

第4部

特集4 Interplanetary network

植原 啓介、石原 知洋、内田 祥喜、鈴木 翔太、陳 毅祐、竹村 太希

概要

Space WG は、Delay and Disruption Tolerant Network (DTN)を含むInterplanetary network (IPN)に関する研究をおこなうため、2023年9月に設立された。

Space WGでは、2024年6月に開催された、Interopにおいて、SHOWNETへのコントリビュータとして参加し、DTNネットワークを提供した。また、併設のSpace x Internet Summitにブースを出展し、DTNを使ったWeb Proxyや画像配信システムなどのデモを実施した。本稿では、これらのアクティビティについて報告する。

第1章 はじめに

1.1 Interop Tokyo 2024 "Internet X Space Summit"

2024年6月にInterop Tokyo 2024の特別企画として、「Internet X Space Summit」[3]が幕張メッセで開催された。このサミットでは、宇宙とインターネット技術の統合に焦点を当てた多岐にわたるトピックが取り上げられた。遅延・断絶耐性ネットワーク(Delay/Disruption Tolerant Network:DTN)、NASAの提唱するLunarNet[6]のような月通信アーキテクチャの提案、SRv6などの技術を使用して地上ネットワークと宇宙ネットワークを統合することによる新しい宇宙インターネットの可能性について議論が交わされた。

1.2 宇宙におけるインターネットの必要性とDTN

近年、月や火星の宇宙探査ミッションが本格化し、NASA中心のアルテミス計画[7]は2025年から有人ミッションも予定している。これらの計画に伴い、今後は月・火星に

ある衛星やさまざまな通信機器、デバイスなどの数が増加する可能性が高い。従来までの宇宙ミッションにおいて宇宙のノードと地球との通信は、地球上にある各国の大型アンテナを利用し、一対一の通信を行っていた。しかしこのような計画でノードの数が増加する場合、通信ニーズに対応するためには宇宙にも多対多のノードで通信が可能なインターネットが必要となる。

既存のインターネットはEnd-to-Endの疎通性が確保できている環境で通信を行うことが多いが、宇宙で通信を行う際には頻繁な断絶と大きな遅延が問題となる。中継ノードとなる様々な宇宙機は宇宙空間での位置が常に変化しており、天体の影に入るなどで断絶が頻繁に起こる。また通信の際には地球月間でも片道1.3秒、地球火星間では太陽に対する2天体の公転の状況によって、片道4分から20分程度の遅延が想定されている。End-to-EndでTCPを用いた通信を行う際には、3-way-handshakeなどを含めこれらの天体間を複数回往復する通信を行う必要があり、遅延はさらに大きな時間になる。

そのため宇宙のインターネットにはDTNの技術を利用することが考えられている。DTNの技術の一つにBundle Protocol (BP)があり、BPでは通信されるデータはバンドルという可変長のデータとして転送される。中間ノードでは経路上の次のノードへ転送可能なタイミングまでバンドルを蓄積することが可能になっているため、End-to-Endの通信疎通性が確保できていない場合でも、この蓄積による転送を行うことにより断絶に強い通信ができる。またトランスポートレイヤにUDPなどのプロトコルを用いることで、比較的遅延を抑えて通信することもできる(図1)。

図中のConvergence Layer (CL)については2章で説明

する。

1.3 既存のDTN実装

既にいくつかの研究機関などによりDTN技術を実装したソフトウェアがリリースされている。いくつかの例を以下に示す。

- Interplanetary Overlay Network DTN (ION-DTN) : NASA/JPL
- HDTN: NASA/Glenn research center
- DTN ME: Marshall Space Flight center
- μ D3TN: D3TN GmbH
- IONe: Experimental ION Scott Burleigh United States
- DTN7/Go: University of Marburg German

これらのDTNソフトウェアは、基本的に通信内容からバンドルへのエンコード・デコード、中間ノードでのバンドルのままでの蓄積転送を可能にしているが、2章で説明するConvergence Layerが対応しているトランスポートレイヤプロトコルの種類などの点で異なる。

1.4 宇宙インターネットのアーキテクチャ

今後数十年間で開発される宇宙インターネットのアーキテクチャは現時点で確定しているものではなく、IETFでも複数のアーキテクチャが議論されている。その中で有力なものの一つとして、月内部や火星内部のネットワー

クが既存の地球のTCP/IPを中心としたインターネットと同様のネットワークで、その間がDTNで接続されるようなアーキテクチャ (図2)がある。このアーキテクチャの大きな利点は、それぞれの天体内では既存の地球のインターネット同様、デバイスどうしはIPによる通信が可能であり、今までに開発された多くの技術が容易に移植できることである。

このアーキテクチャの場合、天体内IPインターネットのエンドユーザのデバイスなどのノードはバンドルプロトコルに対応していない可能性は高いが、これらのノードがDTNを介して天体間での通信を行おうとするユースケースが存在する可能性は高い。これらのノードが天体間のDTNを通過する通信を行うために、ゲートウェイによってIPインターネットとDTN間の接続を仲介することが必要となると想定される。

我々は今回、このように地球と月のそれぞれの天体内のIPインターネットと、天体間のDTNがゲートウェイにより接続されるアーキテクチャを想定し、遅延も考慮した模擬的な宇宙の環境を構築した。

本論文の構成は以下の通りである。2章でDTNで使用される技術について述べたのち、この環境と、この環境上で実施した既存のDTNソフトウェア間のインターオペラビリティテストについて3章で報告する。また4章では、

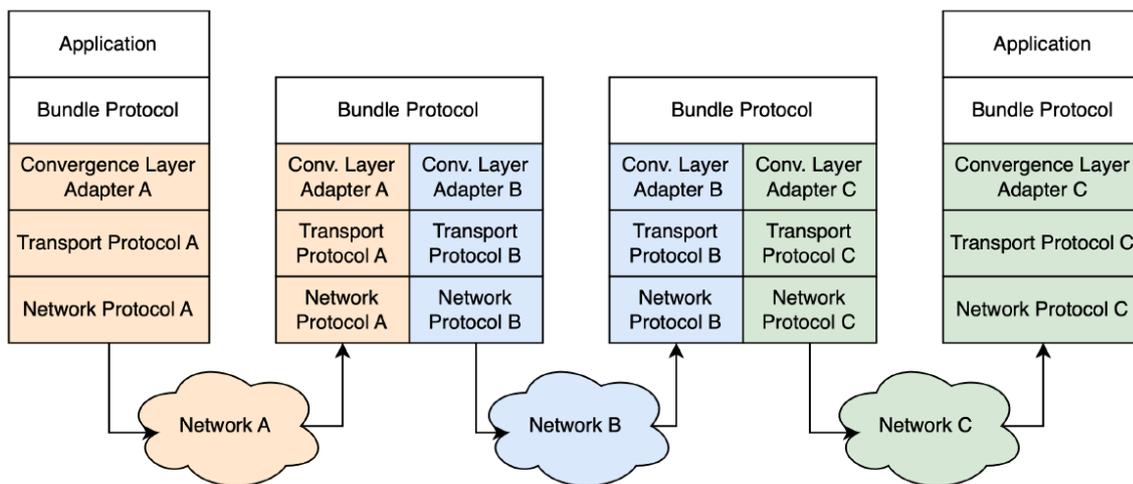


図1 DTNを搭載したノード間のみでの通信(参考文献[8]Figure1から引用)

3章で実現したネットワーク環境上に構築した、web over DTNと映像ストリーミングの2つのアプリケーションについて報告する。5章では、これらの実装と展示による成果と、判明した課題について述べ、6章で今後の課題と展望を述べる。

第2章 DTNの特徴的な技術

2.1 衛星間のContact

DTNは、通信の遅延や途絶が発生する環境でデータを確実に届けるための技術である。このDTNにおいて、通信が可能な時間やタイミングを「Contact」と呼んでいる。Contactとは、2つのノード間で直接通信が可能な期間やその条件を指し、データを送受信できる時間を意味している。

DTNを使用する環境では、常に接続が確立されている訳ではなく、ノード間の通信が可能な期間が限られていることが一般的である。したがって、このContactを正確に把握することが、効率的なデータ転送やネットワークの最適化において極めて重要な要素となっている。例えば、地球と宇宙探査機間の通信を考えてみると、両者が視界に入る時間にだけデータを送信することができる。この時間がContactにあたる。

2.2 Contact Plan

2章で既に述べた通り既存のDTN実装は複数あるが、

これらのDTN実装におけるルーティング手法は、主にContact Graph Routing (CGR) [9]が用いられ、CCSDSではSCHEDULE-AWARE BUNDLE ROUTING [10]として標準化されている。宇宙におけるノード間の通信可能な機会は物理的な軌道の計算により予測可能であり、CGRはノードの通信可能機会とそのスループットなどが書かれたContact Planを用いて最適な経路を計算するルーティング手法である。ION-DTN_でもCGRを用いており、実装ではコンフィグファイルの中に直接的に書き込むことで使用される。今回Interopにおいて使用したファイルを図3に示す。

Contact PlanではノードとノードのContactについて、Contact開始時間、Contact終了時間、送信者と受信者のIPNアドレス、平均スループットが1行に記される。ただし宇宙におけるコンタクトは必ずしも双方向の通信が可能とは限らず、片方向的な通信の機会も存在するため、Contact Planにおいて1行で記されるContactは片方向的なものである。

2.3 Bundle Protocol

Bundle Protocol (BP)は、DTNにおける主要な通信技術で遅延・断絶が起きやすい環境でデータを確実に伝送するために設計された。

Bundle Protocolは、データを「バンドル」と呼ばれる可変長の単位として送信する。このバンドルは、送信元から目的地までの途中で複数の中継を経ても、全体として

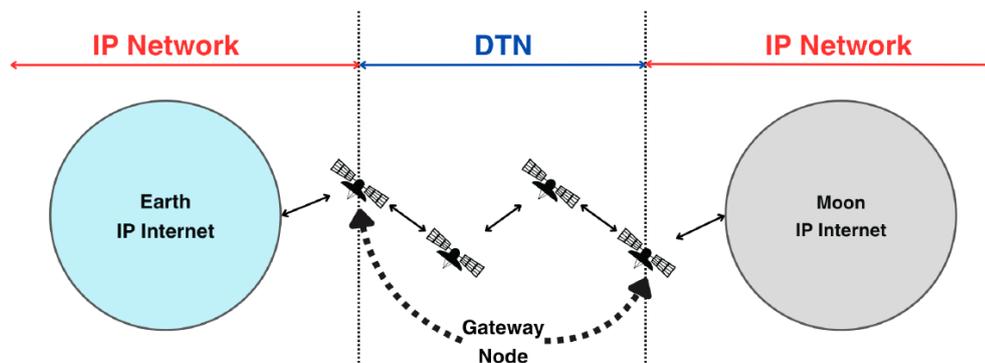


図2 DTNによって天体IPインターネットが接続された宇宙インターネット

データを確実に届けるためのものである。また、このプロトコルは「ストア&フォワード」方式を利用しており、各中継ノードが受け取ったバンドルを一時的に保存し、次のノードと通信できるタイミングが来るまで待機する。これにより、通信が一時的に途絶えてもデータが失われることなく、次のノードへと送信される。

2.4 Convergence LayerとLTP

DTNでは多様なプロトコルがトランスポートレイヤ以下の層で使用することを想定しており、図1中のConvergence Layerはそれらの違いを吸収することを目的としている。Convergence Layer Protocol(CLP)として

は、利用する下位レイヤプロトコルにより、TCP-based CLP (TCPCL)、User Datagram Protocol (UDP)-based CLP (UDPCL)、Saratoga CLP、Licklider Transmission Protocol (LTP)-based CLP (LTPCL)、Licklider Transmission Protocol(LTP)などがある。

LTP[12]はコンバージェンスレイヤのプロトコルの一つであり、再送制御の機能も実装している。LTPをコンバージェンスレイヤに用いる場合、トランスポートレイヤにUDPを用いることがあるほか、宇宙での通信においてLTPが直接リンク層にアクセスすることも想定されている。

```
## begin ionadmin

# 150はどのIPNノード番号のノードにとってのコンタクト情報かを表す
1 150 ' '
s

# 1行ごとに片方向のコンタクトを示す。
# 例として"a contact +1 +3600 149 150 100000"の場合について説明する
# "+1":開始時間から起算したコンタクト開始時間
# "+3600":開始時間から起算したコンタクト終了時間
# "149":送信者側のIPNノード番号
# "150":受信者側のIPNノード番号
# "100000":転送速度 (bytes/second)
a contact +1 +3600 149 149 100000
a contact +1 +3600 149 150 100000
a contact +1 +3600 150 149 100000
a contact +1 +3600 150 150 100000
a contact +1 +3600 150 152 100000
a contact +1 +3600 152 150 100000
a contact +1 +3600 152 152 100000
a contact +1 +3600 152 151 100000
a contact +1 +3600 151 152 100000
a contact +1 +3600 151 151 100000

# 1行ごとに片方向のコンタクトを示す。
# "contact"の行とは異なり、ノード間の物理的な距離についての情報を示す。
# 例として"a range +1 +3600 149 150 1"の場合について説明する
# "+1":開始時間から起算したコンタクト開始時間
# "+3600":開始時間から起算したコンタクト終了時間
# "149":送信者側のIPNノード番号
# "150":受信者側のIPNノード番号
# "1":送受信者間の通信にかかる秒数(片道の時間, 光速での通信)
a range +1 +3600 149 149 1
a range +1 +3600 149 150 1
a range +1 +3600 150 150 1
a range +1 +3600 150 152 1
a range +1 +3600 152 152 1
a range +1 +3600 152 151 1
a range +1 +3600 151 151 1

# ノードのデータ送受信の帯域の上限値
# "production 1000000"は約1Mb/secondの送信用の帯域上限
# "consumption 1000000"は約1Mb/secondの受信用の帯域上限
m production 1000000
m consumption 1000000

## end ionadmin
```

図3 ION-DTNにおけるContact Planの例
それぞれの行の解説は参考文献[11]を参照した

2.5 IPN address

IPNアドレス(Interplanetary Networking Address)は、DTN環境で使用されるアドレス形式で、宇宙通信のためのネットワーク識別とエンドポイントの識別を可能にするものである。従来のインターネットプロトコルアドレス(IPアドレス)は、リアルタイムでの通信や短い遅延を前提とした設計であるため、宇宙空間における遅延や断絶が発生する環境では適切に機能しない。DTNのアーキテクチャは、これらの遅延や断絶を前提としており、IPネットワークとは異なる方法でデータを伝送するため、IPNアドレスが必要とされている。さらに、IPNアドレスは地上のインターネットや宇宙のネットワークなど、異なるアドレッシングスキームを持つネットワークの統合する役割としても機能する。

IPNアドレスは「ipn:ノード番号.サービス番号」という形式で記述され、これにより特定の宇宙船や装置が個別に識別される。

第3章 模擬宇宙環境構築とインターオペラビリティテスト

3.1 模擬宇宙インターネット環境の意義と目的

模擬宇宙インターネット環境は、地球から月や火星間のインターネット通信をシミュレーションするための重要なツールである。この環境を構築することにより、宇宙空間での通信に特有の遅延や断続的な接続、リソースの制約をリアルに再現することが可能となる。

この模擬環境の目的は、将来の宇宙ミッションにおいて確実に安定した通信を実現するための技術を検証し、テストすることである。

3.2 機材配置

R86Sを衛星及び地上、月面上基地局に見立ててNetwork Operation Center (NOC)に設置した。このデバイスは、複数のネットワークインターフェースを持ち、さまざまなネットワークシミュレーションやテスト環境で利用可能である。特に、ディストリビューションネットワークや特殊なネットワーク構成のテストに適している。それぞれ

のR86Sを繋ぐスイッチとして、Juniper社EX2300cを用いた。EX2300cはNOCとSpace Summitのブース図5にそれぞれ1台ずつ配置している。

3.3 地球月間を想定した環境の構築

図6は、R86Sを用いた4つのノードでそれぞれ、地球拠点(Earth)、地球周回衛星(ISS)、月周回衛星(Lunar Gateway)、月拠点(Moon)を模擬している。各ノード間の通信は、4つ全てのノードに接続するスイッチ(EX2000c)によって制御される。このスイッチは、データパケットの転送を行う中継装置として機能している。また、このスイッチは東陽テクニカ社に提供して頂いたSpirent Network Emulator (SNE)と接続されており、このエミュ

```
## begin ltpadmin
1 32
a span 149 32 32 1400 10000 1 'udplso 192.168.2.1:1113'
a span 150 32 32 1400 10000 1 'udplso 192.168.2.2:1113'
a span 150 32 32 1400 10000 1 'udplso 192.168.6.1:1113'
a span 152 32 32 1400 10000 1 'udplso 192.168.6.2:1113'
s 'udplsi 192.168.2.2:1113'
s 'udplsi 192.168.6.1:1113'
## end ltpadmin

## begin bpadmin
1
a scheme ipn 'ipnfw' 'ipnadminep'
a endpoint ipn:150.0 q
a endpoint ipn:150.1 q
a endpoint ipn:150.2 q
a protocol ltp 1400 100
a induct ltp 150 ltpcli
a outduct ltp 149 ltpclo
a outduct ltp 150 ltpclo
a outduct ltp 152 ltpclo
s
## end bpadmin

## begin ipnadmin
a plan 149 ltp/149
a plan 150 ltp/150
a plan 152 ltp/152
## end ipnadmin
```

図4 Contact PlanにおけるLTPとIPNの設定



図5 ブース機材

レータを通じて実際の宇宙環境における各ノード間の遅延環境をシミュレートしている。

さらに、InteropのNOCに設置されたスイッチ(EX2300c)は、Interopのブースに設置されたスイッチ(EX2300c)と接続されている。この構成により、2章で述べるブースで展示されているweb over DTN、映像ストリーミング

グ、これらのビジュアライゼーションなどのデモ機材が、NOCに構築したDTN網を通じた通信を行うことを可能にした。今回構築した環境はスケーリングが可能な構成となっており、今後他の利用者にもDTN網を提供することが可能である。

今回構築した環境は、BPを評価・試験するためのテスト

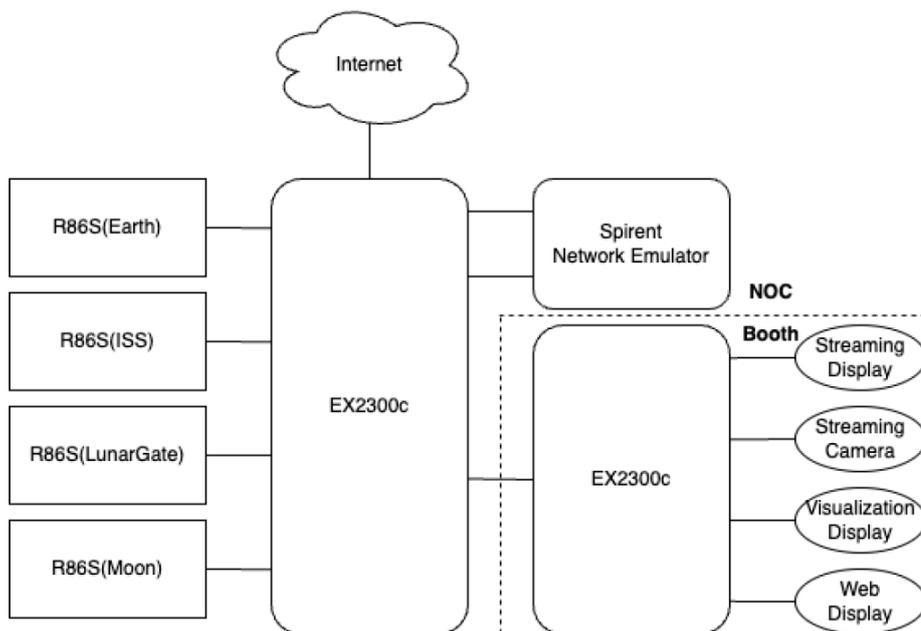


図6 物理接続図

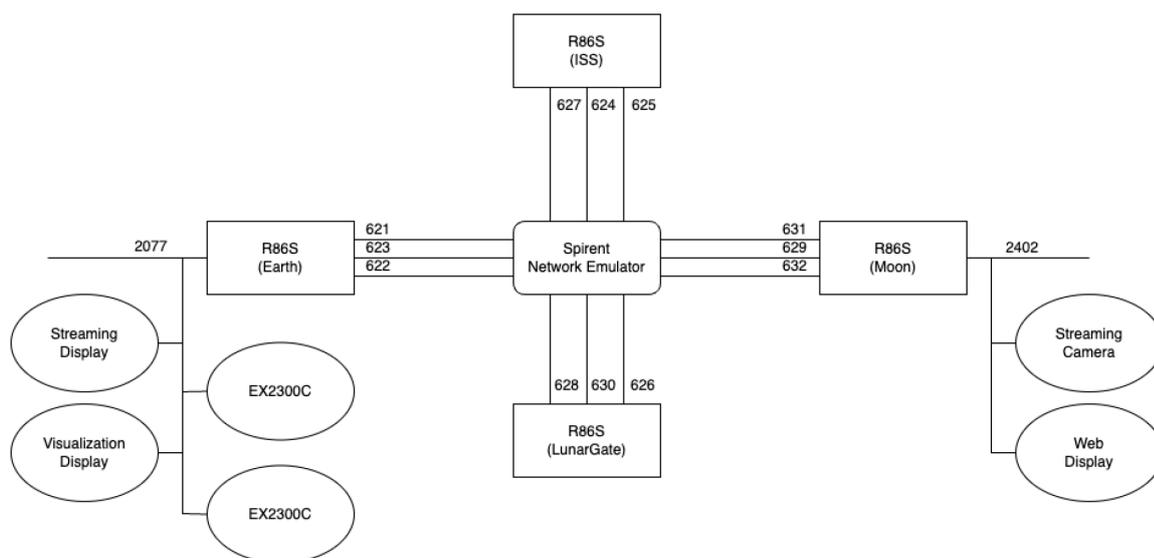


図7 VLAN構成

ベッドであり、衛星のリソースや電波、光通信を再現したのではない。今回の構成において各ノード間の通信遅延は異なる値に設定している。この通信遅延を実現するために、東陽テクニカ社提供のSpirent Network Emulator (SNE)を使用した。SNEは、Ethernetフレームのパラメータ毎にフレームに対して遅延を追加したり、フレームデータの書き換えを行うことができる。今回はそれぞれのノード間のリンクを示すVLAN毎に任意の長さの遅延を挿入した。1つにリンクについて、遅延を入れる前後で区別する必要があるため、それぞれのリンクごとにVLAN IDを2つ割り当て(図7)、SNEにおいて相互のVLAN IDの書き換えをおこなっている。例えば図10

で示す通り、Earth - Moon間のリンクはEarth側がvlan 623、Moon側がvlan 629となっているが、Earthからのフレームはvlan 623としてSNEに入力された後、遅延を実施した後にVLAN IDを629に書き換えてMoon側に送出される。

4つのノードはフルメッシュ構成で接続されており、各ノード間の遅延は固定値として設定されている。具体的な遅延値は以下の通りである。

- Earth-ISS:0.1秒
- Earth-LunarGate:1.2秒
- Earth-Moon:1.3秒
- ISS-LunarGate:1.1秒
- ISS-Moon:1.2秒
- LunarGate-Moon:0.1秒

これらの遅延値は、衛星の軌道による遅延の変化を考慮せずに設定している。実際に設定している図を図8に示す。VLAN毎に分岐されて遅延を設定している。

今回構築したメッシュ構造では、1つのNICを共有して使っているため、ノード間の通信は専用のVLANを介して

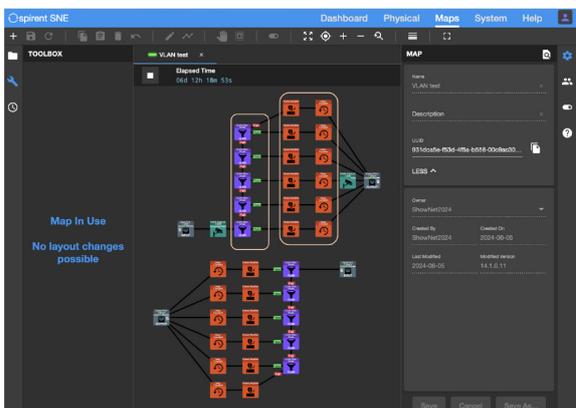


図8 Spirent Network Emulator

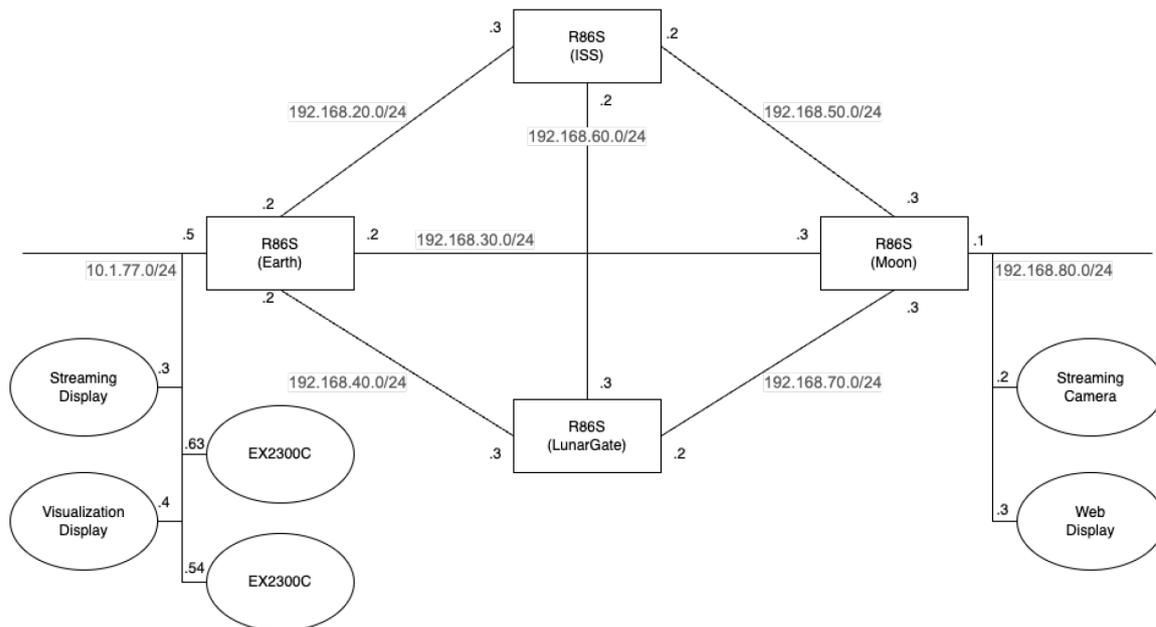


図9 IP Address構成

行われ、各ノードが同じネットワークセグメント上に存在している訳ではなく、VLANに対応した形でネットワークが分けられている。図10は、VLANとIP addressの関係を見やすくしたものである。

3.4 利用したIPN address

IPアドレスとは別に、BPのStore and Forwardを実現するために使用されているIPNアドレスは、以下の通りである。Earth:ipn:149、Moon:ipn:150、LunarGate:ipn:151、ISS:ipn:152。図11 Service Numberは、0、1、2を用いた。

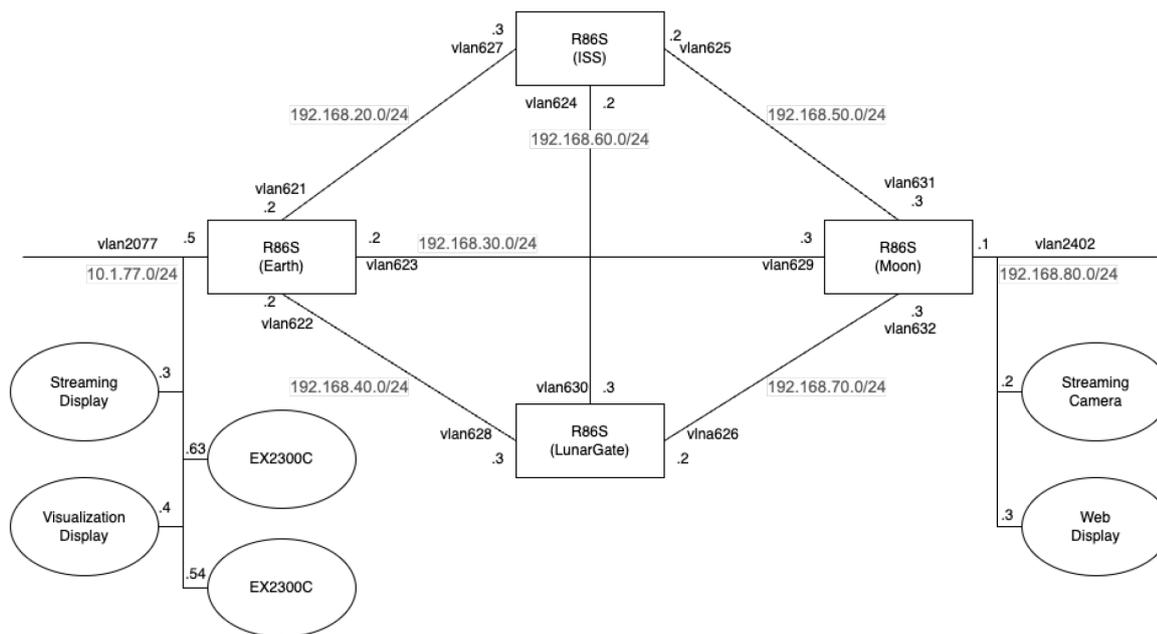


図10 VLAN、IP Adress

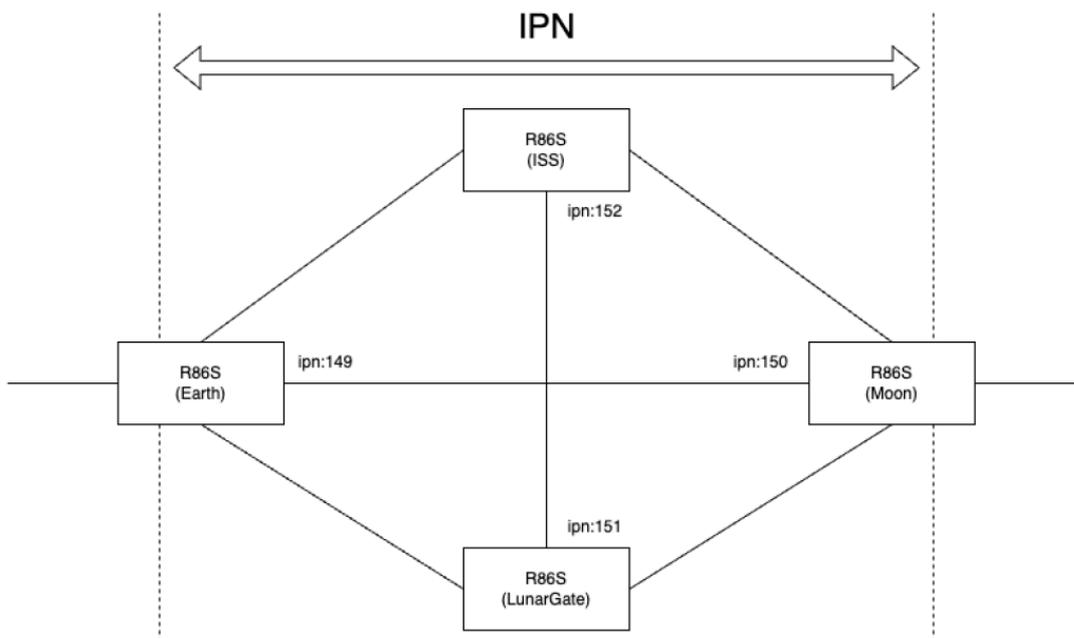


図11 IPN Address構成

- Service Number 0:映像ストリーミング
- Service Number 1:web over DTNの送信用
- Service Number 2:web over DTNの受信用

3.5 ION-DTNと μ D3TN間のインターオペラビリティテスト

ION-DTNと μ D3TNは、Interplanetary Networking Special Interest Group (IPNSIG)[13]の主導のもと、これらの中でインターオペラビリティテストが行われた。[14]本実装では、そのテストを応用した。Interplanetary Overlay Network (ION)は、NASA/JPLによって開発されたDTNソフトウェアで、バージョン4.1.1ではバンドルプロトコルバージョン7 (BPv7)に準拠している。一方、D3TNの μ D3TNも最新バージョン0.11.0でBPv7に対応しており、この両実装の相互接続テストが可能となっている。これらのテストは、異なるDTN実装間の相互接続性とアプリケーションの相互運用性を実現している。

テスト環境ではIONと μ D3TNがTCPを介して通信するように設定した。IONは複数の収束層(LTP、TCP、UDP)をサポートしているものの、 μ D3TNは唯一TCP収束層のみをサポートしているため、インターオペラビリティテストではTCP収束層を用いた。

今回我々が構築した環境では、Earth、ISS、MoonにION-DTNを実装し、LunarGateに μ D3TNを実装した。ION-DTNを実装したノード同士はLTPで通信を行い、 μ D3TNを介した通信では、TCPをベースに通信を行っている。

3.6 構築した環境における通信状況の可視化

実際にDTN通信を活用したストリーミングおよびウェブ閲覧アプリケーションをエミュレーション環境に基づ



図12 宇宙インターネットの可視化画面

いて天体運動及びバンドル転送を可視化した。可視化モデルには地球、地球を周回する複数の衛星、月、およびその周回軌道が含まれており、惑星と衛星の相対位置に応じてバックエンドのノードがデータを送信する仕組みである。またノード間で行われるバンドル転送の経路をtcpdumpでパケットキャプチャし、トラフィックをリアルタイムに検知して、それぞれのバンドルのデータサイズやヘッダーを画面に表示した。

第4章 DTN環境を利用したアプリケーション

前章ではオープンソースのDTN実装を使用したDTN環境について述べた。しかし我々の想定する天体内IPインターネットがDTNによって接続される宇宙インターネットのアーキテクチャの大きな理由の一つは、既存のインターネットのアプリケーションなどの移植が比較的容易であることである。その実証のため、構築したDTN環境を用いた静的なwebの利用と、映像ストリーミングの2つのアプリケーションを設計・構築し、デモンストレーションを行った。

4.1 Web over DTN

構築した実験用DTN環境のアーキテクチャを利用し、DTNで接続された異なるIPインターネット間でのweb利用を実装しデモンストレーションを行った。構成を図13に示す。クライアント端末上でdnsmasqを動作させ、すべての問い合わせに対してゲートウェイ端末のIPアドレスを返答するように設定をおこなった(図中1・2)。ブラウザからのHTTP/HTTPSリクエスト(図中3)に対して、ゲートウェイ端末1は端末内のキャッシュをチェックする(図中4・5)。キャッシュとして保存されていなかった場合、クライアントからのHTTP/HTTPSリクエストの内容はIONプロセスによってバンドルにエンコードされ、ゲートウェイ端末2へと送信される。バンドルを受け取ったゲートウェイ端末2はその内容に応じたコンテンツの取得を行い、レスポンスをバンドルにエンコードしてゲートウェイ端末1に送信する。ゲートウェイ端末1はレスポンスを直接クライアント端末に返さず自身の端末にキャッシュとして保存し、再度クライアントからのリクエストがあった場合にレスポンスとして送信する(その

ため、本デモではキャッシュされていなかったページについてはクライアント側のブラウザで再読み込みを行う必要がある)。今回の静的なwebシステムの構築では、それぞれのゲートウェイ端末のIONプロセスにおいて、送信に1番を、受信に2番のIPNサービス番号を用いた。

4.2 映像ストリーミング

構築した実験用DTN環境で動作するアプリケーションとして、映像ストリーミング配信を実装し、デモンストレーションを行った。

本アプリケーションの構成を図14に示す。カメラ端末で取得した映像は10秒ごとにチャンクに区切られ、H.264コーデックでエンコードされた後、構築したDTN環境を通じてビューワ端末に送信される。ビューワ端末では、受信したチャンクをバッファに蓄積し、画面に表示して再生する。カメラ端末とビューワ端末は直接通信せず、

ゲートウェイ端末を介して通信を行う。ゲートウェイ端末とカメラ・ビューワ端末間の通信はTCPで行われ、ゲートウェイ端末間の通信はBundle Protocolを使用する。

Interopでは、EarthおよびMoonをゲートウェイ端末とし、Streaming Cameraをカメラ端末、Streaming Displayをビューワ端末としてデモンストレーションを行った。

当日の展示の様子を図15に示す。カメラ端末から取得された映像が、ディスプレイに接続されたビューワ端末によって表示されている。来場者はバッファ分遅延した映像を、(ネットワークトラブル時を除き)途切れることなく閲覧することができた。

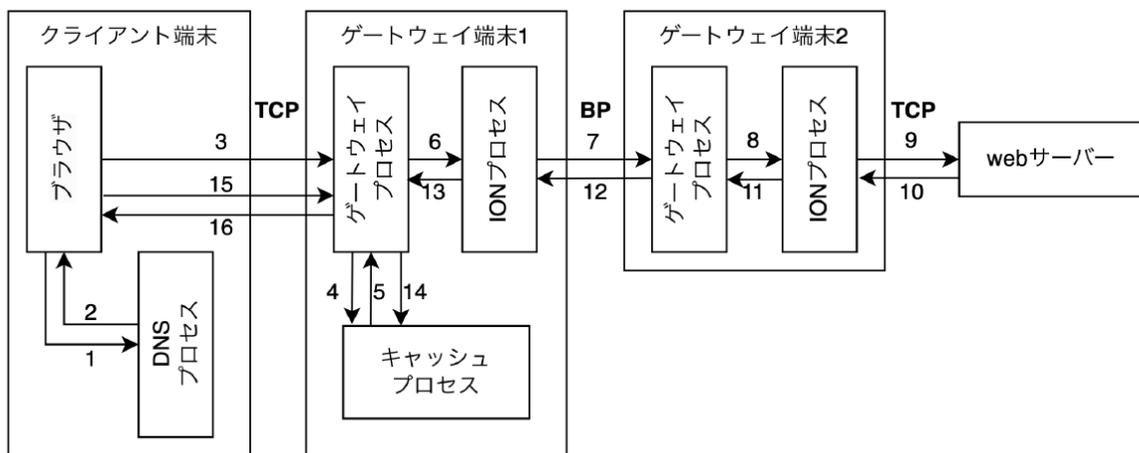


図13 静的webシステムの構成図

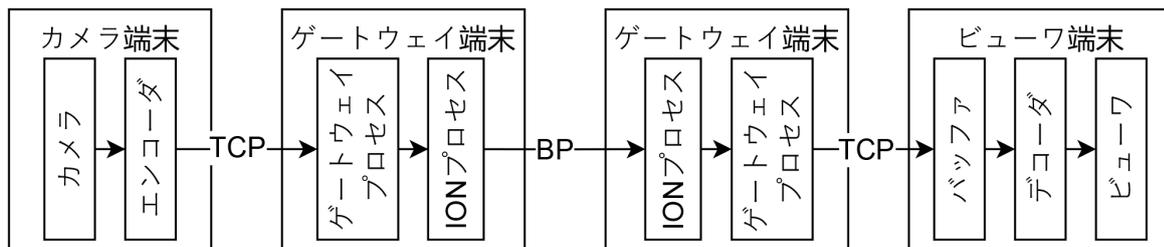


図14 映像ストリーミングシステムの構成図

第5章 実装により判明した課題とINTEROPにおける成果

5.1 Interop Tokyo 2024での成果まとめ

我々はInterop Tokyo 2024において、地球と月間の通信エミュレーション環境を構築し、遅延が発生する環境下でのバンドル転送を再現した。来場者は、フルメッシュ構成のネットワークを通じたウェブ閲覧と映像ストリーミングのデモを体験し、アプリケーションの技術仕様や実際の使用シナリオについて議論した。デモでは地球、地球周回衛星、月周回衛星、月面基地を模擬したノード間での通信が行われ、実際の宇宙通信に近い環境での動作を参加者に認識していただいた。

5.2 DTN実装によるリソース管理

DTNシステムでは、ネットワークが動作する環境のユニークな特性により、リソース管理に大きな課題がある。DTNノードは多くの場合、限られた動的メモリ割り当てを含む厳しいリソース制約の下で動作するため、特にメモリ管理が困難である。予測可能性を確保し、リアルタイム・オペレーティング・システムにおける動的メモリ管理に関連するリスクを回避するために、メモリ割り当てが起動時に固定されるのが一般的である。これは宇宙システムでよく見られる。実際、今回のシステムではファイルサイズが500KBを超えると、メモリストールを示すSDRメモリエラーが出力された。また、コンタクトプランが再設定されると、システムはプロセスを停止し、再起動しなければならない。このような静的割り当ては、メモリの枯渇を防ぐために慎重な計画を必要とし、再起動や物理的な修復が不可能な環境では大惨事を引き起こし

かねない。DTNは低帯域幅、高遅延の通信リンクに依存することが多く、特に宇宙アプリケーションでは、リンクの非対称性と限られた伝送機会により、利用可能な帯域幅を非常に効率的に使用する必要があるため、伝送リソースも同様に制約される。DTN運用の中核であるバンドルプロトコル(BP)はデータを断片化し、再組み立てする必要があるため、ストレージと処理リソースの両方に対する要求が増加し、処理オーバーヘッドも増加する。帯域幅の管理は、さまざまなデータレートに対応し、重要なデータに優先順位をつける必要性によってさらに複雑化する。今回は転送するh204などのファイルのオーバーヘッドを最小限に抑えるための圧縮モジュールを実装し、利用可能な帯域幅を最大限に活用するための慎重な送信スケジューリングを、低帯域幅の環境で実現した。今後、DTNが宇宙通信において標準となるためには、上記のメモリストールやソケットなど、物理層とのインターフェースの実装が必要である。

5.3 コンタクト情報の配布

CGRに基づいたルーティングを行うには、どのDTN実装においてもコンタクト情報をそれぞれのノードが保持している必要がある。しかしそのコンタクト情報の配布手法は既存のDTN実装では考慮されておらず、またIETFやCCSDSでも正式には議論されていない。既存のDTN実装では、コンタクト情報を元にDijkstra Algorithmなどを用いて最適な経路を算出している。しかし宇宙環境ではノードの計算能力は非常に限られており、通信帯域も貴重であることから、これらのリソースを効率的に使用できる配布方法の検討が必要である。

第6章 これからの展望、Future work

WIDE ProjectのSpace WGでは、2024年のInteropにおいて、既存のDTN技術を活用したネットワークのデモを展示した。このデモンストレーションは、現行の実装をもとにしたものであり、SpaceWGオリジナルの開発要素は含まれていない。しかし、これを機にDTNのさらなる発展と拡大に向けた目標が見えてきた。

特に開発者がDTN環境でアプリケーションを容易に作成



図15 映像ストリーミングシステムの展示の様子

できるようにするためには、より使いやすい開発ツールやAPIを提供しなければならない。現在のDTNでは、データの送信や受信を簡単に行えるようなsocketプログラミングインターフェイスは開発段階であり、これがアプリケーション開発の障壁となっている。この問題に対し、Space WGとして新たなツールキットの開発を行おうと考えている。これにより、開発者はDTNの特性を最大限に活かした宇宙インターネット向けのアプリケーションを開発できるようになる。

さらに、今後のInteropで宇宙インターネット網を利用した、月面生活のシミュレーションを行おうと考えている。このシミュレーションでは、実際の月面基地で発生する可能性のあるさまざまなシナリオを想定し、それに必要な通信方法を検討する。データの種類に応じて最適な送信方法を選び出すことが重要で、例えば、テキストデータの送信は高遅延が許容されるのに対し、ビデオ会議ではリアルタイム性が求められるようにより高度なデータに対する圧縮や優先順位、プロトコルの選定が重要だと考えている。

IPNSIGでは、国際的な相互接続の構築を目指す議論が行われている。この取り組みは、宇宙インターネット(DTN技術)の普及と実用化を目指しており、様々な国や地域間でのデータ通信の安全性と信頼性を高めることを目的としている。この国際的な流れに合わせ、日本国内でもDTNの相互接続試験を行なうことを考えている。

また2024年のInteropでは、WIDE ProjectのみでDTN網を構築・利用したが、来年以降のInteropではさらに多くの多様な利用者にDTN網を利用したサービスの提供を展開していくことを予定している。この構成をどのように拡張し、どのような形で他の利用者に提供していくかの方針を現在検討しており、具体的な方針が決定次第、関係者への情報共有を行う。これらのプロセスを経て、最終的に多様な利用シナリオにも適応できるような環境を整えることが目標としている。

これらの活動を通じて、宇宙空間でのデータ通信技術の基盤を固め、将来的には地球外での人類の生活を支えるインフラとして実用化を目指す。WIDE ProjectのSpace

WGは、これらの課題に対して、国内外の研究者や技術者と連携しながら、新たな技術開発に取り組んでいく。