

災害時に有効な衛星通信ネットワークの研究開発 Satellite Communication Network Valid for Disaster Recovery

研究代表者

末松 憲治 東北大学 電気通信研究所
Noriharu SUEMATSU Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

研究分担者

小熊 博† 笹沼 満†† 江口 茂††† 黒田幸明††††
Hiroshi OGUMA† Mitsuru SASANUMA††
Shigeru EGUCHI††† Komei KURODA††††
†富山高等専門学校 ††スカパーJSAT 株式会社
†††株式会社アイ・エス・ビー ††††株式会社サイバー創研

研究期間 平成 24 年度～平成 25 年度

概要

大災害時において、地上系の通信手段は甚大な被害を受ける場合もあり、衛星回線との連動による広域ネットワークの確保が必要となる。先の東日本大震災において、衛星通信の重要性が再認識されたが、柔軟性や機動性の問題点もクローズアップされた。被災地においてニーズに応じた衛星回線の円滑な確保を図るため、複数の衛星システムに対応可能とするための技術、地球局の消費電力を低減させるための技術及び衛星回線の収容効率を向上させるための技術の研究開発を実施した。

1. まえがき

2011 年 3 月の東日本大震災においては、東北地方太平洋沿岸部を中心に大規模な地震・津波の被害を受けた。これらの地域では、携帯電話の基地局をはじめとする地上系の通信インフラが被災し、被災地から外側に向けての情報発信ができない状況になった。このような状況下では衛星通信が外部との唯一の通信手段になるということが再認識された。一方で東日本大震災においては、衛星通信ネットワークにおいても以下のような問題点が明らかになった：(1) 被災地の通信ニーズに応じた衛星通信システム用の小型地球局 (VSAT: Very Small Aperture Terminal) 機器の確保が困難である、(2) 大規模・長時間の停電により VSAT 機器が動作停止する、(3) 衛星回線においても地上系と同様に通信トラフィックが急増し、今後の大震災においては輻輳状態となることが予想される。

これらの諸問題の解決し、被災地においてニーズに応じた衛星回線の円滑な確保を図るために、我々は平成 24 年度～平成 25 年度の 2 年間にわたり、「災害時に有効な衛星通信ネットワークの研究開発」を実施した。

2. 研究開発内容及び成果

2.1 研究開発の概要

図 1 に本研究開発の全体像を示す。課題は、(課題ア) マルチモード地球局技術、(課題イ) 省電力可搬地球局技術、(課題ウ) 通信帯域最適化技術の 3 課題に大別されていて、それぞれまえがきで記した問題点(1)、(2)、(3) に対応している。課題アでは、例えば民間の衛星通信システム (スカパーJSAT(株) EsBird サービス) と自治体衛星通信機構 (LASCOM) の衛星通信システムなどの複数の異なるシステムにも、ハードウェアを変更せずソフトウェアの書き換えにより対応できるマルチモード地球局 (VSAT) を研究開発した。さらに、マルチモード VSAT を無線 LAN (Local Area Network) のアクセスポイントとして利用し、避難所などにおいて利用者が自身のスマートフォンやノートパソコンなどから、衛星回線を經由してインターネットにアクセスできる機能を実現した。また、搬入が難

しく、大容量電源の確保が難しい避難所などへの設置を容易にすべく、課題イでは、人手で可搬、かつハイブリッド車などの車載電源で動作可能な低消費電力地球局技術を研究開発した。さらに、今後の衛星通信機器の普及に伴い予想される災害時の輻輳対策として、課題ウでは、災害時に実際に使用している通信量にあわせて、通信帯域の割り当てを最適化制御する技術を研究開発した。

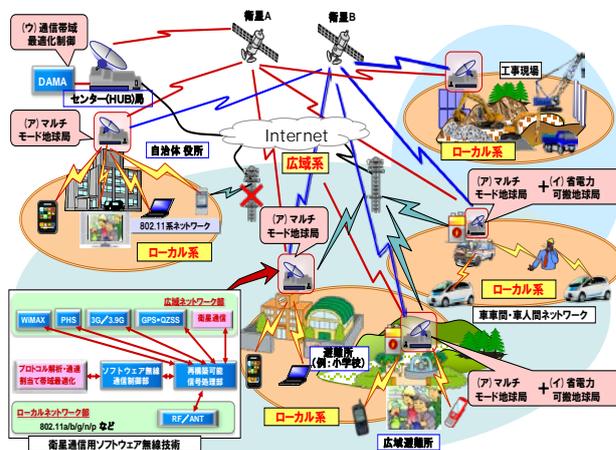


図 1 本研究開発の全体像

図 2 に災害発生時における情報通信ネットワーク確保のシナリオを示す。これまで述べた技術を適用した次世代 VSAT システムは、災害発生後に自治体などで組織的な対応が可能となる数時間後から、地上系通信インフラが本格的に復旧するまでの期間、活用されることを想定している。課題アで開発される地球局は、地上系の無線通信に開発されてきたソフトウェア無線技術やコグニティブ無線技術をベースに衛星通信にも対応できるように拡張されるものであるため、災害復旧フェーズあるいは平常時においては、衛星通信のかわりに携帯電話などの地上系通信システムに接続することにより、地上系通信システムへの

アクセスポイントとして活用可能である。

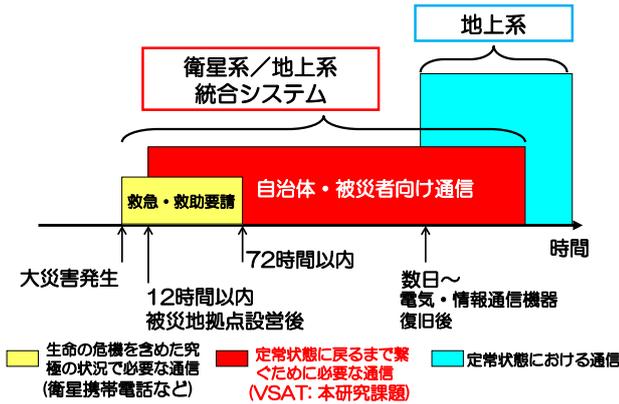


図 2 災害発生時における情報通信ネットワーク確保のシナリオ

表 1 に、課題ア、課題イ、課題ウについて簡単にまとめた。

表 1 課題ごとの技術的概要

課題 (技術)	技術の概要
課題ア マルチモード地球局技術	被災地のニーズに応じた通信回線の確保を行うため、平時では地上系、災害時には衛星系に切り替える技術や、複数の通信衛星を捕捉し接続を可能とする技術。
課題イ 省電力可搬地球局技術	災害時の限られた電源容量下でも安定した衛星通信を可能とするため、地球局の省電力化を実現する技術。
課題ウ 通信帯域最適化制御技術	災害発生時等における衛星回線の輻輳対策として、トラフィックの種別に応じた通信帯域の制御を可能とする技術。

以下に、課題ア、課題イ、課題ウについての詳細を説明する。

2.2 課題ア_マルチモード地球局技術

課題アのマルチモード地球局技術は、地上系コグニティブルータを発展させた衛星通信用ソフトウェア無線技術と複数衛星捕捉制御技術によるマルチモード技術を実現したものである。図 3 にその全体像を示す。

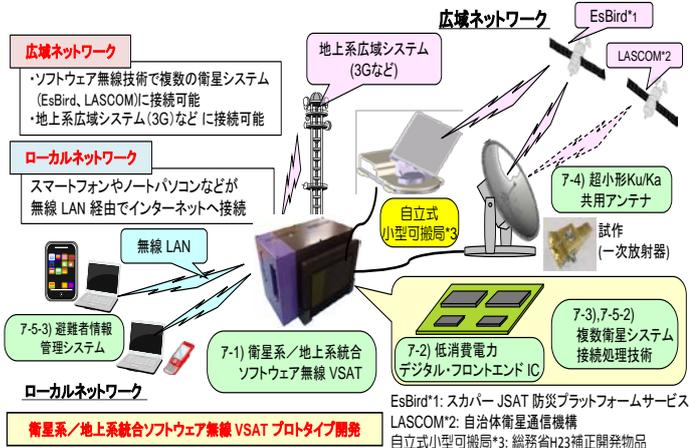


図 3 マルチモード地球局技術の全体像

図 3 に示したように、課題アでは大きく分けて 5 つの

研究開発課題について取り組んだ。

まず「課題ア-1 衛星通信ソフトウェア無線技術」では、例えばスカパーJSAT(株) EsBird と LASCOM の衛星通信システムなど、複数の異なるシステムにも、ハードウェアを変更せずソフトウェアの書き換えにより対応できるマルチモード地球局 (VSAT) を研究開発した。さらに、マルチモード VSAT を無線 LAN のアクセスポイントとして利用し、避難所などにおいて利用者が自身のスマートフォンやノートパソコンなどを用いて衛星回線経由でインターネットにアクセスできる機能を実現した。



図 4 マルチモード VSAT 屋内装置 (IDU) 写真

図 4 に開発したマルチモード VSAT 屋内装置 (IDU) の写真を示す。マルチモード VSAT IDU の前面にはタッチパネル式のディスプレイがあり、災害時にはこのディスプレイを用いて安否情報の入力や検索を行うことができる。開発したマルチモード VSAT IDU は EsBird 1:1 IP (Internet Protocol) 型データ伝送 (2Mbit/s) を衛星実通試験にて確認している。また、LASCOM の通信機能についても室内実験で 2Mbit/s の ping 通信を確認している。ソフトウェアの切り替えにより EsBird と LASCOM を切り替える機能と、地上回線 (Ethernet/LTE) と衛星回線 (EsBird) を自動的に切り替える機能を実装した。

図 5 に示すように、室内での環境において、異なる複数の衛星通信方式 (変復調方式、誤り訂正方式、回線制御方式、信号帯域幅等) に対応可能であることを検証するために、衛星通信ソフトウェア無線端末用の評価シミュレータ装置を開発し、評価試験を実施した。



図 5 室内での試験評価環境

「課題ア-2 デジタル・フロントエンド技術」では、図 6 に示す ■ 可変ビットレート対応フロントエンド技術及び ■ マルチモード衛星通信対応ソフトウェア無線 LSI 技術の 2 つの項目について研究開発を行った。

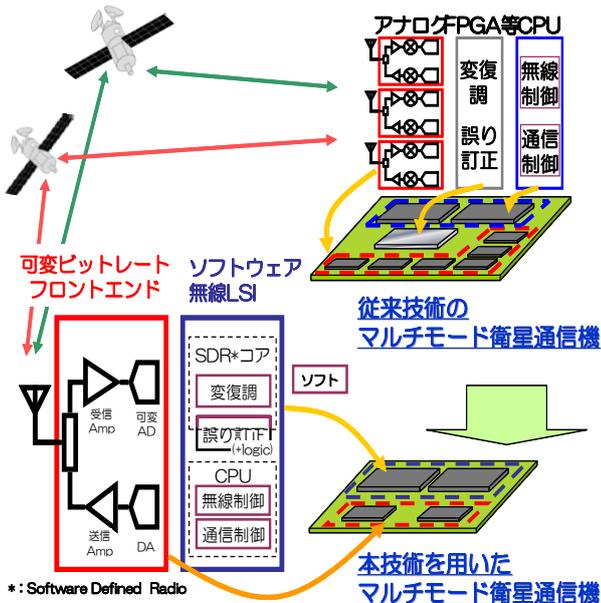


図 6 デジタル・フロントエンド技術

以下に上記 2 つの技術を説明する。

■ 可変ビットレート対応フロントエンド技術: 可変サンプリングレート方式に対応可能なダイレクト RF サンプリング方式を検討し、マルチモード衛星通信方式向けアナログフロントエンドの小型化を検討した。マルチモードでは複数必要であったアナログフロントエンドの共通化を図り、小型化、低消費電力化を実現した。

■ マルチモード衛星通信対応ソフトウェア無線 LSI 技術: 地上系ソフトウェア無線用に開発されてきた IP (Intellectual Property) コアを活用して、マルチモード衛星通信用 LSI および評価ボードを試作した。ソフトウェア無線 LSI コアを適用することにより、FPGA、汎用 CPU で構成されるマルチモード衛星通信機に対し小型化、低消費電力化を図った。また、本 IP コアを実装したソフトウェア無線 VSAT を開発した。

「課題ア-3 複数衛星システム接続処理技術」では、被災地において、ニーズに応じた衛星回線の円滑な確保を図るため、複数の衛星システムに対応可能な VSAT 局を実現するための技術の確立を行った。具体的な内容は以下の通りである。

- 目的の衛星やシステムを正しく選択することができる制御アルゴリズムの開発
- 衛星からの基準信号・識別信号を自動的に解析し、正確な衛星アクセスを行うための復号制御の開発
- 制御アルゴリズム、衛星システム認識技術を用いて複数の衛星またはシステムと自動的に通信を確立させるための自動処理技術の構築

これらの研究開発により、1 種類の地球局により複数の衛星システムと適切に接続することが可能となるだけでなく、衛星の捕捉誤りによる異なる衛星への誤発射を防止し、災害時でも効率的な衛星の利用が可能となった。

「課題ア-4 超小型 Ku/Ka 帯共用アンテナ放射部、給電部」では、今後の Ka 帯衛星通信システムの活用を想定して、1 台の装置で Ku 帯及び Ka 帯の衛星にアクセスできる Ku/Ka 共用アンテナの放射部・給電部を試作し実現性を検討した。さらに、避難所などへの設置あるいは車載用途を考慮し、可搬性を向上させた開口径 30cm 級の超小型アンテナの実現性を検討した。

図 7 に試作した超小型 Ku/Ka 帯共用アンテナの一次放射器 (クロスタイプブリッジホーン) と給電部の写真を示す。クロスタイプブリッジホーンアンテナは直交偏波アイソレーションが 25dB 以上を実現している。また、リフレクトアレーの適用についても検討を行った。



一次放射器
(クロスタイプブリッジホーン)

給電部

図 7 超小型 Ku/Ka 帯共用アンテナ技術

「課題ア-5 衛星通信ソフトウェア無線制御技術・実フィールド評価」では、まず、平成 23 年度補正・総務省研究開発「災害時に簡易な操作で設置が可能な小型地球局 (VSAT) の研究開発」(研究開発機関: スカパー JSAT(株)) において開発した、災害時に地上回線が途絶した場合でも容易に通信可能な可搬型小型衛星通信地球局 (自立式可搬型 VSAT) と、課題ア-1 で開発したソフトウェア無線 VSAT IDU を接続するための開発・改修を実施した。

図 8 に自立式可搬型 VSAT の写真を示す。本自立式可搬型 VSAT は、スカパー JSAT(株)が開発した自立式小型 VSAT をベースに、EsBird サービスに接続できる機能を有しており、設置後アンテナ展開から、電波の発射による正しく衛星を捕捉できているかの確認 (UAT: Uplink Access Test) ならびに実際の通信の確立までをほぼ自動で実施し、専門の作業者の立ち会いなしに避難所での IP ネットワークへの接続を可能とする。



図 8 自立式可搬型 VSAT

次に、これまで述べた成果物を用いて、本研究開発成果の社会実装を踏まえた実証実験を東日本大震災で大きな津波被害を受けた宮城県山元町にて実施した。図 9 に山元町で実施した実証実験の想定環境を示す。被災地における複数避難所を想定した。拠点避難所 A は比較的大規模な避難所で公民館や学校を想定している。平常時からマルチモード VSAT IDU が設置してあり、無線 LAN 環境を提供している。近隣避難所 B・C は比較的小規模な避難所で地域の集会場などを想定しており、拠点避難所からは数 km 程度の範囲にあるとする。

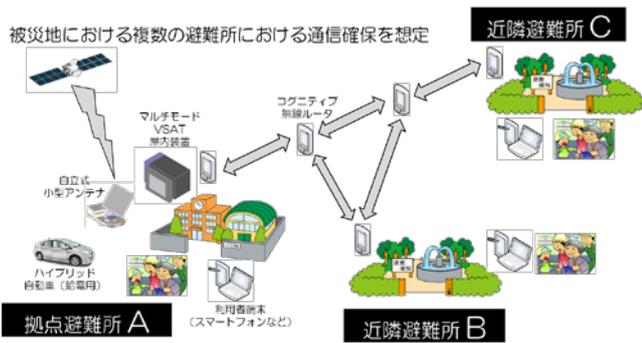


図9 山元町で実施した実証実験の想定環境

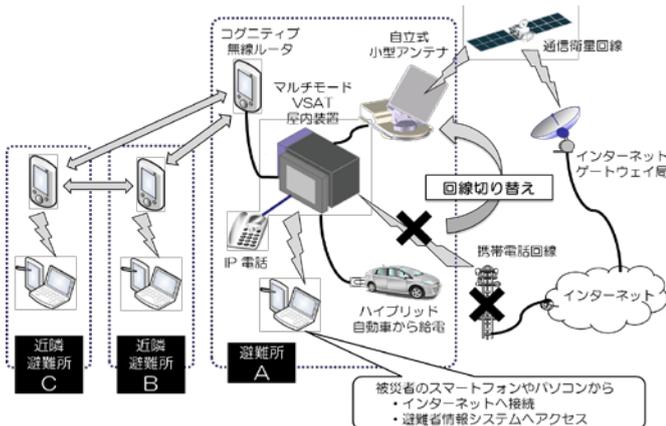


図10 実証実験の装置構成図

図10に実証実験の装置構成図を示す。マルチモードVSAT IDUと自立式可搬型VSAT（自立式小型アンテナ）を接続してインターネットへの接続を実現した。これらすべての装置へはハイブリッド自動車の家庭用電源コンセント（最大1500W）から電力供給している。衛星回線接続時はIP電話が利用可能であり、一般のアナログ電話や携帯電話との発着信が可能である。避難所間の通信にはコグニティブ無線ルータを利用する。なお、コグニティブ無線ルータはNICTワイヤレスネットワーク研究所スマートワイヤレス研究室の研究開発成果である。

実証実験では、アプリケーションとして東日本大震災の際に宮城県内の各市町村から報告された30万人にもわたる手書きの避難者名簿を宮城県庁内で行政職員により電子化した教訓を基に本研究開発課題で開発した避難者情報を扱う安否確認システムを使用した。図11に開発した安否確認システムの概要を示す。

図11 開発した安否確認システムの概要

図11から分かるとおり、避難所にあるスマートフォンやマルチモードVSAT IDUのタッチパネルディスプレイから、安否情報（名前・所在・状況など）を登録することができる。また、サーバにアクセスすることで検索も可能である。



図12 実証実験風景（宮城県山元町役場）

図12に実証実験風景の写真を示す。今回の実証実験には報道機関、通信事業者、宮城県山元町・宮城県などの自治体関係者などが参加した。避難所となる公民館や学校などにおいて、平常時、大規模災害発生時、携帯電話回線復旧時に実際にどのように活用されるかを説明した。

2.3 課題イ_省電力可搬地球局技術

本研究課題の省電力可搬地球局技術では、災害時における通信の確保を図るべく、発電機等の電力容量が限られる中でのVSATの設置・運用の円滑化を目指し、地球局の消費電力の低減化を実現するため、「課題イ-1 地球局の省電力化」と「課題イ-2 ODU (Out Door Unit) /IDU (In Door Unit)

一体化」の2課題を設定した。

まず、「課題イ-1 地球局の省電力化」では、送信すべき信号がない場合に消費される無効電力の低減を、伝送される信号の品質に影響を与えることなく実現するために、伝送信号に対応して送信部に供給する電力のオン/オフを制する技術を開発した。図13に地球局の省電力化について示す。

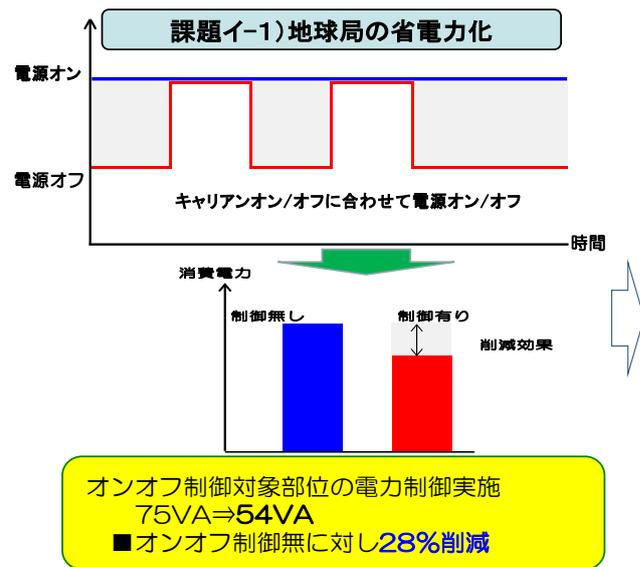


図13 地球局の省電力化

次に、「課題イ-2 ODU/IDU 一体化」では、送受信用基準信号発信部の共通化や発熱対策、および干渉対策など、一体化のための構造・実装技術ならびに効率化技術を確立

した。図 14 に詳細を示す。従来の分離型設備に比較し、小型化・軽量化を実現するとともに、一定時間の消費電力を約 36%（目標値 20%以上）削減できること、および課題イ-1 の成果とを組み合わせることにより、従来設備と比較し、一定時間の消費電力を約 54%削減（目標 40%以上）できることを、試作機により確認した。



図 14 ODU/IDU の一体型地球局

研究開発実施にあたっては、課題イ-1 とイ-2 の検討結果をフィードバックさせながら、両課題を組み合わせることで最大の効果が得られるよう工夫し期間内で開発が終了した。

表 2 に本省電力可搬地球局装置の諸元を示す。表 2 で示した諸元の決定にあたっては、国内で使用される VSAT システムの諸元に準拠することにより、実用化に近い装置を開発するよう工夫した。

表 2 省電力可搬地球局装置の諸元

No.	項目	性能
1	送信系	
1-1	送信周波数	14.0GHz~14.5GHz
1-2	送信周波数ステップ	25kHz
1-3	送信出力レベル	4W相当
1-4	送信情報速度	IPチャンネル 32kbps,64kbps,128kbps,256kbps, 384kbps,512kbps,768kbps,1024kbps 1536kbps,2048kbps
2	受信系	
2-1	受信周波数	12.25GHz~12.75GHz
2-2	受信周波数ステップ	25kHz
2-3	受信情報速度	IPチャンネル 32kbps,64kbps,128kbps,256kbps, 384kbps,512kbps,768kbps,1024kbps 1536kbps,2048kbps
3	消費電力	約75VA

2.4 課題ウ 通信帯域最適化制御技術

東日本大震災のようなトラフィックが急増した状況であっても迅速な情報収集や通信手段の確保を衛星回線によって可能とするための技術として、下記 (1)~(4) の研究開発を行った。

- (1) プロトコル解析・通達アルゴリズム
- (2) 割当帯域最適化アルゴリズム
- (3) BOD 処理手順最適化アルゴリズム
- (4) プロトコル死活監視アルゴリズム

研究成果を集約した可搬型制御局のプロトタイプの製造し、これを用いて実証実験を行った。実証実験により、実際に利用されている静止衛星を使用した場合においても、研究開発が達成されていることを確認した。具体的には、以下の成果を得た。

- (1) プロトコル解析・通達アルゴリズム

プロトコル解析・通達アルゴリズムの実衛星回線を使った検証について、可搬 VSAT4 局 (A 局、B 局、C 局、J 局) を用いて行った。実験により、実際のアプリケーション (TV 会議/VoIP 通話/FTP ファイルダウンロード) においても、利用状況変化を VSAT 局から DAMA 装置へ通達できることを確認した。

- (2) 割当帯域最適化アルゴリズム

割当帯域最適化アルゴリズムの実衛星回線を使った検証について、DAMA 装置および可搬 VSAT4 局 (A 局、B 局、C 局、J 局) を用いて行った。表 3 及び図 15 に概略結果を示す。表 3 及び図 15 から、通常時および発災時において、可搬 VSAT 局から通知された上位プロトコルの利用状況に基づき、DAMA 装置が適切に帯域割当を行うことと、災害時の対応として TCP プロトコルの帯域制限上限を制御局での設定とすることで全体の帯域割当効率向上し、以下に示す計算結果より、合計使用帯域が最大 56%の改善が確認できることがわかる。

$$(5900 - 2600) \div 5900 \times 100 \approx 56 (\%)$$

表 3 割当帯域最適化アルゴリズムの実衛星回線使用による検証結果 (概略)

条件	TCP全帯域	RTP全帯域	合計使用帯域	TCP帯域縮減率
通常時(制限なし)	3450 kHz	2300 kHz	5900 kHz	0%
TCP上限256k	1200 kHz	2300 kHz	3650 kHz	65.2%
TCP上限128k	600 kHz	2300 kHz	3050 kHz	82.8%
TCP上限64k	300 kHz	2300 kHz	2750 kHz	91.3%
TCP上限32k	150 kHz	2300 kHz	2600 kHz	95.7%

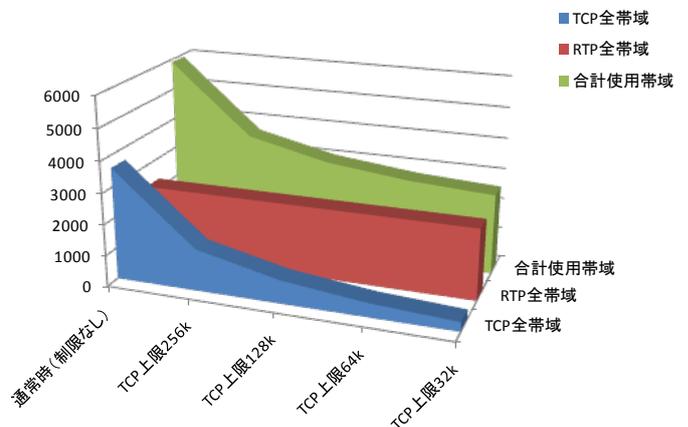


図 15 割当帯域最適化後の改善グラフ

(3) BOD 処理手順最適化アルゴリズム

BOD 処理手順最適化アルゴリズムの実衛星回線を使った検証について、可搬 VSAT2 局 (A 局、B 局) を用いて行った。実験により、VoIP 通話や TV 会議のような RTP (UDP) のストリーム系のアプリケーションにおいては、高速シーケンスにより、BOD 処理動作時の瞬断時間を短縮することで、通話や会議への影響を減らせることが確認できた。

(4) プロトコル死活監視アルゴリズム

プロトコル死活監視アルゴリズムの実衛星回線を使った検証について、可搬 VSAT2 局 (A 局、B 局) を用いて行った。実験により、従来のトラフィック量 BOD による減速 (標準モデル) に比べ、アプリケーションの種類によらず、概ね 70~80% 程度 帯域占有×時間の量が改善されることが確認できた。

図 16 に (3) BOD 処理手順最適化アルゴリズム及び (4) プロトコル死活監視アルゴリズムの検証結果を示す。

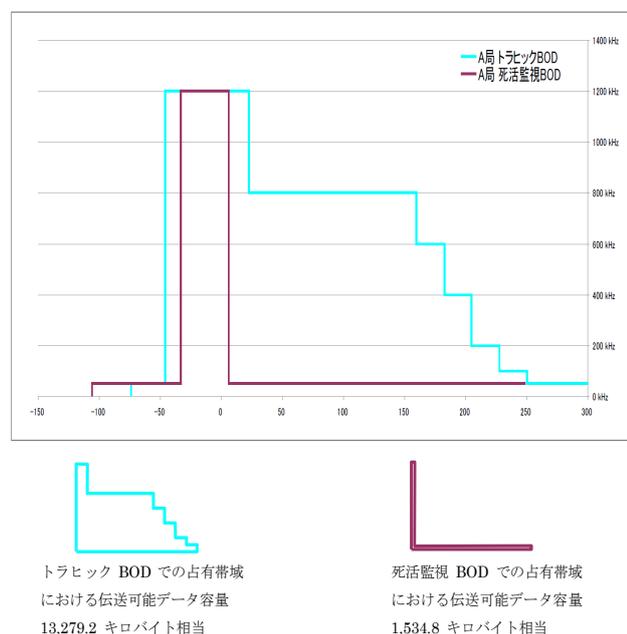


図 16 BOD 処理手順最適化アルゴリズム及び死活監視アルゴリズムの評価結果

上記図 16 で示した結果から、データ伝送有無を監視する機能と通達する手順、また通達された情報に基づき最適な帯域を割当または解放する手順が効率的に機能し、アプリケーションの停止後には速やかに占有する帯域を開放することが確認できた。本試験のケースでは、アプリケーション停止後の占有帯域の割合が 88.4% の余剰帯域の削減を実現している (占有帯域における伝送可能容量で約 11,744 キロバイト相当)。

上記の通り、研究開発目標を達成したことにより、災害時の利用局数やトラフィックが増加した状況であっても衛星回線の有効利用を図り最適な帯域割当を実現できることを確認した。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

今後の研究開発成果の社会展開に向けた主な取組計画及び波及効果創出への取り組みとしては、主に以下の 2 項目を実施していくと伴に、今年度末に仙台市で開催され

る国連世界防災会議において、デモンストレーション等を実施する予定である。

- ① 自治体へのデモンストレーションなどの広報活動による災害に強い衛星通信システム及び、装置の普及・展開
- ② VSAT 用災害者支援アプリケーションの導入希望自治体への配布実施による、災害時に衛星通信を介して活用できる安否確認ツールの普及・展開

4. むすび

大規模災害時において地上系通信インフラが地震・津波などで損壊した場合にも、災害の影響を受けにくい衛星通信システムにより、被災地のニーズに応じた通信回線確保を円滑に図るための研究開発を行った。今後の社会実装、実用化に向けては、今回の開発品を用いた実証実験を継続するとともに、自治体関係者からの要望が強かった LASCOM の実衛星回線を用いた実証実験を行うことができるようにしていく予定である。

【査読付発表論文リスト】

- [1] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, S. Kameda, N. Suematsu, "Reflectarray Design by Induced Electromotive Force Method," IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, June 11, 2014.
- [2] N. Suematsu, S. Kameda, H. Oguma, M. Sasanuma, S. Eguchi, K. Kuroda, "Multi-Mode SDR VSAT against Big Disasters," 43rd European Microwave Conference (EuMC2013), NNC Nuremberg, Germany, Oct. 2013 (招待講演).
- [3] D. Banda, O. Wada, S. Kameda, N. Suematsu, K. Tsubouchi, "Direct RF Under Sampling Reception Method with Lower Sampling Frequency," 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2013), Seoul, Korea, Nov. 2013.

【報道掲載リスト】

- [1] 「簡単操作で衛星通信」、河北新報、平成 25 年 4 月 26 日朝刊)
- [2] 「災害に強い“新”通信システム 東北大学が開発」、仙台放送、平成 26 年 3 月 25 日・スーパーニュース
- [3] 「大規模災害時は衛星回線で 東北大などシステム開発」、河北新報、平成 26 年 3 月 26 日朝刊