

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：31303

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22700081

 研究課題名（和文）低軌道衛星 IP ネットワークエミュレータの構築および  
通信制御方式の実験的検証

 研究課題名（英文）Developing Network Emulator for Low Earth Orbit Satellite IP Networks  
and Experimentation of Communication Control Methods

研究代表者

角田 裕 (HIROSHI TSUNODA)

東北工業大学・工学部情報通信工学科・講師

研究者番号：30400302

研究成果の概要（和文）：低軌道衛星ネットワークは、従来から IP 化と TCP/IP による地上インターネットとのシームレスな接続・統合の実現が世界的に期待されている。そこで、低軌道衛星ネットワークの通信制御に関して実用的な側面からの評価を充実させ、低軌道衛星 IP ネットワークの早期の実現に貢献することを目指し、本研究では数十機から数百機の低軌道衛星からなるネットワークのエミュレータの開発と各種通信制御方式の検証を行った。

研究成果の概要（英文）：Low earth orbit (LEO) satellite network has been expected to seamlessly connect and integrate to the existing IP networks. If such IP/LEO network is realized, users can move freely in the integrated networks and communicate with each other anywhere in the world. This research tackled to develop a network system for emulating IP/LEO satellite networks and proposed communication control methods in that environment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,246,140	390,000	1,636,140
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,946,140	900,000	3,846,140

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：衛星利用ネットワーク，エミュレーション，TCP/IP

## 1. 研究開始当初の背景

衛星ネットワークは、地球規模のカバレッジを持ち、あらゆる場所のユーザに対していつでも通信リンクを提供できるという機能を有している。衛星ネットワークで使用する衛星は、その軌道高度によって静止衛星（高度 36,000km）、中軌道衛星（高度 10,000km）、低軌道衛星（高度 500～200km）に分類される。この中でも、低軌道衛星はその軌道の低

さから伝搬遅延が特に小さく、伝搬中のロスを抑えることができるという利点があり、数十機から数百機の衛星を衛星間通信によって接続した図 1 のような「低軌道衛星ネットワーク」の活用が以前から関心を集めている。特に、1990 年代終盤には Iridium や Global Star がサービスを展開し話題となった。

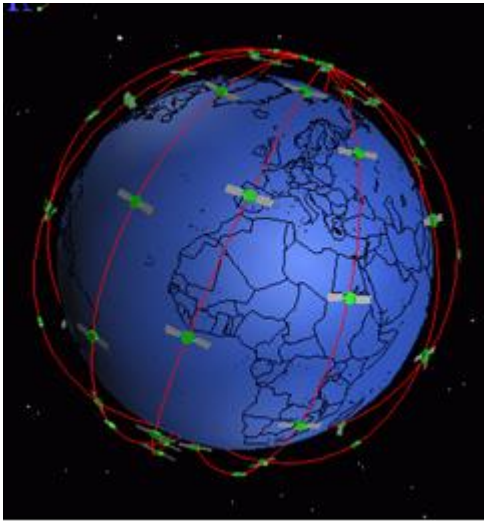


図 1 低軌道衛星ネットワークの例  
Iridium(generated by using SaVi)

だが、それらのサービスがビジネス的には大きな成功に繋がらなかった上に、携帯電話などの地上の広域無線ネットワークの爆発的に進展・普及したことにより、2000年代後半は衛星ネットワークへの関心が下がっていた。

しかし、ここ数年は低軌道への小型衛星の打ち上げが活発化し、それらの小型衛星のネットワーク化も進められていることなどから、低軌道衛星ネットワークへの注目が再び集まってきている。それに伴い、低軌道衛星ネットワークの IP 化と、インターネット標準の TCP/IP プロトコルによる地上インターネットとのシームレスな接続・統合の実現が世界的に期待されている。

## 2. 研究の目的

低軌道衛星ネットワークが地上のインターネットとシームレスに接続されれば、携帯端末を使用する移動ユーザや、僻地や離島などの地上インフラが未成熟な地域のユーザに対するインターネット接続環境の提供が可能となり、通常時だけでなく、緊急時や災害時などの通信手段として非常に大きな役割を果たす。また、地球観測の分野においては、多数のセンサからの観測データの取得やそれらのセンサの制御を低軌道衛星ネットワークとインターネットを介して行うことができるようになるという利点が生まれる。

このようなシームレスなネットワークの実現の障害は、低軌道衛星が非静止衛星であることである。非静止衛星である低軌道衛星は地上に対して常に移動し続けるため、低軌道衛星ネットワークでは、インターネットとの

衛星ネットワークとの接続関係および衛星ネットワーク内の構成が時々刻々と移り変わる。この特徴から、低軌道衛星ネットワークへの TCP/IP の適用に関する問題点が指摘され、経路制御・移動管理・伝送制御などの各種通信制御に関する様々な研究が行われている。例えば、地理的位置情報を積極的に活用した移動端末の移動管理方式、衛星の移動によって発生するパケットの再送を抑制する伝送制御方式などがその具体例として挙げられる。しかし、本分野の現状は、評価の方法が定性的な分析とシミュレーションに限られており、実用的な観点からの検証が大幅に不足している。

そこで、本研究では、計算機による低軌道衛星ネットワークのエミュレータを開発し、低軌道衛星ネットワークに関連する通信制御方式を実験的に検証・評価することを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 低軌道衛星ネットワークの遅延データベースの作成

低軌道衛星ネットワークの特徴は、衛星の移動によって衛星同士の位置関係が変化し、その結果としてネットワークの遅延も時間と共に変化することにある。そのため、開発するエミュレータにおいてはその遅延の再現がひとつの課題となる。

衛星の移動と位置関係の変化は衛星の軌道配置によって定まるため、あらかじめ計算しておくことが可能である。そこでエミュレータ構築の前段階として、本研究項目において、オープンソースのネットワークシミュレーションソフトウェアである NS-2 を利用して、想定する衛星ネットワークのシミュレーションを行い、遅延のデータを取得する。そして、得られたデータから各時刻における衛星間の遅延マップを生成し、それをデータベースとして各時刻の遅延マップをエミュレータに入力しエミュレータ上で再現する。NS-2 は内部に衛星の軌道計算ルーチンを有しており、軌道計算に基づいて衛星間の遅延を算出する機能が実装されている。また、ネットワークに関わる多くの研究で利用され修正と改良を繰り返されているシミュレータであり、低軌道衛星ネットワークの研究に用いられているため、作成した遅延マップの正確性も高いことが期待できる。

### (2) 低軌道衛星ネットワークのエミュレータの構築

本研究項目では、まず OS として Linux を

搭載した各小型パソコンがそれぞれ1機の衛星をエミュレートする小規模なエミュレータを構築する。前節で言及した遅延データベースに基づいた衛星間の遅延のエミュレートには **netem (network emulator)**を用いる。**netem** は **Linux** に標準搭載されているネットワークエミュレーションツールであり、ネットワークインターフェースごとに遅延や帯域を調節できる機能を有している。**netem** を用いて衛星の移動に伴う遅延の時間的な変化を再現するために、時間と共に **netem** に設定する遅延データを動的に切り替えるプログラムを作成する。

そして、エミュレートされた各衛星間の遅延を24時間に渡り計測し、低軌道衛星ネットワークの遅延の変化が再現されていることを確認する。その後、低軌道衛星ネットワークに特有の特徴である遅延の変化の再現が可能であることを確認した上で、大規模エミュレータの開発に取り組む。少数の計算機を効率的に活用して百機以上の衛星からなる大規模な低軌道衛星ネットワークをエミュレートする方法として、近年進展がめざましい仮想化技術を利用し、仮想マシンによって衛星をエミュレートしそれらを相互に接続する。

### (3) 低軌道衛星ネットワークにおける通信制御方式の評価検討

エミュレータおよび実ネットワークを活用し、低軌道衛星ネットワークにおける様々な通信制御に関する評価と検討を行う。低軌道衛星ネットワークでは衛星間の遅延や構成が変化するため、低軌道衛星ネットワークを介して通信する2点の端末間の最短経路が時間と共に変化する。この場合、インターネット標準の経路制御プロトコルでは頻りに経路情報の交換が必要となる可能性が指摘されている。この問題を検証するため、エミュレータ上で **RIP/OSPF** などの各種経路制御プロトコルを動作させ、低軌道衛星 **IP** ネットワークにおける経路制御の問題の実際を検証する。また、**IPv6** 化された衛星ネットワークを想定し効率的な通信制御の方式を検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 低軌道衛星ネットワークの遅延データベースの作成

**NS-2** が標準で備えているイリジウムシステムの衛星配置を用いたシミュレーションを行い、遅延データベースを作成した。作成には **NS-2** が出力するルーティング情報の履歴

を利用した。イリジウムシステムの衛星配置では、各衛星はそれぞれ隣接する3~4の衛星とリンクしている。**NS-2** 内では、各衛星がリンクしている隣接衛星との遅延を測定し、ルーティングのため情報として保持している。そこでそのルーティング情報からデータを抽出した。

図2に、**NS-2** が出力したルーティング情報の一例である。この例では、衛星0が衛星1, 10, 11と接続されており、それらとの間の遅延がそれぞれ0.013455, 0.013455, 0.014795秒であることを示している。

```
Found a link from 0 to 1 with cost 0.013455
Found a link from 0 to 10 with cost 0.013455
Found a link from 0 to 11 with cost 0.014795
```

図2 ルーティング情報の出力例

そして、この遅延データに効率的にアクセスするために、**SQLite** を利用してデータベース化し、そのデータベースを次の研究項目で述べるエミュレータで活用する。

### (2) 低軌道衛星ネットワークのエミュレータの構築

コスト対効果を考慮して、エミュレータは **VMWare** 社の無償ハイパーバイザである **VMWare vSphere Hypervisor (VMware ESXi)** を利用して開発した。個々の衛星をエミュレートする仮想マシンの **OS** には、衛星がルータとして動作することを想定し、**Linux** ベースのソフトウェアルータ **Vyatta** を採用した。

まず、**netem** を用いて衛星通信で発生する遅延の変化をエミュレータ内で再現できることを確認するために、約10台の仮想マシン(衛星エミュレータ)を備えた衛星ネットワークエミュレータを構築し、検証を行った。検証には、イリジウムシステムの遅延データを用いた。図3は **NS-2** が出力したイリジウムシステムの遅延データに基づいて **netem** を制御し、エミュレータ上で遅延の変化を再現させた結果である。元となった遅延データとエミュレータ上で発生した遅延を比較している。図3からわかるように、エミュレータで再現された通信遅延はわずかに元となった遅延より大きい。この原因としては仮想マシン内での処理の影響が考えられる。しかし、遅延の変化のタイミングはほぼ一致しており、正しく遅延の変化を再現できているといえる。

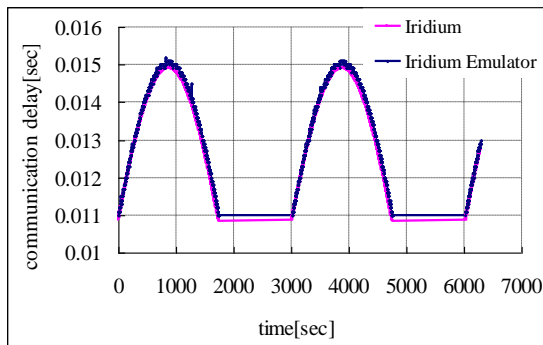


図 3 エミュレータ内での遅延の推移

次に、10 軌道に 12 機ずつ合計 120 機の衛星がグリッド状に接続される Walker Delta 型の衛星システム NeLS (次世代 LEO システム) のエミュレータを構築した。仮想マシンの接続関係を図 4 に示す。NeLS の設計では、衛星間通信は同一軌道内の前後の衛星および両側の隣接軌道にある直近の衛星の計 4 機との間で行う。そのため、衛星をエミュレートする各マシンには 4 枚の仮想 NIC を持たせて、それらをグリッド上に相互接続することで衛星間通信を模擬した。図 4 に示すように隣接軌道間の通信の軌道内の通信のそれぞれに仮想スイッチを割り当て、個々の衛星間通信はすべて異なる VLAN の独立したサブネットとした。構築したエミュレータ内の通信は ping による疎通確認を行い、すべての衛星同士が相互に通信できることを確認した。また、OSPF による動的ルーティングにより、一部のリンクを切断した際には代替経路が設定されることも確認できた。

### (3) 低軌道衛星ネットワークにおける通信制御方式の評価検討

本研究項目では、IPv6 化された低起動衛星ネットワークを想定し、効率的な通信制御の方式を中心に検討を行った。IPv4 ネットワークにおける通信制御では、Address Resolution Protocol (ARP) を活用してパケットの通信を制御し、所望の場所へ誘導することが提案されている。ここでは、IPv6 ネットワークにおける同様の制御を実施することを想定し、ARP の置き換えとなる Neighbor Discovery Protocol (NDP) による効率的なパケット誘導の方法について考察した。

具体的には、NDP の仕様に基づいて制御のための NDP Spoofing に利用するパケットの種類について考察した。Neighbor Cache の状態遷移の仕組みから、要請フラグを設定した Neighbor Advertisement による Spoofing が最も効率的であることを示し、そ

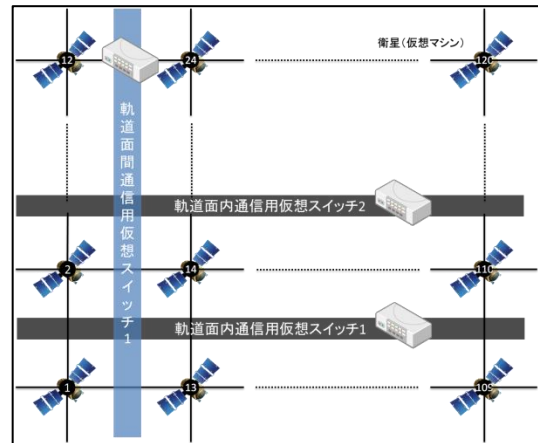


図 4 仮想マシンの接続関係

れを実験により確認した。

### (4) その他の成果

本研究を通じて、当初想定していた主要な研究項目以外にも関連する分野について多くの知見を得ることができた。ここではそれらの研究成果について、その概要を述べる。

開発したエミュレータは内部に 120 台の仮想マシンを有し、各仮想マシンの管理が煩雑であったため、各マシンの設定変更やコマンド実行を一括して自動的に行う環境を整備し効率化を図った。また、管理性を向上させるため、エミュレータが出力するログ情報の管理システムを整備するなど、低軌道衛星ネットワークに限定されない、より広範囲に適用可能なネットワーク管理技術に関する有用な知見を得ることができた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 松田勝敬, 鈴木健一, 中山英久, 河野公一, 角田裕 WAN 接続可能な研究用ネットワークの構築と運用, 東北工業大学紀要, 査読有, 第 31 号, I 理工学編, 67-76
- ② 角田裕, 安住信貴, IPv6 イン트라ネットにおけるトラフィック監視のための NDP Spoofing に関する研究, 東北工業大学紀要, 査読有, 第 33 号, I 理工学編, 85-92

[学会発表] (計 7 件)

- ① 渡邊紘平, 角田裕, LEO 衛星ネットワークエミュレータの構築に関する研究, 2011 年 3 月 12 日, 平成 23 年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」, 仙台工業高等専門学校
- ② 安住信貴, 角田裕, IPv6 ネットワークにおける端末検知に関する研究, 平成 23 年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・

電波・エネルギー・システムとその応用」,  
2011年3月12日, 仙台工業高等専門学校

- ③ 安住信貴, 角田裕, IPv6 イントラネットにおける端末検知に関する検討, 平成 23 年度 電気関係学会 東北支部連合大会, 2011年8月25日, 東北学院大学
- ④ 安住信貴, 角田裕, IPv6 イントラネットの通信監視のための NDP Spoofing に関する検討, 2012年 電子情報通信学会 総合大会, 平成 24年3月21日, 岡山大学
- ⑤ 工藤卓馬, 角田裕, ネットワークログインシステムの管理性の向上に関する検討, 平成 25年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」, 2013年3月1日, 仙台工業高等専門学校
- ⑥ 兜森悠史, 角田裕, Eucalyptus 環境におけるノード追加の効率化に関する検討平成 25年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」, 2013年3月1日, 仙台工業高等専門学校

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

角田 裕 (Hiroshi TSUNODA)  
東北工業大学・工学部・講師  
研究者番号：30400302