

# 海洋資源調査のための次世代衛星通信技術に関する研究開発

R&D of broadband satellite communication systems for ocean resources research

## 研究代表者

豊嶋 守生 国立研究開発法人情報通信研究機構

Morio Toyoshima National Institute of Information and Communications Technology

## 研究分担者

吉村 直子<sup>†</sup> 高橋 卓<sup>†</sup> 三浦 周<sup>†</sup> 森川 栄久<sup>†</sup> 辻 宏之<sup>†</sup> 菅 智茂<sup>†</sup> 若菜 弘充<sup>†</sup>

Naoko Yoshimura<sup>†</sup> Takashi Takahashi<sup>†</sup> Amane Miura<sup>†</sup> Eihisa Morikawa<sup>†</sup>

Hiroyuki Tsuji<sup>†</sup> Tomoshige Kan<sup>†</sup> Hiromitsu Wakana<sup>†</sup>

<sup>†</sup>国立研究開発法人情報通信研究機構

<sup>†</sup>National Institute of Information and Communications Technology

研究期間 平成 26 年度～平成 30 年度

## 概要

小型・軽量かつ省電力で 10Mbps 級の伝送速度を実現する資源調査船に搭載可能な衛星地球局を開発し、国立研究開発法人海洋研究開発機構等が運用する調査船に搭載し、メタンハイドレート、海底熱水鉱床等、将来の国産資源として期待される海底資源の調査の高速化及び高効率化に貢献する。

### 1. まえがき

現在、日本近海に眠っている海底資源の存在が注目されており、メタンハイドレート、海底熱水鉱床等が将来の国産資源として期待されている。これら海底資源の調査を広い海域に渡って効率的に実施するためには、海洋上における観測データの分析や多数の知見者との調査方法の検討等が重要である。しかし、現時点で、海洋上で利用可能な通信手段である衛星通信については、現状の通信環境では数百 kbps 程度までの低速な通信サービスの提供がほとんどであり、大規模な観測データの分析や多数の知見者とのデータ共有等は陸上拠点に持ち帰って行うことを余儀なくされている。

本研究開発では、ICT を活用した生活資源対策として、このようなデジタルデバイド状態を解消し、海底資源調査の効率化に資するため、海洋上の資源調査船から HDTV クラスの高精細画像のリアルタイム伝送等を実施可能とする伝送容量 10Mbps 級の通信速度を実現する衛星地球局を開発することを目的とする。

### 2. 研究開発内容及び成果

小型・軽量かつ省電力で、10Mbps クラスの伝送速度を実現する資源調査船に搭載可能な衛星地球局を開発した。開発した衛星地球局が、到達目標の各項目を満たすことを確認したほか、衛星捕捉・追尾機能の向上技術により、海洋上での大きな動揺においても通信が確保されるとともに、開発した衛星地球局が実際に通信サービスを展開する商用衛星に適用可能であることを実証実験を通じて確認した。

#### 2.1 EIRP 増加技術

高速伝送と小型化を実現するため、現状で広く普及している衛星移動体通信で使用されている L 帯及び Ku 帯より高い周波数である Ka 帯を用いる衛星地球局を提案した。情報通信研究機構 (NICT) では陸上における Ka 帯移動体衛星通信の研究開発実績があり、開発品の機能性能実証に必要な Ka 帯衛星として超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) の利用が可能であった。

開発には WINDS の海洋上ビームにて 6.5Mbps の伝送能力を有する既存車載局をベースとすることで開発期間お

よびコストの低減化を図った。WINDS の海洋上ビームを用いて 10Mbps の実現に必要な EIRP を試算したところ、56.5dBW 以上が必要であるが、既存車載局の EIRP は 55.5dBW 以上であり、1dB 以上の EIRP 増加が必要であった。EIRP の増加のため、アンテナ径の増加、送信電力の増加、送信機器のロス軽減の 3 つについて検討した。アンテナ径の増加は基本計画書で要求される寸法を逸脱する可能性があるため、レドームサイズと合わせて検討する必要があった。送信電力の増加については消費電力の増加に直結することと、アンテナ径との関係によってはサイドローブ特性や軸外 EIRP 特性等を満足できない可能性が高いため、慎重に検討する必要がある。ロス低減については、導波管の材質等を見直しても効果は小さいため、今回の検討からは除外した。

最終的に、2.3 項に示す省電力化も考慮し、これまで WINDS 向けの衛星地球局で使用してきた既存電力増幅素子 GaAs に代えて、消費電力及び動作許容温度の点で優位性のある新規電力増幅素子 GaN を採用した電力増幅部を開発した。また、レドームの再設計を行うことで、レドーム外径に対してレドーム内部の空間を広げることが可能とし、既存の車載局と同程度の設置直径でアンテナ径を 65cm から 80cm に大型化することが可能となった。これらの研究開発により、既存車載局と同じ送信電力で EIRP を 2dB 以上増加することが可能となり、小型衛星地球局における EIRP 増加技術を確立した。

#### 2.2 衛星捕捉・追尾性能向上技術

陸上移動体と比較して、波の動揺の影響が大きいため仰角方向 (El) の駆動範囲を広げる必要がある。搭載を想定している調査船を保有する国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と情報交換を行うとともに、動揺状況のシミュレーションを実施し、アンテナの EL 軸の駆動範囲を既存車載局の 20°～160°から、-20°～160°まで駆動可能とすることとした。2.1 項での検討と合わせて、アンテナ径 80cm で EL 方向の駆動範囲が -20°～160°のアンテナを設置外形 1m×1m×1m のレドーム内に収容可能とするため、アンテナ支持構造の見直しを行った。

捕捉・追尾制御においては、信号遮断時のアンテナポジ

オン維持機能を実装し、シャドウイング等からの素早い捕捉復帰を行うとともに、追尾精度 $\pm 0.15^\circ$ 以内を実現し、船舶搭載用衛星地球局の捕捉・追尾技術を確立した。

### 2.3 省電力技術

2.1 項の電力増幅部の研究開発と連動し、新規電力増幅素子を用いた電力増幅部及び動作許容温度の高温化による冷却システムの変更を実施した。新規電力増幅素子 (GaN) は従来品と比較して電力変換効率が高く、発生熱量の低減が可能である。これに加えて、動作許容温度範囲が従来品の GaAs では  $75^\circ\text{C}$  程度であるのに対して、GaN では  $125^\circ\text{C}$  程度まで許容できるため、エアコンディショナーによる冷却ではなく、ファンを用いた空冷式熱交換システムを利用することとした。

これらの技術を組み合わせることで開発のベースとした既存車載局と比較してアンテナ室外装置 (ODU) 部分で 50% 程度の省電力化を実現した。

### 2.4 調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局

2.1~2.3 項の各課題を統合し、調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局を開発した。図 1 に外観を、表 1 に基本計画書の到達目標に基づく設計要求と設計のベースとした既存小型車載局及び今回開発した調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局の機能性能の比較を示す。表 2 のとおり、開発した地球局は全ての項目において到達目標を満たすとともに、重量、電源容量については、到達目標を大幅に超える成果を実現した。特に電源容量については約 50% の省電力化となり、目標を大幅に超えて実現した。

捕捉・追尾性能は動揺台を用いた地上試験及び調査船に搭載した実海域上での試験にて確認を行った。地上試験では、動揺台を到達目標である  $25^\circ/6$  秒の条件で船上の動揺状態を模擬し、その条件下で WINDS のビーコンを用いて初期捕捉、追尾誤差の測定を行い、設計要求を満足することを確認した。



図 1 調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局の外観

表 1 の機能性能に加え、海洋上で 10Mbps クラスの高速伝送が実現可能であることを WINDS を用いて検証した。

開発した調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局を JAMSTEC 保有の調査船及び民間調査船、小型漁船に搭載し、実海域上での実証実験を実施した。実海域上での実験期間中は 10Mbps で画像伝送、TV 会議、データ共有等のアプリケーションが概ね安定して実行された。捕捉・追尾機能についても約 54 時間の連続運用を実施し、シャドウイング等による遮断後の捕捉・追尾復帰を含めて安定して動作することを確認した。実証実験では、実海域上の調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局と NICT 鹿島宇宙通信技術センターとの間で、天候が晴天~小雨、海況が最大 sea state2 (小波程度、波の高さが  $0.1\sim 0.5\text{m}$ ) の条件下において、双方向 10Mbps での回線構築が可能であった。

その他、回線品質に関する測定として UDP によるパケットロス測定と TCP によるスループット測定を実施し

た。パケットロス測定では、10Mbps の回線で UDP データを双方向同時に 3 時間連続伝送し、パケットロスが発生しないことを確認した。スループットについては、TCP/IP の輻輳制御に hydra を用いて測定を行い、最大 7.5Mbps のスループットを得た。

表 1 主要機能性能の比較

設計要求		既開発 小型車載局	調査船搭載用 プロトタイプ 衛星地球局
設置 寸法	1×1×1.5 [m] 以内 (船外装置)	0.99×0.99×0.8 m [m] (別途エア コン 要 、 0.63×0.44×0.1 9 [m])	0.99×0.99×1.1 [m]
アン テナ 径	N/A	65 cm	80 cm
伝 送 速 度	10 Mbps 以 上	6.5 Mbps (WINDS APAA エリア)	10 Mbps 以上 (WINDS APAA エリア)
EIRP	> 56.5dBW	> 55.5 dBW	58.1 dBW
重 量	100 kg 以下 (ODU)	117 kg (エアコン含 む)	84.5 kg
駆 動 範 囲	Az 方向無限 回転	Az: 360°連続 El: 20°~160° X-El: $\pm 15^\circ$	Az: 360°連続 El: $-20^\circ \sim$ 160° X-El: $\pm 15^\circ$
追 尾 誤 差	$\pm 0.2^\circ$ 以内	$\pm 0.2^\circ$ 以内	$\pm 0.15^\circ$ 以内
消 費 電 力	1,000 W 以 下	1,435 W 以下 (設計値) 約 1,000 W (運 用時)	850 W (設計 値) 約 500 W (運用 最大時)

### 2.5 商用通信衛星対応化

2.4 項で開発した調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局の性能を維持し、商用通信衛星に適用可能であることを確認した。

WINDS と一般的な商用通信衛星では通信用周波数以外に、偏波 (WINDS : 直線偏波、商用通信衛星 : 円偏波)、捕捉追尾に使用するビーコン波の形式と周波数が異なる。このため、電力増幅部 (BUC)、受信部 (LNB)、ビーコン受信部、偏波部、地球局制御部を新たに商用通信衛星用に開発し、調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局と組み合わせて機能性能を確認した。製作したコンポーネント及び地球局の外観を図 2、図 3 に示す。各コンポーネントは WINDS 向け調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局と周波数以外の電氣的・機械的インターフェースを合わせてあり、コンポーネントを入れ替えることで WINDS 対応と商用通信衛星対応を切り替え可能とした。コンポーネント入れ替え後も防水性能を維持するため、地球局制御部 (船内装置) 以外はすべて WINDS 向け調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局のレドーム内部に収容可能となっている。

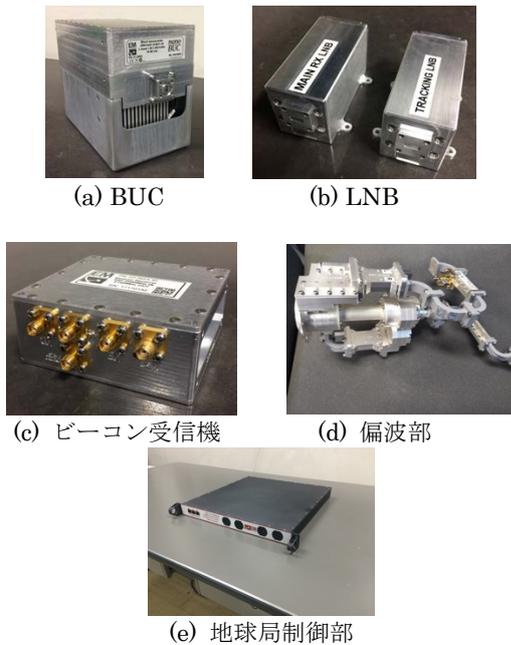


図2 商用通信衛星用コンポーネント



図3 商用通信衛星用地球局外観

表2 主要機能性能の開発結果比較

項目	WINDS 用	商用衛星対応
設置寸法	0.99×0.99×1.1 [m]	0.99×0.99×1.1 [m]
アンテナ径	80 cm	80 cm
EIRP	58.1 dBW	> 57.9 dBW
重量	84.5 kg	83.2 kg
駆動範囲	Az: 360°連続 El: -20°~160° X-El: ±15°	Az: 360°連続 El: -20°~160° X-El: ±15°
追尾誤差	±0.15°以内	±0.15°以内
消費電力	850 W (設計値) 約 500 W (運用時)	600 W (設計値) 約 450 W (運用時)
送信周波数 偏波	28.05~28.6GHz 直線偏波	28.6~28.8GHz 左旋偏波
受信周波数 偏波	18.25~18.8GHz 直線偏波	18.8~19.0GHz 右旋偏波
ビーコン周波数	18.9GHz 直線偏波	19.447GHz 右旋偏波

これらのコンポーネントを WINDS 向け調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局と組合せて機能性能を地上試験で確認した。主要機能性能について地上試験の結果を WINDS 向け調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局の開発結果を比較したものを表 2 に示す。地上試験の結果、周波数が異なる以外はコンポーネントを入れ替えたことによる機能性能の劣化はなく、

WINDS APAA と同等性能を持つ商用衛星に適用することで 10Mbps の回線構築が可能である。地上試験による機能性能試験実施後、商用通信衛星での実通試験を実施し、商用通信衛星折返しの 10Mbps 回線を構築し、商用通信衛星での回線確立を確認した。本結果により、周波数及び偏波を変更しても機能性能が維持できることが確認でき、本研究開発の成果が商用通信衛星に適用可能であることを確認した。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

内閣府プログラムである戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) との連携等により、実海域での通信実験を実施し、地球局の機能性能及び伝搬に関するデータを取得するとともに、ユーザーの把握や海洋上での高速通信の重要性に関する周知に努めた。

#### 3.1 リアルタイムネット配信実験

一般社団法人ラ・プロンジェ深海工学会及び株式会社ドワンゴとの連携により、海没潜水艦・沈没船調査のリアルタイム伝送によるインターネット配信実験を実施した。

調査海域上の調査母船に船舶搭載用プロトタイプ衛星地球局を搭載し、茨城県鹿嶋市の NICT 鹿島宇宙技術センターとの間で 10Mbps の回線を構築し、水中ロボット (ROV) が撮影した海中カメラ映像をリアルタイムに伝送した。衛星経由で送られた映像は鹿島宇宙技術センターから地上インターネット網でドワンゴのサーバに送られ、インターネットにてリアルタイム動画配信された。ドワンゴのインターネット配信サービスでは、動画視聴者が動画に対してリアルタイムにコメントすることが可能であり、調査母船では調査映像をアップリンクすると同時に、鹿島宇宙技術センター経由でインターネット配信動画及び視聴者からのコメントを視聴し、コメントへの返信等が可能である。実験時のネットワーク構成を図 4 に示す。



図4 リアルタイムネット配信時のネットワーク構成

本実験においては、開発当初に想定した調査船 (2,000~4,000 トン級) と比較してより小型の 500 トン級の海難救助船や 20 トン級の小型漁船への搭載も行った。小型であるほど波の動揺の影響が大きいため、捕捉・追尾の難易度が高くなる。小型漁船に搭載した際の衛星追尾状況を図 5 に示す。図 5 から、仰角が 12°以上変化した場合でも、ビーコン受信電力は変動しておらず、大きな動揺に対しても衛星の捕捉追尾が成立していることがわかる。本結果から、開発した衛星地球局は小型船舶に対しても適用可能と言える。

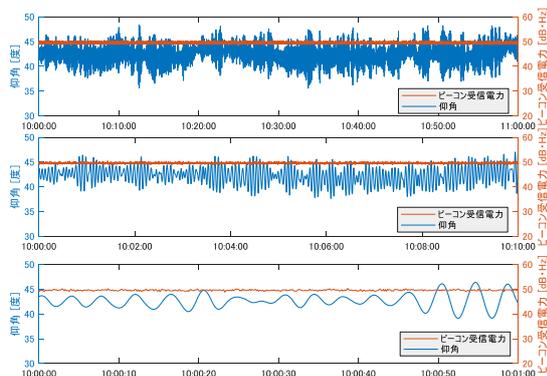


図5 小型漁船における衛星追尾状況

本実験は研究期間中に合計3回実施し、各回とも、視聴者からのコメントによる情報が海没潜水艦や沈没船の特定に大きく貢献し、乗船人数に制限がある海上調査において、双方向通信により乗船者以外の専門家等が調査に参加することが調査の確度向上や効率化に有用であることが実証できた。また、海洋上からの高画質動画配信は、ネット配信時の視聴者コメント及び終了時アンケートにおいて一般視聴者にも高く評価されており、今後の海洋における高速衛星通信システムの普及促進に向けて効果があったと考えている。

### 3.2 航海時の通信インフラ実験

内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「次世代海洋資源調査技術」と連携し、海洋調査船に開発した衛星地球局を搭載し、陸上拠点との間に常時10Mbpsの回線を構築した。この回線を用いることで、これまでは調査航海中には実現できなかった、船上で取得した調査データや海況情報を陸上拠点とリアルタイムで共有可能となった。各種情報をリアルタイムに共有することにより、調査計画の迅速な修正が可能となり、海洋上での高速衛星通信が海洋調査の効率化に有効であることが実証された。

また、船上で陸上と同様にインターネット接続が可能であることから、添付ファイルのあるメールの送受信、web閲覧、スマートフォンアプリ等の利用が可能である。ユーザーズ把握のため、実験的に船内に無線LAN環境を構築し、利用環境等についてアンケート調査を行った結果、回線速度、使用感について概ね満足であるとの結果を得た。このことから、海洋上の高速衛星通信は、海洋調査等の学術的な目的だけでなく、長期間の航海を行う漁船、貨物船等の乗務員の福利厚生や、長期クルーズ客船の乗客へのサービス等の目的にも有用であると考えられる。

一方で、高速衛星通信環境を用いると、運航に必要な船上機器の各種データを陸上拠点に集約することも可能であり、船舶運航の省力化や無人航行等への応用も考えられる。

## 4. むすび

海洋調査等に使用する調査船に搭載し、10Mbpsの回線を構築可能な調査船搭載用プロトタイプ衛星地球局を開発し、WINDSを用いて実海域において実証実験を実施した。開発した衛星地球局は設計のベースとした既存小型車載局を比較して、重量・消費電力ともに大幅に削減することができ、搭載性の向上を実現した。また、実海域での各種実証実験により、海洋上と陸上とのリアルタイムなデータ共有が海洋調査の効率化に有用であることを実証した。

近年、商用衛星通信サービスにおいては、高速・大容量

のサービスを提供するにあたって、サービスコストの低廉化を目指した大容量衛星通信 (HTS: High Throughput Satellite) システムが増加している。HTS通信システムでは、大容量化のためにKa-bandの利用やマルチビーム化が進められており、本研究開発で開発した衛星地球局が適用可能である。

NICTでは、研究開発成果のKa帯での移動体ブロードバンド衛星通信システムであるESIM (Earth station in motion) や技術試験衛星9号機 (ETS-IX)、衛星5Gへの適用等について、関係機関との連携を計画している。また、実海域で取得した伝搬データ等については、ITU等の国際標準化機関への寄与文書等にとりまとめることを計画している。

### 【査読付発表論文リスト】

- [1] Naoko Yoshimura, Takashi Takahashi, Amane Miura, Morio Toyoshima, “Feasibility Study of Broadband Satellite Communications System for Research Vessel”, the 30th International Symposium on Space Technology and Science 2015-j-07 (平成27年7月8日)

### 【報道掲載リスト】

- [1] “長崎沖に旧日本軍潜水艦”、毎日新聞夕刊、平成29年8月28日、他関連掲載 (地方紙、業界紙含む)