

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 98 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	3	3
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	1	1
	その他研究発表	10	10
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

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

【目標】研究開発項目1では、研究開発項目1-a)～1-c)の3つの要素技術(フットプリント固定技術、ビーム最適化制御技術、ヌルフォーミング制御技術)についてアンテナ構成を考慮した形での基本アルゴリズム検討、及びその効果についてシミュレーション評価を行う。また、これらを実証するために必要となるアンテナ構成及びパイロード機能の一部仕様を検討し、研究開発項目1-d)においてアンテナ部やRF部等の一部の開発を進める。上空プラットフォームの構築においては係留気球の選定を完了し、要求仕様等をまとめて機体の設計を進める。

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、ターゲットとなるエリア半径及び所要通信品質を満たすセル構成の設計を完了
- シリンダアンテナを用いたデジタルビームフォーミングによるフットプリント固定方式を前提とし、前述の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
- 設計したシリンダアンテナにおいて、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

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及びシミュレーション評価を完了
- 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及び評価を完了
- 地上システムとの干渉制御を考慮したビーム最適化検討に先行的に取り組み、HAPS-地上システム間の周波数共存を考慮したエリア最適化アルゴリズムの基本設計及び評価を完了
- より高速なエリア最適化制御の実現のため、機械学習を用いた最適化手法について基本設計及び評価を完了
- 実アンテナを考慮したビーム最適化検討について先行的に検討に着手

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

- サブアレー内ヌルフォーミングにより上空プラットフォーム間の干渉を低減する 2 段階プリコーディング方式の基本設計及びシミュレーション評価を完了
- 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完了
- 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
  - 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完了
  - 3 段階プリコーディング方式におけるアンテナ構成や制御観点からの実現性を検討

#### 1-d) ビームフォーミング対応パイロードの開発

- 研究開発項目 1-a) ~1-c) の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ダアンテナ構成の設計を完了
- 試作予定の通信装置の一部（親機装置の RF 基板）について実装を完了
- 検討した装置構成から重量、消費電力、サイズの概算を見積もり
- ウェイト制御方式及び制御周期について検討し、HAPS 機体の移動速度に対する追従性の評価を完了
- ジャイロセンサの角度誤差とその影響について調査
- シリンダアンテナ構成における機構部等も考慮した電磁界シミュレーションによるアンテナ素子パターンの作成

#### 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

- 研究開発項目 1-d) で検討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を完了し、設計仕様の整理を実施
- 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できるカバレッジ半径の見積もりを実施

### 研究開発項目 2 エリア最適化の応用技術検討

【目標】研究開発項目 2 では、学習アルゴリズムを用いたビーム制御に基づくセル制御アルゴリズムを開発する。学習アルゴリズムとして、まず深層 Q 学習を用いる。その際、深層 Q 学習などのアルゴリズムで問題となる収束時間を短くするために、CPS を活用して、サイバー空間にユーザ分布などを含めた上空プラットフォームシステムを構築し、非常に高速な計算機を用いて深層 Q 学習により設計規範の点で最適なビーム制御パラメータを導出する。開発するアルゴリズムを、実際のメッシュ型人工流動データを用いたユーザ分布に対して計算機シミュレーションにより評価する。また、他研究開発項目で取得予定の伝搬データを用いて、開発するアルゴリズムを評価する。

#### 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

- 深層 Q 学習を用いたアンテナパラメータ制御法を検討し、評価を完了
- 平均場強化学習を用いたアンテナパラメータ制御法を検討し、評価を完了
- 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を検討し、評価を完了
- 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を検討し、評価を完了

#### 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

2024 年度に実施予定。

### (8) 今後の研究開発計画

#### 研究開発項目 1

2023 年度では、研究開発項目 1-a) ~1-c) の 3 つの要素技術において、実際のアンテナ構成や素子パターンを考慮したアルゴリズムの設計検討を行い、実装仕様を完成さ

せる。パイロード開発においては、2022 年度に検討した装置仕様をベースに開発を完了する。また、研究開発項目 1-a) ~1-c) で検討した実装仕様を考慮し、適用効果等も考慮しながら適宜装置の調整を進める。上空プラットフォームについては昨年度選定した機体の手配を進める。2024 年度では、2023 年度に開発を完了したパイロードの暗室試験を実施し、3 つの要素技術について所望の特性が得られることを確認するとともに、上空プラットフォームへの搭載のためのインタフェースの実装、監視制御系の実装等を行う。上空プラットフォーム開発においては機体の手配を完了し、ダミーパイロード等を用いたテストフライト等を行い機体単体での動作確認を完了する。最後に本上空プラットフォームにパイロードを搭載し、屋外での総合実証試験を行う。

## 研究開発項目 2

2023 年度では、2022 年度に検討したアルゴリズムに様々な都市のユーザ分布を適用するとともに、各提案アルゴリズムで用いているネットワーク構造や損失関数、学習方法について検討する。深層学習法などの各種アルゴリズムについて、データ量や収束時間を評価しながら、それらを低減できるようにアルゴリズムを改変する。また、提案アルゴリズムのうち特に提案ユーザクラスタリング法を他のアルゴリズムと組み合わせた検討についても進める。また、CPS への実環境のマッピングを考慮し、通信量・データ量の削減についても検討する。また、人口流動データ、及び他研究開発項目で取得予定の伝搬データを用いたアルゴリズムの検討も行う。2024 年度では、Massive MIMO 技術を用いたユーザ単位のビームフォーミング技術について検討する。平均場ゲーム(MFG)を用いて、ビーム間干渉を平均場干渉として捉えることで計算時間を短縮するビーム制御法について検討する。加えて、Massive MIMO 技術を用いたユーザ単位のビームフォーミング技術では、ビーム間干渉に加えて、上空プラットフォーム-地上システム間の干渉を考慮する。また、人口流動データ、及び他研究開発項目で取得予定の伝搬データを用いたアルゴリズムの検討も行う。