

4 ETS-9 地上系設備の研究開発

4 R&D of Ground Segment Facilities for ETS-9

4-1 ETS-9 運用計画作成システム

4-1 ETS-9 Operation Planning System

大津留豪 川本雄一 木村紋子 谷内宣仁

OTSURU Go, KAWAMOTO Yuichi, KIMURA Ayako and TANIUCHI Nobuhito

高速・大容量な通信を実現する次世代の通信衛星では、ソフトウェア無線やデジタル信号処理技術の活用により、オンボードにおける再構成技術が進展している。衛星打ち上げ後のソフトウェア書換により、ビーム形状や周波数、帯域幅などの無線リソースの柔軟な制御が実現される。これらのフレキシビリティを十全に活用するためには、各ビームにおける通信需要や天候状況を予測し、得られた予測情報に基づく衛星の運用計画立案が不可欠となる。本稿では、周波数利用効率向上に関する理論検討や、ETS-9 の宇宙実証に向けた地上系の一部として開発した天候状況・移動体需要予測サブシステムや、ネットワーク運用センターにおける運用計画作成機能部について概説する。

In next-generation communication satellites designed to enable high-speed and high-capacity data transmission, onboard reconfigurability has advanced through the adoption of software-defined radio and digital signal processing technologies. Post-launch software updates allow for flexible control of radio resources such as beam shapes, frequencies, and bandwidths. To fully leverage this flexibility, it is essential to forecast communication demand and weather conditions for each beam, and to formulate satellite operation plans based on these predictions. This paper provides a theoretical examination of frequency utilization efficiency and outlines the development of ground subsystems for the ETS-9 space demonstration, including a weather and demand prediction subsystem and a network operation center with an operation planning function.

1 まえがき

かつての古典的な通信衛星では、衛星に搭載する通信用の機器におけるハードウェアによる制約から、各ビームに対して割り当てられる周波数や帯域幅などの無線リソースは固定的に運用・制御されていた。このような固定的運用は、無線リソースの余剰あるいは不足といった非効率的な利用を招き、商用化において不可欠なビット単価の低減を妨げていた。しかしながら、デジタル信号処理技術の発展に伴い通信衛星における運用の柔軟性は増大しており、ハイスループット衛星(High-throughput Satellite:HTS)と呼称される通信衛星では、古典的な通信衛星よりも広帯域なX帯やKu帯などの高周波数帯域が用いられるとともに、数十から数百のビームによってカバレッジを形成し、ビーム単位での周波数再利用を図ることで高速・大容量化を

実現した。近年では、数百から数千のビームを有し、Ka帯などのより広帯域を確保可能なミリ波帯を搬送波とする超ハイスループット衛星(Very High-throughput Satellite:VHTS)や、ソフトウェア無線(Software-defined Radio:SDR)技術を活用したソフトウェア定義衛星(Software-defined Satellite:SDS)が注目を集めている[1]。技術試験衛星9号機(ETS-9)では、VHTSやSDSに期待される柔軟なリソース制御を実現するための機能が搭載されている。三菱電機株式会社によってETS-9搭載用に開発されたデジタルチャネライザは、衛星中継器に対して入力された信号を周波数に応じて分波・スイッチング・合成することで、所望の周波数にマッピングして送信することができる[2]。この機能により、衛星から地上のユーザに対する通信リンクであるユーザリンクのビームごとに割り当てる周波数帯域幅を変更することが可能となり、

需要が多い地域に対してより多くの周波数資源を割り当てることができる。また、ユーザリンクのトラヒックを束ねる地上局と衛星間の通信リンクであるフィーダリンクにおいて、より良好な回線を確立できる地上局と選択的に接続するサイトダイバシティ運用にも本機能は貢献する。特にKa帯のようなミリ波帯においては降雨減衰による通信品質の劣化が顕著であり、安定的な通信を確立するためにはサイトダイバシティが重要である。

このようなフレキシビリティ機能を有する次世代の通信衛星においては、その運用・制御が通信容量やユーザ収容数、周波数利用効率といったシステム全体性能に与える影響が大きい。ユーザリンクにおけるビームごとの需要情報や、フィーダリンクにおける地上局単位での天候情報は衛星のリソース制御における重要な決定因子であり、定数で与えられるものではなく時間軸上で変動する。そのため、事前にビームごとのトラヒックの増減や地上局周辺における降雨量の多寡を予測し、それらを考慮した運用計画を立案することが求められる。本稿においては、ETS-9に関連する委託研究「電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)」の「多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御に関する研究開発」において取り組まれた、予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術の確立のための理論検討や開発について紹介する。本委託研究はNICTを研究代表機関として、東京大学、東北大学、株式会社天地人、三菱電機株式会社により、2020-2024年度にかけて実施された。

本稿の構成は以下のとおりである。**2**で東北大学が実施した衛星通信システムの最適制御に関する理論検討について述べる。**3**で株式会社天地人が実施したAI技術を活用した通信需要や回線条件の予測技術について説明する。**4**でNICTが実施した予測情報に基づく運用計画立案技術について紹介し、**5**で将来展望とともに結論を述べる。

AI技術を活用した衛星通信システム最適制御方式の理論検討に関する研究開発

東北大学では、ディープラーニングや機械学習に代表されるAI技術を利用したデータ解析に基づく衛星通信リソース制御方式の理論検討を行った。今後5G網やIoT網などへの接続が期待される衛星通信システムにおいては、そのフレキシビリティ性を活かして、地理的・時間的に変動するサービス要求や通信環境に柔軟に対応可能とすることが重要である。しかし、現状の衛星通信システムでは多様化するサービス要求や環境変化を考慮した上で衛星の通信リソースをフレキ

シブルに制御するための方法は存在せず、次世代のハイスループット衛星通信システムが有する機能・性能を最大限発揮させることが難しい。そこで、我々はAI技術を利用した過去の様々なデータから解析・学習することで将来の状況を予測し、適切な制御を実現することを目指した。解析・学習の対象とするデータとしては、例えば通信需要の地理的な差異やその時間変化、移動体が持つモビリティの特性、気象データなどが挙げられる。ここで、AI技術によるデータ解析・学習結果を実際に衛星通信システムの制御に適応するためには、制御対象となる衛星通信システムのモデル化が必要となる。そのため、制御対象となる各パラメータの相関関係や、解析結果との関係性を数理モデルによつて明らかにすることで、その影響を定量的に評価した。

本章では、転移学習を用いたトラヒック予測による学習用帯域削減手法が衛星-地上接続システムにおける周波数利用効率に与える影響を評価した結果について紹介する。低位学習を用いた制御手法の詳細については文献[3]を参照されたい。

まず評価にあたって想定する環境を説明する。図1で示すように衛星、VSAT (Very Small Aperture Terminal)、GW (Gateway)、NOC (Network Operation Center) で構成されるシステムにおいて、VSATが地上ネットワークのカバー範囲外へ通信環境を提供することを想定する。また、衛星のフィーダリンクはコアネットワークと接続するGWと通信を行い、GWはNOCと接続する。NOCは予測されたトラヒック量に基づき、衛星から各VSATへ割り当てる周波数や電力などの通信リソースを決定する。

トラヒック予測を行う際には、過去のデータを用いた学習フェーズが必要となる。一般的にトラヒック予測に用いられる学習手法である集中学習では、学習用データを一箇所に集約する必要がある。想定する衛星環境では各VSATで収集した過去のデータを衛星経由でNOCまで伝送する必要があるものの、このデータ伝送により帯域を大量消費してしまい、ユーザが使用可能な帯域が制限されるという課題がある。本課題を解決する方法として、転移学習を用いたトラヒック予測が有効である。転移学習は既に学習したモデルを

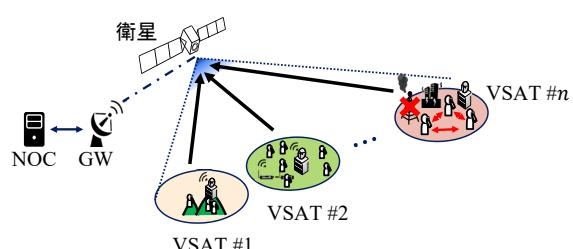


図1 想定する衛星-地上接続システム

再利用することが可能な学習手法であり、ある程度類似したデータについては従来の機械学習手法と比べて少ないデータ量でも予測精度を保つことが可能である。そのため、学習済みモデルを配布することで、大量の予測用データを一箇所に集約する必要がなくなるため、学習に必要なトラヒック量が少量であるという利点がある。

本想定システムにおいて転移学習を用いる際、以下のようなステップでトラヒック予測が行われる。

1. 過去データの伝送

各 VSAT が持つ過去のトラヒックデータを、衛星を通して NOC へ伝送する。

2. モデルの作成

NOC へ集約した過去データを用いて学習を行い、トラヒック予測モデルを作成する。

3. モデルの配布

NOC で作成したトラヒック予測モデルを各 VSAT へ配布する。

4. VSAT における学習

各 VSAT において、配布されたモデルと自身が持つ過去データから学習を実行する。

5. VSAT におけるトラヒック予測

学習結果をもとに、各 VSAT が自身のカバー範囲におけるトラヒック予測を行う。予測精度が一定値を下回った場合、ステップ 1 に戻る。

以上の手順の中で、ステップ 1 においては過去データの集約が必要となる。しかし、その後のステップでは各 VSAT で学習を実行し、学習結果のみを VSAT へ伝送するため、集中学習的なアプローチを比較してモデルの更新頻度を低くすることが可能である。したがって、長期的に見て学習用データの伝送量が減少し、占有する帯域が削減される。また、ステップ 5 において予測精度の閾値を設定することで、予測精度が一定以上に担保される。

表 1 にシミュレーションで使用したパラメータを示す。各 VSAT からの要求通信速度のデータとして情報通信研究機構から提供されたトラヒックデータを使用した(図 2)。

評価指標として、次式で表されるような従来の集中学習的アプローチと比較した周波数利用効率改善効果 I を用いた。

$$I = \frac{SE_{\text{prop}}}{SE_{\text{conv}}} \quad (1)$$

ここで SE_{prop} , SE_{conv} はそれぞれ転移学習的アプローチ及び集中学習的アプローチを用いた場合の周波数利

表 1 シミュレーションパラメータ

| パラメータ | 値 |
|-------------|----------------------|
| NOC 局数 | 1 |
| 衛星基数 | 1 |
| VSAT 局数 | 4 |
| 周波数総帯域幅 | 500 MHz |
| 平均要求通信速度 | 79.2 Mbps |
| 集中学習用データサイズ | 27 GB |
| 転移学習用データサイズ | 15 GB |
| モデル更新頻度 | 15 分(集中) 75 分(転移) |

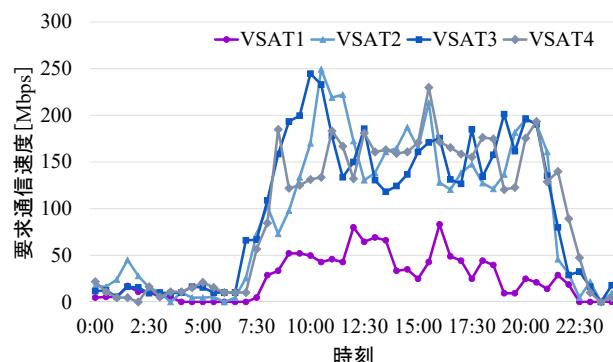


図 2 各 VSAT からの要求通信速度

用効率であり、次式のように表される。

$$SE_{\text{prop}} = \frac{(BW_{\text{total}} - BW_{\text{tran}}) \times C}{BW_{\text{total}}} \quad (2)$$

$$SE_{\text{conv}} = \frac{(BW_{\text{total}} - BW_{\text{mass}}) \times C}{BW_{\text{total}}} \quad (3)$$

ここで BW_{total} はリターンリンクの総帯域幅、 BW_{tran} 、 BW_{mass} はそれぞれ転移学習的アプローチ及び集中学習的アプローチにおける学習用データ帯域幅、 C は平均通信速度である。

まず、要求通信速度の平均値を用いた際の、リターンリンクにおける学習用帯域とユーザ用帯域の比率を図 3 に示す。従来手法ではリターンリンク帯域のおよそ半分を学習用データの伝送が占めていたものの、転移学習を導入することで学習用帯域を 5 分の 1 程度まで削減可能であることを確認した。また、周波数利用効率は $SE_{\text{conv}} = 2.49 \text{ [bits/s/Hz]}$ 、 $SE_{\text{prop}} = 4.05 \text{ [bits/s/Hz]}$ であり、周波数利用効率改善効果は $I = 1.62$ となった。

次に、要求通信速度に対する周波数利用効率の変化を図 4 に示す。要求通信速度の下限値と上限値は各 VSAT からの要求通信速度のデータに基づいている。要求通信速度の大小に関わらず、転移学習の利用により周波数利用効率が向上し、周波数利用効率改善効果

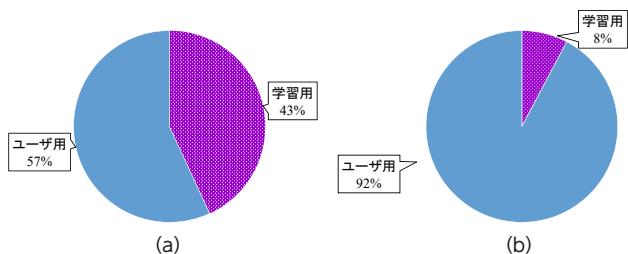


図3 集中学習的アプローチ(a)、転移学習的アプローチ(b)を用いた際の帯域分配状況

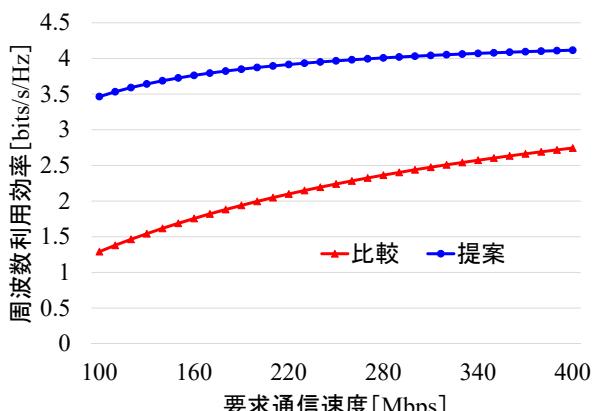


図4 要求通信速度に対する周波数利用効率

は平均で $I=1.87$ となった。

上記のシミュレーション結果から、転移学習を用いて衛星通信システムのトラヒック予測をすることが周波数利用効率を向上させるうえで有効であることを確認した。周波数利用効率が向上することで、システム全体の通信容量を増加させることができになり、より多様なユースケースに対応可能な衛星通信システムの構築に貢献することが期待される。

衛星リソース割当運用計画における通信需要・回線条件の予測技術に関する研究開発

3

株式会社天地人は、2019年5月に創業したスタートアップ企業であり、人工衛星データを活用した課題解決のためのソリューション提供を展開している。JAXAの知的財産や知見を利用して事業を行うJAXA認定ベンチャーであり、人工衛星データ・地上データ等の各種ビッグデータをWeb GISサービス「天地人コンパス」で解析・可視化することで、まだ誰も気付いていない土地の価値や地球の資源を明らかにするサービスを提供している。

本章に記述する研究開発の目的は、ETS-9に代表される次世代のHTSを用いた衛星通信システムにおいて、周波数リソースをより効率的に利用するための仕組みの構築を目指すものである。周波数リソースの効

率化のためには、通信需要や回線条件の変化をデータ解析に基づき予測を行い、衛星リソースを適切に割り当てる運用計画方式を確立することが重要である。

当社は、スタートアップ企業のアイデアや機動力を発揮しつつ、これまで培ってきた衛星データ・気象データ等解析技術やAI技術(機械学習技術)を活用して、通信需要や回線条件の変化をデータ解析に基づき予測するサブシステムの研究開発を担当した。

具体的には、通信需要(ユーザリンク)では移動体(航空機・船舶)の需要予測を行い、回線条件(フィーダリング)では気象状況(降雨・雲)の予測を行った。各予測システムを、移動体需要予測サブシステム、気象状況予測サブシステムと呼び、各サブシステムの構成要素であるデータベース並びに解析アルゴリズムについて基本設計、試作、詳細設計、開発並びに評価を行った。また、各サブシステムから運用計画作成システムへ予測データを転送するために、IPネットワーク上で動作する、軽量なデータ交換方式を採用したWeb APIシステムの構築も実施した。

3.1 移動体需要予測サブシステムの研究開発

移動体需要予測サブシステムでは、衛星通信を利用する航空機・船舶(機内Wi-Fi等)を対象とする。30/60/90分後の各航空機・船舶の位置予測を行うことで、ビームごとの機数の変動を基にした通信需要の予測に活用できる。

(1) 航空機の位置予測

航空機が自身の位置や速度などの情報を定期的に送信するADS-B(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)の報知情報を地上局・人工衛星でトラッキングした航空機軌跡データ(Flightradar24提供データ)を用いて、航空機の軌跡を予測した。

航空機需要予測に関する最新予測技術事例の論文調査を行い検討した結果、航空機軌跡の予測アルゴリズムとして以下2種類を選定した。

- ・深層学習LSTM(Long Short Term Memory)及び全結合層(FC)を組み合わせたアルゴリズム
- ・確率推論(カルマンフィルタを用いたアルゴリズム)

各予測アルゴリズムの正解軌跡と予測軌跡の距離の誤差並びにETS-9のアンテナビームのフットプリント範囲内の航空機数の誤差を比較すると、表2のとおりとなり、深層学習を用いたアルゴリズムにおける予測誤差が最も小さくなることが明らかとなった。そこで、移動体需要予測サブシステムにおけるデータベースとしてADS-Bデータ(Flightradar24提供データ)、アルゴリズムとして図5で概要を示した深層学習を探

表2 予測アルゴリズム別の予測誤差

| 予測時間 | 深層学習 | | 確率推論 | |
|--------|-----------|----------|-----------|----------|
| | 位置誤差 [km] | 機数誤差 [機] | 位置誤差 [km] | 機数誤差 [機] |
| 5 min | 10.5 | 0.16 | — | — |
| 15 min | 21.5 | 0.22 | — | — |
| 30 min | 36.0 | 0.30 | 113.7 | 1.11 |
| 60 min | 70.7 | 0.42 | 249.9 | 1.69 |
| 90 min | — | — | 386.9 | 1.89 |

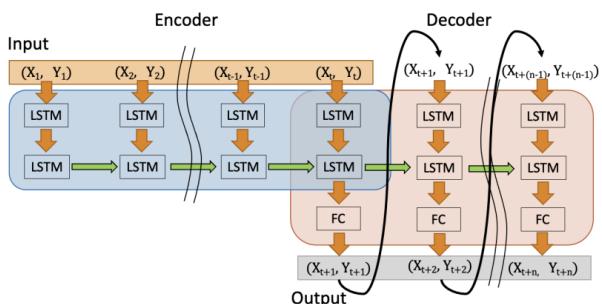


図5 航空機位置予測 深層学習モデルの概要

用することとした。

(2) 船舶の位置予測

航空機位置予測モデルを船舶の位置予測へ適用することで、移動体需要の対象拡大の可能性を検討した。

船舶位置予測モデルでは、航空機位置予測モデルと同モデルを用い、学習データとして ADS-B と同種のシステムである、船舶が自身の位置や航行情報を定期的に報知する AIS (Automatic Identification System) のデータを用いることとした。なお、AIS データは MarineTraffic 社より調達し、日本近海におけるデータを用いている。

モデル適用のテストケースとして、下記を設定した。

- ・利用した AIS データの期間
- ・学習データ：2023/01/01-2023/01/30
- ・検証データ（パラメータ設定に利用）：2023/02/01
- ・テストデータ：2023/02/03
- ・評価時の入出力
- ・入力：30 分前、現在（2 時点）の緯度、経度、速度
- ・出力：30 分後の緯度、経度

テストケース（2023/2/3）を実行したところ、予測船舶位置と正解船舶位置の距離の誤差を計算すると、平均で 340.9 km の乖離があり、誤差が大きいことが明らかとなった。

航空機位置予測モデルの場合は、発着空港情報を学習することで位置予測の精度向上が見込まれたため、

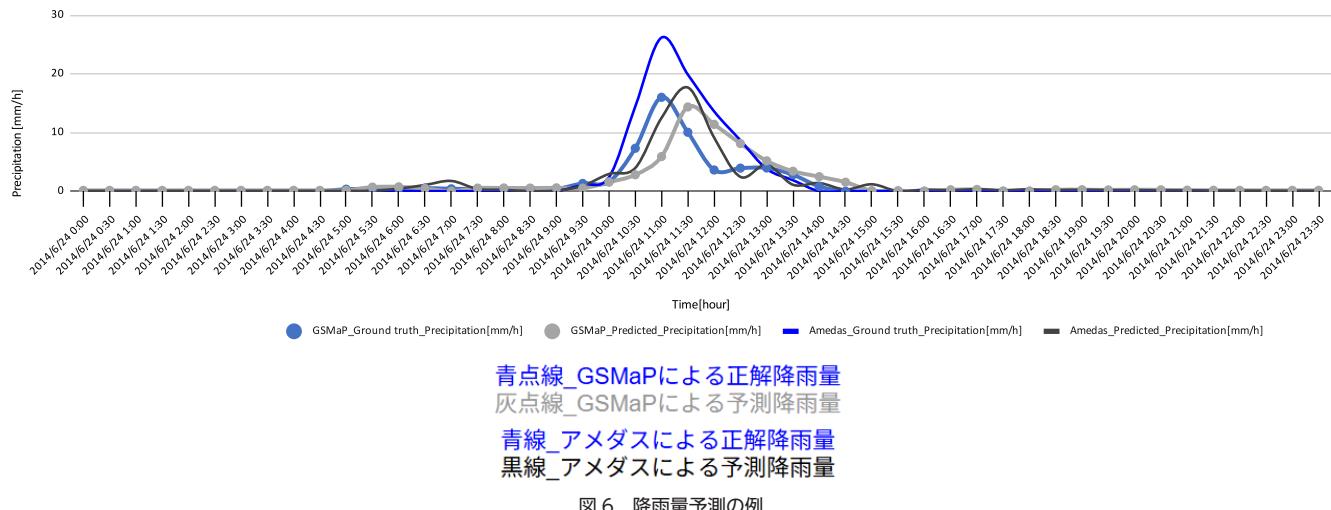
船舶位置予測モデルでも発着港を学習させている。今回のテストケースにおける学習データ・テストデータを確認したところ、学習データ・テストデータ両方に含まれる港数が 361 港であったのに対し、学習データには含まれないが・テストデータに含まれる港数が 247 港あることが明らかとなった。つまり、約 4 割の港について学習データに含まれていないため、船舶の行先が不明確となり位置予測精度が低下した可能性がある。これを確認するため、発着港が学習データに含まれるか含まれないかで予測データを絞り込み、予測船舶位置と正解船舶位置の距離の誤差を計算した。学習データ・テストデータ両方に含まれる港にのみ予測データを絞り誤差を計算すると平均で 88.1 km の誤差、学習データに含まれず・テストデータに含まれる港にのみ予測データを絞り誤差を計算すると平均で 1291.2 km の誤差となることが明らかとなった。これにより、船舶位置予測精度に寄与する要因の 1 つが、学習データに含まれている港（つまり、学習済みの航路）かどうかであることが明らかとなった。航空機データに比べ、船舶データは港数が多く、予測時に新規の港情報が多く含まれる可能性が高いため、航空機の場合と同じ学習方法を船舶に単純に適用することが難しい。学習データの工夫により既知の港情報を増やす等、未知の港データに対応するための工夫が必要であることが推察される。

3.2 気象状況予測サブシステムの研究開発

気象状況予測サブシステムでは、Ka 帯の電波減衰量を予測するための降雨量予測と光帯の通信可能性を予測するための雲量予測を行った。

(1) 降雨量予測

人工衛星・レーダーの画像 (GSMAp) や地上観測所の気象情報 (アメダス) を用いて、降雨量を予測した。降雨量予測に関する最新予測技術事例の論文調査を行い検討した結果、航空機軌跡の予測アルゴリズムとして以下 2 種類を選定した。



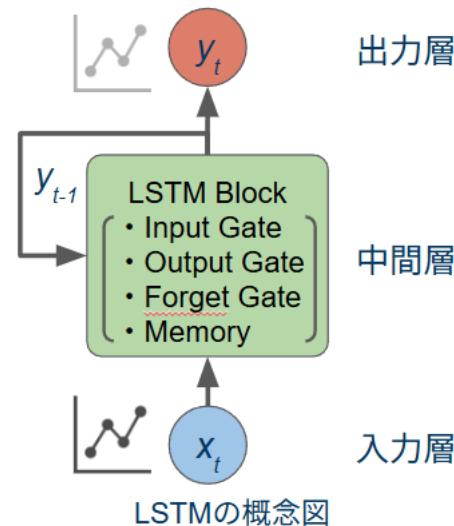
- ・面的予測：深層学習 (U-net：過去やリアルタイムの衛星・レーダーの気象画像から将来の気象画像を予測するアルゴリズム)
- ・点的予測：深層学習 (LSTM：過去やリアルタイムの地上観測データ（降雨量、気温、気圧、湿度等）を用いて、将来の降雨量を予測するアルゴリズム）

予測アルゴリズムを用いて降雨量を予測した結果の一部を図 6 に示す。予測地点として NICT 鹿島局（緯度 35.955°、経度 140.663°）を設定し、2014 年 6 月 14 日をモデルケースとして、30 分後の降雨量を予測したところ、降雨量としてはやや過小な予測値となるが、降雨のタイミングについて精度よく予測できることが明らかとなった。

面的予測では、GSMAp から収集される 1 時間ごとの降雨レーダー画像を用いるため、30 分後・90 分後の予測を行う際にデータ補完が必要となり、計算負荷が高い。一方で、点的予測ではアメダスでは 10 分ごとにデータが取得可能なため、30 分後・90 分後の予測を行う際にデータ補完が必要なく、計算負荷が低い。機械学習による予測値を気象状況予測サブシステムから運用計画作成システムへインターネット経由で転送することを考え、計算負荷の低い点的予測を移動体需要予測サブシステムのアルゴリズムとして採用することとした。図 7 に点的予測で用いた深層学習モデルの概要を示す。

(2) 雲量予測

雲量予測にあたり機械学習を用いるにあたって、光通信の可能性と雲に関するデータの相関分析を行い、最も光通信の可能性と相関の高いデータを学習データとして用いることが、雲による光通信可否を予測する



LSTMは過去の出力と現在の入力から情報の記憶と忘却を行い
 それらを基に予測値を出力。

図 7 降雨量予測 深層学習モデルの概要

アルゴリズムとして適切と考えられる。そこで、光通信可能性と雲量データの相関分析を実施した。

光通信可能性のデータとして、「NICT が推定した大気透過率 (0 ~ 1 の数値)」具体的には、NICT が構築した環境データ情報収集システムのうち、沖縄における環境データ情報(2022年5月分)から推定した数値を用いることとした。

また、光通信可能性との相関を見る雲に関するデータとして、下記の 4 種を用いた。

- ・気象衛星「ひまわり」Band14 の輝度温度
- ・NICT 環境データ雲量 (0 ~ 100 %)
- NICT 環境データ内の地表温度、赤外放射温度、

全天カメラの画像データによる雲量から推定した数値

- ・NICT 環境データ雲高 (0 ~ 8,000 m)
標高 8,000 m で -45 °C を基準として、NICT 環境データ内の地表温度と赤外放射温度から算出
- ・高分解能雲情報(雲の有無ラベルデータ)
気象庁が推計した、各メッシュにおける雲の有無がラベル化されたデータ

これらのデータ間で相関係数をとると、表 3 光通信可能性と最も相関が高いのは NICT 環境データから推定した雲量データであることが明らかとなった。

ただし、雲量データは NICT が設置した箇所でのみ取得が可能なため、日本各地や世界への横展開が難しい。そのため、日本・世界において広域でデータが入手できる可能性のある気象庁プロダクトの中から、雲量を示す高分解能雲情報を選定し、光通信可能性との

表 3 光通信可能性と NICT 環境データ(雲量・雲高)の相関分析

| 相関係数 | ひまわり | 雲量 | 雲高 |
|--------|------|------|------|
| 光通信可能性 | 0.54 | 0.84 | 0.81 |

相関分析を実施した。高分解能雲情報は、雲の有無がラベル化されたデータのため、相関係数ではなくヒストグラムを用いて分析を行った。

その結果、図 8 に示すとおり、ラベル 200(晴天)は、全体的に光通信可能性が高い数値を示し、ラベル 201(雲混じり)は、光通信可能性 50 %以下が約 20 %を占め、ラベル 202(雲有)は、光通信可能性 50 %以下が約 45 %まで上昇することを確認した。これにより、光通信可能性と、雲量を示す高分解能雲情報(気象庁)の相関も高い傾向にあることを確認した。

以上のデータ相関分析結果に基づいて、雲による光通信可否を予測するアルゴリズムのもととなる学習データとして、光通信可能性との相関が高い「高分解能雲情報」(気象庁)を選定することとした。

また、雲量の予測アルゴリズムとして、図 9 に示すとおり深層学習を用いる面的予測アルゴリズムを用意した。具体的には、画像の時系列予測に実績のある 3D CNN をアルゴリズムに用い、画像の特徴抽出(エンコーダ)と特徴の画像への展開(デコーダ)から成る U-net アーキテクチャを採用した。

学習データである高分解能雲情報は、雲の有無を雲

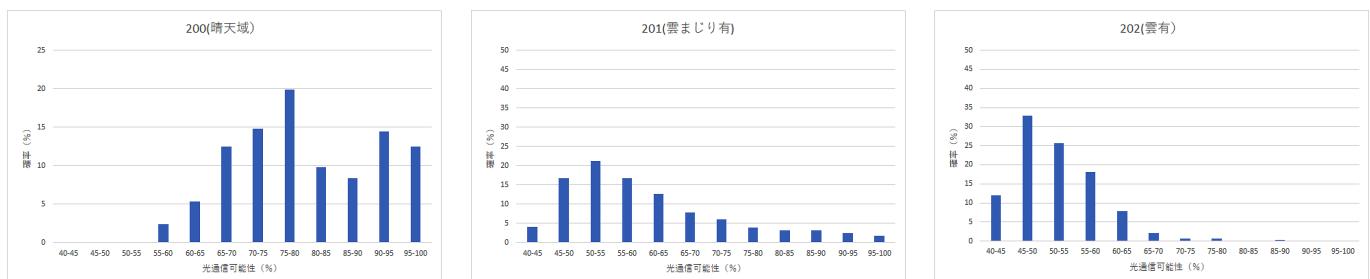


図 8 光通信可能性と高分解能雲情報の相関分析

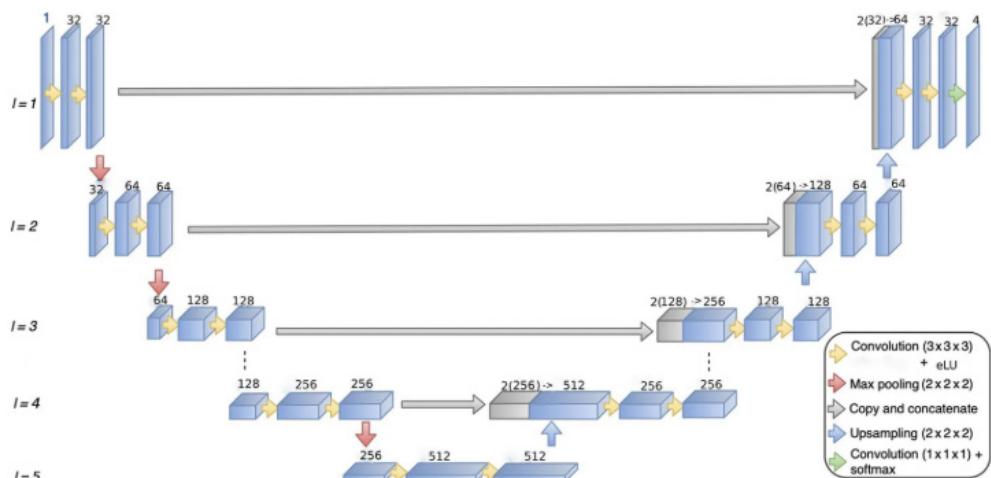


図 9 降雨量予測 深層学習モデルの概要
(出典)『Tips for training a 3D-Unet model for segmentation tasks.』By Bhavya Rema Devi

4 ETS-9 地上系設備の研究開発

表 4 予測地点別の正解率

| 地点 | 鹿島 | 沖縄 | 小金井 | 神戸 | 北海道 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 正解率 | 77.4 % | 79.0 % | 77.5 % | 77.6 % | 79.5 % |

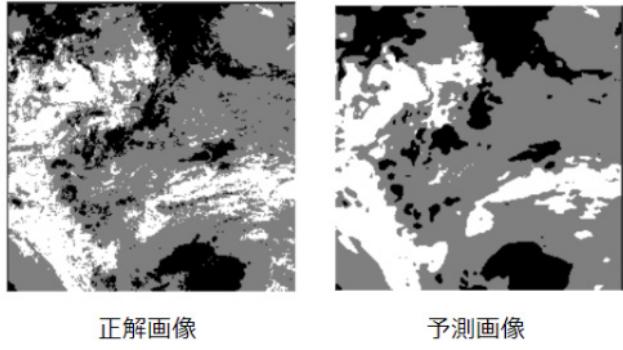


図 10 雲量予測の例

有り、雲混じり有り、雲なしの3段階で表現しているため、雲有り：0、雲混じり有り：0.5(※)、雲なし：1、と数値化して、グレースケールにて予測結果を表示したのが図 10 である。

予測地点である NICT の 5 抱点(鹿島、沖縄、小金井、神戸、北海道)について、高分解能雲情報を用いた機械学習を行い、雲量の予測を行った。予測画像と正解画像の比較を図 10 に示す。

予測精度の定量評価を行うため、Accuracy(全ての画像ピクセル数に対し、予測と正解が一致した画像ピクセル数の割合：正解率)を算出したところ、表 4 に示すとおりすべての地点で 75 % を超える予測精度を達成した。

4 ユーザリンク・フィーダリンク最適衛星リソース割当方式に関する研究開発

NICT では、株式会社天地人が開発した気象状況・移動体需要予測サブシステムや、NICT がフィーダリンク局周辺に整備した光・RF データ収集システムとインタフェースとして Web API を有するネットワーク制御センターにおける運用作成機能部(NOC-P)を開発し、予測情報や地上局周りの環境情報を考慮した衛星運用計画を立案するためのシステムを構築した。

図 11 に開発した地上局系のシステムアーキテクチャの概要を示す。NOC-P は気象状況・移動体需要予測サブシステム及び光・RF データ収集システムとインタフェースを有して予測情報を取り込み、それらを基に運用計画を立案する。NOC には運用計画作成機能部である NOC-P とともに三菱電機株式会社によって開発された制御機能部(NOC-C)が存在し、NOC-P で立案された運用計画は NOC-C に送信され、衛星のリ

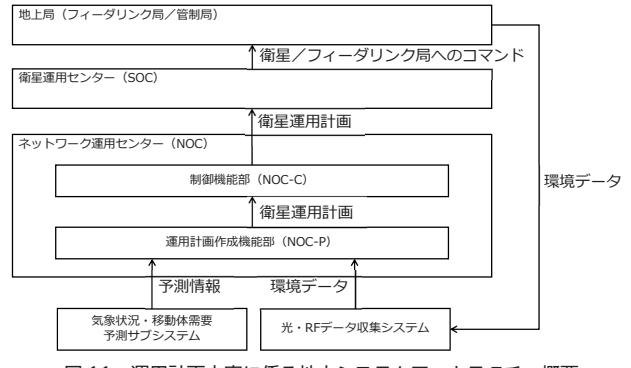


図 11 運用計画立案に係る地上システムアーキテクチャ概要

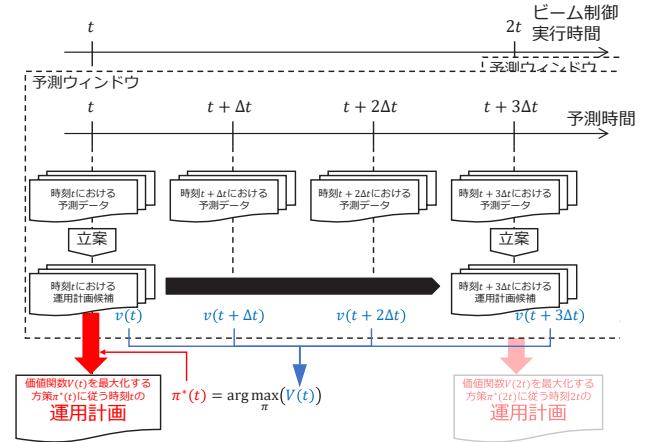


図 12 予測技術を活用した運用計画の立案手順の概要

ソース状況との整合性が確認される [4]。NOC-Cにおいて整合性チェックが完了した後に、衛星の運用計画は衛星運用センター(SOC)に送信され、SOCにおいて実運用上のコマンドへ変換される。各フィーダリンク局周辺には環境データを収集する装置が設置されており、逐次的に収集したデータを光・RF データ収集システムへ蓄積している [5][6]。また、株式会社天地人が開発した移動体需要・気象状況予測サブシステムは AI を用いた通信需要・回線条件の予測を行い、NOC-P からの要求に対して予測結果を応答する [7]。

4.1 運用計画立案

図 12 に、各サブシステムから取得した予測データを活用した時刻 t における最適な運用計画の立案イメージを示す。NOC-P は、ビーム制御実行時間 t ごとに ETS-9 のリソース制御に関する運用計画候補を立案する。運用計画候補は予測データに基づいて、デジタルチャネライザによる周波数フレキシビリティを活用した動的割当法や、フィーダリンク局選択機能を用いて立案される [8]。価値関数 $V(t)$ を最大化する方策 $\pi^*(t)$ に基づいて運用計画が最終的に採用される。

$$\pi^*(t) = \arg \max_{\pi} V(t) \quad (4)$$

表5 シミュレーション条件

| Item | Value |
|------------------------------------|----------------------|
| シミュレーション時間 | 86,400 秒(1日) |
| 偏波 | RHCP / LHCP |
| 帯域幅(ユーザリンク) | 500 MHz |
| 帯域幅(フィーダリンク) | 500 MHz |
| 降雨減衰モデル | ITU-R P618-12 準拠[9] |
| Modulation and Coding Scheme (MCS) | 適応変調(DVB-S2(X)) [10] |
| 衛星軌道配置 | 静止軌道 |
| 地上局 | 沖縄局／鹿島局 |
| ユーザ | 航空機 |
| ビーム数 | 86 ビーム |

ここで、時刻 t における価値関数 $V(t)$ は、予測ウィンドウサイズ W まで予測時間ステップ Δt ごとの推定価値関数 $v(t)$ の総和として与えられる。ビーム制御実行時間の間隔は予測時間ステップ Δt によって分割されており、予測ウィンドウ内においてもビーム制御実行時間になるまでは、直前に採用された運用計画のリソース制御結果に基づいて推定価値が求められる。

$$V(t) = \sum_c^W (t + c\Delta t) \quad (5)$$

推定価値関数 $v(t)$ には、システムスループットや呼損数、フィーダリンク局切替による制御コストなどを設定する。

4.2 NOC-P を用いたシミュレーションによる評価

本章では、移動体需要予測サブシステムから取得する需要変動と、光・RF 計測データ収集システムから取得する地上局周辺の環境データに関する予測情報を考慮した運用計画立案により、周波数利用効率が向上することをシミュレーションにより示す。

シミュレーション条件を表5に示す。本シミュレーションにおいて衛星ユーザとして想定している航空機は、機種に応じて要求通信速度を設定する。大まかに座席数が 100 未満、100 以上 200 未満、200 以上の機体をそれぞれ小型、中型、大型として分類している。

ビーム配置は、図13に示すように、日本全土を覆う 86 ビーム配置としており、特定の時刻における航空機の軌跡を緑十字で示している。また、ユーザリンクとフィーダリンクのシステム帯域幅はともに 500 MHz である。図14に示すとおり、周波数再利用パターンは右旋円偏波(RHCP)及び左旋円偏波(LHCP)による偏波を列ごとに使い分け、同一偏波列内においては、隣接ビーム間で周波数を重複しないように共用する 4 ビーム繰り返しを採用した。すなわち、通信需要や天

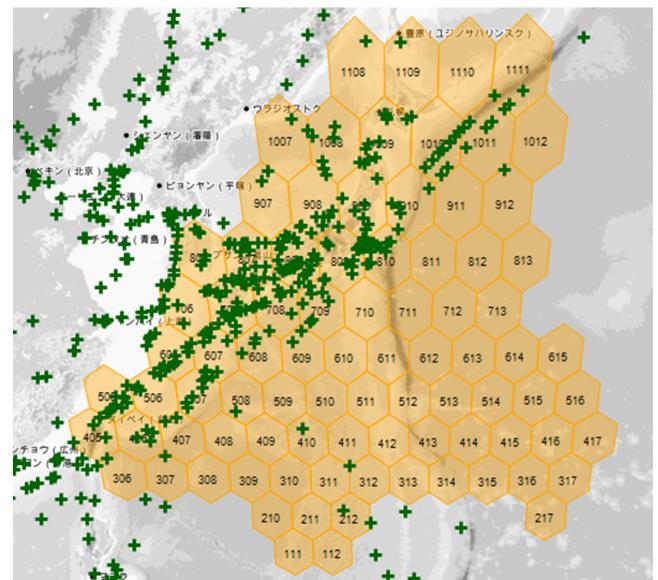


図13 日本国全土を覆う 86 ビーム及び航空機軌跡の一例

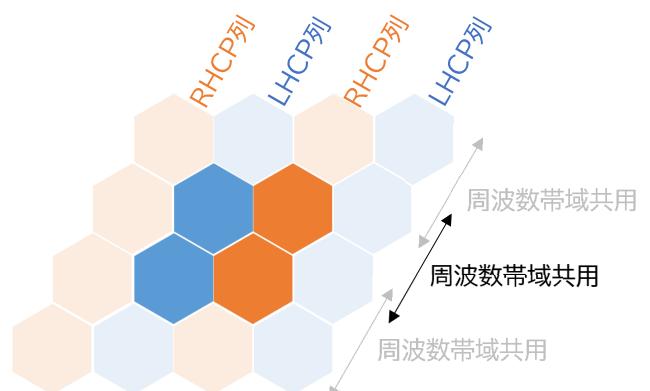


図14 周波数再利用パターン

候状況の予想データを用いて運用計画を立案する提案方式では、隣接ビーム間での需要の多寡に応じてビームごとに周波数帯域の割当を上限を 500 MHz として割り当てる。一方で、比較対象となる従来型ペイロードは予測データが無く、ハードウェアの制約を受けた

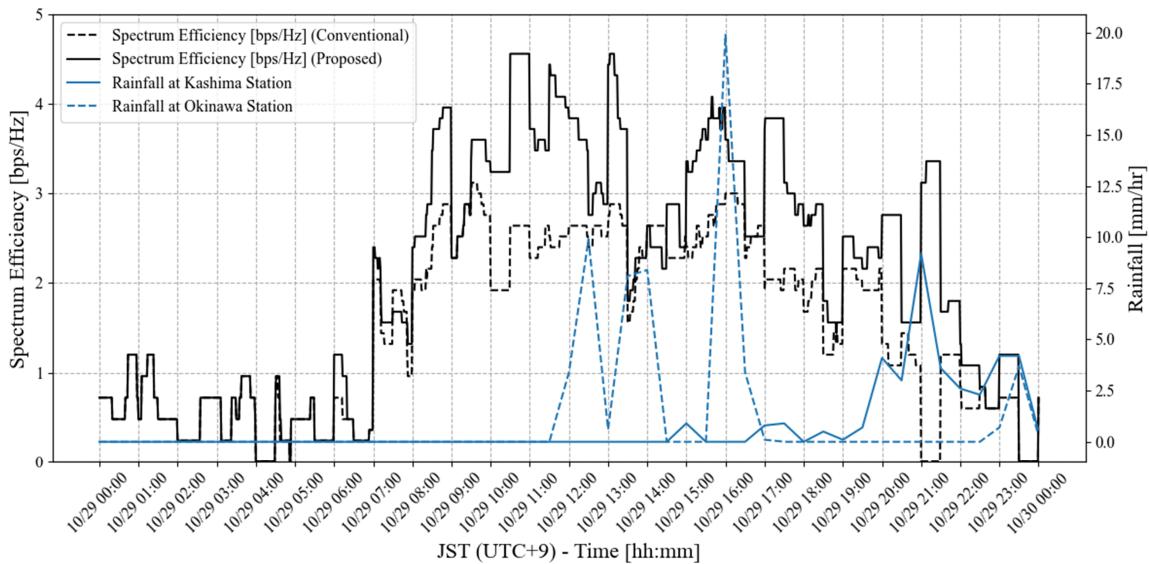


図 15 ビーム #708、808 における時刻に対する周波数利用効率の遷移

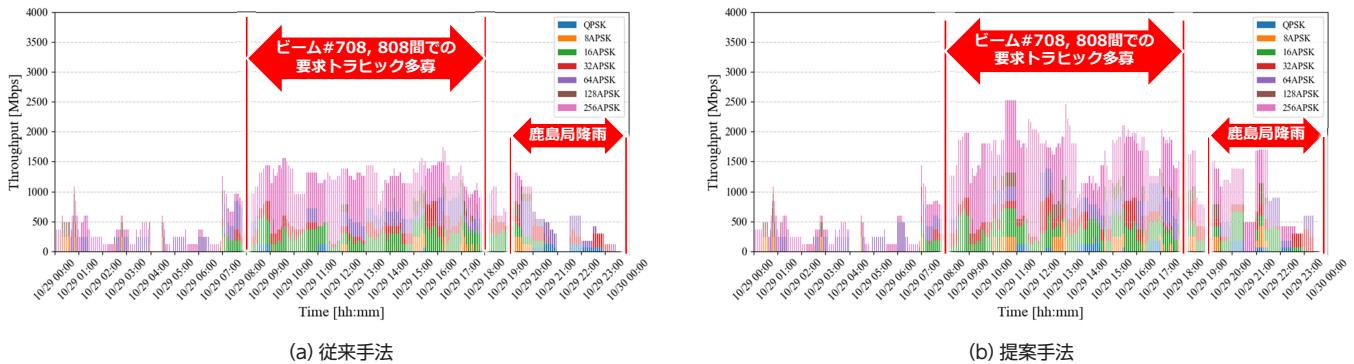


図 16 ビーム #708、808 における時刻に対する変調方式に応じたスループット遷移

固定的なりソース制御を行うものとする。すなわち、従来型ペイロードにおいては周波数の割り当てはビームごとに 250 MHz 均一であり、通信需要や天候情報の変動情報が取得できないことから、鹿島局のみを用いた上で環境が理想条件(晴天)として運用計画を立案する。ただし、提案方式では沖縄局と鹿島局による複数局の運用を行うことから、フィーダリンクにおける周波数帯域幅の共通化のために従来手法では鹿島局は RHCP 及び LHCP による両偏波運用を行うものとする。

図 15 に同一偏波かつ隣接する 2 ビームであるビーム #708、808 における時刻に対する周波数利用効率の変動を示す。本シナリオにおいては、沖縄局周辺においては 11 時から 17 時にかけて間欠的に、鹿島局周辺では 19 時から 24 時にかけて降雨が発生した。0 時から 8 時頃までの航空機の運航が少なくトラヒック需要小さい場合には、従来手法及び提案手法を問わずユーザを収容できる周波数帯域幅の余剰があるため、周波数利用効率の差は生じていない。需要の増加に伴い、主に 10 時以降には従来手法による固定割当では周波数

帯域が不足するが、提案手法では需要変動予測と動的割当法を用いることでデジタルチャネライザによるフレキシビリティ機能を活用し、周波数利用効率が向上していることが確認できる。また、鹿島局周辺で強い降雨が発生している時刻(21 時～22 時)においては従来手法の通信品質が大きく劣化するために、提案手法の周波数利用効率が従来手法を大きく上回っている。

本シナリオにおける従来手法に対する提案手法の周波数利用効率の向上効果は、86 ビーム全体で評価すると 1 日平均で 1.08 倍であった。これは、デジタルチャネライザによる周波数フレキシビリティやサイトダイバシティの顕著な効果が現れるのは、ビームごとの固定的な割当量(250 MHz)を超える要求トラヒックが発生した上でビーム間での要求トラヒック量に多寡のアンバランスが発生した場合か、特定の地上局において強い降雨が発生することでフィーダリンクにおける通信品質の劣化が生じた場合に限定されるためである。すなわち、全時間の全ビームに着目した評価においては、周波数利用効率の改善効果が平滑化されたと推察

される。

ビーム #708、808 に着目した周波数利用効率の向上効果は平均で 1.21 倍、1 時間単位での降順の上位 3 時間では 2.43 倍(21 時～22 時)、1.84 倍(12 時～13 時)、1.67 倍(10 時～11 時)であった。21 時～22 時は鹿島局における強い降雨が発生していたことで、予測情報を活用した運用計画立案によるサイトダイバシティの効果が現れたと考えられる。10 時～11 時や 12 時～13 時については、図 13 に示すとおり、ビーム #708、808 は多くの航空機が運行し、ビームごとの固定的な割当量を超える要求トラヒック量が発生した上で、ビーム間での要求トラヒックの多寡が生じ、デジタルチャネライザによる周波数フレキシビリティ効果が現れた時間帯であると考えられる。

図 16 に時刻に対するスループットの変動を示す。スループットは MCS の変調方式別の積み上げ棒グラフとなっており、左図が従来手法、右図が提案手法である。図 15 に示した周波数利用効率の変動と同様に、トラヒック需要が小さい場合には従来手法と提案手法との間で大きな差はない。一方で、ビーム間で不均一な要求トラヒック量が発生している場合には提案手法のスループットが大きく改善している。また、降雨時のスループット及び利用された MCS の内訳には、周波数効率向上に寄与する顕著な傾向が確認される。従来手法では、鹿島局周辺の降雨減衰の影響により CNR が大きく低下し、低 CNR でも通信可能なロバストな比較的底辺ちょうどな MCS の割合が支配的になる。提案手法では、運用計画立案時に鹿島局周辺での降雨に関する予測情報を取り込むことで、事前に沖縄局への割当を増加させ、降雨時においても 256 APSK を含めた周波数利用効率が高い MCS が適応的に選択されている。すなわち、サイトダイバシティ技術を活用することでスループットを向上させていることが分かる。

以上の結果から、従来の固定的な衛星運用と比較して、予測情報を活用することで最大で 2 倍以上の周波数利用効率改善効果を得る運用計画立案技術を確立できたと考える。また、地上総合評価において擬似衛星局を用いることで NOC-P における運用計画立案技術の地上実証を行った。詳細は [11] を参照されたい。

5 おわりに

本稿では、次世代 HTS や VHTS、SDS が有する柔軟なリソース制御機能を活用するための運用計画作成技術として、最適な衛星通信システム制御方式に関する理論検討や、AI 技術を用いた気象状況や移動体需要の予測、予測情報を活用した運用計画立案手法について示した。

近年の衛星機能の高度化に伴い、運用・制御技術の重要性が強調されている。多種多様な入力情報を基に最適な衛星運用計画を立案し、システム全体の性能を向上させることは、ひいてはビット単価の低減による商用化や宇宙市場の活性化をもたらす。将来的には、宇宙通信インフラストラクチャは生活の質の向上や、災害時における冗長性担保、デジタルデバイドにおける通信の提供などを実現するとともに、社会基盤として“存在して当然のもの”になると考えられる。

今後は 2025 年度以降に打ち上げ予定の ETS-9 を用いた軌道上における実証や、静止軌道衛星のみならず非静止軌道衛星や HAPS などの異なる NTN ノードとのマルチオービット化を含めた取組を進めたい。

謝辞

本研究は、総務省「電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)」の「多様なユースケースに対応するための Ka 帯衛星の制御に関する研究開発」で実施した。

【参考文献】

- 1 T. Rossi, M. De Sanctis, E. Cianca, M. Ruggieri, and H. Fenech, "Future Space-based Communications Infrastructures Based on High Throughput Satellites and Software Defined Networking," 2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering, pp.332–337, 2015.
- 2 角田 聰泰, 須永 輝巳, 内田 繁, 草野 正明, 中本 成洋, 坂井 英一, 堀江 延佳, “固定・可変ビーム通信サブシステム,” 情報通信研究機構研究報告, 本特集号, 3-1, 2025.
- 3 Kazumasa Tamada, Yuichi Kawamoto, and Nei Kato, "Bandwidth Usage Reduction by Traffic Prediction Using Transfer Learning in Satellite Communication Systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.73, no.5, pp.7459–7463, May 2024.
- 4 内田 繁, 堀江 延佳, 草野 正明, 須永 輝巳, 角田 聰泰, 中本 成洋, 坂井 英一, “ETS-9衛星通信管制システムの開発状況,” 第 68 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2024.
- 5 鈴木 健治, 國森 裕生, 豊嶋 守生, “衛星 - 地上間光通信のための環境データ情報統計処理報告,” 信号処理学会ソサイエティ大会(通信), p.194, 2015.
- 6 大津留 豪, 菅 智茂, 阿部 侑真, 関口 真理子, 鈴木 健治, K. Dimitar, 小野 文枝, 辻 宏之, “ETS-9 通信ミッションの地上系システムにおける運用計画作成機能の開発状況,” 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2023.
- 7 中村 凌, 木村 紋子, E. Kim, 柴田 優斗, “多様なユースケースに対応するための Ka 帯衛星の制御に関する研究開発 通信需要・回線条件の予測技術,” 第 68 回宇宙科学連合講演会講演集, 2024.
- 8 Y. Abe, M. Okawa, A. Miura, K. Okada, M. Akioka, and M. Toyoshima, "Performance Study of Frequency Flexibility in High Throughput Satellite and Its Contribution to Operations Strategy," Proceedings of the 37th International Communications Satellite Systems Conference.
- 9 ITU-R, "Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-space Telecommunication Systems," Recommendation ITU-R, p.618–12, 2015.
- 10 ETSI, "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation Guidelines for the Second Generation System for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and Other Broadband Satellite Applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X)," TR 102 376-2 V.1.2.1, 2021.
- 11 谷内 宣仁, 鄭炳表, 高橋 卓, 大津留 豪, 関口 真理子, 三浦 周, “擬似衛星局の開発と地上総合評価,” 情報通信研究機構研究報告, 本特集号, 5-1, 2025.

4 ETS-9 地上系設備の研究開発



大津留 豪 (おおつる ごう)
ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
研究员
博士(工学)
NTT、宇宙通信



川本 雄一 (かわもと ゆういち)
東北大学大学院情報科学研究科
教授
博士(情報科学)
情報通信、情報ネットワーク



木村 紋子 (きむら あやこ)
株式会社天地人取締役兼 CFO
博士(工学)
流体力学、リモートセンシング、機械学習
【受賞歴】
2010年 平成22年度日本応用数理学会論文賞
(応用部門)

谷内 宣仁 (たにうち のぶひと)
ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
主任研究技術員
宇宙通信システム