

衛星通信システム実験の現状と展望

加藤 寧[†] 風間 宏志^{††} 西山 大樹[†]

Experiment of Satellite Communication Systems: Present State and Future Prospects

Nei KATO[†], Hiroshi KAZAMA^{††}, and Hiroki NISHIYAMA[†]

あらまし 広域性と同報性に優れ古くから利用されてきた衛星通信システムだが、時代の変遷とともにその役割が少しずつ変化してきている。地上の有線/無線ネットワークの発達により都市部を中心に利用者数が減ってはいるものの、災害に対する強さなど非常時でも利用可能な通信システムとしての役割は依然として大きい。僻地や災害地でのシームレスな通信を実現するために衛星通信システムと地上ネットワークの融合が叫ばれる一方、限られた周波数資源の有効利用も課題となっている。更に、地球環境の変化などに伴い、環境モニタリングといった衛星通信システムの新しい利用法にも注目が集まっている。本論文では、衛星通信システム実験の現状を概観し、国内外の最新の状況を紹介するとともに、今後の展望について述べる。

キーワード 衛星通信, システム, 実験

1. ま え が き

地上インフラが未整備でインターネットも存在しなかった時代、衛星電話に代表される衛星通信システムはいつでもどこでも利用可能な唯一の通信手段として大きな役割を担っていた。しかしながら、地上ネットワークの急激な高速化・グローバル化、そしてインターネットや携帯電話の爆発的な普及により、近年では、衛星通信システムの役割は災害時や僻地での通信サービス提供といった限られたものへと変化してきている。衛星通信システム単体での利用よりも、地上に展開する他の通信システムとの統合運用などに重点が移り始めている。その一方で、地球環境保護の気運が高まるにつれ、小型衛星を利用した環境観測などにも注目が集まっており、衛星の新たな利用方法の開拓につながるものとして期待が高まっている。本論文では、過去3年程度の間報告された主な衛星通信システム

実験について紹介するとともに、国内外の研究開発の最新状況について触れ、そこから見えてくる衛星通信システムの今後の展望について述べる。なお、各研究開発の詳細については各々の文献に譲るものとし、本論文は衛星通信システムの実験・開発の現状を広く俯瞰することを目的として次のように構成される。まず2.では、近年様々な衛星通信システムにおいて議論されている周波数共用技術について述べる。次に3.では、衛星搭載中継器並びに多元接続制御といった衛星通信システムの根幹技術についてまとめる。そして、4.では近年実施または計画されている衛星通信システム実験について紹介し、続く5.では、近年注目を集める環境観測ビジネスについて触れる。最後に、6.にて今後の展望を述べる。

2. 周波数共用技術

周波数資源の有効利用は、衛星通信のみならず無線通信システム全般の重要課題である。地上系無線通信システムの拡大と多様化により、通信に利用可能な周波数帯域の割当は逼迫しており、限られた周波数帯域の高効率利用が至上命題となっている。本章では、衛星通信システムにおける周波数共用技術についてまとめる。

[†] 東北大学大学院情報科学研究科, 仙台市

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, 6-3-09 Aramaki aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, 980-8579 Japan

^{††} NTT ソフトウェア株式会社, 東京都

Sales Promotion Headquarters, NTT Software Corporation, Taiyo Seimei Shinagawa Bldg.27F, 2-16-2 Konan, Minato-ku, Tokyo, 108-8202 Japan

2.1 地上系通信システムとの周波数共用

技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) や米国の MSV (Mobile Satellite Ventures) 衛星に代表されるように、大型の展開型マルチビームアンテナを衛星に搭載して送受信性能を高めることにより、地上端末を一般的な携帯電話程度まで小型化することが可能になっている。これに伴い、携帯電話網と衛星通信システムの両方に接続可能な携帯電話サイズの端末の実現に向け、地上と衛星のシステム間で周波数を共用する方法が検討されている。例として、ATC (Ancillary Terrestrial Components) を利用した衛星・地上複合システムや、STICS (Satellite/Terrestrial Integrated mobile Communication System) と呼ばれる地上/衛星統合移動通信システムなどが挙げられる。STICS では、共有する周波数帯として 1980-2010 MHz と 2170-2200 MHz を想定しており、現在これらは移動体衛星業務 (MSS: Mobile Satellite Services) と第 3 世代移動通信システム (IMT-2000: International Mobile Telecommunication 2010) に割り当てられている。周波数の共用方式については文献 [1], [2] などにて様々な提案されているが、地上システムからの衛星に対する干渉の抑圧が最大の課題として指摘されている。実際、航空機による携帯電話基地局からの干渉波測定実験が行われており [3]、基地局上空付近においては干渉波の強度が周辺と比較して 10 dBm 程度高くなることが指摘されている。

一方、総務省が公表した「周波数再編方針」によると、第 4 世代移動通信システム等の移動通信システム用の周波数に関して、国際標準化動向を踏まえて 3 GHz から 4 GHz 帯の割当てが検討されている。そのため、現在固定衛星通信業務 (衛星から地球局) に使用されている C バンド (4 GHz 帯) における周波数共用が課題となっている。これに対し、アダプティブアンテナ技術による干渉抑圧によって周波数共用を可能にする技術が開発されており、文献 [4] ではフィールド試験により開発した装置の有効性が確認されている。なお、システム設計段階において適切なサブアンテナ数などを考慮する必要性など、実用化に向けた課題も言及されている。

海上でのブロードバンド通信手段として船上地球局が有力視されているが、船上地球局が送信に使用する 6 GHz 帯または 14 GHz 帯は陸上固定地球局でも使用されているため、干渉保護が必要になる。世界無線通信会議 (WRC-03) の決議 902 によると、6 GHz 帯で

は 300 km, 14 GHz 帯では 125 km 以上沿岸から離れて運用する必要がある等の制限が課されている。これらの制限基準は狭帯域通信方式を前提としたものであるが、拡散通信方式を用いることにより干渉を低減させる方法が提案されており [5]、前述の距離以内においても陸上固定地球局を保護しつつ通信可能であることが干渉評価により示されている。

2.2 衛星通信システムにおける周波数共用

他の無線通信システム同様、衛星ネットワークにおいても一般的な周波数共用技術として偏波共用が用いられている。例えば、航空管制機能と気象観測機能を併せ持った運輸多目的衛星新 2 号 (MTSAT-2: Multi-functional Transport Satellite 2) には直交偏波共用マルチビームアンテナとして Ku 帯及び Ka 帯をそれぞれ利用する二つのデュアルグリッドアンテナが搭載されている。また、文献 [6] では、周波数が離れた送受信帯 (20 GHz/30 GHz) を一つのアンテナで共用可能な実用化レベルのデュアルグリッドアンテナの性能評価について報告されており、所望の性能が得られることが確認されている。

直交偏波を用いる方式は他にもあり、例えば偏波周波数可変多重通信 (VPFDM: Variable Polarization Frequency Division Multiplexing) 方式が提案されている。一般に、Ku 帯を用いた移動体衛星システムの地球局には、移動に伴って生じる衛星指向方向及び衛星偏波面角度の変化を追尾するために高精度な機械駆動式の衛星追尾アンテナが必要になる。これに対し、VPFDM は薄型アンテナの実現を目指して偏波無追尾アンテナの採用を前提としており、発生する偏波間干渉をデジタル信号処理で除去する点に特徴を有する。更に、VPFDM は複数キャリアを用いてスペクトルを分割し、未使用帯域に分散配置することができる。このため、連続未使用帯域の確保が不要であり、通信回線を要求に応じて割り当てる DAMA (Demand Assigned Multiple Access) ベースの回線割当にも適しているため、周波数利用効率の飛躍的な向上が期待できる。なお、VPFDM 伝送装置の実験報告 [7] によると、所望の信号伝送特性が得られることが確認されている。

一方、偏波共用とは全く異なる方法としてキャリア重畳方式 [8], [9] がある。多数の超小型地球局 (VSAT: Very Small Aperture Terminal) とセンター局が一对多型のネットワークを構成する衛星通信システムでは、一般にインパウンド (VSAT からの狭帯域信号)

とアウトバンド(センター局からの広帯域信号)ではそれぞれ異なる周波数帯域を使用するが, キャリヤ重畳方式ではこれらを同一の周波数帯に重畳して通信を行う。これにより周波数の利用効率は向上するが, 当然, 各々にとって自局の信号が干渉波となるため, 所望する信号を得るためには干渉波(自局信号)を除去する必要がある。干渉波の除去は, 自局信号と同期したレプリカを再生することでキャンセルすることができ, いくつかの方法が提案されているが[8], いずれにしてもレプリカを利用したキャンセルの精度が通信性能を大きく左右することが分かっている。

3. 衛星搭載中継器と多元接続制御技術

地上系通信ネットワークの急激な高速化に追従すべく, 衛星通信システムの高速化に向けた衛星搭載中継器の性能向上が求められている。また, 衛星そのものの寿命が延びる一方で地上系通信システムはその姿を次々と変容させているが, この乖離を埋めるべく再構成可能な中継器の開発が進められている。他方, 環境センシングのように多数の地球局を収容する場合や, 将来的に様々な種別の地球局を収容する場合を想定し, 高効率な周波数チャンネル割当方式を採用した多元接続制御方式の検討も進んでいる。本章では, これら衛星搭載中継器と多元接続制御に関する技術開発についてまとめる。

3.1 衛星搭載中継器

超高速インターネット衛星(WINDS: Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite)には, 非再生中継モードで高速通信を提供するSS-TDMA(Satellite Switched Time Division Multiple Access)システムが搭載されている。軌道上传送実験では, 622 Mbit/s 波を2本束ねることにより世界最高速度の1244 Mbit/sでのデータ通信に成功している[10]。

携帯端末からの高速通信の実現を目的の一つに掲げるETS-VIIIには, 大容量音声通信交換のためのオンボードプロセッサと, 高速データ伝送のためのパケット交換機が搭載されており, それぞれについて軌道上評価実験の結果が報告されている。オンボードプロセッサについては, 使用可能な全チャンネルで加入者登録や位置登録, 回線交換制御などが正常に機能することが確認されている[11]。一方, パケット交換機については, FTP(File Transfer Protocol)を用いたデータファイル転送試験により, データ誤りが発生しない

環境下において, 理論的最大転送レートとほぼ同程度の通信速度を達成できることが確認されている[12]。ただし, 信号伝送の信頼性を高めつつ回路構成を簡単にすることを優先して設計されている都合上, パケット交換機の処理時間の平均値が衛星と地上局間の電波伝搬遅延時間に対して十分に小さいとはいえず, 処理時間の短縮が今後の課題であると指摘されている。

中継器の高速化が進む一方, 中継器の機能的な柔軟性の実現に向けた開発も進められている。地上系通信システムが日々目覚ましい発展を続ける中, 衛星通信システムもそれに合わせて進化することが求められるが, 衛星搭載システムは打ち上げ後寿命を全うするまでの十数年間, 機能を変更することはほぼ不可能である。この課題に対し, 軌道上にて柔軟にその機能・性能を変更可能な中継器の開発が進められている。中継器において柔軟性が求められる点として, カバレッジエリア, 周波数分波・合波, ビーム間接続(チャネライザ), 電力配分などが挙げられる。文献[13]では, チャネライザ機能等を有した欧米のフレキシブル中継器のほか, 日本において開発された再構成通信機について紹介されている。

3.2 多元接続制御技術

近年ネットワークを利用した環境センシングが注目を浴びる中, 気象・地震・潮位など様々な環境情報の観測を想定し, 数万の観測局(地球局)を対象として数十バイトから数メガバイトといった幅広いサイズのデータを収集する多地点データ集信型衛星通信システムが開発されている。このシステムは, 観測局の送信周波数を稠密配置するための高精度周波数同期技術[14], 任意かつ動的に周波数配置された複数信号を一括処理するための動的一括復調技術[15], 膨大な数の観測局の送信信号を時間的・周波数的に最適配置するための超多元接続制御技術の三つの主要技術からなる。そして, 超多元接続制御においては周波数の高効率利用が大きな課題であるため, 時間的・周波数的に無駄の少ないチャンネル割当を実現するための方式が提案されている[16]。なお, 実証実験報告[17]によると, 上位層にIP(Internet Protocol)とUDP(User Datagram Protocol)を用いたパケット転送において, パケットの欠落や転送遅延の著しい増加といった問題を発生させることなく, 割当容量に近いスループットを達成できることが確認されている。

2.2において偏波無追尾アンテナの採用を前提として直交偏波を用いるVPFDMを紹介したが, この

VPFDM 伝送方式に DAMA ベースの回線制御機構を組み合わせると多元接続に対応した VPFDM 衛星通信システムが提案されている。このシステムの特徴は、VPFDM 伝送方式の既存衛星通信システムへの段階的な導入を想定し、直線偏波方式を採用する既存の偏波追尾局と直交偏波方式を採用する VPFDM 局の混在収容を考慮している点にある。VPFDM 局が V/H 両偏波を対として使用するのに対し、偏波追尾局は V 偏波または H 偏波の片方のみを使用するため、これら通信方式の違いを考慮した多元接続制御を行う必要がある。特に、周波数の高効率利用を実現するためには各偏波面を考慮した周波数割当方法を検討する必要がある。このシステムでは衛星リソース（衛星搭載中継器の全帯域と衛星の最大送信電力）を最大限活用することで収容地球局数を増大させる回線割当アルゴリズム [18] が採用されている。なお、衛星を使用した実証実験報告 [19] によると、各地球局に対して適切な回線割当が可能であり、TCP (Transmission Control Protocol) 及び UDP 通信においてスループットが劣化しないことが確認されている。

4. 衛星通信システム実験の現状

本章では、近年の国内外における衛星通信システム実験の動向について概観する。

4.1 時刻同期実験

米国の全地球測位システム (GPS: Global Positioning System) の近代化をはじめとし、ロシアの GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System)、欧州の Galileo、中国の北斗、そして日本の準天頂衛星システム (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) など、世界中で衛星測位システムの開発・構築が進められている。衛星測位システムに必要な技術としては、衛星の精密軌道決定技術、衛星の時刻管理技術、衛星と地上の時刻同期技術が挙げられる。国内においては、QZSS に先立ち、ETS-VIII に搭載された高精度時刻基準装置を用いた高精度時刻同期実験が行われており、おおむね良好な結果が得られていることが報告されている [20]。

中国においては、運用が終了した静止衛星を傾斜地球同期軌道 (IGSO: Inclined Geosynchronous Satellite Orbit) へと軌道修正し、準天頂衛星として測位システムに利用することを想定し、実際に APSTAR-1 を用いた実験が行われている [21], [22]。静止衛星 SINOSAT-1 と準天頂衛星 APSTAR-1 のそれぞれを用いた衛星

双方向時刻比較実験では、準天頂衛星 APSTAR-1 の場合は衛星の移動が主要因となって 1 日当り数十ナノ秒程度の誤差が生じることが報告されている。

4.2 パケット転送プロトコルの性能評価実験

遅延が大きい衛星回線を利用した通信において、TCP では十分なスループットが得られないことは以前から指摘されており、実際、後で紹介する遠隔授業実験 [23] などでも問題点として報告されている。米国にて静止衛星を用いて行われた TCP 通信の実験では、平均往復遅延 (RTT: Round Trip Time) が 690 ミリ秒程度の環境において六つの異なる改良型 TCP の性能が比較されており、TCP Hybla [24] が最も短い時間で衛星回線速度 (1 Mbit/s) の 90% までスループットを増加できることが確認されている [25]。国内においては、シミュレーションベースではあるものの、高速衛星ネットワークにおける高スループット達成を目的とした TCP の改良型 [26] や、TCP とは異なる新しいトランスポートプロトコル [27], [28] などの開発が進められている。

4.3 音声・映像伝送実験

文献 [29] では、ETS-VIII を用いた小型携帯端末による音声通信実験の結果が報告されている。実験では、誤り訂正なしで通信を行った場合の BER (Bit Error Rate) 特性などが評価されており、BER の劣化は理論値からおおむね 1 dB 程度と小さく、端末の小型化による劣化も小さいことなどが確認されている。

音声に加えて映像も含むマルチメディア伝送実験として、WINDS を用いた遠隔授業実験が行われている [23]。実験では、筑波大学、タイのアジア工科大学、マレーシアのマルチメディア大学の 3 地点を結んだメッシュ型ネットワークが構築され、遠隔講義アプリケーションを使用して各地点から授業配信が行われた。WINDS 搭載交換機の活用により、地上で通信の折り返しを行う従来のスター型ネットワークの場合と比較し、各地点間のネットワーク遅延を 1 秒程度短縮し、0.8 秒から 1 秒程度に抑えることに成功している。一方、遠隔講義アプリケーションを使用する上で TCP 通信のスループット不足が大きな問題として浮上したことから、アクセラレータ等の導入により TCP 通信の高速化を行うことが必要であると指摘している。

前述の遠隔授業実験では標準解像度 (SD: Standard Definition) でビデオ撮影された映像が伝送されたが、同じ WINDS を利用したスーパーハイビジョン (SHV: Super Hi-Vision) 伝送実験も実施されて

いる [30] . SHV の圧縮には H.264 方式を使用し、映像・音響合わせて 100 Mbit/s まで圧縮した 3 番組 (うち 1 番組は生放送) を同時に衛星経由で多チャンネル伝送できることが確認されている . なお、Ka 帯を使用する WINDS (アップリンク 28 GHz 帯、ダウンリンク 18 GHz 帯) を用いた実験の成功は、将来の Ka 帯 (21 GHz 帯) 広帯域衛星を利用した本格的な SHV 放送の実現に寄与するものである .

SHV の衛星伝送実験は、WINDS に限らず国内外において実施されている . 2008 年 9 月にはイタリア・トリノとオランダ・アムステルダム間で世界初となる SHV の国際衛星伝送実験が行われている [31] . 一方国内では、放送衛星 BSAT-3a (Ku 帯) を用いた伝送実験により、H.264 方式により 118 Mbit/s に圧縮された SHV 映像と AAC (Advanced Audio Coding) 方式で 1920 kbit/s に圧縮された 22.2 ch 音声の伝送に成功している [32] . また、この実験に先立ち、2011 年の開始が見込まれる高度衛星デジタル放送を想定したハイビジョン (HDTV: High Definition TeleVision) 映像伝送実験も行われており、直径 45 cm のアンテナでも安定した受信が可能であることが報告されている .

4.4 高速移動体通信実験

高速移動する地球局の例として自動車、航空機、船舶等があるが、災害発生時などの情報収集手段として機動性に優れたヘリコプターを想定したヘリコプター衛星通信 (ヘリサット) システムが開発されている . システムは情報を収集するヘリコプター局と、中継する衛星局、受信する地上局からなる . 静止衛星 SUPERBIRD を利用して実施された伝送実験では、橋桁被害や車両状況を確認できる程度の高画質 (1.5 Mbit/s) 動画伝送に成功している [33] .

4.5 他の通信システムとの接続実験

衛星通信システムを単体で使用するだけでなく、他のネットワークや通信システムと接続することによって有効活用することは大変重要であるが、そのような異種通信システムの統合利用においては、様々な種類の問題が発生することは容易に想像される . 衛星通信システムそのものの問題や、相互接続する他のネットワークに潜む問題、更には異種通信システム間の互換性など、複数の要因が複雑に作用して通信全体の性能を左右する .

臨時通信システム「スカイメッシュ」と衛星通信システムの連携 [34] など、災害地や僻地といったインフラが十分に存在しない環境を想定し、衛星地球局にア

ドホックネットワークや無線メッシュネットワークを接続することによって衛星回線に接続可能なエリアを拡大する方法が多数検討されている [35] ~ [38] . アドホック通信システムを接続する実験では、経路構築の役割を担うルーティングプロトコルの影響によってスループットが低下することが確認されている [35] . また、無線メッシュネットワークを接続する実験においては、無線メッシュネットワークを経由する場合のスループットが、経由しない場合のスループット (衛星ネットワーク部分のスループット) の 70% 程度まで低下してしまうことが確認されている [36] .

近年注目を集めるセンサネットワークとの接続実験例として、生体情報を収集する BAN (Body Area Networks) システムを用いた実験がある . BAN システムによって収集される生体活動情報は 3 軸加速度情報 (66 kbit/s) であるが、これを WINDS の高速回線 (155 Mbit/s) を使用してタイ・バンコクと日本間で伝送する実験 [39] や、SUPERBIRD 経由で速度が異なる回線 (605 kbit/s, 519 kbit/s, 43 kbit/s) を用いて伝送する実験 [40] が実施されている . 実験報告によると、ATM (Asynchronous Transfer Mode) 交換機での接続処理を行う衛星を用いる場合、ペントパイプ型の衛星を用いる場合と比較して、遅延の時間変動幅が 1 桁程度大きくなる (0.1 秒程度から 1 秒程度に増加する) ことが確認されている .

3.2 で紹介した多地点データ集信型衛星通信システムを船陸間無線通信システム (IEEE802.11j 利用) と接続し、船舶に搭載された気象観測システムで取得された情報を収集する実証実験が行われている [41] . 実験では、気象データ (温度、湿度、気圧、風向、風速)、GPS データ (位置、船向、船速)、Web カメラ画像の三つの観測データが、二つの観測局それぞれから同時に衛星 (ETS-VIII) を介してデータ集信局に集約される . 観測周期が 10 秒の気象データと GPS データ、及び観測周期が 20 秒の Web カメラ画像のすべてについて、リアルタイム伝送とアプリケーションによる可視化表示に成功したことが報告されている .

4.6 ミリ波・光通信実験

現在世界で商用運用されている衛星は C 帯または Ku 帯を利用するものが大部分を占め、それより高い周波数帯を利用するものでも Ka 帯 (27-40 GHz) を使用する程度である . これに対し、更に波長が短い V 帯 (40-75 GHz) や W 帯 (75-110 GHz) などのミリ波や、レーザー光を用いた衛星通信実験が各国で実施・

計画されている。

欧州で進行中の ARTES (Advanced Research in Telecommunications Systems) プログラムでは次世代通信衛星 (Alphasat) の開発が進められており、V 帯通信における ACM (Adaptive Coding Modulation) の干渉抑圧効果の検証実験などが計画されている [42]。イタリアでは、WAVE (W-band Analysis and Verification) プロジェクトのもと、小型の低軌道衛星を使用して W 帯通信を行う IKNOW (In-orbit Key-test and validation Of W-band) と呼ばれる実験計画が進行しており、電波減衰特性などの事前検証結果が報告されている [43]。一方フランスでは、軍事衛星システム (SYRACUSE3) を用いた V 帯通信実験が既に行われており、44 GHz 帯を利用した通信 (地球局から衛星局) における電波減衰測定結果などが報告されている [44]。

一方、光衛星通信においては、2009 年 9 月に運用が停止された日本の光衛星間通信実験衛星 (OICETS: Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite) を用いた実験により数々の成果が挙げられている。2005 年には低軌道衛星である OICETS と欧州宇宙機関 (ESA: European Space Agency) の静止衛星 ARTEMIS との通信実験により、低軌道衛星と静止衛星を結ぶ双方向光衛星間通信に世界で初めて成功した。更に、2006 年には世界初となる低軌道衛星と地上局間の双方向光通信に成功している。OICETS の運用停止後は、衛星搭載用の光増幅器や、サイトダイバーシチを念頭に置いた光可搬局の開発などが進められている [45]。なお、国外においては、2008 年に米国の低軌道衛星 (NFIRE: Near Field InfraRed Experiment) とドイツの低軌道衛星 (TerraSAR-X) の間で世界初の低軌道衛星間光通信が行われ、5.6 Gbit/s の高速データ伝送に成功している。

4.7 衛星間通信実験

中低軌道を周回する衛星の場合、特定の地球局と直接通信できる時間は 1 回につき数分から十数分と非常に短い。そこで注目されているのがデータ中継衛星を静止軌道上に配置し、中低軌道衛星と衛星間通信を行うことで通信可能時間を長くする方法である。欧米では、複数のデータ中継衛星が、中低軌道衛星はもちろん国際宇宙ステーションやスペースシャトルなどから送られるデータの中継に使用されている。日本では、データ中継技術衛星 (DRTS: Data Relay Test Satellite) を利用した実験が実施されている [46]。陸域観測技術

衛星 (ALOS: Advanced Land Observing Satellite) との衛星間通信実験では、世界最高速度の 278 Mbit/s を達成しているほか、取得画像数の 99% 以上が DRTS 経由で取得されているなど、データ中継衛星による大容量伝送の有効性が確認されている。また、DRTS は欧州宇宙機関 (ESA) の地球観測衛星 (ENVISAT: ENVironmental SATellite) との衛星間通信にも成功しており、衛星間通信の相互運用性が実証されている。なお、日本の観測衛星が国外のデータ中継衛星を使用する例としては、米国航空宇宙局 (NASA: National Aeronautics and Space Administration) のデータ中継衛星システム (TDRSS: Tracking and Data Relay Satellite System) と ALOS の衛星間通信があり、2010 年に運用が開始されている。

静止衛星と低中軌道衛星間の通信実験・実証が次々と成功する中、実現には至っていないものの、軌道が異なる衛星群の接続を念頭に置いた新しい衛星通信システムが検討され始めている。低軌道衛星群の静止衛星との統合 [47]、あるいは中軌道衛星群との統合 [48], [49] などが提案されているが、いずれにおいても、通信品質 (特に通信遅延) とトラフィック分散のトレードオフを考慮した経路制御が課題として指摘されている。

5. 衛星を利用した環境観測ビジネス

本章では、近年注目を集める環境観測という新たな衛星利用の拡大について触れる。環境観測のための衛星利用と一言に言っても、3.2 で紹介した多地点データ集信型衛星通信システムのように地球上で観測された情報を収集するために衛星を利用するものと、衛星に搭載されたレーダ等を用いて軌道上から観測された情報を地球局に伝送するものとの二つに大別され、ここでは後者について述べる。

日本の主な環境観測衛星としては、温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT: Greenhouse gases Observing SATellite) や陸域観測技術衛星 (ALOS) などが運用中であり、ALOS については地殻変動観測 [50] や熱帯雨林森林状況監視 [51] の結果が報告されている。加えて、近年は小型衛星による環境観測も盛んに行われており、国内ではスプライト観測衛星 (SPRITE-SAT)、海外ではイギリスの小型災害監視衛星 (UK-DMC: United Kingdom-Disaster Monitoring Constellation) などが例として挙げられる。

環境観測衛星の多くは太陽同期極軌道若しくは太陽

同期準回帰軌道をもち、ある任意の地点の上空を通過する時期は衛星軌道によって決まるが、それゆえに、衛星を用いた環境観測には二つの問題が存在する。一つ目の問題は、周期より短い時間スケールの変動把握の観測に対応できないことである。定常的な観測の実現のためには、複数の衛星を連携運用する必要があることが指摘されている [50], [52]。もう一つの問題は、特に準回帰軌道など回帰日数が数日を超える場合、観測データの速やかな取得を実現するためには、地球上に複数の地球局を分散整備し、地上ネットワークを経由してデータを収集しなければならない点である。この代替案として、静止軌道上のデータ中継衛星を利用した衛星間通信に期待が集まっていることは既に述べたとおりである。

一つ目の問題に対する解決策として複数の衛星を連携運用する方法を挙げたが、実際に衛星群として既に運用が開始されたものも存在する。ドイツの RapidEye 社が運用開始した RapidEye シリーズでは、自ら打ち上げた 5 m 解像度光学センサ搭載の小型衛星群 (5 機体制) による高頻度な地表観測を行っており、観測された情報はユーザへと提供されている。このような商用目的の衛星打ち上げが加速する背景には、衛星による環境観測を利用したビジネスの急速な拡大がある。米国 Google 社による Google Earth など一般ユーザ向けのサービスに加え、近年では高度かつ先進的な活用目的による高分解能合成開口レーダの高解像度観測データに対する需要も高まるなど、市場が拡大している。

6. 展 望

近年の地上系通信システムの高速化と多様化により、衛星通信システムの主な役割が災害地、僻地、洋上などの地上系通信システムがカバーできない地域、あるいは地上インフラが未整備の地域への通信サービス提供といった限られたものへと変化していることは冒頭に述べたとおりである。広域性、同報性、対災害性の面で優位に立つ衛星通信システムは、地球規模でのデジタルデバイドの解消や迅速な災害復旧活動の実現などにおいて重要な役割を果たすことが期待されており、将来の衛星通信システムにおいても重要な使命の一つであることに変わりないことは間違いない。そして、この期待にこたえ続けていくためには、衛星通信の更なる高速化が課題の一つとなる。

4.5 で一部紹介したとおり、衛星通信システムの利

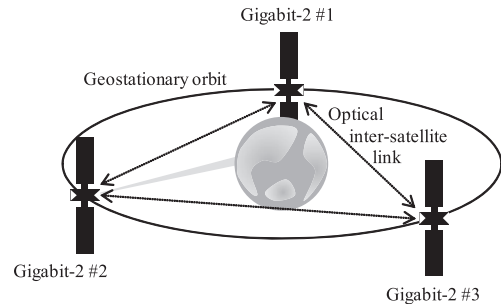


図 1 Gigabit-2 衛星
Fig. 1 Gigabit-2 satellites.

用形態として、各地球局をゲートウェイとして他の通信システムを接続し、その中で複数ユーザが回線を共有する形を想定したものが増加している。このように衛星通信システムがある種の基幹ネットワークとしての役割を担うことを考慮すると、有線ネットワークの回線速度には匹敵しないまでも、衛星回線の更なる高速化の必要性が叫ばれるのは当然といえば当然である。実際、WINDS に続く次期通信衛星プロジェクト候補として図 1 に示すような超高速通信衛星「Gigabit-2 衛星」なるものが提案されるなど [53]、国内外にて高速衛星通信システムの実現に向けた検討が進められている [54], [55]。このような数十 Gbit/s を超えるような超高速衛星通信システムの登場は、衛星通信システムの新たな利用創出につながる可能性もある。例えば、各種サーバシステムを通信衛星に搭載してしまうことで、衛星通信において問題となる通信遅延の短縮に加え、サーバの冷却問題までも解決してしまおうといった斬新な発想も可能になる。

地上系通信ネットワークが急速な進歩を続ける以上、たとえ衛星通信システムの高速化に力を入れたとしても、純粋な回線速度において地上系通信システムを超えることは不可能に近い。そのため、衛星通信システムの高速化が生み出す効果は限定的との見方が大半である。しかし、ここに来て状況は少しずつ変化してきている。FTTH (Fiber To The Home) をはじめとして 100 Mbit/s 程度的高速回線が一般家庭にも普及しつつある今、ユーザの多くは現状に満足し始めており、必ずしもそれ以上の高速回線が求められなくなってきた。つまり、収容する全ユーザを満足させられる程度までの高速化さえ達成できれば、端末の小型化とも相まって、サービスモデルの工夫次第では日常的な通信手段として衛星通信が選択されることも十分

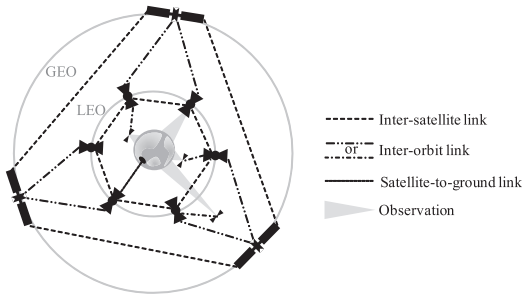


図2 衛星間インターネット
Fig. 2 Intersatellite Internet.

に考えられる．衛星通信システムの高速度化は，衛星通信システムそのものの将来の姿を大きく変える可能性を秘めている．

衛星通信システムの高速度化に加え，前章で触れた衛星を利用した環境観測ビジネスの安定拡大と市場の成長もまた，衛星通信システムを大きく変貌させるだけの力を秘めている．次々と打ち上げられる環境観測衛星にデータ中継機能が搭載されるようになったらどうなるだろうか．個々の環境観測衛星がデータ中継衛星としての役割を担うことにより，地球の裏側からのリアルタイムデータ伝送，電波状況が良い地球局を選択した衛星地上局間通信などが可能になる．更に，周囲の他の観測衛星への中継機能（つまり地球局までの通信経路）の提供や，運用者が異なる衛星群の相互接続などが起こり得る．ビジネスモデルの工夫次第では，データ中継を専門として地球全域をカバーするネットワークが登場する可能性も十分ある．そうなれば，環境観測衛星のみならず，地上への超高速回線を有する衛星や宇宙観測衛星など，様々な衛星が高速な光リンクで結ばれ，図2のような衛星間インターネットの誕生すら夢ではなくなる．

7. むすび

本論文では，最近の衛星通信システム実験に関して紹介するとともに，そこから見えてくる今後の展望について述べた．地上系通信システムとの周波数共用や相互接続など，地上系通信システムとの融合を図りつつ，衛星通信システムの広域性や耐災害性といった独自の優位性を生かし，地上系通信システムの弱点を補完する役割を担うことが期待されており，そのためには衛星通信システムの更なる高速化が求められる．一方，近年注目を集める環境観測のための新しい衛星利

用の拡大により，衛星通信システムが大きな変貌を遂げる可能性についても論じた．これまで，衛星通信システムは文字どおり，単に地球上のある点からある点へとトラヒックを運ぶための閉じた「システム」であり，衛星間を接続することに大きな意義が見出されることはほとんどなかった．しかし，宇宙空間においてトラヒックを生み出す環境観測衛星の登場により，トラヒックを適切な場所に適切な方法で運ぶための「ネットワーク」の役割を担う存在が求められている．環境観測という新たな衛星利用の需要拡大と市場の成長を，いかに衛星通信ネットワークの将来発展に結び付けられるかが今後の重要な鍵となる．

文 献

- [1] 蓑輪 正，田中正人，浜本直和，藤野義之，西永 望，三浦 龍，鈴木健治，“安心・安全のための地上/衛星統合移動通信システム” 信学論 (B)，vol. J91-B，no. 12，pp. 1629-1640，Dec. 2008.
- [2] 梅比良正弘，大友洋平，“衛星/地上統合移動通信システムにおける周波数運用モードの比較” 2009 信学ソ大 (通信)，B-3-9，Sept. 2009.
- [3] 辻 宏之，藤野義之，浜本直和，鈴木龍太郎，“地上/衛星共用携帯電話システムにおける航空機による携帯電話基地局からの干渉波測定実験” 信学技報，A-P2009-70，July 2009.
- [4] 河合宣行，藤井 浩，野村 勇，大木秀実，木原弘喜，苅谷則幸，“衛星通信と他の通信の共用のためのアダプティブアンテナ技術による干渉抑圧装置のフィールド試験による評価” 信学技報，SAT2008-33，Nov. 2008.
- [5] 福家直樹，松嶋孝明，河合宣行，“船地球局 (ESV) への拡散通信適用時の陸上固定局における干渉評価” 信学技報，SAT2009-6，June 2009.
- [6] 大嶺裕幸，大和昌夫，片木孝至，“Ka 帯 2m 級送受信共用デュアルグリッドアンテナの特性評価” 信学技報，A-P2009-105，July 2008.
- [7] 山下史洋，阿部順一，鈴木義規，内山宏樹，中平勝也，小林聖，武田養造，“偏波無追尾 Ku 帯衛星 VPFDM 伝送実験” 信学技報，SAT2009-47，Dec. 2009.
- [8] 大里まゆみ，原 孝雄，岡田 実，“衛星通信キャリア重畳方式における遅延測定方式の安定化” 信学論 (B)，vol. J90-B，no. 12，pp. 1301-1313，Dec. 2007.
- [9] 久保健太，宮本龍介，原 孝雄，岡田 実，“衛星通信キャリア重畳方式において非線形増幅器による干渉キャンセラの特性劣化の補償” 2009 信学ソ大 (通信)，B-3-14，Sept. 2009.
- [10] 大川 貢，橋本幸雄，高橋 卓，“WINDS 非再生中継モードにおける 1244 Mbps 高速ネットワーク” 信学技報，SAT2008-59，Dec. 2008.
- [11] 山本伸一，川崎和義，平良真一，“技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) 搭載オンボードプロセッサ (OBP) の軌道上評価実験結果” 信学技報，SANE2009-27，June 2009.
- [12] 平良真一，山本伸一，米田誠良，“技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII：きく 8 号) 搭載用バケット交換機の軌道上

- 性能” 信学技報, SAT2008-68, Feb. 2009.
- [13] 米田誠良, 熊谷健夫, 小石洋一, 鈴木龍太郎, “衛星搭載フレキシブル中継器の一検討” 信学技報, SAT2009-58, Feb. 2010.
- [14] 今泉 豊, 小林 聖, 鈴木義規, “多地点集信型衛星通信システムにおける高精度・動的配置 FDMA 方式の評価” 2009 信学総大, B-3-14, March 2009.
- [15] 小林 聖, 山下史洋, 阿部順一, “多地点集信衛星通信システム用変復調装置—任意かつ動的に周波数配置された FDMA 信号を処理可能な一括変復調装置” 信学技報, SAT2008-30, Nov. 2008.
- [16] K. Nakahira and K. Kobayashi, “A highly efficient and flexible channel allocation scheme for hyper multi-point data gathering satellite communication systems,” IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.11, pp.3309–3317, Nov. 2009.
- [17] 小林 聖, 中平勝也, 今泉 豊, 鈴木義規, 富永律人, “多地点データ集信型衛星通信システム実証実験” 信学技報, SAT2010-7, June 2010.
- [18] 中平勝也, 小林 聖, “VPFDM 衛星通信用高効率回線割当アルゴリズムの提案” 信学技報, SAT2009-12, July 2009.
- [19] 中平勝也, 内山宏樹, 山下史洋, 鈴木義規, 阿部順一, 小林聖, “VPFDM 衛星通信システムの総合動作検証” 信学技報, SAT2009-55, Feb. 2010.
- [20] 中村 涼, 井上高広, 中村信一, 片桐征治, “ETS-VIII 高精度時刻同期実験” 信学技報, SANE2008-15, June 2008.
- [21] H. Shi, G. Ai, Y. Han, L. Ma, J. Chen, and J. Geng, “Multi-life cycles utilization of retired satellites,” Science in China Series G: Physics Mechanics and Astronomy, vol.52, no.3, pp.323–327, March 2009.
- [22] Y. Xuhai, L. Zhigang, W. Fenglei, and L. Xiaohui, “Two-way satellite time and frequency transfer experiment via IGSO satellite,” Proc. IEEE Int. Frequency Control Symposium, pp.1206–1209, Geneva, Switzerland, May 2007.
- [23] 高橋 伸, 久永 忠, 亀山啓輔, 福井幸男, 北脇信彦, “衛星きずな (WINDS) を用いた遠隔授業実験” 信学技報, SAT2009-14, July 2009.
- [24] C. Caini and R. Firrincieli, “TCP Hybla: A TCP enhancement for heterogeneous networks,” Int. J. Satellite Commun. Netw., vol.22, no.5, pp.547–566, Sept. 2004.
- [25] C. Caini, R. Firrincieli, D. Lacamera, T. De Cola, M. Marchese, C. Marcondes, M.Y. Sanadidi, and M. Gerla, “TCP live experiments on a real GEO satellite testbed,” Proc. IEEE Symposium on Comp. and Commun., pp.523–529, Aveiro, Portugal, July 2007.
- [26] 小畑博靖, 平 和弘, 石田賢治, “衛星インターネット環境に適した TCP-STAR の実装及び評価” 信学論 (B), vol.J90-B, no.6, pp.566–576, June 2007.
- [27] Y. Ikeda, H. Nishiyama, N. Ansari, Y. Nemoto, and N. Kato, “Extensions of VCP to enhance the performance in high BDP and wireless networks,” Proc. IEEE Wireless Commun. and Netw. Conference, Sydney, Australia, April 2010.
- [28] T. Taleb, N. Kato, and Y. Nemoto, “REFWA: An efficient and fair congestion control scheme for LEO satellite networks,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.14, no.5, pp.1031–1044, Oct. 2006.
- [29] 山本伸一, 小園晋一, 浜本直和, “技術試験衛星 VIII 型を用いた小型携帯端末による音声通信実験” 信学論 (B), vol.J91-B, no.12, pp.1620–1628, Dec. 2008.
- [30] 筋誠 久, 鈴木陽一, 小島政明, 橋本明記, 田中祥次, 正源和義, “衛星「きずな (WINDS)」を利用したスーパーハイビジョン伝送実験” 信学技報, SAT2009-3, June 2009.
- [31] 井口和久, 中島奈緒, 境田慎一, 合志清一, 筋誠 久, 鈴木陽一, 伊藤 隆, 中川 章, 数井君彦, “スーパーハイビジョンコーデックの開発と衛星伝送実験” 信学論 (B), vol.J92-B, no.7, pp.991–1002, July 2009.
- [32] 橋本明記, 井上康夫, 松本英之, 方田 勲, 上田和也, 市川鋼一, 佐藤 彰, 柴田 豊, 石原友和, 太田陽介, 野崎秀人, 北之園展, 斎藤知弘, 筋誠 久, 小島政明, 鈴木陽一, 田中祥次, “高度衛星デジタル放送の ARIB 実証実験” 信学技報, SAT2008-53, Dec. 2008.
- [33] 藤野義之, 佐藤正樹, 永井清二, 平良真一, 尾崎 裕, 渡邊栄司, 澤 学, 田中行男, 楠田哲也, “災害・防災情報伝送のためのヘリコプター衛星通信技術の開発” 信学論 (B), vol.J91-B, no.12, pp.1611–1619, Dec. 2008.
- [34] 川上雄気, 岡田 啓, 間瀬憲一, “臨時通信システム「スカイメッシュ」と超高速インターネット衛星「きずな」の接続実験” 2009 信学総大, B-21-10, March 2009.
- [35] K. Inai, H. Hoshino, K. Kumamoto, and K. Yasukawa, “Experimental evaluation of network performance formed by ETS-VIII satellite and wireless ad-hoc,” 信学技報, SAT2008-25, Nov. 2008.
- [36] 鈴木龍太郎, 高橋 卓, 近藤良久, 滝澤 修, 吉村直子, 山口真司, 秋岡真樹, 大川 貢, 浅井敏男, 赤石 明, 寺田岳大, “超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) によるサブパブリシティ・アプリケーション実験” 信学技報, SAT2010-10, June 2010.
- [37] 林 成樹, 川上用一, 山中仁昭, 小出 亨, “デジタル・ディバイド対策用衛星インターネット通信の実験検討” 2008 信学ソ大 (通信), B-3-10, Sept. 2008.
- [38] 南川敦宣, 森川大輔, 横山浩之, 西山 智, “端末の物理移動と衛星回線を利用した非常時メッセージ交換” 2007 信学ソ大 (通信), BS-12-2, Sept. 2007.
- [39] 大川 貢, 川崎和義, 赤石 明, 高橋 卓, 豊田雅宏, 浜口清, 李 還帮, 河野隆二, 吉田泰輔, 中川 亮, 石川翔太, 泰野拓哉, 高橋富士信, “WINDS 衛星を用いた多地点間医療情報伝送実験” 2009 信学ソ大 (通信), B-3-2, Sept. 2009.
- [40] 李 還帮, 高橋 卓, 豊田雅宏, 森 康之, 河野隆二, “Ka バンド衛星回線を用いた BAN データ伝送実験” 2009 信学総大, B-3-22, March 2009.
- [41] 田口陽一, 新夕将史, 富永律人, 小林 聖, “多地点データ集信型衛星通信システムを用いたセンサネットワークアプリケーションの実証実験” 信学技報, SAT2010-8, June 2010.

- [42] T. Rossi, E. Cianca, M. Lucente, M. De Sanctis, C. Stallo, M. Ruggieri, A. Paraboni, A. Vernucci, L. Zuliani, L. Bruca, and G. Codispoti, "Experimental Italian Q/V band satellite network," Proc. IEEE Aerospace Conference, pp.1-9, Big Sky, MT, USA, March 2009.
- [43] M. Lucente, T. Rossi, A. Jebril, and M. Ruggieri, "Experimental missions in W-band: A small LEO satellite approach," IEEE Systems J., vol.2, no.1, pp.90-102, March 2008.
- [44] T. Marsault, L. De Montera, J.D. Hermant, J.C. Penn, L. Barthes, C. Mallet, and P. Gole, "EHF propagation experiment with SYRACUSE 3 satellite: First results," Proc. 2nd European Conference on Antennas and Propagation, pp.1-6, Edinburgh, UK, Nov. 2007.
- [45] 高山佳久, 豊島守生, "宇宙光通信の現状と技術開発," 信学技報, SAT2008-54, Dec. 2008.
- [46] 篠原幸一, "DRTS「こだま」の実験運用成果," 信学技報, SANE2008-13, June 2008.
- [47] 工藤大吾, 西山大樹, 加藤 寧, "階層型衛星ネットワークにおける負荷分散方式の性能評価," 2009 信学ソ大(通信), B-3-24, Sept. 2009.
- [48] 多田祐太, 西山大樹, 吉村直子, 加藤 寧, "階層型衛星ネットワークにおける効率的な経路制御に関する一考察," 信学技報, SAT2010-9, June 2010.
- [49] C. Chen and E. Ekici, "A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks," Wirel. Netw., vol.11, no.4, pp.507-521, July 2005.
- [50] 今給黎哲郎, 和田弘人, 天貝知美, 藤原みどり, 鈴木 啓, 飛田幹男, 矢来博司, 藤原 智, "だいち PALSAR による地震・火山性地殻変動観測とその意義," 信学技報, SANE2009-38, June 2009.
- [51] 島田政信, 磯口 治, ブリーサン, ラクワティン, ロンジェベニコラ, "ALOS PALSAR による熱帯雨林森林状況監視," 信学技報, SANE2009-39, June 2009.
- [52] 鈴木健治, 若森弘二, 加藤博憲, 小元規重, 岡本隆司, 鈴木龍太郎, "小型衛星を用いた準リアルタイム地球観測システムの検討 2," 2009 信学ソ大(通信), B-3-3, Sept. 2009.
- [53] 飯田尚志, 門脇直人, 鈴木龍太郎, 吉村直子, 高山佳久, "将来の衛星通信—時期プロジェクトを目指して," 信学技報, SAT2009-47, Dec. 2009.
- [54] M. Agnew, "Ka-band geosynchronous satellites: 100 Gbps and beyond," Proc. Ka and Broadband Communications, Earth Observation and Navigation Conference, Cagliari, Italy, Sept. 2009.
- [55] H. Fenech, E. Lance, A. Tomatis, and M. Kalama, "The KA-SAT system," Proc. Ka and Broadband Communications, Earth Observation and Navigation Conference, Cagliari, Italy, Sept. 2009.

(平成 22 年 6 月 30 日受付, 10 月 12 日再受付)



加藤 寧 (正員:シニア会員)

昭 63 東北大学大学院修士課程了. 平 3 同大学院博士課程了(工博). 同年同大大型計算機センター助手, 平 7 同大大学院情報科学研究科助手, 平 8 同助教授, 平 15 同教授, 現在に至る. ネットワークマネジメント, ネットワークプロトコル, ネットワークセキュリティ, アドホック&センサ&メッシュネットワーク, 衛星通信ネットワーク, パターン認識などの研究に従事. 本会衛星通信研究会専門委員会副委員長(2009~), Chair of IEEE Satellite and Space Communications TC(2010~), Secretary of IEEE Ad Hoc & Sensor Network TC(2010~), 和文論文誌 B 編集委員(2008~), IEEE Wireless Communications 編集委員(2006~), IEEE Trans. on Wireless Communications 編集委員(2008~), IEEE Trans. on Vehicular Technology 編集委員(2009~), IEEE GLOBECOM 2007 Internet Protocol Symposium Co-chair, IEEE ICC 2010-2011 Ad Hoc, Sensor & Mesh Networking Symposium Co-chair, IEEE WCNC 2010-2011, TPC Vice Chair (Network Track). IEEE GLOBECOM 2010 Best Paper Award, 2009 本会ネットワークシステム研究賞, 2008 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 2007 船井情報科学振興賞, 2005 IEEE 衛星通信貢献賞, 2003 石田實記念財団研究奨励賞などを受賞. 2007 より総務省情報通信審議会専門委員, ITU-R SG4 主査. 2009 より総務省電気通信事業紛争処理委員会特別委員. 北京郵電大学長期訪問高級科学家. IEEE Senior Member.



風間 宏志 (正員:シニア会員)

昭 57 東工大大学院・電気電子工学専攻博士前期課程了. 同年日本電信電話公社(現 NTT)横須賀電気通信研究所入所. 平 12 サービスインテグレーション基盤研究所衛星通信 SC プロジェクトプロジェクトマネージャ. 衛星通信用 TDMA 装置, 送信電力制御方式, ダイレクトマルチキャスト衛星通信方式の開発実用化, 及び次世代衛星通信システムの研究を中心にワイヤレス通信システムの研究実用化に従事. 現在, NTT ソフトウェア(株)営業推進本部部門長. 平 11 本会ソサイエティ功労感謝状, 平 15 第 14 回電波功績賞総務大臣表彰, 平 18 第 17 回電波功績賞電波産業会会長表彰各受賞. 平 22 本会衛星通信研究専門委員会委員長. IEEE, AIAA Senior 各会員.



西山 大樹 (正員)

平 17 東北大・工・情報卒. 平 19 同大大大学院博士前期課程了. 平 20 年 9 月同博士後期課程了. 同年 10 月同助教, 現在に至る. 博士(情報科学). 次世代 IP ネットワーク, 衛星ネットワーク, センサ・アドホックネットワーク等の研究に従事. 平 21 IEEE IC-NIDC 2009 Best Paper Award, 平 22 船井研究奨励賞, IEEE GLOBECOM 2010 Best Paper Award, 各受賞. IEEE 会員.