（革新）様式 1-4-2 (2025-1)

令和７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７年度までの総額 4,257 百万円（令和７年度 1,442 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	20	5
	外国出願	14	6
外部発表等	研究論文	4	2
	その他研究発表	58	26
	標準化提案・採択	19	8
	プレスリリース・報道	32	31
	展示会	1	1
	受賞・表彰	1	0

（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ブ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。３月までの成果は次の通りである。

ア．従来の６セル構成に対して２倍の通信容量を実現する 12 セル対応のアンテナ素子構成を検討するため、シリンダ形状のアレーアンテナを前提にアンテナ素子構成とセル構成が周波数利用効率に与える影響に関する評価を行った。これらの結果をもとに、2026 年度から開発予定のアンテナ構成を確定した。また、本検討の一部について国際会議での発表を完了した。

イ．これまで別々に検討していたセル配置及びアンテナウェイトを勾配法をベースとした連続最適化により同時に最適化可能な新たな手法を提案した。これまでセル配置の設計の段階ではアレー合成パターンは近似モデルを用いていたため、実際のアンテナパターンとの誤差が生じていたが、提案法により実際のアンテナ素子パターンを考慮したアレーパターンを用いながら様々なセル配置構成の設計を同時に実施できるようになった。計算機シミュレーションにより、提案法はモデル化アンテナパターンを用いて最適化を行う従来法と比較して仰角方向の第一サイドローブレベルを 6dB 以上低減させ、周波数利用効率を向上させることを明らかにした。

ウ．通信容量の最大化と機体の旋回に伴うセル形状の変化を抑制するフットプリント固定を同時に実現するニューラルネットワークを用いたアンテナウェイト最適化手法を新たに提案した。計算機シミュレーションにより、提案法は従来のフットプリント固定制御よりも高い固定性能を維持しながら周波数利用効率の中央値として 20%以上の改善効果を示すことを明らかにした。本検討をまとめ、国内研究会での発表及び２件の特許出願を完了し、国際会議へ１件の採択が決定した。

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。３月までの成果は次の通りである

ア．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検討した。ヌル数を柔軟に調整することで、ヌル形成を行わない従来法に対して HAPS 及び地上ユーザの合計キャパシティとして約 30%の改善が見込めることを計算機シミュレーションにより明らかにした。本成果をまとめ、国内研究会での発表を行った。

イ．ヌル形成時の HAPS ユーザの選択方法について検討し、HAPS ユーザへの受信レベルの劣化を可能な限り抑えながら所望の方向に対するヌル形成を同時に行うことができる新たな方式を提案した。一例の地上基地局配置を用いた計算機シミュレーション評価を実施し、ランダムなユーザ選択法を行う従来法と比較して提案方式は HAPS の合計キャパシティを約 21%改善できることを明らかにした。本検討をまとめ、2026 年４月頃に１件の特許出願を行う予定である。

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。３月までの成果は次の通りである

ア．サービスリンク-フィーダリンク結合構成による通信ペイロードをセスナ機に搭載し、八丈島でのフライト試験において、遠方 15km での E2E 疎通及び６セル構成でのフットプリント固定制御に成功した。また、本実験の成功について 2025 年９月にプレスリリース発表を行った。

イ．HAPS 機体が旋回しても常に同じ場所に対してヌル形成を行う動的ヌルフォーミング機能を実装した。八丈島において HAPS を模擬したセスナ機と地上局との重畳構成を構築し、本機能の実証試験を行った。その結果、動的ヌルフォーミングを適用することで機体の旋回に依らず地上カバーエリアに対して常に安定した干渉低減を実現できることを明らかにした。本実証の成功について 2026 年 4 月頃にプレスリリース発表を行う予定である。

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。HAPS の様々な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。3 月までの成果は次の通りである

ア．HAPS 対応時空間電波伝搬モデルの一部である基地局側電波到来角プロファイル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、有人ヘリコプターを用いて基地局側電波到来角測定を実施するための測定環境を構築し、航空局検査に合格した。さらに、測定手法の確認のために有人ヘリコプターを用いた基地局側到来角測定を実施した。LoS 環境での見通し波の確認および過去に測定を行った山岳環境で見通し外環境での山岳反射波等の確認を行い、基地局側到来角測定手法を確立させた。

イ．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。

ウ．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。その結果を基に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。

エ．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過去に測定した 6 種類の窓ガラスに追加して、3 種類の新たな窓ガラスに対して電波伝搬測定を実施し、その結果からガラスの透過損失モデルの検討を実施した。

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。3 月までの成果は次の通りである

ア．開発した電波伝搬モデルの国際標準化に関する議論を 2025 年 5 月～6 月に開催された ITU-R SG3 関連会合に向けた CG（Correspondence Group）で推進し、入力文書案を完成させた。続いて、ITU-R SG3 関連会合に参加し、「干渉検討用クラッター損失モデル提案」、「システムデザイン用都市部電波伝搬遅延モデル提案」、「屋内侵入損失モデル開発に向けた材質による伝搬特性の新報告提案」などの提案文書を入力し、議論を推進した。

「干渉検討用クラッター損失モデル提案」は、2027 年世界無線通信会議（WRC-27）で議論される新しい議題のほぼすべてに関わる新たなクラッター損失モデルの開発に大きく貢献した。本成果は、当初計画を大きく超えた卓越した成果である。このモデルは、日本の提案を基に中国、スウェーデン、アメリカが各要素を微修正したものであり、その根幹部分は日本提案そのものである。改定案は、内容自体は SG3 で承認されたが、微修正が加えられたのが会期中であったため、改定は次会合で行うこととなった。ただし、内容自体は承認されていることから、WRC-27 の各アジェンダアイテムでの計算に使用するべきモデルとして、WP3K/3M の連名で他の WPs にリエゾン回答された。また、「システムデザイン用都市部電波伝搬遅延モデル提案」、「屋内侵入損失モデル開発に向けた材質による伝搬特性の新報告提案」は、SG3 会合でそれぞれ承認され、勧告改定ならびに報告発行がなされた。

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。３月までの成果は次の通りである。

ア. IP 伝送方式のミリ波フィーダリンク装置について、LoS-MIMO 対応のベースバンドユニットの開発を完了し、最大 4×4 構成まで対応可能な機能を実装した。前年度に考案した LoS-MIMO 信号制御方式を組み込み、2×2 に加えて 3×3 および 4×4 構成を用いた室内実験（有線接続試験）を実施し、各構成における LoS-MIMO の機能を確認した。さらにシミュレーション結果との比較・評価を行い、開発した装置が想定通りの性能を発揮し、適切なアンテナ配置により実機においてもモビリティに対応可能であることを確認した。また、次年度の LoS-MIMO 試験に向け、実際のセスナ機および地上アンテナ配置を検討し、旋回時のチャネル容量を評価した。その結果、安定した通信が可能であることを確認した。

イ. HAPS フィーダリンクにおける 12 セル LoS 空間多重非再生中継方式の検討を完了した。SNR シミュレーションにより、非再生中継に適したアンテナ構成として 3x3UCA が有力であることを示し、HAPS の移動や姿勢変化を含むモビリティ下での性能を明らかにした。また、本方式に対応する参照信号配置を設計し、シミュレーションによりその妥当性を確認した。その後、参照信号を含む本方式を無線中継装置に実装し、IF 信号による有線接続試験により LoS-MIMO のチャネル分離性能を評価し、想定通りの特性が得られていることを確認した。

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。3 月までの成果は次の通りである。

ア. 開発したビームトラッキング機能について屋外実験を実施し、ゲートウェイ側・HAPS 側双方を含めた総合的なビームトラッキング性能の評価を完了した。実験およびシミュレーション結果より、上空局・地上局双方のビームトラッキング機能が正常に動作しており、相手局方向へ精度良く追尾できていることを確認した。さらに、LoS-MIMO に対応した複数アンテナが協調動作するジンバル制御にも成功し、実機環境においても複数アンテナの協調ビームトラッキングが可能であることを確認した。また、既存のフェーズドアレイアンテナを 4 タイル化し高利得・狭ビーム化するとともに、狭ビーム化に対応した高速ジンバルを開発した。これを踏まえフィーダリンクの SNR シミュレーションを実施し、通信品質の向上と正確なビームトラッキングの実現を確認した。

イ. 開発したドップラーシフト補正機能について屋外実験を行い、上空局が実際に移動しドップラーシフトが生じる環境で補正機能を動作させ、その効果の実証を完了した。結果より、フィーダリンク装置に搭載したドップラーシフト補正機能が正常に動作し、実環境においても 2000Hz 以上の周波数ずれを補正することが可能であることを示した。

ウ. フェーズドアレーアンテナにおいて、正面利得およびビームフォーミング性能を維持するため、全素子を給電せず、一部を無給電素子として効果的に配置する手法のシミュレーション評価を実施した。その結果、素子数を半減しても、正面利得は従来を上回り、0 度～40 度の範囲でビームフォーミング効果を維持できることを電磁界シミュレータで確認した。これにより、消費電力や放熱の課題を軽減しつつ、ミリ波通信に必要な性能を確保できる可能性を示した。本項目は計画外であったが、今後の実用化を見据えた対策として実施した。

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。３月までの成果は次の通りである。

ア. 前年度に開発したサービスリンクシステムとの結合構成およびフィーダリンク単体構成の通信ペ

イロードをセスナ機に搭載し、八丈島でフライト試験を実施した。本試験では、研究開発項目 1-c)で記載した内容に加え、フィーダリンク-サービスリンク結合部における SINR が概ね 20dB 以上であることを実測により確認し、その結果、良好な通信品質が得られることを確認した。 また、2026 年 3 月に地上の 26GHz 帯フェーズドアレイアンテナを 4 タイル化した高利得アンテナにて、フィーダリンク単体構成におけるフライト試験を実施した。

イ．26GHz 帯フィーダリンクシステムで使用する、フェーズドアレイアンテナモジュール（以下、PAAM）を 4 タイル化することでより PAAM の高利得・高出力化を達成した。また、39GHz 帯 PAAM に実装される、周波数変換 IC(FC-IC),バンドパスフィルタ(BPF)及びビームフォーミング IC(BF-IC)の開発を完了し、それらを統合した PAAM の開発を完了した。また、次年度以降の LoS 空間多重方式の実証実験に向けて、39GHz 帯 PAAM を 4 タイル化した高利得アンテナ開発と、セスナ機への高利得アンテナ搭載検討を完了した。

ウ．12 セル対応偏波多重ミリ波フィーダリンク無線中継装置のシステム設計を完了した。本装置については、12 セル対応機能および 3×3 LoS-MIMO 機能の実装を完了し、基本的な動作検証を完了した。一方、IP 伝送方式のミリ波フィーダリンク装置については、LoS-MIMO 対応のベースバンドユニットを開発し、最大 4×4 MIMO に対応可能な構成とすることで装置として完成させた。さらに、39GHz 帯 PAAM とのインターフェイスモジュールの開発を完了し、結合試験の実施を完了した。

d）HAPS 対応電波伝搬推定技術の開発

研究開発項目１-d）を参照

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）を参照

（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ブ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を確立する。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を確立する。研究開発項目 1-c）では試作装置開発を行い、研究開発項目 3 で開発予定のフィーダリンクと結合した装置構成で上空プラットフォームを用いた飛行試験により 1-a)、1-b）の各要素技術の実証を行う。

研究開発項目 1-d）では、これまでに開発した電波伝搬モデルの妥当性を確認するとともに、残る環境に対する電波伝搬モデルの開発及び電波伝搬シミュレータへの実装を行い、他の研究開発項目の提案技術を評価する。研究開発項目 1-e)では、これまでに提案している電波伝搬モデルの国際標準化活動を進めるとともに、残る環境に対する電波伝搬モデルの国際標準化活動を推進する。

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

研究開発項目 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。研究開発項目 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ビームトラッキング技術を確立する。狭ビーム化を進めるため、ビームトラッキング精度のさらなる向上にも取り組む。研究開発項目 3-c）では、試作装置を開発し、試験により所望の無線特性が得られること、および成層圏環境での動作を実証する。あわせてセスナ機への LoS-MIMO アンテナ搭載検討を進め、最終的に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。研究開発項目 3-d)、3-e）は、研究開発項目 1-d)、1-e）と同様である。