

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ, УСТОЙЧИВОЙ К РАЗРЫВАМ И ЗАДЕРЖКАМ В КАНАЛАХ СВЯЗИ

Н.Л. СОКОЛОВ, *зам. нач. ЦУП, ст. науч. сотр. ФГУП ЦНИИмаш, канд. техн. наук,*
И.Д. АНТОНОВ, *нач. отделения 805, ФГУП ЦНИИмаш, ЦУП,*
Д.А. ЗЕЛЕНОВ, *нач. отдела 8053, ФГУП ЦНИИмаш, ЦУП, канд. техн. наук,*
А.В. ГЛАЗКОВ, *нач. лаборатории, ФГУП ЦНИИмаш, ЦУП, канд. техн. наук,*
А.Н. ТИТОВ, *нач. сектора, ФГУП ЦНИИмаш, ЦУП, канд. физ.-мат. наук*

sokolov@mcc.rsa.ru, aid@mcc.rsa.ru, zelenov@mcc.rsa.ru, a.glazkov@mcc.rsa.ru, alexandre_titov@hotmail.com

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

(ФГУП ЦНИИмаш), Центр Управления Полетами (ЦУП)

141070, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

Рассмотрены вопросы создания космической информационной сети, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи, которая основана на технологии Disruption (Delay) Tolerant Networking (DTN). Указаны недостатки существующей технологии информационного взаимодействия при осуществлении космических миссий, в том числе дальнего космоса. Основные проблемы, с которыми приходится сталкиваться в таких системах, состоят в задержках, искажениях и разрывах связи при осуществлении информационного взаимодействия в процессе управления КА и получения целевой информации. В статье определены и описаны основные принципы создания космической сети информационного взаимодействия, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи при реализации миссий дальнего космоса. Среди них создание DTN-узлов на основе рекомендаций подкомитета CCSDS, гибкая система адресации, обеспечение возможности передачи пакетов данных произвольной длины, автоматизация процедур контроля и учета передачи пакетов и обеспечение защиты от несанкционированного доступа, а также обеспечение конфиденциальности информации. При этом учтена возможность дальнейшей интеграции элементов создаваемой сети в международную космическую инфраструктуру без значительных дополнительных затрат. Описаны протоколы передачи информации в DTN-сети, основными из которых являются Bundle-протокол (основной протокол обмена данными между DTN узлами) и Licklider-протокол (протокол нижнего уровня для Bundle протокола). Описаны их структура и возможности. Вместе с этим приведен краткий обзор международного опыта проведения экспериментов по отработке DTN-технологии в реальных космических условиях.

Ключевые слова: космический аппарат, космическая сеть, дальний космос, информационное взаимодействие, управление космическими аппаратами, протокол.

В условиях планируемого расширения космических миссий дальнего космоса существенно возрастают требования к обеспечению надежного управления космическими аппаратами (КА), в том числе в условиях возможных разрывов и задержек передачи информации в каналах связи.

При выполнении космических проектов обмен данными, как правило, основывается на простой схеме точка–точка между КА и наземными приемо-передающими станциями космической связи. Доставка полученных от КА данных из наземных приемно-передающих станций в центры обработки информации осуществляется посредством специализированной наземной инфраструктуры связи. Такая организация системы связи обеспечивает сравнительно невысокую скорость обмена данными, при этом требует высоких затрат на содержание наземных станций, имеющих уникальные дорогостоящие антенные систе-

мы. Другой существенный недостаток такого способа взаимодействия заключается в том, что если во время сеанса происходит сбой работы системы связи на каком-либо участке, часть передаваемой информации теряется и необходимо проведение повторного сеанса в полном объеме. В особенности эти недостатки связи сказываются на качестве информационного обеспечения проектов дальнего космоса. Современный подход информационного обмена предполагает использование более сложных сценариев обмена данными, основанных на использовании ретрансляторов, расположенных в космосе.

В настоящей работе определен перечень основных принципов создания космической сети информационного взаимодействия, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи при реализации миссий дальнего космоса. При этом учитывается возможность дальнейшей интеграции элементов создаваемой

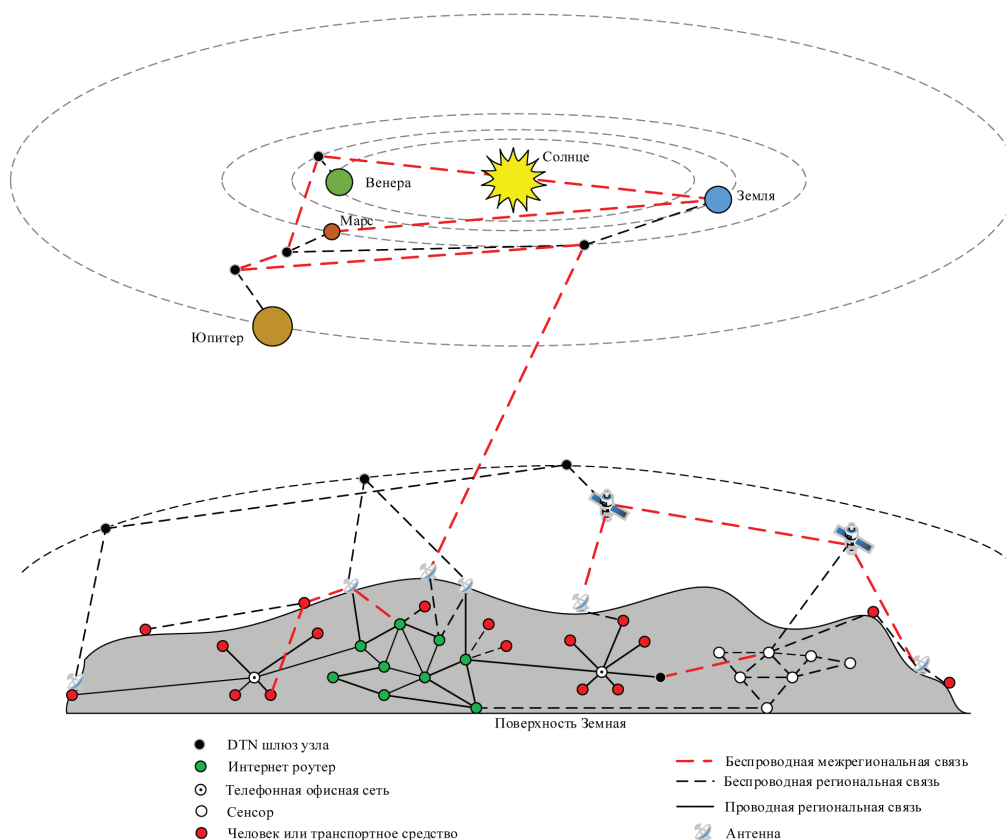


Рис.1. Схема информационных взаимодействий в сети DTN

Fig.1. A scheme of information interactions in the DTN network

сети в международную космическую инфраструктуру без значительных затрат.

Учитывая, что современный опыт построения наземных информационных систем и сетей базируется на использовании достаточно стабильных каналов, следует сказать, что одной из основных задач является разработка и реализация протоколов обмена данными, которые способны обеспечить гарантированную доставку информации в системах дальней космической связи в условиях длительных задержек прохождения сигнала и разрывов канала.

Международный Консультативный Комитет по космическим системам передачи данных (CCSDS) опубликовал ряд документов RFC, описывающих как концепцию технологии Disruption (Delay) Tolerant Networking (DTN) [2], так и отдельные элементы технологии [3, 4, 5]. Основанная на принципах DTN технологии сеть представляет собой надстройку над региональными сетями. Основные принципы архитектуры этой над сети изложены в документе RFC 4838 – Delay-Tolerant Networking Architecture [2].

На настоящий момент разработано несколько реализаций программного обеспечения DTN, однако многие вопросы функционирования сетей DTN требуют дальнейшего исследования и доработок. DTN представляет собой технологию обеспечения устойчивой и надежной связи в системах дальней космической связи, включающих объекты дальнего космоса и наземные системы связи. Схема информационных взаимодействий в сети DTN показана на рис. 1.

Основные проблемы, с которыми приходится сталкиваться в таких системах, состоят в следующем: задержки, искажения или разрывы связи.

Существенные задержки возникают при передаче информации на большие расстояния вследствие ограниченной скорости распространения радиоволн. Так, например, при полете к Марсу время прохождения сигнала может достигать десятков минут, в зависимости от положения Земли и Марса на их орбитах. Искажения выражаются в виде роста числа ошибок, обусловленного затуханием сигнала при передаче на сверхбольшие расстояния.

Искажения также могут быть вызваны солнечными бурями и другими факторами передачи данных в космосе. Разрывы связи обусловлены либо естественными причинами, либо причинами технологического характера.

Причины естественного характера: при проведении сеансов связи со спутником, находящимся на орбите вокруг Марса, необходимо учитывать, что связь со спутником невозможна в те моменты, когда он скрыт от Земли планетой Марс.

Технологические причины: связь наземных пунктов приема и обработки сигнала с объектом на поверхности Марса обеспечивается через спутник-ретранслятор на орбите Марса, который не может одновременно обеспечить связь с Землей и объектом на поверхности Марса. Иными словами, в каждый данный момент связь возможна либо с Землей, либо с объектом на поверхности Марса.

Основными протоколами передачи информации в DTN-сети являются Bundle-протокол Licklider-протокол [7].

Bundle-протокол (BP) является основным протоколом обмена данными между DTN узлами. Данный протокол разработан рабочей группой DTNRG. Полная техническая спецификация этого протокола описана в документе [3, 6]. Суть этого протокола заключается в том, что подлежащие пересылке данные, представляющие собой сообщение произвольной длины, трансформируются в специальные пакеты (Bundle), которые могут пересылаться в различных гетерогенных сетях. Каждый такой пакет (Bundle) содержит следующие типы данных:

- данные, сформированные на прикладном уровне, содержащие смысловую часть передаваемой информации;
- служебные данные, описывающие назначение, структуру, способы обработки и хранения передаваемых данных. Служебные данные формируются отправителем и предназначены получателю;
- заголовок пакета, содержащий адреса отправителя, получателя, промежуточных DTN узлов, принимающих на себя ответственность за доставку, и другую служебную информацию, определяемую Bundle протоколом.

Блоки во время передачи между DTN-узлами могут быть разделены еще на несколько связей, которые при необходимости могут фрагментироваться еще раз.

Деление сообщений на блоки и обратная сборка могут происходить в любом DTN-узле, выполняя важную роль по обеспечению эффективности использования каналов связи. Во-первых, размеры фрагментов подбираются таким образом, чтобы наиболее полно загружать канал и не допускать его простоев, во-вторых, в случае сбоя Bundle реструктурируется так, чтобы не допускать повторной отправки уже переданной части данных.

Передача данных от источника получателю организована на основе пакетов, содержащих несколько (не менее двух) блоков, структура которых описана ниже.

Структура первичного блока Bundle-протокола приведена в табл. 1, а структура блока полезной нагрузки в табл. 2.

Ключевые особенности этого протокола состоят в следующем:

- транзит данных на основе принципа ответственности за доставку;
- устойчивость к неожиданным разрывам связи;
- способность максимально эффективно учитывать известные заранее моменты разрывов связи и использовать существующие возможности связи;
- позднее связывание идентификаторов сетевой оболочки с реальными сетевыми адресами.

Протокол BP может взаимодействовать с разными протоколами транспортного уровня, расширяя возможности обмена информацией между DTN-узлами в гетерогенных сетях. В наземной сети протокол BP может работать поверх широко распространенного протокола TCP, предусматривающего механизм гарантированной доставки сообщений, однако при необходимости работы поверх протокола UDP или протоколов CCSDS обеспечение надежности доставки ложится на протокол LTP (LickliderTransmissionProtocol).

Licklider Transmission Protocol – протокол связи «точка–точка», разработанный для использования в каналах передачи данных

дальнего космоса. Этот протокол обеспечивает устойчивую связь при наличии больших задержек на прохождение сигнала, характерных для связи на большие, сравнимые с межпланетными, расстояния.

Этот протокол базируется на опыте разработки и использования протокола пересылки файлов – FileDeliveryProtocol (CFDP), разработанного CCSDS. Этот протокол рассматривается в качестве протокола нижнего уровня для Bundle протокола, предназначенного для межсетевого обмена информацией между различными типами сетей.

Возможности Licklider-протокола:

- надежная транспортировка важных данных (таких, как заголовок файла);
- ненадежная транспортировка менее важных данных (таких, как отдельные пиксе-

ли изображения – отдельные сбойные пиксели можно игнорировать при восстановлении целого изображения);

– независимость от переговорного процесса для установления связи, что имеет большое преимущество при большом времени на передачу данных;

– низкое потребление энергии при передаче, так как посылает данные только при наличии канала связи и различает уровни важности данных;

– совместимость работы таймеров протокола с коммуникационным расписанием и возможность приостановки в соответствии с расписанием доступности каналов связи;

– информированность о доступности канала связи, время необходимого для прохождения сигнала «туда–обратно»;

– протокол может поддерживать обмен данными в одном направлении, обходит проблемы, связанные с длительным временем прохождения сигнала в режиме «туда–обратно».

Приложение, использующее такой протокол, имеет возможность посылать данные двух типов (при этом любая часть может иметь нулевой размер).

Красная часть. Содержит данные, требующие надежной передачи. Получатель этих данных должен отослать подтверждение о получении, пока такое подтверждение не получено, отправитель должен хранить эти данные. Например, это может быть заголовок файла, который содержит важную информацию, необходимую для декодирования всего файла. Если этот заголовок будет утерян при передаче, все остальные данные невозможно будет декодировать.

Зеленая часть. Содержит данные, не требующие надежной доставки. Для этих данных не требуется уведомление об их получении, они могут быть удалены отправителем сразу же после их отправки.

Первый весомый шаг при отработке принципов создания космической информационной сети, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи был сделан в 2008 г. Лаборатория реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory – JPL) по контракту с NASA установила и протестировала элемен-

Т а б л и ц а 1

Структура первичного блока

Bundle-протокола

The structure of the primary unit of Bundle-protocol

Номер версии протокола	Набор признаков
Длина блока	
Адрес получателя (в формате DTN)	
Адрес источника (в формате DTN)	
Адрес администратора (в формате DTN)	
Адрес опекуна (в формате DTN)	
Время создания	
Последовательный номер	
Время существования	
Длина словаря (число байтов)	
Словарь (массив переменной длины, состоящий из байтов)	
Fragmentoffset	
Полная длина массива прикладных данных	

Т а б л и ц а 2

Структура блока полезной нагрузки

A structure of Payload Unit

Тип блока	Контрольные признаки процесса обработки
Длина блока	
Полезная нагрузка (переменной длины)	

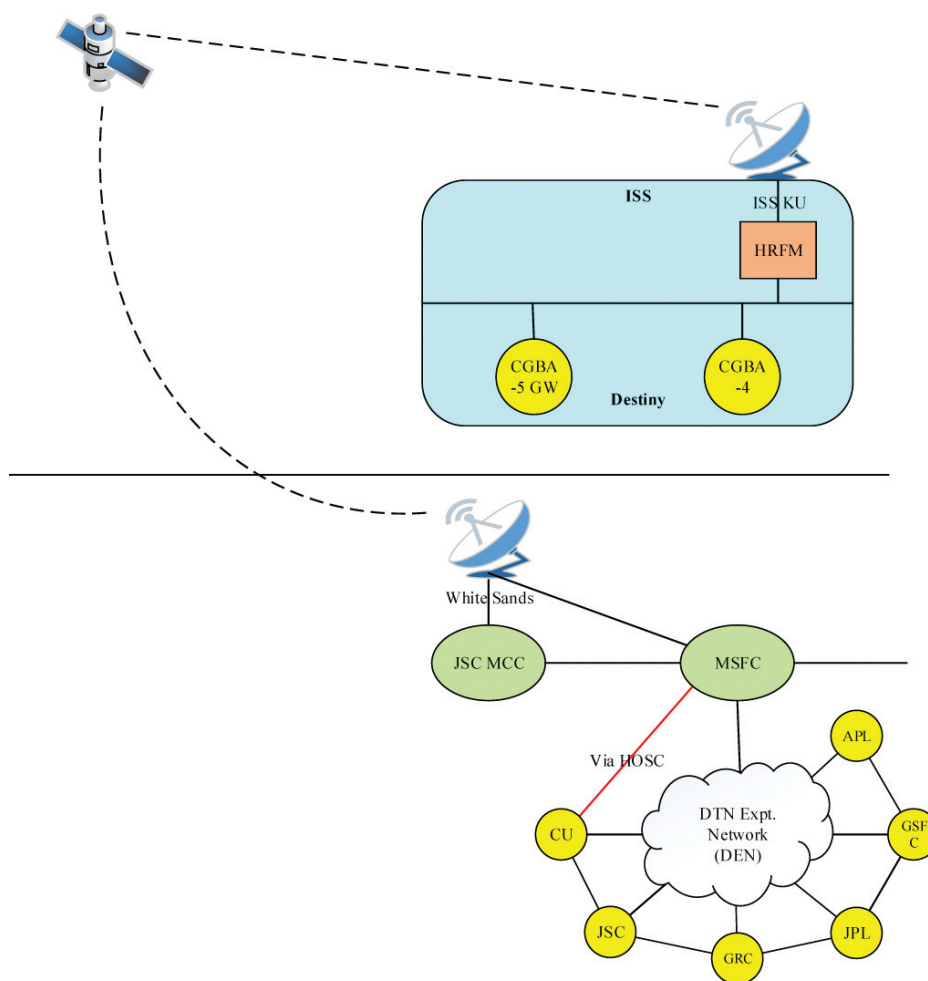


Рис. 2. Схема DTN-сети МКС
Fig. 2. A scheme of DTN-ISS network

ты (Bundle Protocol и Licklider Transmission Protocol) DTN-технологии на космическом аппарате дальнего космоса и девяти компьютерах в самой лаборатории. Этот эксперимент выполнялся в тесной кооперации с проектом EPOXI, который представляет собой комбинацию двух компонентов – наблюдения за планетами вне солнечной системы (эксперимент Extrasolar Planet Observations and Characterization – Epoch) и пролет около кометы Хартли 2 (эксперимент Deep Impact Extended Investigation – DIXI).

Эксперимент DINET начался, когда КА был на расстоянии около 15 млн миль (24 млн. км) от Земли. В ходе эксперимента через DTN-узлы в JPL на борт КА было передано около 300 изображений, после чего они были автоматически пересланы обратно в JPL. При этом отрабатывались следующие элементы DTN-технологии: формирование

DTN-связки (bundle), передача, сбор, динамическая маршрутизация, управление переполнением, порядок операций и процедуры автоматической пересылки. Данные элементы отрабатывались как на борту КА, так и на Земле, в течение 27 дней. В течение этого времени КА приблизился к Земле на расстояние около 15 млн км. Временные задержки сигнала составляли соответственно 81 с с начала эксперимента и 49 с к концу. Все пересылаемые бандлы были успешно получены без искажений, несмотря на некоторые плавающие проблемы в работе станций сети дальнего космоса (Deep Space Network – DSN) в процессе слежения. Эксперимент DINET показал возможность космического сетевого обмена данными между узлами с подобной Интернету автоматизацией и низкими затратами на обслуживание. Развитие технологии DTN позволит масштабировать космические сети

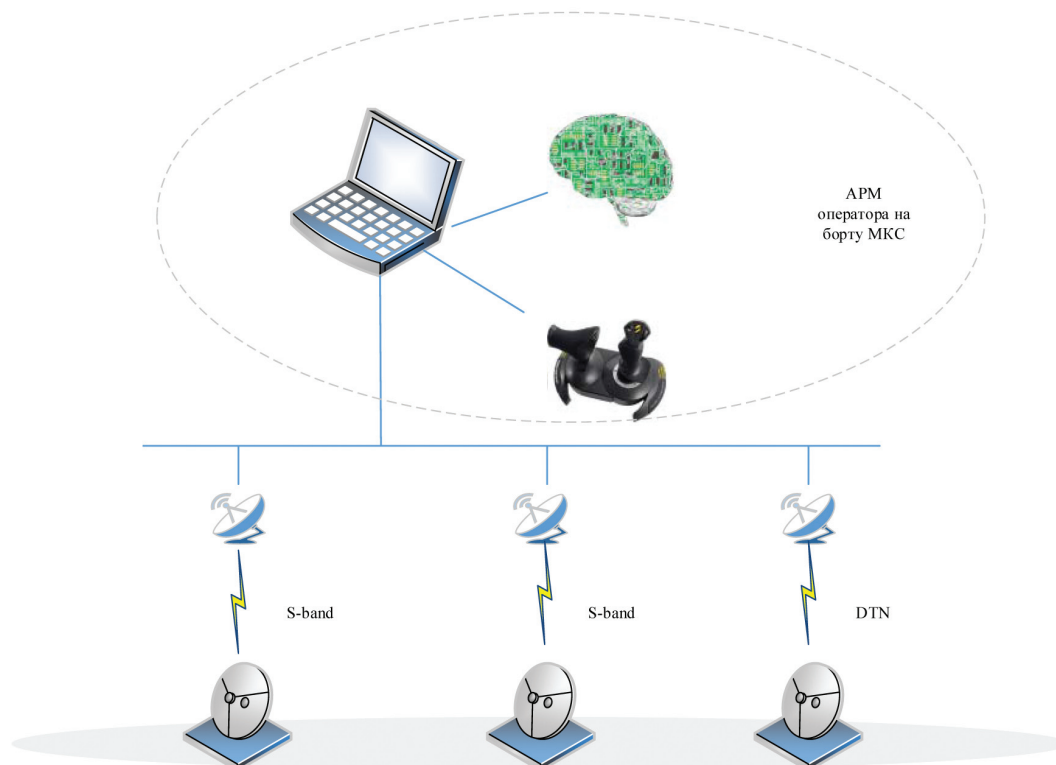


Рис. 3. Возможности управления напланетными автоматизированными устройствами
 Fig. 3. Management capabilities of planetary automated devices

и сократить время и усилия, необходимые для планирования и координации соединений в дальнем космосе. Кроме того, возможность автоматической маршрутизации информации между КА, находящихся близко друг к другу, дает возможность оперативной гарантированной доставки больших объемов научной информации потребителям [1].

Далее, на борту МКС был создан тестовый стенд для проведения испытаний технологии DTN, включающий два коммерческих универсальных аппарата для обработки биологических данных – Commercial Generic Bioprocessing Apparatus (CGBA), которые формируют данные телеметрии полезной нагрузки в формате DTN и затем передают их в наземные центры управления (рис. 2).

Эксперимент проводится под наблюдением и контролем Центра Управления полезной нагрузкой компании BioServe, находящегося в инженерном центре университета Колорадо (г. Боулдер). Получаемые на лабораторных установках данные первоначально собираются на Compact Flash накопителе, а затем в автоматическом режиме отправляются в центр поддержки исследований CGBA. Для автома-

тизированной передачи команд используется восходящий канал S-диапазона. Для нисходящего потока данных отводится 500-килобитный канал. Данные исследования необходимы для отработки коммуникационного программного обеспечения, реализующего протоколы DTN, в реальных условиях космоса с целью использования его на космических аппаратах, удаленных от околоземных орбит, транспортных средствах и объектах инфраструктуры поддержки на поверхности другой планеты.

Следующим шагом стал проект METERON [8, 9], который реализуется в сотрудничестве NASA, DLR (Германия), Роскосмоса, РКК Энергия и ЦНИИ РТК (Санкт-Петербург). Этот проект является началом использования МКС в качестве испытательного полигона для моделирования действий на пилотируемой станции, находящейся на орбите вокруг Луны, Марса или астероидов. В данном проекте предусматривается ряд экспериментов, направленных на отработку взаимодействий космонавтов и спускаемых на поверхность планеты автоматизированных устройств, выполняющих научные и инженерные задачи, при освоении других планет. Операции могут выполняться как под

контролем оператора в реальном масштабе времени, так и автономно под управлением планировщика заданий в зависимости от доступных в данный момент каналов связи между бортом орбитальной станции и напланетной сетевой инфраструктурой, поэтому для обмена информацией между оператором и автоматизированными устройствами используются как прямое соединение, так и соединение на основе DTN-технологии (рис. 3).

Экспериментальное оборудование и узел DTN находится на МКС в европейском модуле Columbus, канал связи обеспечивается системой Контур-2, расположенной на модуле «Звезда». На первой фазе проекта демонстрировались возможности технологии DTN для управления роботизированной системой, проверялась возможность управления роботом с помощью экзоскелета. Вторая фаза проекта направлена на отработку тактильной и захватывающей технологии при управлении роботами в условиях невесомости [1].

Рассмотрим более подробно структуру DTN-сети. В DTN архитектуре узлом называется некий объект сети, реализующий взаимодействия уровня Bundle-протокола. Условно узлы по функционалу делят на хосты, маршрутизаторы и шлюзы. Хост посылает и принимает целевую информацию, но не передает ее другим узлам. Хост может быть источником или получателем, опционально может оснащаться хранилищем для поддержки надежной передачи в нестабильных каналах. Маршрутизатор передает целевую информацию в пределах одного DTN региона и может быть хостом, также опционально может оснащаться хранилищем для поддержки надежной передачи в нестабильных каналах. Шлюз передает целевую информацию между двумя или более DTN регионами, которые представляют собой гетерогенные сети и всегда оснащаются хранилищем для длительного содержания передаваемых данных. Шлюз может использоваться также в качестве хоста [11].

Узлы в DTN-сети обозначаются с помощью специальных идентификаторов EndpointIdentifiers (EID) переменной длины, имеющих в основе синтаксис URI, широко из-

вестный по использованию в сети Интернет. Вместе с целевой информацией передается также EID источника, получателя, а также одного или нескольких узлов, которым следует отправлять диагностические сообщения о перемещении данной информации в сети.

Данные приложений перед отправкой на транспортный уровень сначала преобразуются в связки (бандлы) блоков данных, состоящие не менее чем из двух блоков. Каждый блок может содержать данные приложения или служебную информацию, используемую для доставки бандлов к месту назначения. Блоки во время передачи между DTN-узлами могут быть разделены еще на несколько связок. Деление сообщений на блоки и обратная сборка могут происходить в любом DTN-узле, выполняя важную роль по обеспечению эффективности использования каналов связи. Размеры фрагментов подбираются исходя из условия наиболее полной загрузки канала.

С помощью некоторого количества узлов сети, представляющих собой серверы, поддерживающие временное хранение информации, можно организовывать сервис, обеспечивающий гарантированную доставку данных. Реализация принципа custody transfer сводится к организации приема-передачи таким образом, чтобы принимающий сообщение (или фрагмент сообщения) DTN-узел сохранял его в своем запоминающем устройстве до тех пор, пока оно не будет доставлено следующему DTN-узлу, который обеспечит последующее хранение и доставку сообщения получателю. В силу особенностей связи в дальнем космосе это время может быть довольно продолжительным, поэтому для временного хранения передаваемых сообщений узлы должны иметь долговременное запоминающее устройство.

Следует отметить, что требования безопасности для сети DTN [10] несколько отличаются от традиционной модели безопасности, так как помимо защиты информации на конечных точках необходима защита информации на маршрутизаторах (роль которых выполняют DTN-узлы). Такая необходимость появляется вследствие того, что время пребывания информации на маршрутизаторе может быть значительным по сравнению с наземными сетями.

Для реализации модели безопасности в сетях DTN каждое сообщение содержит неизменяемую «почтовую марку», содержащую идентификационные данные отправителя, запрашиваемый класс обслуживания и другие материалы шифрования для проверки правильности содержания сообщения. Маршрутизаторы проверяют полномочия принимающего узла на каждом DTN-переходе и отбрасывают сообщение по возможности раньше, если проверка не прошла. Конфиденциальность определяется как гарантия того, что целевая информация будет доступна только уполномоченным узлам DTN-сети. Для обеспечения конфиденциальности используются механизмы шифрования, предотвращающие несанкционированное использование целевой информации.

Таким образом, основными принципами создания космической сети, устойчивой к разрывам и задержкам в каналах связи при реализации космических миссий, являются:

- создание DTN-узлов на основе рекомендаций подкомитета CCSDS;
- определение единых правил, реализующих гибкую систему адресации;
- обеспечение возможности передачи пакетов данных произвольной длины;
- автоматизация процедур контроля и учета передачи пакетов (custody transfer);
- обеспечение защиты от несанкционированного доступа и конфиденциальность информации.

GENERAL PRINCIPLES OF CREATION OF SPACE INFORMATION NETWORK TOLLERANT TO DISRUPTIONS AND DELAYS IN COMMUNICAION CHANNELS

Sokolov N.L., TsNIIMash, MCC, Ph.D. (Tech.); **Antonov I.D.**, TsNIIMash, MCC; **Zelenov D.A.**, TsNIIMash, MCC, Ph.D. (Tech.); **Glazkov A.V.**, TsNIIMash, MCC, Ph.D. (Tech.); **Titov A.N.**, TsNIIMash, MCC, Ph.D. (Physics and Mathematics)

sokolov@mcc.rsa.ru, aid@mcc.rsa.ru, zelenov@mcc.rsa.ru, a.glazkov@mcc.rsa.ru, alexandre_titov@hotmail.com

Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash),
Mission Control Center, 4, st. Pioneerskaya, Korolev, Moscow region, 141070, Russia

The article reviews the questions of creation of space information network tolerant to disruptions and delays in communication channels and based on Disruption Tolerant Networking (DTN) technology. The article highlights the disadvantages of current informational interaction technology during the implementation of space missions including ones in deep space. Main issues which are faced with in such systems are comprised of delays, distortions and link disruptions while implementing informational interaction during the process of spacecraft control and payload data reception. The article describes and defines general principles of creation of space information network tolerant to disruptions and delays in communication channels during the implementation of deep space missions. These principles include: the creation of DTN nodes based on CCSDS sub-committee's recommendations, the creation of a flexible addressing system, the provision of a possibility to transmit data packets of a random length, the automation of monitoring procedures and procedures of packet transfer accounting, the protection from unauthorized access and also the provision of information privacy. The possibility of further integration of the elements of a created network into the international space infrastructure without tangible additional expenditures is also taken into account. The article describes the protocols of information transmission to DTN-networks the main of which are Bundle-protocol (the main protocol of data exchange between DTN nodes) and Licklider-protocol (the protocol of a lower level for the Bundle protocol). Their structure and features are described in the article. The article also contains a short review of the international experience in experiment carrying out for DTN technology testing in real space conditions.

Keywords: spacecraft, space net, deep space, informational interaction, spacecraft control, protocol.

Библиографический список/References

1. Аналитический обзор текущего состояния работ по отработке технологии DTN по материалам зарубежных источников, ФГУП ЦНИИмаш, 2013. *Analiticheskiy obzor tekushchego sostoyaniya rabot po otrabotke tekhnologii DTN po materialam zarubezhnykh istochnikov* [An analytical overview of the current state of the work on developing the technology DTN based on foreign sources], FSUE TsNIIMash 2013., FGUP TsNIImash, 2013
2. RFC 4838. V. Cerf, et al. Delay-Tolerant Networking Architecture. Reston, Virginia: ISOC, April 2007.
3. RFC 5050. K. Scott and S. Burleigh. Bundle Protocol Specification. Reston, Virginia: ISOC, November 2007.
4. RFC 5325. Licklider Transmission Protocol – Motivation, September 2008.
5. RFC 5326. Licklider Transmission Protocol – Specification, September 2008.
6. Omar Mukhtar, «Design and Implementation of Bundle Protocol Stack for Delay-Tolerant Networking», Helsinki University Of Technology.
7. Y. Xian, C. Huang and J.Cobb «Look-Ahead Routing and Message Scheduling in Delay-Tolerant Networks» Proc. of 35th IEEE Conference on Local Computer Networks, Denver, Colorado, October 2010.
8. K. Fall, A. McMahon. «DTN Reference Implementation Update», November 13, 2009.
9. K. Gifford, A. Jenkins, and S. Kuzminsky, «BDTN experiments onboard the International Space Station», presented at the METERON Presentation to CCSDS, Spring Meeting, May 4, 2010.
10. V. Zaborovsky «Architecture of Distributed Network Processors: Specifics of Application in Information Security Systems», 4-th International Conference on Networking, Reunion Island, France, April 2005, Proceedings, Part II, p.681-688.
11. Will Ivancic, Phil Paulsen, Dave Stewart, John Taylor, Scott Lynch, Jay Heberle, James Northam, Chris Jackson and Lloyd Wood «Large File Transfers from Space using Multiple Ground Terminals and Delay-Tolerant Networking» IEEE Globecom, Miami, Florida, pp. 1-6, December 2010.