности при отправке.

В данной работе рассматривается один из возможных вариантов топологии сети, реализованной по описанному ниже принципу (оптимизация топологии сети, в том числе с точки зрения показателей качества функционирования сети, требует серьезного исследования и не входит в задачи представленного исследования). Каждый узел сегмента сети реализует один и тот же состав линий связей. У космического аппарата k -го сегмента сети n_{c5k} и n_{c6k} связей с ближайшими к нему космическими аппаратами в его номинальной орбитальной плоскости спереди и сзади соответственно. Космический аппарат может реализовывать n_{c3k} и n_{c4k} боковые связи с космическими аппаратами в ближайших от его орбитальной плоскости орбитальных плоскостях слева и справа соответственно. В общем случае n_{c3k}

(или n_{c4k}) боковых связей космического аппарата распределены между ближайшими боковыми плоскостями слева (справа) таким образом, что в одной боковой плоскости может быть несколько космических аппаратов (в частном случае – один), с которыми реализуется связь (это ближайшие к нему космические аппараты в этой плоскости). Космический аппарат реализует n_{c1k} и n_{c2k} межсегментных связей с верхними и нижними сегментами соответственно. В общем случае n_{c1k} (или n_{c2k}) связей космического аппарата распределены таким образом, что в каждом верхнем (или в каждом нижнем) сегменте сети есть несколько (в частном случае – один или ни одного) космических аппаратов, с которыми он реализуется связь. Принцип выбора в верхнем (нижнем) сегменте того космического аппарата, с которым реализуется связь, может, например, основываться на выборе для связи ближайшего космического аппарата или на стремлении к минимизации числа переключений линии связи. Связи n_{c5k} и n_{c6k} в топологии сети стабильны – пара узлов, которые они соединяют, неизменна во времени. Связи n_{c1k} , n_{c2k} , n_{c3k} и n_{c4k} – динамически изменяются при переключении линии связи с одного узла сети на другой.

Все линии связи, которые предусмотрено реализовывать космическому аппарату, постоянно поддерживаются. Даже если по линии не осуществляется передача данных, обеспечивающие эту линию устройства передачи и приема информации космических аппаратов постоянно программно нацеливаются в текущую точку передачи или приема информации соответственно. Таким образом, сеть постоянно существует (аналогично проводной сети), имея «активированные» передачи данных линии и «неактивированные», по которым передаются только кратковременные контрольные сигналы (хотя при рациональном управлении нагрузкой в сети и экономически обоснованной загрузке сети «пустых» линий практически не должно быть). Отсутствие линий связи возможно при перерывах, вызванных переключением создающих ее устройств с одного космического аппарата на другой (эти перерывы достаточно кратковременны и могут полагаться мгновенными), или при прохождении космическими аппаратами описанных выше участков нереализуемости боковых связей. Топология сети – динамическая, ее прогнозируемые изменения происходят в дискретные моменты времени.

Связь дуплексная, линии на прием и передачу информации организованы независимо. Каждый узел является маршрутизатором. Предлагается дейтаграммный метод маршрутизации (он обеспечивается лучшую адаптацию алгоритма к текущему состоянию сети) и более высокую живучесть сети.

Каждый узел сети (космический аппарат) поддерживает на борту текущую глобальную информацию о сети (о ее топологии и загруженности узлов передаваемой информацией) – «видит» сеть. Для решения задачи поддержания текущей информации о сети предложен описанный далее подход, направленный на снижение необходимого объема оперативной памяти узла и сокращение времени на выполнение им необходимых вычислительных

операций, а также на уменьшение объема передаваемой по сети управляющей информации.

На борту космического аппарата моделируется движение других космических аппаратов с использованием моделей двух уровней точности. Движение всех космических аппаратов сети узел моделирует с использованием достаточно простых математических моделей движения (отличающихся от Кеплеровой только учетом вековых составляющих изменения орбиты на основе упрощенных выражений). Для программного управления ориентацией линий связи космическому аппарату необходимо моделировать свое движение и движение тех космических аппаратов, с которыми реализуется связь, с использованием математической модели, в которой более подробно учтены возмущающие силы. Отметим, что точность модели, используемой при управлении линиями связи, должна обеспечивать, как можно более полный учет не только вековых, но и периодических отклонений значений орбитальных параметров.

Погрешность исходных данных для моделирования движения космических аппаратов уменьшается за счет уточнения значений их орбитальных параметров через относительно короткие интервалы времени. Уточнение реализуется путем передачи из наземных центров служебных пакетов глобальной адресации, содержащих навигационные баллистические данные. На основе моделирования движения космических аппаратов определяется текущая структура связей сети. Затраты времени на прогнозирование изменений топологии сети могут быть снижены, если использовать методы быстрого прогноза переключения связей. Это методы, которые основаны не на моделировании движения космических аппаратов и анализе их текущего относительного расположения, а на моделировании более медленного изменения орбит, определения на них текущих точек переключения связи и моментов времени прохождения этих точек с учетом квазипериодичности движения.

Для представления информации о состоянии загруженности узлов сети предлагается оценивать общее состояние загруженности объема накопителя узла, отведенного для пакетов, ожидающих отправки из узла. Обосновать это решение можно следующим образом. Чем больше пакетов ожидает отправки по каждому исходящему направлению узла, тем больше общая загруженность накопителя и тем выше вероятность, что адаптивный к нагрузке алгоритм маршрутизации будет обеспечивать обход этого узла.

Общий объем накопителя узла V_n (измеряемый, например, в единицах информации), отведенный для пакетов, которые ожидают в узле передачу по пути следования или выхода из сети, разбивается на уровни заполнения. Для этого вводится значение Δ_{vn} в единицах измерения объема накопителя, эквивалентное одному уровню его заполнения. Объемы накопителей узлов сети выбраны такими, чтобы быть кратными значению Δ_{vn} . В частном случае объемы накопителей всех узлов сети равны (тогда можно вводить общее число уровней разбиения n_L и через него определять значение Δ_{vn}). В общем случае

объемы накопителей узлов различных сегментов сети могут различаться. Введем понятие состояния узла, которое определяется уровнем заполнения накопителя. Если у узла j полностью заполнено f_j уровней и реализуется заполнение уровня, номер которого на единицу больше, то узел находится в состоянии f_j .

В узлах сети имеется информация о текущем состоянии f_j заполнения каждого узла сети j . Как только происходит изменение состояния загруженности узла в большую или меньшую сторону (переход порогового значения заполнения накопителя узла между уровнями заполнения), то информация об этом распространяется с помощью служебных пакетов по всей сети. Кроме того, узел сообщает другим узлам сети о своем состоянии и в том случае, если оно в течение заданного граничного времени не меняется. Альтернативный подход к обновлению информации о загруженности узлов сети – периодическое широковещательное оповещение узлами о состоянии своей загруженности, разнесенное во времени для различных узлов.

В состав данных служебного пакета, сообщающего о состоянии загруженности узла, может входить информация о разделении общего объема накопителя на направления ожидания отправки по сходящим из узла линиям. При этом объем информации, ожидающей по исходящему направлению, измеряется в заполненных уровнях накопителя, но не дискретным их числом, как состояние узла, а с учетом дробной части (для дискретизации в алгоритме маршрутизации может быть введено разбиение уровня на подуровни).

Таким образом, для поддержания глобальной информации о сети используются два вида служебных пакетов: пакеты с балистика-навигационной информацией и пакеты с информацией о состоянии загруженности узла сети. Оба вида пакетов многоадресной (в данном случае глобальной) адресации. По отношению к информационным пакетам, передаваемым в сети, служебные информационные пакеты имеют высший уровень приоритетности.

Для обеспечения экономии сетевых ресурсов передачу служебного информационного пакета предлагается реализовать не методом заливки (лавинным методом), а на основе многоадресной рассылки по дереву кратчайших путей. Согласно этому методу до всех узлов одной неразветвленной ветви дерева передаваемую информацию доставляет один и тот же пакет. Каждый узел по ходу движения пакета по ветви дерева считывает из него необходимую информацию, и пакет следует далее. Генерирование копий пакета происходит только при разветвлении ветви дерева. В случае передачи в сеть служебного пакета с балистико-навигационными данными корень дерева – в узле, который получил от наземного центра пакет с обновленной информацией, при передаче узлом пакета с информацией о загруженности его накопителя корень – в этом узле.

С учетом высшей приоритетности информационных пакетов при определении дерева кратчайших путей для доставки служебной информации задержка в узлах, обусловленная их загруженностью, не учитывается.

Учитывается только время передачи информации и затраты времени на обработку информации при прохождении служебным пакетом узла сети. В таком дереве кратчайший путь, в основном, определяется числом отрезков пути и временем передачи по ним. Время передачи можно учесть, используя для каждого сегмента среднее время передачи информации по элементарным отрезкам пути, связывающим два смежных узла этого сегмента, а для двух сегментов сети с заданными номерами – среднее время передачи информации по элементарным отрезкам пути, соединяющих узлы этих сегментов (для межсегментных связей). Средние значения времени передачи по элементарным отрезкам пути можно получить предварительно на основе статистической обработки результатов моделирования сети.

К приведенным выше аргументам, обосновывающим использование разновысотных сегментов сети, можно добавить снижение затрат пропускной способности сети на распространение служебных пакетов. При описанном подходе к определению дерева путей наименьшей стоимости для пакетов с управляющей информацией большинство путей будут сводиться к переводу этих пакетов в высокий сегмент, распространению по этому сегменту и дальнейшей передаче всем узлам сети.

Выше описано распространение служебных информационных пакетов по той же сети, что и транспортируемых сетью информационных пакетов. Однако возможно и другое, вытекающее из него техническое решение. Топология сети, динамически изменяющаяся через дискретные интервалы времени, поддерживается постоянно на основе описанного выше принципа. Информационные пакеты поступают от наземных центров управления или от сгенерировавшего их узла в самый высокий сегмент, который целесообразно сделать высокоорбитальным. Служебная информация распространяется по принявшему ее сегменту и от них передается спутникам сети в блоках данных, транслируемых на основе излучаемых радиосигналов по принципу, который реализован в навигационных системах.

Таким образом, трансляция служебной информации из принявшего ее сегмента реализована «вне топологии сети». Сегмент транслирующих эту информацию спутников может быть автономным от решения глобальной задачи транспортной сети и реализовывать межспутниковые связи только для распространения между своими узлами пакетов с предназначенной для трансляции служебной информации. При реализации такого подхода используется своеобразное «комбинированное дерево» распространения служебной информации. Одна часть дерева обеспечивает на основе базовых технологий используемой транспортной сети перевод широкоэмитерной служебной информации в верхний сегмент (в частном случае каждый узел транспортной сети постоянно имеет межсегментную связь с узлом сегмента, используемого для трансляции служебной информации) и распространение по этому сегменту. Вторая часть дерева – радиолинии, соединяющие спутники верхнего сегмента с воспринимающими их трансляцию спутниками нижних сегментов.

Описанный принцип поддержания глобальной информации о сети приводит к выводу о возможной целесообразности совместного использования транспортной спутниковой сети связи и навигационных систем, добавив в навигационные системы дополнительные функции.

Далее описан подход к решению задач ведения абонентов. Начнем с рассмотрения поддержания актуальной информации о земных пользователях (наземных, медленных воздушных и авиационных). Для определения положения этих абонентов поверхность Земли разделена на участки (соты), которым дана сквозная нумерация. Для связи с наземными и медленными воздушными абонентами используется успешно реализованный в различных спутниковых системах связи подход – многолучевая антенная система. При движении космического аппарата по орбите обеспечивается управление позиционированием его лучей, каждый из которых в течение дискретных интервалов времени (для низких сегментов сети не превышающих 1-2 минут) удерживается неподвижным над сотой. Таким образом, в течение этого интервала времени космический аппарат (узел сети) доступен для абонентов находящихся в зонах текущего положения лучей – сотах текущего обслуживания. Множество текущих сот обслуживания космического аппарата объединяются в текущий сотовый кластер его обслуживания. Параметры реализации связи, например, область рабочих частот «привязаны» не к лучам космического аппарата, а к соте, с которой взаимодействует луч (подход, аналогичный предлагавшемуся в системе Teledesic). Переход луча от соты к соте ведет к смене его параметров связи.

Ведение земных абонентов основано на привязке их местоположений к сотам. При этом база данных о текущем местоположении активных для сети абонентов (абонентов с включенными терминалами, готовыми к взаимодействию с сетью) поддерживается как в наземных станциях управления, так и в космических аппаратах одного из сегментов сети, построенного на высоких орбитах (назовем его сегментом базы данных о местоположении абонентов или сегментом ведения абонентов). Этот сегмент содержит от одного до нескольких десятков космических аппаратов. Они связаны между собой и с узлами других сегментов сети так же, как все узлы описываемой сети транспортировки данных.

Кроме хранения информации о местонахождениях активных для сети абонентов узлы этого сегмента, как и другие узлы сети, реализуют функцию транспортировки всех видов информации. В частности, они полноценно используют эту функцию для обмена данными внутри своего сегмента. Участие узлов этого сегмента сети в общесетевой транспортировке данных существенно ограничено или исключено (в частности – повышением стоимостей линий связи, ведущих к ним). Полная база данных об абонентах поддерживается в каждом из узлов сегмента ведения абонентов. База данных о текущих местоположениях активных абонентов также содержится в наземных станциях, но хранение ее на Земле выполняет в основном контрольную и резервную функции.

Посотовый контроль местоположения абонентов (в частности, выявление факта перехода абонента из соты в соту) осуществляется с использованием предназначенных для этого космических аппаратов низкого сегмента, который можно назвать сегментом космических аппаратов, выполняющих функцию «датчиков» текущего положения абонентов (сегмент контроля изменения положения земных абонентов). Переход из соты в соту определяет сам абонент на основе смены параметров контрольных сигналов, принимаемых от космических аппаратов, которые соответствующим образом меняют их от соты к соте (привязка параметров связи реализуется по сотам). Кроме того, возможно техническое решение, согласно которому абонент определяет текущую соту своего местоположения, используя навигационную систему. О своем переходе из соты в соту абонент посылает служебное информационное сообщение космическому аппарату низкоорбитального сегмента контроля текущего положения земных абонентов, а тот, в свою очередь, отправляет многоадресное информационное сообщение узлам сегмента сети, которые хранят базу данных о текущих местоположениях земных пользователей.

Для более быстрого обновления этой базы данных (что актуально, например, в случае авиационных пользователей) сообщение о новом местонахождении абонента может дополнительно распространиться по сегменту ведения абонентов волновым методом от каждого получившего его узла. Так как узлов в этом сегменте немного, и связи между ними используются в основном лишь для передачи достаточно коротких пакетов служебной информации, а также вследствие того, что число авиационных пользователей по сравнению с наземными сравнительно невелико, волновое распространение пакетов по сети не приведет к замедлению работы сети, сделав это решение нерациональным.

При отправлении пользователем сети блока пакетов, на который разбито его сообщение к адресату, он также посылает служебный пакет групповой адресации ко всем узлам сегмента ведения абонентов, и в этом сегменте абонент-отправитель и абонент-адресат помечаются как реализующие связь. Каждый отправляемый адресату информационный пакет содержит поле с указанием адресата и соты, в которой адресат находится. Как отмечалось выше, маршрутизация в сети – дейтаграммная (каждый узел сети самостоятельно принимает решение о дальнейшей отправке пакета на основе полной информации о сети, включающей в себя данные о текущей топологии сети и прогноз последующей ее динамики, а также о состоянии каждого из узлов сети, которое определяет число уровней загрузки накопителя). Такую же информацию о состоянии загрузки сети имеют и узлы сегмента ведения адресата.

При поступлении в базу данных информации об изменении местоположения абонента, помеченного в сегменте ведения абонентов как адресат отправленной информации, узлы сегмента ведения абонентов посылают об этом информацию к тем узлам сети, в которых могут находиться или будут находиться пакеты сообщения на их возможных путях к адресату.

Группа узлов возможного нахождения пакетов сообщения (определяемая с некоторым запасом по составу включаемых в нее узлов), находится на основе используемого для этого алгоритма, который выполняет расчет на базе глобальной информации о сети и с учетом правил, на основе которых каждый узел реализует действия по маршрутизации поступающих в него пакетов. Когда пакет находится в узле, содержащем для него информацию о смене местоположения абонента, то в соответствующее поле пакета записываются новые данные, которые учитываются на дальнейшем пути его следования. По истечении контрольного времени информация о новом местоположении адресата удаляется из узлов описанной выше группы.

Поддержание информации о текущем положении абонентов космического пользовательского сегмента реализуется на основе следующего подхода. В состав глобальной информации о сети входит расчет расписания доступности космических аппаратов-абонентов сети для реализации связи с ними каждым из устройств космического аппарата, транспортирующего сетевые данные (интервалы времени, в течение которых соответствующие устройства могут реализовывать связь). При этом учитывается не только возможность реализации связи космическим аппаратом сети транспортировки данных, но и наличие такой возможности у космического аппарата-абонента сети (у космического аппарата-абонента могут быть устройства связи лишь нескольких типов, перечисленных для сети транспортировки данных, в частном случае – одно устройство).

Полагается, что линия связи между космическим аппаратом сети связи и космическим аппаратом пользовательского сегмента реализована так же, как линии между космическими аппаратами сети, транспортирующей данные. Для выполнения расчетов расписаний доступности используется та же модель орбитального движения космических аппаратов, что и при расчете текущей топологии сети. Значения орбитальные параметров космических аппаратов пользовательского сегмента уточняются аналогично параметрам космических аппаратов сети, транспортирующей данные. Пакет данных может быть направлен только к тем узлам транспортной сети, у которых есть устройство (устройства) связи, для которого (для которых) после получения передаваемого пакета связь с космическим аппаратом-абонентом будет доступна от начала передачи пакета до окончания передачи.

Выше были вкратце описаны подходы к реализации маршрутизации служебной информации. Далее приведем краткое описание подхода к маршрутизации основных данных, транспортируемых сетью связи. В реализации маршрутизации информационных пакетов (транспортируемой сетью информации) выделим две составляющие (будем говорить, что алгоритм реализации имеет два уровня). Опишем первый, базовый уровень алгоритма. Сеть спутников рассматривается как замкнутая сеть, в которой каждый узел определяет пути наименьшей стоимости до всех отличных от него узлов сети независимо от того, над какой территорией Земли находится этот узел, или от того, каким космическим аппаратам доступна с ним связь (строит глобальное

сетевое дерево с корнем в себе самом). Для этого предлагается с использованием текущей информации о топологии сети и состоянии загруженности узлов сети рассчитывать на борту космического аппарата текущие значения маршрутных таблиц каждого из узлов.

В общем случае уравнение стоимости элементарной линии связи (отрезка пути между смежными узлами i и j), используемое при определении пути наименьшей стоимости, запишем таким образом

$$S_{ij} = k_{0ij} \cdot 1 + k_{1ij} S_{1ij} + k_{2ij} S_{2ij} + k_{3ij} S_{3ij}. \quad (1)$$

В уравнении (1) первое слагаемое – единица, соответствующая наличию линии связи между узлами i и j , которая учитывается с введенным положительным не равным нулю коэффициентом k_{0ij} , который в частном случае равен 1. В остальных слагаемых уравнения (1) значения S_{1ij} , S_{2ij} , S_{3ij} – три добавочные составляющие стоимости, которые будут описаны ниже, а k_{1ij} , k_{2ij} , k_{3ij} – их весовые коэффициенты в суммарной добавочной стоимости, которые выбираются в зависимости от принятой стратегии маршрутизации и в частном случае могут быть равны нулю.

Составляющая S_{1ij} учитывает то, в каком сегменте сети находится узел, к которому ведет линия связи (например, стоимости линий, ведущих к более высоким сегментам можно повысить, чтобы препятствовать использованию для передачи транзитной нагрузкой спутников этих сегментов, если в нижних сегментах есть пути, эквивалентные по числу элементарных отрезков верхним).

Составляющая S_{2ij} учитывает нагрузку в узле сети, к которому она ведет, или долю использования исходящей линии при маршрутизации по встречному пути. Также при назначении S_{2ij} может быть введена корректирующая добавка для ускорения процесса сглаживания неравномерности («перекоса») нагрузки в различных частях сети. Например, корректирующая добавка возможна при появлении флуктуаций нагрузки в компактных группах узлов топологии сети. Для ускорения процесса «сглаживания» флуктуации к стоимостям линий связи, ведущим к узлам на границе флуктуации, может быть сделана соответствующая корректирующая добавка. Добавка, корректирующая неравномерность средней нагрузки в сегментах сети, может быть введена для межсегментных линий связи.

Составляющая S_{3ij} основана на учете комплекса показателей, связанных с кинематическими параметрами линии связи, для дискретизации учтенных не непрерывными значениями, а номером диапазона значений, в которое это непрерывное значение попадает. К кинематическим параметрам относятся длина линии связи, скорость изменения длины линии связи, значения и скорость изменения углов, задающих ее направление линии, и прочее. Составляющая S_{3ij} позволяет оценить время передачи по линии связи между

узлами i и j (зависит от длины линии связи) и качество реализации связи (зависит от других кинематических параметров). Очевидно, при назначении S_{3ij} составляющая, обеспечивающая учет качества связи, имеет незначительный вес в значении S_{3ij} и, тем более, в общей стоимости S_{ij} .

Второй уровень алгоритма маршрутизации касается операций, которые выполняются с пакетом при его попадании в j -й узел [10]. Как отмечалось, пакет содержит информацию относительно его адресата (номер участка территории, на которой или над которой находится наземный или воздушный объект, или номер космического аппарата в пользовательском сегменте).

В соответствии с информацией о топологии сети и о нагрузке в узлах сети для каждого узла определено дерево кратчайших путей от него до всех узлов сети. Используя дерево кратчайших путей j -ого узла и данные о загруженности узлов сети, рассчитывается интервал времени $[t_{pb}, t_{pe}]$, в течение которого пакет, отправляемый из j -ого узла и достигнувший i -того будет гарантировано передан из i -того узла адресату. В данном случае

$$t_{pb} = t_u + \sum_{k=1}^K (T_p - \Delta_{Tp} + T_o - \Delta_{To}),$$

$$\text{а } t_{pe} = t_u + \sum_{k=1}^K (T_p + \Delta_{Tp} + T_o + \Delta_{To}) + T_{es},$$

где t_u – момент времени отправки пакета из j -ого узла, K – число отрезков пути до i -того узла в дереве кратчайших путей. При этом T_p – среднее время передачи пакета по линии связи в сети, T_o – среднее время ожидания в узле сети.

Значения Δ_{Tp} и Δ_{To} – максимально возможные отклонения от T_p и T_o соответственно. Возможно также, что время передачи пакета по линиям связи T_p может быть определено не как среднее значение по сети, а с учетом длительности пакета, аналогично время ожидания пакетом отправки из узла T_o – не как среднее по сети, а с учетом загруженности узла сети, в котором будет ожидание отправки дальнейшей передачи. Такой подход позволит использовать меньшие значения Δ_{Tp} и Δ_{To} или не учитывать их вовсе. Если интервал времени выхода пакета из сети через i -тый узел принадлежит интервалу времени $[t_{rb}, t_{re}]$ пребывания этого узла в зоне доступности получателя ($[t_{pb}, t_{pe}] \in [t_{rb}, t_{re}]$), то i -ты узел рассматривается как возможный для дальнейшей отправки информации из j -того узла. Из всех узлов, включенных в список тех, в которые информация может быть отправлена, для выхода информации из сети, выбирается тот, путь до которого имеет наименьшую стоимость в дереве кратчайших путей.

Выводы. В данной статье представлено лишь общее описание концептуального решения по созданию спутниковой сети коммутации пакетов с наземными, авиационными и космическими абонентами. Концепция

разработана на основе обобщенного анализа работ ряда авторов и внесенных авторами данной статьи предложений, увязывающих комплекс перспективных технических решений в единое целое. Данная концепция требует дальнейшего исследования (как в целом, так с выделением отдельных аспектов рассмотрения). Авторы понимают, что предложенная концепция сети – один из альтернативных вариантов возможных технических решений. Проекты подобных систем рассматриваются все более активно, но они по-прежнему кажутся проектами будущего. Однако разработка и обсуждение концепции таких сложных космических систем остро необходимы человечеству: с одной стороны, за такими системами – будущее; с другой стороны, эффективное и безопасное использование космического пространства требует рациональных, оптимальных, наилучших решений.

Библиографические ссылки

1. Аганесов А.В. Модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков/ А.В. Аганесов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015, № 4. – С. 43-51.

2. Аганесов А.В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha. / А.В. Аганесов // Системы управления, связи и безопасности. – 2015, №2. – С. 99-134.

3. Албул А.С. Обоснование модели маршрутизации для многоспутниковых LEO систем высокоскоростной передачи данных. / А.Албул, М.Ф. Бабаков // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016, № 6 (80). – С. 181-187.

4. Борщёва А.В. Моделирование кинематики составной линии связи между космическими аппаратами спутниковой сети с разновысотными орбитальными группировками. / О.В. Борщёва, Т.В. Лабуткина // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. Збірник наукових праць. Том XVII 2015. – С. 9-25.

5. Борщова А.В. Экологические аспекты использования спутниковых сетей связи с разновысотными орбитальными группировками, глобализация спутниковых систем./ О.В. Борщова, Т.В. Лабуткина, А.А. Тихонова // Наукові читання «Дніпровська орбіта – 2015»: Збірник доповідей. – Дніпропетровськ, НЦАОМ, 2015. – С. 104-107.

6. Иванов В.И. Исследование протоколов маршрутизации в негеостационарных спутниковых системах. / В.И. Иванов // Т-Comm#6-2012. Технологии. – С. 19-21.

7. Иванов В.И. Метод распределенного управления информацией о местоположении абонентов низкоорбитальной спутниковой системы. / В.И. Иванов // Т-Comm#6-2014. Технологии. – С. 33-37.

8. Ковалев А.М. Глобальная инфокоммуникационная сеть с использованием пикоспутников/ А.М. Ковалев, Т.Ю. Лямичева, Д.Ю.

Пономарев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – С. 546-548.

9. Королев Б.В. Технология работы космической оптической линии связи для повышения оперативности управления и получения информации потребителем в процессе функционирования космических средств. / Б.В. Королев. / Космическая техника и технологии № 1 (4), 2014. – С. 39-47.

10. Лабуткина Т.В. Имитационные модели спутниковой сети коммутации пакетов на основе комбинирования моделей разной точности. / Т.В. Лабуткина, А.А. Тихонова, А.В. Борщёва, Р.С. Косий, А.И. Лукашевич // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. Збірник наукових праць. Том XIX 2015 С. 98-113.

11. Лабуткина Т.В. Имитационная модель спутниковой сети коммутации пакетов с разновысотными орбитальными сегментами / Т.В. Лабуткина, В.А. Ларин, В.В. Беликов, А.В. Борщева, А.А. Тихонова, Д.И. Деревяшкин. // Научно-технический журнал «Радиоэлектронные и компьютерные системы». № 1 (75), 2016. С. 66-83.

12. Лабуткина Т.В. Информация в космосе: передача, обработка и хранение информации на основе спутниковых сетей./ Т.В. Лабуткина, А.В. Бабанина, И.А. Саенко, Я.А. Скородень // Цифрова-революція в соціально-економічній сфері: історія і перспективи. Матеріали 6-ої Всеукр. наук.-практ. конф. «Глушковські читання», Київ ТОВ НВП. – 13 грудня 2017. – С. 94-96.

13. Лабуткина Т. Спутниковая сеть коммутации пакетов с наземными, авиационными и космическими абонентами: концепции и моделирование. / Т. Лабуткина, А. Бабанина, И. Саенко, А. Дымченко, А. Эржанов, Д. Лыщиков // Тези доповідей на II Всеукраїнській науково-практичній конференції MEICS-2017, м. Дніпро, 22-24 листопада, – С. 173-174.

14. Мальцев Г.Н. Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи // Информационно-управляющие системы. – 2007. – № 1. – С. 33 – 39.

15. Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных / Под ред. А.И.Галькевича. – Тамбов: ООО «Издательство Юлис», 2011. – 169 с.

16. Labutkina T.V. A Simulation Model of a Satellite Data Transmission Network. / T.V. Labutkina, V.O. Larin, V.V. Belikov, S.Y. Kondous, Y.V. Bezruchko // 55th International Astronautical Congress, Vancouver, October 2003. Article IAC-04-U.3.b.04.

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

18. Combes S. Satellite and next generation networks / S. Combes, O. Alphand, P. Berthou, T. Gayraud // QoS issues, – Journal of space communications, 20, 3-4 (2005) p.101-119.

Надійшла до редколегії 10.08.2017