

博士學位論文

論文題目 非地上系統合ネットワークにおける
通信要求に基づく動的リソース制御
に関する研究

提出者 東北大学大学院情報科学研究科
応用情報科学専攻

学籍番号 C O I D 4 0 0 5

氏名 高橋 昌希

目次

第1章 序論	1
1.1 本論文の背景	1
1.2 本論文の目的	3
1.3 本論文の構成	4
第2章 衛星通信システムを用いた送信電力及びビーム指向性の融合制御	5
2.1 はじめに	5
2.2 想定システムとその課題	6
2.2.1 想定システム	6
2.2.2 DBF 搭載型衛星通信システムにおけるリソース制御上の課題	8
2.3 DBF 搭載型衛星通信システムを用いた送信電力・ビーム指向性の融合制御方式	12
2.3.1 DBF 搭載型衛星通信システムのスループット算出モデル	13
2.3.2 通信要求に応じた送信電力・ビーム指向性の融合制御方式	15
2.4 性能評価	17
2.4.1 評価環境	18
2.4.2 評価結果	23
2.5 まとめ	28
第3章 通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング	29
3.1 はじめに	29

3.2	想定システムとその課題	30
3.2.1	想定システム	30
3.2.2	通信要求予測の仕組み	31
3.2.3	通信要求予測に基づくリソース制御上の課題	35
3.3	通信要求に基づくリソース制御の動的スケジューリング方式	38
3.3.1	提案方式の概要	38
3.3.2	通信要求予測モデルの更新タイミング最適化	39
3.3.3	リソース制御の切替タイミング最適化	42
3.3.4	通信要求予測とリソース制御間の連携フロー	44
3.4	性能評価	47
3.4.1	評価環境	47
3.4.2	評価結果	51
3.5	まとめ	57
第4章	双方向中継伝送の効率化に向けた飛翔体の送信電力制御	59
4.1	はじめに	59
4.2	想定システムとその課題	60
4.2.1	想定システム	60
4.2.2	双方向中継伝送における飛翔体の送信電力制御上の課題	61
4.3	双方向中継伝送の効率化に向けた飛翔体の送信電力制御方式	62
4.3.1	提案方式の概要	62
4.3.2	双方向中継伝送における伝送容量の算出モデル	64
4.3.3	飛翔体における通信要求に応じた送信電力配分の最適化	66
4.4	性能評価	69
4.4.1	評価環境	69
4.4.2	評価結果	71
4.5	まとめ	76

第 5 章 結論	77
著作物利用許諾	81
発表文献一覧	87
参考文献	93
謝辞	99

目次

1.1	本論文を構成する各研究の位置付け	4
2.1	想定する衛星通信システムの全体像 © 2020 IEICE	6
2.2	送信電力が同一周波数ビーム間干渉に及ぼす影響	7
2.3	ビーム指向性が同一周波数ビーム間干渉に及ぼす影響	7
2.4	同一周波数ビーム間の距離が電波干渉に及ぼす影響	9
2.5	異なる周波数帯域を持つ隣接ビーム間の距離 d_{diff} とダウンリンク SINR の関係が地上端末のビーム選択に与える影響 © 2020 IEICE	10
2.6	DBF 搭載型衛星を用いた送信電力・ビーム指向性の融合制御の概 要図	11
2.7	DBF 搭載型 HTS のビーム配置パターン	12
2.8	衛星ビームの送信アンテナ利得の位置的關係	13
2.9	解析評価用ビーム配置パターン	18
2.10	$n_{\text{trf}}=26, \Sigma_{xy} = 3.0 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$ におけるトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理 的分布 © 2020 IEICE	22
2.11	$n_{\text{trf}} = 26, \Sigma_{xy} = 3.0 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$ における各ケースのトラヒック収容率 T_{acc} © 2020 IEICE	23
2.12	図 2.10 (ケース C) でのトラヒック集中地域の分散共分散行列 Σ_{xy} に応じたトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理的分布	24
2.13	図 2.10 (ケース C) での分散共分散行列 Σ_{xy} とトラヒック収容率 T_{acc}	25

2.14	$\Sigma_{xy} = 2.0 \cdot 10^4 E_2$ におけるトラヒック集中地域数 n_{trf} とトラヒック 収容率 T_{acc} 間の関係	26
3.1	想定する非地上系統合ネットワークの全体像	30
3.2	リソース制御切替タイミング最適化モデルを適用可能な制御方式 の一例	31
3.3	スライディングウィンドウを用いた通信要求予測の時間的流れ	33
3.4	LSTM モデルを用いた長期的予測の仕組み	34
3.5	通信要求予測モデルに係る更新タイミングの遅延により生じる問題	36
3.6	リソース制御に係る切替タイミングの遅延により生じる問題	36
3.7	衛星通信システム特有の制約に伴う実行タイミング導出上の課題	37
3.8	提案スケジューリング方式の概要図	39
3.9	通信要求予測モデルの更新タイミング最適化	41
3.10	リソース制御の切替タイミング最適化	43
3.11	全 HAPS の総トラヒック要求量に係る実際値と予測値の時間変動	52
3.12	通信要求予測に基づく電力リソース制御による伝送容量の時間変動	54
3.13	総リソース過不足量及びトラヒック収容率の観点での周期的制御 と提案スケジューリング方式間の比較	56
4.1	非地上系統合ネットワークでの HAPS を用いた双方向中継伝送 © 2022 IEICE	60
4.2	双方向中継伝送における HAPS による送信電力配分の統合制御の 概念図	62
4.3	提案モデルを用いた HAPS での送信電力配分の導出 © 2022 IEICE	63
4.4	非地上系統合ネットワークにおける双方向中継伝送のシステムモ デル	64
4.5	評価環境	70

4.6	HAPSでの送信電力配分によるアップ/ダウンリンクにおける伝送容量の増減影響 © 2022 IEICE	71
4.7	アップリンクに配分する HAPS の送信電力と地上端末群における要求満足度間の関係 © 2022 IEICE	73
4.8	提案モデル適用による要求満足度の改善効果 © 2022 IEICE	75

表 目 次

2.1	送信電力とビーム指向性の融合制御に係る評価パラメータ設定 . . .	21
3.1	HAPS の配置座標及びトラヒック発生モデルに係るパラメータ設定	49
3.2	通信要求予測に基づく動的リソース制御の評価パラメータ設定 . . .	50
4.1	双方向中継伝送における送信電力制御の評価パラメータ設定	70

第1章

序論

1.1 本論文の背景

Beyond 5G/6G の時代（2030 年～2040 年）における日本では，2040 年には人口が約 1 億 1100 万人にまで減少し，現時点における居住地域の約 2 割が無居住化すると予測されている [1]．それに伴い，生産年齢人口の減少による生産力維持の難化を始め，条件不利地域への遠隔医療や自動運転，ネット通販の爆発的な需要拡大といった社会構造を不安定化させる様々な課題が顕在化すると予想される．このような状況を想定した通信の在り方として，近年では 6G において通信衛星や高高度プラットフォーム（HAPS: High-Altitude Platform Station）等の飛翔体を構成要素とする非地上系統合ネットワークの役割が重要視されている [2, 3]．非地上系統合ネットワークはこれまで地上系とは独立してアーキテクチャが構築されており，地上系との接続に関する標準化は成されていなかった．一方，3rd Generation Partnership Project（3GPP）での標準化においては，2017 年 3 月より Release 17 では非地上系統合ネットワークと 5G/Beyond 5G 間の連携に関する技術検討が進行しており [4, 5]，Release 18 では衛星バックホール回線の Beyond 5G/6G 網への組込が仕様化検討項目として掲げられている [6]．前述した標準化が完了すると，非地上系統合ネットワークに Beyond 5G/6G ユーザのトラフィックが大量に流れるようになるとともに，非地上系統合ネットワークのユースケース

が多様化するため、将来的に非地上系統合ネットワークへの通信要求の増加や多様化が想定される [7-9].

一方、非地上系統合ネットワークを構成する衛星で主に使用される Ka 帯等の高周波数帯については、固定通信や移動通信等の地上回線と衛星回線の共用化が進んでおり、周波数帯域の制約が厳しくなることが懸念されている。さらに、衛星や HAPS は通信リソース制御の切替における時間間隔が地上系に比べて長く、その時間間隔の最小値を制御周期としても、時々刻々と変動する地上ユーザ端末群からの通信要求に対するリソース割当により生じる通信リソースの無駄が最小化される保証はない [10]. 特に、衛星ではビーム単位で通信リソース割当が実行されるため、ビーム内に多数の地上ユーザ端末が分布する状況では、各地上ユーザ端末における通信要求量の変動の相関が低いほど通信リソース割当の調整は困難になる。したがって、今後 Beyond 5G/6G 網への接続が期待される非地上系統合ネットワークでは、地理的かつ時間的に変動する通信要求量に合わせて、有限の周波数帯域内で通信リソースを動的に割り当てることが求められる。そこで本研究では、地上ユーザ端末群からの通信要求量の地理的かつ時間的な変動に対応可能とする非地上系統合ネットワークを用いた動的リソース制御について検討する。

1.2 本論文の目的

本研究は、衛星や飛翔体等で構成される非地上系統合ネットワークにおいて、地上ユーザ端末群からの通信要求に基づいて効率的に通信リソースの割当を行うための動的リソース制御方式を構築することが目的である。前述の通り、構築する動的リソース制御方式は地上ユーザ端末群からの通信要求量の地理的かつ時間的な変動に対応可能とするものであり、衛星や飛翔体等における通信リソース制御上の切替周期や地上ユーザ端末群からの通信要求量の地理的分布等をパラメータとして反映するとともに、それらパラメータが通信性能に与える影響について相互関係を明確化することで、高いリソース利用効率を実現する。また、提案方式について従来方式との比較評価によって有効性の確認を行うほかに、提案方式を用いた際の性能について数学的解析を行う。上記に従って研究に取り組むことで、現在の非地上系統合ネットワークが抱える問題を解決する次世代の非地上系統合ネットワークにおける動的リソース制御方式を確立する。

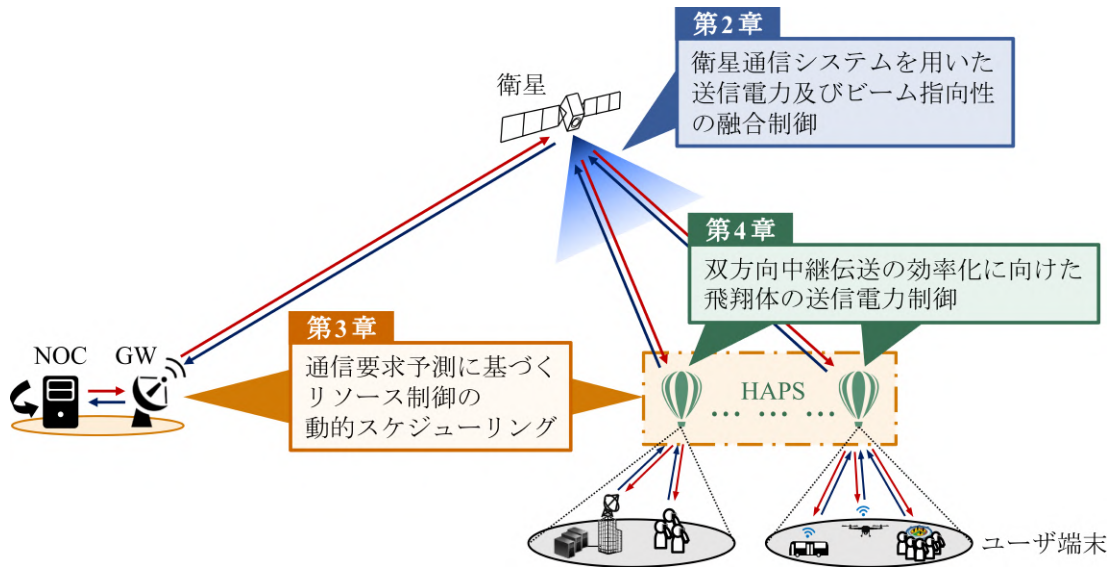


図 1.1: 本論文を構成する各研究の位置付け

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章は序論であり，本論文の背景とその目的について述べるとともに，本論文を構成する各研究の位置付けを明確化する．第2章では，衛星打ち上げ後においても衛星ビームの指向性および配置位置を制御可能な機能としてDBF（Digital Beam Forming）に注目し，DBF搭載型衛星通信システムを用いた送信電力とビーム指向性の融合制御方式を構築する．第3章では，非地上系統合ネットワークにおける通信要求予測を基にしたリソース制御の動的スケジューリングについて提案する．第4章では，非地上系統合ネットワークにおける双方向中継伝送の効率化に向けた飛翔体の送信電力制御方式を設計する．第5章は結論であり，本論文のまとめである．なお，本論文を構成する第2章～第4章の研究はそれぞれ，非地上系統合ネットワークにおいて図1.1に示すような位置付けとなる．

第2章

衛星通信システムを用いた送信電力 及びビーム指向性の融合制御

2.1 はじめに

本章では、衛星ビームの指向性および配置位置を制御可能なDBF（Digital Beam Forming）に着目し、DBF搭載型衛星通信システムを用いた送信電力とビーム指向性の同時制御方式にマルチビーム配置制御を融合した柔軟性の高い電力リソース割当へ適用可能なスループット算出モデルを構築する。その上で、衛星カバーエリア内におけるトラヒック要求量に対する総スループットの比率を最大化するために、DBF搭載型衛星により照射される各ビームの送信電力とビーム指向性、配置位置の最適化を図る電力リソース割当モデルを提案する。

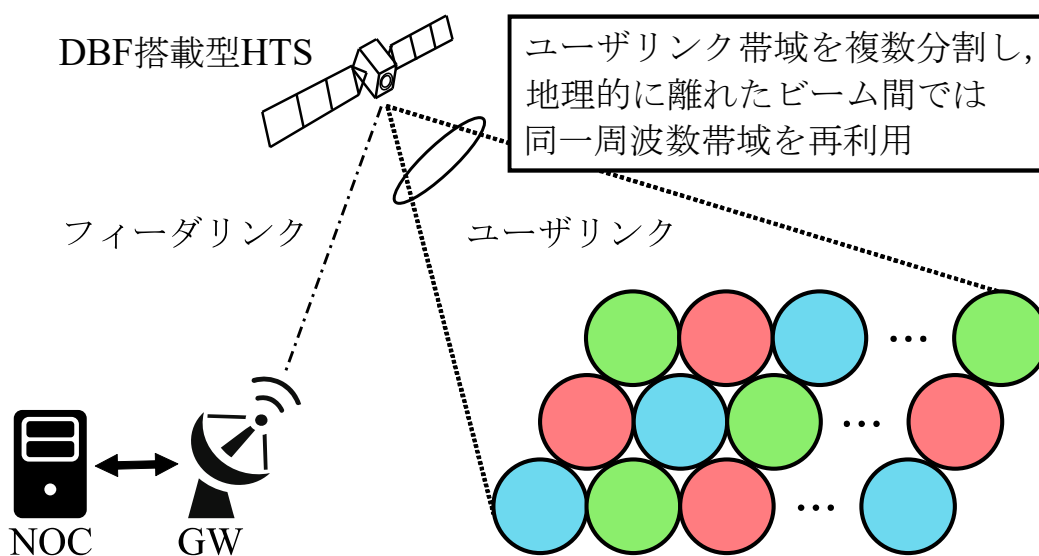


図 2.1: 想定する衛星通信システムの全体像 © 2020 IEICE

2.2 想定システムとその課題

2.2.1 想定システム

想定する DBF 搭載型衛星通信システムの全体像を図 2.1 に示す. 本研究では, 複数本のビームで通信環境を提供し, ビームごとに割り当てる周波数帯域を繰り返し利用することで周波数利用効率の向上を図るハイスループット衛星 (HTS: High Throughput Satellite) を想定する [11]. HTS の使用周波数帯は Ka 帯とし, ユーザリンクに割り当てられた周波数帯域は複数に分割する [12]. その上, 隣接ビーム間では異なる周波数帯域を利用し, 地理的に離れた箇所に位置するビーム間では同一周波数帯域を再利用することとする. また, フィーダリンクには GW (Gateway) と NOC (Network Operation Center) が接続され, NOC は地上端末から一定時間毎に受信したトラフィック要求情報を基に各ビームの送信電力, 送信アンテナ利得, ビーム中心の配置位置を設定し, 各地上端末はこれらの設定によって割り当てられたリソースを使用して通信を実施するものとする.

第2章 衛星通信システムを用いた送信電力及びビーム指向性の融合制御

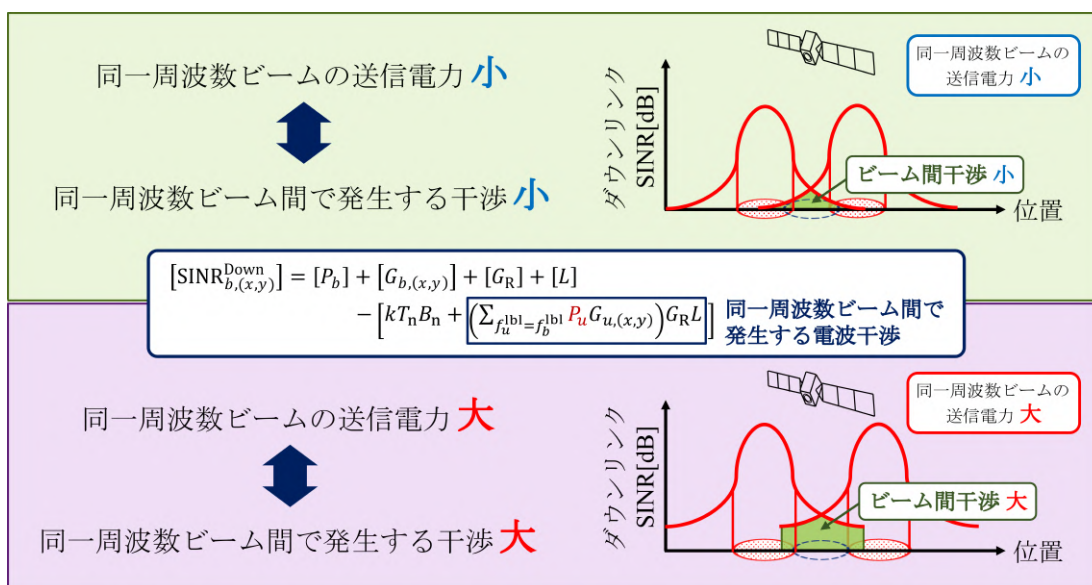


図 2.2: 送信電力が同一周波数ビーム間干渉に及ぼす影響

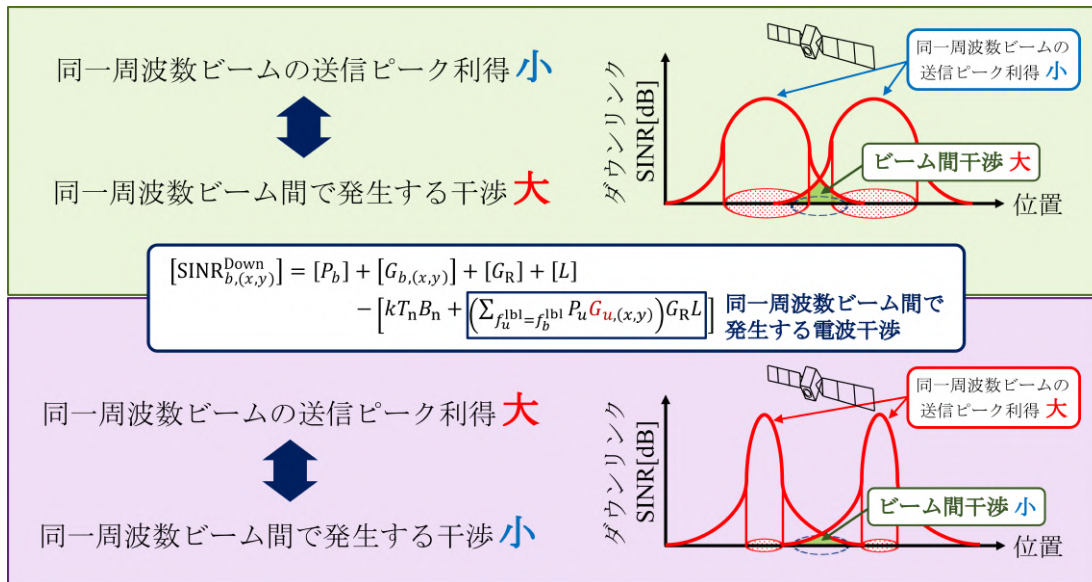


図 2.3: ビーム指向性が同一周波数ビーム間干渉に及ぼす影響

なお、本研究で HTS への搭載を想定している DBF は、デジタル信号処理を通して所望のアンテナパターンを高速かつ並列的に作成することで複数本のビームを形成する機能である [13–16]。HTS に複数設置された各アンテナ素子で送受信する通信信号に対して振幅と位相それぞれの重みを付け、それにより生成された素子信号を合成することで、アンテナを機械的に回転移動させることなく複数本のビームを異なる方向に照射し、フレキシブルにビーム形状を形成することができる。

2.2.2 DBF 搭載型衛星通信システムにおけるリソース制御上の課題

近年では DBF 機能を HTS に搭載し、通信リソース割当の効率化に向けて様々な研究が行われている。DBF 搭載型 HTS 通信システムにおける電力リソース割当の変更が可能な主な制御パラメータは各ビームの送信電力 [17,18]、ビーム指向性（送信ピーク利得） [19,20]、配置位置 [21–23] である。しかし、これまでに提案されてきた電力リソース割当モデルに関しては、いずれかの制御パラメータのみに焦点を当てた検討に留まっており、トラヒック要求量の地理的分布の変化への適応が困難であった。

送信電力制御においては、図 2.2 に示すように、衛星ビームの照射カバー範囲内でのトラヒック要求量の量的変化に応じて、衛星の各ビームの送信電力を動的に変更することで電力リソースの割当効率を向上する制御方式も検討されている。しかしながら、ビーム指向性が衛星のアンテナ構成及び機能のみに依存するため、各ビームのカバーエリア内におけるトラヒック要求量の地理的偏りに応じた電力リソース配分が困難である。

また、ビーム指向性制御においては、図 2.3 に示すように、ビーム指向性を低下させる場合では、同一周波数帯域を持つビーム間で発生する電波干渉による影

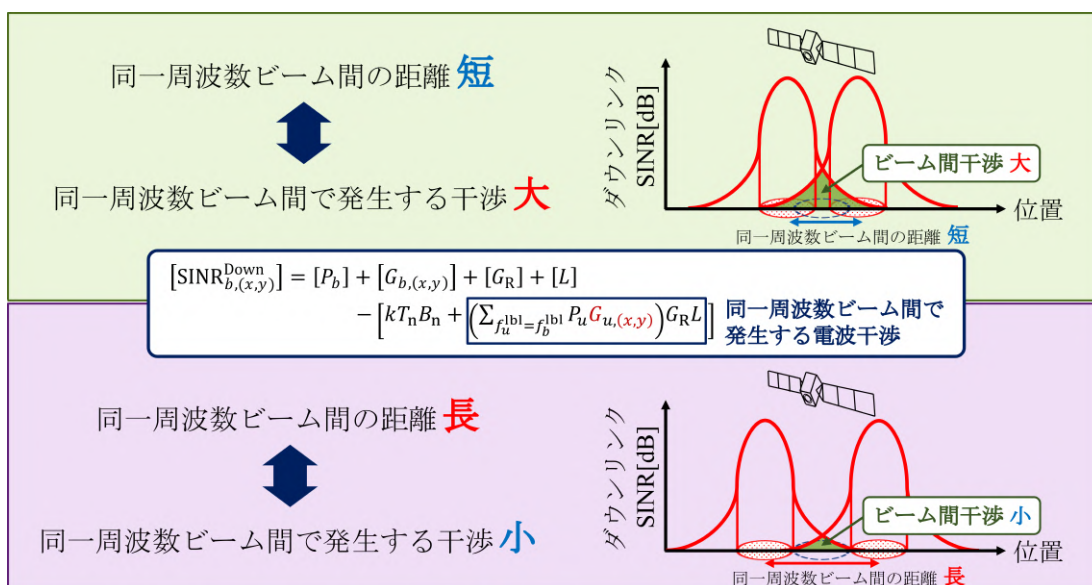


図 2.4: 同一周波数ビーム間の距離が電波干渉に及ぼす影響

響の増大によって、信号品質の劣化を誘起しやすいという課題がある。さらに、ビーム指向性を高める場合では、ビーム中心部外の領域において電力リソース割当量が減少し、通信要求を満足することが困難となる。

一方、衛星ビームの配置位置制御においては、電力リソース割当上の懸念点が2つ存在する。一つは、同一周波数帯域を持つ隣接ビーム間の距離が電波干渉に与える影響についてである。図 2.4 に示すように、衛星から照射される電波はビーム中心で最も強く、ビーム中心から離れるほど減衰していくのが一般的であるが、同一周波数帯域を持つ隣接ビーム間の距離 d_{same} が短いほど電波干渉の影響による減衰は大きくなるため、受信信号品質を示すダウンリンク信号対雑音干渉比 (SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio) が減少する。

もう一つは図 2.5 に示すように、異なる周波数帯域の隣接ビーム間の距離とダウンリンク SINR の関係が地上端末のビーム選択に与える影響についてである。衛星通信サービスを利用する地上端末は、ユーザリンクを介してダウンリンク

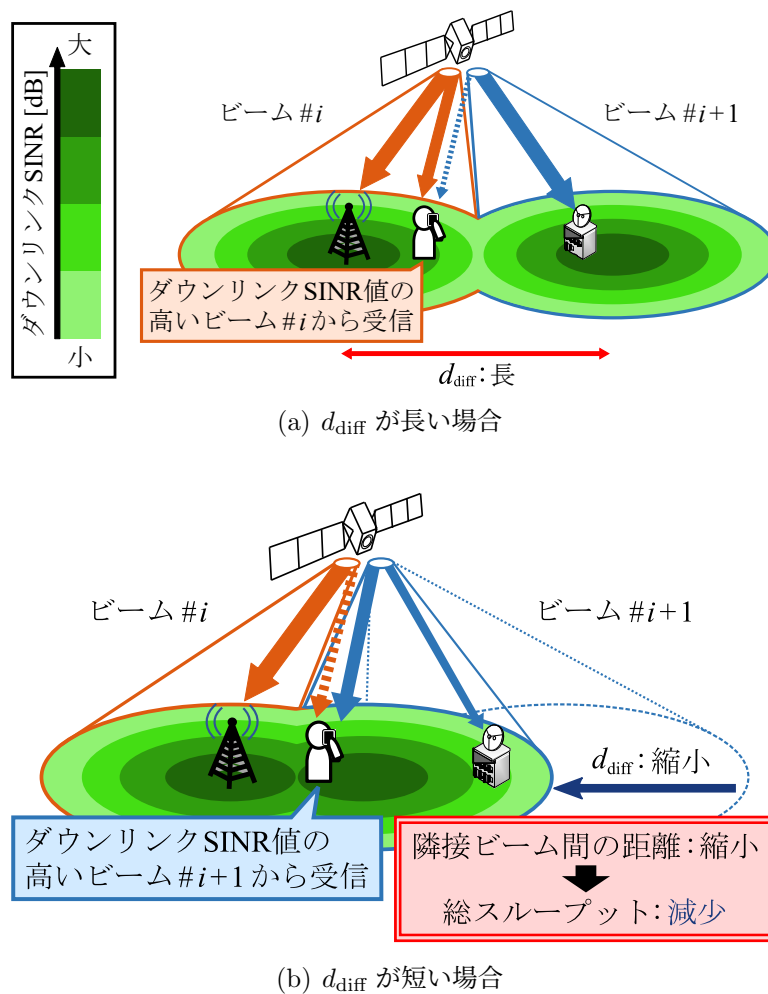


図 2.5: 異なる周波数帯域を持つ隣接ビーム間の距離 d_{diff} とダウンリンク SINR の関係が地上端末のビーム選択に与える影響 © 2020 IEICE

第2章 衛星通信システムを用いた送信電力及びビーム指向性の融合制御

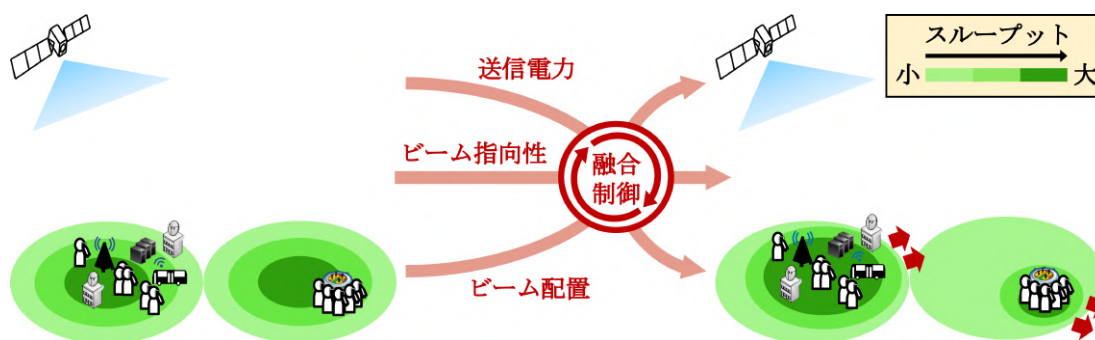


図 2.6: DBF 搭載型衛星を用いた送信電力・ビーム指向性の融合制御の概要図

SINR 値が最大のビームの電波を選択する。そのため、異なる周波数帯域を持つ隣接ビーム間の距離 d_{diff} が縮小すると、各ビームにおけるダウンリンク SINR 値の高い領域が互いに重なるため、カバーエリア全体の総スループットは低下する。

無論、通信要求の地理的分布の変化に合わせた柔軟性の向上に向けて、DBF 搭載型 HTS における各ビームの送信電力、ビーム指向性、配置位置を融合制御することで、トラフィック要求量の地理的分布の変化に適応する柔軟性が向上されるのは予想しやすい。しかし、送信電力、ビーム指向性、配置位置の組み合わせ次第でスループットの位置特性は異なり。これら制御パラメータの組み合わせ値と HTS の全カバーエリアにおける総スループット間の定量的関係を明らかにした先行研究は存在しない。そのため、DBF 搭載型 HTS 通信システムにおいて、上記の定量的関係を明瞭にし、各ビームの送信電力、ビーム指向性、配置位置の融合制御へ適用可能な電力リソース割当モデルを独自に構築する必要がある。

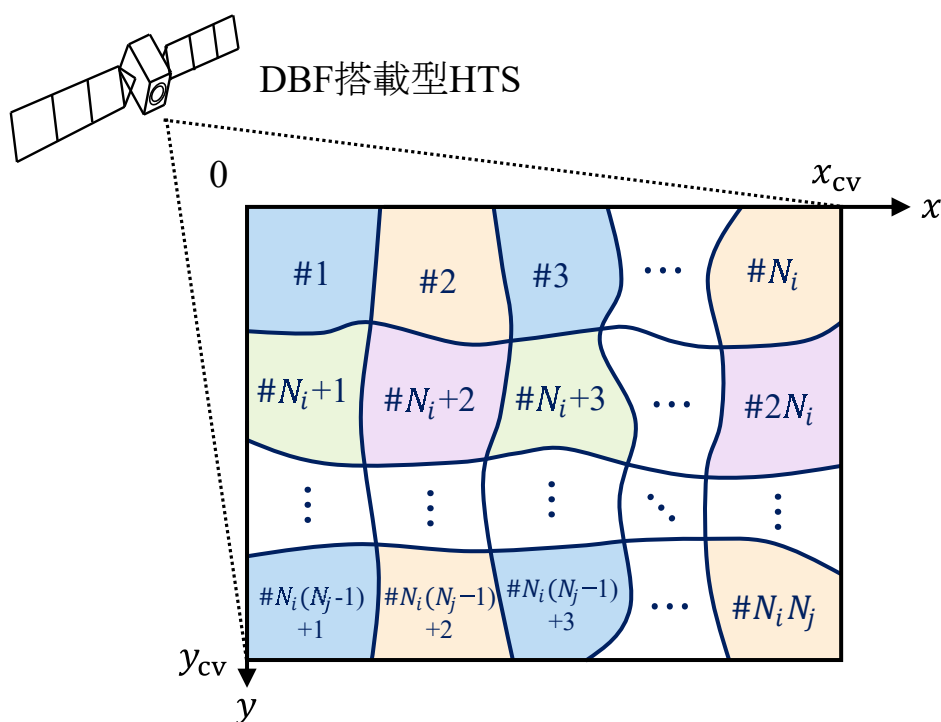


図 2.7: DBF 搭載型 HTS のビーム配置パターン

2.3 DBF 搭載型衛星通信システムを用いた送信電力・ビーム指向性の融合制御方式

本節では、図 2.6 に示すような DBF 搭載型 HTS 通信システムを用いた送信電力とビーム指向性、配置位置の融合制御を可能とする電力リソース割当モデルについて提案する。はじめに、DBF 搭載型 HTS 通信システムを用いた電力リソース割当に関する先行研究の課題を指摘し、本研究で提案する融合制御を用いた電力リソース割当の必要性について述べる。次に、DBF 搭載型 HTS 通信システムに融合制御を適用した場合のスループット算出モデルを設計する。最後に、トラフィック要求量に対するスループットの比率を示すトラフィック収容率の最大化を目的とする各ビームの送信電力とビーム指向性、配置位置の最適化を図る電力リソース割当モデルを提案する。

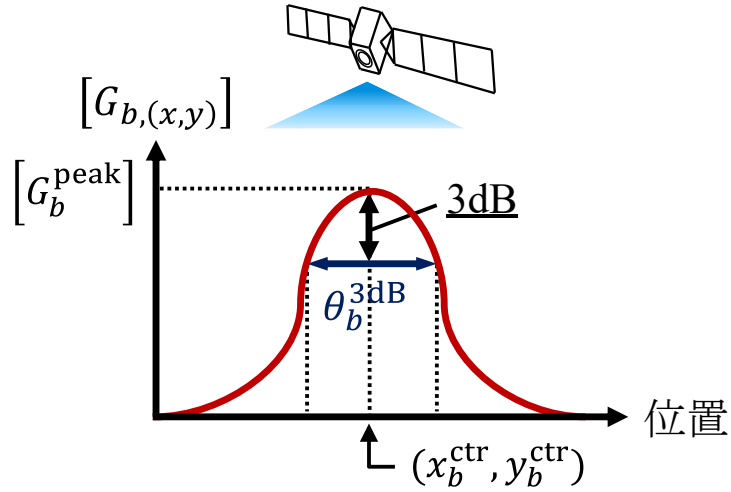


図 2.8: 衛星ビームの送信アンテナ利得の位置的関係

2.3.1 DBF 搭載型衛星通信システムのスループット算出モデル

本項では、DBF 搭載型 HTS 通信システムにおいて送信電力とビーム指向性の同時制御とマルチビーム配置制御を融合した電力リソース割当への適用が可能なスループット算出モデルの定式化を行う。

はじめに、DBF 搭載型 HTS のビーム配置パターンを図 2.7 に示す。本研究では、 x 軸方向に 1 行あたり N_j 本のビームを配置し、その連続したビームの行を y 軸方向に N_i 列並べる。また、DBF 搭載型 HTS の全カバーエリアは $x_{cv} \times y_{cv}$ の方形領域とする。そして、合計 $N_i N_j$ 本のビームの中心が DBF 搭載型 HTS の全カバーエリア $x_{cv} \times y_{cv}$ 内に収まるように配置する。以後、DBF 搭載型 HTS におけるビーム数および全カバーエリアは $N (= N_i N_j)$ 、 $S_{all} (= x_{cv} \times y_{cv})$ と記す。

次に、DBF 搭載型 HTS により照射されるビーム指向性を定義づける。ビーム指向性の主な指標であるビーム b の送信ピーク利得を G_b^{peak} と表すと、 G_b^{peak} は次式で与えられる [13].

$$G_b^{\text{peak}} = \eta \left(\frac{70\pi}{\theta_b^{3\text{dB}}} \right)^2 \quad (2.1)$$

ここで、 η はそれぞれアンテナ開口能率を示す。 $\theta_b^{3\text{dB}}$ はビーム b における 3dB ビーム幅であり、図 2.8 に示すように、 $\theta_b^{3\text{dB}}$ と G_b^{peak} 間には反比例の関係がある。なお、 $\theta_b^{3\text{dB}}$ は送信ピーク利得から 3dB 低い位置とビーム中心間の角度幅に相当し、光速 c 、搬送周波数 f 、アンテナ径 D が関係する制約 $\theta_b^{3\text{dB}} \geq 70c/fD$ の下で DBF 機能を適用することによって制御できる。また、地上端末の位置 (x, y) におけるビーム b の送信アンテナ利得 $G_{b,(x,y)}$ は、 G_b^{peak} を用いることで次式のように表される。

$$[G_{b,(x,y)}] = [G_b^{\text{peak}}] - 12 \cdot \frac{G_b^{\text{peak}}}{\eta} \left(\frac{\theta_{b,(x,y)}}{70\pi} \right)^2 \quad (2.2)$$

なお、 $[q]$ は q の dB 値を表す。 $\theta_{b,(x,y)}$ はビーム b の中心座標 $(x_b^{\text{ctr}}, y_b^{\text{ctr}})$ と地上端末の位置 (x, y) の間の角度幅を示しており、地上-衛星間距離 h_{GEO} を用いて次式で算出される。

$$\theta_{b,(x,y)} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(x - x_b^{\text{ctr}})^2 + (y - y_b^{\text{ctr}})^2}}{h_{\text{GEO}}} \quad (2.3)$$

さらに、フォワードリンクにおけるアップ/ダウンリンクの SINR について定式化し、地上端末のスループットを算出する。本研究では、DBF 搭載型 HTS がユーザリンク（ダウンリンク）と接続する地上端末に対して電力リソースを直接割り当てる想定であるため、アップリンク SINR (SINR^{Up}) は一定とする。一方、位置 (x, y) に分布する地上端末におけるビーム b のダウンリンク SINR を $\text{SINR}_{b,(x,y)}^{\text{Down}}$ と表すと、 $\text{SINR}_{b,(x,y)}^{\text{Down}}$ は次式によって導出される [24]。

$$[\text{SINR}_{b,(x,y)}^{\text{Down}}] = [P_b] + [G_{b,(x,y)}] + [G_R] + [L] - \left[kT_n B_n + \left(\sum_{f_u^{\text{bl}}=f_b^{\text{bl}}} P_u G_{u,(x,y)} \right) G_R L \right] \quad (2.4)$$

ここで、 P_b はビーム b の送信電力、 G_R は地上端末の受信アンテナ利得、 L はダウンリンク伝搬損失、 k はボルツマン定数、 T_n は地上端末のアンテナ雑音温度、

B_n は雑音帯域幅を示している。なお、右辺第5項内の右項は、ビーム b における周波数帯域 f_b^{lbl} と同一の周波数帯域を持つビームからの電波干渉による影響の大きさを表す。その上、位置 (x, y) に分布する地上端末において、アップリンクとダウンリンクで構成される衛星通信回線の総合的な SINR を $\text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Total}}$ と表すと、 $\text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Total}}$ はアップ/ダウンリンクの SINR 値を用いて次式で求められる [25]。

$$\text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Total}^{-1}} = \text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Up}^{-1}} + \text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Down}^{-1}} \quad (2.5)$$

なお、 $\text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Down}}$ については次式に示す通り、位置 (x, y) に分布する地上端末は全 N 本のビームの内、 $\text{SINR}_{b,(x,y)}^{\text{Down}}$ が最大であるビームのみから受信することを表しており、複数ビーム間の配置関係の変化に伴って地上端末の選択するビームが替わる場合に対応している。

$$[\text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Down}}] = \max_{1 \leq b \leq N} [\text{SINR}_{b,(x,y)}^{\text{Down}}] \quad (2.6)$$

以上の過程により導出された $\text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Total}}$ およびダウンリンク周波数帯域幅 BW を用いることで、位置 (x, y) に分布する地上端末のスループット $t_{(x,y)}^{\text{asn}}$ が求まる。

$$t_{(x,y)}^{\text{asn}} = BW \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_{(x,y)}^{\text{Total}}) \quad (2.7)$$

2.3.2 通信要求に応じた送信電力・ビーム指向性の融合制御方式

本項では、DBF 搭載型 HTS 通信システムを用いた電力リソース割当の柔軟性を向上するために、トラヒック要求量の地理的分布に対応した全ビームの送信電力とビーム指向性、配置位置の組み合わせ最適化を行う。なお、本研究における組み合わせ最適化問題の目的関数は、DBF 搭載型 HTS のカバーエリア内におけるトラヒック要求量に対する総スループットの比率を示すトラヒック収容率 T_{acc} とし、次式で定義する。

$$T_{\text{acc}} = \frac{1}{S_{\text{all}}} \sum_{b=1}^N \iint_{S_b} \frac{\min\{t_{(x,y)}^{\text{asn}}, t_{(x,y)}^{\text{req}}\}}{t_{(x,y)}^{\text{req}}} dx dy \quad (2.8)$$

ここで、 S_b はビーム b のカバーエリア、 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ は位置 (x, y) に分布する地上端末のトラヒック要求量を示す。なお、地上端末のスループット $t_{(x,y)}^{\text{asn}}$ がトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ 以上である位置 (x, y) については、その地上端末に対して $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ と同量の電力リソースが割り当てられるものとする。

そして、トラヒック収容率 T_{acc} を最大化する各ビームの送信電力とビーム指向性、配置位置の最適な組み合わせを $\mathbb{C}_{\text{beam}}^{\text{opt}}$ とすると、この $\mathbb{C}_{\text{beam}}^{\text{opt}}$ を求める最適化問題 \mathcal{U} は以下のように定式化できる。

$$\mathcal{U} : \mathbb{C}_{\text{beam}}^{\text{opt}} = \arg \max_{\mathbb{C}_{\text{beam}}} T_{\text{acc}} \quad (2.9)$$

$$\mathbb{C}_{\text{beam}} = \left\{ [P_b], [G_b^{\text{peak}}], (x_b^{\text{ctr}}, y_b^{\text{ctr}}) \mid 1 \leq b \leq N, b \in \mathbb{N} \right\} \quad (2.10)$$

s.t.

$$\sum_{b=1}^N P_b \leq P_{\text{total}} \quad (2.11)$$

$$[P_b] + [G_{b,(x,y)}] \leq \text{EIRP}_{\text{ul}} \quad (2.12)$$

$$\theta_b^{3\text{dB}} \geq 70 \frac{c}{fD} \quad (2.13)$$

$$\forall x_c (x_c = x_{i,N_i+i}^{\text{cp}} = x_{N_i+i,2N_i+i}^{\text{cp}} = \cdots = x_{N_i(N_j-2)+i,N_i(N_j-1)+i}^{\text{cp}}, \\ \wedge 0 \leq x_c \leq x_{\text{cv}} \wedge 1 \leq i \leq N_i),$$

$$0 \leq y_{i,N_i+i}^{\text{cp}} \leq y_{N_i+i,2N_i+i}^{\text{cp}} \leq \cdots \leq y_{N_i(N_j-2)+i,N_i(N_j-1)+i}^{\text{cp}} \leq y_{\text{cv}} \quad (2.14)$$

$$\forall y_c (y_c = y_{N_i(j-1)+1,N_i(j-1)+2}^{\text{cp}} = y_{N_i(j-1)+2,N_i(j-1)+3}^{\text{cp}} = \cdots = y_{N_i j-1,N_i j}^{\text{cp}}, \\ \wedge 0 \leq y_c \leq y_{\text{cv}} \wedge 1 \leq j \leq N_j),$$

$$0 \leq x_{N_i(j-1)+1,N_i(j-1)+2}^{\text{cp}} \leq x_{N_i(j-1)+2,N_i(j-1)+3}^{\text{cp}} \leq \cdots \leq x_{N_i j-1,N_i j}^{\text{cp}} \leq x_{\text{cv}} \quad (2.15)$$

$$\left[P_a G_{a,(x_{a,b}^{\text{cp}}, y_{a,b}^{\text{cp}})} \right] - \left[\left(\sum_{f_u=f_a} P_u G_{u,(x_{a,b}^{\text{cp}}, y_{a,b}^{\text{cp}})} \right) + \frac{kT_n B_n}{G_{\text{RL}}} \right] = \\ \left[P_b G_{b,(x_{a,b}^{\text{cp}}, y_{a,b}^{\text{cp}})} \right] - \left[\left(\sum_{f_v=f_b} P_v G_{v,(x_{a,b}^{\text{cp}}, y_{a,b}^{\text{cp}})} \right) + \frac{kT_n B_n}{G_{\text{RL}}} \right] \quad (2.16)$$

ただし、 C_{beam} は各ビームの送信電力とビーム指向性、配置位置の組み合わせを示し、 P_{total} は DBF 搭載型 HTS の総送信電力を表している。ここで、(2.11) は DBF 搭載型 HTS の総送信電力 P_{total} の中で全ビームに対して送信電力を割り当てるという制約である。また、他衛星システムへの過度な電波干渉を抑える必要があるため、(2.12) に示すように各ビームの送信電力と送信アンテナ利得のデシベル和である等価等方輻射電力 (EIRP: Equivalent Isotropically Radiated Power) がその上限値 EIRP_{ul} を超過しない制約を設ける [26]。 (2.13) は 2.3.1 項にて述べた DBF の制御上の制約条件である。また、 $(x_{b,b'}^{\text{cp}}, y_{b,b'}^{\text{cp}})$ は隣接ビーム b, b' 間のダウンリンク SINR 値が同値となる交点の座標を表し、通信リソースの利用効率の低下を抑制するビーム配置上の制約条件 (2.14), (2.15) の下で、(2.16) で示される $(x_{b,b'}^{\text{cp}}, y_{b,b'}^{\text{cp}})$ の描く全ての軌跡曲線によって、ビーム b のカバーエリア S_b は一意に定まる。

2.4 性能評価

本節では、DBF 搭載型 HTS 通信システムを利用した送信電力とビーム指向性の同時制御とマルチビーム配置制御を融合した電力リソース割当モデルの有効性を確認するために数値解析を実施する。2.4.1 項では数値解析の評価環境および評価方法について説明する。2.4.2 項ではトラヒック収容率 T_{acc} を指標とした評価結果を基に、HTS の各 DBF 制御方式を適用した電力リソース割当モデルと比較し、本研究で提案する各ビームの送信電力、ビーム指向性、配置位置の融合制御に適用可能な電力リソース割当モデルの有効性を確認する。

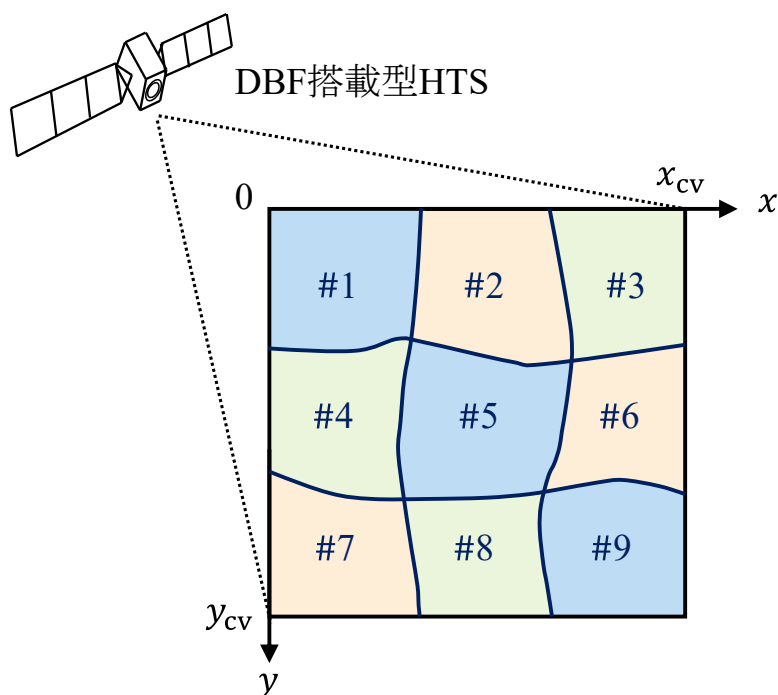


図 2.9: 解析評価用ビーム配置パターン

2.4.1 評価環境

本数値解析では、DBF 搭載型 HTS の全カバーエリアは $1,280\text{km} \times 1,280\text{km}$ の正方領域とし、図 2.9 に示すように、このカバーエリア内に DBF 搭載型 HTS のビームを x 軸方向に 1 行毎に 3 本配置し、その連続したビームの行を y 軸方向に 3 列並べた。ただし、同色ビームには同一周波数帯域を再利用するものとする。また、DBF 搭載型 HTS の全カバーエリアを表現したグリッド平面は単位グリッド当たり $20\text{km} \times 20\text{km}$ の正方領域で構成し、トラヒック集中地域内における位置 (x, y) のトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{conc}}$ は、その中心位置でのトラヒック要求量 ζ を $5.0 \cdot 10^{12}$ bps に設定し、平均ベクトル $(\mu_x; \mu_y)$ が $(0; 0)$ 、分散共分散行列 $(\sigma_x^2 \ \sigma_{xy}; \ \sigma_{xy} \ \sigma_y^2)$ が $1.5 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$ 以上 $4.5 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$ 以下の範囲 (\mathbf{E}_n : n 行 n 列の単位行列) によって組成

される 2 次元正規分布で模擬した。

$$t_{(x,y)}^{\text{conc}} = \frac{\zeta}{2\pi|\Sigma_{xy}|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{xy})^T \Sigma_{xy}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{xy}) \right\} \quad (2.17)$$

なお、単位グリッド当たりのトラヒック要求量については、同一の単位グリッド内において重複分のトラヒック集中地域によるトラヒック要求量の総和で算出している。また、トラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理的分布については、DBF 搭載型 HTS の全カバーエリア内に同一のトラヒック集中地域の発生数 n_{trf} を 10～30カ所の範囲で分布させ、それぞれのトラヒック集中地域の配置をランダムに決定した 75 ケースで解析評価を実施した。比較対象は、下記 5 種類の制御方式を伴った電力リソース割当モデルとした。

- 従来方式 A 打ち上げ後無制御（ベントパイプ型衛星）
- 従来方式 B マルチビーム配置制御
- 従来方式 C ビーム指向性制御
- 従来方式 D 送信電力・ビーム指向性の同時制御
- 提案方式 P 送信電力・ビーム指向性・配置位置の融合制御

なお、従来方式 A, C, D 適用時のビーム配置については、下記の各ビームの中心座標 $(x_b^{\text{ctr}}, y_b^{\text{ctr}})$ に示すように、1,280 km×1,280 km のカバーエリア内に各ビームの中心を等間隔に配置した。一方、従来方式 A, B 適用時における各ビームの送信ピーク利得 $[G_b^{\text{peak}}]$ は $[G_{\text{max}}]$ と同値とし、各ビームの送信電力 $[P_b]$ は、全ビーム間で等分配されるように送信 EIRP の上限値 EIRP_{ul} から $[G_{\text{max}}]$ を差し引いた大きさとした。

$$\begin{pmatrix} x_1^{\text{ctr}} & x_2^{\text{ctr}} & x_3^{\text{ctr}} \\ x_4^{\text{ctr}} & x_5^{\text{ctr}} & x_6^{\text{ctr}} \\ x_7^{\text{ctr}} & x_8^{\text{ctr}} & x_9^{\text{ctr}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 213.3 & 640 & 1066.7 \\ 213.3 & 640 & 1066.7 \\ 213.3 & 640 & 1066.7 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{pmatrix} y_1^{\text{ctr}} & y_2^{\text{ctr}} & y_3^{\text{ctr}} \\ y_4^{\text{ctr}} & y_5^{\text{ctr}} & y_6^{\text{ctr}} \\ y_7^{\text{ctr}} & y_8^{\text{ctr}} & y_9^{\text{ctr}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 213.3 & 213.3 & 213.3 \\ 640 & 640 & 640 \\ 1066.7 & 1066.7 & 1066.7 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

また、組み合わせ最適解の算出にはシミュレーテッド・アニーリング (SA: Simulated Annealing) の一種である指数型アニーリングを使用している。組み合わせ最適化問題 \mathcal{U} における制約条件は関数化させ、それらをペナルティ関数として目的関数に取り込み、下式に示すような無制約条件下での最適化問題に置き換えている [27, 28]。その他の設定パラメータは表 2.1 に示す。

$$\mathcal{V} : \mathbb{C}_{\text{fus}}^{\text{opt}} = \arg \min_{\mathbb{C}_{\text{fus}}} \varphi \quad (2.20)$$

$$\mathbb{C}_{\text{fus}} = \left\{ [P_b], [G_b^{\text{peak}}], (x_b^{\text{ctr}}, y_b^{\text{ctr}}) \mid 1 \leq b \leq N \right\} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \varphi = & -T_{\text{acc}} + \mu \left\{ \left(\sum_{b=1}^N P_b - P_{\text{total}} \right)_+^2 + \sum_{b=1}^N \left([G_b^{\text{peak}}] - [G_{\text{max}}] \right)_+^2 \right. \\ & + \sum_{b=1}^N \left([P_b] + [G_{b,(x,y)}] - [\text{EIRP}_{\text{ul}}] \right)_+^2 \\ & + \sum_{i=1}^{N_i-1} \sum_{j=1}^{N_j} \left(x_{N_i(j-1)+i, N_i(j-1)+i+1}^{\text{cp}} - x_{N_i(j-1)+i+1, N_i(j-1)+i+2}^{\text{cp}} \right)_+^2 \\ & \left. + \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j-1} \left(y_{N_i(j-1)+i, N_i j+i}^{\text{cp}} - y_{N_i j+i, N_i(j+1)+i}^{\text{cp}} \right)_+^2 \right\} \quad (2.22) \end{aligned}$$

$$x_{N_i j, N_i j+1}^{\text{cp}} = x_{\text{cv}}, \quad y_{N_i(N_j-1)+i, N_i N_j+i}^{\text{cp}} = y_{\text{cv}} \quad (2.23)$$

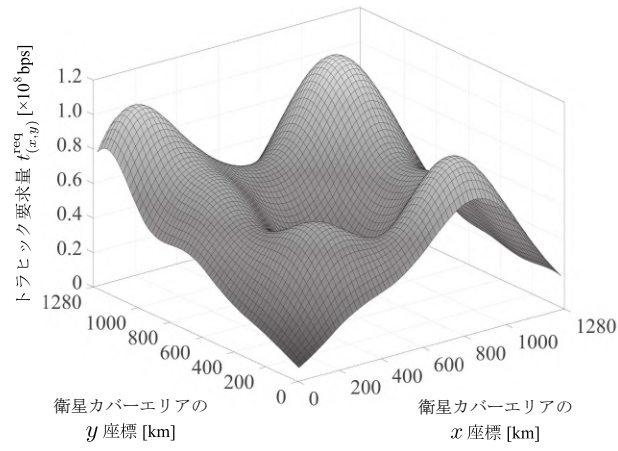
$$1 \leq i \leq N_i, \quad 1 \leq j \leq N_j \quad (2.24)$$

第 2 章 衛星通信システムを用いた送信電力及びビーム指向性の融合制御

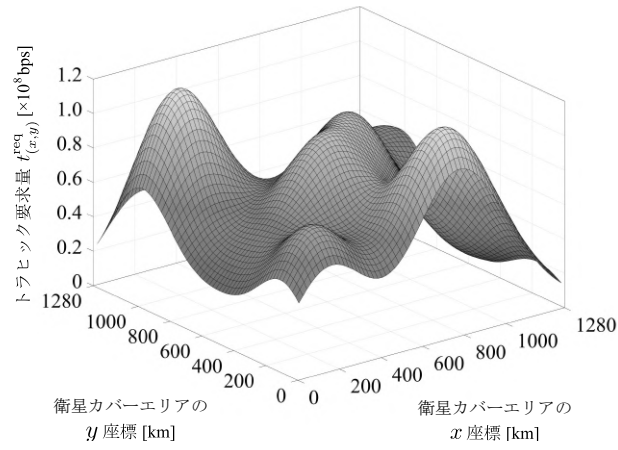
表 2.1: 送信電力とビーム指向性の融合制御に係る評価パラメータ設定

パラメータ	値
ビーム数 (N)	9
周波数繰り返し数	3
DBF 搭載型 HTS の総送信電力 (P_{total})	3 kW
等価等方輻射電力の上限値 (EIRP_{ul})	73 dBW
ダウンリンク周波数帯域幅 (BW)	50 MHz
ダウンリンク周波数帯 (f)	20 GHz
衛星アンテナ開口能率 (η)	0.5
衛星アンテナ径 (D)	2.5 m
送信アンテナ利得の最大値 ($[G_{\text{max}}] = [\eta(\pi f D/c)^2]$)	51 dBi
アップリンク SINR (SINR^{Up})	20 dB
地上から衛星までの距離 (h_{GEO})	35,786 km
ボルツマン定数 (k)	-228.6 dB
ダウンリンク伝搬損失 (L)	-213.49 dB
地上端末のアンテナ雑音温度 (T_n)	29 dB
地上端末の受信アンテナ利得 (G_R)	40 dBi
雑音帯域幅 (B_n)	80.9 dB
HTS の全カバーエリア ($S_{\text{all}} = x_{\text{cv}} \times y_{\text{cv}}$)	1,280 km \times 1,280 km
グリッド面積	20 km \times 20 km
トラヒック集中地域の中心位置 におけるトラヒック要求量 (ζ)	$5.0 \cdot 10^{12}$ bps
トラヒック集中地域の平均ベクトル ($\mu_x; \mu_y$)	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
トラヒック集中地域の分散共分散行列 ($\Sigma_{xy} = (\sigma_x^2 \ \sigma_{xy}; \ \sigma_{xy} \ \sigma_y^2)$)	$1.5 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2 \leq \Sigma_{xy} \leq 4.5 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$
SA の初期温度	100°C
SA の探索回数	100

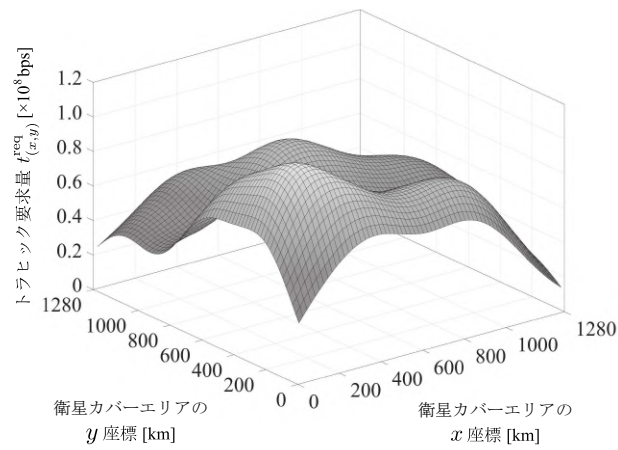
第 2 章 衛星通信システムを用いた送信電力及びビーム指向性の融合制御



(a) ケース A



(b) ケース B



(c) ケース C

図 2.10: $n_{\text{trf}}=26, \Sigma_{xy} = 3.0 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$ におけるトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理的分布 © 2020 IEICE

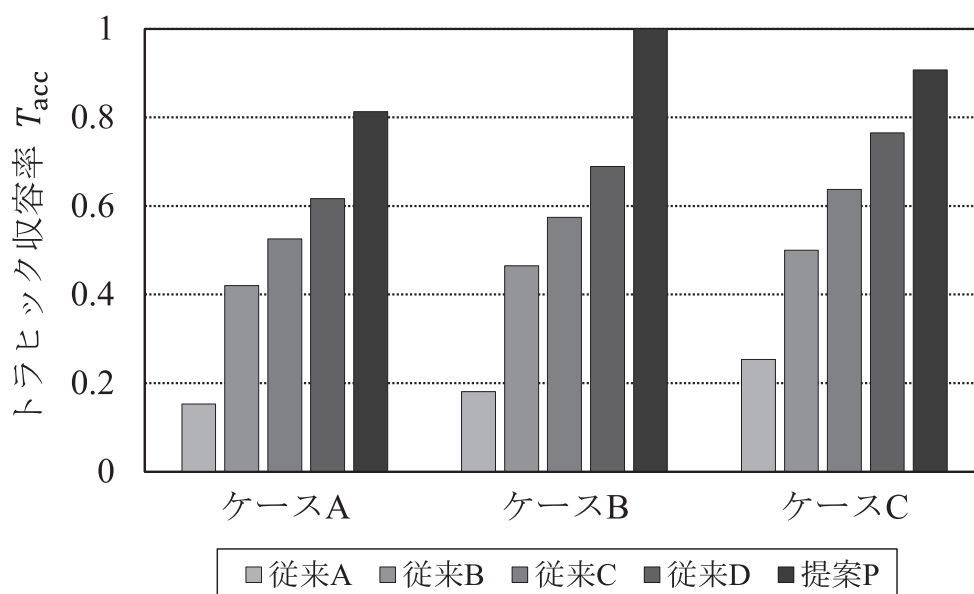
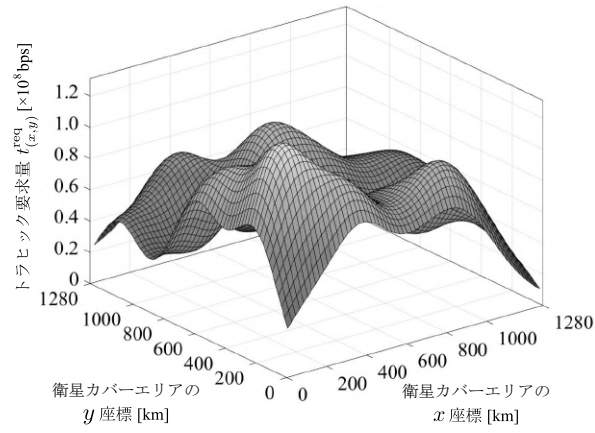


図 2.11: $n_{\text{trf}} = 26, \Sigma_{xy} = 3.0 \cdot 10^4 E_2$ における各ケースのトラヒック収容率 T_{acc} © 2020 IEICE

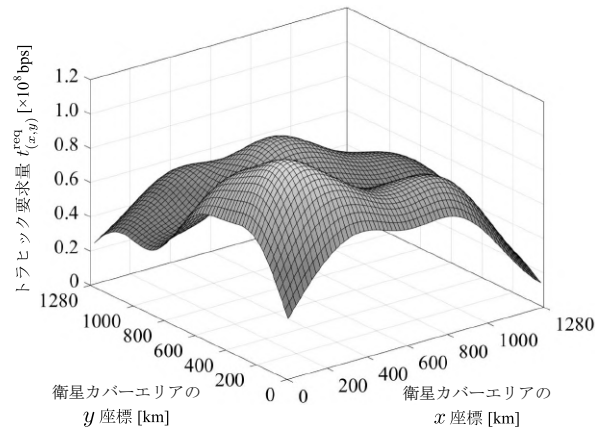
2.4.2 評価結果

はじめに、2.4.1 項で設定したトラヒック集中地域 n_{trf} が DBF 搭載型 HAPS のカバーエリア内に 26カ所分布するパターンにおいて、全 75 ケースからランダムに選択した図 2.10 の 3 ケースを評価環境として適用した際のトラヒック収容率 T_{acc} を図 2.11 に示す。ただし、この 3 ケースに関しては、衛星カバーエリア全体におけるトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の総和は同値であり、ケース A から順にトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理的分布の尖度が全体的に小さくなっている。本研究で提案する融合制御方式 P は、全ケースにおいて最大のトラヒック収容率 T_{acc} を記録している点を確認できる。図 2.11 の結果より、トラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理的分布の尖度が全体的に大きくなるほど、トラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ 以上のスループットが出る領域の拡大に伴って過剰割当による電力リソースの無駄が増加する。一方で、トラヒック要求がより局所的に集中する箇所では所望のスループットが満た

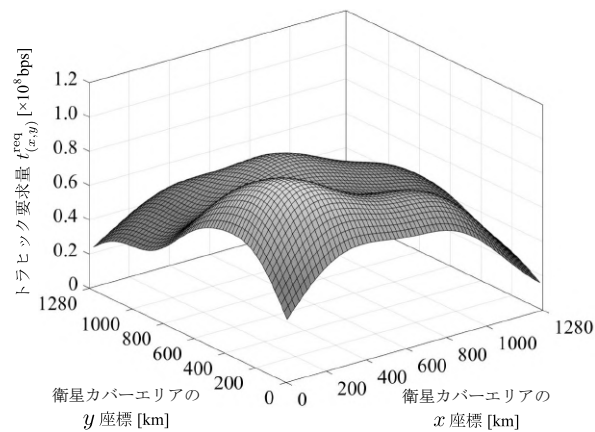
第2章 衛星通信システムを用いた送信電力及びビーム指向性の融合制御



(a) $\Sigma_{xy} = 2.0 \cdot 10^4 E_2$



(b) $\Sigma_{xy} = 3.0 \cdot 10^4 E_2$



(c) $\Sigma_{xy} = 4.0 \cdot 10^4 E_2$

図 2.12: 図 2.10 (ケース C) でのトラヒック集中地域の分散共分散行列 Σ_{xy} に応じたトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理的分布

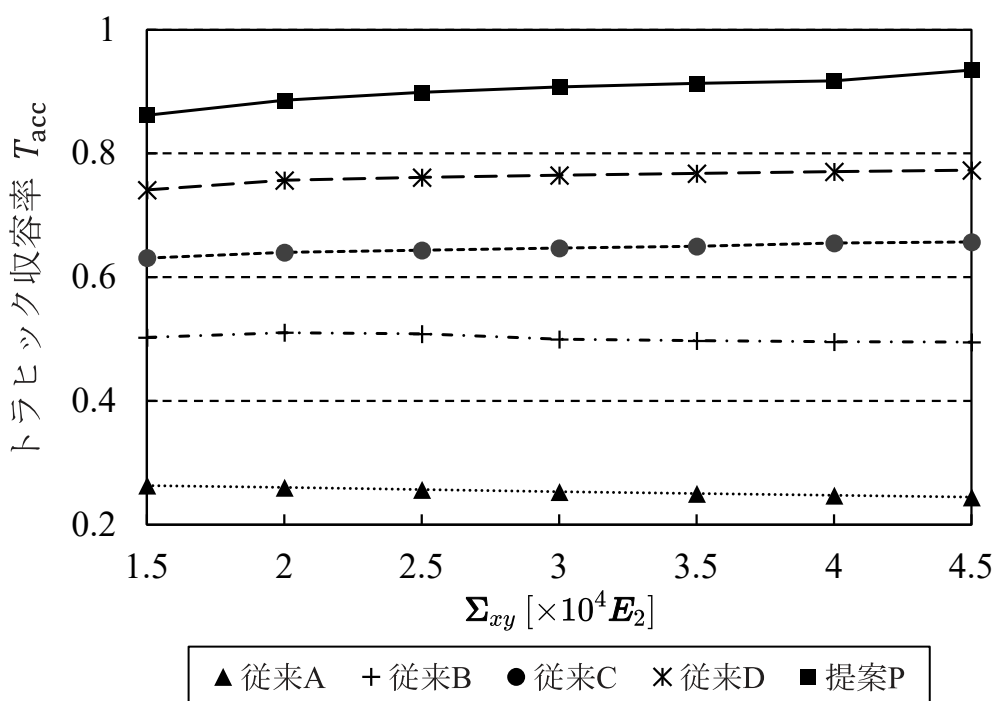


図 2.13: 図 2.10 (ケース C) での分散共分散行列 Σ_{xy} とトラフィック収容率 T_{acc}

されなくなるため、いずれの制御方式においてもトラフィック収容率 T_{acc} は低下する傾向にある。また、可変とする DBF 搭載型 HTS の制御パラメータ数が多いほど、同一周波数帯域を持つビーム間で発生する電波干渉が与えるスループットの減少影響および異なる周波数帯域の隣接ビーム間の距離と SINR の関係が地上端末のビーム選択に与える影響の大きさを考慮した上で、トラフィック要求量 $t_{(x,y)}^{req}$ の地理的分布に合わせた柔軟な電力リソース割当が可能となるため、DBF 搭載型 HTS の制御パラメータを単一で制御する場合よりもトラフィック収容率 T_{acc} は改善される。

さらに、衛星カバーエリア内に分布する各トラフィック集中地域の中心位置が同一である状況下で、トラフィック集中地域におけるトラフィック要求量の地理的分布に係る急峻度を示す分散共分散行列 Σ_{xy} とトラフィック収容率 T_{acc} 間の関係性を明

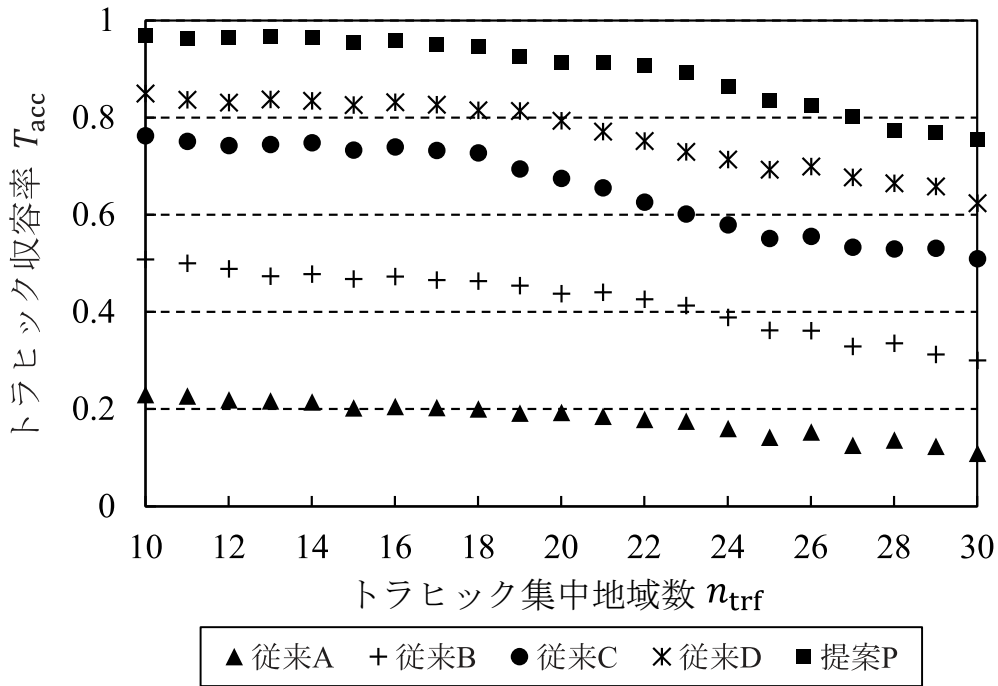


図 2.14: $\Sigma_{xy} = 2.0 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$ におけるトラヒック集中地域数 n_{trf} とトラヒック収容率 T_{acc} 間の関係

らかにするためにのシミュレーションを実施した. 図 2.12 は, 図 2.10 のケース C でのトラヒック集中地域の分散共分散行列 Σ_{xy} に応じたトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{req}$ の地理的分布の一例を示すグラフであり, このようなトラヒック要求の発生状況下における分散共分散行列 Σ_{xy} とトラヒック収容率 T_{acc} 間の定量関係を図 2.13 に示す. 図 2.12 のグラフを通して, 分散共分散行列 Σ_{xy} の数値が増大するにつれて, トラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{req}$ の大きさはトラヒック集中地域の中心付近では減少し, その中心付近から離れた領域では増加していることが分かる. この傾向を踏まえ, 図 2.13 の評価結果からは, 従来方式 A, B では全衛星ビームの送信ピーク利得が最大値で固定されるため, トラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{req}$ の地理的分布に係る急峻度が小さい領域に対する電力リソース割当の柔軟性が低い故に, 分散共分散行列 Σ_{xy} の増大に伴ってトラヒック収容率 T_{acc} は減少する傾向があると読み取れる.

一方、提案方式を含めた上記以外の制御方式に関してはDBFによる送信ピーク利得の調整が可能であり、トラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ の地理的分布に係る急峻度が小さい領域でも無駄なく電力リソースを割り当てることができるため、分散共分散行列 Σ_{xy} の増大とともにトラヒック収容率 T_{acc} は向上される傾向にある。

最後に、 $\Sigma_{xy} = 2.0 \cdot 10^4 \mathbf{E}_2$ の場合でのトラヒック集中地域数 n_{trf} と各制御方式の適用時におけるトラヒック収容率 T_{acc} との定量関係を表す解析結果を図2.14に示す。いずれの制御方式においても、衛星カバーエリア内に分布するトラヒック集中地域数 n_{trf} の増加に伴い、トラヒック収容率 T_{acc} は減少していることが確認できる。これは、トラヒック集中地域の分布数 n_{trf} が増えることによって、複数のトラヒック集中地域間での部分的な重複によって衛星カバーエリア内のトラヒック要求量 $t_{(x,y)}^{\text{req}}$ が平均的に上昇する。このような傾向はトラヒック集中地域数 n_{trf} の増加が顕著になるにつれて、トラヒック要求量に相当するスループットを満足できない確率が高まるため、トラヒック収容率 T_{acc} の減少度合いは徐々に急峻になる傾向がある。

以上より、本研究で提案する融合制御方式を適用することで、様々なトラヒック要求量の地理的分布においてトラヒック収容率が向上することを確認した。

2.5 まとめ

本章では、DBF 搭載型 HTS 通信システムを用いた送信電力とビーム指向性の同時制御とマルチビーム配置制御を融合した電力リソース割当へ適用可能なスループット算出モデルを構築した。その上で、DBF 搭載型 HTS のカバーエリア内のトラヒック要求量に対する総スループットの比率を示すトラヒック収容率の最大化を目的とする各ビームの送信電力とビーム指向性、配置位置の最適化を図る電力リソース割当モデルを提案した。提案した電力リソース割当モデルについて解析評価を行った結果、DBF 搭載型 HTS のカバーエリア全体におけるトラヒック要求量に対するスループットの比率を示すトラヒック収容率が向上することを明らかにした。

第3章

通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング

3.1 はじめに

本章では、非地上系統合ネットワークにおいてリソース割当により発生し得る通信リソースの無駄を最小限に抑制するために、通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング方式を提案する。はじめに、本研究で想定するシステム構成および通信要求予測の仕組みについて述べる。次に、非地上系統合ネットワークにおける通信要求予測に基づくリソース制御上の課題を指摘する。そして、通信要求予測モデルの更新とリソース制御の切替を動的に調整可能なスケジューリング方式について提案する。最後に、シミュレーション評価を通して提案方式の有効性を確認する。

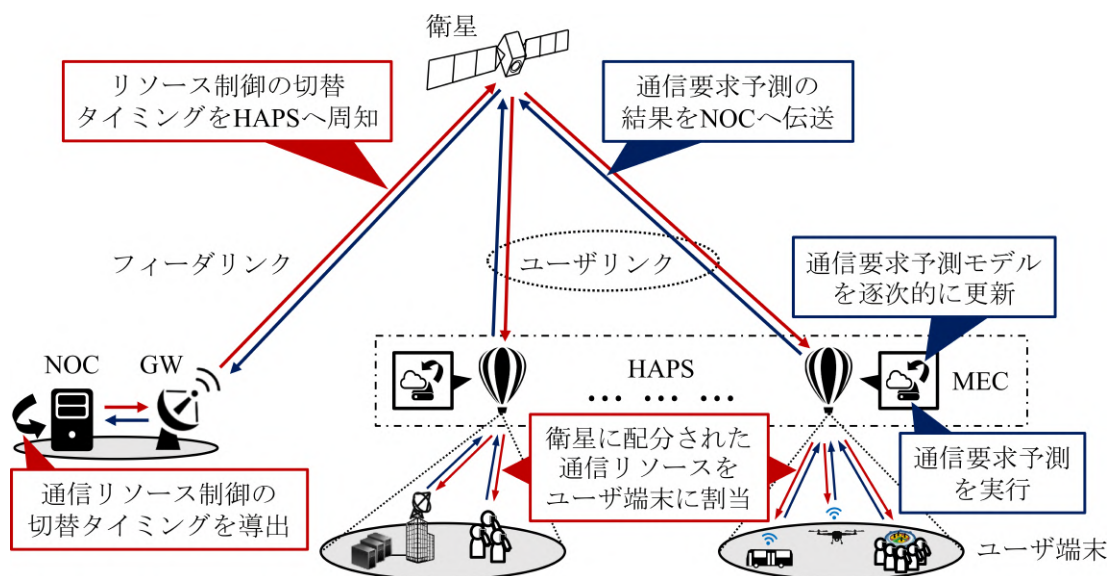


図 3.1: 想定する非地上系統合ネットワークの全体像

3.2 想定システムとその課題

3.2.1 想定システム

図 3.1 に本研究で想定する非地上系統合ネットワークの全体像を示す。ユーザリンク下では、複数分布する HAPS (High Altitude Platform Station) にそれぞれ MEC (Mobile Edge Computing) が搭載された状態を想定し、各 HAPS で MEC を用いて近傍のユーザ端末群におけるトラフィック要求量の時間変動を LSTM (Long Short-Term Memory) で予測し、その予測結果を連続的に衛星回線経由で NOC (Network Operation Center) へ伝送する。各 HAPS では必要に応じて通信要求予測を一旦中断し、中断した時点までに取得した近傍のユーザ端末群におけるトラフィック要求量の実際値を入力データとして追加の上、新たに通信要求予測モデルを自動更新する。一方、フィーダリンクには GW (Gateway) と NOC (Network Operation Center) が接続される状況を想定し、NOC は HAPS から連

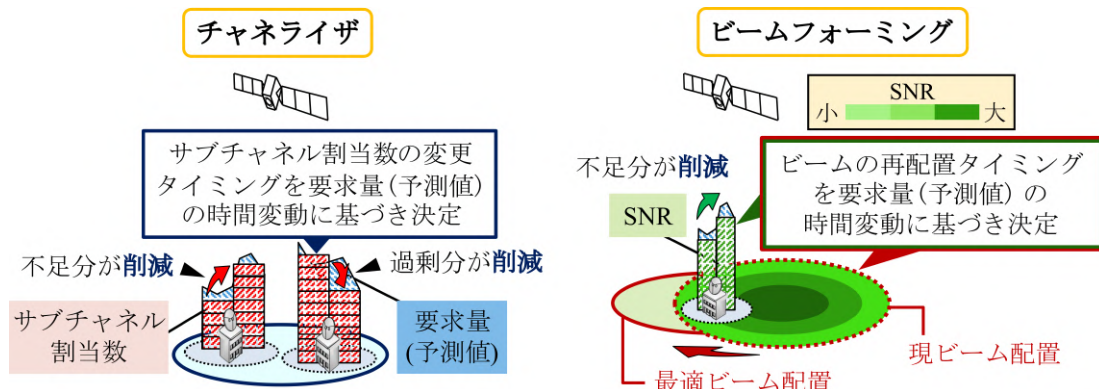


図 3.2: リソース制御切替タイミング最適化モデルを適用可能な制御方式の一例

続的に受信したトラフィック要求量の予測結果を基に直近におけるリソース制御の切替タイミングを決定する。また、リソース制御の切替タイミングに合わせて再度リソース制御を実行し、ユーザリンク下の HAPS に対して通信リソースを割り当てる。本研究で想定する通信要求予測が適用可能なリソース制御としては、図 3.2 に示すようなチャネライザやビームフォーミングといった、衛星打上げ後にビーム単位で通信リソースの割当状態を変更可能な制御技術を対象とする。なお、ユーザ端末は近傍の HAPS 経由で配分された通信リソースを用いて通信を行うものとする。

3.2.2 通信要求予測の仕組み

本項では、本研究において通信要求予測モデルでの利用を想定する LSTM による長期的予測の仕組みに関して説明する。

LSTM は RNN (Recurrent Neural Network) の拡張版モデルであり、時系列データを扱うニューラルネットワークの一種である。RNN では解決不可能であった勾配消失問題や勾配発散問題に対して、LSTM では RNN にメモリセルが導入

されており、入力ゲートや出力ゲート、忘却ゲートでLSTMセル内における情報の流れを制御することで解決している [29,30]. これにより、時系列データ間の依存関係を長期間にわたって学習可能となり、他の時系列予測モデルよりも高精度で通信要求の長期的予測を実行することができる.

本研究では、衛星カバーエリア内に分布する HAPS に MEC が搭載される状況を想定し、HAPS 近傍のユーザ端末群における過去のトラフィック要求量に関する数値が格納された時系列データに基づいて、一定の時間間隔で区切られたタイムステップ毎に将来的なトラフィック要求量の時間変動を予測する. 通信要求予測においては、訓練フェーズと予測フェーズの2つのフェーズを交互に繰り返して実行する.

訓練フェーズでは、まず始めに各 HAPS で過去のタイムステップにおけるトラフィック要求量の実際値が格納された時系列データセットを訓練用データとテストデータに分割する. 次に、訓練用データを入力データ ${}_i\mathbf{I}_s$ とそれに対応する出力データ ${}_iO_s = {}_i\varphi_s$ (${}_i\varphi_s$: タイムステップ # s における HAPS # i のトラフィック要求量の実際値) のデータペアを形成して整理し、その上で膨大なデータペアに基づいて予測誤差が一定値を下回るまで訓練を継続する. なお、 ${}_i\mathbf{I}_s$ は直前のタイムステップ # $(s-1)$ から τ タイムステップ分だけ遡った期間における HAPS # i のトラフィック要求量の実際値 $[{}_i\varphi_{s-\tau}, \dots, {}_i\varphi_{s-1}]$ が格納された入力データであり、下式のように表される.

$${}_i\mathbf{I}_s = [{}_i\varphi_{s-\tau}, \dots, {}_i\varphi_{s-1}], \quad \text{s.t. } s \geq \tau, \quad i, s, \tau \in \mathbb{N} \quad (3.1)$$

ここで、通信要求予測で発生した予測誤差の実際値を ${}_i e_{u+h|u}^j$ と表すとすると、 ${}_i e_{u+h|u}^j$ はトラフィック要求量の実際値と予測値の差分の絶対値と同値であり、次式で定式化される.

$${}_i e_{u+h|u}^j = |{}_i\varphi_{s_{i,j}^{\text{pre}}+u+h} - {}_i\hat{\varphi}_{u+h|u}^j|, \quad \text{s.t. } j, u, h \in \mathbb{N} \quad (3.2)$$

第3章 通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング

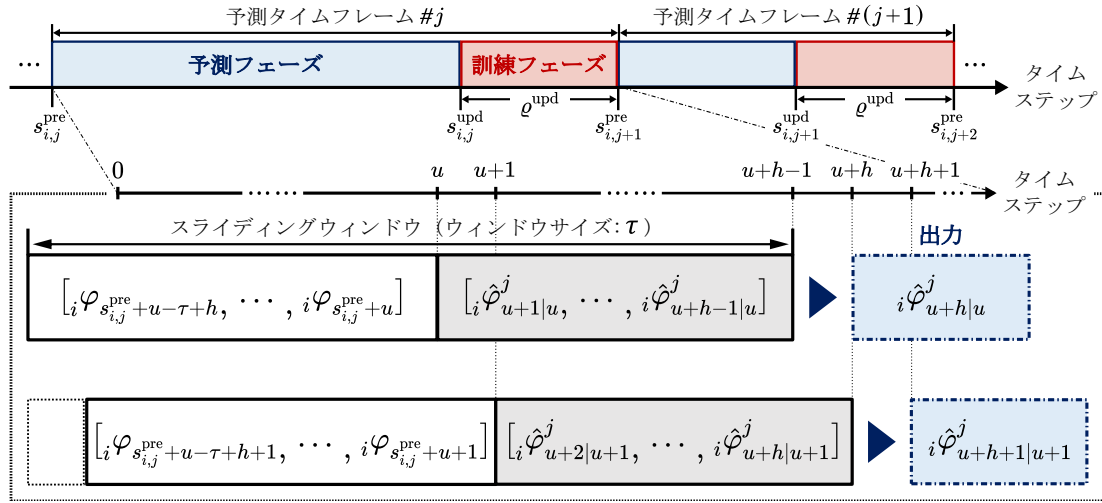


図 3.3: スライディングウィンドウを用いた通信要求予測の時間的流れ

$s_{i,j}^{\text{pre}}$ は HAPS # i において予測タイムフレーム # j で通信要求予測を開始するタイミングを示している。予測タイムフレームとは、図 3.3 に示すように予測フェーズと訓練フェーズをセットにした時間枠である。また、 \hat{q} は q の予測値を表し、 $i\hat{\varphi}_{u+h|u}^j$ と $i e_{u+h|u}^j$ はそれぞれ予測タイムフレーム # j の開始時点から u タイムステップが経過した時点での h 期先予測を通して取得した HAPS # i におけるトラヒック要求量の予測値および予測誤差の実際値を示す。なお、 $i\varphi_{s_{i,j}^{\text{pre}}+u+h}$ は過去のタイムステップに関する数値データであるため、 $i e_{u+h|u}^j$ も同様に過去のタイムステップのみでしか算出できない点に留意する。その後、訓練用データを用いて学習した通信要求予測モデルに対して、テストデータを用いて通信要求予測を一定以上の精度で実行できるかを検証する。通信要求予測モデルの訓練が完了後、予測フェーズに移行する。予測フェーズへの移行タイミングは、通信要求予測時に生じた予測誤差が一定以下であることを満足しつつ、直前のエポックでの予測誤差と比較して増加した場合に訓練を強制的に終了する Early Stopping が適用される瞬間とする。

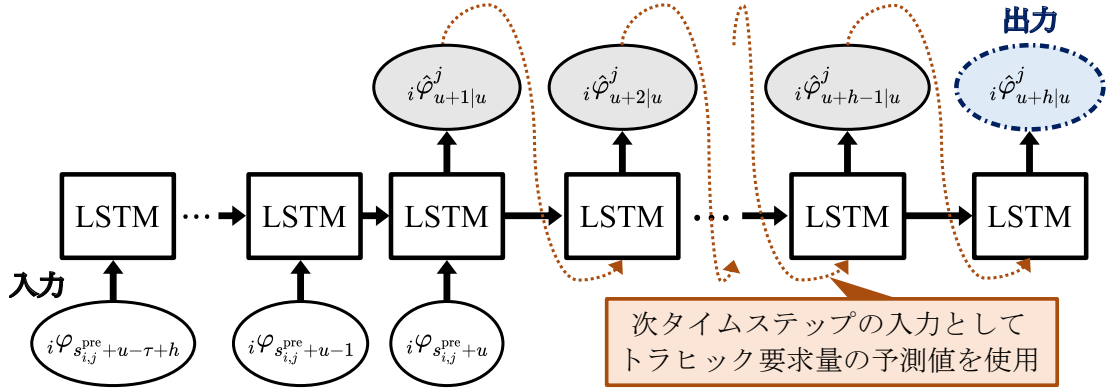


図 3.4: LSTM モデルを用いた長期的予測の仕組み

予測フェーズ移行後は、訓練が完了した通信要求予測モデルを用いて、各 HAPS で自律的に将来的なトラヒック要求量の変動予測を継続的に実行する。予測フェーズで使用する入力データは、図 3.3 に示すようなスライディングウィンドウを適用した一定の時間長 τ にわたるトラヒック要求量の実際値および予測値が格納されるものとする。このスライディングウィンドウを活用した通信要求予測を実行することにより、トラヒック要求量の予測結果 $i\hat{\varphi}_{u+h|u}^j$ が次式に従って導出される。

$$i\hat{\varphi}_{u+h|u}^j = f\left(\underbrace{[i\varphi_{s_{i,j}^{pre}+u-\tau+h}^j, \dots, i\varphi_{s_{i,j}^{pre}+u}^j]}_{(\tau-h+1) \text{ timesteps}}, \underbrace{[i\hat{\varphi}_{u+1|u}^j, \dots, i\hat{\varphi}_{u+h-1|u}^j]}_{(h-1) \text{ timesteps}}\right), \quad \text{s.t. } \tau \in \mathbb{N} \quad (3.3)$$

ここで、 $f(\cdot)$ は括弧内で示される入力時系列データを基に通信要求予測モデルにより $i\hat{\varphi}_{u+h|u}^j$ を出力する関数を表す。なお、LSTM を用いた通信要求予測モデルでは、図 3.4 に示すように、1 タイムステップ先の予測値を次のタイムステップでの入力値として取り込むことで長期的な通信要求予測が可能となる。しかし、予測フェーズの開始時点から長時間が経過すると、次式で定式化される隣接タイムス

テップ間でのトラフィック要求量の予測誤差 ${}_i\delta_{u+h|u}^j$ が増大する傾向が生じる [31,32].

$${}_i\delta_{u+h|u}^j = {}_i e_{u+h|u}^j - {}_i e_{u+h-1|u}^j \quad (3.4)$$

$$\text{s.t. } {}_i\delta_{u+1|u}^j = {}_i e_{u+1|u}^j \quad (3.5)$$

そのため、時間経過に伴ってトラフィック要求量の予測誤差が増大した状況下では、後述する通信要求予測モデルの更新タイミング最適化の方針に基づいて予測フェーズから訓練フェーズに移行する。次式に示すように、HAPS # i における通信要求予測モデルによる予測タイムフレーム # j の開始タイムステップ # $s_{i,j}^{\text{pre}}$ は、予測フェーズから訓練フェーズへの移行タイミングに相当するタイムステップ # $s_{i,j}^{\text{upd}}$ から予測モデル更新に要するタイムステップ数 ϱ^{upd} が経過した時点となる。

$$s_{i,j}^{\text{pre}} = s_{i,j-1}^{\text{upd}} + \varrho^{\text{upd}} \quad (3.6)$$

なお、訓練フェーズ期間中では通信要求予測の実行が中断されるため、訓練フェーズにおけるトラフィック要求量の予測値は直前の予測フェーズ期間内で導出した直近の予測結果を反映するものとする。

3.2.3 通信要求予測に基づくリソース制御上の課題

本項では、HAPS から NOC に伝送された近傍のユーザ端末群におけるトラフィック要求量の予測結果を基に、NOC で直近のリソース制御が終了するタイミングに合わせてリソース制御の切替を行う状況を想定する。通信要求予測に基づくリソース制御の実行にあたり、HAPS に搭載された MEC での通信要求予測モデルの更新あるいは NOC でのリソース制御切替を実行するタイミングが不適切な場合、衛星カバーエリア内に分布する各 HAPS へ割り当てる通信リソース量の過不足が無駄に発生する。具体的には、図 3.5 に示すように、通信要求予測モデルの

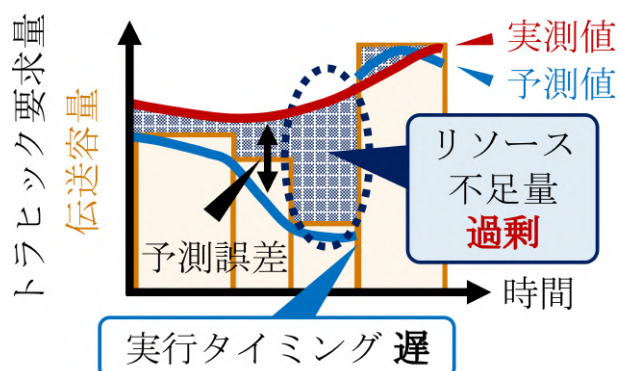


図 3.5: 通信要求予測モデルに係る更新タイミングの遅延により生じる問題

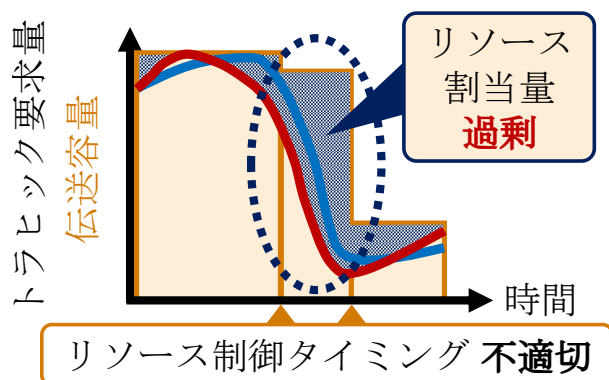


図 3.6: リソース制御に係る切替タイミングの遅延により生じる問題

更新タイミングに遅延が生じると、HAPS 近傍のユーザ端末群におけるトラフィック要求量の予測誤差が増大する。また、図 3.6 に示すように、HAPS 近傍に分布するユーザ端末群からのトラフィック要求量の予測値が時間的に大きく変動する時間帯においてリソース制御に係る切替タイミングに遅延が発生すると、そのリソース制御によって定まる各 HAPS へ割り当てる通信リソース量と HAPS 近傍に分布するユーザ端末群からのトラフィック要求量との差異が拡大する。

さらに、図 3.7 に示すように、リソース制御の切替における時間間隔が地上系通信システムに比べて非常に長い衛星通信システムでは、その時間間隔の最小値

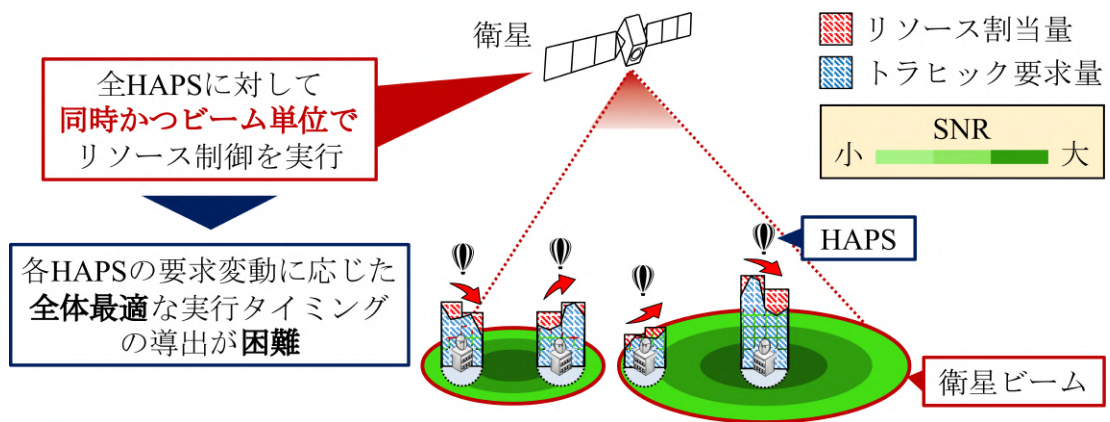


図 3.7: 衛星通信システム特有の制約に伴う実行タイミング導出上の課題

を制御周期としてもリソース割当により生じる通信リソースの無駄が最小化される保証はない。さらに、衛星ではビーム単位でリソース制御が実行されるため、ビーム内に多数のユーザ端末が分布する状況では、各ユーザ端末におけるトラフィック要求量の時間変動に係る相関が低いほど通信リソース割当の調整は困難になる。

以上を踏まえ、衛星通信システムを利用した非地上系統合ネットワークにおいて割当リソースの無駄を削減するには、HAPS 近傍のユーザ端末群におけるトラフィック要求量の予測値が時間的に変動する状況に応じて通信要求予測モデルの更新タイミングとリソース制御の切替タイミングを動的に調整可能なスケジューリング方式を構築することが必要である。

3.3 通信要求に基づくリソース制御の動的スケジューリング方式

本節では、非地上系統合ネットワークにおけるリソース割当時に生じる通信リソースの過不足を抑制するために、衛星回線を介した HAPS と NOC 間の連携による通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング方式を提案する。提案方式の設計にあたり、衛星通信システムを用いたリソース制御に特有の時間的制約を踏まえつつ、HAPS による通信要求予測モデルの更新および NOC によるリソース制御の切替を実行するタイミングを逐次的に最適化可能な数理モデルを構築する。

3.3.1 提案方式の概要

図 3.8 に本研究で提案する動的スケジューリング方式の概要図を示す。この提案方式では、HAPS と NOC 間の連携によって通信要求予測モデルの更新タイミングとリソース制御の切替タイミングが逐次的に決定されるため、通信要求分布の時間的な変動に依らずに割り当てリソースの無駄が最小限に抑制される。具体的には、HAPS 側では通信要求予測モデルの更新タイミングを NOC から共有される直近のリソース制御切替開始から一定期間のトラフィック要求量の変動予測結果に基づいて決定する。一方、NOC 側では各 HAPS における通信要求予測モデルの最適な更新タイミングに従って導出されたトラフィック要求量の変動予測結果に応じて、リソース制御の切替タイミングを逐次的に決定していく。以上の手順で継続的に稼働する提案方式が非地上系統合ネットワークに適用されることで、各 HAPS における通信要求予測モデルの予測誤差が低減されるとともに、リソース制御切替の適切性が担保され、リソース割当の周期的制御に比べて割り当て可能な通信リソースの節約に貢献する。以降で、HAPS による通信要求予測モデルの更新ならびに

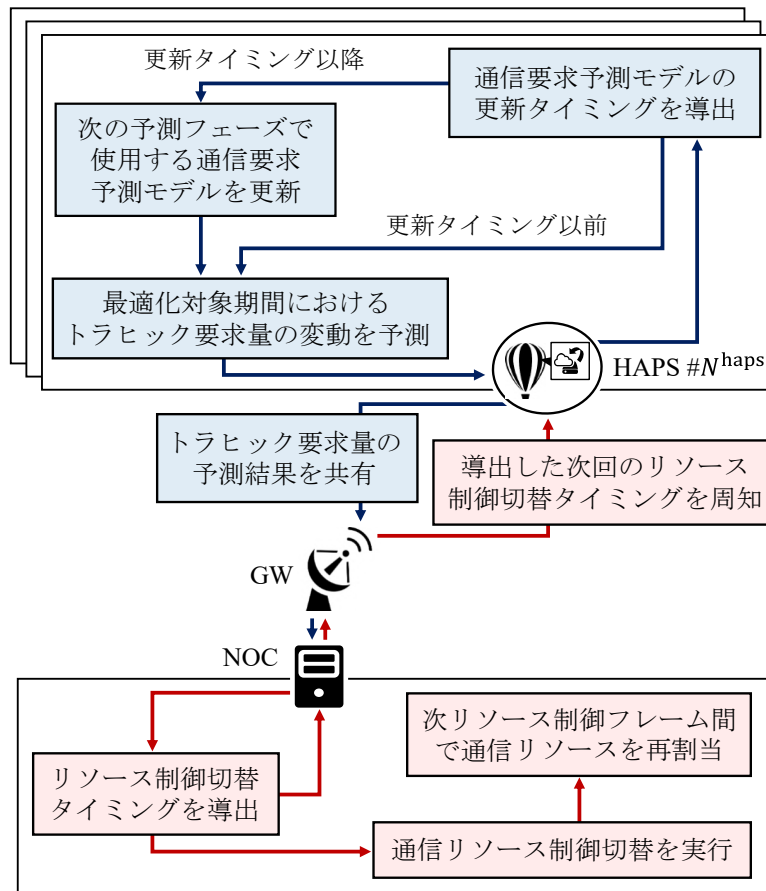


図 3.8: 提案スケジューリング方式の概要図

NOC によるリソース制御の切替に係る実行タイミングの決定方法に関する詳細を説明する。

3.3.2 通信要求予測モデルの更新タイミング最適化

本項では、HAPS に付属する MEC における通信要求予測モデルの更新タイミングを逐次的に最適化可能な数理モデルについて説明する。

トラフィック要求量の時間変動に応じた無駄の少ない通信リソース割当を可能とするために、各 HAPS に搭載された MEC の通信要求予測モデルでは、HAPS 近

傍のユーザ端末からのトラヒック要求量の時間変動を LSTM で予測しつつ、時間経過に伴って徐々に増大していく予測誤差が割りリソースの過不足量に及ぼす影響を加味した上で、適切なタイミングで自身のモデルを更新することが必要である。しかし、将来的なトラヒック要求量の実際値は未知であるが故に、将来的なトラヒック要求量の予測誤差も同様に未知である。そこで、始めに将来のタイムステップにおけるトラヒック要求量の予測誤差の推定値として、下式に示すように HAPS # i での過去の隣接タイムステップ間におけるトラヒック要求量の予測誤差の差分 ${}_i\delta_{u+h|u}^\zeta$ の期待値を用いる。

$$\begin{aligned} {}_i\hat{\delta}_{u+h|u}^j &= \mathbb{E}[{}_i\delta_{u+h|u}^\zeta] \\ &= \frac{1}{j-1} \sum_{\zeta=1}^{j-1} {}_i\delta_{u+h|u}^\zeta \end{aligned} \quad (3.7)$$

なお、 $\mathbb{E}[q]$ は q の期待値を表す。 ${}_i\hat{\delta}_{u+h|u}^j$ と ${}_i\delta_{u+h|u}^\zeta$ はそれぞれ予測タイムフレーム # j の開始時点から u タイムステップが経過した時点におけるトラヒック要求量の h 期先予測誤差と $(h-1)$ 期先予測誤差の差分に関する実際値と推定値である。ここで、予測タイムフレーム # j の開始時点から u タイムステップが経過した時点での HAPS # i におけるトラヒック需要量の h 期先予測値 $\hat{e}_{i,j,u,s+h|s}$ を、次式に示すように通信要求予測における 1 期先予測誤差から h 期先予測誤差までの総和と定義する。

$${}_i\hat{e}_{u+h|u}^j = \sum_{\nu=1}^h {}_i\hat{\delta}_{u+\nu|u}^j \quad (3.8)$$

次に、通信要求予測に基づくリソース制御により発生し得る割りリソースの過不足量に及ぼす影響を軽減するための通信要求予測モデルの更新タイミングの最適化について述べる。図 3.9 に通信要求予測モデルにおける最適な更新タイミングの導出イメージを示す。図 3.9 で示されるように、最適化対象期間内にわたる各 HAPS におけるトラヒック要求量の予測誤差の推定値の総和が最小となるタイ

第3章 通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング

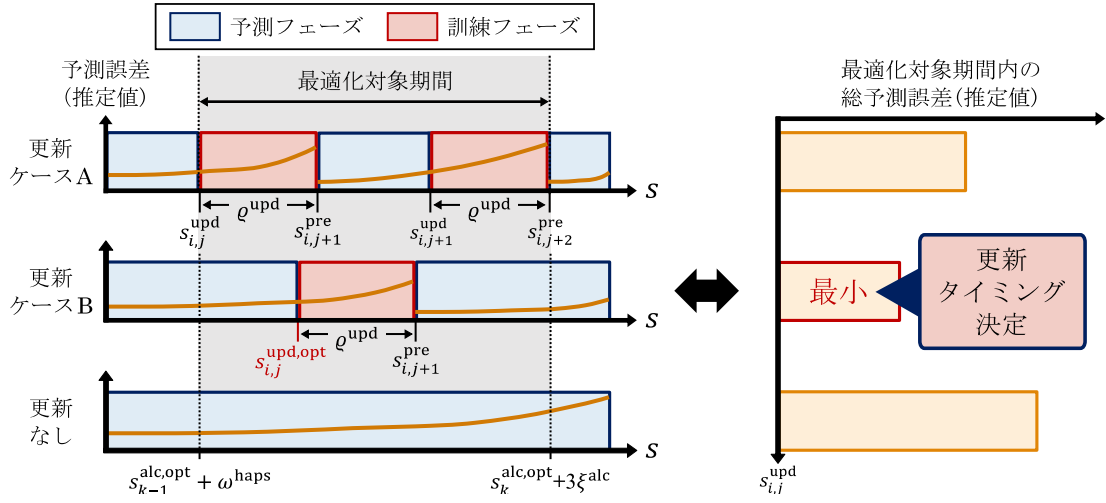


図 3.9: 通信要求予測モデルの更新タイミング最適化

ミングで通信要求予測モデルの更新を実行することによって、通信要求予測に基づくリソース制御により発生し得る割りリソースの過不足量を最小限に抑制可能となる。この通信要求予測モデルの更新タイミング最適化を数理モデルで表現すると、次のように定式化できる。

$$s_{i,j}^{upd,opt} = \arg \min_{s_{i,j}^{upd}} \sum_{i=1}^{N^{haps}} \left(\sum_{s=s_{k-1}^{alc,opt} + \omega^{haps}}^{s_{i,j+1}^{pre} - 1} i \hat{e}_s | s_{k-1}^{alc,opt} + \omega^{haps} + \sum_{s=s_{i,j+1}^{pre}}^{s_k^{alc,opt} + 3\xi^{alc}} i \hat{e}_s | s_{i,j+1}^{pre} \right) \quad (3.9)$$

$$\text{s.t. (3.6), } s_{k-1}^{alc,opt} + \omega^{haps} + \left\lceil \frac{\chi^{upd}}{l^{unit}} \right\rceil \leq s_{i,j}^{upd} \leq s_k^{alc,opt} + 3\xi^{alc} \quad (3.10)$$

なお、 N^{haps} は衛星カバーエリア内に分布する HAPS の局数を表す。 ξ^{alc} は衛星を用いたリソース制御における切替間隔の最小時間長、 l^{unit} は単位タイムステップあたりの時間長である。 $s_k^{alc,opt}$ はリソース制御フレーム # k におけるリソース制御切替時の最適タイムステップ No. を示す。 $s_{i,j}^{upd}$ は HAPS # i における予測タイムフレーム # j の開始タイミング、即ち通信要求予測モデルの更新が開始した時

点でのタイムステップ No. を表し, $s_{i,j}^{\text{upd,opt}}$ はその最適タイムステップ No. である. χ^{upd} は通信要求予測モデルの更新タイミング最適化に要する計算時間を, χ^{alc} はリソース制御の切替タイミング最適化に要する計算時間を示す. また, ω^{haps} はリソース制御切替時から次のリソース切替タイミングに係る情報が伝達されるまでの HAPS での待機タイムステップ数であり, 次式のように定式化できる. なお, $D^{\text{ul/fl}}$ はユーザリンク/フィーダリンクにおける伝搬遅延を表す.

$$\omega^{\text{haps}} = \left\lceil \frac{\chi^{\text{alc}} + D^{\text{fl}} + D^{\text{ul}}}{l^{\text{unit}}} \right\rceil \quad (3.11)$$

なお, $D^{\text{ul/fl}}$ はユーザリンク/フィーダリンクにおける伝搬遅延を表す.

3.3.3 リソース制御の切替タイミング最適化

本項では, 各 HAPS に付属する MEC で取得したトラフィック要求量の予測結果を基に NOC で実行するリソース制御の切替タイミングを逐次的に最適化可能な数理モデルについて説明する.

はじめに, 本研究におけるリソース制御により発生し得る割り当てリソースの無駄を示す評価指標として, HAPS におけるトラフィック要求量の実際値と伝送容量間の差分をリソース過不足量と定義し, 下式で算出するものとする.

$$\hat{\Psi}_{s|s}^k = |{}_i\hat{\phi}_{s|s} - {}_i\gamma_s^k| \quad (3.12)$$

なお, $\hat{\Psi}_{s|s}^k$ はタイムステップ # s で通信要求予測を実行した際のリソース制御フレーム # k 内にあるタイムステップ # s における HAPS # i でのリソース過不足量の推定値と定義する. ${}_i\hat{\phi}_{s|s}$ は通信要求予測をタイムステップ # s 時点で実行した場合におけるタイムステップ # s での HAPS # i のトラフィック要求量の推定値を表す. このトラフィック要求量 ${}_i\hat{\phi}_{s|s}$ の確率密度関数は次式に示すような混合正規分布

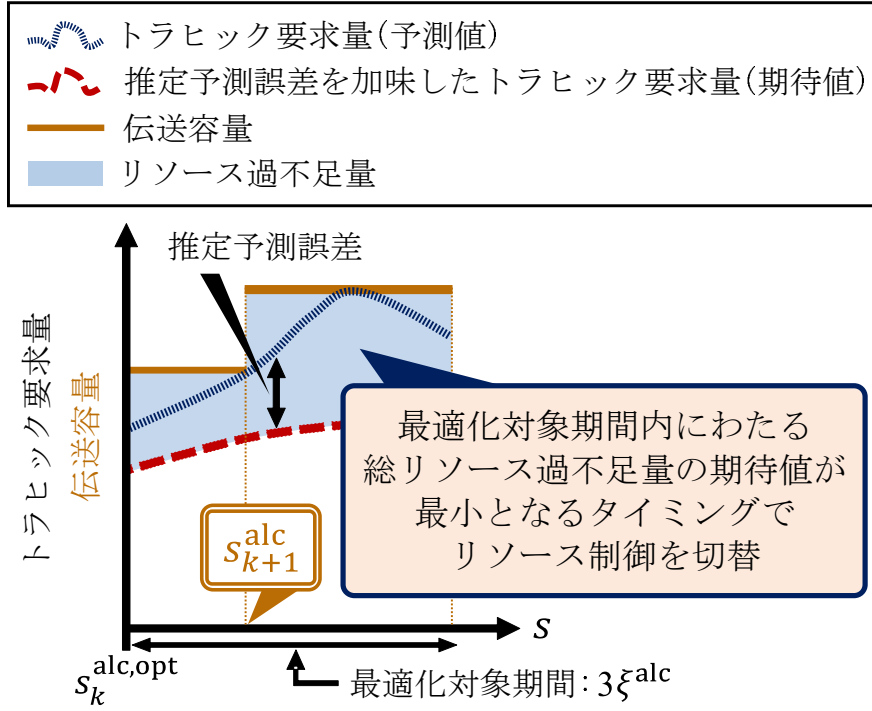


図 3.10: リソース制御の切替タイミング最適化

に従って求められる.

$$\begin{aligned}
 \hat{\phi}_{s_{i,j}^{\text{pre}}+u+h|s_{i,j}^{\text{pre}}+u} \sim & \frac{1}{2} \left\{ \mathcal{N} \left(i\hat{\varphi}_{u+h-1|u}^j + i\hat{e}_{u+h-1|u}^j + \mu[i\delta_{u+h|u}^\zeta], \sigma^2[i\delta_{u+h|u}^\zeta] \right) \right. \\
 & \left. + \mathcal{N} \left(i\hat{\varphi}_{u+h-1|u}^j - i\hat{e}_{u+h-1|u}^j - \mu[i\delta_{u+h|u}^\zeta], \sigma^2[i\delta_{u+h|u}^\zeta] \right) \right\} \\
 \text{s.t. } & 1 \leq \zeta \leq j-1, \zeta \in \mathbb{N} \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

なお、各HAPSで取得した予測結果 $\hat{\phi}_{s_{i,j}^{\text{pre}}+u+h|s_{i,j}^{\text{pre}}+u}$ は衛星回線を通して定期的にNO Cに共有されるとする。また、 $i\gamma_{s'}^k$ はリソース制御フレーム #k 内にあるタイムステップ #s' におけるHAPS #i の伝送容量を表す。ここで、リソース過不足量 $\hat{\Psi}_{s'|s}^k$ を変数 ψ で示す上、 ψ の確率密度関数を $p(\psi)$ とすると、リソース制御切替タイミング最適化の目的関数として用いる $\hat{\Psi}_{s'|s}^k$ の期待値 $\mathbb{E}[\hat{\Psi}_{s'|s}^k]$ は以下のように

算出される。

$$\mathbb{E}[\hat{\Psi}_{s|s}^k] = \int_0^\infty \psi p(\psi) d\psi \quad (3.14)$$

次に、リソース制御により発生し得る割りリソースの無駄を示すリソース過不足量を最小化するためのリソース制御切替タイミング最適化について述べる。図 3.10 にリソース制御切替における最適な実行タイミングの導出イメージを示す。図 3.10 に示すように、最適化対象期間 $3\xi^{\text{alc}}$ 内にわたる全 HAPS のリソース過不足量の期待値 $\mathbb{E}[\hat{\Psi}_{s|s}^k]$ の総和が最小となるタイミングでリソース制御を切り替えることによって、最適化対象期間 $3\xi^{\text{alc}}$ 内における割りリソースの無駄を最小限に抑制できる。このリソース制御切替タイミング最適化を数理モデルにより表現すると、以下のように定式化できる。

$$s_{k+1}^{\text{alc,opt}} = \arg \min_{s_{k+1}^{\text{alc}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{haps}}} \left(\sum_{s=s_k^{\text{alc,opt}}}^{s_{k+1}^{\text{alc}}-1} \mathbb{E}[\hat{\Psi}_{s|s_{i,j}^{\text{sw}}}^{k+1}] + \sum_{s=s_{k+1}^{\text{alc}}}^{s_k^{\text{alc,opt}}+3\xi^{\text{alc}}} \mathbb{E}[\hat{\Psi}_{s|s_{i,j}^{\text{sw}}}^{k+2}] \right) \quad (3.15)$$

$$\text{s.t. } s_k^{\text{alc,opt}} + \max(\xi^{\text{alc}}, \omega^{\text{haps}} + \omega^{\text{noc}}) \leq s_{k+1}^{\text{alc}} \leq s_k^{\text{alc,opt}} + 2\xi^{\text{alc}} \quad (3.16)$$

$$s_{i,j}^{\text{sw}} = \begin{cases} s_k^{\text{alc,opt}} & (s \leq s_{i,j}^{\text{upd,opt}}) \\ s_{i,j}^{\text{upd,opt}} & (s > s_{i,j}^{\text{upd,opt}}) \end{cases} \quad (3.17)$$

ここで、 s_k^{alc} 、 $s_k^{\text{alc,opt}}$ はリソース制御フレーム $\#k$ におけるリソース制御切替時のタイムステップ No. とその最適タイミングを示す。 ω^{noc} は通信要求予測の開始時点からトラヒック要求量の予測結果に係る情報が伝達されるまでの NOC の待機タイムステップ数を表す。

$$\omega^{\text{noc}} = \left\lceil \frac{\chi^{\text{upd}} + D^{\text{fl}} + D^{\text{ul}}}{l_{\text{unit}}} \right\rceil \quad (3.18)$$

3.3.4 通信要求予測とリソース制御間の連携フロー

3.3.2 項で構築した通信要求予測モデルの更新タイミング最適化モデルと 3.3.3 項で構築したリソース制御の切替タイミング最適化モデルを両立し、予測モデル

第3章 通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング

更新およびリソース制御切替の実行タイミングを動的に調整可能とする連携フローを **Algorithm 1** に示す。 **Algorithm 1** では、非地上系統合ネットワークにおいて通信要求予測に基づくリソース制御を継続的に実行していく中で、HAPS側では通信要求予測モデルの更新タイミングを、NOC側ではリソース制御の切替タイミングを逐次的に調整しつつ、HAPSとNOC間で相互に連携する。まず、衛星カバーエリア内に分布する各HAPSがタイムステップ $\#(s_{k-1}^{\text{alc,opt}} + \omega^{\text{haps}})$ の時点で(3.9)に基づいた予測モデル更新タイミング $s_{i,j}^{\text{upd}}$ の逐次的最適化を計算時間 ω^{noc} 内で自律的に実行し、その逐次最適解 $s_{i,j}^{\text{upd,opt}}$ を導出する。その後、各HAPSで(3.10)で示した時間範囲において推定予測誤差を加味したトラフィック要求量の推定値を算出し、その推定結果を衛星回線を通してNOCに伝達する。次に、タイムステップ $\#s_k^{\text{alc,opt}}$ が到来したらNOC側でリソース制御切替を実行する。その上、NOCは全HAPSから共有された予測結果を用いて、(3.16)を時間範囲とする次回のリソース制御切替タイミング s_{k+1}^{alc} の逐次最適化(3.15)を計算時間 ω^{haps} 内で実行し、その逐次最適解 $s_{k+1}^{\text{alc,opt}}$ を衛星回線経由で全HAPSに対し共有する。なお、各HAPSの通信要求予測モデルにおける直近の更新タイミング $\#s_{i,j}^{\text{upd,opt}}$ が到来した時点で一旦予測を中断して訓練フェーズに移行し、その時点までに取得したトラフィック要求量の実測値を入力データとして追加してから再度モデルを更新する。モデル更新に要するタイムステップ数 ρ^{upd} の経過後、予測フェーズに戻って通信要求予測を再開する。

以上の過程により、通信要求予測に基づくリソース制御上でのHAPSとNOC間の連携を通して、トラフィック要求量が時間的かつ地理的に変動する状況下においても割りリソースの無駄を最小限に抑制することが可能となる。

Algorithm 1 通信要求予測モデル更新と通信リソース制御切替の連携フロー

Initialize: $j = 1, k = 0, s^{\text{now}} = s_0^{\text{alc,opt}} = 1$.

- 1: **while** $s^{\text{now}} \leq l^{\text{tot}}$ **do**
- 2: **if** $s^{\text{now}} = s_{k-1}^{\text{alc,opt}} + \omega^{\text{haps}}$ **then**
- 3: Determine $s_{i,j}^{\text{upd,opt}}$ based on (3.9) at all the HAPSs.
- 4: HAPS calculates $\{\hat{\phi}_s | s_{k-1}^{\text{alc,opt}} + \omega^{\text{haps}} \leq s \leq s_k^{\text{alc,opt}} + 3\zeta^{\text{alc}}\}$ based on $s_{i,j}^{\text{upd,opt}}$ and shares to NOC.
- 5: $s^{\text{now}} \leftarrow s^{\text{now}} + \omega^{\text{noc}}$.
- 6: **end if**
- 7: **if** $s^{\text{now}} = s_k^{\text{alc,opt}}$ **then**
- 8: NOC switches into resource control timeframe $\#(k+1)$ to all the HAPSs.
- 9: NOC derives $s_{k+1}^{\text{alc,opt}}$ and $\{\gamma_s^\kappa | s_k^{\text{alc,opt}} \leq s \leq s_k^{\text{alc,opt}} + 3\zeta^{\text{alc}}, \kappa = k+1 \text{ or } k+2\}$ based on (3.15) and shares the result of $s_{k+1}^{\text{alc,opt}}$ with all the HAPSs.
- 10: $s^{\text{now}} \leftarrow s^{\text{now}} + \omega^{\text{haps}}$.
- 11: $k \leftarrow k + 1$.
- 12: **end if**
- 13: **if** $s^{\text{now}} = s_{i,j}^{\text{upd,opt}}$ **then**
- 14: Shift to training phase at IoT traffic demand prediction model of the HAPS $\#i$ in prediction timeframe $\#(j+1)$.
- 15: $s^{\text{now}} \leftarrow s^{\text{now}} + \varrho^{\text{upd}}$.
- 16: Shift to prediction phase at IoT traffic demand prediction model of the HAPS $\#i$ in prediction timeframe $\#(j+1)$.
- 17: $j \leftarrow j + 1$.
- 18: **end if**
- 19: $s^{\text{now}} \leftarrow s^{\text{now}} + 1$.
- 20: **end while**

3.4 性能評価

本節では、第3.3節で提案した動的スケジューリング方式の性能を計算機シミュレーションにより評価する。

3.4.1 評価環境

本シミュレーション評価では、衛星カバーエリアを $2250 \text{ km} \times 375 \text{ km}$ の方形領域として設定し、衛星カバーエリアの左下端を原点 $(0, 0)$ とする xy 平面において HAPS による通信要求予測を基に NOC で電力リソース制御 [発表文献1] を切り替えることで、衛星ビーム # b の中心座標 x_b が $y = 187.5 \text{ km}$ を満たす x 軸に平行な直線上に沿って適宜調整される状態を想定する。評価の簡略化のため、 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ の正方領域を単位グリッドとして構成したグリッド平面で衛星カバーエリアを模擬し、衛星カバーエリア内におけるいずれかのグリッドの中心部に HAPS が配置されているものとする。HAPS の配置数 N^{haps} は 10 局とし、各 HAPS における配置座標およびトラヒック発生モデルに関するパラメータは表 3.1 に示した。なお、HAPS のトラヒック要求量の実値は 3GPP TR 37.868 で定義される IoT トラヒック発生モデルを基に設定した [33]。

また、電力リソース制御 [発表文献1] により定まるリソース制御フレーム # k 内のタイムステップ # s における HAPS # i のスループット ${}_i\gamma_s^k$ は、シャノン=ハートレーの定理に従って次式から算出されるものとする。

$${}_i\gamma_s^k = \text{BW} \cdot \log_2 \left(1 + \max_{1 \leq b \leq N^{\text{bm}}} \text{SINR}_{P_b, (x_i, y_i)}^{\text{Total}} \right) \quad (3.19)$$

ここで、BW は衛星ビームへの割当周波数帯域幅であり、 N^{bm} は衛星ビーム数を表す。 $\text{SINR}_{P_b, (x_i, y_i)}^{\text{Total}}$ は衛星ビーム # b の送信電力 P_b および HAPS # i の配置座標 (x_i, y_i) の関数であり、詳細な導出式は [発表文献1] を参照した。

第3章 通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング

比較対象は、リソース制御間隔 ξ^{alc} が全シミュレーション期間全体にわたって固定されたケースを3つ設定し、提案スケジューリング方式におけるリソース制御間隔の最小時間長は、(3.16)に基づいて ω^{haps} , ω^{noc} を合わせた待機タイムステップ数に相当する3分10秒とした。また、上記3ケースの予測モデル更新間隔はリソース制御間隔 ξ^{alc} と同値に設定した。

そして、提案方式の有効性検証を目的としてリソース割当により生じる通信リソースの無駄を示す2つの評価指標を用いる。1つ目の評価指標はシミュレーション期間 l^{tot} にわたる全 HAPS の総リソース過不足量 Ψ^{tot} とし、以下に定義する。

$$\Psi^{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N^{\text{haps}}} \sum_{s=1}^{l^{\text{tot}}} {}_i\Psi_s^k \quad \text{s.t.} \quad {}_i\Psi_s^k = |{}_i\gamma_s^k - {}_i\varphi_s| \quad (3.20)$$

もう1つの評価指標は、シミュレーション期間 l^{tot} 内にわたる全 HAPS の総トラヒック要求量の実際値に対する総スループットの比率を表すトラヒック収容率 \mathcal{R}_{acc} とし、次式で定義する。

$$\mathcal{R}_{\text{acc}} = \frac{1}{N^{\text{haps}} l^{\text{tot}}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N^{\text{haps}}} \sum_{s=1}^{l^{\text{tot}}} \min\{{}_i\gamma_s^k, {}_i\varphi_s\}}{\sum_{i=1}^{N^{\text{haps}}} \sum_{s=1}^{l^{\text{tot}}} {}_i\varphi_s} \quad (3.21)$$

なお、伝送容量 ${}_i\gamma_s^k$ がトラヒック要求量 $\varphi_{i,s}^{\text{req}}$ 以上の HAPS に対しては $\varphi_{i,s}^{\text{req}}$ と同等のリソースを割り当てる。その他の設定パラメータは表 3.2 に示す。

表 3.1: HAPS の配置座標及びトラフィック発生モデルに係るパラメータ設定

HAPS No. (# i)		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
IoT トラフィック 発生モデル 1	x 座標 (x_i) [km]	87.5	412.5	587.5	762.5	1062.5	1262.5	1537.5	1712.5	1912.5	2137.5
	y 座標 (y_i) [km]	137.5	312.5	187.5	37.5	262.5	162.5	62.5	187.5	287.5	237.5
	z 座標 (z_i) [km]	20									
IoT トラフィック 発生モデル 2	IoT デバイス数	1200	2400	3000	2400	3600	3000	3600	2400	3000	1800
	パケットが発生する IoT 機器の到着分布	周期 (T_{mdl1}) 60 sec の一様分布									
	パケットサイズ	200 Bytes									
	周期 T_{mdl1} 間のパケット発生数	600 以上 3000 以下の乱数									
	IoT デバイス数	180	300	240	240	420	360	240	300	300	240
	パケットが発生する IoT 機器の到着分布	周期 (T_{mdl2}) 10 sec の Beta 分布 $Beta(\alpha, \beta)$									
Beta 分布のパラメータ (α, β)	(3, 8)	(5, 4)	(7, 5)	(4, 6)	(9, 4)	(2, 9)	(5, 7)	(8, 4)	(3, 6)	(7, 2)	
パケットサイズ	200 Bytes										
周期 T_{mdl2} 間のパケット発生数	40 以上 500 以下の乱数										

第3章 通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング

表 3.2: 通信要求予測に基づく動的リソース制御の評価パラメータ設定

パラメータ	値
評価環境	
HAPS 配置数 (N^{haps})	10
衛星ビーム数 (N^{bm})	6
周波数繰返し数	2
衛星高度 (z^{sat})	35786 km
衛星カバーエリア	2250 km × 375 km
グリッド面積	25 km × 25 km
ユーザ/フィーダリンクにおける伝搬遅延 ($d_i^{\text{ul}}/d^{\text{fl}}$)	0.26 sec
通信要求予測モデルの更新タイミング の逐次最適化に要する計算時間 (χ^{upd})	90 sec
リソース制御の切替タイミング の逐次最適化に要する計算時間 (χ^{alc})	90 sec
単位タイムステップあたりの時間長 (l^{unit})	5 sec
通信要求予測モデル	
LSTM ユニット数	60
学習率	0.03
バッチサイズ	32
最適化手法	Adam
損失関数	MSE
訓練フェーズでのエポック数	150
スライディングウィンドウサイズ (τ)	12 timesteps
訓練データセットとして用いた 実トラヒックデータの対象時間長	9000 timesteps
通信要求予測モデルの更新時間 (ϱ^{upd})	30 timesteps
シミュレーション期間 (l^{tot})	250 timesteps
電力リソース制御	
各ビームへの割当周波数帯域幅 (BW)	150 MHz
ダウンリンク周波数帯	20 GHz
衛星の総送信電力	2 kW
衛星アンテナ開口能率	0.5
衛星アンテナ径	2.5 m
アップリンク SINR	20 dB
ボルツマン定数	-228.6 dB
ダウンリンク伝搬損失	-213.5 dB
HAPS のアンテナ雑音温度	29 dB
HAPS の受信アンテナ利得	40 dBi
雑音帯域幅	83.9 dB
モンテカルロシミュレーションの試行回数	$1.0 \cdot 10^5$

3.4.2 評価結果

図 3.11 にシミュレーション期間 t^{tot} 内にわたる全 HAPS の総トラヒック要求量に係る実際値と予測値の時間変動結果を過去 10 タイムステップの移動平均線で示す。なお、図 3.11 に示す縦点線は、通信要求予測モデルの更新が完了したタイムステップである。このシミュレーション結果から、図 3.11(a) に示す提案方式では、予測モデル更新間隔及びリソース制御間隔が一定である図 3.11(b)-(d) の周期的制御と比較して、シミュレーション期間 t^{tot} 全体を通じてトラヒック要求の実際値と予測値間の予測誤差が低減されている点を確認できる。予測モデル更新間隔が短くなるほど通信要求予測モデルの更新頻度が多くなるため、シミュレーション期間全体で見ると総トラヒック要求量の実際値と予測値間の予測誤差は減少する傾向にある。一方、提案方式を用いると、予測モデル更新間隔が一定な周期的制御と比較して、総トラヒック要求量の予測誤差はシミュレーション期間全体で見ると減少していることが分かる。これは、提案方式では (3.10) に示す通信要求予測モデルの更新タイミングを設定可能な時間範囲が直近のリソース制御間隔 $s_k^{\text{alc,opt}}$ によって調整されるため、リソース制御間隔が一定の中で通信要求予測モデルも同様に周期的に更新する場合よりも、(3.9) によって導出される通信要求予測モデルの更新タイミングの妥当性が高まるためである。

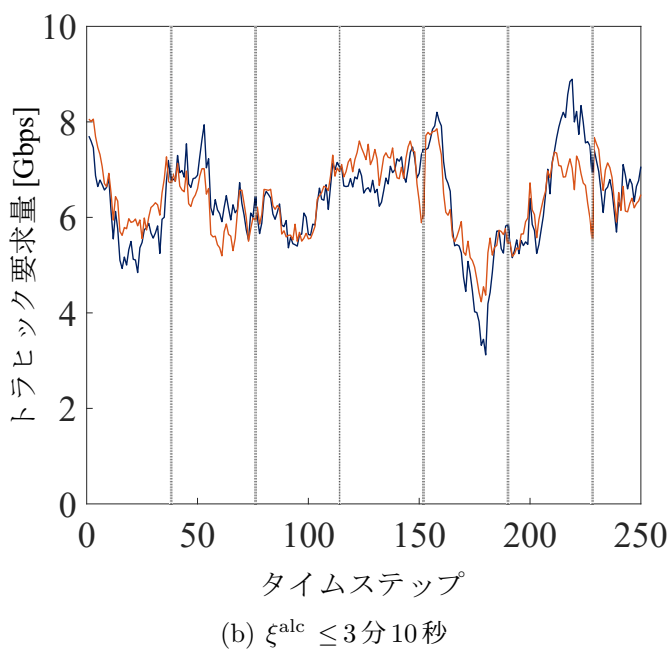
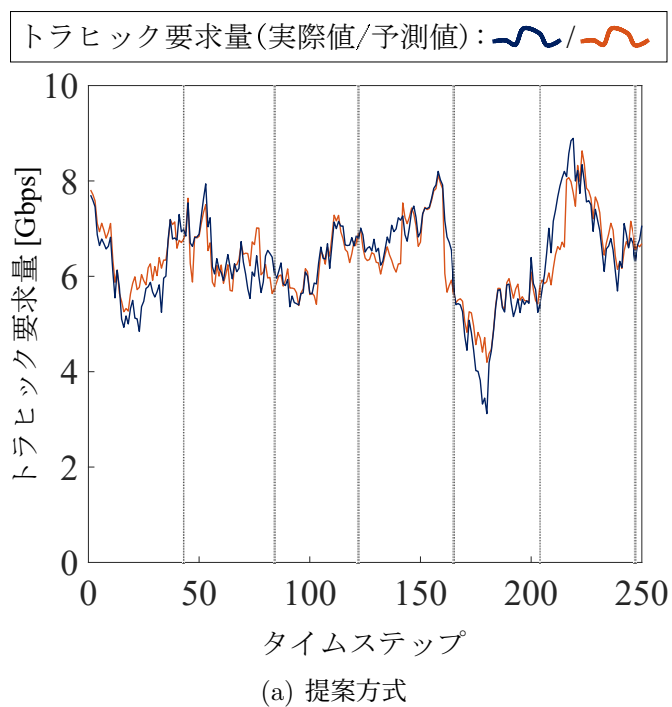


図 3.11: 全 HAPS の総トラフィック要求量に係る実際値と予測値の時間変動

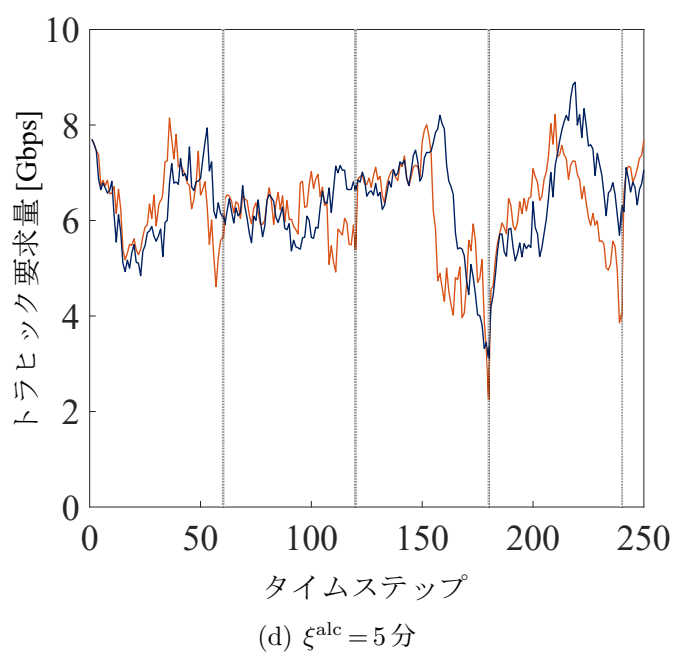
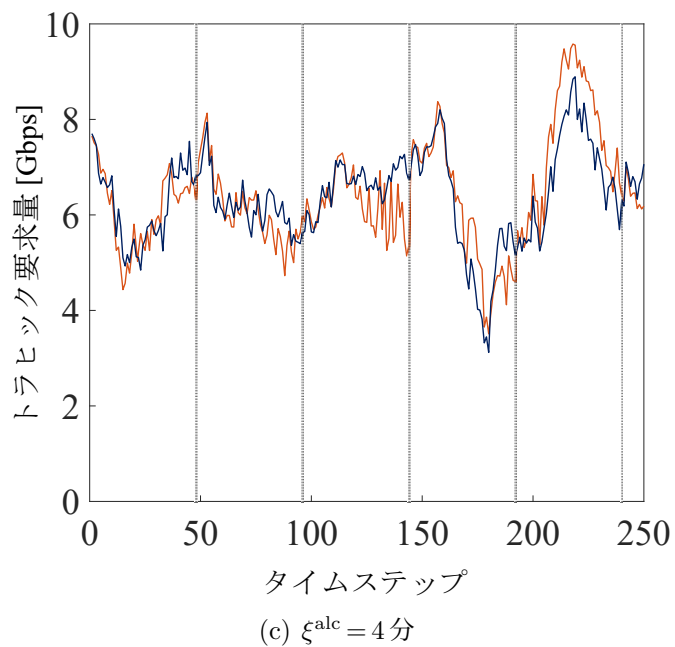


図 3.11: 全 HAPS の総トラフィック要求量に係る実際値と予測値の時間変動

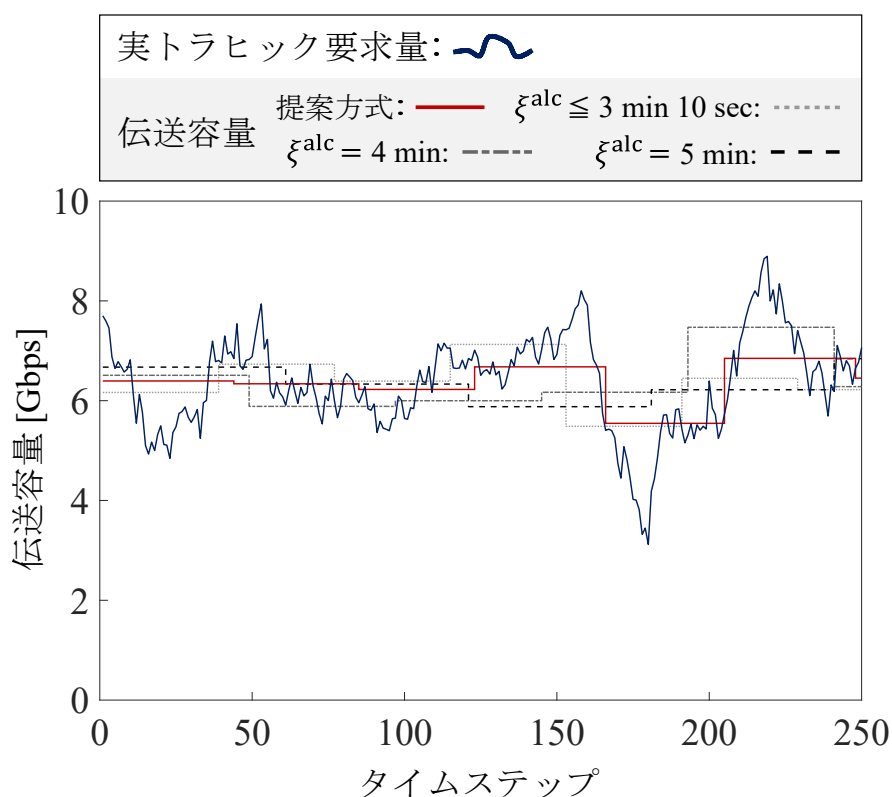


図 3.12: 通信要求予測に基づく電力リソース制御による伝送容量の時間変動

次に、通信要求予測に基づく電力リソース制御 [発表文献 1] による伝送容量の変動結果を図 3.12 に示す。図 3.12 の結果より、シミュレーション期間 t^{tot} にわたる伝送容量の変動結果が比較対象の制御方式間で異なる上、提案方式ではリソース制御間隔が一定の周期的制御と比較して、電力リソース制御によって得られる全 HAPS の総伝送容量が実トラヒック要求量の時間変動に対して最も追従していることが、図 3.13 に示す総リソース過不足量が最小である点から確認できる。これは、通信要求予測モデルに係る更新間隔の違いに起因する通信要求予測モデルの予測精度ならびにリソース制御間隔の時間長に起因する実トラヒック要求量の時間変動に対する適応度の観点で、比較対象とする周期的制御よりも提案方式の方が高いことを示している。なお、電力リソース制御 [発表文献 1] により得られ

第3章 通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング

る全 HAPS の総スループットが実トラフィック要求量の合計値に対して追従できていない時間帯が発生している理由は、全 HAPS における総トラフィック要求量の予測値が同一値であっても各 HAPS のトラフィック要求量の予測値はそれぞれ異なる上、同一周波数帯域を持つビーム間干渉が各 HAPS でのスループット減少に及ぼす影響が各ビームの送信電力値によって変化するためであると考察する。

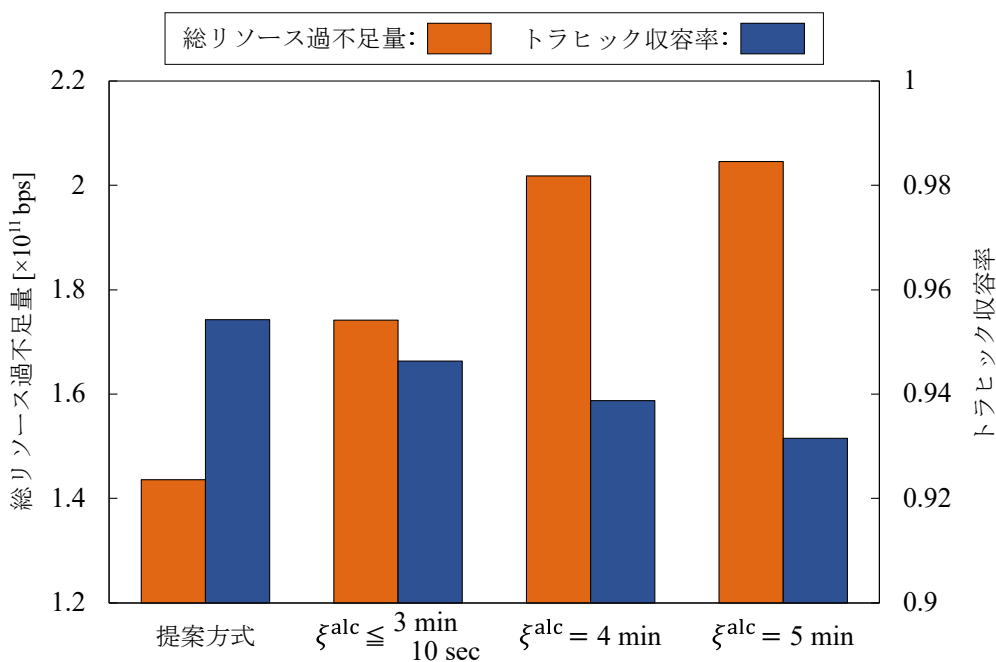


図 3.13: 総リソース過不足量及びトラヒック収容率の観点での周期的制御と提案スケジューリング方式間の比較

最後に、総リソース過不足量及びトラヒック収容率の観点での周期的制御と提案方式間の比較結果を図 3.13 に示す。図 3.13 の評価結果より、本研究で提案する動的スケジューリング方式を適用することで、総リソース過不足量の減少およびトラヒック収容率の増加が示された。故に、提案スケジューリング方式によって割り当てリソースの無駄を削減可能であることを確認した。

3.5 まとめ

本章では、衛星カバーエリア内に分布する HAPS 間の地理的分布やトラフィック要求量の予測値の関係に応じて、HAPS による通信要求予測モデルの更新および NOC によるリソース制御の切替を実施するタイミングを逐次的に最適化可能な数理モデルを構築した。その上で、これらの逐次最適化モデルを連携させ、通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング方式を提案した。シミュレーションによる評価の結果、リソース制御を周期的に実行する場合と比較して提案方式は割り当てリソースの無駄を削減可能であることを確認した。

第4章

双方向中継伝送の効率化に向けた 飛翔体の送信電力制御

4.1 はじめに

本章では，非地上系統合ネットワークにおける双方向中継伝送を効率化するために，アップ/ダウンリンクを使用する各地上ユーザ端末群における通信要求の地理的分布に応じて飛翔体での両リンクに対する送信電力配分を統合的に制御可能な数理モデルを構築する．まず，想定するシステム構成について説明するとともに，想定システムでの双方向中継伝送上の課題を指摘する．そして，非地上系統合ネットワークにおける双方向中継伝送の高効率化に向けた飛翔体の送信電力配分モデルを提案し，非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送の課題を解決する．最後に数値解析によって提案モデルの有効性を確認する．

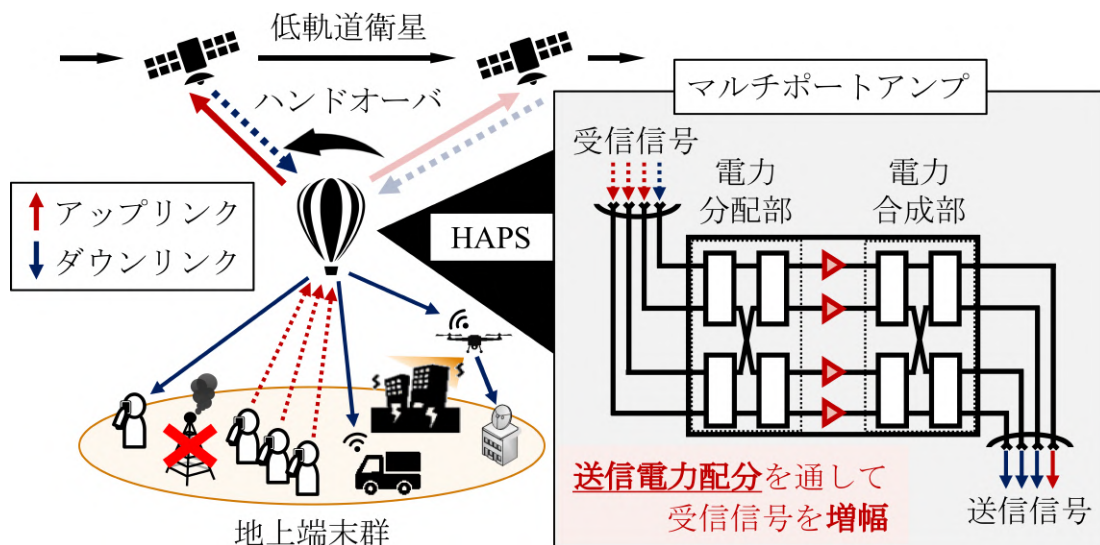


図 4.1: 非地上系統合ネットワークでの HAPS を用いた双方向中継伝送 © 2022 IEICE

4.2 想定システムとその課題

本節では、本研究において想定する非地上系統合ネットワークに関して説明するとともに、非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送上の課題を述べる。

4.2.1 想定システム

本研究では、図 4.1 に示すように、低軌道衛星、HAPS 及び地上端末群で構成する非地上系統合ネットワークにおいて、低軌道衛星-地上端末群間を HAPS が中継基地局としてアップ/ダウンリンクのそれぞれで AF (Amplify-and-Forward) 中継伝送を行う状況を想定する。アップ/ダウンリンクの周波数帯については現行の衛星通信で用いられる Ka 帯を使用するとし、Ka 帯等の高周波数帯域が今後地上系で更に使用されるようになる状況を見越して、同一周波数帯域を共用するシステムを想定する。各リンクでは、MF-TDMA (Multi-Frequency Time-Division

Multiple Access) 方式に基づいて低軌道衛星-HAPS 間で使用する周波数帯域を HAPS-地上端末間で重複のないように等分割してサブチャネルを割り当て、低軌道衛星と地上端末間は直接通信しない形態とする。また、HAPS は気球型 HAPS での運用を想定し [34], 各リンクでの中継伝送に使用する複数の送信アンテナに対してマルチポートアンプ一式を共有することで、地上端末群の通信要求に応じて各送信アンテナへの送信電力配分の調整を行う [35]。簡易化のため、本研究で想定するマルチポートアンプは非線形歪みに伴う干渉の影響が生じない理想状態とする。

4.2.2 双方向中継伝送における飛翔体の送信電力制御上の課題

非地上系統合ネットワークで HAPS を用いた双方向中継伝送を行うにあたり、HAPS による送信電力制御上の懸念点は2つ存在する。一つは、アップ/ダウンリンクに対して配分可能な HAPS の総送信電力は各々固定するという前提での検討に留まっていたため、各リンクの伝送容量が限定される。これにより、両リンクを使用する地上端末群間で通信要求に偏りが生じる状況においては、HAPS で使用電力の過不足が無駄に発生する。もう一つは、現在打ち上げが進行中である SpaceX 等の大規模な衛星コンステレーションを活用すると仮定すると、低軌道衛星-HAPS 間において数分に一度の頻度でハンドオーバーが実行されるため、時々刻々と変化する地上端末群の通信要求に応じて限られた時間内で HAPS によるアップ/ダウンリンクへの送信電力配分を逐次的に制御することが重要である。

従って、非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送時に通信要求を満足する地上端末数が常に多い状態では、アップリンク使用端末及びダウンリンク使用端末の位置関係や通信要求の地理的分布に応じて、図 4.2 に示すような HAPS での両リンクに対する送信電力配分を統合的に制御可能な数理モデルの構築が必要である。

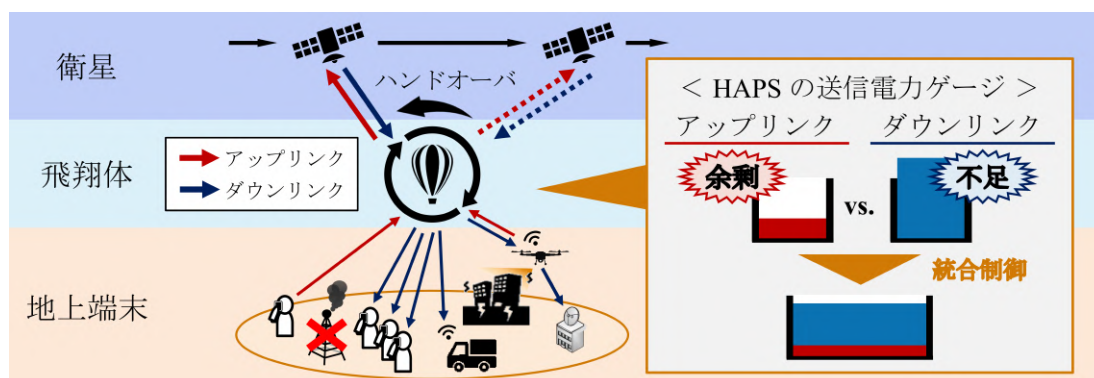


図 4.2: 双方向中継伝送における HAPS による送信電力配分の統合制御の概念図

4.3 双方向中継伝送の効率化に向けた飛翔体の送信電力制御方式

本節では、非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送の高効率化に向けた HAPS の送信電力配分モデルを提案する。はじめに、非地上系統合ネットワークにおける HAPS の送信電力制御を通じた双方向中継伝送の効率化について述べる。次に、非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送において、アップ/ダウンリンクに配分する HAPS の送信電力等に基づいた両リンクの伝送容量の定式化を行う。最後に、通信要求を満足する地上端末数の割合を示す要求満足度を最大限担保しつつ、電力効率を向上可能な HAPS の送信電力配分モデルについて提案する。

4.3.1 提案方式の概要

非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送に対応した HAPS の送信電力配分モデルを構築するにあたり、本研究での評価指標として、HAPS へ接続を試みる全地上端末に対するトラヒック要求量以上の伝送容量を担保した地上端末数の割合を要求満足度と定義し、定式化する。しかし、この定義に基づいて記述され

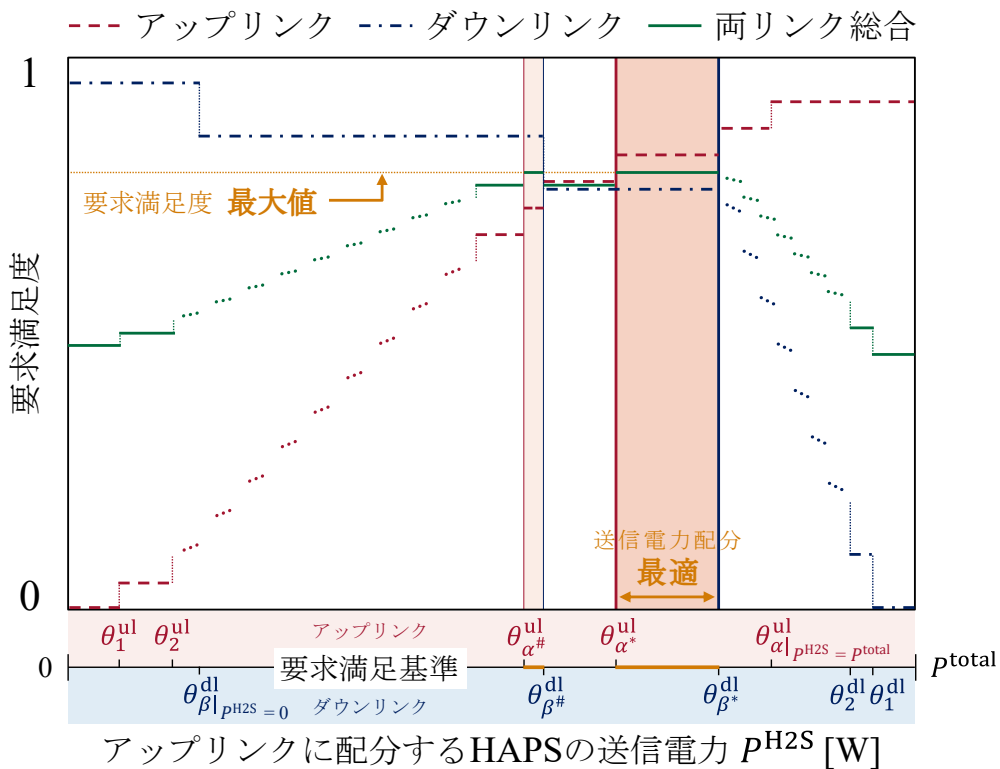


図 4.3: 提案モデルを用いた HAPS での送信電力配分の導出 © 2022 IEICE

た要求満足度の算出式では、HAPS による両リンクへの最適な送信電力配分の導出に要する計算時間はシミュレーション手法に依存するため、低軌道衛星-HAPS 間におけるハンドオーバーの発生間隔に対して HAPS の動的な送信電力制御が対応できない可能性が高い。そこで、次に HAPS が両リンクに配分する送信電力と各リンクの伝送容量間の関係を定式化する。最後に、HAPS の総送信電力の全てを両リンク間で配分すると一旦仮定し、図 4.3 のように HAPS がアップリンクに配分する送信電力との大小関係のみで各地上端末からの通信要求を満足するかを判定できるように式変形し、提案モデルとして最終化する。

これにより、提案モデルを用いると、各リンクを使用する地上端末群の分布位置や通信要求の地理的分布に応じて地上端末群の要求満足度を最大化しつつ、使用電力を最小限に抑制可能な HAPS の最適な送信電力配分を解析的に導出できる。

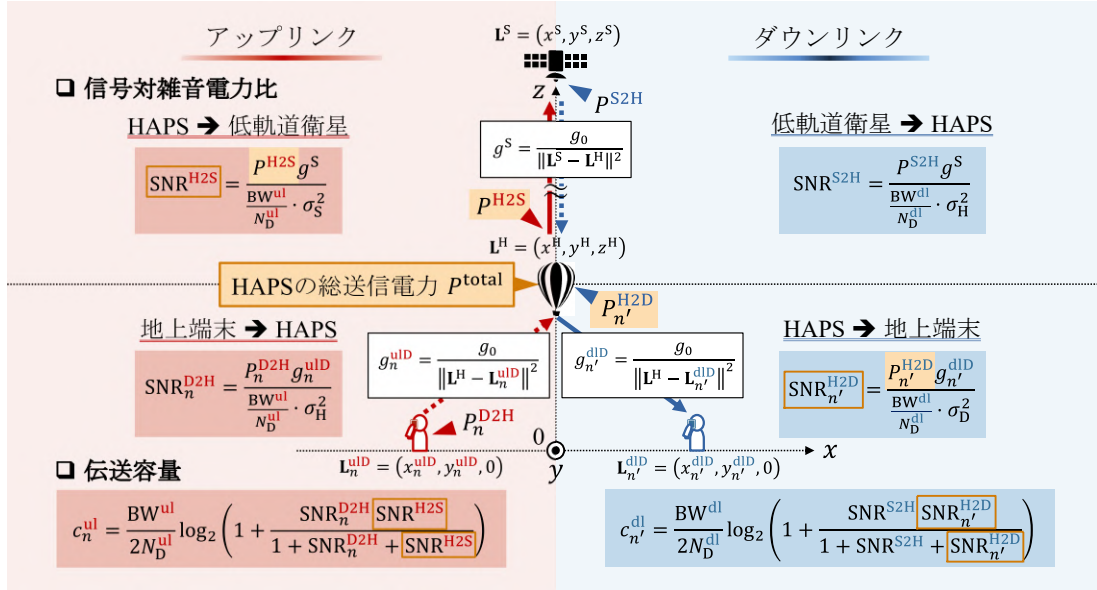


図 4.4: 非地上系統合ネットワークにおける双方向中継伝送のシステムモデル

4.3.2 双方向中継伝送における伝送容量の算出モデル

本項では、非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送において、アップ/ダウンリンクに配分する HAPS の送信電力等を基に、両リンクの伝送容量を定式化する。提案モデルでは、図 4.4 に示すように、低軌道衛星、HAPS、アップリンク使用端末 n 及びダウンリンク使用端末 n' の xyz 空間座標 \mathbf{L} をそれぞれ、 $\mathbf{L}^S = (x^S, y^S, z^S)$, $\mathbf{L}^H = (x^H, y^H, z^H)$, $\mathbf{L}_n^{\text{ulD}} = (x_n^{\text{ulD}}, y_n^{\text{ulD}}, 0)$, $\mathbf{L}_{n'}^{\text{dlD}} = (x_{n'}^{\text{dlD}}, y_{n'}^{\text{dlD}}, 0)$ のように定義する。アップ/ダウンリンクを使用する地上端末の総数は N_D^{ul} , N_D^{dl} 台とする。また、4.2.1 項で述べた通り、アップ/ダウンリンクの各々に対して低軌道衛星-HAPS-地上端末間で帯域幅 $BW^{\text{ul/dl}}$ を共有し、各リンクを使用する地上端末間で重複のないように等分割する。ここでは、リンク間の干渉を回避するため、地上端末間で異なるサブチャネルが割り当てられると仮定する。

はじめに、低軌道衛星-HAPS間及びHAPS-アップ/ダウンリンク使用端末 n/n' 間のチャンネル利得 $g^S, g_n^{\text{ulD}}, g_{n'}^{\text{dlD}}$ を定義する. 本研究の想定環境では、アップ/ダウンリンク帯域幅はいずれも搬送周波数と比べて非常に小さく、低軌道衛星-HAPS間、HAPS-アップ/ダウンリンク使用端末間の伝搬路は見通し内経路 (LoS 経路) が支配的であると仮定すると、チャンネル利得 $g^S, g_n^{\text{ulD}}, g_{n'}^{\text{dlD}}$ は、基準距離 1m における電力利得 g_0 を用いて次式で与えられる [36].

$$g^S = \frac{g_0}{\|\mathbf{L}^S - \mathbf{L}^H\|^2} \quad (4.1)$$

$$g_n^{\text{ulD}} = \frac{g_0}{\|\mathbf{L}^H - \mathbf{L}_n^{\text{ulD}}\|^2}, \quad g_{n'}^{\text{dlD}} = \frac{g_0}{\|\mathbf{L}^H - \mathbf{L}_{n'}^{\text{dlD}}\|^2} \quad (4.2)$$

次に、アップリンクにおける低軌道衛星-HAPS間及びHAPS-アップリンク使用端末 n 間の信号対雑音電力比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) は下式で表される.

$$\text{SNR}^{\text{H2S}} = \frac{P^{\text{H2S}} g^S}{\left(\frac{\text{BW}^{\text{ul}}}{N_{\text{D}}^{\text{ul}}}\right) \sigma_{\text{S}}^2}, \quad \text{SNR}_n^{\text{D2H}} = \frac{P_n^{\text{D2H}} g_n^{\text{ulD}}}{\left(\frac{\text{BW}^{\text{ul}}}{N_{\text{D}}^{\text{ul}}}\right) \sigma_{\text{H}}^2} \quad (4.3)$$

ここで、 $P^{\text{H2S}}, P_n^{\text{D2H}}$ は低軌道衛星へのHAPSの送信電力、HAPSへのアップリンク使用端末 n の送信電力を示している. BW^{ul} はアップリンク帯域幅を表す. $\sigma_{\text{S}}^2, \sigma_{\text{H}}^2$ はそれぞれ低軌道衛星及びHAPSの雑音電力密度である. 同様に、ダウンリンクにおける低軌道衛星-HAPS間及びHAPS-ダウンリンク使用端末 n' 間のSNRは下式で表される.

$$\text{SNR}^{\text{S2H}} = \frac{P^{\text{S2H}} g^S}{\left(\frac{\text{BW}^{\text{dl}}}{N_{\text{D}}^{\text{dl}}}\right) \sigma_{\text{H}}^2}, \quad \text{SNR}_{n'}^{\text{H2D}} = \frac{P_{n'}^{\text{H2D}} g_{n'}^{\text{dlD}}}{\left(\frac{\text{BW}^{\text{dl}}}{N_{\text{D}}^{\text{dl}}}\right) \sigma_{\text{D}}^2} \quad (4.4)$$

なお、 $P^{\text{S2H}}, P_{n'}^{\text{H2D}}$ はHAPSへの低軌道衛星の送信電力、ダウンリンク使用端末 n' へのHAPSの送信電力を表す. BW^{dl} はダウンリンク帯域幅、 σ_{D}^2 は地上端末の雑音電力密度である.

上述で定式化した両リンクにおける低軌道衛星-HAPS間及びHAPS-地上端末間のSNRを基に、HAPSでのAF中継伝送を適用した低軌道衛星-アップ/ダウン

リンク使用端末間の伝送容量 $c_n^{\text{ul/dl}}$ は次式から導出される [37, 38].

$$c_n^{\text{ul}} = \frac{\text{BW}^{\text{ul}}}{2N_D^{\text{ul}}} \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}_n^{\text{D2H}} \text{SNR}^{\text{H2S}}}{1 + \text{SNR}_n^{\text{D2H}} + \text{SNR}^{\text{H2S}}} \right) \quad (4.5)$$

$$c_{n'}^{\text{dl}} = \frac{\text{BW}^{\text{dl}}}{2N_D^{\text{dl}}} \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}^{\text{S2H}} \text{SNR}_{n'}^{\text{H2D}}}{1 + \text{SNR}^{\text{S2H}} + \text{SNR}_{n'}^{\text{H2D}}} \right) \quad (4.6)$$

4.3.3 飛翔体における通信要求に応じた送信電力配分の最適化

本項では、非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送において地上端末群の要求満足度を最大化するための HAPS による最適な送信電力配分を導出する。

4.3.1 項にて述べた通り、本研究では評価指標として、HAPS へ接続を試みる地上端末群内に占めるトラヒック要求量以上の伝送容量を担保した地上端末数の割合を地上端末群における要求満足度 φ と定義し、次式で定式化する。

$$\varphi = \frac{\sum_{n=1}^{N_D^{\text{ul}}} \mathcal{U}(c_n^{\text{ul}} \geq r_n^{\text{ul}}) + \sum_{n'=1}^{N_D^{\text{dl}}} \mathcal{U}(c_{n'}^{\text{dl}} \geq r_{n'}^{\text{dl}})}{N_D^{\text{ul}} + N_D^{\text{dl}}} \quad (4.7)$$

ここで、 $\mathcal{U}(c_{n/n'}^{\text{ul/dl}} \geq r_{n/n'}^{\text{ul/dl}})$ は地上端末の要求満足基準であり、非地上系統合ネットワークに対して通信要求を行うために HAPS への接続を試みるアップ/ダウンリンク使用端末 n/n' のトラヒック要求量 $r_{n/n'}^{\text{ul/dl}}$ 及び伝送容量 $c_{n/n'}^{\text{ul/dl}}$ の大小関係に基づき、ステップ関数を用いて地上端末の通信要求を満足するか否かを判定する。

$$\mathcal{U}(c_{n/n'}^{\text{ul/dl}} \geq r_{n/n'}^{\text{ul/dl}}) = \begin{cases} 1 & (c_{n/n'}^{\text{ul/dl}} \geq r_{n/n'}^{\text{ul/dl}}) \\ 0 & (c_{n/n'}^{\text{ul/dl}} < r_{n/n'}^{\text{ul/dl}}) \end{cases} \quad (4.8)$$

そして、地上端末群における要求満足度 φ が最大となるようなアップ/ダウンリンクへ配分する HAPS の送信電力の組み合わせを \mathbb{P}_H と表すとすると、この \mathbb{P}_H の最適解 \mathbb{P}_H^* を求める最適化問題 Q は次のように定式化できる。

$$\mathcal{Q}: \mathbb{P}_H^* = \arg \max_{\mathbb{P}_H} \varphi \quad (4.9)$$

$$\text{s.t. } \mathbb{P}_H = \{(P^{H2S}, P_{n'}^{H2D}) \mid 1 \leq n' \leq N_D^{\text{dl}}\} \quad (4.10)$$

$$P^{H2S} + \sum_{n'=1}^{N_D^{\text{dl}}} P_{n'}^{H2D} \leq P^{\text{total}} \quad (4.11)$$

なお、この最適化問題 \mathcal{Q} では式 (4.11) に示すように、HAPS の総送信電力 P^{total} 内に収まるように両リンクへ配分する送信電力 $(P^{H2S}, P_{n'}^{H2D})$ が調整される制約を設けている。

次に、式 (4.8) で示される地上端末の要求満足基準 \mathcal{U} について、アップ/ダウンリンクへの最適な HAPS の送信電力配分 \mathbb{P}_H^* を解析的に導出するために、式 (4.8) を変形する。この式変形にあたり、HAPS の総送信電力 P^{total} の全てを両リンク間で配分すると一旦仮定する。上述を踏まえて、低軌道衛星へ配分する HAPS の送信電力 P^{H2S} の大小関係に基づく要求満足基準によって通信要求を満たすかを判定可能とするために、地上端末群の要求満足度を ψ で再定義し、次のように定式化する。

$$\psi = \frac{\sum_{\alpha=0}^{\alpha|_{P^{H2S}=P^{\text{total}}}} \mathcal{U}(P^{H2S} \geq \theta_{\alpha}^{\text{ul}}) + \sum_{\beta=0}^{\beta|_{P^{H2S}=0}} \mathcal{U}(P^{H2S} \leq \theta_{\beta}^{\text{dl}})}{N_D^{\text{ul}} + N_D^{\text{dl}}} \quad (4.12)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \alpha|_{P^{H2S}=P^{\text{total}}} \leq N_D^{\text{ul}}, 0 \leq \beta|_{P^{H2S}=0} \leq N_D^{\text{dl}} \quad (4.13)$$

$$0 \leq \theta_{\alpha}^{\text{ul}}, \theta_{\beta}^{\text{dl}} \leq P^{\text{total}}, \quad (4.14)$$

$$\theta_0^{\text{ul}} = 0, \theta_0^{\text{dl}} = P^{\text{total}} \quad (4.15)$$

$$\theta_{\alpha}^{\text{ul}} = \frac{\text{BW}^{\text{ul}} \sigma_S^2 (1 + \text{SNR}_{\alpha}^{\text{D2H}}) (2^{2N_D^{\text{ul}} r_{\alpha}^{\text{ul}} / \text{BW}^{\text{ul}}} - 1)}{N_D^{\text{ul}} g_{\alpha}^{\text{S}} (1 + \text{SNR}_{\alpha}^{\text{D2H}} - 2^{2N_D^{\text{ul}} r_{\alpha}^{\text{ul}} / \text{BW}^{\text{ul}}})} \quad (4.16)$$

$$\theta_{\beta}^{\text{dl}} = P^{\text{total}} - \frac{\text{BW}^{\text{dl}} \sigma_D^2 (1 + \text{SNR}_{\beta}^{\text{S2H}}) (2^{2N_D^{\text{dl}} r_{\beta}^{\text{dl}} / \text{BW}^{\text{dl}}} - 1)}{g_{\beta}^{\text{D}} (1 + \text{SNR}_{\beta}^{\text{S2H}} - 2^{2N_D^{\text{dl}} r_{\beta}^{\text{dl}} / \text{BW}^{\text{dl}}})} \quad (4.17)$$

ここで、 α, β は要求満足基準 U を満たすアップ/ダウンリンクの使用端末数を表しており、 α, β の取り得る値の範囲はそれぞれ、アップ/ダウンリンクの片側に対して HAPS の総送信電力 P^{H2S} を全て配分する場合に U を満たす使用端末数 $\alpha|_{P^{\text{H2S}}=P^{\text{total}}}, \beta|_{P^{\text{H2S}}=0}$ 以下となる。 $\theta_{\alpha}^{\text{ul}}, \theta_{\beta}^{\text{dl}}$ はアップ/ダウンリンクを使用する地上端末の要求満足基準 U に基づく P^{H2S} に対する閾値を示す。なお、式 (4.12) に示す α は $\theta_{\alpha}^{\text{ul}}$ の昇順に、 β は $\theta_{\beta}^{\text{dl}}$ の降順に従うとする。ここで、要求満足基準 U を満たすアップ/ダウンリンクの使用端末数 (α, β) の組み合わせを Ψ_{H} と定義すると、地上端末群の要求満足度 φ を最大化する最適化問題 Q は、以下に定式化する最適化問題 Q' と同義である。

$$Q' : \Psi_{\text{H}}^* = \arg \max_{\Psi_{\text{H}}^{\#}} (\theta_{\beta^{\#}}^{\text{dl}} - \theta_{\alpha^{\#}}^{\text{ul}}) \quad (4.18)$$

$$\text{s.t. } \Psi_{\text{H}}^{\#} = \arg \max_{\Psi_{\text{H}}} \psi \quad (4.19)$$

$$\Psi_{\text{H}} = \left\{ (\alpha, \beta) \left| \begin{array}{l} 0 \leq \alpha \leq \alpha|_{P^{\text{H2S}}=P^{\text{total}}} \\ 0 \leq \beta \leq \beta|_{P^{\text{H2S}}=0} \end{array} \right. \right\} \quad (4.20)$$

$$\theta_{\alpha^{\#}}^{\text{ul}} \leq \theta_{\beta^{\#}}^{\text{dl}} \quad (4.21)$$

この最適化問題 Q' では、まず地上端末群の要求満足度 ψ が最大となる U を満足するアップ/ダウンリンクの使用端末数の組み合わせ $\Psi_{\text{H}}^{\#} = (\alpha^{\#}, \beta^{\#})$ を抽出し、その上で $\Psi_{\text{H}}^{\#}$ が複数存在する場合は、 $\Psi_{\text{H}}^{\#}$ を基に算出された地上端末の要求満足基準における送信電力 P^{H2S} に対する閾値 $\theta_{\alpha^{\#}}^{\text{ul}}, \theta_{\beta^{\#}}^{\text{dl}}$ 間の差分が最大である $\Psi_{\text{H}}^{\#}$ を最適解 $\Psi_{\text{H}}^* = (\alpha^*, \beta^*)$ として導出する。これにより、地上端末群の要求満足度を最大限担保しつつ、HAPS の使用する送信電力を $(\theta_{\beta^*}^{\text{dl}} - \theta_{\alpha^*}^{\text{ul}})$ [W] 削減できる。以上から、アップ/ダウンリンクに配分する HAPS の最適送信電力 $P^{\text{H2S}*}, P_{n'}^{\text{H2D}*}$ は

$\theta_{\alpha^*}^{\text{ul}}$, $\theta_{\beta^*}^{\text{dl}}$ を用いて次式から導出される.

$$\begin{aligned} (P^{\text{H2S}^*}, P_{n'}^{\text{H2D}^*}) &= \left(\theta_{\alpha^*}^{\text{ul}}, \frac{P^{\text{total}} - \theta_{\beta^*}^{\text{dl}}}{N_{\text{D}}^{\text{dl}}} \right) \\ &\text{s.t. } 1 \leq n' \leq N_{\text{D}}^{\text{dl}} \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.4 性能評価

本節では、非地上系統合ネットワークでの双方向中継伝送において提案モデルの有効性を評価するために数値解析を実施する. 4.4.1 項では評価環境について説明し、解析時に使用したパラメータを示す. 4.4.2 項では地上端末群の要求満足度に関する評価結果から、本研究で提案する HAPS の送信電力配分モデルの有効性を確認する.

4.4.1 評価環境

本研究では、図 4.5 に示すような水平方向を x 軸、高度方向を z 軸とする 2 次元直交座標系上で評価する. 低軌道衛星と HAPS は原点に対して高度 760km, 20km に 1 機ずつ配置する. 地上端末は計 150 台とし、アップ/ダウンリンクの使用端末数 (N_{D}^{ul} , N_{D}^{dl}) は 1 台刻みで (50, 100) から (100, 50) の範囲にわたる全 51 ケースを設定の上、各ケースにおいて x 軸上に原点から x 軸正方向に 100km の範囲内で使用リンク別に地上端末を等間隔に分布させる.

なお、アップ/ダウンリンクに割り当てる周波数帯域幅 $BW^{\text{ul/dl}}$ は各リンクの使用端末群内で均等に割り当てるものとし、HAPS への中継伝送における低軌道衛星及び地上端末の送信電力 $P^{\text{D2H/S2H}}$ は一定とする. また、アップ/ダウンリンクを使用する地上端末のトラヒック要求量 $r_n^{\text{ul/dl}}$ は 0.5-3.5Mbps, 1.5-4.5Mbps の範囲で一様分布に従って決定する. そして、その他パラメータを含む設定の一覧を表 4.1 に示す.

第 4 章 双方向中継伝送の効率化に向けた飛翔体の送信電力制御

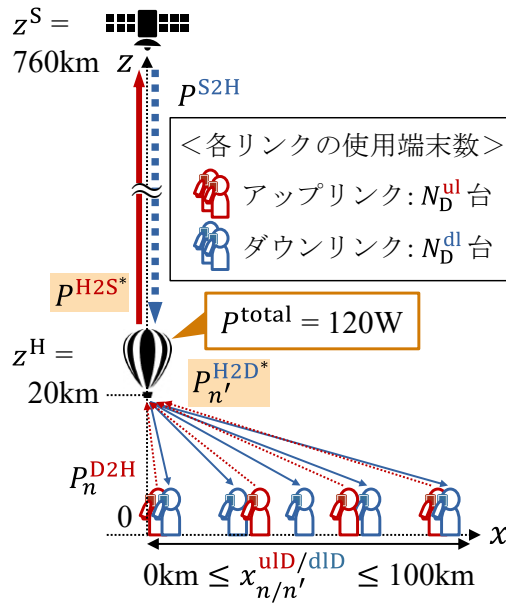
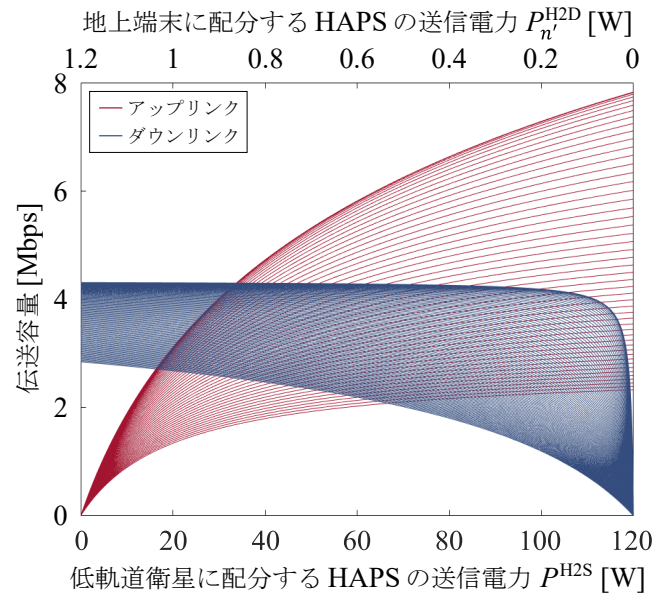


図 4.5: 評価環境

表 4.1: 双方向中継伝送における送信電力制御の評価パラメータ設定

パラメータ	値
アップ/ダウンリンク帯域幅 ($BW^{\text{ul/dl}}$)	250 MHz
地上端末の総数 ($N_D^{\text{ul}} + N_D^{\text{dl}}$)	150 台
HAPS のカバーエリア	100 km
低軌道衛星の軌道高度 (z^S)	760 km
HAPS の航行高度 (z^H)	20 km
基準距離 1m における電力利得 (g_0)	1.59×10^{-3}
HAPS への地上端末の送信電力 (P^{D2H})	1 W
HAPS への低軌道衛星の送信電力 (P^{S2H})	60 W
HAPS の総送信電力 (P^{total})	120 W
低軌道衛星の雑音電力密度 (σ_S^2)	-170.8 dBm/Hz
HAPS の雑音電力密度 (σ_H^2)	-171.6 dBm/Hz
地上端末の雑音電力密度 (σ_D^2)	-175.6 dBm/Hz
アップリンク端末 n のトラフィック要求量 (r_n^{ul})	0.5-3.5 Mbps
ダウンリンク端末 n' のトラフィック要求量 ($r_{n'}^{\text{dl}}$)	1.5-4.5 Mbps



(a) $(N_D^{ul}, N_D^{dl}) = (50, 100)$

図 4.6: HAPS での送信電力配分によるアップ/ダウンリンクにおける伝送容量の増減影響 © 2022 IEICE

4.4.2 評価結果

まず、HAPS での送信電力配分によるアップ/ダウンリンクにおける伝送容量 $c_n^{ul/dl}$ の増減影響に関する評価結果を図 4.6 に示す。なお、図 4.6 と図 4.7 では、アップ/ダウンリンクの使用端末数 (N_D^{ul}, N_D^{dl}) については $(50, 100)$, $(75, 75)$, $(100, 50)$ の 3 つの評価ケースを抽出したものである。図 4.6(a)-(c) に共通する傾向として、HAPS の総送信電力 P^{total} が一定の下では、片方向のリンクに対する送信電力の配分比を高めると当リンクの伝送容量は増加する一方で、他方のリンクでは配分される送信電力の低減に伴って伝送容量は減少する点が挙げられる。また、HAPS との水平距離が近い地上端末ほど伝送容量は高く、地上端末に対する送信電力及び帯域幅の配分に関する本評価のポリシー上では、各リンクの使用端末数と低軌道衛星-地上端末間の伝送容量との間に単調減少関係が存在している。一方、HAPS から両リンクに配分する送信電力が同一であっても、各リンクを使用する地上端末数の割合によって両リンク共に伝送容量に差異が生じていることが確認できる。

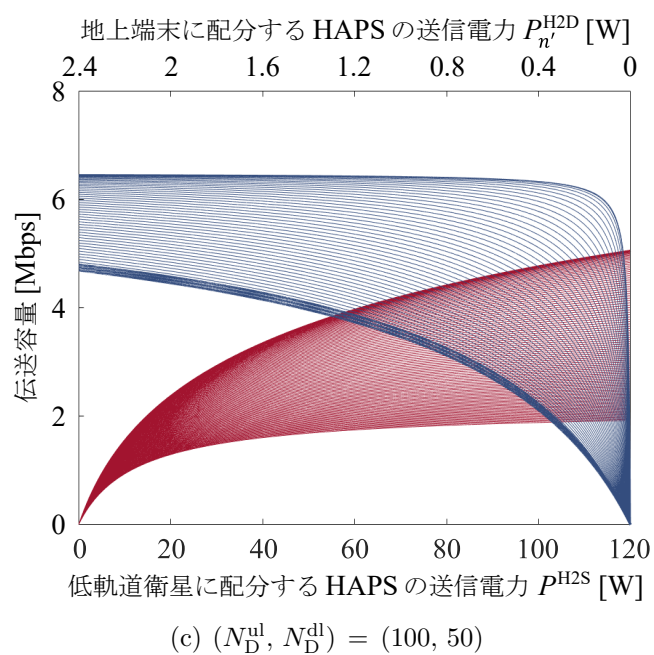
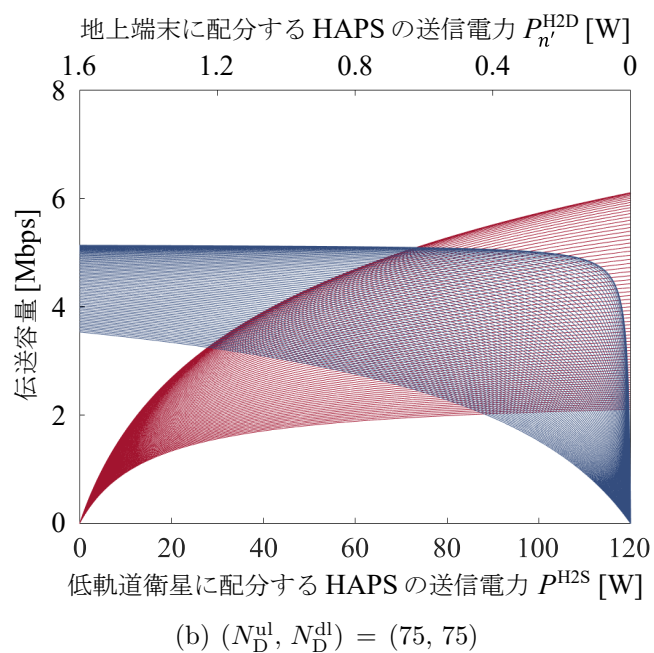
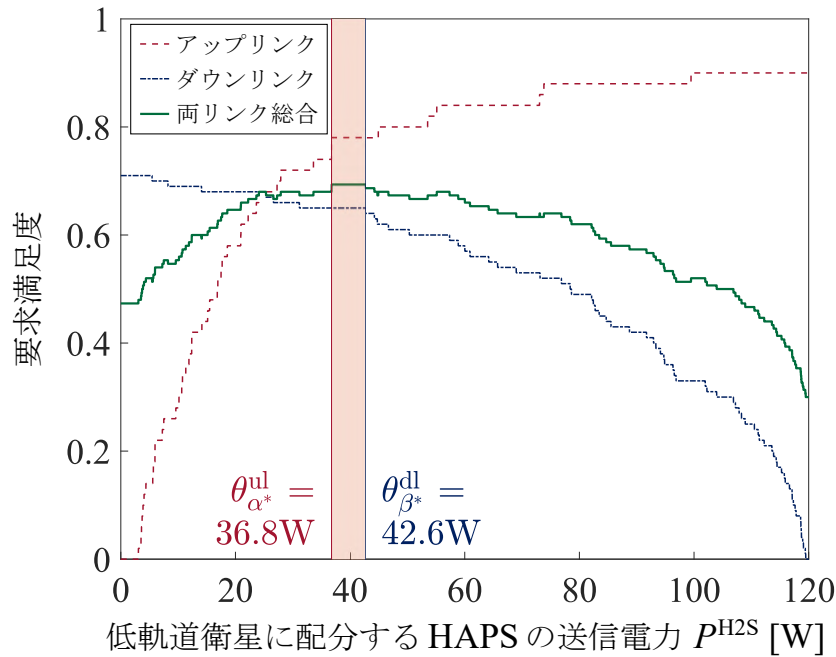


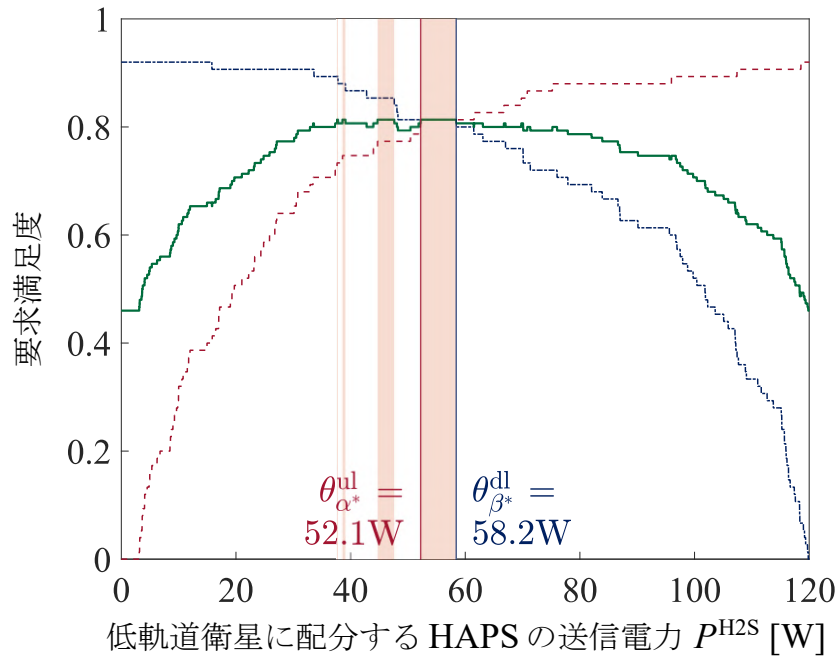
図 4.6: HAPS での送信電力配分によるアップ/ダウンリンクにおける伝送容量の増減影響 © 2022 IEICE



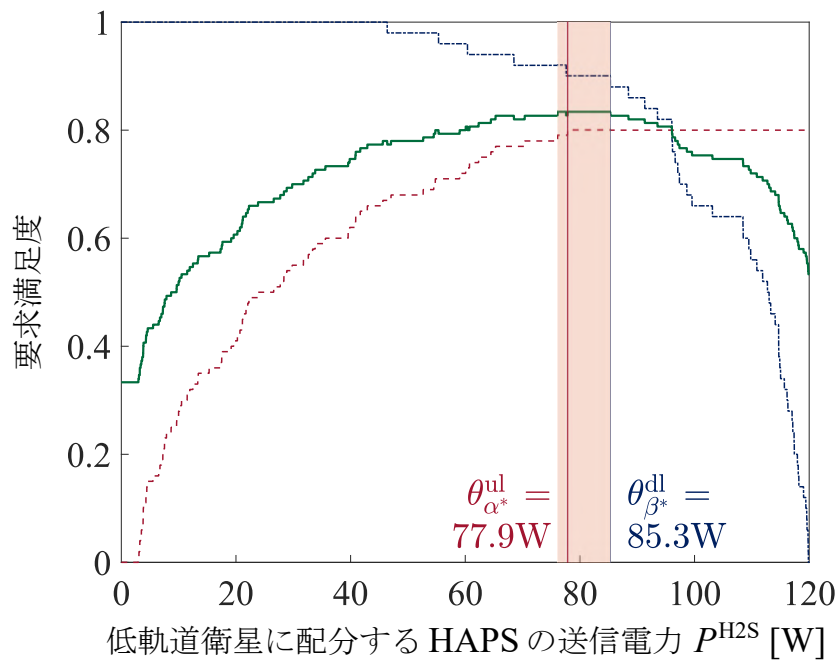
(a) $(N_D^{ul}, N_D^{dl}) = (50, 100)$

図 4.7: アップリンクに配分する HAPS の送信電力と地上端末群における要求満足度間の関係 © 2022 IEICE

次に、アップリンクに配分する HAPS の送信電力と地上端末群における要求満足度の関係に関する評価結果を図 4.7 に示す。図 4.7 中の橙色領域は、地上端末群の要求満足度 φ が最大となる範囲を表しており、地上端末群の評価ケース間で橙色領域の分布特性に違いが見られる。さらに、図 4.7 中に示す赤色と青色の閾値 $(\theta_{\alpha^*}^{ul}, \theta_{\beta^*}^{dl})$ に基づいて、両リンクに配分する HAPS の送信電力の最適値 $(P^{H2S^*}, N_D^{dl} \times P_n^{H2D^*}) = (a): (36.8W, 77.4W), (b): (52.1W, 61.8W), (c): (77.9W, 34.7W)$ が算出された。したがって、本評価で用いた地上端末群の分布ケースにおいては、HAPS の総送信電力 120W に対して約 6W の電力が低減されたとともに、地上端末群の要求満足度 φ が最大となることを確認した。これは比率にして約 5% に相当し、提案モデルを適用することで電力効率も向上されたといえる。



(b) $(N_D^{\text{ul}}, N_D^{\text{dl}}) = (75, 75)$



(c) $(N_D^{\text{ul}}, N_D^{\text{dl}}) = (100, 50)$

図 4.7: アップリンクに配分する HAPS の送信電力と地上端末群における要求満足度間関係 © 2022 IEICE

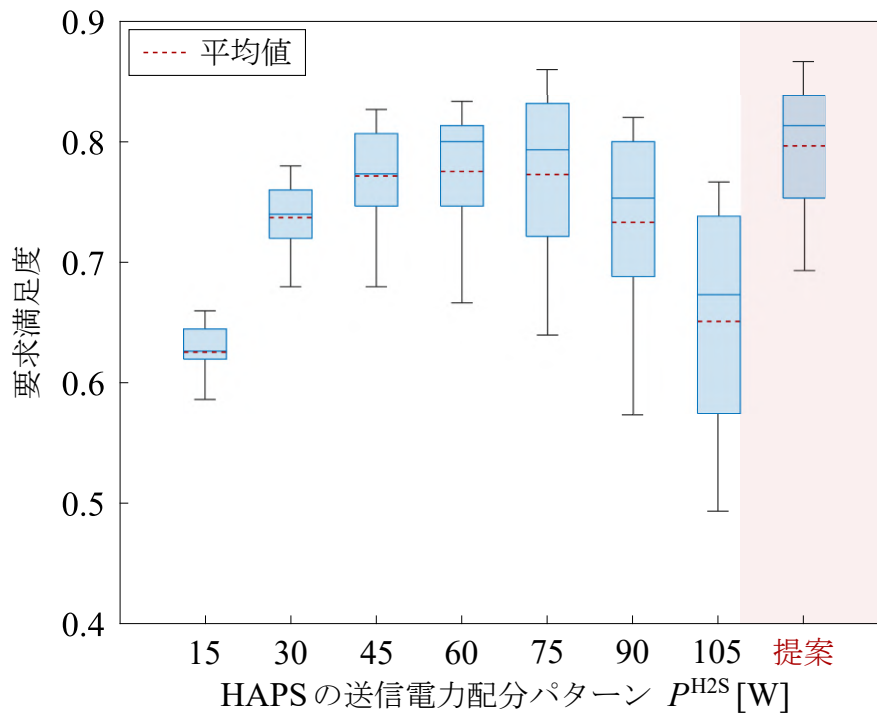


図 4.8: 提案モデル適用による要求満足度の改善効果 © 2022 IEICE

最後に、提案モデルの適用による地上端末群の要求満足度 φ に関する改善効果を図 4.8 に示す。図 4.8 では、アップ/ダウンリンクの使用端末数 (N_D^u , N_D^d) は 1 台刻みで (50, 100) から (100, 50) の範囲にわたる全 51 ケースにおける地上端末群の要求満足度に関する評価結果に基づいており、アップ/ダウンリンクに対する HAPS の送信電力配分が同一の状態に維持されるパターンと提案モデルを用いて統合制御するパターン間で箱ひげ図を用いて比較した。結果より、提案モデルが適用されたパターンでは、地上端末群の要求満足度 φ の平均値及び最小/最大値が全評価ケースにおいて送信電力配分が同一の状態に維持される場合に得られた数値を上回っていることを示している。したがって、提案モデルを HAPS の送信電力配分に適用することで、非地上系統合ネットワークにおける双方向中継伝送上の安定性が改善されたことが確認できた。

4.5 まとめ

本章では、宇宙空間及び成層圏から広範囲に通信環境を提供する非地上系統合ネットワークにおいて HAPS を中継基地局とした双方向中継伝送に着目し、通信要求を満たす地上端末数の割合が最大となる HAPS の送信電力配分を解析的に導出可能な数理モデルを設計した。提案モデルの有効性評価を実施した結果、HAPS の送信電力配分が各リンクで同一の状態に維持される場合と比較して地上端末群の要求満足度を最大限担保しつつ、電力効率が向上した点を確認した。

第5章

結論

2030年代に到来する Beyond 5G/6G 時代においては、産業自動化を始め、リモートセンシングや災害救助等といった無線通信のユースケースが多様化していくとともに、それに伴う通信需要の更なる拡大が見込まれている。しかし、5G時代までに構築された地上系ネットワークは、基地局の整備コストに対して通信料金では採算が取れないという理由から、山間部や島嶼部等の僻地では利用可能な領域は少ないのが現状である。ゆえに、地上系ネットワークへの依存を軽減するためには、宇宙空間や空中を起点とし、都市部に限らず、山間部や島嶼部などの地理的制約の大きな領域も対象としたネットワークを新たに展開しつつ、有限の通信リソースを通信要求に合わせて動的に割り当てることが求められる。本論文では、あらゆる場所への無線通信のカバレッジ拡張を通じた多種多様なユースケースへの対応が期待される非地上系統合ネットワークに着目し、当該ネットワークにおいて通信要求を基にした動的リソース制御方式に関する研究を実施した。

以下では各章を振り返り、本論文の総括を行う。

■ **第1章** 本論文の背景，及びその目的について述べ，本研究分野の重要性について述べた。

■ **第2章** 衛星打ち上げ後においても柔軟に通信リソース割当を変更可能な衛星搭載機能の中でも，各衛星ビームの指向性および配置位置を制御可能な機能としてDBFに着目し，DBF搭載型衛星通信システムを用いた送信電力とビーム指向性の融合制御方式について提案した．はじめに，DBF搭載型衛星通信システムを用いた送信電力とビーム指向性の融合制御に適用可能なスループット算出モデルを設計した．その上で，DBF搭載型衛星のカバレッジエリア内におけるトラフィック要求量に対するスループットの比率を示すトラフィック収容率を最大化するために，DBF搭載型衛星により照射される各ビームの送信電力，ビーム指向性および配置位置の最適化を図る電力リソース割当モデルを構築した．解析評価を行った結果，DBF搭載型衛星の制御パラメータを部分的に制御する場合との比較によって，提案方式の有効性を確認した。

■ **第3章** 非地上系統合ネットワークにおいて，リソース割当の実行後に発生し得る通信リソースの無駄を最小限に抑制するための通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリングについて述べた．はじめに，飛翔体による通信要求予測モデルの更新およびNOCによるリソース制御の切替を実施するタイミングを逐次的に最適化可能な数理モデルを構築した．その上で，これらの逐次最適化モデルを連携させ，通信要求予測に基づくリソース制御の動的スケジューリング方式を提案した．性能評価の結果，リソース制御を周期的に実行する場合と比較して提案方式は割り当てリソースの無駄を削減可能であることを確認した。

■ **第4章** 非地上系統合ネットワークを用いた双方向中継伝送において，アップ/ダウンリンクを使用する各地上ユーザ端末群からの通信要求の地理的分布に応じて，飛翔体での両リンクに対する送信電力配分を統合的に制御可能な数理モデルを構築した．提案モデルの有効性評価を実施した結果，飛翔体の送信電力配

分が各リンクで同一の状態に維持される場合と比較して、地上ユーザ端末群の要求満足度を最大限担保しつつ、飛翔体における使用電力の低減効果を確認した。

以上のように、本論文では、非地上系統合ネットワークにおける通信要求に基づく動的なリソース制御方式の提案を行った。本論文の成果は、今後の非地上系統合ネットワークを更に立体的に展開するに際して、ユーザにとっての通信品質の改善および通信可能エリアの拡張がより一層両立できるようになるとともに、通信オペレータにおける運用コストの大幅な削減に繋がると期待される。

著作物利用許諾

本論文で用いている図表，文章の一部は出版済みの文献から再利用したものを含む．本論文で再利用した文献のリスト及び著作物利用許諾を以下に示す．なお，電子情報通信学会の出版物に掲載された発表論文においては，権利表示および出所の明示を行えば著作物利用許諾申請は不要であるため，文献リストのみの明記とする．

- [Masaki Takahashi](#), Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “DBF-based Fusion Control of Transmit Power and Beam Directivity for Flexible Resource Allocation in HTS Communication System toward B5G,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 1, pp. 95–105, Jan. 2022.
- [Masaki Takahashi](#), Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Adaptive Power Resource Allocation with Multi-Beam Directivity Control in High-Throughput Satellite Communication Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.8, no. 4, pp.1248-1251, Aug. 2019.
- [Masaki Takahashi](#), Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Adaptive Multi-Beam Arrangement for Improving Throughput in HTS Communication System,” *IEEE International Conference on*

Communications (ICC), Virtual Conference, Jun. 2020.

- 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “宇宙-空-地上統合ネットワークにおける高高度プラットフォームによる双方向中継伝送の高効率化に向けた送信電力制御に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2022-21, pp. 24–29, 2022年7月.
- 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “衛星通信システムにおけるトラヒック需要予測モデル更新とリソース制御切替の動的スケジューリングに関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2021-53, pp. 1–6, 2022年2月.
- 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星通信システムを用いたリソース割当の柔軟性向上のための送信電力とビーム指向性の融合制御に関する検討 (奨励講演),” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2020-21, pp. 59–64, 2020年8月.
- 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星通信システムにおけるマルチビーム配置制御がスループットに及ぼす影響に関する一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2019-70, pp. 19–24, 2020年2月.



RightsLink



Home



Help ▾



Live Chat



Sign in



Create Account



Adaptive Power Resource Allocation With Multi-Beam Directivity Control in High-Throughput Satellite Communication Systems

Author: Masaki Takahashi
Publication: IEEE Wireless Communications Letters
Publisher: IEEE
Date: August 2019

Copyright © 2019, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



RightsLink



Home



Help ▾



Live Chat



Sign in



Create Account



Adaptive Power Resource Allocation With Multi-Beam Directivity Control in High-Throughput Satellite Communication Systems

Author: Masaki Takahashi
Publication: IEEE Wireless Communications Letters
Publisher: IEEE
Date: August 2019

Copyright © 2019, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW



RightsLink



Home



Help ▾



Live Chat



Sign in



Create Account



Adaptive Multi-Beam Arrangement for Improving Throughput in an HTS Communication System

Conference Proceedings:

ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)

Author: Masaki Takahashi

Publisher: IEEE

Date: June 2020

Copyright © 2020, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis online.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

発表文献一覧

学術論文（査読あり）

1. Masaki Takahashi, Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “DBF-based Fusion Control of Transmit Power and Beam Directivity for Flexible Resource Allocation in HTS Communication System toward B5G,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 1, pp. 95–105, Jan. 2022.
2. Yuichi Kawamoto, Taiki Kamei, Masaki Takahashi, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Flexible Resource Allocation with Inter-beam Interference in Satellite Communication Systems with a Digital Channelizer,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp.2934–2945, May. 2020.
3. Masaki Takahashi, Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Adaptive Power Resource Allocation with Multi-Beam Directivity Control in High-Throughput Satellite Communication Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.8, no. 4, pp.1248-1251, Aug. 2019.
4. Masaki Takahashi, Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Hiroyuki Tsuji, and Amane Miura, “Traffic Prediction-Based Dynamic Resource Control Strategy in HAPS-Mounted MEC-Assisted Satellite Communication Systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, Conditional Acceptance.

国際会議論文（査読あり）

5. Masaki Takahashi, Yuichi Kawamoto, and Nei Kato, “Transmit Power Control of HAPS for Two-Way Relay Communication in Space-Air-Ground Integrated Networks,” *39th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2022)*, Stresa, Italy, Oct. 2022.
6. Masaki Takahashi, Simpei Suzuki, Yuichi Kawamoto, and Nei Kato, “A Practical Approach for SNR-based Subchannel Allocation Considering Inter-Beam Interference in a Satellite Communication System,” *IEEE 7th International Conference on Network Intelligence and Digital Content (IC-NIDC 2021)*, Virtual Conference, Nov. 2021.
7. Masaki Takahashi, Yuichi Kawamoto, and Nei Kato, “An Initial Study on Designing Prediction-Based Resource Allocation in Satellite Communication Systems (Invited Paper),” *IEICE International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020)*, Virtual Conference, Dec. 2020.
8. Masaki Takahashi, Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Adaptive Multi-Beam Arrangement for Improving Throughput in HTS Communication System,” *IEEE International Conference on Communications (ICC 2020)*, Virtual Conference, Jun. 2020.
9. Amane Miura, Eihisa Morikawa, Naoko Yoshimura, Hiroyuki Tsuji, Takashi Takahashi, Mitsugu Okawa, Teruaki Orikasa, Kazunori Okada, Kazuyoshi Kawasaki, Tomoshige Kan, Masaki Sato, Shinichi Kozono, Takuya Okura, Yuma Abe, Morio Toyoshima, Masaki Takahashi, Yuichi Kawamoto, Nei Kato, Eiichi Sakai, Terumi Sunaga, Nobuyoshi Horie, Toshiyasu Tsunoda, Arimasa Kanasashi, Masaaki Kusano, Yoshio Inasawa, and Hitomi Ono, “On Critical Design of Bandwidth-on-Demand High Throughput Satellite Communications System Technology,” *25th Ka and Broadband Communications Conference*, Sorrento, Italy, Oct. 2019.

国際会議論文（査読なし）

10. Masaki Takahashi, “Two-Way Relay Communications with Transmission Power Control in a HAPS-Enabled SAGIN,” *A3 Foresight Program 2022 Workshop*, Tokyo, Japan, Dec. 2022.
11. Masaki Takahashi, “Practical Subchannel Allocation Scheme with SNR-Based Position Estimation for Satellite Communication Systems,” *A3 Foresight Program 2022 Workshop*, Online, Feb. 2022.
12. Masaki Takahashi, “Communication Demand Prediction and Resource Control in Satellite Communication Systems: A Study on Schedule Adjustment,” *A3 Foresight Program 2021 Workshop*, Online, Feb. 2021.
13. Masaki Takahashi, “A Study on Efficient Multi-spot Beam Arrangement for Power Resource Allocation in High Throughput Satellite Communication System,” *NSFC-JSPS Collaborative Research Project Workshop*, Beijing, China, Nov. 2019.

国内会議論文（査読なし）

14. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “宇宙-空-地上統合ネットワークにおける高高度プラットフォームによる双方向中継伝送の高効率化に向けた送信電力制御に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2022-21, pp. 24–29, 2022年7月.
15. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “衛星通信システムにおけるトラヒック需要予測モデル更新とリソース制御切替の動的スケジューリングに関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2021-53, pp. 1–6, 2022年2月.
16. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “衛星通信システムにおける通信需要予測に基づくリソース制御の実行スケジューリングに関する初期検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-9, 2021年3月.

17. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星を用いた電力リソース割当における通信要求分布に合わせた DBF 制御に関する検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-2-5, 2020 年 9 月.
18. 川本雄一, 高橋昌希, 加藤寧, “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 – 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計画 –,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-3-5, 2020 年 9 月.
19. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星通信システムを用いたリソース割当の柔軟性向上のための送信電力とビーム指向性の融合制御に関する検討 (奨励講演),” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2020-21, pp. 59–64, 2020 年 8 月.
20. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星通信システムの柔軟性評価モデルへの実パラメータ適用に関する一考察,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-22, 2020 年 3 月.
21. 三浦周, 森川栄久, 吉村直子, 辻宏之, 岡田和則, 織笠光明, 大川貢, 若菜弘充, 山本伸一, 高橋卓, 川崎和義, 菅智茂, 佐藤正樹, 小園晋一, 大倉拓也, 阿部侑真, 豊嶋守生, 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, 坂井英一, 須永輝巳, 堀江延佳, 金指有昌, 角田聡泰, 草野正明, 稲沢良夫, 尾野仁深, “ニーズに合わせて通信容量や利用地域を柔軟に変更可能なハイスループット衛星通信システム技術の総合評価の状況,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-20, 2020 年 3 月.
22. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星通信システムにおけるマルチビーム配置制御がスループットに及ぼす影響に関する一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2019-70, pp. 19–24, 2020 年 2 月.
23. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星通信システムにおける電力リソース割当方法とフレキシビリティ性の関係に関する一考察,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-3-16, 2019 年 9 月.

24. 高橋昌希, 川本雄一, 加藤寧, “ハイスループット衛星通信システムにおけるビーム指向性制御を伴った効率的な電力リソース割当に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-15, 2019年3月.
25. 高橋昌希, 金子和真, 川本雄一, 西山大樹, 加藤寧, “サブチャネル幅が衛星通信システムの柔軟性に与える影響に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, SAT2017-67, pp. 59–63, 2018年2月.

受賞

- 2021 7th IEEE International Conference on Network Intelligence and Digital Content Best Paper Award
- A3 Foresight Program 2021 Workshop Best Presentation Award
- IEEE International Conference on Communications 2020 Best Paper Award
- IEEE Communication Society Student Grant for ICC 2020
- IEEE ComSoc Sendai Chapter Student Excellent Research Award 2019
- 電子情報通信学会 衛星通信研究専門委員会 2019年度衛星通信研究賞

参考文献

- [1] 国土審議会政策部会長期展望委員会, “「国土の長期展望」中間とりまとめ,” Available online: <https://www.mlit.go.jp/common/000135853.pdf>, (Accessed on Apr. 2020).
- [2] J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah, and N. Kato, “Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 20, no. 4, pp. 2714–2741, May. 2018.
- [3] N. Zhang, S. Zhang, P. Yang, O. Alhussein, W. Zhuang, and X. Shen, “Software Defined Space-Air-Ground Integrated Vehicular Networks: Challenges and Solutions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 7, pp. 101–109, Jul. 2017.
- [4] 3rd Generation Partnership Project, “Study on architecture aspects for using satellite access in 5G,” 3GPP TR 23.737 v17.0.0 (2019–12), Dec. 2020.
- [5] 3rd Generation Partnership Project, “Study on management and orchestration aspects with integrated satellite components in a 5G network,” 3GPP TR 28.808 v0.4.0 (2019–11), Nov. 2019.
- [6] 3rd Generation Partnership Project, “Work Plan 3GPP version December 12th 2021,” Available online: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN, (Accessed on Dec. 2022).
- [7] F. Guo, F. R. Yu, H. Zhang, X. Li, H. Ji, and V. C. M. Leung, “Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 15, pp. 11891–11915, Aug. 2021.

-
- [8] E. Yaacoub and M. Alouini, “A Key 6G Challenge and Opportunity—Connecting the Base of the Pyramid: A Survey on Rural Connectivity,” *Proc. IEEE*, vol. 108, no. 4, pp. 533–582, Apr. 2020.
- [9] X. Fang, W. Feng, T. Wei, Y. Chen, N. Ge, and C. X. Wang, “5G Embraces Satellites for 6G Ubiquitous IoT: Basic Models for Integrated Satellite Terrestrial Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 18, pp. 14399–14417, Sep. 2021.
- [10] L. Yan, X. Fang, L. Hao, and Y. Fang, “Safety-Oriented Resource Allocation for Space-Ground Integrated Cloud Networks of High-Speed Railways,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 12, pp. 2747–2759, Dec. 2020.
- [11] A. K. Maini and V. Agrawal, “Satellite Technology: Principles and Applications, 3rd Edition,” *WILEY*, Jun. 2014.
- [12] Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Construction of a Flexibility Analysis Model for Flexible High-throughput Satellite Communication Systems with a Digital Channelizer,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 3, pp. 2097–2107, Mar. 2018.
- [13] G. Maral and M. Bousquet, “Satellite Communications System: Systems Techniques and Technology, 5th Edition,” *WILEY*, Aug. 2011.
- [14] D. Digdarsini, M. Kumar, and T. V. S. Ram, “Design & hardware realization of FPGA based digital beam forming system,” *Proc. 3rd Int. Conf. Signal Process. Integr. Netw. (SPIN)*, pp. 275–278, Feb. 2016.
- [15] S. Zhang, C. Guo, T. Wang, and W. Zhang, “On-off analog beamforming with per-antenna power constraint,” *Proc. IEEE 85th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, pp. 1–5, Jun. 2017.
- [16] R. Deng, S. Chen, S. Zhou, Z. Niu, and W. Zhang, “Channel fingerprint based beam tracking for millimeter wave communications,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 3, pp. 639–643, Mar. 2020.

-
- [17] F. Li, K. Y. Lam, X. Liu, J. Wang, K. Zhao, and L. Wang, “Joint Pricing and Power Allocation for Multibeam Satellite Systems With Dynamic Game Model,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 3, pp. 2398-2408, Mar. 2018.
- [18] A. I. Aravanis, B. Shankar M. R., P. D. Arapoglou, G. Danoy, P. G. Cottis, and B. Ottersten, “Power Allocation in Multibeam Satellite Systems: A Two-Stage Multi-Objective Optimization,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 6, pp. 3171-3182, Jun. 2015.
- [19] M. Goswami, H. M. Kwon, K. Pham, J. Lyke, and T. Nguyen, “Communication on the move with satellite digital beamforming,” *Proc. MILCOM IEEE Mil. Commun. Conf. (MILCOM)*, Baltimore, MD, pp. 337--341, Oct. 2017.
- [20] G. Taricco and A. Ginesi, “Precoding for Flexible High Throughput Satellites: Hot-Spot Scenario,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 65, no. 1, pp. 65–72, Mar. 2019.
- [21] B. Liu, C. Jiang, L. Kuang, and J. Lu, “Joint User Grouping and Beamwidth Optimization for Satellite Multicast with Phased Array Antennas,” *2020 IEEE Global Communications Conference*, Taipei, Taiwan, pp. 1–6, Dec. 2020.
- [22] J. T. Camino, S. Mourgues, C. Artigues, and L. Houssin, “A greedy approach combined with graph coloring for non-uniform beam layouts under antenna constraints in multibeam satellite systems,” *2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*, Livorno, Italy, pp. 374–381, Sep. 2014.
- [23] P. J. Honnaiah, N. Maturo, S. Chatzinotas, S. Kisseleff, and J. Krause, “Demand-Based Adaptive Multi-Beam Pattern and Footprint Planning for High Throughput GEO Satellite Systems,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 1526–1540, Jul. 2021.
- [24] D. Roddy, “Satellite Communications, fourth Edition (Professional Engineering),” *McGraw-Hill Professional*, Feb. 2006.

-
- [25] S. Shi, G. Li, Z. Li, H. Zhu, and B. Gao, “Joint power and bandwidth allocation for beam-hopping user downlinks in smart gateway multibeam satellite systems,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, issue. 5, May. 2017.
- [26] Rec. ITU-R SF.358-5, “Maximum permissible values of power flux-density at the surface of the earth produced by satellites in the fixed-satellite service using the same frequency bands above 1 GHz as line-of-sight radio-relay systems,” Oct. 1995.
- [27] A. I. Pereira and E. M. G. P. Fernandes, “Comparative study of penalty simulated annealing methods for multiglobal programming,” *Proc. 2nd Int. Conf. Eng. Optim.*, Lisbon, Portugal, pp. 1—9, Sep. 2010.
- [28] A. I. Pereira, E. M. G. P. Fernandes, T. E. Simos, G. Psihoyios, and C. Tsitouras, “Constrained multi-global optimization using a penalty stretched simulated annealing framework,” *Proc. AIP Conf.*, pp. 1354—1357, Sep. 2009.
- [29] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, “Long Short-Term Memory,” *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, Nov. 1997.
- [30] F. A. Gers, J. Schmidhuber, and F. Cummins, “Learning to forget: continual prediction with LSTM,” *1999 Ninth International Conference on Artificial Neural Networks*, pp. 850–855, Sep. 1999.
- [31] A. Zhang, Z. C. Lipton, M. Li, and A. J. Smola, “Dive into Deep Learning, Release 0.17.0”, Jul. 2021, Available online: <https://d2l.ai/>, (Accessed on Aug. 2021).
- [32] A. Yu, H. Yang, T. Xu, B. Yu, Q. Yao, Y. Li, T. Peng, H. Guo, J. Li, and J. Zhang, “Long-Term Traffic Scheduling Based on Stacked Bidirectional Recurrent Neural Networks in Inter-Datacenter Optical Networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 182296–182308, Dec. 2019.

-
- [33] “Study on RAN Improvements for Machine-type Communications,” 3GPP TR 37.868 v11.0.0 (2011–09), Sep. 2011.
- [34] “Loon: Expanding internet connectivity with stratospheric balloons,” Available online: <https://x.company/projects/loon/>, (Accessed on May. 2022).
- [35] H. L. Lee, D. H. Park, M. Q. Lee, and J. W. Yu, “Reconfigurable 2×2 Multi-Port Amplifier Using Switching Mode Hybrid Matrices,” *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 24, no. 2, pp. 129–131, Feb. 2014.
- [36] C. Zhu, Y. Li, M. Zhang, Q. Wang, and W. Zhou, “Optimal HAP Deployment and Power Control for Space-Air-Ground IoRT Networks,” *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Nanjing, China, Mar. 2021.
- [37] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [38] Y. Li, C. Liao, Y. Wang, and C. Wang, “Energy-efficient optimal relay selection in cooperative cellular networks based on double auction,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 8, pp. 4093–4104, Aug. 2015.

謝辞

本稿は、東北大学大学院情報科学研究科情報通信技術論研究室（加藤・川本研究室）において筆者が行った研究を博士論文としてまとめたものです。

本研究を行うにあたり、東北大学大学院情報科学研究科 加藤寧教授には、研究の機会を与えて頂き、また終始、御指導・御鞭撻を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科 田中和之教授、並びに周暁教授には、副査として本論文の細部に渡り御意見や御討論を頂きました。心から深く感謝いたします。

東北大学大学院情報科学研究科 川本雄一准教授には、本研究全般にわたり日頃から御討論・御助言を頂きました。川本先生には在籍中の6年間では色々ご迷惑をお掛けしてしまいましたが、こんな未熟な私に対して厳しくご指摘を続けて下さり、人間的成長のきっかけを与えて頂きました。深く感謝いたします。私が就職した後にいつか、一緒に共同研究ができるようになれるよう、今後も精一杯頑張ります。

東北大学大学院情報科学研究科 Tiago Koketsu Rodrigues 助教、並びに Shikhar 特任助教には、日頃の研究生生活や英語論文執筆において大変御世話になりました。深く感謝いたします。

東北大学大学院情報科学研究科事務補佐員 白石元子さんには、日常の快適な研究生生活を送る上で大変御世話になりました。深く感謝申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科卒業生 亀井大樹様には、直属の先輩として親

身になってご指導頂きました。おかげさまで、本研究室における研究の進め方や衛星通信分野に関する多くの知識・知見が得られました。深謝いたします。

東北大学大学院情報科学研究科 橋田紘明君には、同じ博士後期課程学生として模範的な姿勢を見せて下さり、私にとって励みとなる存在でした。また、時には雑談も交えながら穏やかで楽しい研究生生活を送ることができ、最後まで博士後期課程をやり切ることができました。深く感謝いたします。

加藤・川本研究室の学生の方々、そして先輩方には、本研究に対する御討論、更には研究生生活において多大な御力添えを頂きました。ありがとうございました。

三菱電機株式会社 谷重紀様、内田繁様、半谷政毅様、山下靖貴様、並びに佐田彩夏様には研究に関するアドバイスや、衛星通信に関する研究開発の動向について貴重なご意見を頂きました。深く感謝いたします。

三菱電機株式会社 金子和真様には、衛星通信に関する研究開発の動向についてご共有いただくとともに、加藤・川本研究室の博士後期課程学生の先輩として、日頃の研究や博士後期課程への進学に関するご相談に親身に応じて下さいました。深く感謝いたします。

また、研究室以外の様々な場面で御世話になった皆様に御礼申し上げます。

そして、東北大学を始め、日本学術振興会、並びに電気通信工学振興会による手厚い経済的支援のもとで、自身の追求したい衛星通信分野に関わるテーマで研究に勤しむことができました。学内外の関係各位に心より感謝いたします。

最後に、精神面・金銭面をはじめ様々な場面で支え続けながら温かく見守って下さった両親に、心からの感謝を申し上げます。

皆々様の御力添えなしには、本論文の完成はありませんでした。ここに深く感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

2023年1月