

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 05701

研究開発課題名 上空プラットフォームにおける CPS を活用した動的エリア最適化技術

(1) 研究開発の目的

B5G に向けて上空のプラットフォームから広域のエリアカバーを実現する非地上系ネットワーク (NTN) への期待が高まっている。本研究開発では、上空プラットフォームの実運用及び高度化に向けて、上空プラットフォームの移動や傾きによらず安定したエリア形成を行うフットプリント固定技術、サイバーフィジカルシステム (CPS) を活用しユーザ分布に応じてエリア全体の通信容量を増大するビーム最適化制御技術、上空プラットフォームの柔軟な展開を実現する干渉調整技術を確立する。また、通信機器の試作装置及び実際の上空プラットフォームを用いた屋外での実証試験を行い、各要素技術の実証を行う。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 6 年度 (3 年間)

(3) 受託者

ソフトバンク株式会社<代表研究者>

学校法人慶應義塾

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 4 年度から令和 6 年度までの総額 290 百万円 (令和 6 年度 97 百万円)

※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 エリア最適化の基本技術検討及び屋外実証

- 1-a) 機体の動作を補償するフットプリント固定技術の検討 (ソフトバンク(株))
- 1-b) エリア内ユーザ分布を考慮したビーム最適化制御技術の基本検討 (ソフトバンク(株)、慶應義塾大学)
- 1-c) 上空プラットフォームの柔軟な展開を実現する干渉調整技術の検討 (ソフトバンク(株))
- 1-d) ビームフォーミング対応ペイロードの開発 (ソフトバンク(株))
- 1-e) 上空プラットフォームを用いたフィールド実証実験 (ソフトバンク(株))

研究開発項目 2 エリア最適化の応用技術検討

- 2-a) エリア内ユーザ分布を考慮したビーム最適化制御技術の応用検討 (慶應義塾大学、ソフトバンク(株))
- 2-b) 地上システムとの干渉調整とエリア内ユーザ分布を考慮したビーム最適化制御技術の検討 (慶應義塾大学、ソフトバンク(株))

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	8	2
	外国出願	3	2
外部発表等	研究論文	4	3
	その他研究発表	68	27
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	2	1
	展示会	1	0
	受賞・表彰	2	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 エリア最適化の基本技術検討及び屋外実証

1-a) 機体の動作を補償するフットプリント固定技術の検討

- ・上空プラットフォームとしてHAPSを検討対象とし、HAPSの動作条件を考慮したアンテナ構成としてシリンダアンテナ構成を検討した。
- ・ターゲットとするエリア半径において所要通信品質を満たすセル構成の設計を完了し、検討したセル構成に必要な素子数・素子間隔等のアンテナ構成の設計を完了した。
- ・設計したシリンダアンテナにおいて、想定される機体の移動・回転を考慮したフットプリント固定性能についてシミュレーション評価を完了し、水平及び垂直の回転に応じたビームフォーミング制御により、最終目標である $\pm 3\text{dB}$ 以内の受信レベルの変動を達成した。
- ・電磁界シミュレーションにより得られたアンテナ素子パターンを考慮したフットプリント固定性能を評価し、受信レベルの変動を $\pm 2\text{dB}$ 以内に収められることを確認した。
- ・暗室において回転台に搭載した実アンテナを使用したフットプリント固定性能の評価を行い、ビームフォーミング制御により受信レベルの変動を $\pm 3\text{dB}$ 以内に収められることを実証した。
- ・係留気球を用いた屋外でのフットプリント固定性能を評価し、機体の姿勢や位置が大きく移動している中で、半径10km程度の広い通信エリアかつ長時間でも常に固定できていることを実証した。

1-b) エリア内ユーザ分布を考慮したビーム最適化制御技術の基本検討

- ・複数セル構成のHAPSにおいて、セル数の増加に伴う探索空間の増大に対応するための遺伝的アルゴリズムをベースとした共進化を用いた最適化アルゴリズムの設計を行い、最大21セルのセル構成の最適化を達成した。
- ・更なる効率的な最適化制御のため、共進化アルゴリズムを用いたエリア最適化アルゴリズムに探索範囲削減手法を組み合わせた2段階動的エリア最適化アルゴリズムの設計を行い、最適化にかかる計算量を最大約半分まで低減できることを明らかにした（当初計画を越える項目）。
- ・HAPSー地上システム間の周波数共存を考慮したカバー率を最大化可能な最適化アルゴリズムの設計を完了し、従来法に対して20%程度のカバー率の改善を達成した（当初計画を越える項目）。
- ・より高速なエリア最適化制御の実現のため、機械学習（ニューラルネットワーク）を用いた最適化手法のアルゴリズム設計を完了し、教師データであるGAを用いた特性と概ね同じスループット改善特性を達成した（当初計画を越える項目）。
- ・高所作業車を用いた屋外実証試験を先行的に実施し、外部制御によるビーム制御機能を実証すると共に、端末の位置情報に基づいた本機能の動的制御の実証に成功した（当初計画を越える項目）。また、最適化により端末の合計スループットを約2.13倍に改善することに成功した。
- ・フットプリント固定制御とビーム最適化制御の同時制御アルゴリズムを新たに考案し、高頻

- 度制御のフットプリント固定制御と、低頻度のビーム最適化制御の共存を可能とした。
- ・実アンテナの特性を考慮し、サイドローブレベル等をより正確に最適化に反映するため、電磁界シミュレーションにより得られたアンテナ素子パターンを考慮したビーム最適化制御アルゴリズムの設計を完了した。
- ・実環境におけるビーム最適化制御の効果を評価するため、地形等の追加損失を考慮可能な伝搬シミュレータを使用した評価を行い、見通し領域において 30% 程度の改善効果が得られることを確認するとともに、機体の準最適配置アルゴリズムの設計を完了した（当初計画を越える項目）。
- ・端末位置情報の取得方法とビーム最適化の手順について整理・明確化した。

1-c) 上空プラットフォームの柔軟な展開を実現する干渉調整技術の検討

- ・上空プラットフォーム間の干渉を考慮した評価系の構築、および同干渉を低減する 2 段階プリコーディング方式の基本設計を完了した。エリアシミュレーションの結果、上空プラットフォーム間の干渉低減によりユーザの SINR が約 6.8 dB 改善することを確認した。
- ・複数の上空プラットフォームと地上セルの混在環境において、上空プラットフォーム間の干渉および上空から地上セルへの干渉を考慮した評価系の構築を完了した。また、これらの干渉を同時に低減する 3 段階プリコーディング方式の基本設計および評価を完了した。
- ・3 段階プリコーディング方式において、サブアレー構成およびヌル方向の最適化手法の検討および評価を完了した。エリアシミュレーションの結果、サブアレー化未適用時に対して最大で 73% 程度のキャパシティ改善効果を確認した（当初計画を越える項目）。
- ・コードブックに基づく MU-MIMO 通信を前提とする上空プラットフォームにおいて、コードブックの一部を制限することにより地上セルまたはサービスエリア外に対する干渉を低減する方式の基本設計を完了した（当初計画を越える項目）。
- ・3 段階プリコーディング方式において、各地上基地局に対して形成するヌルの数を制御することにより地上システムへの干渉低減性能を改善する方式の検討および評価を完了した。エリアシミュレーションの結果、地上セルユーザの SINR を最大で約 3.3 dB 改善することを確認した（当初計画を越える項目）。
- ・シリンドラアンテナを構成する素子の振幅および位相パターンを考慮することで高精度のヌルフォーミングを実現するウェイト制御アルゴリズムの設計を完了した。同アルゴリズムの適用により、メインローブのピークから -20 dB 程度のヌルが $-\infty$ dB まで落ち込むことをシミュレーションで確認した。
- ・シリンドラアンテナを用いた屋外実証試験を実施し、アンテナを固定した場合において、ヌルフォーミング制御により任意の方位角方向に対してピークから最大で約 30 dB の干渉抑圧効果が得られることを確認した（当初計画を越える項目）。
- ・上空プラットフォームと地上システムの重畳構成によるヌルフォーミングの屋外実証試験を実施し、干渉低減により地上システムのスループットが最大で約 2.6 倍に増加することを確認した。機体に搭載したシリンドラアンテナからヌルを形成する場合においても、最大で 28 dB 程度の干渉低減効果が得られたことから、本研究開発の目標である「最大指向性に対して 20 dB 以上の干渉低減」を達成した。

1-d) ビームフォーミング対応ペイロードの開発

- ・本研究開発で提案したビームフォーミング技術を実証可能な装置全体の構成及びシリンドラアンテナ構成について仕様検討を完了し、親機・子機を合わせた通信システムの開発を完了した。
- ・上空プラットフォームに搭載予定の装置構成における重量、消費電力、サイズの実測定を行い、フィールド試験で使用予定の係留気球に搭載可能であることを確認した。
- ・各研究開発項目でのビームフォーミング技術におけるアンテナウェイト制御法を分類し、各実証実験における設定について整理した。
- ・提案したアルゴリズムにおいて必要となるウェイト制御計算・周期及び角度の精度の実現可能性について検討し、実装置で実現可能であることを明らかにした。

- ・フィールド試験の実施に向けた電波暗室試験を実施し、装置の正常性確認を実施した。
- ・IGF2023 でシリンダアンテナ（モックアップ）を展示し、国内の大臣や各国要人に HAPS の技術を紹介するとともに日本の技術力アピールを行った（当初計画を越える項目）。

1-e) 上空プラットフォームを用いたフィールド実証実験

- ・開発した通信パイロードを搭載可能な上空プラットフォームの選定及び手配を完了した。また、実証試験実施に向けて上記上空プラットフォームで実現可能なカバレッジ半径を検討した。
- ・フィールド実証実験に向けて、実験場所の選定及び使用許可を取得し、研究開発項目 1-d) で開発した通信パイロードの実験試験局免許の申請及び取得を行った。また、係留気球を使用した実験に向けて空域調整を完了した。
- ・通信パイロードの事前機能評価のため、高所作業車（バケット車）を用いたフィールド実証試験を実施した（当初計画を越える項目）。
- ・上空プラットフォームを用いたフィールド実証実験を完了し、本研究開発の各要素技術の実証に成功した。

研究開発項目2 エリア最適化の応用技術検討

2-a) エリア内ユーザ分布を考慮したビーム最適化制御技術の応用検討

エリア内ユーザ分布を考慮したビーム最適化制御技術として、以下のアンテナパラメータ制御法並びにユーザクラスタリング法を提案し、その有効性を確認した。

- ・深層 Q 学習を用いたアンテナパラメータ制御法
- ・平均場強化学習を用いたアンテナパラメータ制御法
- ・エリア内ユーザ分布とスループットを考慮したユーザクラスタリング法
- ・深層強化学習遺伝アルゴリズムを用いたアンテナパラメータ制御法
- ・K-Means 支援粒子群最適化を用いたアンテナパラメータ制御法
- ・スループットヒートマップに基づく HAPS 軌道最適化
- ・Transformer に基づく強化学習を用いたアンテナパラメータ制御法
- ・複数 HAPS システムにおける最適輸送に基づくユーザ割り当てと深層強化学習を用いた軌道設計
- ・Digital Twin を用いた深層強化学習に基づくアンテナパラメータ制御法
- ・モデルベース深層強化学習を用いた HAPS 通信システムにおける動的アンテナビームフォーミング

2-b) 地上システムとの干渉調整とエリア内ユーザ分布を考慮したビーム最適化制御技術の検討

HAPS と地上ネットワークのスペクトル共有におけるユーザ分布に基づくヌルフォーミングの制御法を提案し、その有効性を確認した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本研究開発では、フットプリント固定技術、ビーム最適化制御技術、干渉調整技術を確立し、実証実験を行った。これらの成果は对外発表等を通じて引き続き普及啓発を行い、早期の実用化及び普及を促進する予定である。また、提案技術は一般的な通信端末を幅広く使えるようにするため、3GPP で規定される 5G NR 方式や将来的な 5G-Advanced、B5G を前提としており、標準化技術の範囲内で早期の実用化を計画している。更に、本研究開発で開発した要素技術をベースに更に拡張し、引き続き研究会や国際会議等での成果発表を行うことで HAPS 通信技術の分野の発展に貢献すると共に、本分野における国際的競争力の強化を図る。また、これまでに特許出願した提案技術は、社内での商用装置に導入することを計画している。