

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 07701
 研究開発課題名 Beyond 5G における超広域・大容量モバイルネットワークを実現する HAPS 通信
 技術の研究開発
 研究開発項目 1 HAPS のサービスリンクにおける地上システムとの周波数共用技術の研究開発
 研究開発項目 3 HAPS のフィーダリンクにおける LoS 空間多重技術による高速大容量化の研究開発
 副 題 HAPS 移動通信の高速大容量化技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

超広域のカバーエリア、災害に強いネットワークを実現する新たな移動通信プラットフォームとして HAPS への期待が高まっている。本研究開発では、HAPS 移動通信のサービスリンクにおけるセル高密度化技術、および、地上ネットワークとの周波数共用技術、フィーダリンクの高速大容量化技術について検討を行う。これにより周波数利用効率の向上を達成し、従来技術と比較して HAPS システムで 2 倍以上の大容量化を実現することを目標とする。また、HAPS・地上システム間の周波数共用により、柔軟なエリア展開を実現するとともに、提案技術を適用しない場合と比較して周波数利用効率を 1.5 倍以上向上させることを目標とする。

(2) 研究開発期間

令和 5 年度から令和 9 年度（5 年間）

(3) 受託者

ソフトバンク株式会社＜代表研究者＞

(4) 研究開発予算（契約額）

令和 5 年度から令和 6 年度までの総額 2,815 百万円（令和 6 年度 1,415 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 HAPS のサービスリンクにおける地上システムとの周波数共用技術の研究開発（ソフトバンク株式会社）

研究開発項目 3 HAPS のフィーダリンクにおける LoS 空間多重技術による高速大容量化の研究開発（ソフトバンク株式会社）

(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	15	11
	外国出願	8	8
外部発表等	研究論文	2	2
	その他研究発表	32	21
	標準化提案・採択	11	10
	プレスリリース・報道	1	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	1	1

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1：HAPS のサービスリンクにおける地上システムとの周波数共用技術の研究開発

a) セル高密度化技術の開発

本研究開発項目では、HAPS サービスエリア内のセルの高密度化による周波数利用効率の改善に必要となるサイドロープレベルの低減を目的とし、セル設計技術、アンテナ構成技術、アンテナウェイト制御技術を確立する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. これまで HAPS サービスリンクアンテナとして検討したシリンドラアンテナとその他の様々なアンテナ構成との性能比較を実施し、シリンドラアンテナが平面アンテナや半球アンテナと比較して半径 100km エリア内で SNR が比較的均一かつ高い特性を示すことを明らかにした。

イ. エリア内の受信特性を最大化させるアンテナチルト角の最適化を新たに提案し、これを従来のシリンドラアンテナに適用したチルト型シリンドラアンテナがこれまでで最も高い SNR 特性を示すことを明らかにした。

ウ. 目標とする 12 セル構成を実現するための基本検討として、上記シリンドラアンテナにおいて所望のビーム幅に対する実現可能なビーム幅と最大サイドロープレベルの関係性を明らかにした。また、サイドロープレベル最小化を目的関数とする遺伝的アルゴリズムを用いたアンテナウェイト制御法を提案し、これまでに検討した疑似逆行列を用いたアンテナウェイト生成法に対して、サイドロープレベルを下げることを可能であることを示した。

エ. アンテナウェイト制御によるサイドロープレベル低減の最適化検討を行うに当たり、理論値と実アンテナを用いた測定値とのアンテナパターンの比較評価を実施し、メインビームはほぼ一致し、サイドロープレベルは $\pm 5\text{dB}$ 程度に収めることに成功した。

b) HAPS・地上間周波数共用技術の開発

本研究開発項目では、HAPS・地上システム間で同一周波数を用いる場合を想定し、ヌルフォーミングによる干渉抑圧制御に無線リソース割当制御を適用した HAPS・地上システム間連携による周波数共用技術を確立する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. 固定的なヌルフォーミング制御により発生するカバレッジホールを回避するため、ヌルフォーミングの ON/OFF 制御を考慮したユーザ選択制御アルゴリズム（上空・地上間の連携制御アルゴリズム）を新たに検討し、ヌル Off リソースが約 35%以下の場合に通信容量が目標とする 1.5 倍を達成することを明らかにした。

イ. ヌル形成を行うためのアンテナ自由度に制限があるなかで、複数の地上基地局に対して効果的に干渉低減を行うヌル方向の最適化アルゴリズムを新たに検討し、その適用効果を明らかにした。

c) 試作装置開発及び実証実験

本研究開発項目では、項目 1-a)、1-b) で検討する要素技術を実証するための試作装置開発、及びセスナ機等の実機体を用いた実証実験を実施する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. サービスリンク装置の基本仕様検討及び試作装置開発を実施し、装置を完成させた。また、サービスリンク装置で使用している 1.7GHz 帯周波数の実験局免許申請を完了した。

イ. 開発したサービスリンク装置を用いたサービスリンク単体基本特性評価を実施し、所望の受信電力及びスループット特性が得られることを確認した。

ウ. サービスリンク-フィーダリンク結合評価試験を実施し、5G 基地局-FL-SL-端末の統合構成において E2E でのスループット導通を確認した（1-c、3-c 共通）。

エ. セスナ機を用いた実証試験に向けて、通信ペイロード搭載に必要な配置や機構設計を完了し、搭載を完了した。また、試験飛行に必要な飛行申請を完了した。

d) HAPS 対応電波伝搬推定技術の開発

本研究開発項目では、HAPS 対応伝搬推定技術の開発に向けた電波伝搬測定環境の構築を実施する。様々な HAPS 対応電波伝搬環境におけるシステムデザイン用伝搬損失モデルおよび時空間電波伝搬モデルの開発に向けた電波伝搬測定および評価を実施する。これらの評価結果を用いて電波伝搬モデルの開発を実施する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. HAPS で想定される電波伝搬環境と本研究開発で開発する電波伝搬モデルを整理した。

イ. HAPS 対応電波伝搬推定モデルを開発するためには、基地局側の電波到来角特性の評価が必要不可欠である。そこで、セスナ機を用いた基地局側電波到来角測定を実施するための測定環境の構築を実施した。まず、早期に電波伝搬測定を実施するために改造検査を必要としない簡易な環境（測定環境 1）を構築した。さらに、詳細な電波伝搬測定を実施するための環境（測定環境 2）を構築し、航空局検査に合格した。

ウ. 基地局側電波到来角特性を解明するために、まずレイトレースシミュレータを用いたシミュレーション評価を実施し、基地局に到来するパスの広がり角が狭いことを明らかにした。また、イで構築した測定環境 1 を用いて簡易測定を実施し、そのシミュレーション評価が妥当であることを確認した。2024 年 9 月～10 月に、測定環境 2 を用いた電波伝搬測定を実施した。

エ. 山岳環境において有人ヘリコプターを用いた電波伝搬測定を実施し、時空間電波伝搬特性を解明した。その結果を基に山岳環境における時空間電波伝搬モデルの検討を実施した。2024 年 12 月に追加の電波伝搬測定を実施し、山岳環境の時空間電波伝搬モデルの開発を推進した。

オ. 植生環境において有人ヘリコプターを用いた電波伝搬測定を実施し、時空間電波伝搬特性を解明した。その結果と都市部における時空間電波伝搬特性を参照にして、植生環境における時空間電波伝搬モデルの検討を実施した。2024 年 12 月に追加の電波伝搬測定を実施し、植生環境の時空間電波伝搬モデルの開発を推進した。

カ. 屋内侵入損失の要因の一つである窓ガラスの透過損失を解明するために 6 種類の窓ガラスに対して電波伝搬測定を実施し、その結果から透過損失モデルを開発した。本成果は材質の透過モデルという新しいモデル開発であり、当初の計画以上の成果である。

キ. これまでに開発した HAPS 対応電波伝搬推定モデルを伝搬シミュレータに実装した。

e) HAPS 対応電波伝搬推定技術の国際標準化

本研究開発では、研究開発項目 1-d) で開発する電波伝搬モデルについて、国際標準化活動を推進する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. 本研究開発で国際標準化活動の対象とする電波伝搬モデルを明確化するために、本研究開発契約締結以前の HAPS 対応電波伝搬推定法の国際標準化状況を整理した。

イ. 開発した電波伝搬モデルの国際標準化に関する議論を ITU-R SG3 関連会合が開催されない期間に議論を進めるための専門家会議（Correspondence Group：CG）で推進し、入力文書案を完成させた。続いて、2024 年 5 月～6 月および 2025 年 2 月に開催された ITU-R SG3 関連会合に参加し、「システムデザイン用都市部電波伝搬遅延モデル提案」、「システムデザイン用クラッター損失モデル提案」、「システムデザイン用屋内侵入損失モデル提案」などの提案文書を入力し、議論を推進した。これらの提案は、将来の勧告改定または新報告作成に向けた議長報告に記載された。また、2027 年世界無線通信会議（WRC-27）で議論される新しい議題に、移動衛星業務に関して HAPS と帯域が重複する議題がある。本議題について、HAPS との干渉検討を行う場合には、本研究開発の実施責任者等が標準化を達成してきた HAPS 電波伝搬モデルである ITU-R 勧告 P.1409 を用いることを認めさせ、回答文書に記載させた。本成果は新しく他の WPs から SG3 へ依頼された連絡文書に対する対応であり、当初の計画以上の成果である。

研究開発項目 3: HAPS のフィーダリンクにおける LoS 空間多重技術による高速大容量化の研究開発

a) LoS 空間多重技術の開発

本研究開発項目では、HAPS フィーダリンクの大容量化を目的とし、モビリティ対応の LoS 空間多重技術を確立する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. HAPS の移動・旋回時においても LoS 空間多重数に応じた最小のアンテナ構成で平均 2 倍以上の周波数利用効率を達成できる LoS 空間多重アンテナ構成をシミュレーションにより明らかにした。

イ. サービスリンクでマルチセルを構成するセル毎に信号を空間多重することで非再生中継時に LoS 空間多重可能な LoS-MIMO システム構成を考案し、その効果を電波暗室による簡易実験により実証した。

ウ. フィーダリンクのスループット向上と安定化の実現に向けて、ULA を直交させた UXA による LoS-MIMO 伝送の検証実験を行った。対向アンテナが回転時に ULA を適切にスイッチすることにより、安定化が可能となることを示した。

b) HAPS 対応長距離ミリ波無線伝送技術の開発

本研究開発項目では、長距離ミリ波伝送と HAPS モビリティに対応したミリ波ビームトラッキング技術および本技術を適用したフィーダリンク無線通信システムを確立する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. ミリ波・長距離伝送の回線設計を行い、HAPS フィーダリンクで必要となる所要アンテナ利得を明らかにした。回線設計では降雨減衰や地上ゲートウェイ設置位置、アンテナ指向マージン等を考慮した上で十分な通信品質を確保できるよう所要アンテナ利得を設定した。本結果をもとに地上アンテナ仕様を確定した。

イ. HAPS モビリティ対応のビームトラッキング方式を考案し、シミュレーション評価によりその妥当性を確認した。本ビームトラッキング方式を実装したミリ波無線通信装置と LoS-MIMO 構成に対応する地上用複数アンテナジナル装置の開発を完了し、セスナ機を用いた地上用複数アンテナジナル装置の動作検証を完了した。

ウ. LoS 空間多重対応無線中継方式の検討として、上記 3-a) に記載の非再生無線中継方式、高速ドップラシフト補償技術、フィーダリンクレベル補償技術を検討し、無線中継装置への機能実装を完了した。

c) 試作装置開発及び実証実験

本研究開発項目では、項目 3-a)、3-b) で検討する要素技術を実証するための試作装置開発、及びセスナ機等の実機体を用いた実証実験を実施する。2025 年 3 月までの成果実績は次の通りである。

ア. 6 セル偏波多重中継に対応した 26GHz 帯ミリ波フィーダリンク無線中継システムの試作装置開発を完了した。開発したフィーダリンクシステムとサービスリンクシステムとの結合試験を実施し、動作検証を完了した。また、セスナ機へのフィーダリンク無線中継システムの艀装検討を行い、フィーダリンクシステムをセスナ機に搭載して飛行許可を取得し、飛行試験の準備を完了した。その他、IP 伝送対応のフィーダリンク装置の基本仕様検討と開発に着手し、一部のハードウェア開発を完了した。

イ. 26GHz 帯ミリ波フェーズドアレイアンテナの特性評価を電波暗室で実施し、所望の特性が得られることを確認した。また、先行して成層圏環境評価試験を実施し、成層圏環境下でのコールドスタートとビーム制御に成功した。また、低気圧環境下における両偏波利用時の温度上昇対策の検討を進めた。

ウ. 39GHz 帯ミリ波フェーズドアレイアンテナの仕様を確定して開発に着手した。周波数変換

IC とビームフォーミング IC の開発が完了し、当初の計画を越える成果である。

d) HAPS 対応電波伝搬推定技術の開発
研究開発項目 1-d) と同様

e) HAPS 対応電波伝搬推定技術の国際標準化
研究開発項目 1-e) と同様

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目 1：HAPS のサービスリンクにおける地上システムとの周波数共用技術の研究開発

研究開発項目 1-a) では多数のセル（セクタ）を形成する多数セル構成において、大容量化に向けて必要となるサイドロープ低減を実現するセル設計技術、アンテナ構成技術、アンテナウェイト制御技術について検討する。本取り組みにより提案技術を適用しない同一セル数の HAPS セル構成と比較して、セル毎で 1.2 倍以上の周波数利用効率の達成を目指す。研究開発項目 1-b) では、HAPS と地上システムとを同一周波数でオーバーレイさせる場合を想定し、HAPS・地上間の周波数共用を実現するビームフォーミング技術、無線リソース割り当て制御技術について検討する。本取り組みにより提案技術を用いず HAPS・地上システムをオーバーレイさせる場合と比較して 1.5 倍以上の周波数利用効率の達成を目指す。また、研究開発項目 1-c) では試作装置開発を行い、提案技術により所望の特性が得られることを実証すると共に、成層圏環境下においても正常に動作させることを目指す。また、研究開発項目 3 で開発予定のフィードリンクと結合し、対流圏を飛行する上空プラットフォームを用いた上空での実証試験により提案技術を確立する。

また、HAPS 移動通信システムを効率よく設計するためには、高高度における電波伝搬損失特性や時空間電波伝搬特性（電波伝搬遅延特性、電波到来角特性）を推定できる電波伝搬推定技術が不可欠である。研究開発項目 1-d) では、HAPS 移動通信システムを効率よく設計するために必要な HAPS 対応電波伝搬推定技術として、さまざまな環境での電波伝搬測定および伝搬シミュレータによる評価、解析を行い、電波伝搬モデルの開発を実施する。開発した電波伝搬モデルを用いて研究開発項目 1-a) ～1-c) の提案技術を評価する。

本研究開発の研究開発項目 1-a) ～1-c) を効率的に評価するためには、評価に用いる電波伝搬モデルの国際標準化が必要不可欠である。そこで、研究開発項目 1-e) では、研究開発項目 1-d) で開発する電波伝搬推定法の国際標準化に取り組む。

研究開発項目 3：HAPS のフィードリンクにおける LoS 空間多重技術による高速大容量化の研究開発

HAPS フィードリンクの大容量化を実現するため、研究開発項目 3-a) では LoS 空間多重技術、研究開発項目 3-b) では HAPS 対応の長距離ミリ波無線伝送技術の研究開発を行う。これらの取り組みにより、3-a) ではモビリティ対応の LoS 空間多重技術を確立し、偏波多重 MIMO と比較して平均 2 倍以上の周波数有効利用効率を達成する。3-b) では長距離ミリ波伝送と HAPS のモビリティに対応したミリ波ビームトラッキング技術を実装したミリ波フィードリンク無線通信システムを確立する。また、研究開発項目 3-c) では検討した提案技術を実証するための試作装置開発を行い、無線伝送試験により所望の特性が得られることを実証すると共に、成層圏環境下においても正常に動作させることを目指す。また、研究開発項目 1 で開発予定のサービスリンクと結合し、上空プラットフォームを用いた実証試験により提案技術を確立する。

また、研究開発項目 3-d) で開発する HAPS 対応電波伝搬推定技術は、研究開発項目 1-d) と共通である。同様に研究開発項目 3-e) では、開発する共通の電波伝搬推定法の国際標準化に取り組む。