

令和 5 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局移動通信課新世代移動通信システム推進室

評価年月：令和 5 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

第 5 世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

令和元年度～令和 4 年度（4 か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人等

・総事業費

4,691 百万円

令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	総 額
1,212 百万円	1,168 百万円	1,201 百万円	1,110 百万円	4,691 百万円

・概 要

第 5 世代移動通信システム（5 G）の更なる高度化を行うことで、利活用分野をさらに拡大し、我が国の新産業の創出や社会課題の解決をより一層促進し、高度 5 G ネットワークを 2025 年頃に実現するために、以下の要求条件の達成に必要な技術の確立を行った。

① ネットワーク全体のエネルギー効率向上（通信量あたり従来より数倍）

ミリ波帯における伝搬損失を補い、広いカバレッジを実現するためにはフェーズドアレイ無線技術が必要である。一方、周波数が高いほど回路のエネルギー効率が低下し消費電力の増大や、フェーズドアレイではアンテナ素子毎に回路を必要とするため、回路構成が複雑となり、無線機のコストが増加するという課題がある。また、ミリ波を活用する無線基地局に収容される端末台数が増えるに連れ、送信時や端末移動時のオーバーヘッドが増加し消費電力量が増加する課題が存在する。これらを解決するために、ミリ波帯の高エネルギー効率を実現するフェーズドアレイ無線技術や通信制御技術の確立を図った。（課題イ）

② 信頼性向上（常時複数のネットワークと接続）

ミリ波帯のその電波伝搬特性から基地局 1 台でカバーできるエリアは小さく、電波直進性から遮蔽による通信品質の劣化が発生すると考えられる。また、5 G の社会実装が進むと、例えば超高速かつ超低遅延のように、5 G での超高速、大容量、超低遅延、低エラー率といった性質の組み合わせが必要な、多様なサービス要求が発生すると考えられる。このような環境下における、多様なサービスを高信頼に収容可能な、高度 5 G ネットワークを実現するため、通信性能の向上のみならず、大容量、超低遅延、超多接続を組み合わせる高信頼な通信サービスを実現する、適応的な無線アクセス網(RAN)の制御技術、ミリ波帯を対象にした遮蔽予測技術や無線通信方式の確立を図った。（課題ア）

③ 高い周波数の利用（40, 70, 90GHz 帯等）

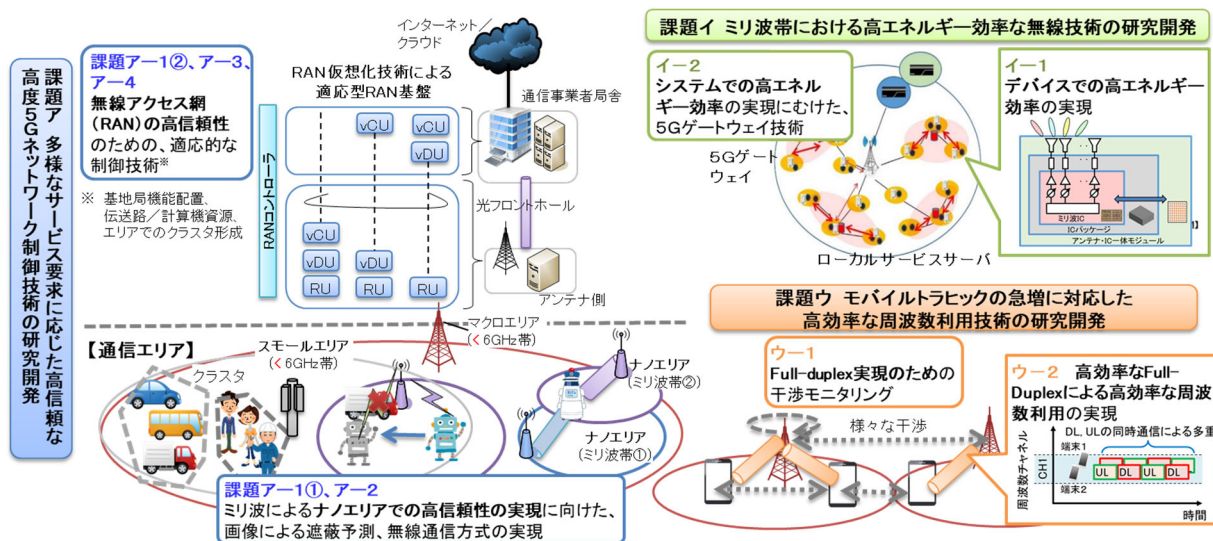
5 G の高度化において、様々な要求のある多量の通信を収容するためには通信容量を増大させる必要がある。必要となる広い周波数帯域幅を確保するためには、高い周波数であるミリ波帯の活用は必須となる。本研究開発では、28GHz 帯、39GHz 帯、60GHz 帯の移動体通信技術での活用、及び 79GHz 帯におけるレーダー技術の活用を行った。

（課題ア、課題イ、課題ウ）

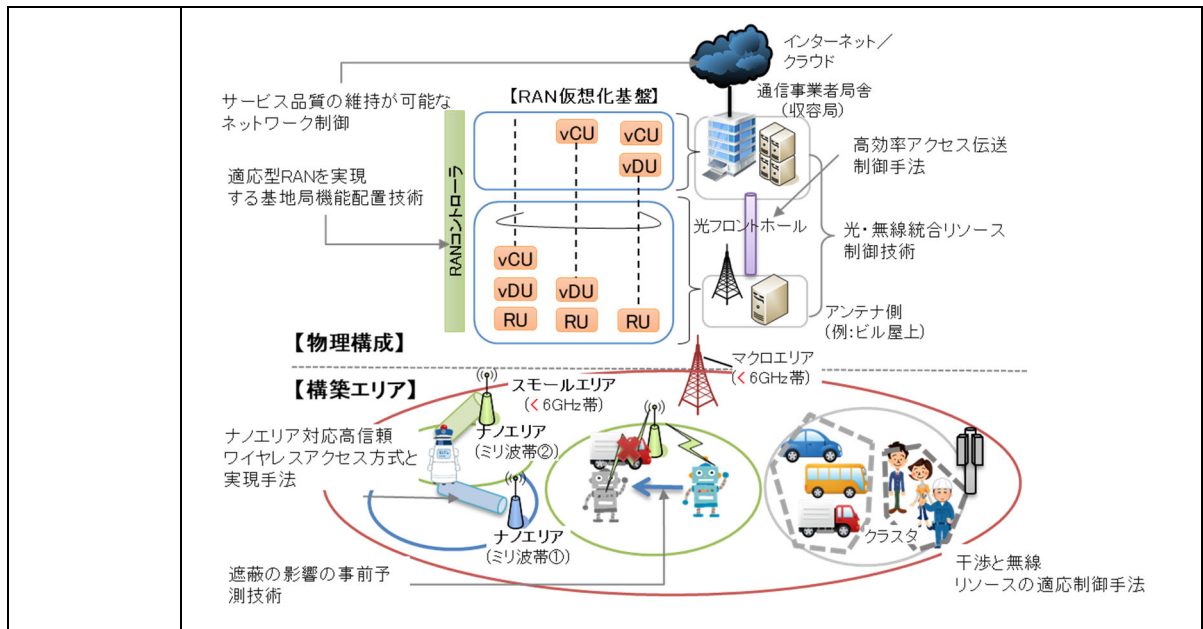
④ 周波数利用効率の向上（従来より 2 倍）

高い周波数のみならず、高 SHF 帯以下の 5 G においてもモバイルトラヒックの急増に対応し

た高効率な周波数利用技術として帯域内全二重通信 (Full-Duplex) の実現が期待される。送受信に同一周波数を使用するため、自己干渉や端末間の干渉が発生するという課題があり、複数の端末から空間に発射される電波の干渉状況を事前に把握することが必要である。この課題を解決し、周波数利用効率を向上させるために、無線通信干渉モニタリング技術を研究開発し、干渉の影響が少ない周波数・時間スロットにおいて送受信を同時に行う Full-Duplex セルラーシステム制御技術、及び同一周波数・時間スロットで送受信を同時に行う Full-Duplex セルラーシステムを実現するための、干渉モニタリング技術と制御技術の確立を図った。(課題ウ)



技術の種類	技術の概要
多様なサービス要求に応じた高信頼な高度5Gネットワーク制御技術	<p>2018年度比でトラフィックが5倍に大容量化しても、通信品質を95%以上担保し、通信の継続率を99%以上確保することが可能な、安定した通信を実現し、高信頼なサービス提供が可能となるよう、次に示す技術等を実現した。</p> <ul style="list-style-type: none"> 高い周波数であるミリ波(28GHz帯)を活用して通信の継続を実現するための、遮蔽の影響を予測する手法と予測に基づきロバストにビームの切り替えを行うトラフィック量が多い通信向けの無線通信方式、低遅延・多接続のIoT向けの無線通信方式、及びそれらの実機での実現手法 トラフィック量が大容量化した場合でも通信品質を確保するための、仮想化RAN技術を用いた適応型RANの実現。その実現に向けた、トラフィック種別の把握手法、及びそれに基づくRAN全体の基地局機能配置等の通信品質確保のための制御手法。また、大量のトラフィック収容のための光フロントホールの効率化手法、及び干渉と無線リソースの適応的な制御柔軟な適応制御手法



高エネルギー効率を実現するために、高い周波数であるミリ波帯の活用で重要なフェーズドアレイ無線のデバイスにおける電力効率を従来比で2倍向上させ、さらに、収容端末数の増加に従って生じる無線切り替え等の制御オーバーヘッドに起因する消費電力増を解決し、システムの電力効率を従来比3倍向上させるために、次に示す技術等を実現した。

- エネルギー効率が低下する高い周波数である39GHz帯、かつ多数のアンテナ素子を含む複雑な回路でも高い電力効率を達成できる、IC・パッケージ・モジュールの設計手法
- 60GHz帯を用いたワイヤレスバックホールを活用し、79GHz帯のミリ波レーダーを用いて端末経路、無線品質を高精度に予測して、無線切替用制御信号の送信対象と送信タイミングを絞り込むことで、制御のオーバーヘッドを減らしてシステムの電力効率を向上させる通信制御手法

ミリ波帯における高エネルギー効率な無線技術

デバイス技術

- パワーアンプ高効率化、パッケージ・IC-アンテナ間ロス低減で、効率2倍
- 無線アクセス/フロントホール/バックホール装置へ適用

システム技術

- ローカルエリアで頻繁に発生する大容量トラフィックを、高い電力効率で収容
- 60GHz帯を活用したワイヤレスバックホールネットワークにて、3倍の電力効率^(式1)を実現

電力効率 = $\frac{\text{端末が送受信する総データ量}}{\text{端末及びネットワークが消費する電力量}} \dots (式1)$

5G-GWネットワークに3つの技術を組み合わせ

↑

3倍

コア連携技術
トラフィック電源制御

多段接続技術
グループング経路制御

端末収容技術
品質予測送信制御

5G-GWオーバーレイ

コンピューティング バックホール回線

コアNW

5G-GW

LSサーバ

マクロセル

マイクロセル

端末

アクセス回線

IC-アンテナ間の効率1.4倍以上

パッケージの損失70%以下

パワーアンプの効率1.4倍以上

協調設計

ミリ波IC

ICパッケージ

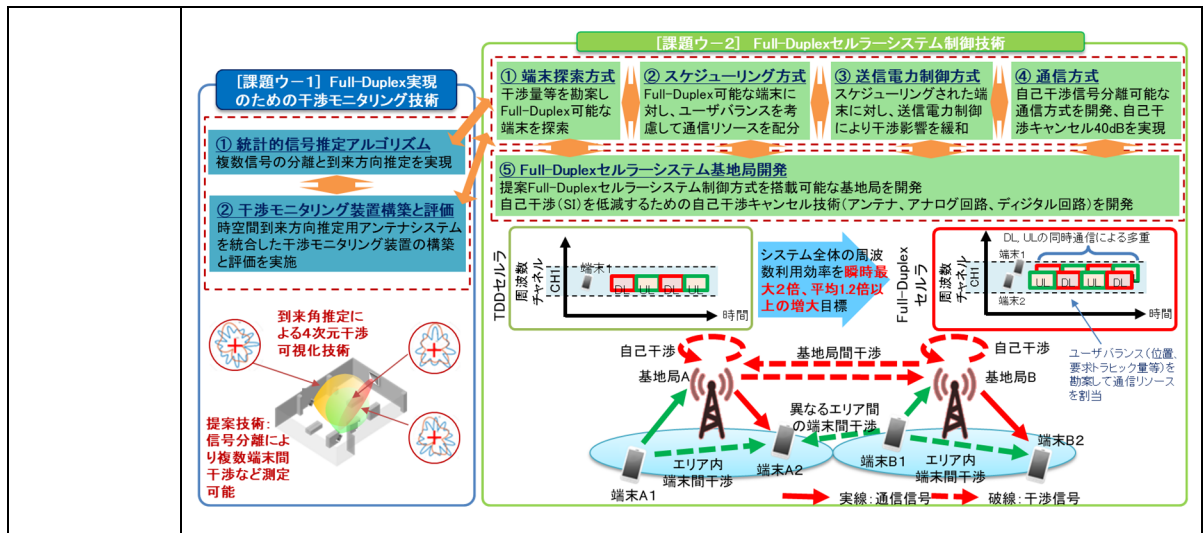
アンテナ・IC一体モジュール

端末収容率向上

モバイルトラフィックの急増に対応した高効率な周波数利用技術

同じ周波数を送信と受信で同時に使用する Full-Duplex により、周波数利用効率を瞬時的に現状の最大2倍、平均1.2倍以上向上させるために、次の技術等を実現した。

- 干渉信号の到来方向を高精度に推定する、高い周波数である28GHz帯を含めた干渉モニタリング手法
- Full-Duplexを実現するための、端末探索、スケジューリング、電力制御等の制御手法
- 干渉信号を抑圧するデジタル自己干渉キャンセリング手法、アナログ自己干渉キャンセリング手法、アンテナ



・スケジュール

技術の種類	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
ミリ波帯における高エネルギー効率な無線技術	方式検討	実装評価	評価改良	実証実験
多様なサービス要求に応じた高信頼な高度5Gネットワーク制御技術	方式検討	方式改良	実用検討、実装	統合実証実験
モバイルトラヒックの急増に対応した高効率な周波数利用技術	基本設計	二次設計	試作評価	総合システム試作評価

(2) 達成目標

5Gは、我が国の社会・経済を支える基盤技術として広く普及することが想定される。3Gや4Gは、10年よりも短い周期で持続的に進化しており、5Gについても利活用分野の更なる拡大など高まり続けるニーズに対応するためには、早くから5Gの更なる高度化に取り組むことが必要である。そこで、5Gを高度化する本研究開発の下線で示す達成目標及びそれを実現するために確立すべき技術等を次に示す。

- 高い周波数の活用による周波数帯域の確保に向けた、ミリ波帯(28GHz帯、39GHz帯、60GHz帯)を利用する無線通信方式、パワーアンプ及びアンテナデバイス、無線システム切り替え技術、Full-Duplex向けの無線モニタリング技術の確立。加えて、無線システム切り替え技術に適用するための79GHz帯レーダーを用いた端末経路予測技術の確立。
- 高エネルギー効率の実現に向けた、ミリ波帯におけるフェーズドアレイ無線のデバイスや、複数の無線システム切り替え技術の確立
- 高信頼性の実現に向けた、トラヒックが2018年比5倍においても、通信品質の95%以上、通信継続率99%以上にするための無線アクセス網(RAN)の制御技術や無線通信方式の確立
- 20Gbpsを安定的に超える超高速通信の実現に向けた、ミリ波帯におけるフェーズドアレイ無線のデバイスや、トラヒックを収容するための光フロントホールを効率的に利用する技術の確立

- 1 ミリ秒を安定的に満たす超低遅延通信の実現、及び 1 平方キロメートルあたり 100 万台が安定的に接続する多数接続通信の実現に向けた、ミリ波帯向けの無線通信方式及びその実機の確立

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT 政策） 政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等


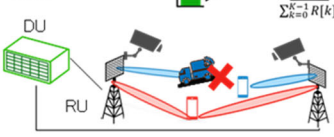
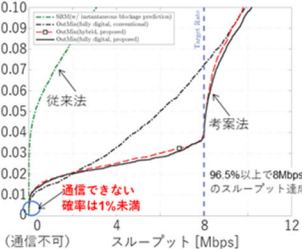
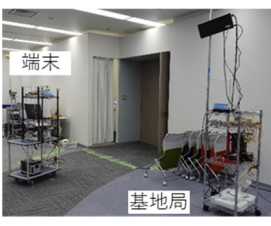
名称（年月日）	記載内容（抜粋）
未来投資戦略2018(平成30年6月15日)	第2 II. [1] 1. (3) iii) 新たな技術・ビジネスへの対応 ⑤Society 5.0 を支える通信環境の整備 Society 5.0 の社会実装を地域においても加速させるため、その基盤となる 5 G や光ファイバ網等の地域展開、Wi-Fi 環境整備、ケーブルテレビネットワークの光化等の通信環境の高度化を推進するとともに、Beyond 5G 等の次世代ワイヤレスシステムの実現のための技術開発や環境整備、人材育成、優れたワイヤレスシステムの海外展開等に取り組む。
世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成30年6月15日）	第1部 III 1. (4) 5 G 等のネットワーク基盤技術 社会基盤としての役割が期待される Beyond 5G 等の次世代ワイヤレスシステムに関し、その実現に向けた技術開発を行うとともに、周波数共有・移行の推進、先端的なワイヤレス研究人材や電波の利活用を分かりやすく助言するメンター人材の育成、我が国の優れた電波システムのグローバル展開などの環境整備を通じ、社会コストの低減や経済成長に貢献する。
経済財政運営と改革の基本方針2018(平成30年6月15日)	第2章 2. (4) 経済構造革新への基盤づくり ① データ駆動型社会の共通インフラの整備 大容量・高速通信を支える 5 G について、本年度末に周波数割当を行い、民間事業者による基盤整備を促進し、2020 年からのサービス開始につなげるなどの基盤システム・技術への投資の促進を図る。

(3) 目標の達成状況

4 年間の研究開発を通じて、5 G の更なる高度化を目的とした次に述べる要素技術を実現し、下線で示す当初の目標どおり達成した。

- 高い周波数の活用として、ミリ波の電波の遮蔽の事前予測に基づきロバストなビームフォーミングを行う無線通信方式、その 28GHz 帯における実機での評価により、端末が移動しても高速な通信の 99% の継続を達成した。また、大きな伝搬損失を補うために多数のアンテナ素子を含む複雑なビームフォーミング装置の設計手法により、64 系統のアンテナ素子を備えた 39GHz 帯ハイブリッドビームフォーミング装置向けのデバイスを実現した。加えて、60GHz 帯を利用する 5 G ゲートウェイによる無線通信システムを実現した。さらに、周波数利用効率を向上する Full-Duplex に必要な 28GHz 帯で電波の到来方向をモニタする手法について、±10 度以下の高精度化を達成した。これらにより、28GHz 帯、39GHz 帯、60GHz 帯といった高い周波数であるミリ波を活用した通信を実現した。さらに、5 G ゲートウェイによる無線通信システムでは、79GHz 帯のレーダーを活用した端末経路予測技術を確立した。
- 高エネルギー効率は、多数のアンテナを備えた複雑な回路に高効率/協調設計手法を適用した 39GHz 帯フェーズドアレイ向けのデバイスを実現し、2.6 倍の電力効率を確認した。また、60GHz 帯利用する 5 G ゲートウェイを用いる無線通信システムにおいて、ミリ波レーダーを利用して予測した端末経路と無線品質により、無線切替制御のオーバーヘッドを減らす通信制御で、3 倍以上の電力効率を実現した。

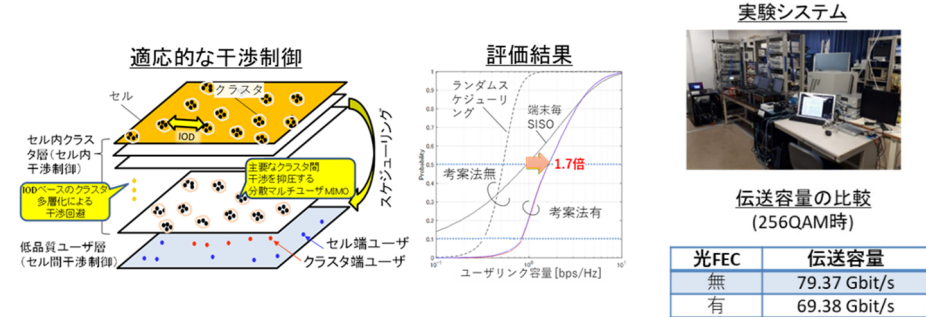
- 高信頼性は、仮想化 RAN 技術を用いる適応型 RAN での制御方式やミリ波向けの無線通信方式の確立により、2018 年度比でトラフィックが 5 倍という大容量化しても、通信品質の 96% の確保、通信の継続率を 99%確保可能であることにより実現した。
- 20Gbps を安定的に超える超高速通信は、考案した 39GHz 帯フェーズドアレイデバイスを用いることで、20Gbps・200m 伝送に必要な輻射電力が確保可能なことを確認した。また、超高速通信を収容するための光コヒーレント伝送の効率化により、80Gbps の伝送が可能であることを確認した。
- 1 ミリ秒を安定的に満たす超低遅延通信と、1 平方キロメートルあたり 100 万台が安定的に接続する多数接続通信は、ミリ波向けの基地局からの割当指示が不要なグラントフリーによる無線通信方式を確立し、その実証を行うことで実現性を確認した。

技術の種類	目標の達成状況
<p>多様なサービス要求に応じた高信頼な高度 5G ネットワーク制御技術</p>	<p>本技術に関連した到達目標（下線）、及びそれを実現する手法の概要を次に示す。</p> <p>(1) <u>高い周波数の活用</u>として、ミリ波の電波の遮蔽の事前予測に基づきロバストなビームフォーミングを行う無線通信方式、その 28GHz 帯における実機の実現</p> <p>(2) <u>高信頼性</u>は、トラフィック量が 2018 年度比 5 倍と大容量化する前提での仮想化 RAN 技術を用いる適応型 RAN での制御方式やミリ波向けの無線通信方式の確立</p> <p>(3) <u>20Gbps を安定的に超える超高速通信</u>における、超高速通信を収容するための光コヒーレント伝送の効率化</p> <p>(4) <u>1 ミリ秒を安定的に満たす超低遅延通信</u>と、<u>1 平方キロメートルあたり 100 万台が安定的に接続する多数接続通信</u>に向けた、グラントフリーによる無線通信方式の確立</p> <p>以降で、(1)から(4)の実現手法の詳細を述べる。</p> <p>■ (1) 「高い周波数の活用」に関する実現手法</p> <p>ミリ波の電波の遮蔽の事前予測に基づきロバストなビームフォーミングを行う無線通信方式を実現した。具体的には、下図①②のように、歩行者や車によるミリ波の遮蔽を事前予測して、影響を回避するように複数基地局が連携してビームを制御する手法を用いている。下図の「評価結果」は、ミリ波の屋外実験データを利用したシミュレーション評価結果で、99%の通信継続（通信できない確率を 1%）となることを確認した。また、ロバストビームフォーミング方式、及び(4)に示すグラントフリー無線通信方式について、下図に示すような実機での評価も合わせて行い、実現性を確認した。これらは、ミリ波の弱点である電波の遮蔽による通信断を克服する技術と言え、高い周波数の活用に向けて貢献できると考えられる。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="470 1305 694 1579"> <p>① 遮蔽確率の把握</p> <p>カメラ画像と受信電力から、物体の移動予測を行い、それを元に遮蔽確率を予測</p>  </div> <div data-bbox="710 1305 1077 1579"> <p>② ビームの設計</p> <p>端末毎の遮蔽発生確率を利用し、アナログ・デジタルのハイブリッドビームを制約を考慮して設計</p>  </div> <div data-bbox="1093 1305 1428 1579"> <p>評価結果</p>  </div> </div> <p>図：遮蔽の影響を考慮するビーム制御を備えた無線通信方式</p> <div style="text-align: center;">  <p>図：実験システム</p> </div> <p>■ (2) 「高信頼性」及び(3) 「20Gbps を安定的に超える超高速通信」の実現手法</p> <p>「高信頼性」として、2018 年度比でトラフィックが 5 倍という大容量化の収容を前提と</p>

し、通信品質 96% (到達目標 95%) の確保、通信継続率 99%の実現を達成した。なお、通信継続率 99%は、本技術における(1)及び(4)で記載している手法によるものであり、ここではそれ以外に関する内容を記載する。

【トラヒック 5 倍の収容が可能な大容量化】

本内容について、無線区間、光伝送区間の両面から取り組んだ。無線区間では、ユーザ間干渉を回避・抑圧する適応的な無線リソース制御で容量 1.7 倍を実現し、周波数帯域幅 3.5 倍 (主要な通信事業者では、4 G : 240MHz 幅から 5 G : 840MHz 幅) と合わせて、トラヒック量 5 倍以上となる 5.2 倍を達成した。また、光伝送区間では、FEC 削減による 14%の効率増と、デジタルコヒーレント伝送技術を用いた無線 IQ 信号と光の直接マッピングで、従来の 10G-PON に対して 5 倍以上となる、80Gbps 伝送を実現した。これは、到達目標である「20Gbps を安定的に超える超高速通信」の収容も十分な可能な伝送を実現したと言える。

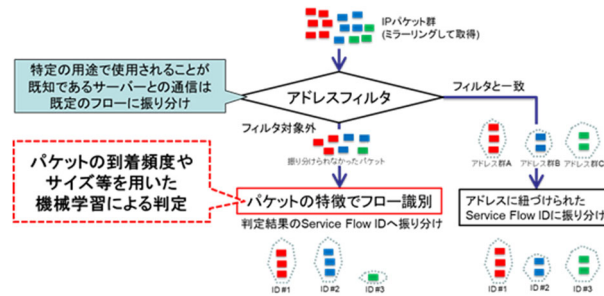


図：無線区間の手法

図：光伝送区間の手法

【通信品質要求達成率 96%の確保】

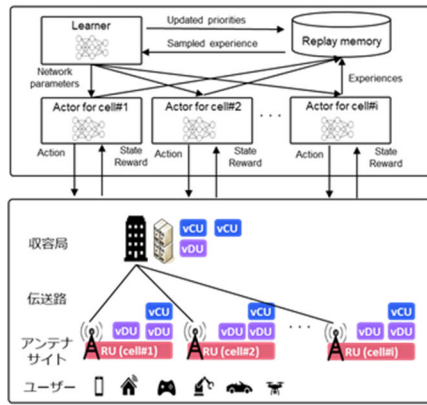
通信品質を制御するためには、最初にどのような通信が存在するかを把握する必要がある。他方、それをユーザから通知するには手間が生じる。そこで、下図のようにパケットデータから通信フローのサービスについて機械学習を用いて識別する手法を確立し、実際のトラヒックデータを用いて、暗号化データを含めて 99.4%の精度での識別を達成した。



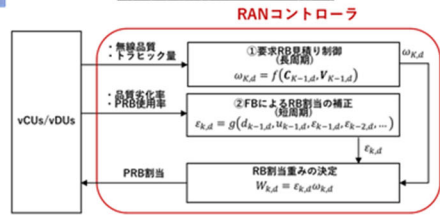
図：通信フローの識別

識別した通信フローに基づき、仮想化 RAN 技術を用いた適応型 RAN の制御を行う手法を確立した。制御は、下図に示す、数分から数時間の長周期となる基地局機能配置と、数 ms から数秒の短周期の無線リソース割当から構成される。基地局機能配置では、通信サービスの発生状況、伝送路の利用状況、無線リソースの利用状況から、パケット処理 (下図の CU) や無線信号処理 (下図の DU) といった基地局機能を、機械学習を用いて動的に配置する。これにより、例えばトラヒックが増大して伝送路が逼迫するような場合に、基地局機能配置を変更することで輻輳を抑制し、通信品質を確保できる。無線リソースの割当は、無線信号処理 (DU) が複数配置されたときに、周波数帯域幅で決まる無線リソースを効率的に割り当てるものであり、下図に示すようなフィードバック型の制御を行っている。これらを複数のトラヒック種別、基地局、端末を配置した計算機シミュレーションで評価した結果、通信品質の要求に対して 97%の品質が確保可能なことを確認した。

通信サービスを適切に收容するための
動的な基地局機能配置

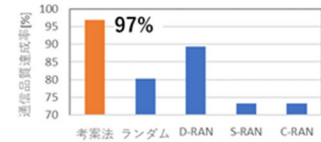


短期間の通信品質変動に対応するための
動的な無線リソース割当



評価結果

トラフィック5倍、
かつ様々な通信
サービスを発生
させて評価



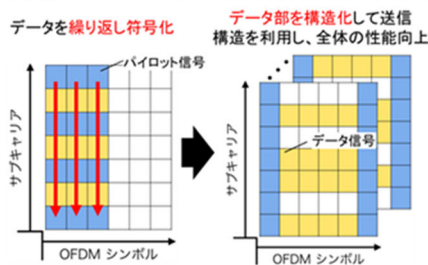
図：適応型 RAN の動的制御

前述した通信フローの識別率 99.4%と、適応型 RAN の制御による通信品質の達成率 97%から、本技術としては 96%の通信品質の達成ができており、高信頼な通信が実現されたと考える。

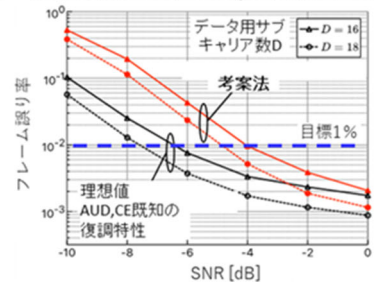
■ (4) 「1 ミリ秒を安定的に満たす超低遅延通信」「1 平方キロメートルあたり 100 万台が安定的に接続する多数接続通信」の実現手法

ミリ波を対象に、超低遅延・多接続を、下図左側に示す、ミリ波で時間と周波数の両方向で送信データを拡散し、伝搬損失等の事前情報なしで復調するグラントフリー無線通信方式を実現した。下図右側は、遅延 1 ミリ秒、端末 500 台時の計算機シミュレーションでの評価結果であり、99%の通信フレームが誤らずに届く（フレーム誤り率 1%）を達成している。また本シミュレーションは、周波数帯域幅 10MHz で実施しており、ミリ波帯の周波数帯域幅 400MHz 幅、ミリ波基地局カバレッジを 0.0025km² (50m×50m) として、1 平方キロメートルあたりの端末数に換算すると、端末 500 台×帯域幅 40 倍×ミリ波基地局 100 台=200 万台であり、100 万台となる。これらにより、到達目標である「1 ミリ秒を安定的に満たす超低遅延通信」「1 平方キロメートルあたり 100 万台が安定的に接続する多数接続通信」が実現されていることを確認した。

端末收容のための時間・周波数方向での拡散



遅延制約1ms/125byte送信時の評価



図：低遅延・多接続サービスを実現するグラントフリー無線通信方式

ミリ波帯における
高エネルギー
効率な無線技術

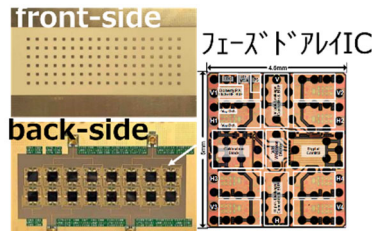
本技術に関連した到達目標（下線）、及びそれを実現する手法の概要を次に示す。

- 高エネルギー効率、及び高い周波数の活用の実現に向けた、39GHz 帯フェーズドアレイ向けのデバイス、60GHz 帯を利用する 5 G ゲートウェイを用いる無線通信システムの実現。加えて、5 G ゲートウェイにおける端末経路予測のための 79GHz 帯ミリ波レーダーの活用。
- 20Gbps を安定的に超える超高速通信の実現に向けた、39GHz 帯フェーズドアレイ向けデバイスの実現

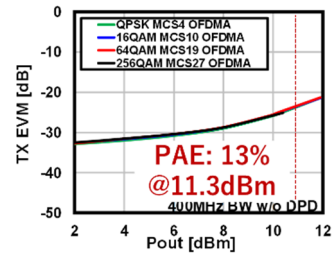
以降において、実現手法である、「39GHz 帯フェーズドアレイ向けのデバイス」、「60GHz 帯を利用する 5 G ゲートウェイを用いる無線通信システム」及び「5 G ゲートウェイにおける端末経路予測のための 79GHz 帯ミリ波レーダーの活用」について詳細を述べる。

【39GHz 帯フェーズドアレイ向けのデバイス】

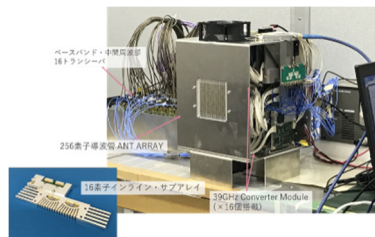
39GHz 帯フェーズドアレイ IC を IC・パッケージ・モジュールの高効率/協調設計手法により試作し、測定により従来比 2.6 倍となる 13%の電力効率を確認し、高エネルギー効率であることを達成した。また、39GHz 帯ハイブリッドビームフォーミング装置を試作して、単一ビームで 5.5Gbps および、世界初の 8 UE 多重を実証した。さらに、実用化に向けて、研究開発した IC を適用する 39GHz 帯ミリ波装置の仕様を策定した。



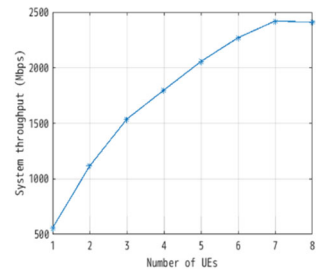
図：試作 64 系統フェーズドアレイ IC



図：試作 IC の出力特性



図：試作ハイブリッドビームフォーミング装置

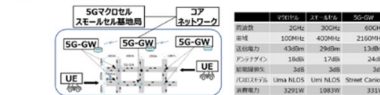


図：UE 数対スループット特性

【60GHz 帯を利用する 5G ゲートウェイを用いる無線通信システム】

60GHz 帯無線 LAN によるネットワークと 5G ネットワークを、5G ゲートウェイによりオーバーレイするネットワークを検討した。5G ゲートウェイを用いない場合と比較して、リアルタイム通信、蓄積型データダウンロード混在時で 3 倍以上の電力効率を実現し、目標を達成した。

ネットワーク構成



ユースケース

- ・遠隔制御用リアルタイム映像情報通信
- ・3D マップ等の蓄積型データダウンロード

$$\text{電力効率比} = \frac{\text{5G-GWを適用するNWの電力効率}}{\text{5Gでの電力効率}}$$

図：ネットワーク構成と電力効率の定義

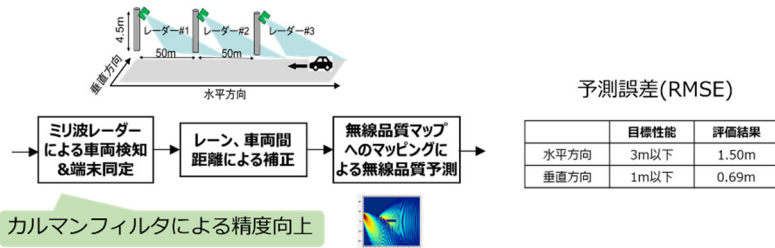
蓄積型データダウンロード混在UE 1台のダウンロード速度 [Gbps]

	リアルタイムアプリ利用UEの台数比率 [%]									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	4.19	3.58	3.92	4.07	4.80	5.24	5.67	6.18	6.85	7.23
2	4.62	3.80	3.83	3.75	4.06	4.16	4.30	4.90	5.33	6.32
3	5.00	4.09	4.02	3.97	4.06	3.88	3.59	4.14	4.53	5.72
4	5.35	4.30	4.14	4.11	4.05	3.72	3.40	3.67	4.08	5.14
5	5.53	4.48	4.38	4.30	4.16	3.64	3.34	3.60	3.93	4.77
6	5.69	4.52	4.46	4.36	4.27	3.70	3.33	3.55	3.84	4.52
7	5.59	4.60	4.48	4.41	4.29	3.70	3.37	3.48	3.76	4.21
8	5.48	4.46	4.43	4.37	4.28	3.67	3.30	3.49	3.78	4.02

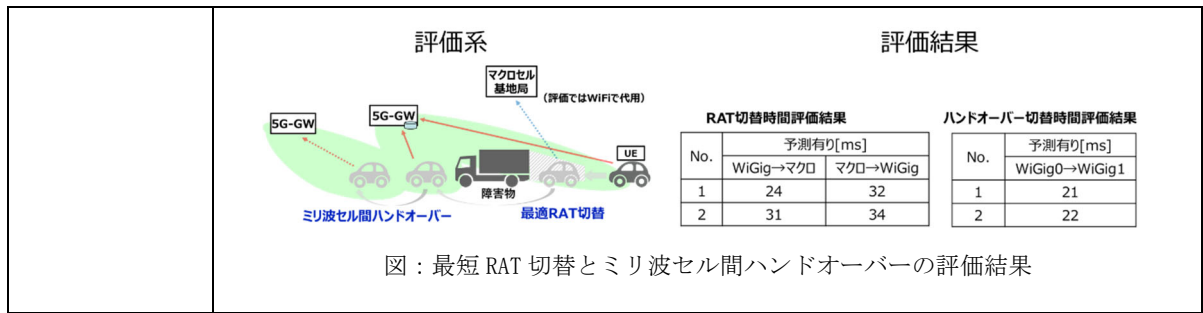
図：電力効率特性

【5G ゲートウェイにおける端末経路予測のための 79GHz 帯ミリ波レーダーの活用】

ネットワークシステムに関連する要素技術として、79GHz レーダーを用いる端末経路予測技術・無線品質予測技術を実現して、十分な予測精度を得られることを実証実験系で検証した。さらに、無線品質予測に応じた最適な無線アクセスの切替技術、ミリ波セル間ハンドオーバー技術を実現し、無瞬断で切替できることを実証実験系で検証した。



図：端末経路予測の予測誤差



高度 5 G システムにおいて、高い周波数の利用を促進しつつ、周波数利用効率の向上を次の技術等を用いて実現した。

- 高い周波数の活用として、高精度な到来方向推定が可能となる 28GHz 帯干渉モニタ技術の実現
- 周波数利用効率の向上に向けた、Full-Duplex セルラーシステム制御技術の実現

以降で、「干渉モニタ技術」及び「Full-Duplex セルラーシステム制御技術」の詳細を述べる。

【干渉モニタ技術】

28GHz 帯と 3.7/4.5GHz 帯に対応した、8ch 受信の干渉モニタ装置を試作し、信号分離後において到来方向推定誤差は±10 度以下、干渉信号抑圧比は 10dB 以下を達成した。また、信号帯域幅 100MHz のテスト信号 (4.65GHz 帯) を用いて、所望波×1・干渉波×3 の構成で 5.4m×5.4m 空間において信号分離性能の評価を実施し、干渉モニタリングに必要な性能 (実測値 vs FSPL 最大±3dB 差、信号分離の有無による差 0.1dB 以下) が達成できることを確認した。

モバイルトラヒックの急増に対応した高効率な周波数利用技術

※FSPL: 自由空間伝搬損

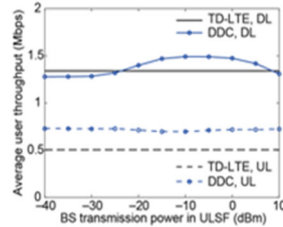
試作装置 伝搬路利得[dB] 実測値とFSPL

図：干渉モニタ試作装置

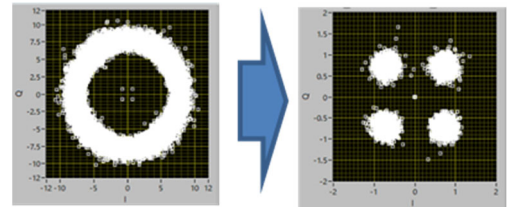
【Full-Duplex セルラーシステム制御技術】

端末からのアップリンク (UL) 通信と別の端末へのダウンリンク (DL) 通信を同時に実施する「Full-Duplex」を TDD ベースのセルラーシステムに段階的に導入するための「Dynamic-Duplex Cellular (DDC) システム」を開発した。全装置を統合して電波暗室内での試験を実施し、各開発装置が実装制御アルゴリズムによって制御されたうえで、瞬時的に最大 2 倍、平均 1.2 倍以上の周波数利用効率向上という目標の達成を確認した。

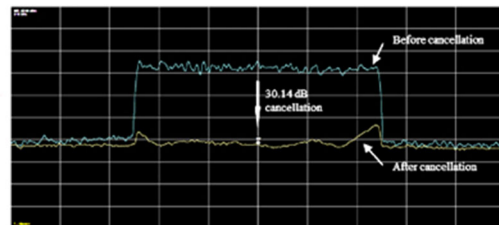
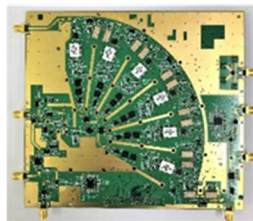
詳細としては、Full-Duplex を用いる DDC システム及び制御アルゴリズムを開発し、UL 及び DL の平均ユーザスループットをそれぞれ 42.4%及び 10.1%改善した (19 セル環境・計算機シミュレーション)。さらに、5G NR 信号に適用可能な、デジタル自己干渉キャンセラを実装して、SI 対所望信号電力比 32dB 以下でブロックエラー率 (BLER) ≤ 0.1 を達成した。アンテナ・アナログ自己干渉キャンセラを実装して、48.6 dB のアイソレーションを実現 (4.7GHz・2つの平面アンテナを平行配置・アンテナ間距離 150 mm) した。3.7/4.7 GHz 帯広帯域 RF フロントエンドを開発し、4.7 GHz 帯において電力ベースで約 30 dB の SI キャンセル性能を実現した。Full-Duplex 実現に必要な干渉モニタ技術、Full-Duplex 制御技術 (端末探索・スケジューリング・電力制御)、基地局技術 (デジタル自己干渉キャンセラ、アナログ自己干渉キャンセラ、アンテナ) を結合試験により実証した。



図：DDC システムの平均ユーザスループット



図：デジタル自己干渉キャンセラの特性



図：アナログ自己干渉キャンセラと特性

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和5年6月22日)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

- 論文や研究発表の実績の観点では、下表のように査読付き誌上発表論文 55 件、査読付き口頭発表 117 件といった多数の発表を行っている。特に口頭発表では、4 年間で 347 件を行い、タイムリーな研究成果アピールに努めていると言える。これらの発表の中では、集積回路技術に関する最も著名な論文誌 (IEEE Journal of Solid-State Circuits: IF=6.126) への掲載 6 件、半導体分野での最も著名な国際学会 (IEEE International Solid-State Circuits Conference, ISSCC) での発表 2 件が含まれている。また、International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) や Microwave Workshop & Exhibition (MWE) などの国際学術会議やワークショップにおける招待講演の依頼を多数受けている。さらに、情報処理学会での特選論文への選出、国際学術会議 WCNC や ICETC での Best Paper Award の受賞、デジタルコヒーレント光伝送技術に関連して石田實記念財団研究奨励賞特別賞や日本

国際賞の受賞をしている。これらの内容は、研究成果のアピールを積極的に行っていると共に、本研究開発の必要性和有効性が外部から認められた証左と考える。

- ・ 特許の観点では、4年間で120件、内数で37件の海外出願を実施済みである。特に、出願された特許には、後述する国際標準化で規格必須特許となったものが含まれている。今後も関連する特許出願が見込まれることもあり、本研究開発の必要性和有用性が認められる。
- ・ 国際標準化の観点では、適応型 RAN の動的制御に関わるユースケース、アーキテクチャ、インタフェースの寄書を 0-RAN Alliance に入力して、国際標準化活動を推進した。寄与文書を 41 件（下表の国際標準提案数の内数）入力すると共に、0-RAN 規格必須特許の候補 21 件（下表の特許出願数の内数）を出願すると共に、候補のうち 2 件を標準規格に反映した。また、高エネルギー効率を実現する通信制御について、ITS 向けネットワーク技術として、APT/AWG-27, 28, 29, 30 に入力し、提案した 5 件（下表の国際標準提案数の内数）が全て承認された。これらの国際標準化で、本研究開発の成果内容を規格化できたことは、必要性和有効性が外部から認められた証左であると考えられる。

主な指標	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件 (1件)	13件 (7件)	15件 (9件)	26件 (15件)	55件 (32件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	11件 (11件)	34件 (33件)	29件 (29件)	43件 (43件)	117件 (116件)
その他の誌上発表数	2件 (0件)	1件 (0件)	4件 (0件)	8件 (1件)	15件 (1件)
口頭発表数	59件 (9件)	80件 (6件)	100件 (8件)	108件 (26件)	347件 (49件)
特許出願数	19件 (0件)	35件 (14件)	43件 (15件)	23件 (8件)	120件 (37件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	4件 (0件)	12件 (4件)	16件 (4件)
国際標準提案数	0件 (0件)	7件 (7件)	37件 (37件)	2件 (2件)	46件 (46件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	2件 (2件)	2件 (2件)	3件 (3件)	7件 (7件)
受賞数	5件 (1件)	10件 (5件)	19件 (4件)	13件 (6件)	47件 (16件)
報道発表数	0件 (0件)	5件 (2件)	3件 (1件)	11件 (5件)	19件 (8件)
報道掲載数	0件 (0件)	5件 (2件)	3件 (1件)	11件 (5件)	19件 (8件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読（peer-review（論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの）のある出版物に掲載された論文等（Nature, Science, IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC, ECOC, OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注5：PCT（特許協力条約）国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。（何カ国への出願でも1件として計上）。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	<p>5Gの普及により、移動通信システムがあらゆる産業や社会生活に深く浸透し、毎年約1.3倍に増加している移動通信トラフィックの加速度的増加が予想されて、社会基盤に期待される高信頼性やエネルギー効率の向上の実現が求められていた。国際的にも、より高い周波数利用の検討が加速していた。その後、国際的にネットワークの仮想化やオープン化の検討が進み、その前提で多様なサービス品質を同時に保証する動的制御が、5Gネットワーク高度化の方向性となった。さらに、エネルギー需給の逼迫と、トラフィック増に起因するネットワーク機器の増加が生じており、エネルギー効率の向上と周波数有効利用の向上は喫緊の課題であった。</p> <p>これらの国際的・社会的な動向に対して、世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成30年6月15日）における「社会基盤としての役割が期待されるBeyond 5G等の次世代ワイヤレスシステムに関し、その実現に向けた技術開発」として、高エネルギー効率、高信頼性、高い周波数の活用、周波数利用効率の向上の観点から先んじて取り組み、トラフィックが増大した状況を想定しつつ、必要な技術を実現した、本研究開発の方向性が正しかったことは明らかである。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発を推進するに当たっては、移動通信技術に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する民間企業、大学、国立研究開発法人のノウハウを積極的に活用しており、効率的に研究開発を進められた。また、実施期間中も受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。</p> <p>予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。</p> <p>研究開発で得られた成果の早期な社会展開を図るため、国際標準化への積極的な取り組みを行った。国際的に注目を浴び、移動体通信に関する主要な企業等が参加している国際標準化団体 0-RAN Alliance に参加して、研究開発を行った適応型 RAN に関する寄書を 41 件入力すると共に、研究開発の成果である特許 2 件の規格必須特許化を実現した。さらに、アジア・太平洋電気通信共同体 無線グループ (APT/AWG) に次世代 ITS に関する提案 5 件の入力を行い、承認が得られた。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発の目標を次のように達成した。</p> <ul style="list-style-type: none"> 高い周波数の活用として、ミリ波の電波の遮蔽の事前予測に基づきロバストなビームフォーミングを行う無線通信方式、その 28GHz 帯における実機での評価により、端末が移動しても高速な通信の 99%の継続を達成した。また、大きな伝搬損失を補うために多数のアンテナ素子を含む複雑なビームフォーミング装置の設計手法により、64 系統のアンテナ素子を備えた 39GHz 帯ハイブリッドビームフォーミング装置向けのデバイスを実現した。加えて、60GHz 帯を利用する 5G ゲートウェイによる無線通信システムを実現した。さらに、周波数利用効率を向上する Full-Duplex に必要な 28GHz 帯で電波の到来方向をモニタする手法について、±10 度以下の高精度化を達成した。これらにより、28GHz 帯、39GHz 帯、60GHz 帯といった高い周波数であるミリ波を活用した通信を実現した。さらに、5G ゲートウェイによる無線通信システムでは、79GHz 帯のレーダーを活用した端末経路予測技術を確立した。 高エネルギー効率は、多数のアンテナを備えた複雑な回路に高効率/協調設計手法を適用した 39GHz 帯フェーズドアレイ向けのデバイスを実現し、2.6 倍の電力効率を確認した。また、60GHz 帯利用する 5G ゲートウェイを用いる無線通信システムにおいて、ミリ波レーダーを利用して予測した端末経路と無線品質により、無線切替制御のオーバーヘッドを減らす通信制御で、3 倍以上の電力効率を実現した。 高信頼性は、仮想化 RAN 技術を用いる適応型 RAN での制御方式やミリ波向けの無線通信方式の確立により、2018 年度比でトラフィックが 5 倍という大容量化しても、通信品質の 96%の確保、通信の継続率を 99%確保可能であることにより実現した。 20Gbps を安定的に超える超高速通信は、考案した 39GHz 帯フェーズドアレイデバイスを用いることで、20Gbps・200m 伝送に必要な輻射電力が確保可能なことを確認した。また、超高速通信を収容するための光コヒーレント伝送の効率化により、80Gbps の伝送が可能であることを確認した。

	<ul style="list-style-type: none"> 1 ミリ秒を安定的に満たす超低遅延通信と、1 平方キロメートルあたり 100 万台が安定的に接続する多数接続通信は、ミリ波向けの基地局からの割当指示が不要なグラントフリーによる無線通信方式により達成し、その実証を行うことで実現性を確認した。 <p>本研究開発は、高信頼、高エネルギー効率、周波数利用効率の向上といった異なる分野の技術に取り組んでいる。ただ、実用化においては、高度 5 G システムとして一体として実現する必要がある。当初から一体として実現することを意識して研究開発を進めているが、さらに確実にするために、通信事業者、通信機器ベンダー、学术界当からの外部有識者や専門家を含む、課題別の研究開発運営委員会において、学术界の有識者 1 名がすべての課題の運営委員となり、横串を挿す形での連携を図った。これにより、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。</p> <p>適応型 RAN においては仮想化 RAN 技術に基づき構築した移動体ネットワークに対して動的に制御を行うことで多様なサービスが混在しても複数軸の品質を同時に担保する高信頼化を実現している。これは、国際的な仮想化とオープン化の流れに沿っており、国際標準化団体 0-RAN において、本研究開発成果の特許 2 件を含む形で、標準規格化を実現した。また、高い電力効率でのミリ波フェーズドアレイ技術は、無線アクセス、フロントホールやバックホール装置に幅広く適用可能である。5 G ゲートウェイについては、国際標準化である APT/AWG での次世代 ITS への提案が承認されており、次世代 ITS やローカル 5 G などへの利用が見込まれる。これらの電力効率の高い機器やシステムを活用することで、電力節約分を高速大容量な ICT 環境の構築に振り向けることも可能となる。加えて、Full-Duplex 実現のための干渉モニタは、電波干渉状況を把握し、基地局や端末を適切に制御するシステム技術の確立を目指している。これにより、多くの研究者によって検討されてきた MIMO 等の空間多重技術や、NOMA 等の複数端末同時収容技術とは異なる、全く新しい周波数利用効率向上技術の選択肢を利用者に与えることになる。さらに、査読付き誌上発表論文 55 件、査読付き口頭発表 117 件といった、専門家が査読を行いその内容を認めた発表を行っているとともに、著名な国際学術会議 PIMRC2022 で Special Session 「Enable Technologies for 5G Advanced System」において本研究開発の成果が多数発表されたことは、外部の専門家から本研究開発内容の有効性が認められたものと考えられる。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発は、移動体通信システム等に利用されている周波数帯域の逼迫状況を緩和し、高い周波数の活用及び周波数の有効利用を促進する技術の研究開発であるため、広く無線通信の利用者の受益となる。</p> <p>本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>通信トラヒックの加速度的増加に対応するための高い周波数の活用と、通信機器・システム増に対応するための高エネルギー効率化、移動体通信がインフラとして社会に深く浸透することに起因する高信頼化は喫緊の課題であり、早急に対応する必要があった。</p> <p>世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成 30 年 6 月 15 日閣議決定）においても、「社会基盤としての役割が期待される Beyond 5G 等の次世代ワイヤレスシステムに関し、その実現に向けた技術開発を行う」こととされている。また、諸外国においても、2019 年からの 5 G 商用化に引き続き、2025 年頃の 5 G の高度化に向けた検討開始の機運が高まりつつあり、早期に実施する必要があった。本研究開発の成果は、査読付き誌上発表論文 55 件、査読付き口頭発表 117 件といった、専門家が査読を行いその内容を認めた発表をタイムリーに行っている。加えて、外国出願 37 件を含む特許出願 120 件を達成しており、必要とされる技術のタイムリーな知財化により、国際競争力の確保に早くから貢献できている。さらに、無線アクセス網の構築に関する国際標準化を行う 0-RAN での本研究開発成果の特許 2 件を規格必須特許として含む形での規格化、次世代 ITS に関わる APT/AWG の国際標準化での提案 5 件の承認といった、タイムリーな国際標準化への入力ができている。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

5 G の普及により、移動通信システムがあらゆる産業や社会生活に深く浸透し、毎年約 1.3 倍に増加している移動通信トラヒックの加速度的増加が予想されて、エネルギー効率の向上や、社会イ

ンフラに期待される高信頼性の実現が求められていた。ネットワークの仮想化とオープン化の流れとネットワークの動的制御、エネルギー需給の逼迫とネットワーク機器数の増大に対処するための高エネルギー効率、高い周波数の活用、周波数利用効率の向上の必要性は、国際的、社会的な情勢から明らかであり、必要な研究開発に先んじて取り組みを行った。

本研究開発においては、高い周波数の活用として、28GHz 帯における電波の遮蔽の事前予測に基づきロバストなビームフォーミングを行う無線通信方式、39GHz 帯におけるビームフォーミング装置向けのデバイス、60GHz 帯を無線通信で活用可能で 79GHz 帯のレーダーを端末の移動予測に用いる 5 G ゲートウェイ、周波数利用効率を向上させる Full-Duplex 用の 28GHz 帯干渉モニタを実現した。これらにより、高い周波数帯を高度 5 G ネットワークに活用可能な技術を確立したと言える。高エネルギー効率については、前述した 39GHz 帯のデバイス、5 G ゲートウェイによる無線切替制御のオーバーヘッド削減により、技術的な目標の 2 倍を上回る 3 倍の電力効率を実現した。高信頼性は、仮想化 RAN 技術を用いる適応型 RAN での制御方式やミリ波向けの無線通信方式の確立により、2018 年度比でトラフィックが 5 倍という大容量の収容があっても、通信品質の 96%の確保(技術的な目標 95%)、通信の継続率を 99%確保可能であることにより実現した。20Gbps を安定的に超える超高速通信は、考案した 39GHz 帯フェーズドアレイデバイスを用いることで、20Gbps・200m 伝送に必要な輻射電力が確保可能なことを確認した。また、超高速通信を収容するための光コヒーレント伝送の効率化により、80Gbps の伝送が可能であることを確認した。1 ミリ秒を安定的に満たす超低遅延通信と、1 平方キロメートルあたり 100 万台が安定的に接続する多数接続通信は、ミリ波向けの基地局からの割当指示が不要なグラントフリーによる無線通信方式より達成し、その実証を行うことで実現性を確認した。これらにより、アウトプット目標、アウトカム目標について、一部は上回る形で達成できたことを確認した。

本研究開発の成果は、査読付き誌上発表論文 55 件、査読付き口頭発表 117 件といった、専門家が査読を行い、その内容を認めた発表をタイムリーに行っている。加えて、外国出願 37 件を含む特許出願 120 件を達成しており、必要とされる技術の知財化により、国際競争力の確保に早くから貢献できている。さらに、無線アクセス網の構築に関する国際標準化を行う 0-RAN Alliance での本研究開発成果の特許 2 件を規格必須特許として含む形での規格化、次世代 ITS に関わる APT/AWG の国際標準化での提案 5 件の承認といった、国際標準化への入力を早期から行った。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

前述したように、本研究開発で予定された要素技術が得られ、一部については国際標準化が進んでいる。研究開発成果が、高度 5 G ネットワークのみならず、Beyond 5G/6G に向けて、広く社会的に利用され、着実に実用化に向けて取り組む必要がある。個々の要素技術について、高信頼、高エネルギー効率、周波数利用効率の向上の観点で、技術の特徴を生かして、社会で活用されていくよう取り組みを進めていく。加えて、発展させた内容の特許出願、論文等による情報発信、0-RAN や APT/AWG 等の国際標準化活動を継続していく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和 5 年 6 月 22 日)において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ユーザ間干渉を回避・抑圧する適応的な無線リソース制御、デジタルコヒーレント伝送技術を用いた無線 IQ 信号と光の直接マッピング、FEC 削減等により、ピーク時 10. 25Gbps/km² を達成し、個別の通信フローのサービス種別を 99. 4%の精度で識別、識別した通信フローの適応型 RAN の動的制御による 97%の品質確保を達成している。また、39GHz 帯フェーズドアレイ IC を試作し、従来比 2. 6 倍となる 13%の電力効率と、200m 伝送相当の輻射電力を達成し、システムシミュレーションにて電力効率 3 倍以上を確認している。さらに、「Full-Duplex (全二重通信)」の高度化およびそのセルラーシステム上での実用化を実現し、瞬時的に現状の最大 2 倍、平均 1. 2 倍以上の周波数利用効率を実現している。以上より、到達目標は達成されている。精力的に研究開発が

なされており、予算は効率的に使用されたと思われる。0-RAN Alliance で標準化活動を推進し、41 件の標準化寄書を提出し、査読付きの論文 55 件、口頭発表 117 件、特許申請 120 件（登録 16 件）、受賞 47 件等、優れた成果をあげている。ローカル 5G 事業検討企業との共同電波伝搬・伝送特性実験を実施するとともに、実用化を見据えた 5G NR 信号をベースにしたソフトウェア無線機による物理層実機実証試験を実施している。以上、総合的に見て有益であったと思われる。

- 第 5 世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発であり、各課題の目標、課題ア：携帯電話のトラフィック量が現在の 5 倍となった環境下でも、通信への品質要求を 95%以上満たし、かつサービスの継続性を 99%以上、課題イ：従来手法と比較して 2 倍以上の電力効率となる、ミリ波帯における高エネルギー効率の実現、課題ウ：全二重通信（Full-Duplex）セルラーシステム時に瞬時的に現状の最大 2 倍、平均 1.2 倍以上の高い周波数利用効率の実現をそれぞれ達成している。また現状の 5G システム、もしくはその延長線上にある技術を元に研究開発をしており、本研究開発の成果は高度 5G ネットワークとして統合可能なものである。これらのことから、本研究開発は有益であったと判断する。

7 評価に使用した資料等

- 未来投資戦略 2018（平成 30 年 6 月 15 日閣議決定）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_zentai.pdf
- 世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成 30 年 6 月 15 日閣議決定）
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180615/siryoul.pdf>
- 経済財政運営と改革の基本方針 2018（平成 30 年 6 月 15 日閣議決定）
http://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2018/2018_basicpolicies_ja.pdf
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>
- 基本計画書 第 5 世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発
https://www.soumu.go.jp/main_content/000606918.pdf

令和5年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局電波部電波環境課

評価年月：令和5年8月

1 政策（研究開発名称）

不要電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

- ・実施期間
令和元年度～令和4年度（4か年）
- ・実施主体
大学、民間企業
- ・総事業費
1,278百万円

令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	総額
326百万円	339百万円	317百万円	297百万円	1,279百万円

予算要求段階では総額10億円超となるか未定だったため、事前事業評価は未実施。

・概要

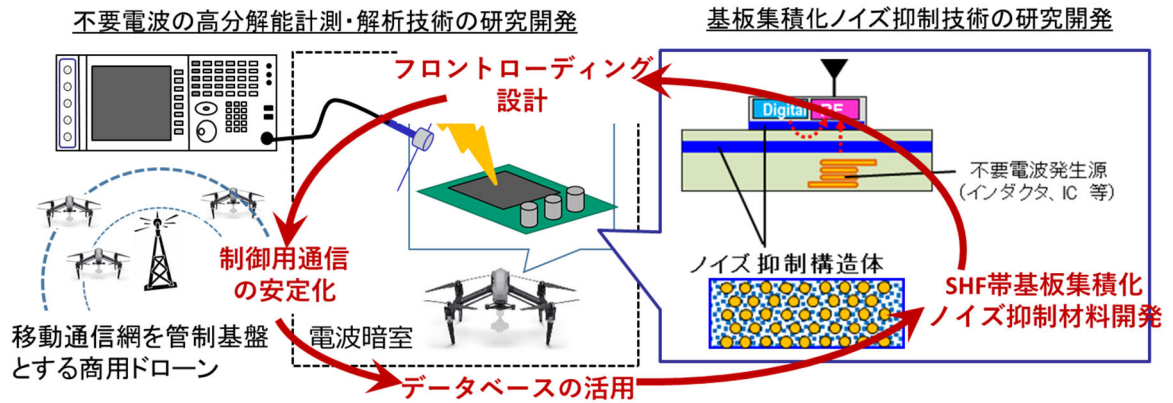
実装が高密度化した無線設備等においても従来と同等の受信感度を確保するため、不要電波の発生を予防する基板集積化ノイズ抑制技術、及び無線設備等における不要電波の高分解能計測・解析技術を確立した。

1. 不要電波の高分解能計測・解析技術の研究開発

無線設備等における不要電波の発生と内部干渉を計測するためのプローブ技術を開発した。また、不要電波のプローブ技術と機能連携した、不要電波の高分解能（量子化・デジタル化した際の観測信号の分解能）計測による広帯域データをリアルタイム解析する手法、及び着目する無線通信に干渉する帯域の不要電波を検知して高分解能データを収集する手法を開発した。さらに、高分解能データと通信シミュレーションを統合し、着目する無線通信への干渉及び通信性能への影響を評価する技術を開発した。

2. 基板集積化ノイズ抑制技術の研究開発

高い透磁率を有し、基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な薄い磁性体を開発し、基板内のノイズ発生源近傍に集積化させることで不要電波の発生を予防する技術を開発した。



技術の種類	技術の概要
不要電波の高分解能計測・解析技術	<p>(a) 不要電波のプロープ技術の研究開発 ドローン等の動作状態における不要電波の発生を広い周波数範囲で計測し、低ノイズフロアで評価するためのプロープ技術及び記録技術を開発した。さらに、不要電波の記録データを用いた無線設備等の内部干渉と対策効果について試験環境及び実験評価手法を開発した。</p> <p>(b) 不要電波の高度解析技術の研究開発 ドローン等の動作状態の変化に対応した不要電波の追従性や、着目する無線通信に干渉する不要電波を抽出し、不要電波の発生と内部干渉を解析した。不要電波の記録データを解析する手法及び不要電波の記録データと通信シミュレーションの統合により着目する無線通信への干渉及び通信性能への影響を評価する技術を開発した。</p>
基板集積化ノイズ抑制技術	<p>高い透磁率を有し、かつ基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な薄い磁性体を基板内のノイズの発生源近傍に集積させ、不要電波を低減する技術を確立した。アとの連携により、高分解能測定の結果をノイズ抑制設計へフィードバックし高性能化を図った。</p>

・スケジュール

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
不要電波の高分解能計測・解析技術	不要電波の高分解能計測技術の基本検討及び設計	不要電波の高分解能計測技術のプロープ技術開発（静止状態）	不要電波の高分解能計測技術のプロープ技術開発（動作状態）	
	不要電波の高度解析技術の基本検討及び設計	解析試験環境構築	干渉解析	統合試験
基板集積化ノイズ抑制技術	広帯域ノイズ抑制材料一次試作と課題抽出	広帯域ノイズ抑制材料二次試作と材料系統込み	構造設計	
	評価系基礎検討	評価系一次試作	評価系二次試作	統合試験

(2) 達成目標

1. 不要電波の高分解能計測・解析技術の研究開発

(a) 不要電波のプロープ技術

- 不要電波を 700 MHz～30GHz の帯域内において 6 GHz 以上の広い周波数範囲で不要電波を記録する広帯域計測技術
- 無線設備等が干渉しやすい周波数帯域における特徴的な不要電波を低ノイズフロア（-170dBm/Hz 以下）で記録する高分解能計測技術

- ・ドローン等の機器における不要電波の対策効果を評価する試験環境

(b) 不要電波の高度解析技術の研究開発

- ・(a)と連携して、ドローン等の機器の動作状態における機器内部・機器外部の不要電波を計測し、10 秒以上の連続した動作状態の変化に対応した不要電波の追従性を解析する技術
- ・(a)と連携して、広帯域計測データ及び高分解能計測データから、着目する無線通信に干渉する不要電波を抽出し、700 MHz～30 GHz の帯域内における複数の無線通信（無線方式と無線帯域の組み合わせ）について通信シミュレーションと統合して無線通信性能指標への影響を解析する技術
- ・2 と連携して、ノイズ抑制技術により不要電波を対策する設計環境の構築技術

上記の技術を確立し、小型化・高周波駆動化・高密度実装化の進む無線設備等における不要電波の高度解析技術を実現する。また、例えば、(a) と (b) を連携して得られた不要電波の計測データ等の研究成果を公開するなど、広く成果展開することを目指す。

2. 基板集積化ノイズ抑制技術の研究開発

- (a) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料の開発技術
- (b) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体の設計技術
- (c) 伝送線路とノイズ抑制体を一体化した試料の実装評価のためのノイズ抑制構造体評価技術

上記の技術の確立や 1 との連携を通じて、基板内のノイズ発生源近傍に集積化可能な磁性体とその設計技術および評価技術を開発し、既存のノイズ抑制シートと比べて不要電波の抑制効果を 10 dB 以上改善する。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT 政策） 政策 13 「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
電波政策 2020 懇談会報告書（平成 28 年 7 月）	<p>第 3 章 制度見直しの方向性</p> <p>（2）電波利用共益事務の在り方</p> <p>②次期における電波利用料の使途</p> <p>（オ）電波資源拡大のための研究開発、周波数ひっ迫対策のための技術試験事務</p> <p>（中略）</p> <p>e) 電磁環境・測定分野：</p> <p>安心・安全な電磁環境の維持に向けたワイヤレス電力伝送（WPT）システム等の機器から発せられる漏えい電波の解析・低減技術、近年の測定器や無線設備の多様化に対応し様々な機器から発射される電波が技術基準に適合していることを確認するために必要な測定技術の開発及び試験を実施する。</p>

(3) 目標の達成状況

本研究開発では周波数範囲 700MHz～30GHz を対象として、ノイズ抑制体の材料物性からドローンの機体要件に至る広範なテーマの技術開発を実施機関の密接な連携により推進し、目標どおり達成することができた。

1. 不要電波の高分解能計測・解析技術の研究開発

(a) 不要電波のプロープ技術

不要電波を 700 MHz～30GHz の周波数範囲において 6 GHz 以上の周波数帯域で記録する広帯域計測技術及び無線設備等が干渉しやすい周波数帯域における特徴的な不要電波を低ノイズフロア（-170dBm/Hz 以下）で記録する高分解能計測技術を構築・実証した。

(b) 不要電波の高度解析技術

産業用ドローン等の機器の動作状態（10 秒以上）における機器内部・機器外部の不要電波計測データを収集することにより、産業用ドローン等に搭載する電子モジュールの動作と放射電磁ノイズの関連付け、あるいは放射電磁ノイズの記録データと無線通信システムへの干渉解析データの関連付け等の不要電波解析法を構築・実証した。また、ドローンにおける不要電波対策の技術要件をまとめ、ドローン産業界に提示した。また、ノイズ抑制技術をドローン機体に応用する不要電波対策の設計法及び試験方法を構築した。

2. 基板集積化ノイズ抑制技術

(a) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料の開発技術

700 MHz～30 GHz 帯における不要電波の抑制効果を改善するため、広帯域で高い透磁率を有し、かつ基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な磁性体を開発し、既存材料より優れた伝送減衰率を有することを実証した。

(b) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体の設計技術

基板内蔵プロセスに適合するようなプロセスの最適化により、熱プレスプロセスに対応可能で簡便に実装できる設計技術として、仮形成した薄いシートを積層樹脂基板製造プロセスに導入する技術を構築し、ノイズ抑制構造体（低ノイズ基板）を開発した。2(a)による材料を用いたノイズ抑制構造体を、既存のノイズ抑制シートと比較し、不要電波のチャンネルパワーを 10dB 以上低減する効果を実証した。

(c) ノイズ抑制構造体の評価技術

磁性体および誘電体の複素比透磁率と複素比誘電率を 700 MHz～30 GHz の周波数範囲で計測可能な評価技術を開発し、実証した。また、プリント基板に実装されたノイズ抑制構造体の基礎評価技術として、伝送線路とノイズ抑制体を一体化した実装基礎評価技術を開発し、検証した。

総合試験として、基板集積化ノイズ抑制技術の研究により開発した材料を、基板に実装して IC チップに組み込み、1 で開発したプロープ技術により材料による不要電波の相違を 30GHz までデータベースに組込めることを実証し、高度な設計技術の基盤データとして活用できることを実証した。

技術の種類	目標の達成状況
<p>1. 不要電波の高分解能計測・解析技術</p>	<p>(a) 不要電波のプロープ技術</p> <p>700 MHz～30GHz の帯域内において 6 GHz 以上の広い周波数範囲で不要電波を記録する広帯域計測技術を開発するため、広帯域計測技術((a)-1)及び無線設備等が干渉しやすい周波数帯域における特徴的な不要電波を記録する高分解能計測技術((a)-2)を開発し、本項目の目標を達成した。</p> <p>(a)-1 広帯域計測技術（アンテナの開発）</p> <p>1950 年代に電気通信大学の岡村らによって発表された菱形折返しアンテナの原型（260 MHz から 700 MHz まで対応可能）を参考に、マイクロ波まで拡張するため、主要部の寸法を 2 分の 1 に小型化、アンテナエレメントの形状を修正するとともに、給電点の構造を改良しバランを不要とした（図 1）。なお、本アンテナは製品化された。</p> <div data-bbox="762 719 991 965" data-label="Image"> </div> <p>図 1 長六角形折返しアンテナ（FLHA）</p> <p>(a)-2 不要電波の高分解能計測技術</p> <p>産業用ドローンの放射電磁ノイズに対応するため、移動通信システムにおいて利用される 700MHz から 6 GHz までの周波数帯域における放射電磁ノイズを高分解能に測定可能な測定系(図 2)を構築した。周囲の無線通信や測定器が発生するノイズの影響を抑制するため、被評価ドローンとアンテナ、帯域除去フィルタ、低雑音増幅器などの高周波測定機器を電波暗室内に配置した。本測定系に対する入力電力応答評価実験により、測定下限値が-170dBm/Hz 以下であることを確認した。</p> <div data-bbox="667 1413 1123 1675" data-label="Diagram"> </div> <p>図 2 放射電磁ノイズ測定系</p> <p>(b) 不要電波の高度解析技術</p> <p>(a)と連携し、産業用ドローン等の機器の動作状態（10 秒以上）における機器内部・機器外部の不要電波を計測・収集することにより、産業用ドローン等に搭載する電子モジュールの動作と放射電磁ノイズの変化に対応した不要電波の追従性を解析する技術、及び広帯域計測データ・高分解能計測データから、着目する無線通信に干渉す</p>

る不要電波を抽出し、700MHz～30GHz の帯域内における複数の無線通信（無線方式と無線帯域の組み合わせ）について通信シミュレーションと統合して無線通信性能指標への影響を解析する技術を開発した（(b)-1）。また、ドローン機体への不要電波対策の設計法及び試験方法（(b)-2）を構築した。これをもとに、ドローンにおける特徴的な不要電波データや、不要電波対策の技術要件をまとめるとともに、更にこれらをドローン産業界に提示するなど社会実装に向けた取組み（(b)-3）を行った。これらにより目標をより高度に達成した。

(b)-1 不要電波の高度解析技術

無線通信システムシミュレーションを用いた無線通信品質の解析環境を図3に示す。放射電磁ノイズの実測記録データに基づき LTE 通信品質を解析することで、電波暗室等の試験施設は不要となるほか、シミュレーションでは周波数や変調方式等を任意に設定可能して、放射電磁ノイズ及び無線通信干渉について効率的に解析可能となった。

具体的には、シミュレーションにより生成した LTE 通信の信号を、ドローン機体の近傍で実測記録した2秒間（最大10秒間）の放射電磁ノイズデータと重畳し、高周波フロントエンドの動作モデルに入力することで、受信機におけるデータスループットを解析した。このRFフロントエンドのモデルパラメータは実機に基づいており、実機と同等の性能評価が可能である。

また、放射電磁ノイズの広帯域及び高分解能な計測データを収集するとともに、独立成分分析を実装することにより、着目する無線通信に干渉する不要電波を抽出し、700MHz～30GHz の帯域内における複数の無線通信（無線方式と無線帯域の組み合わせ）について通信シミュレーションと統合して無線通信性能指標への影響を解析する技術を構築・実証した。これにより本項目の目標を達成した。

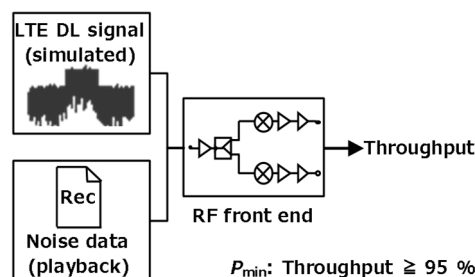


図3 不要電波を解析するシミュレーション環境

(b)-2 ドローン本体及び無線端末に応用する不要電波対策の設計法及び試験方法

ドローンなどの機器の無線通信性能確保のため、ドローンの本体と無線モジュールの不要電波抑制（低ノイズ化）設計を行い、評価を行った。ドローンは電源、モータなどの制御回路、カメラからの映像伝送回路、無線通信回路、そしてこれを統合制御するマイコン回路などからなる。ドローンの不要輻射と近傍電磁界を評価し、またドローン電装品の回路モジュール間の伝搬ノイズを計測したところ、ノイズが通信

へ影響するのは不要輻射が(a)アンテナに直接飛び込む経路、(b)無線モジュールに伝導する経路、(c)無線端末内の自家中毒の3つがあることが分かった(表1)。そこで(a)と(b)の低減を目的とし、ドローン本体の低ノイズ化及び(c)の無線端末のノイズの低減を図った。なお、無線通信の不要輻射の影響する指標については、通信帯域でのノイズの積分値に相当する通信帯域でのノイズのチャンネルパワーを評価指標とした。

(b)-2-1 ドローン本体の低ノイズ化

ドローン本体のノイズ低減のため、ドローンを構成する部位ごとの低ノイズ化を目指し、2種類の対策を設計し(表1)、検証した。結果は6つの無線バンド(Band1, Band3, Band8, Band18, L1, L2)全てでノイズ低減の効果があつた(図4)。また、角度平均値を全バンドで比較した結果、低ノイズ化対策を行った機体(表1の対策②)は対策前のリファレンス機体に対して垂直偏波で9.9dB、水平偏波では8.9dBの低減効果があつた。

表1 要素毎の
主要な不要電波抑制設計

部位	対策前	対策①	対策②
回路	水晶発振器	水晶発振器、CMF追加、バスコン等	+映像リドライバ削除
基板	2~4層	多層化(GND強化)、シールドキャップ等	←
ケーブル	束線+ノイズフィルム	シールド線	+基板間GND接続
筐体	メッキなし	←	メッキあり
設計例			

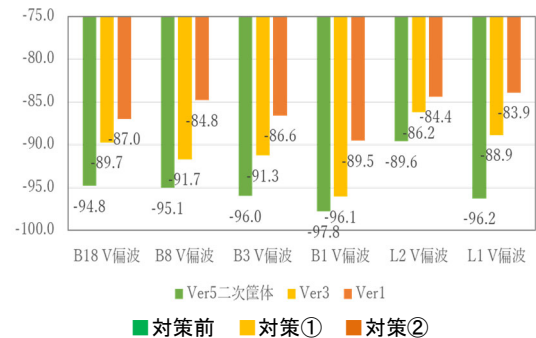


図4 通信バンド毎のドローンの低ノイズ化

(b)-2-2 無線端末の低ノイズ化

リファレンス機の無線端末では通信帯域に高調波ノイズを発生していたことから、これらを抑制するためFPGA、DDRをプレートや、ガスケット、基板により電磁的影響を遮蔽したほか、DCDCコンバータを金属により遮断し、評価した。結果、アンテナ端でのノイズは7dB以上低減した。更に無線端末に内蔵しているLTEモジュールの接地構造を片辺接地から両辺接地に変更し、通信性能を評価した(図5)。これにより、無線端末の感度について、端末がアンテナの15cm横にある場合も-100dBm/10MHz以下となった。これはアンテナが無い場合と同程度であり、ノイズの低減効果があつた。

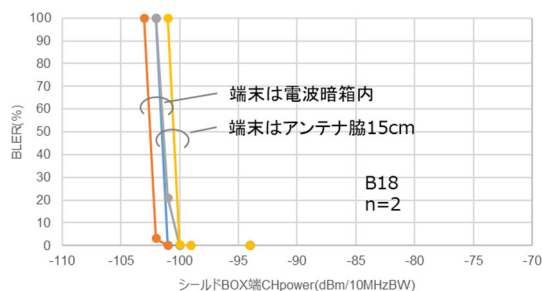


図5 無線端末の通信性能評価

(b)-3 ドローンの社会実装に向けた取組

ドローン機体に搭載された LTE 通信の無線性能評価、及び品質改善によるフィールドでの効果検証を実施するとともに、品質改善のアプローチをまとめた映像及び文書を作成し、当該取組を通じて再認識したモバイル通信の無線性能の品質確保の重要性を広く認知させた。

(b)-3-1 ドローン機体の LTE 通信の無線性能評価

国内外の市販機体、開発機体を含めた複数の LTE 通信機能を搭載したドローンを対象に、電波法で上空利用が認められた LTE の 3 周波数帯における総合放射電力 (TRP : Total Radiated Power)、全方向感度 (TIS : Total Isotropic Sensitivity) の測定を行い、LTE 通信エリア設計に基づく携帯電話の無線性能の受入基準への適合性を評価した。

図 6 の受入基準に対する機体の TRP/TIS の測定結果が示す通り、1.7GHz 帯 (Band3)、2GHz 帯 (LTE Band1) では多くの機体が基準を満足したが、800MHz 帯 (Band18) では、ほぼ全ての機体が基準未達の結果となった。これは、カメラや DCDC コンバータといったドローン搭載機器の不要電波ノイズ特性が低周波数帯で顕著である点とも符合し、不要電波対策が十分施されていないドローン機体における無線性能の品質確保の必要性が浮き彫りとなったと言える。

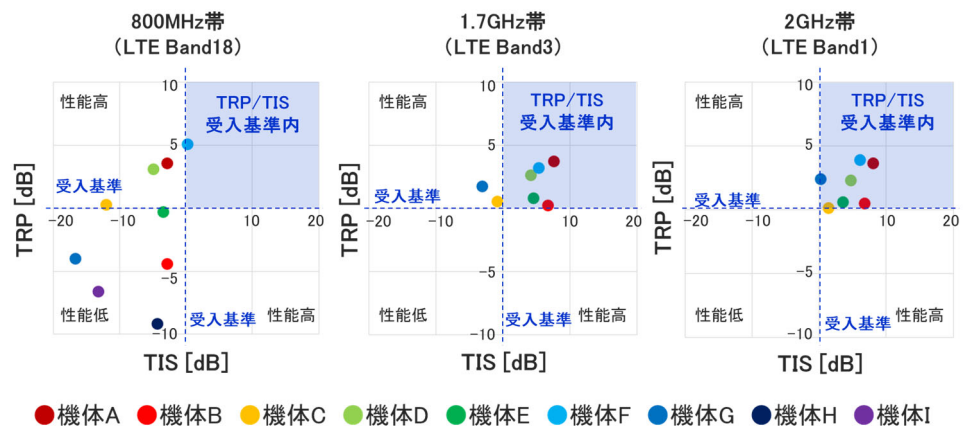


図 6 機体ごとの TRP/TIS 測定結果プロット

(b)-3-2 LTE 通信の無線性能の品質改善と効果検証

(b)-3-1 を踏まえ、ドローン機体に対する LTE 通信の無線性能改善に向けた対策を行い、対策前後の機体を用いて、ドローンの実利用シーンにおける LTE 通信品質への効果検証を実施した。

LTE 通信の無線性能改善のため、本研究の他機関と共に策定した無線性能改善プロセス (図 7) を適用すると共に、不要電波ノイズ対策等含めドローン用に設計開発した LTE 通信モジュール Corewing01 (図 8) を搭載することで対策を行った。本対策によりドローン機体の無線性能は、800MHz 帯 (Band18) の TRP において対策前後で 10dB の改善が確認できた (図 9)。

本対策による無線性能の効果検証として、LTE の 800 MHz 帯の電波環境が異なるエ

リアにおいて、対策前後のドローンを飛行させ、LTE 通信を介した飛行中のカメラ映像伝送品質を比較評価した（「電波資源拡大のための研究開発」第16回成果発表会、およびMWE2022で動画を紹介）。

電波環境が良いエリア A では機体による映像品質に大きな差異はなかったが、電波環境が比較的悪いエリア B では、対策前の機体において映像途切れが確認されたのに対し、対策後の機体では安定して飛行映像が確認できた（図10）。本結果は、無線性能の改善効果を示すと同時に、ドローンの安心安全な遠隔運航の実現における無線性能の重要性を再認識させるものとなった。

本研究成果を纏めた映像や文書を広く公開し、ドローン業界全体の無線性能の品質課題と対策の重要性の認知を高めた。これにより、機体品質の向上につながり、上空での無線品質の確保が可能となることから、無人飛行機等の安全な運行に寄与するとともに、周波数の有効利用の一層の向上に寄与するものとなった、

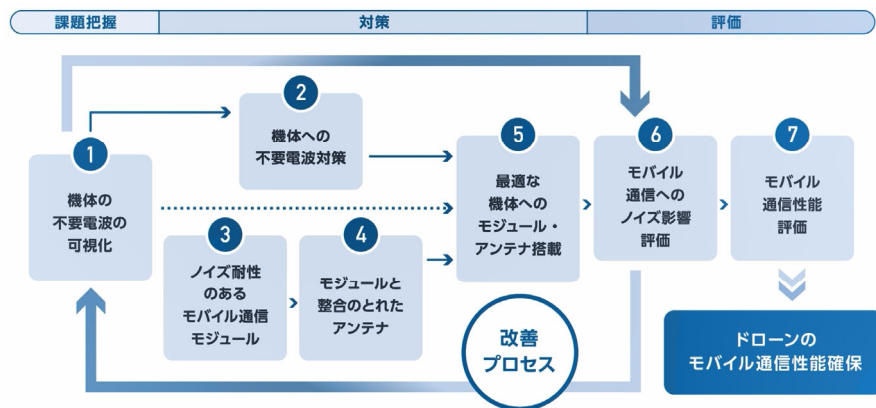


図7 無線性能改善プロセス



図8 Corewing01



図9 ドローン機体の無線性能

機体	エリアA (RSRP: -75~-85dBm)	エリアB (RSRP: -95~-105dBm)
対策前	映像品質良	映像断発生
対策後	映像品質良	映像品質良

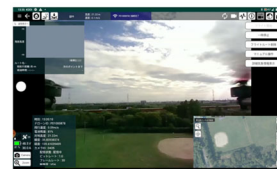


図10 ドローン飛行時のLTE映像伝送品質の効果検証

(a) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料の開発

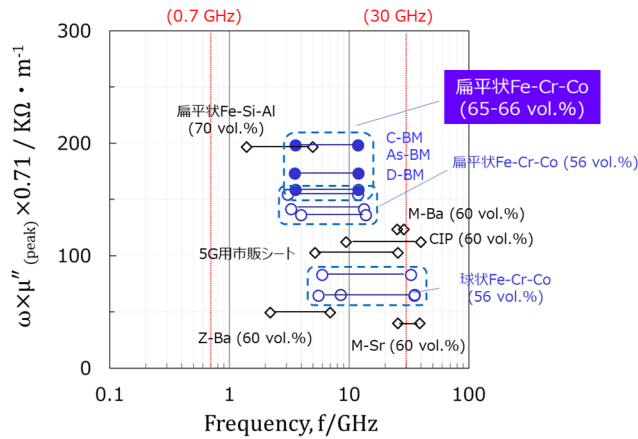
700 MHz～30GHz 帯において不要電波の抑制効果が改善されるよう、広帯域で高い透磁率を有し、かつ基板内蔵化のための熱プレスプロセスに対応可能な磁性体を開発するため、Fe-Cr-Co 系合金による樹脂複合体 ((a)-1) に着目し、電子回路基板における電磁ノイズ抑制効果 ((a)-2) を検証した結果、既存材料より優れた伝送減衰率を確認でき、目標を達成した。

(a)-1 Fe-Cr-Co 系合金による樹脂複合体の開発

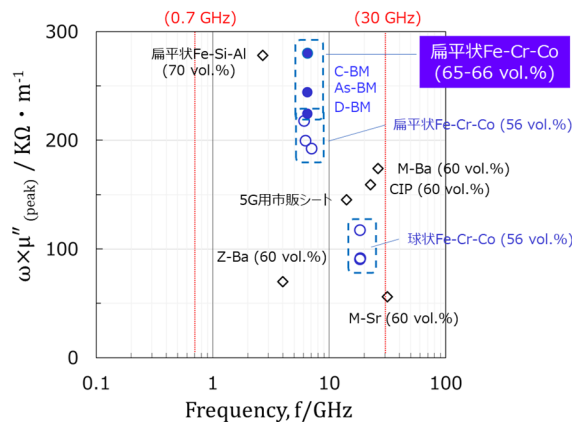
実施主体は、1990 年代後半から永久磁石を用いた電磁波吸収材料に関する研究開発の実績を有し、この知見を踏まえ、広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体用材料を鉄-クロム-コバルト (Fe-Cr-Co) 系合金を用いて実現した。

市販の平均粒径 $20\mu\text{m}$ 程度の Fe-Cr-Co 系ガスアトマイズ粉末を用い (試料 As)、この粉末に対して多段階時効処理 (試料 C)、続けて連続冷却処理 (試料 D) を行った。これらの試料に対してボールミル加工を行って扁平状粉末を作製した (以下、試料名に「BM」を追記し、As-BM、C-BM、D-BM と表記)。得られた粉末をエポキシ樹脂に高充填化した樹脂複合体を作製し、特性を測定した。

図 11 に示すように、Fe-Cr-Co 系合金材料は高い電磁波吸収効果を SHF 帯 (3GHz～30GHz) で示し、6 GHz 付近で最も大きくなることが確認された。



(a) $\omega \times \mu''$ の帯域幅



(b) $\omega \times \mu''$ の極大値

図 11 開発した Fe-Cr-Co 系合金粉末を用いた樹脂複合体及び各種市販材料の電磁波吸収効果 $\omega \times \mu_r''$ の比較

(a)-2 電磁ノイズ抑制効果

図12に開発合金のボールミル粉末を用いた樹脂複合体の電子回路基板における電磁ノイズ抑制効果（伝送減衰率 $\Delta P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ ）を示す。伝送減衰率 $\Delta P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ は、入力電力に対する損失の割合を示し、高いほど優れたノイズ抑制効果を示す。

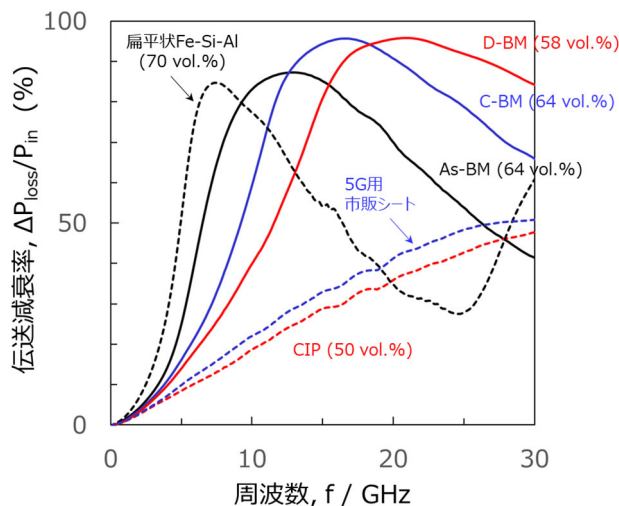


図12 Fe-Cr-Co系合金のボールミル粉末の樹脂複合体の伝送減衰率 $\Delta P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ の周波数依存性

これにより C-BM、D-BM 試料は市販されている 5G 用ノイズ抑制シートやカルボニル鉄粉(CIP)ならびに扁平状セリダスト(Fe-Si-Al)粉の樹脂複合体よりも 10GHz～30GHz の高周波側に及ぶ周波数域で優れた伝送減衰率を示すことがわかり、高い電磁波吸収能を有すると判断された。以上より Fe-Cr-Co 系合金は、SHF 帯（3GHz～30GHz）において優れた電磁波吸収材料になりうると考えられる。

(b) 広帯域基板集積化ノイズ抑制構造体の設計技術

プリント基板に内蔵することで低ノイズ化を図るノイズ抑制構造体の実現に向け、熱プレスプロセスに対応可能な材料を検討し (b)-1)、基礎評価 (b)-2) の後、ドローン搭載用の DCDC コンバータの基板にノイズ抑制体を内蔵し評価した結果、既存のノイズ抑制シートと比較し、不要電波のチャネルパワーを 10dB 以上低減する効果を検証した (b)-3)。これにより、目標は達成した。

(b)-1 基板内蔵ノイズ抑制構造体の検討

プリント基板の製造時には高い温度と圧力が加わるため、高耐熱性および高耐応力性を持つ構造体が必要となるが、各種ポリマーおよびその配合比等に加えて、事前の熱処理等のプロセスについても検討した結果、エポキシ樹脂とセリダストの扁平粉を主原料とし、基板製造プロセス及びリフロー（熱によるチップ部品の半田付け）による部品実装に適応したノイズ抑制構造体を開発した（特許登録）。開発したノイズ抑制体の写真および内部構造を図13に、また実際にノイズ抑制体を内蔵し部品を実装したプリント基板および側面写真を図14に示す。

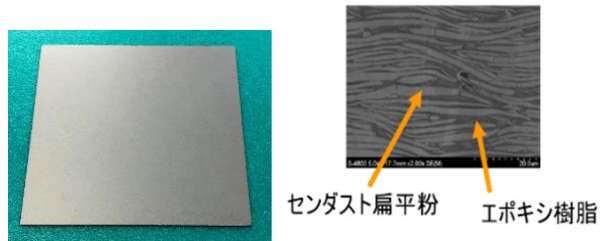


図 13 基板内蔵可能なノイズ抑制体

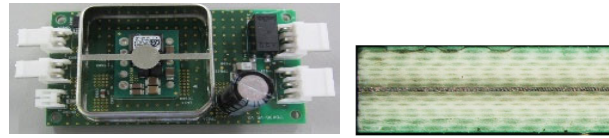


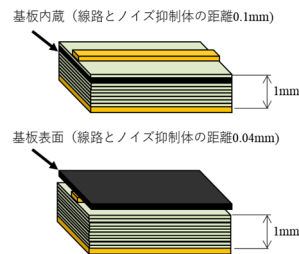
図 14 ノイズ抑制構造体を内蔵した基板および側面写真

(b)-2 基板内蔵ノイズ抑制構造体の基礎評価

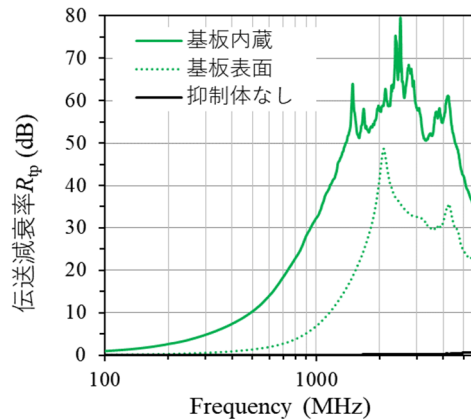
基板内蔵ノイズ抑制構造体のノイズ抑制性能を定量的に評価するため、既存のノイズ抑制シートの評価方法である IEC62333-2 で規定される伝送減衰率 R_{tp} を参考に評価系を作成した。

$$R_{tp} = -10 \log_{10} \left(\frac{10^{S_{21M}/10}}{1 - 10^{S_{11M}/10}} \right)$$

評価基板は、0.1mm 厚の基板を積層することにより、ノイズ抑制構造体を厚みや位置を変えて内蔵できる構成とした。基板の総厚を 1mm とし、特性インピーダンスが 50Ω となるように線路幅を設計した。



(a) 構成



(b) 測定結果

図 15 伝送減衰率測定結果

評価結果を図 15 に示す。既存のノイズ抑制シートの使い方である線路表面にシートを置いた場合と比較し、ノイズ抑制体を内蔵した場合、より大きな減衰効果が得られる結果となった。

(b)- 3 不要電波の抑制効果検証

ドローン搭載用に設計された DCDC コンバータ基板に、上記の検討で得られたセンダスト扁平粉からなるノイズ抑制構造体を内蔵し、不要電波の抑制効果の検証を行った。

不要電波の評価指標として、本研究において無線通信機器の最小受信感度との相関があることが確認されている不要電波のチャネルパワーを採用した。評価する周波数は、目視外飛行で大きな役割を果たす 800MHz 帯とした。測定結果を図 16 に示す。LTE Band18 (865MHz 帯) において、ノイズ対策をしない場合の不要電波チャネルパワーが -50.27dBm であったのに対し、ノイズ抑制体をプリント基板に内蔵した場合は -62.47dBm となり、 10dB 以上の不要電波チャネルパワーの低減を確認できた。

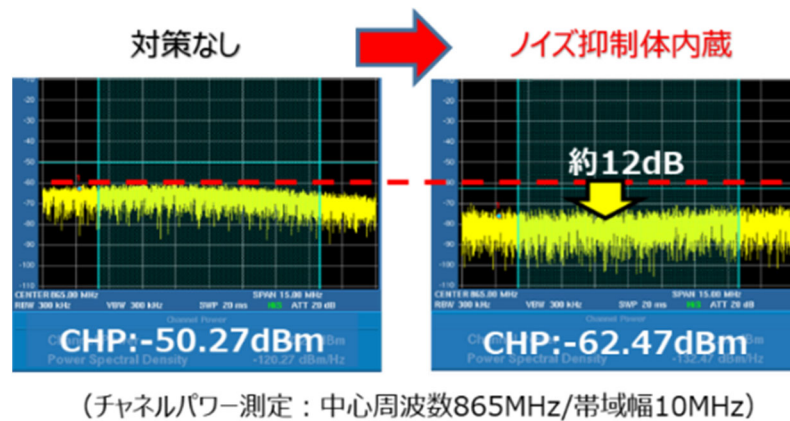


図 16 不要電波抑制効果の評価結果

(c) ノイズ抑制構造体の評価技術

ノイズ抑制構造体用材料の評価技術として、複素比透磁率及び複素比誘電率を 700 MHz～30GHz の周波数範囲で計測可能な評価技術を開発し((c)-1)、実証した((c)-2)。更に、開発した評価技術の社会展開を目指しスタートアップ企業の立ち上げもなされた((c)-3)。以上により、目標をより高度に達成した。

(c)-1 各種測定法の開発

ノイズ抑制構造体は磁性体の高周波損失に基づいて電磁ノイズを抑制するため、磁性体およびそのコンジット材料の複素比透磁率および複素比誘電率を適切に測定し、その結果を踏まえ無線機や無線システムの低ノイズ化設計に活用することが有用である。磁性体の比透磁率は一般に 10GHz 以上では一桁台まで小さいため、比透磁率 10 以下、比誘電率 10 以下の磁性体および誘電体の複素比透磁率と複素比誘電率を 700 MHz～30GHz の周波数範囲で誤差 15% 以内で計測可能な評価技術を開発し、磁性体およびノイズ抑制構造体の高周波特性の評価に利用した。

よく知られているニールソン・ロス・ウィア (NRW) 法を参照測定法とし、新たな

方式として、以下の①ハーモニック共振器摂動法、②シールドドループコイル (SLC) 法、③マイクロストリップラインプローブ法を開発した。NRW 法はシートや基板内蔵形状では高精度での計測が困難であり、開発した3方式はこの課題を解決したものである。また、IEC TC51/WG10において、30GHzまでのノイズ抑制シートの透磁率・誘電率測定法の候補方式として3方式を提案し、国際規格化に向け活動中である。

① ハーモニック共振器摂動法

本方式は、ひとつの共振器において、共振の基本周波数に加えてその整数倍で共振器を共振させ、共振周波数と Q 値の変化から、複数の周波数で透磁率と誘電率を高感度で測定可能な方式であり、これまでに方形導波管による 3.9~18GHz に対応した製品化がなされている。

これまでの方法では、共振の発生にループアンテナ方式を利用しているが、より高周波数帯に対応するため、電界アンテナと結合孔板による新方式を開発し、Ka band (22~38GHz) においても高精度な測定が可能となった (特許申請)。

② シールドドループコイル (SLC) 法

本方式は、側面開放型 TEM セル内部に生じる磁界を励磁源として、短冊状試料を面内方向に励磁し、試料の磁束変化を試料周囲に配置された多層平面 SLC で検出するものである。6 GHz までを対象とした IEC 規格に採録されている。

本研究開発では、広帯域に対応するため、装置寸法およびインピーダンス整合を見直すとともに、校正測定における直流磁界強度を従来の 0.5T から 5T に増大させることにより高精度化を達成し、20GHz 以上においても測定可能とした。

③ マイクロストリップラインプローブ法

透磁率を測定する手段としてマイクロストリップ線路での測定可能性は示されてきたが、実際には単純な形状設計によるマイクロストリップ線路では、高周波において測定時に発生する反磁界の影響が避けられず、これに伴い共鳴周波数がずれることが課題であった。

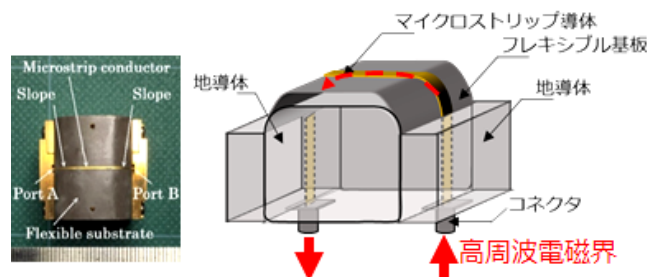


図 17 開発したマイクロストリップ型プローブ

本研究開発では、この課題を解決するため、まず、伝送線路の基本構造を変え、幅広コプレーナ線路型プリント基板プローブを開発した。信号線を幅広にして反磁界

を低減するとともに、信号線の幅方向にスリットを形成して電流が均等に流れる効果で広い範囲で適切な磁気測定に対応できる。ニッケル亜鉛 (NiZn) フェライトシート、カルボニル鉄粉 (CIP) シート等により 30GHz 以下において測定可能であることを示した。

(c)-2 精度検証

CIP コンポジットシートを対象として、NRW 法、ハーモニック共振器摂動法、シールドループコイル法及びマイクロストリップラインプローブ法による複素比透磁率の測定結果を比較した (図 18)。NRW 法を規準として、どの方式でも測定結果が概ね±15%の誤差範囲内にあり、ハーモニック共振器摂動法とマイクロストリップラインプローブ法では測定帯域が 30GHz を越え、当初の目標を達成した。

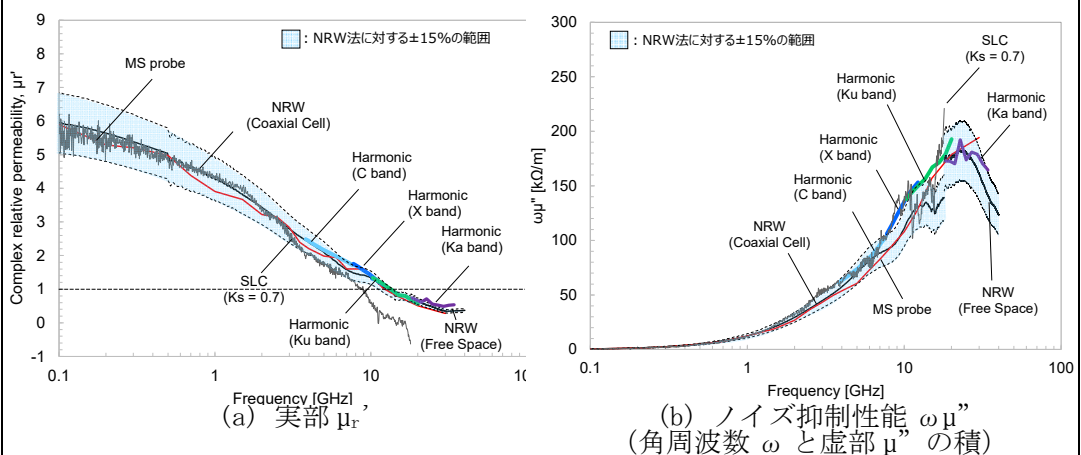


図 18 CIP の複素比透磁率

(c)-3 研究成果の社会展開 (スタートアップ企業の立ち上げ)

2023 年 1 月 4 日、マイクロストリップ線路型プローブ法を普及させるためスタートアップ企業を立ち上げ、活動を開始した (役員構成: CEO 沖田和彦、CTO 藪上信、URL: <https://www.tohoku-tmit.com/>)。

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和 5 年 6 月 22 日)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

国際標準化について、IEC TC51/WG10 における透磁率・誘電率の国際規格化に加え、ノイズ抑制構造体の性能評価指針を磁性コアからの漏洩磁界及び漏洩電界により評価する方式を国際規格に

取り込むことを目指し、IEC TC51/WG9 で活動中である。

主な指標	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	合計
査読付き誌上発表論文数	2件 (2件)	2件 (1件)	3件 (1件)	9件 (7件)	16件 (11件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	3件 (3件)	5件 (5件)	5件 (5件)	5件 (5件)	17件 (17件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)	1件 (0件)	5件 (0件)	1件 (0件)	6件 (0件)
口頭発表数	12件 (2件)	20件 (3件)	35件 (7件)	33件 (6件)	100件 (18件)
特許出願数	4件 (0件)	3件 (1件)	6件 (1件)	7件 (2件)	20件 (4件)
特許取得数	0件 (0件)	1件 (0件)	0件 (0件)	2件 (1件)	3件 (1件)
国際標準提案数	0件 (0件)	3件 (3件)	1件 (1件)	1件 (1件)	5件 (5件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	1件 (1件)	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (1件)
受賞数	4件 (2件)	1件 (0件)	0件 (0件)	3件 (1件)	11件 (3件)
報道発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (0件)	2件 (0件)
報道掲載数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	4件 (0件)	4件 (0件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む)を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集(電子媒体含む)に掲載された論文等(ICC、ECOC、OFCなど、Conference、Workshop、Symposium等でのproceedingsに掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。)を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等(電子情報通信学会技術研究報告など)は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等(査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む)を計上する。

注5：PCT(特許協力条約)国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何カ国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	ドローンやロボット等、広域低電力無線通信や高速・大容量通信等の無線通信機能を備える機器の稠密化により通信トラフィックが急激に増加し周波数がひっ迫する見通しである。今後、さらなる機器の増大により周波数のひっ迫が進み、ドローン等の機器の制御に用いられる無線LANやGNSS等の通信ネットワーク等に悪影響を及ぼし安定運用が困難になることが懸念されている。また、機器の小型化・高周波駆動化・高密度実装化が進み、機器内のスイッチングデバイス等のノイズ源が機器内のアンテナ

	<p>ナに近接配置され、電磁干渉による受信感度劣化の問題が増えることが懸念されている。</p> <p>本研究開発では、極薄でありながらノイズを効果的に抑制する基板集積化ノイズ抑制技術、及び無線設備等における不要電波等の発生源や抑制設計手法を高度に計測・解析する技術を開発し、この技術を活用し、ドローン等の静止及び動作状態における機器内部のノイズ発生と不要電波（700MHz～30GHzの帯域内）干渉を対策することにより、高密度実装化した無線設備等において従来と同等の受信感度を確保することで、制御用通信の安定化や通信特性の維持・改善によるトラフィック抑制が期待され、周波数の有効利用に貢献する。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。加えて、実施期間中も外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。</p> <p>本研究開発においては、ノイズ抑制技術に関する専門的知識や研究開発実績を有する受託者が、蓄積されたノウハウ・知見を有効に活用することで効率的で質の高い研究開発が進められ、予定した実施期間や事業費において、所期の目標を達成することができた。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発では、産業用ドローンの動作状態における不要電波の高分解能計測・解析技術及び基盤集積化ノイズ抑制技術を確立し、これら技術をドローンに活用することによりノイズを有効に低減できるため、上空での無線品質の確保が可能となり、周波数の有効利用に寄与するとともに、無人飛行機等の安全な運行に寄与することができた。</p> <p>開発された要素技術は、すでに一部で製品化やスタートアップ企業が設立された。研究開発においては、外部有識者や専門家を含む研究開発運営委員会を通じて、多様な専門家からのアドバイスを得つつ、研究開発と実証実験を一体的に進め、その成果を展示会にて積極的に紹介を行うことにより、応用研究に向けた知見が得られるなど、研究成果の実用化に向けた確実性が高い。</p> <p>さらに、本研究開発で開発したノイズ抑制構造体の性能を評価するための測定方法については、IEC TC51/WG10において、国際規格化に向け提案したところであり、我が国の競争力強化や、ノイズ抑制機能の高い材料・部品の普及促進、ひいては電波環境の品質確保にも寄与することができた。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発では、ドローンにおける不要電波をノイズ抑制技術により対策する設計技術の要件等を含む成果をまとめた映像や文書を広く公開し、ドローン業界全体に認知された。この設計技術が普及すると、ドローン及びその管制技術が所期の性能を十分に発揮でき、空の産業革命の推進を支える基盤技術として、またドローンに限らずEVやロボットなども含めて、社会・産業へ還元できる。</p> <p>また、本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>ドローンやロボット等、広域低電力無線通信や高速・大容量通信等の無線通信機能を備える機器の稠密化により通信トラフィックが急激に増加し周波数がひっ迫する見通しである。今後、さらなる機器の増大により周波数のひっ迫が進み、ドローン等の機器の制御に用いられる通信ネットワーク（制御用通信）等に悪影響を及ぼし安定運用が困難になることが懸念されている。また、機器の小型化・高周波駆動化・高密度実装化が進み、機器内のスイッチングデバイス（高周波電源モジュールや高速デジタル制御モジュール等）等のノイズ源が機器内のアンテナに近接配置され、電磁干渉による受信感度劣化の問題が増えることが懸念されている。これらは喫緊の課題であり、早急に対応する必要があることから電波政策 2020 懇談会報告書（平成 28 年 7 月）においても、優先的課題として電磁環境・測定分野における研究開発の必要性が記載されている。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

機器の小型化や実装の高密度化により電磁干渉による受信感度劣化の問題が指摘されている。特にドローンやロボット等の利用増加に伴うトラフィックの増加も進む中、ドローン等の機器の制御に用いられる通信ネットワーク等の安定運用を実現するため、機器内部の不要電波への対策をすることで、

制御用通信の安定化や通信特性の維持・改善による周波数の有効利用が期待されている。

本研究開発では、産業用ドローンの動作状態における不要電波の高度分析技術及び基盤集積化ノイズ抑制技術を確立し、これら技術をドローンに活用することによりノイズを有効に低減できることが確かめられた。これにより、周波数の有効利用に寄与するとともに、上空での無線品質の確保による無人飛行機等の安全な運行に寄与しており、目標を達成することができた。

開発された要素技術は、すでに一部で製品化されたほか、スタートアップ企業が設立された。また、研究開発と実証実験を一体的に進め、その成果を展示会にて積極的に紹介を行うことにより、応用研究に向けた知見が得られるなど、研究成果の実用化に向けた確実性が高い。

さらに、本研究開発で開発したノイズ抑制構造体の性能を評価するための測定方法については、IEC TC51/WG10 において、国際規格化に向け提案したところであり、我が国の競争力強化や、ノイズ抑制機能の高い材料・部品の普及促進、ひいては電波環境の品質確保にも寄与することができた。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

前述したように、本研究開発で予定された要素技術が得られ、一部については製品化やスタートアップ企業の立ち上げ、国際規格化に向けた提案など、社会実装に向けた取組が積極的に進められている。個々の要素技術については、今後は受託者において、社会での活用や実用化に向け応用研究、国際規格化活動、論文などによる情報発信が行われる予定であり、これらについて追跡調査等でフォローアップしていく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合（第115回）」（令和5年6月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ドローン等の機器に搭載し不要電波の発生を予防する基板集積化ノイズ抑制技術及び、不要電波の高分解能計測・解析技術を確立し、機器の内部におけるノイズ発生と不要電波干渉（700MHz～30GHzの帯域内）を抑制するための研究開発である。各課題について技術を確立し、さらに実証して目標をすべて達成している。
- ・ドローンにおける不要電波をノイズ抑制技術により対策する設計技術により、最新ドローン試作機におけるノイズを有効に低減でき、この設計技術が普及すれば、ドローン及びその管制技術が所期の性能を十分に発揮でき、空の産業革命の推進を支える基盤技術として期待できる。
- ・ドローンを始めとする自律ロボットの安全な普及には高信頼の無線通信機能が必須であり、これを妨げる機体からの放射雑音を系統的に抑制する道筋を示せたことは大きな成果である。

7 評価に使用した資料等

○電波資源拡大のための研究開発の実施

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>

令和5年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局技術政策課研究推進室

評価年月：令和5年8月

1 政策（研究開発名称）

集積電子デバイスによる大容量映像の非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

令和元年度～令和4年度（4か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人

・総事業費

2,377百万円

令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	総額
619百万円	621百万円	620百万円	512百万円	2,372百万円

予算要求段階では総額10億円超となるか未定だったため、事前事業評価は未実施。

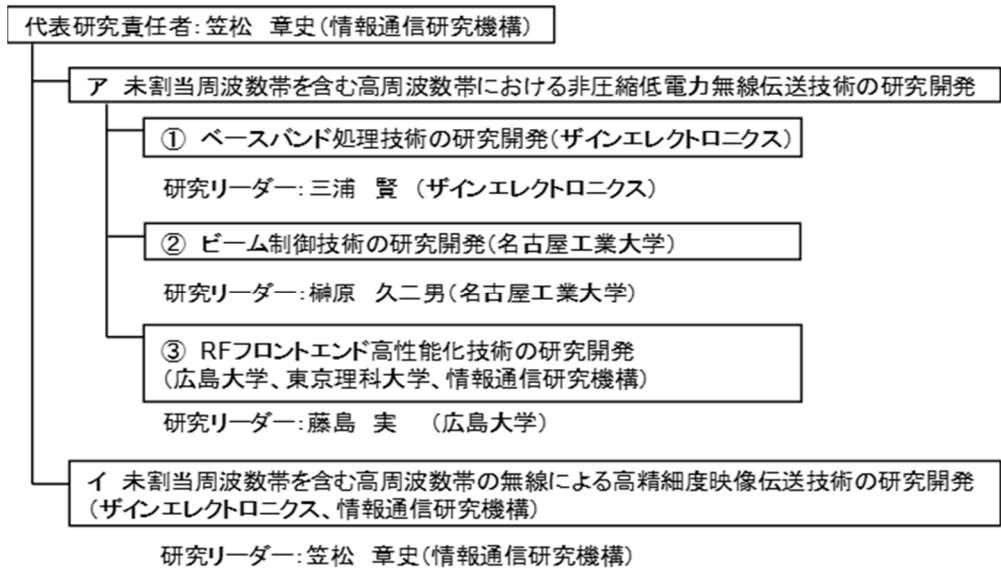
・概要

8K高精細・高分解映像はより美しい映像を視聴できるという以上に医療分野やバーチャルリアリティ等の分野などで大きな意味を持ち、実際に内視鏡手術などの臨床手術などに活用され始めている。しかしながらこれらの応用では有線であることのデメリットも大きく、今後の発展のためには高精細度映像の無線伝送技術の確立が必須である。この観点から、本課題では8K高精細度映像を低遅延で無線伝送する技術を確立し、医療現場における早期診断（早期治療）等に期待される超高精細度映像（4K/8K）を低遅延で無線伝送するため、上記の技術を用いた集積デバイスにより非圧縮、低消費電力、ビーム制御可能な300GHz帯無線伝送システムの開発を実施し、同周波数帯のさらなる有効利用を促進する。

また、275 GHz以上の未割当周波数帯は現在ITU-Rにおいて割当ての検討が行なわれている段階であり、具体的な用途はこれから決まる周波数帯である。したがって用途によっては広い周波数帯域を確保できる可能性が高い。そのため、本研究開発で得られた成果はITU-RおよびIEEEでの技術検討活動に順次入力する。ITU-Rでは、WRC-2019にて275 GHzから450 GHzの高周波数帯を陸上移動及び固定業務に使用するための周波数帯として合意されたほか、様々なユースケースに対する技術要件やこの周波数帯の電波伝搬特性などが研究されており、より本格的な周波数割り当てである分配(allocation)については今後のWRCに向けて議論される見込みであるところ、研究開発成果に基づいて寄書の提出を行う。

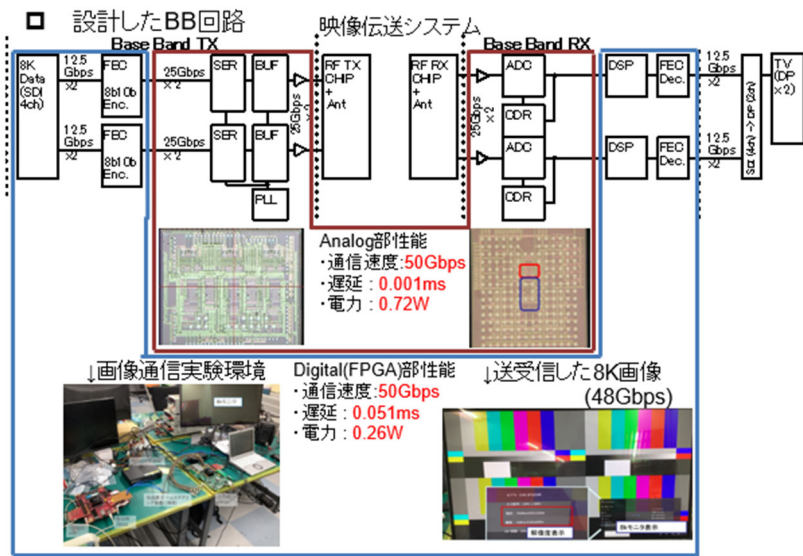


研究開発の全体概要図



研究開発体制の全体概要図

技術の種類	技術の概要
課題ア: 未割当周波数帯を含む高周波数帯における非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発	<p>① ベースバンド処理技術の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ミックスドシグナル技術を用いて 50Gbps の通信速度, 0.1ms 以下の遅延, 1W 以下の消費電力を持つベースバンド(BB)送受信機の開発を行う。 PGAに機能を実装し、TX/RXを設計/試作することで消費電力と遅延を見積もり、目標とした特性を実現 (50Gbps/0.052ms/0.98W)する。 電力削減のため Carrier Recovery (CR)/Clock and Data Recovery(CDR)を統合した受信回路を開発し IF 周波数 20GHz において 10Gbps の通信を実現する。

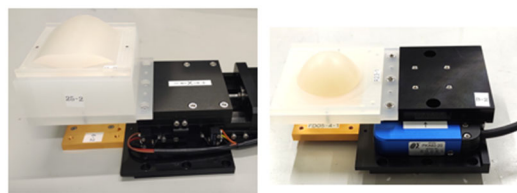


研究開発にて設計した BB 回路

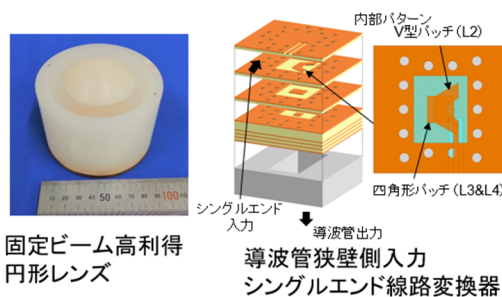
② ビーム制御技術の研究開発

10 度程度のビーム方向制御が可能となる小型・薄型のアンテナシステムの開発を行う。

- ・ 中心周波数 270GHz の 34.56GHz 帯域幅で、10 度(±5 度)のビーム走査が可能
- ・ 送受とも 4 素子 28dBi の利得を実現する小型 (45 mm×45 mm以下)・薄型 (高さ 40 mm 以下) のビーム走査アンテナ
- ・ 円筒型レンズを用いたメカ・フェーズドアレー ハイブリッドビーム走査アンテナ
- ・ 円形型レンズを用いたメカ・フェーズドアレー ハイブリッドビーム走査アンテナ
- ・ 円形型レンズを用いた高利得 40dBi 固定ビームアンテナ
- ・ 高誘電率材料を用いてレンズをさらに薄型化
- ・ 導波管狭壁側入力シングルエンド線路変換器



円筒型レンズ 円形レンズ
 メカ・フェーズドアレー メカ・フェーズドアレー
 研究開発に用いたメカ・フェーズドアレー

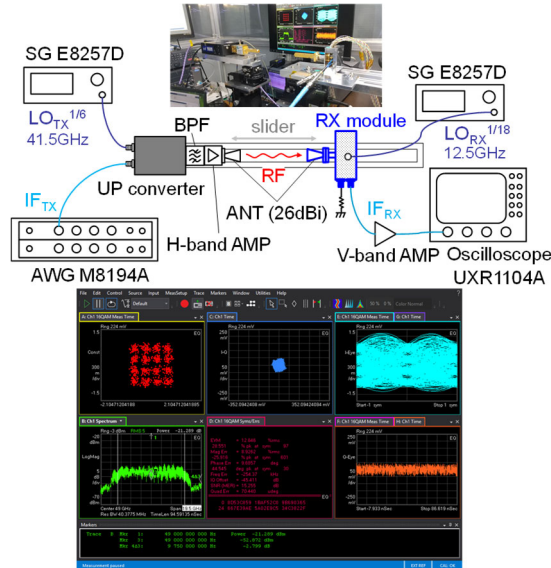


研究開発に用いたレンズ及びシングルエンド線路変換器

③ RF フロントエンド高性能化技術の研究開発

34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な RF フロントエンドの開発を行う。

- ・ 34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な送受信回路を試作
- ・ ビーム制御可能な 300GHz 帯送受信回路において送信-5dBm、受信 NF15dB を実現
- ・ 300 GHz 帯電力増幅器の設計、試作
- ・ 34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な送受信回路を実現
- ・ 40nm CMOS プロセスを用い回路により送信-40 dBm、受信 NF 17dB を実現（送信回路は電源線を修正することにより-7.5 dBm の出力電力を確認）
- ・ 0.13 μm SiGe BiCMOS により 300 GHz 帯で 3.2 mW 以上の出力電力を実現

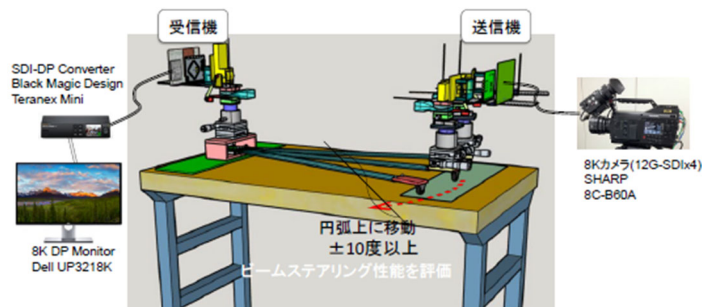


300GHz 帯トランシーバ評価の概要図

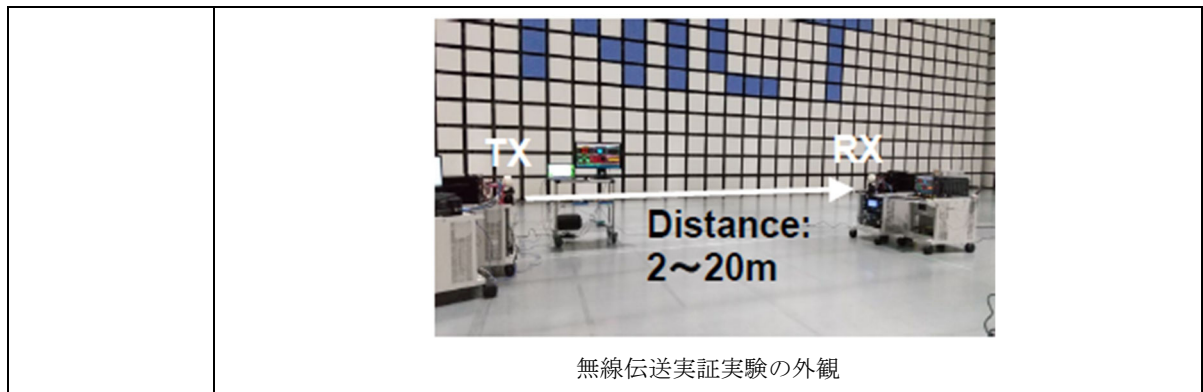
8K 映像の非圧縮 50 Gbps 程度の無線伝送実証実験

- ・ ビーム方向制御アンテナシステム、マルチチップ制御 RF フロントエンド技術、FPGA(Field Programmable Gate Array)を含むベースバンド技術を統合し、通信実験を実施する。
- ・ 開発したベースバンド回路、無線部、画像送信装置・画像表示装置を用いて、最終形態での映像伝送デモを実施する。
- ・ アンテナ、RF、ベースバンドを統合した実験で変復調を確認する。
- ・ 角度 10° 以上 (16°) のビーム制御を実験で確認する。
- ・ 5m 以上の伝送（電波暗室で可能な 20m まで）の伝送を実験で確認する。
- ・ バイアス調整用の SPI-DAC を改良試作し、基本動作を確認する。

課題イ：未割当周波数帯の無線による高精細度映像伝送技術の研究開発



映像伝送デモの全体接続構成外観



・スケジュール

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
アー①. ベースバンド処理技術	映像伝送システム方式検討 基本試作 基本設計	映像伝送基本システム実験 試作、デジタル部デモ 二次設計	映像伝送システム予備実験 波形整形回路等作製 最適化設計	映像伝送システム統合実験 実証実験システムへの組み込み、評価
アー②. 300GHzビーム制御技術	ビーム制御基本検討 シミュレーション、評価 基本設計	ビーム制御機構試作 特性評価 二次設計	ビーム制御システム構築 特性評価 最適化設計	実証実験システムへの組み込み、評価
アー③. 300GHz帯RFフロントエンド高性能化技術	低消費電力回路試作 基本設計	集積化チップ試作 二次設計	搬送波発生回路試作 最適化設計	実証実験システムへの組み込み、評価

(2) 達成目標

8K等の超高精細度映像（データレート48 Gbps）を低遅延、低消費電力で無線伝送する需要に向けて、集積回路とビーム制御可能なアンテナシステムによって映像データを非圧縮で伝送する無線通信技術の研究開発を実施する。

従来のマイクロ波やミリ波では不可能な広い帯域を確保できる可能性がある、未割当周波数帯を含む高周波数帯を用いて50 Gbps程度の伝送速度を実現し、これにより大容量映像のデータを非圧縮で伝送することで、圧縮・伸張に要する電力を削減しつつ1ms程度の低遅延を実現する。

これを将来普及可能なコストと性能で実現するためには、無線回路、デジタルおよびアナログ信号処理回路を集積化することが必須である。本研究開発は2021年度までにアンテナシステム、8Kインターフェース、無線信号処理の各要素技術を確立し、2022年度に映像伝送実験を行う。

また、確立された要素技術から技術基準策定を行い、次世代映像システムへの適用を目指すことで、高周波数帯の有効利用を促進する。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT政策） 政策13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
未来投資戦略 2018（平成 30 年 6 月 15 日 閣議決定）	第 2 具体的政策 I 「Society 5.0」の実現に向けて今後取り組む重点分野と、変革の牽引力となる「フラッグシップ・プロジェクト」等 [1] 「生活」「産業」が変わる 2. 次世代ヘルスケア・システムの構築 (3) 新たに講ずべき具体的施策 iv) 先進的医薬品・医療機器等の創出、ヘルスケア産業の構造転換 ② AI 等の技術活用 II 経済構造革新への基盤づくり [1] データ駆動型社会の共通インフラの整備 1. 基盤システム・技術への投資促進 (3) 新たに講ずべき具体的施策 iii) 新たな技術・ビジネスへの対応 ⑥ 4K・8K の推進
世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成 30 年 6 月 15 日 閣議決定）	第 2 部 官民データ活用推進基本計画 II 施策集 II - (6) 利用の機会等の格差の是正【官民データ基本法第 14 条関係】 ○[No. 6 - 7] 4K・8K 等の高度な映像・配信技術の利用機会の均等 ○[No. 9 - 5] 8K 等高精細映像技術の医療応用の推進

(3) 目標の達成状況

各研究課題とも目標を達成することができた。

- ・ ミックスドシグナル技術を用いて 50Gbps の通信速度、0.1ms 以下の遅延、1W 以下の消費電力を持つベースバンド(BB)送受信回路を開発した。
- ・ 1 軸フェーズドアレイ、1 軸機械走査に対応した円筒型レンズを用いたアンテナモジュールを開発した。
- ・ シリコン CMOS で 34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの RF 回路を実現、SiGe BiCMOS プロセスにより 300 GHz 帯で 3.2 mW 以上の出力電力を実現した。
- ・ 16 度のビーム制御、20m 伝送、8K 映像伝送等を実験で確認した。

ア-① ベースバンド処理技術の研究開発

本課題では、表ア①- 1 に示す目標を達成するベースバンド(BB)の開発を行った。消費電力と遅延に関しては、FPGA に実装した機能と試作した部品(入力バッファ、クロックデータリカバリ (CDR)、AD コンバータ (ADC)、出力バッファ、シリアライザ等)が 1つの集積回路で実現したと仮定して求めた。BB 送受信機の開発と、キャリアリカバリ (CR) と CDR を統合する方式について示す。試作は 22nm シリコン CMOS プロセスを使用した。

表ア①- 1 目標性能と達成状況

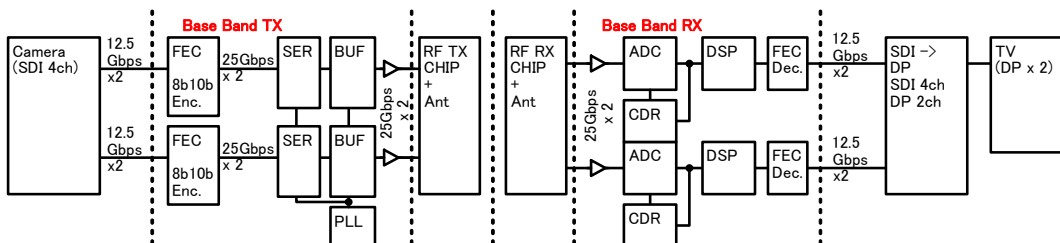
	目標	実施結果	達成状況
通信速度 [Gbps]	50	50	達成
遅延 [ms]	0.1>	0.052	達成
消費電力 [W]	1>	0.98	達成

1 ベースバンドと各課題の関連

全体の構成図を図ア①- 1 に示す。課題ア-①は Base Band TX, RX の部分が該当する。Base Band TX (BBTX)は以下の機能を有している。無線で送受信するものとして 8K 画像データを想定する。

- ・ 画像信号を送信するためにカメラなどの画像データに対してエラー訂正符号の付加
- ・ BBTX-RFTX 間の DC バランスの保持とデータにクロックを追加するための 8B10B 符号化(Encode)
- ・ BBTX-RFTX 間の配線や RFTX の特性に合わせた波形成型機能
- ・ I, Q 信号の位相ずれによるベースバンド信号劣化対策の位相保証回路 Base Band RX (BBRX)は以下の機能を有している。
- ・ エラー訂正符号を使用したビットエラーレート (BER : Bit Error Rate)の改善
- ・ 8B10B 符号を画像データへの変換(Decode)
- ・ RFRX-BBRX 間の配線や RFRX の特性に合わせて波形成型機能 (Analog + Digital 処理で実現)
- ・ 受信した I, Q 信号の CDR を行い送信されたデータの復元

課題ア：未割当周波数帯を含む高周波数帯における非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発



図ア①- 1 全体構成図

2 送受信機の開発

2.1 送受信機の開発

BBTX (送信) の消費電力/遅延を以下に示す。ロジック部は FPGA のため測定できないためシミュレーションで遅延と電力を見積もった。アナログ部は各ブロックの消費電力を集計し電力と遅延を求めた。

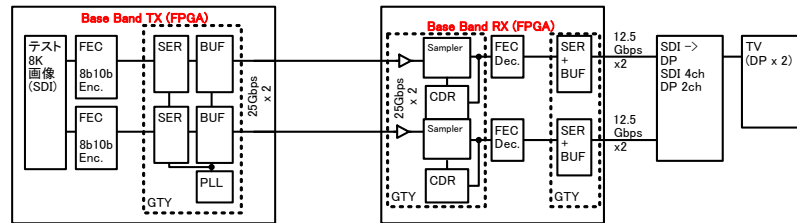
- ・ 消費電力 : 0.38W 内訳 [0.32W (analog) + 0.06W (digital)]
- ・ 遅延 : 1.5 μs 内訳 [0.5 μs (analog) + 1.0 μs (digital)]

BBRX (受信) の消費電力/遅延を以下に示す。TX と同じ方法でアナログ/ロジック部の見積もりを行っている。

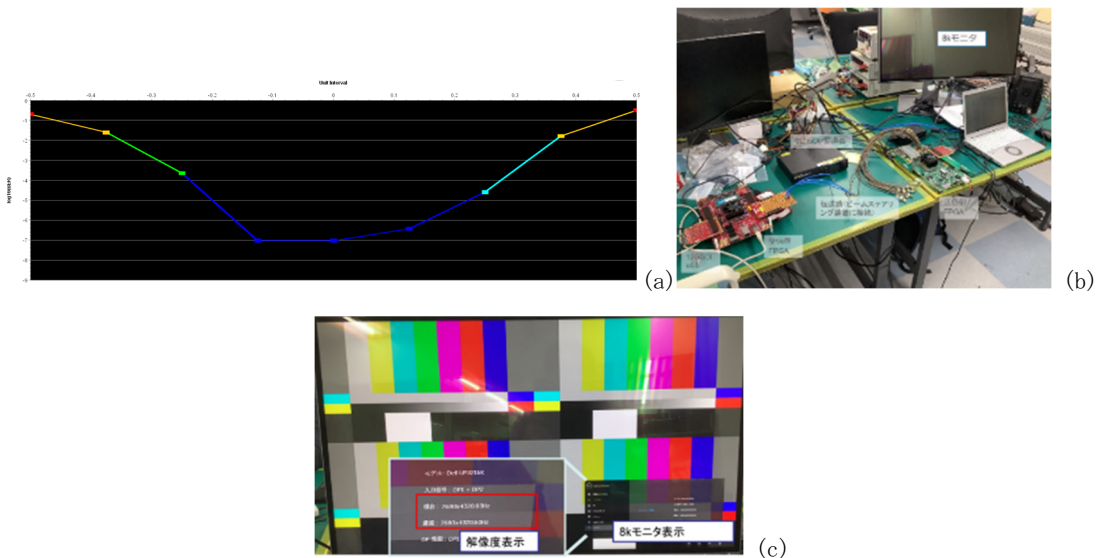
- ・ 消費電力 : 0.60W 内訳 [0.4W (analog) + 0.20W (digital)]
- ・ 遅延 : 50.5 μs 内訳 [0.5us (analog) + 50.0 μs (digital)]

2.2 通信実験

50 Gbps の通信は FPGA を使用して確認を行った。シリアライザと CDR は FPGA (Xilinx 社製) に搭載されているモジュール (GTY) を使用した。評価系を図ア①-2 に示す。BBTX からパターンチェック信号を出力し BBRX で受信した際の BER を図ア①-3(a) に示す。同図の midpoint でデータを取得すれば BER が最小の $1E-7$ になり、FEC を掛けることでエラーフリーとすることができる。BBTX より 8K (50 Gbps) のテスト画像 (SDI 規格) を作成し、BBRX へ送信し SDI-DP 変換装置を介して 8K モニタに接続した。評価系の写真を図ア①-3 (b) に示す。これらを使用して画像を表示した結果を図ア①-3 (c) に示す。8K 画像が通信されているかの判断は同図(c)の解像度表示で確認した。解像度表示を見ると 7680×4320 となっており、8K 画像が送信されていることが確認できる。以上から 8K (50 Gbps) の通信を実現したことがわかる。



図ア①- 2 評価系



図ア①- 3 (a) BER 測定結果, (b) 評価系の写真, (c) 実験結果

3 まとめ

以上より、本研究課題ア-①の開発目標である「通信速度 50 Gbps、遅延 0.1ms 以下、消費電力 1 W 以下」を達成した。さらに無線通信システム全体の消費電力・コスト削減の取り組みとして CR と CDR を同時に実現する方法を提案した。結果として、通信速度は 10 Gbps において低解像度 (3bit) ADC とアナログ回路を組み合わせた通信システムが実現可能であることを示した。これにより無線通信システム全体の消費電力とシステムコストを低減する方式を示すことができた。

ア-② ビーム制御技術の研究開発

本課題では、少ない IC チップ数で高利得、広帯域、広いビーム走査範囲を実現するため、レンズアンテナをベースとしたビーム走査アンテナを開発した。その第一候補として取り組んだ、機械的な動作機構が部分的に必要となるが、システム全体を回転するのではなくレンズ部のみをわずかに往復運動させるだけで、高

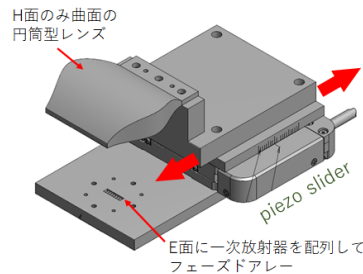
いEIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power: 等価等方放射電力) と、広い角度範囲を2次元ビーム走査が可能となる機械式ビーム走査とフェーズドアレーを組み合わせた方式について、目標に対する性能の達成状況について示す。さらに、これらのレンズアンテナの一次放射器には、レンズへの照射特性を容易に設計が可能なホーンアンテナを用いており、ホーンアンテナの給電に用いている導波管と、高周波 IC との接続用の、平面線路導波管変換回路の開発に取り組んだ結果について示す。

1 機械式ビーム走査とフェーズドアレーを組み合わせた2次元ビーム走査レンズアンテナの開発

レンズを切り替える方式では、すべての送信機から放射した電力が合成されない。また、マルチビーム合成方式も、レベルが低い角度のクロスオーバーレベルを高めて、放射レベルの角度依存性を均一化させる点で優れているが、やはりすべての放射電力が合成されるわけではない。そこで、機械的な走査をするための機能が必要となるが、高いEIRPの実現を優先した方式として、一次元を機械式ビーム走査で、もう一次元をフェーズドアレーによるビーム走査としてそれらを組み合わせた2次元ビーム走査方式を開発した。その達成状況について説明する。

1.1 機械式ビーム走査とフェーズドアレーを組み合わせた2次元ビーム走査方式の構成

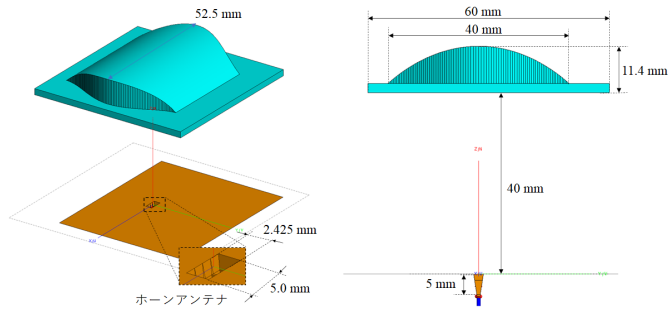
2次元ともフェーズドアレーによるビーム走査で高利得アンテナを実現しようとする、非常に多くの素子数が必要となり、それとともに必要となるICチップ数が多くなってしまふ。そこで、2次元のうちの1次元はレンズを用いてビームを絞ることにより高利得化するとともに、機械走査とはいってもシステム全体を回転走査するのではなく、レンズを一次放射器に対してわずかにずらすだけでビーム走査する性質を用いて、図ア②-1.1に示すように、ピエゾモータを用いた往復運動によりビーム走査し、もう一次元はフェーズドアレーでビーム走査する2次元ビーム走査方式とする。



図ア②-1.1 機械式ビーム走査とフェーズドアレーからなる2次元ビーム走査レンズアンテナ

1.2 半円筒型レンズアンテナの構造とその設計

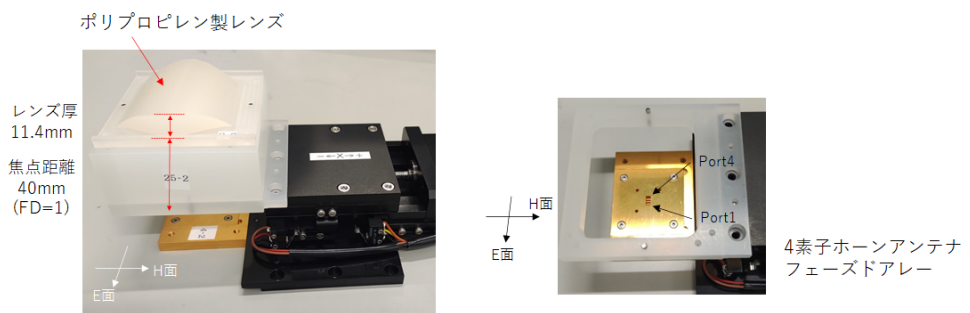
ポリプロピレンを用いて、半円等型の平凸レンズを設計した。その寸法と形状を、図ア②-1.2に示す。また、ホーンアンテナは、レンズの曲面方向をH面とした。E面については、素子指向性を考慮した上で、グレーティングローブが利得に影響しない素子間隔として1.25mmとした。ホーンアンテナ間を仕切る壁面の製造条件を考慮した結果、壁面は開口面よりも低くなり、この影響を考慮して電磁界シミュレーションで特性を評価している。



図ア②-1.2 半円筒型平凸レンズ（ポリプロピレン、F/D 比 1）の形状

1.3 半円筒型レンズを用いたビーム走査アンテナの試作結果

レンズアンテナが、ホーンアンテナの H 面長手方向に、ホーンアンテナの開口面と平行な面内に往復運動するように、ピエゾモータ駆動装置を用いた。その装置の写真を図ア②-1.3 に示す。レンズがホーンアンテナ面に水平に、なめらかに距離が変化しないよう安定して往復運動するように、レンズと同じポリプロピレン製の内部をくりぬいた角柱でレンズを支える構造とした。

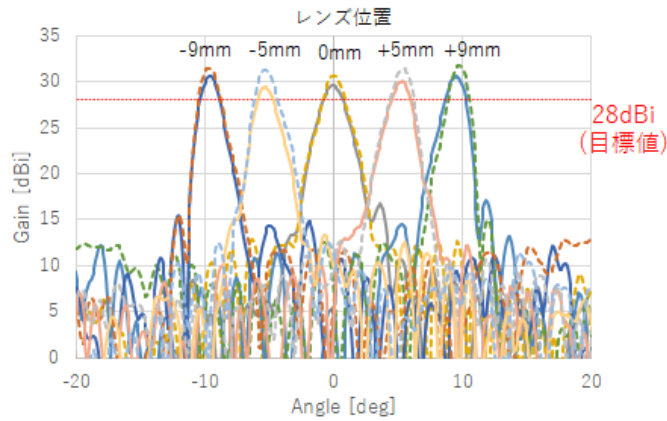


図ア②-1.3 試作した H 面機械駆動半円筒型平凸レンズ（ポリプロピレン、F/D 比 1）

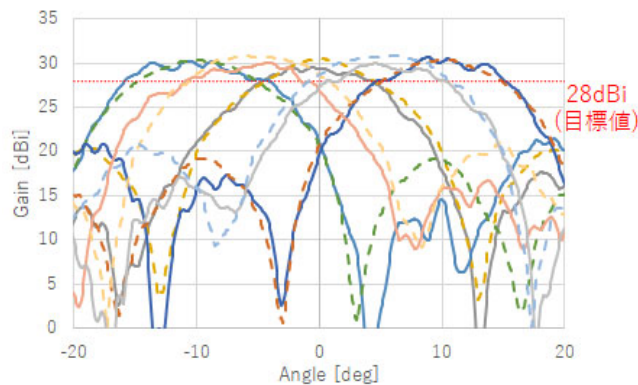
E 面フェーズドアレー 2 次元ビーム走査アンテナ

試作した H 面機械駆動半円筒型平凸レンズ E 面フェーズドアレー 2 次元ビーム走査アンテナのビーム走査特性を測定した結果を示す。図ア②-1.4 に、レンズを連続的にスライドさせたときの指向性を示す。実線が測定結果で、破線がシミュレーション結果である。5 つの位置での指向性のみを示しているが、レンズは連続的にスライドできるため、これらの指向性の間も連続的にビーム形成されている。ここではグラフで確認しやすいように 5 点のみの特性を示している。送信アンテナの目標値 28dBi を ± 5 度の範囲で実現することとしているのに対して、 ± 10 度で実現できていることが実験結果で確認できた。

E 面のビーム走査については、フェーズドアレーの機能で実現する。アンテナの機能の実験的評価として、レンズを含めた 4 素子の各素子の指向性を測定し、4 つのアンテナ素子に同振幅で、所望のビーム走査とするために必要な位相を与えたときの指向性を計算した。そのようにして求めたビーム走査特性を図ア②-1.5 に示す。E 面についても、 ± 10 度を大幅に超える 28 dBi 以上のビーム走査特性が得られることが確認できた。



図ア②-1.4 H面機械駆動ビーム走査特性



図ア②-1.5 E面フェーズドアレービーム走査特性

ア③ RF フロントエンド高性能化技術の研究開発

40 nm CMOS プロセスを用いて RF 送信フロントエンド回路、及び RF 受信フロントエンド回路を設計、試作、評価した。また、0.13 μm SiGe BiCMOS プロセスを用いて 300 GHz 帯電力増幅器を設計、試作、評価した。本研究課題における最終到達目標と達成状況を下表に示す。

表ア③ 研究課題ア③の最終目標と達成状況

最終到達目標	達成状況
34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な RF フロントエンド	<ul style="list-style-type: none"> ・帯域： 受信器>35GHz ・受信器 76G サンプル/s ※受信器において達成
送信機 <ul style="list-style-type: none"> ・出力チャネル当たり 1 mW 以上 ・最終出力 3.2mW 以上の電力増幅器 	<ul style="list-style-type: none"> ・出力電力の測定結果： -17dBm (0.02mW) ・電源線修正後のシミュレーション結果： -7.5dBm (0.18mW) ・電力増幅器と組み合わせることによって 1 mW 以上の出力電力を達成 ・帯域 34.56 GHz 以上、出力電力 3.2 mW (5 dBm) 以上達成
受信機 <ul style="list-style-type: none"> ・雑音指数 15 dB 以下 ・消費電力 1 回路あたり 2 W 以下 	雑音指数の測定結果：23 dB レイアウト改善後のシミュレーション結果：15dB 達成 消費電力 0.99 W 達成

1 300 GHz 帯電力増幅器の開発

その他、0.13 μm SiGe BiCMOS プロセスを用いて 300 GHz 帯電力増幅器の設計及び測定評価を行い、本研究における 300 GHz 帯電力増幅器の開発目標である「帯域 34.56 GHz 以上、出力電力 3.2 mW (5 dBm) 以上の 300 GHz 帯電力増幅器」を実現した。

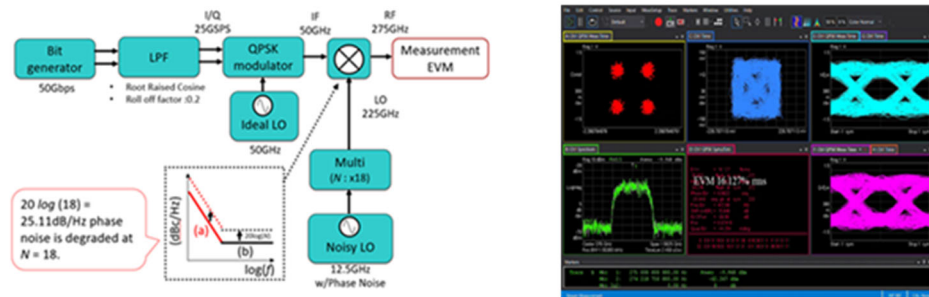
イ① 無線通信システムシミュレーション

RF フロントエンド・ベースバンドの各要素技術の設計仕様・評価結果を統合、無線映像伝送モジュール性能の予測を行うため、リンクバジェット試算を行うとともにシステムシミュレーションを実施した。

(ア) 伝送特性に影響のある項目のシステムシミュレーション

要求仕様（評価指標）は BER、SNR、EVM とし、設計指標に影響がある要因として S/N 比、位相雑音、線形/非線形の信号劣化、Frequency Offset、Phase Offset、I/Q インバランス、DC オフセット、I/Q 信号レベル、Group Delay 偏差を検討した。

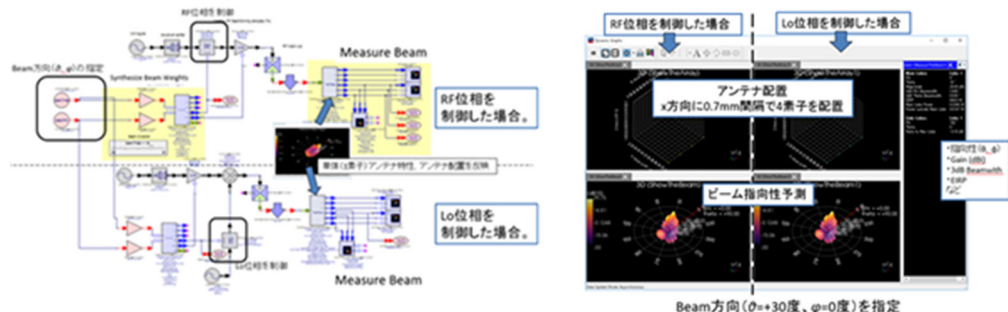
検討例として、局部発信器 (LO) の位相雑音の影響を示す。図イ①-1 のシミュレーション・モデルとシミュレーション結果の例を示す。



図イ①-1 局部発信器 (LO) 位相雑音の影響を 300 GHz 帯のシミュレーション・モデルと結果
(条件：キャリア周波数 275 GHz、シンボルレート 500 Msps、SNR 20 dB、LO 通倍数 18 倍)

(イ) ビームフォーミングのシステムシミュレーション

フェーズドアレーアンテナ特性を反映し、計画されている位相制御方法である局部発信器の位相制御でシステムシミュレーションを行った。図イ①-2 がシミュレーション回路図と結果である。図イ①-2 において上側が RF で位相制御をおこなう場合をシミュレーションしており、下側が局部発信器 (Lo) で位相制御をおこないビーム制御をした場合をシミュレーションしている。



図イ①-2 シミュレーション回路図と結果

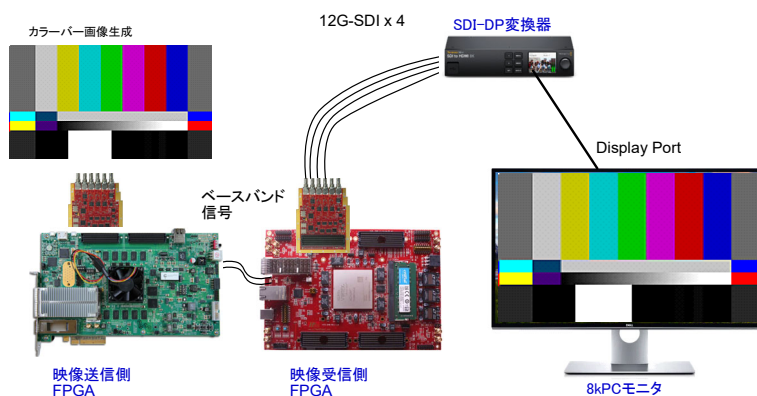
シミュレーション結果のとおり、RF で位相制御した場合及び局部発信器 (Lo) で位相制御を行った場合において、同様にビーム制御が行えることを確認した。

課題イ：未
割当周波数
帯の無線に
よる高精細
度映像伝送
技術の研究
開発

イー② 映像処理部

本課題研究ア-①において、ベースバンド伝送部の伝送遅延を 0.1ms 未満とする目標を立てた。本目標を達成するためのエラー訂正符号を含む映像信号処理部の開発を実施した。

図イ②-1 に映像処理部の全体構成図を示す。映像送信側 FPG でカラーバーのテスト画像を生成し、誤り訂正符号の付加、伝送路符号化等の処理を行い、25 Gbps 差動出力 2 本で出力する。(この出力を無線伝送システムで送受信することを想定している) 受信側では、25 Gbps 差動 2 本で受信した信号を復号化、エラー訂正等の処理を行った上で、SDI 信号の符号化を行い、12G-SDI 4 本で出力する。SDI から Display Port に変換する装置を経由し、Display Port インターフェースの 8K PC モニタで映像を表示する。



図イ②-1 映像処理部全体構成図

設計の結果、映像送信側 FPGA の伝送遅延は $1\mu s$ 、映像受信側 FPGA の伝送遅延は $50\mu s$ であった。アナログ部を含めてベースバンド伝送部の伝送遅延 $0.1\mu s$ を達成した。

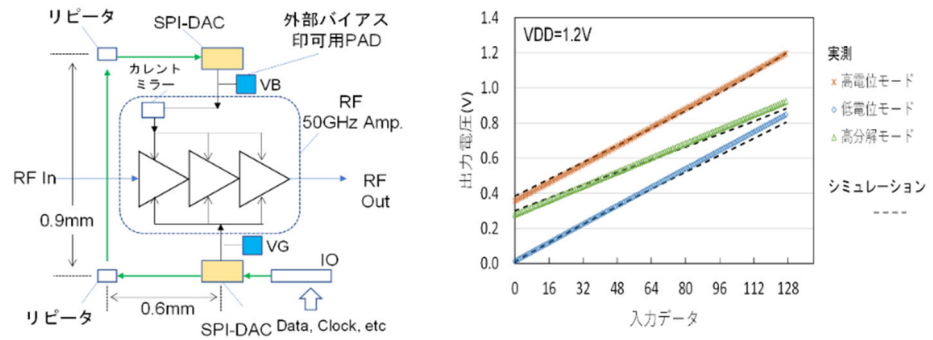
イー③ オンチップ・バイアス調整回路

300 GHz 帯の安定な無線伝送に必要なキャリブレーション技術の一部として、RF フロントエンドに搭載可能なオンチップ・バイアス調整回路技術の開発を行った。

回路方式は、Serial/parallel-Interface (SPI) の DAC 回路 (SPI-DAC と記す) とし、電子ボリューム型回路方式により小面積化と低ノイズ化の両立を図った。また、大規模 RF フロントエンドへの組み込みに対応すべくデジタル信号のリピータ回路を設けた。

本技術の有効性確認のために、小規模な RF 回路 (50GHz アンプ) に SPI-DAC を組み込んだ TEG を試作評価した。図イ③-1 に TEG の回路構成と SPI-DAC の電圧特性を示す。縦軸のマーカは実測結果、破線はシミュレーションである。高電位、低電位、高分解のいずれのモードでも、実測とシミュレーションは良好な一致を示した。ノイズについては、分解能より十分小さい $1mV_{pkpk}$ 以下となった。また、RF 回路に外部電源からバイアス電圧を与えた場合と、SPI-DAC からバイアス電圧を与えた場合の、利得周波数特性を比較した。その結果、設計した SPI-DAC により、外部電源によるものと同等の性能が得られた。

RF フロントエンドへ搭載可能な、オンチップ・バイアス調整回路技術を開発した。設計目標と試作結果を表イ③-1 にまとめた。本回路の技術目標は達成できた。



図イ③-1 TEG の回路構成と SIP-DAC の電圧特性

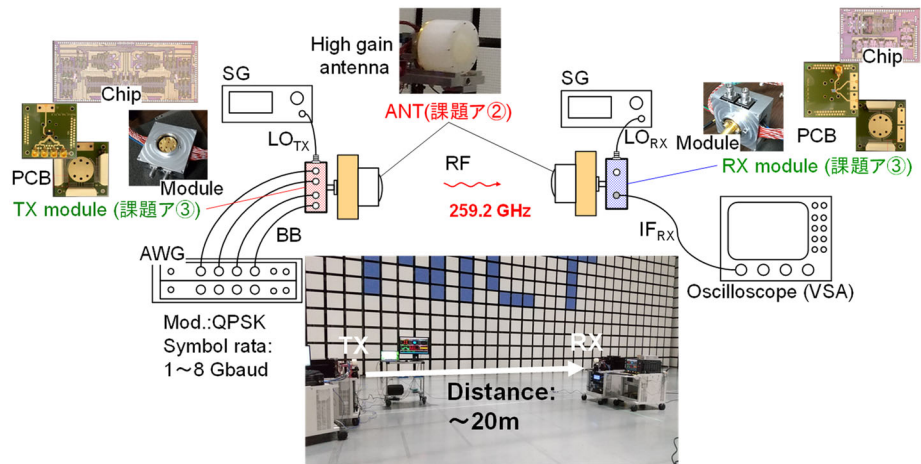
表イ③-1 SPI-DAC の回路目標と試作結果

	目標	試作結果
出力階調	128	128
回路面積 (um ²) (シュリンク前の数値)	300x150	159x108
平均分解能 (mV)	5	5.1
低ノイズ	<<分解能	<<1mVpkpk

イ-④ 無線伝送実験

1. 伝送距離検証実験

伝送距離性能を確認するための無線伝送実験を NICT の大型電波暗室で行った。具体的にはアンテナ (課題ア-②) と RF フロントエンド回路 (課題ア-③) を統合して実験を行った。実験構成を図イ④-1.1 に示す。



図イ④-1.1 伝送距離検証実験の構成

結果として QPSK 変調で、5m で 5 Gbaud, 10 Gbps の伝送距離を実証、20m で 1 Gbaud, 2 Gbps の伝送距離を実証できた。図イ④-1.2 に、QPSK を使用した信号コンスタレーションとエラーベクトルの大きさ (EVM) を示す。距離 5m、データレート 10 Gbps のときの EVM は、誤り訂正可能な 10^{-3} 未満のビットエラーレートの基準を満たしている。

		Data rate	2 Gbps	4 Gbps	6 Gbps	10 Gbps
Distance: 5 m	Constellation (Equalized)					
	EVM		22.14 %rms	24.27 %rms	25.51%rms	27.37 %rms
Distance: 20 m	Constellation (Equalized)					
	EVM		29.24 %rms	39.75 %rms	53.52 %rms	

図イ④-1.2 伝送距離検証実験における信号コンスタレーションとエラーベクトルの大きさ

2. ビームステアリング実験

2-1. メカニカル(機械式ビーム走査)アンテナによるビームステアリング実験

課題ア②により開発されたメカニカル(機械式ビーム走査)アンテナと課題ア③により開発した送受信無線機モジュールを利用し、ビームステアリング実験を実施した。

距離 65 cmに離れたスライダステージ上に課題ア③で開発した無線機モジュールを配置し、送信側に課題ア②による機械式ビーム走査アンテナを設置した。ビームステアリングの評価は、送信機モジュールを回転させてビームの入射方向を変えた状況で、機械式ビーム走査アンテナの指向性の調整により無線リンクの信号強度や品質を測定することで行った。この実験結果より、本課題研究で目標とした $\pm 5^\circ$ のビーム制御を超えるメカニカルアンテナによる $\pm 16^\circ$ のビームステアリング技術の実証に成功した。

2-2. フェーズドアレイ無線機によるビームステアリング実験

課題ア③により開発されたが受信機チップ(回路性能:SSB NF 約 24dB)を用いてフェーズドアレイ無線機を開発し、ビームステアリング実験を実施した。このフェーズドアレイ機構と円筒型レンズアンテナと組み合わせることで、ビーム入射方向を任意に制御するビームステアリングを可能としている。この実験結果より、開発したフェーズドアレイ無線機によるビームステアリング技術の実証に成功した。 $\pm 14^\circ$ のビームステアリングを達成しており、本課題研究で目標とした $\pm 5^\circ$ のビーム制御を超える成果が得ることができた。

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、公募を行う際に定められた基本計画書に記載された目標指数や、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を基に、専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合(第115回)」(令和5年6月)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を確実に確立しており、また、ITU-T における寄書提案を行うなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められる。

主な指標	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	合計
査読付き誌上发表論文数	0件(0件)	1件(0件)	2件(1件)	4件(4件)	7件(5件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0件(0件)	4件(4件)	19件(19件)	10件(10件)	33件(33件)
その他の誌上发表数	1件(1件)	1件(0件)	2件(0件)	0件(0件)	4件(1件)
口頭発表数	2件(0件)	22件(5件)	34件(9件)	33件(5件)	91件(19件)
特許出願数	1件(0件)	10件(0件)	10件(0件)	3件(0件)	24件(0件)
特許取得数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)
国際標準提案数	0件(0件)	15件(15件)	18件(18件)	11件(11件)	44件(44件)
国際標準獲得数	2件(2件)	0件(0件)	0件(0件)	3件(3件)	5件(5件)
受賞数	1件(0件)	2件(0件)	3件(1件)	1件(1件)	7件(1件)
報道発表数	0件(0件)	0件(0件)	1件(0件)	0件(0件)	1件(0件)
報道掲載数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上发表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む)を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集(電子媒体含む)に掲載された論文等(ICC、ECOC、OFCなど、Conference、Workshop、Symposium等でのproceedingsに掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。)を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等(電子情報通信学会技術研究報告など)は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上发表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等(査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む)を計上する。

注5：PCT(特許協力条約)国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何カ国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	<p>2018年12月に8Kの実用放送が始まり、今後は8K等の高精細度映像の普及が加速していくものと考えられる。高精細度映像の利用はテレビ放送に限らず、医療現場における早期診断・早期治療やヘッドセットディスプレイ、e-sports等多くの分野への応用が期待されているが、映像伝送インターフェースが有線であることによる制約が存在する。また、特に医療分野やヘッドセットディスプレイへの応用では、自由な動きを制限しないという観点から無線化の要求は高い。高精細度映像はデータ量が膨大になるため、これをマイクロ波などで無線伝送する場合には必ずデータ圧縮する必要があり、データ圧縮に伴う遅延や消費電力の増大が問題となる。このような問題を解消するには超高精細度映像のような大容量映像を非圧縮で無線伝送する技術が必要である。これを実現するためには現在周波数割当がされておらず、広い帯域を確保できる275 GHz以上の周波数帯を含む高周波数帯を用いて、超高精細度映像を圧縮処理の大きな負荷をかけずに、低消費電力で無線伝送することが可能な無線伝送システムの研究開発が必要になる。</p> <p>また、政策的位置付けとして、「未来投資戦略2018」（平成30年6月15日閣議決定）、「世界最先端IT国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画」（平成29年5月30日閣議決定）において、4K・8K等の高度な映像・配信技術の利用や8K等高精細映像技術の医療応用の推進について掲げられている。</p> <p>本研究開発によって得られた大容量映像を非圧縮で無線伝送する技術により、8K等の高精細度映像機器およびコンテンツの普及を進めることで国民が享受する情報通信の価値を高めるとともに、我が国の産業振興を見込めることから、必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>複数者の保有する得意な技術を持ち寄り、国際競争に勝てる最先端技術を集積することで1者単独開発では難しい効率的かつ迅速な研究開発を可能とした。各者の代表研究者・実務担当者が集まってプロジェクト推進会議等を開催し、各者の進捗状況や課題を共有・調整して迅速に判断する体制の下で研究開発を推進した。また、各課題について、年に2回程度、外部の有識者と研究受託者から構成される運営委員会を開催し、研究進捗や進め方に対して適切な助言・提言を頂くことにより、研究開発の効率的な運用を行った。</p> <p>委託経費の執行に当たっては、事前に予算計画書を確認するとともに、年度途中及び年度末に経費の執行に関して、総務省担当職員が詳細な経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有した監査法人に経理検査の補助を依頼し、経費執行の適正性・効率性を確保している。</p> <p>以上より、当初予算計画に対して当初目標の仕様を大幅に上回る機能・性能を達成し、効率性の高い研究開発成果を創出できたことから、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発は、300 GHz帯のテラヘルツ波を用いた無線通信システムにおいて、ビーム制御機能等の技術を確立することにより、高周波数帯における移動体無線通信を可能にするものである。また、具体的に高精細映像伝送を対象とし、そのためのベースバンド処理部の開発を含んでいる。本研究開発で取り組むビーム制御技術は、300 GHz帯といった高い周波数ではほぼ前例の無い取り組みであり、レンズとフェーズドアレーの技術を組み合わせることで実現しようとしている。ここで開発された技術をテラヘルツ波用装置全般に展開できれば、テラヘルツ波無線システムの今後の発展に大きく寄与することができる。将来的に想定される具体的な製品・サービスとしては、以下のように超薄型8Kテレビや映像コンテンツ制作機器、新型エンタテインメント等が挙げられる。本研究開発はこのようなユースケースの実現に寄与するものであり、有効性があったと認められる。</p> <p>○ 超薄型8Kテレビ</p> <p>テレビのディスプレイは、近い将来に壁面一体型や窓枠一体型といった超薄型パネルが実用化される。この場合、超薄型パネルには直接搭載できる部品に制限があるため、チューナと録画（メモリ）機能は別筐体となる可能性が高い。ディスプレイと別筐体の間は遅延のない伝送が求められ、8Kを非圧縮で伝送するためにはテラヘルツ無線が有望である。テレビ映像の無線伝送については、過去にもマイクロ波やミリ波での実用化が検討されたが、主流に至らなかった経緯がある。しかし、近年になって従来にないディスプレイパネル形状の薄型化が進んでおり、これまでの状況と異なり無線化が真に望まれる状況となりつつある。</p> <p>○ 映像コンテンツ制作現場・機器</p> <p>カメラから映像サーバへの映像データ伝送は、現在、有線接続が主流であるが、無線化によって配線の取り回しの制約が軽減される。中継車内の装置間の伝送が無線化できれば、相当な重量を占めているケーブルを廃して大幅な軽量化が達成できる。</p> <p>○ 新型エンタテインメント</p> <p>AR (Augmented Reality), VR (Virtual Reality)において、没入感を高めるために高精細映像を低遅延で伝送する必要があり、ゴーグルへの映像伝送を無線化することで移動性や装着感の向上を図ることができる。</p>
公平性	<p>本研究開発の成果である集積電子デバイスによる大容量映像の非圧縮低電力無線伝送技術は、我が国の社会・経済活動を支える情報通信インフラの持続的な維持・発展に貢献できるものであり、受託者</p>

	<p>や関係者のみならず、広く国民に利益が享受されるものである。</p> <p>また、支出先の選定に当たっては、実施希望者の公募を広く行い、研究提案について外部専門家から構成される評価会において最も優れた提案を採択する企画競争方式を採用したことから、競争性を担保している。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>8K 高精細・高分解映像はより美しい映像を視聴できるという以上に医療分野やバーチャルリアリティ等の分野などで大きな意味を持ち、実際に内視鏡手術などの臨床手術などに活用され始めている。しかしながらこれらの応用では有線であることのデメリットも大きく、今後の発展のためには高精細度映像の無線伝送技術の確立が喫緊の課題となっており、光アクセス網においても多様化する通信需要をより効率的に収容することが必要とされていた。</p> <p>また、275 GHz 以上の未割当周波数帯は現在 ITU-R において割当ての検討が行なわれている段階であり、各国においても国家プロジェクトとして大規模かつ戦略的な研究開発が行われているところ、ITU-R 等において国際標準化競争が展開されており、我が国が世界において優位性を確保するためにも優先的にこれに取り組む必要があった。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

8K 等の高精細度映像の利用はテレビ放送に限らず、医療現場における早期診断、早期治療やヘッドセットディスプレイ、e-sports 等多くの分野への応用が期待されているが、映像伝送インターフェースが有線であることによる制約が存在する。また、医療分野やヘッドセットディスプレイへの応用では自由な動きを制限しないという観点から無線化の要求は高い。データ量が膨大な高精細度映像をマイクロ波等で伝送する場合にはデータ圧縮する必要があり、圧縮に伴う遅延や消費電力の増大が問題となる。このような問題を解消するには超高精細度映像のような大容量映像を非圧縮で無線伝送する技術が必要である。これを実現するためには、現在周波数割当がされておらず広い帯域を確保できる 275 GHz 以上の高周波数帯を用いた無線伝送システムの研究開発が必要となっている。

本研究開発においては、アンテナシステム、8K インターフェース及び無線信号処理の各要素技術を確立することにより、高周波数帯を用いた 50 Gbps 程度の無線伝送を実現し、膨大な映像データを非圧縮で伝送することで、電力を削減しながら大容量映像のデータを 1ms 程度の低遅延で伝送することを可能にした。これにより、超高精細度映像の無線伝送への対応をマイクロ波やミリ波で行った場合の周波数ひっ迫の深刻化を回避するとともに、未利用周波数帯である高い周波数帯の利用促進を図ることが期待される。また、外部有識者からなる評価会において、本研究開発の成果技術は新たなサービスを生み出す基盤となるものであることから、総合的に見て有益であった旨の評価を得ていることもあり、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

評価結果を踏まえ、今後は受託者において本研究開発を進めるとともに、国の後継プロジェクト等を活用してさらなる技術の発展を目指す。引き続き知財確保や標準化活動を推進することで、高周波数帯における無線伝送技術の国際的優位性を目指すとともに、これらについて追跡調査等でフォローアップしていく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合（第115回）」（令和5年6月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・300GHz 帯非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発として、FPGA に機能を実装し、TX/RX を設計／試作し、50Gbps/0.052ms/0.98W と目標達成している。また、10 度程度のビーム方向制御が可能となる円筒型・円形型レンズを用いたメカ・フェーズドアレーハイブリッドビーム走査アンテナと円形型レンズを用いた高利得40dBi 固定ビームアンテナを開発、34.56GHz 帯域、毎秒25G サンプルの変調信号を処理可能な送受信回路を実現、16 度のビーム制御、20m 伝送、8K 映像伝送等を実験で確認し、目標を達成している。計画通り研究開発がなされており、予算は効率的に使用されたと思われる。また、標準化活動として、ITU-R WP5A では、レポート M.2417-0 の改定案を提案、WP5C では、レポート F.2416-0 の改定案を提案している。APT-AWG では「252-296GHz 帯で運用するポイント・ツー・ポイント型無線通信システム」に関するレポート作成に向けた作業文書の提案を行った。IEEE802.15. TG3mb において、IEEE Std 802.15.3d-2017 の周波数帯の拡張(252-325GHz→252-450GHz)、変調方式の拡張等の改正作業を実施している。以上、総合的に見て有益であったと思われる。
- ・8K 等の超高精細度映像を低遅延、低消費電力で無線伝送するために、未割当周波数帯を含む高周波数帯を用いて 50Gbps 程度の伝送速度を実現し、大容量映像のデータを非圧縮で伝送することで、圧縮・伸張に要する電力を削減しつつ 1ms 程度の低遅延を実現するための研究開発である。50Gbps の通信速度、0.1ms 以下の遅延、1W 以下の消費電力を持つベースバンド (BB) 送受信回路を開発し、目標に合致したアンテナモジュール、RF 回路を開発しており、各研究課題とも目標を達成している。本研究開発の成果技術をテラヘルツ波用装置全般に展開すれば、テラヘルツ波無線システムの今後の発展に大きく寄与すると想定され、本研究開発は有益であったと判断する。

7 評価に使用した資料等

- 未来投資戦略 2018-「Society 5.0」 「データ駆動型社会」 への変革-（平成 30 年 6 月 15 日 未来投資会議）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_zentai.pdf
- 世界最先端 IT 国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成 30 年 6 月 15 日閣議決定）
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180615/siryoul.pdf>
- 電波資源拡大のための研究開発の実施
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>
- 平成 31 年度における電波資源拡大のための研究開発及び異システム間の周波数共用技術の高度化に関する研究開発の基本計画書（案）に対する意見募集の結果及び提案の公募（基本計画書）
https://www.soumu.go.jp/main_content/000606922.pdf

令和 5 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：サイバーセキュリティ統括官室

評価年月：令和 5 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

電波の有効利用のための IoT マルウェア無害化／無機能化技術等に関する研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

令和 2 年度～令和 4 年度（3 か年）

・実施主体

国立大学法人横浜国立大学
国立研究開発法人情報通信研究機構
国立大学法人九州大学
国立大学法人神戸大学
学校法人早稲田大学
株式会社セキュアブレイン
ジャパンデータコム株式会社

・総事業費

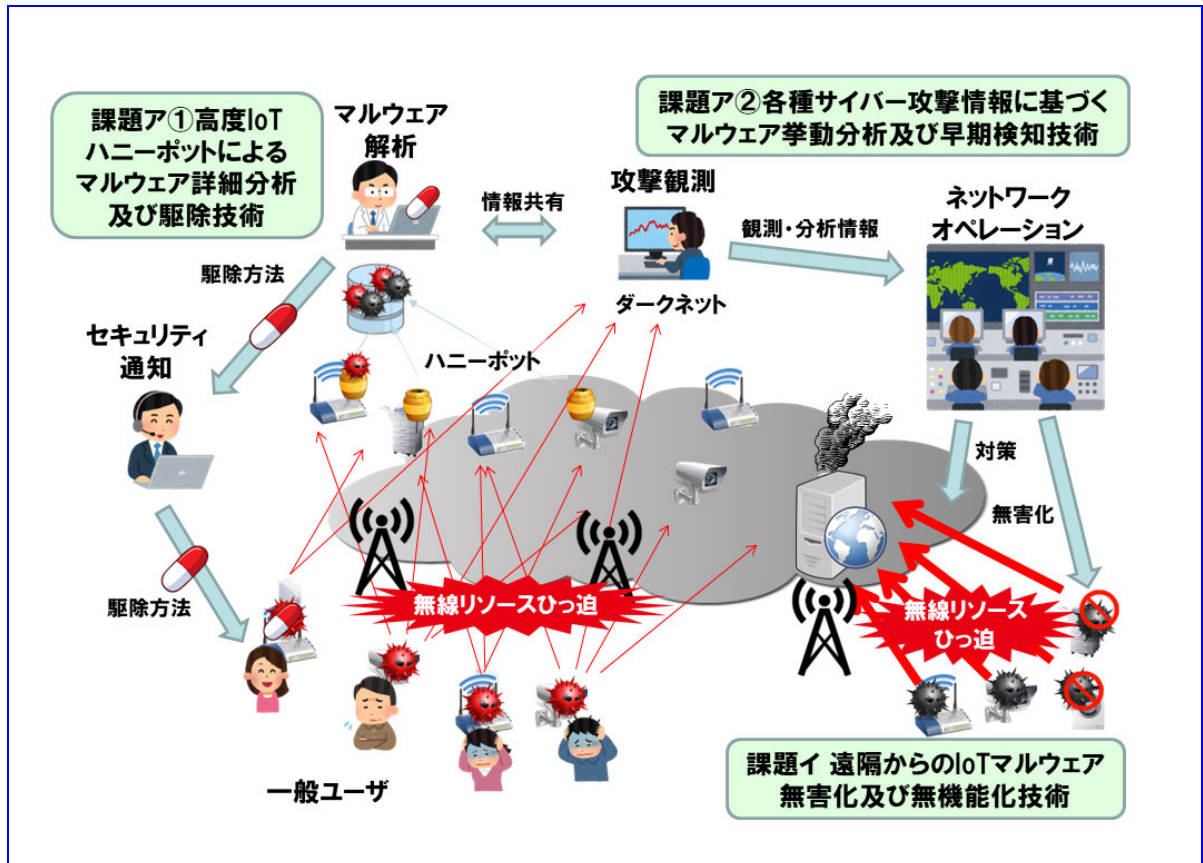
1,062 百万円

令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	総 額
379 百万円	354 百万円	329 百万円	1,062 百万円

予算要求段階では総額 10 億円超となるか未定だったため、事前事業評価は未実施。

・概 要

多様化・高度化する IoT 機器への攻撃の中で、特に多発している IoT マルウェアによる分散型サービス妨害攻撃 (DDoS 攻撃) では、攻撃による不正・不要・不健全な無線通信の急激な発生に伴う無線リソースのひっ迫が懸念されている。そこで、本研究では、IoT マルウェアの収集・分析に必要なシステム及び IoT マルウェアの収集、分析、駆除技術を開発する。また、攻撃行動の全体像を把握するために多角的な研究を行い、各成果を連携した統合分析プラットフォームを構築し、さらに、IoT 機器における IoT マルウェアの活動を阻止する無害化技術や、IoT 機器を遠隔制御（システム停止を含む）する IoT システム無機能化（機能停止）技術を開発し、攻撃による無線リソースのひっ迫の解消に資する。



技術の種類	技術の概要
<p>ア①高度 IoT ハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術</p>	<p>ア①(a)：高度 IoT ハニーポット</p> <p>高度 IoT ハニーポットのアーキテクチャは、攻撃傾向観測機能、応答収集機能、攻撃観測機能の3つの機能から構成される（図1）。攻撃傾向観測機能は、アクセスされたHTTPパスを監視することで、新たな攻撃対象を特定する。具体的には、新たに閾値以上のIPアドレス（攻撃者と想定）からアクセスされたHTTPパスを新たな攻撃対象とみなす。新たな攻撃対象が特定されると、応答収集機能は、そのHTTPパスを持つIoT機器をインターネットから見つけ出す。</p> <p>そして、特定したデバイスからそのHTTPパスに関連する応答（HTTPヘッダーとボディ）を取得し、データベースに記録する。最後に、攻撃者がハニーポットにアクセスすると、攻撃観測機能は、HTTPパスに基づき、IoT機器の応答を攻撃者に返す技術。</p> <p>ア①(b)：IoT マルウェア詳細分析及び駆除技術</p> <div data-bbox="890 1178 1390 1496" data-label="Diagram"> </div> <p>図1：高度 IoT ハニーポットのアーキテクチャ</p>

	<p>適応的 IoT サンドボックスにて高度 IoT ハニーポットや VirusTotal 等で収集された IoT マルウェア検体の分析を行い、持続感染性の有無を判定する。その上で、持続感染分析用テストベッドに実機を配置し、IoT マルウェアの駆除手法を検討、試行し、駆除方法を確立させる技術 (図 2)。</p> <p>ア①(c) : IoT マルウェア対策による通信抑制推定技術 ISP (インターネットサービスプロバイダー) 毎の注意喚起シミュレータ、ワイブル分布に基づく数理モデルを用いたマルウェア生存率及び削減率の線形予測シミュレータの実装と、攻撃データの実測値を用いた検証による、通知周期や注意喚起の割合を ISP 規模毎に可変とした、通常時及びパンデミック時の高精度マルウェア削減率及び不正通信削減率の予測技術。</p>
<p>ア②各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術</p>	<div data-bbox="868 129 1422 584" data-label="Diagram"> <p>図 2 : IoT マルウェア詳細分析システム</p> </div> <p>ア②(a) : マルウェア活動の早期発生検知技術 マルウェアが活動の初期段階でスキャン活動を行うことに着目し、新たなマルウェア活動の兆候を可能な限り早期に検知する技術。</p> <p>ア②(b) : サイバー攻撃の実態把握による対策支援技術 IoT マルウェア検体やその通信の挙動をより長期的に動作させる攻撃実態を観測する技術、マルウェアの通信の中から C&C 通信(マルウェア制御通信)を判別する技術。</p> <p>ア②(c)-1 : セキュリティアラートの重要度診断・スクリーニング技術 セキュリティ情報イベント管理機器(SIEM)が検出・発行する様々な種類の多数の異常アラートから、対応が必要な重要なアラートを機械学習を用いて自動的に抽出する技術。</p> <p>ア②(c)-2 : 仮想統合セキュリティアプライアンスの構築 既存のネットワーク侵入検知システム (NIDS) はそれぞれ偏った特性があるため、通常は一つの組織で複数の NIDS を運用することが多い。こうした NIDS の使用形態の簡略化を目的とした、複数の既存 NIDS の特長を併せ持つ単一の NIDS を機械学習によって構築する技術。</p> <p>ア②(d) : 機械学習による IoT マルウェアの機能分析・分類技術 増加し続ける IoT マルウェアの状況に対応するため、多量のマルウェア検体群を生物学で用いられる進化系統樹を利用したクラスタリング (分類技術) と、亜種がもつ特徴的な機能を抽出するために、関数列呼び出しグラフ (FCSG) という知識表現法を用いて機能分析する技術。</p> <p>ア②(e)-1 : 脅威情報・脆弱性情報からのインテリジェンス情報の抽出技術 脆弱性情報の識別子 (CVE-ID) から MITRE ATT&CK のデータを引き出すなど、ある脆弱性情報からそれに関係する攻撃手法や攻撃者集団等の情報を自動的に導出する技術。</p> <p>ア②(e)-2 : 時系列マッピングに基づく攻撃分析技術 ランキングに基づく検索に加えて、個々の情報を適切な空間に配置して可視化することにより、文書間の関係の経時的な変化を追跡する方法論を構築する技術。</p> <p>ア②(f) : Hybrid 攻撃分析プラットフォームの構築</p>

	<p>近年のマルウェア挙動の多様化・高度化を踏まえ、IoT マルウェアの解析に特化し、ダークネット/ライブネット、ハニーポット、インテリジェンス情報など複数のデータソースからビッグデータとしてデータを収集・蓄積し、前出の各種の解析エンジン（ア②(a)-(e)）を用いて並列に解析し、解析結果を連携・統合する。統合された分析結果は、Web ページ上で段階的詳細化がなされる形で一覧表示される技術（図3）。</p> <div data-bbox="762 129 1433 481" data-label="Diagram"> </div> <p>図3：ハイブリッド攻撃分析プラットフォーム</p>
<p>イ①:IoT マルウェア無害化技術（無害化：マルウェアの機能のみを停止させること）</p>	<p>イ①(a)：IoT マルウェア無害化情報自動抽出システムの開発</p> <p>IoTマルウェアには無害化に用いる情報（無害化情報）が当該 IoT マルウェアに搭載されているものが多数存在している。この情報を利用し、実際の C&C サーバ（マルウェア制御用サーバ）に代わって無害化情報を配信することで、IoT マルウェアを無害化することを目指し、これら多数の IoT マルウェアから無害化情報を自動的に抽出する技術（図4の右側）。</p> <div data-bbox="938 698 1412 1041" data-label="Diagram"> </div> <p>図4：IoT マルウェア無害化技術の全体像</p> <p>イ①(b)：IoT マルウェア無害化システムの開発</p> <p>検知、ルーティング、無害化情報配信の3つのモジュールで構成される IoT マルウェア無害化システムにて、イ①(a)で取得した無害化情報を配信することでIoT マルウェアを無害化する技術（図4の左下）。</p> <p>イ①(c)：IoT マルウェア無害化システムの総合評価技術</p> <p>既存のネットワークシミュレータである ns-3 をベースに、IoT 機器や IoT マルウェアの通信挙動をシミュレートする大規模ネットワークを疑似的に構築し、IoT マルウェア固有の動作をプラグインとして追加することで多種多様なマルウェアをシミュレーションし、IoT マルウェア無害化の効果を評価する技術（図4の左上）。</p>
<p>イ②:IoT マルウェア無機能化技術（無機能化：IoT 機器を安全に停止させること）</p>	<p>イ②(a)：無機能化アルゴリズム基礎技術</p> <p>遠隔からネットワーク内で緊急対応が必要になった IoT 機器（群）や、撤去・廃棄の対象となった IoT 機器（群）の機能を安全に停止させるという IoT システムの無機能化機能を実現する、放送型認証*方式(BA：Broadcast Authentication)を採用した高機能認証技術。</p> <p>*放送型認証:ブロードキャスト通信路を介して受信者全員に同じ制御用データを送りながらも、任意の受信者集合の一部だけが制御コマンドを受信する機能を実現できる技術。</p> <p>イ②(b)：無機能化の実装に向けた応用技術</p> <p>イ②(a)で開発したアルゴリズムを実装した遠隔安全停止システムを構築し、プロトコル評価を含めたシステム構築に関する実証評価を通して 99%以上の実装・実現精度で安全に遠隔から機能停止する技術。</p>

・スケジュール

課題	R2年度	R3年度	R4年度
課題ア①高度IoTハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術			
課題ア①(a)高度 IoT ハニーポット開発	方式検討・プロトタイプ開発、試験運用	広域展開 本実装、機能改善	本運用
課題ア①(b) IoT マルウェア詳細分析及び駆除技術の開発	方式検討・プロトタイプ開発、実証	本実装、評価	総合評価、手法改善
課題ア①(c) IoTマルウェア対策による通信抑制効果の推定	セキュリティモデルとシミュレータ構築	観測データからのパラメータ算出	通信抑制効果の推定
課題ア②各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術			
課題ア②(a)マルウェア活動の早期発生検知技術	方式検討・プロトタイプ開発、方式評価	本実装、試験運用、機能改善	総合評価、手法改善
課題ア②(b)サイバー攻撃の実態把握による対策支援技術	方式検討・プロトタイプ開発、試験運用	本実装、機能改善	総合評価、手法改善
課題ア②(c)セキュリティ機器からの異常検知情報のアグリゲーション	方式検討・プロトタイプ開発、方式評価	本実装、試験運用、機能改善	総合評価、手法改善
課題ア②(d)機械学習によるIoT マルウェアの機能分析・分類技術	先行研究調査、プロトタイプ開発	機能改善、機能分析と分類の統合、試験運用	総合評価、手法改善
課題ア②(e)インテリジェンス情報に基づく攻撃情報の導出技術	先行研究調査、方式検討・プロトタイプ開発	機能統合、機能改善	総合評価、手法改善
課題ア②(f) Hybrid 攻撃分析プラットフォーム構築	連携技術の方式検討、初期プロトタイプ開発	統合実装、試験運用	統合化総合評価、手法改善
課題イ①IoTマルウェア無害化技術			
課題イ①(a) IoTマルウェア無害化情報自動抽出システムの開発	方式検討、モジュールの試作、機能検証 マルウェア調査分析、高度化手法検討	機能改良、システム化、疑似検体試作、手法検討	運用、評価
課題イ①(b) IoTマルウェア無害化システムの開発	方式検討、モジュールの試作、機能検証 C&Cサーバ調査、加害阻害手法検討	機能改良、システム化、模擬C&Cサーバ試作、手法改良	検証、評価
課題イ①(c) IoTマルウェア無害化システムの総合評価	評価方式検討、大規模IoTシミュレータ開発	大規模IoTシミュレータ評価、改良	通信抑制効果の検証
課題イ②IoT マルウェア無機能化技術			
課題イ②(a)無機能化アルゴリズム基礎研究	セキュリティモデルの確立	アルゴリズムの構築	アルゴリズムの適用性評価、改良
課題イ②(b)無機能化の実装に向けた応用研究	プロトタイプ開発	実証システム開発、改良	実証評価、まとめ

(2) 達成目標

本研究開発では、IoT 機器の急速な普及に伴う近年の多様な通信環境において、セキュリティ上の問題により発生する不正・不要・不健全な無線通信トラフィックに対応するため、①サイバー攻撃データやマルウェア解析に基づく、IoT マルウェアの挙動検知及び駆除技術、②マルウェアに感染した IoT 機器を安全に無害化・無機能化技術をそれぞれ確立し、無線通信リソースの効率的かつ安定的な利用環境を提供することで、無線リソースのひっ迫を抑止し電波の有効利用を図る。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT 政策） 政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
サイバーセキュリティ戦略（令和3年9月28日）	4.4.横断的施策 4.4.1 研究開発の推進 (2) 実践的な研究開発の推進 ③ 攻撃把握・分析・共有基盤の強化」として ・サイバー攻撃の巧妙化・複雑化・多様化や、IoT 機器の普及に伴う脆弱性拡大等のサイバー攻撃の脅威動向に適切に対処するため、AI 等の先端技術も活用しつつ、サイバー攻撃の観測・把握・分析技術や情報共有基盤を強化する。
電波有効利用成長戦略懇談会 報告書（平成30年8月31日）	第2章 電波利用の将来像と実現方策 5. ワイヤレスがインフラとなる社会の実現に向けた取組 (2) ワイヤレス成長戦略政策パッケージ (ア) 技術を創る（研究開発プロジェクト、実証・イノベーション）

	ン等) ⑥ 高い信頼性を備えたワイヤレス環境 ・IoT 無線機器の爆発的な普及に伴い、IoT 無線機器の認証データの増大による無線ネットワークへの負担増大や、IoT 無線機器がDDoS 攻撃等の踏み台として悪用されるセキュリティ脅威等が増大している。このため、安全・安心なワイヤレス環境の実現に向けた、サイバーセキュリティに関する研究開発等を推進することが必要である。
サイバーセキュリティ戦略（平成 30 年 7 月 27 日）	4.4. 横断的施策 4.4.2. 研究開発の推進 (1) 実践的な研究開発の推進 ・我が国が、サイバー攻撃に対する検知・解析能力を含むサイバー空間の状況把握能力を高め、防御等の対処能力や強靱性の確保等サイバー空間における安全保障の確保にも資する研究開発を推進する。具体的には、政府機関や企業等の組織を模擬したネットワークに攻撃者を誘い込み、攻撃活動を把握することや、ネットワーク上の脆弱な IoT 機器の調査のための広域ネットワークスキャンの軽量化を目指した研究開発等を進める。
サイバーセキュリティ研究・技術開発取組方針（令和元年 5 月 17 日）	4. 今後の取組強化の方向性 ③ 攻撃把握・分析・共有基盤の強化 ・サイバー攻撃の巧妙化・複雑化・多様化や、IoT 機器の普及に伴う脆弱性拡大等のサイバー攻撃の脅威動向に適切に対処するため、AI 等の先端技術も活用しつつ、サイバー攻撃の観測・把握・分析技術や情報共有基盤を強化する。

(3) 目標の達成状況

本研究開発では、高度 IoT ハニーポットによる攻撃観測に基づき、90%以上の精度で持続感染性の有無を判定する技術を確立し、評価対象に対し 70%以上の成功率で駆除する技術を確立した。この技術を用いて、約 6 割の感染 IoT マルウェアを駆除し、大規模感染インシデント時に発生する DoS トラフィックを約 6 割削減させる目標に対し、6 割以上の通信を削減するために必要な感染ユーザへの通知手段を明らかにし、全体として目標を上回って達成した。

各種サイバー攻撃情報に基づく複数の分析結果及び課題ア①の分析結果を、機械学習等の技術を用いて多面的に統合・相関解析を行う技術を確立させることで、発生検知に要する分析時間を、従来の人手で行っていた時間の 3/10 以下に短縮する目標に対し、全体として目標を上回って達成した。

評価検証対象の IoT マルウェア検体群に対して、70%以上の精度で無害化情報の有無及びその抽出可否を判定した上で、抽出可能な情報を自動抽出する技術を確立し、無害化情報を抽出できた IoT マルウェアに対しては、90%以上の精度で実際に無害化を行う目標に対し、全体として目標を上回って達成した。さらに、緊急対応や廃棄対象の IoT 機器に対し、対象機器を遠隔から停止させる無機能化アルゴリズムとして、放送型認証方式を提案・開発し、具体的なユースケースを想定して、当該アルゴリズムの実装・システム化を実施した。具体的な実証実験を通して、100%の精度で安全に遠隔から対象の IoT 機器の無機能化を行うことを達成でき、99%以上の精度の目標に対し、全体として目標を上回って達成した。

技術の種類	目標の達成状況
ア①高度 IoT ハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術	ア①(a)：高度 IoT ハニーポット 高度 IoT ハニーポットの広域展開を行い、少なくとも 10 か国・地域に配置し、プロジェクト終了までに 10 種類以上の機器・脆弱性を狙った攻撃を観測する目標に対し、17 カ国・地域で観測を実施し、101 種類の脆弱性を狙った攻撃を観測し、目標を大幅に超えて達成した。 また、未分類の攻撃や脆弱性の分析、機器の拡張を行い、攻撃挙動の観測・分析手法の高精度化を検討する目標に対し、高度 IoT ハニーポットに 17,672 種類の機器応答を組

み込み、模倣可能な機器を大幅に拡張した。観測した攻撃を分析するプラットフォームを構築することで、攻撃挙動の観測・分析手法の高精度化を達成した。さらに攻撃コードのライフサイクルの一部を明らかにしたという目標以上の成果を得た。加えて、高度 IoT ハニーポットで収集したマルウェア検体を研究機関へ提供するウェブサイトを開設し、2023年3月31日時点で26か国138の研究組織、企業などにデータを提供した。また、高度 IoT ハニーポットのアクセス情報を、横浜国立大学が運営するマルウェア感染・脆弱性検査サービスに提供し、8万ユーザ以上のIoT機器のマルウェア感染診断に活用した。

ア①(b)：IoT マルウェア詳細分析及び駆除技術

(1) 持続感染分析用テストベッドに10種類以上の実機を配置する目標に対し、12種類配置することに成功し、目標を達成した。また、高度 IoT ハニーポットやVirusTotal等で収集されたIoTマルウェア検体の分析を行い、(2)90%以上の精度で持続感染性の有無を判定する目標に対し、41検体に対して92%の精度で持続感染の有無を判定し、目標を達成した。(3)70%以上の成功率で駆除する技術を確認する目標に対し、100%の駆除に成功し、目標を上回る成果を得た。

ア①(c)：IoT マルウェア対策による通信抑制推定技術

各ISPからのIoTマルウェア感染ユーザへの通知モデルを用いた注意喚起シミュレータと、IoTマルウェア生存率及び削減率の線形予測シミュレータを実装し、攻撃データの実測値による検証を行い、本手法の有用性を示した。図5は通知手段の違いによるIoTマルウェア削減率のシミュレーション結果を示したもので、中小規模ISPがメールのみの通知であっても、大規模ISPの1割がWalled garden等の通知手段による注意喚起を実施できれば、6割の不正通信の削減が達成可能であることを示した。

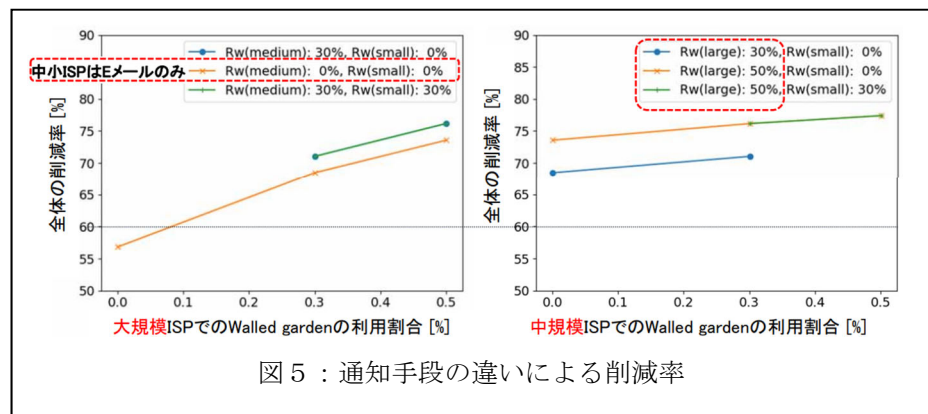


図5：通知手段の違いによる削減率

ア②各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術

ア②(a)：マルウェア活動の早期発生検知技術

マルウェア活動・サイバー脅威をリアルタイムに検知可能なエンジンを構築し、イベント検知率について、90%以上の検知精度を実現する目標に対し、再現率100%を達成し、また、アラート結果のリアルタイム提供を実現した。

また、主要イベントとは関係のない調査目的のスキャンパケット等を除外するための技術を確認し、誤検知数を令和2年度比で50%削減する目標に対し、約90%削減することができ目標を達成するとともに、その要素技術について特許を出願した。さらに、本研究開発の成果論文で使用したNICTER観測データ(ダークネット・トラフィックデータ)の公開を開始し、2023年3月31日時点で、国内外の5つの組織に提供した。

ア②(b)：サイバー攻撃の実態把握による対策支援技術

C&C通信(マルウェア制御通信)の判定手法の検知精度を向上させ、偽陽性率0.1%、偽陰性率10%を実現する目標に対し、C&C通信の判定手法の検知精度として偽陽性率0.000007%以下、偽陰性率0.009%以下を実現し、目標を上回る成果を得た。また、C&C通信の判定手法を長期動的解析システムに適用し運用を開始する目標に対し、120並列のシステムを構築し目標を達成した。さらなる研究成果として、C&C通信をエミュレートするMilkerを開発し、780個のC&Cサーバの長期観測を実現した。

ア②(c)-1：セキュリティアラートの重要度診断・スクリーニング技術

AIを活用した実用的なアラート選別・可視化システムを構築し、実際のSOC(セキュリティオペレーションセンター)運用環境でインシデント対応時間を50%削減する目標に対

し、重要度の高いアラートを再現率 99%にて検出する技術を構築し、重要度の低いアラートの 90%除外を実現し、実際のオペレーション環境に流れるデータを利用して有用性を評価した結果、検証すべきアラート数の 50%以上削減を実現し、目標を達成した。

ア②(c)-2：仮想統合セキュリティアプライアンスの構築

アプライアンスが生成するアラートの元となるトラフィックを分析し、アラート元を特定し、特定したアラートの特徴を学習することで、検知精度が高く、誤検知率及び見逃し率が増大しない仮想統合セキュリティアプライアンスを構築する目標に対し、アラートとイベントの関連付け方法を確立し、kitsune 特徴量とペイロード特徴量に基づく仮想統合セキュリティアプライアンスを実装し、T-Pot 観測データを用いて重要アラート(Nirvana-level 7 以上)を正解ラベルとした実環境評価で、F1 スコア※0.39 を獲得し、目標を達成した。(商用アプライアンスの最高値は 0.07 程度)

※F1 スコア:トレードオフ関係にある再現率と適合率のバランスを示す指標で、1 に近いほど性能が良いことを示す。

ア②(d)：機械学習による IoT マルウェアの機能分析・分類技術

マルウェア検体ファイル間の類似度に基づきマルウェアを分類する技術と、逆アセンブルによる機能推定技術を統合したシステムを開発し、精度を維持しつつ、20 万検体のクラスタリングを実現すると同時に、精度を保ったまま計算時間を 50%削減し、未知のマルウェアの機能を効果的に推定する手法を確立する目標に対し、進化系統樹を用いた分類手法と、クラスタ特徴を FCSG (関数呼び出し列グラフ)で表す手法を構築した。進化系統樹作成法を数十万件まで対応可能に拡張して 20 万検体の評価を実施し、オンライン方式により、精度を保ったまま計算時間を 50%以上削減できることを確認した。そして上記分類手法と機能解析を統合し、未知マルウェアの機能推定のための包括的システムにて推定が可能となり目標を達成した。

ア②(e)-1：脅威情報・脆弱性情報からのインテリジェンス情報の抽出技術

脅威情報や脆弱性情報を基に攻撃キャンペーンに関する情報などを導出する。数万件規模の文書データに対して精度を高く有意義な情報を抽出すると同時に、その処理に必要なコストを低減する技術を確立する目標に対し、脅威情報の分類手法と脆弱性情報の分類手法を開発、さらに NVD¹⁾や CWE²⁾ などの脆弱性情報のオントロジーを MITRE ATT&CK³⁾につながるように拡張し、攻撃の痕跡から脆弱性を持つ製品や攻撃キャンペーンの情報を現実的な時間で導出でき技術確立の目標を達成した。

- 1) 米国国立標準技術研究所 (NIST) が運営する脆弱性データベース
- 2) 米国の非営利団体 MITRE が運営する「共通脆弱性タイプ」
- 3) 米国の非営利団体 MITRE が分類したサイバー攻撃の戦術、技術のフレームワーク

ア②(e)-2：時系列マッピングに基づく攻撃分析技術

インテリジェンス情報が時系列としてどのように変化しているかを追跡する技術を確立し、実際のオペレータがより効率的に業務を実施するための技術基盤を構築することにより、オペレータがインテリジェンス情報の収集・整理に要する時間を 15%以上削減する目標に対し、確率的埋め込み技術、関連度による biplot 表示技術を開発し、実データに対して統計分析を実施し、攻撃分析のための視覚化と分析手法を評価した。その結果、Hybrid 攻撃分析プラットフォームとの連携により、マルウェアの変遷を追跡するいくつかの新しい事例を発見でき、時系列情報の経時変化を視覚化する技術としての成果を確認した。

ア②(f)：Hybrid 攻撃分析プラットフォームの構築

(a)-(e)で構築する各分析エンジンの連携を可能とした Hybrid 攻撃分析プラットフォームを設計、構築して (図 6 参照)、NICT が管理する Web サイト上に本システムを公開する目標に対し、各分析エンジンと連携するための API を整備し、実オペレーションに基づき連動分析シナリオを構築し、そのシナリオについて各分析エンジンを連動させて自動化を実現・実装して目標を達成した。さらには、「アプライアンス発行のアラート対応シナリオ」でオペレーション時間を 1/3 以下に短縮できることを確認した。内部向けと外部向けに別個のデモ・評価用 Web システムを用意して、有識者による評価・フィードバックを獲得し、目標以上の成果を上げた。



図6：プロトタイプシステムのスナップショット

イ①IoT マルウェア無害化技術

イ①(a)：IoT マルウェア無害化情報自動抽出システムの開発

実在する IoT マルウェア 1,000 種（亜種含む）を対象として、70%以上の精度で無害化情報の有無及びその抽出可否を判定し、抽出可能な情報を自動抽出する目標に対し、ア②(d)の技術と連携して無害化情報自動抽出技術を確立した。開発したシステムで実在する IoT マルウェア 4,953 検体（亜種含む）で評価を行った結果、77.04%の精度で無害化情報の有無及びその抽出可否を判定し、抽出可能な情報の自動抽出を実現し目標を達成した。また、今後取り入れられると考えられる高度な手法を実装した IoT マルウェアの疑似検体を 5 種程度試作し、それらへの対策を検討した上で、無害化情報の抽出、無害化の有効性を検証する目標に対し、5 種の疑似検体を試作し、各高度化手法に対応した対策を用いることで無害化の有効性を検証することができ、目標を達成した。

イ①(b)：IoT マルウェア無害化システムの開発

無害化情報の自動抽出が可能であった検体に対して、開発した IoT マルウェア無害化システムを用いて 90%以上の精度で無害化を行う目標に対し、Mirai、Bashlite 検体をあわせた無害化成功率で 96%を実現し、目標を達成した。加えて、イ①(a)で無害化機能がない、或いは無害化情報の一部しか抽出できない検体に対しても、準無害化（シンクホール方式）を検討・検証し、成功率 98.93%を実現した。また、C&C サーバ（マルウェア制御サーバ）の抑制・阻害手法を提案し、安全性や実現性等の観点から評価を行う目標に対し、C&C サーバの抑制・阻害手法を提案し、安全性・実現性の評価を実施したところ、93 種類のマルウェア（C&C サーバ）を全て無害化することに成功し、目標を達成した。

イ①(c)：IoT マルウェア無害化システムの総合評価技術

開発したシステムの総合評価を行い IoT 感染マルウェアに対し約 6 割を無害化することで、大規模感染インシデント時に発生する DoS トラフィックの約 6 割削減に貢献し、無線リソースのひっ迫の解消効果を示す目標に対し、実機・エミュレータ環境で Mirai のパラメータを実測し、大規模 IoT シミュレータを用いた評価を実施した。IoT 機器 1,000 台、ネットワーク数 25 の条件下で、ネットワークへの無害化適用率を 84%程度とすることで、悪性トラフィックの約 6 割削減が可能であることを確認し、目標を達成した（図 7）。

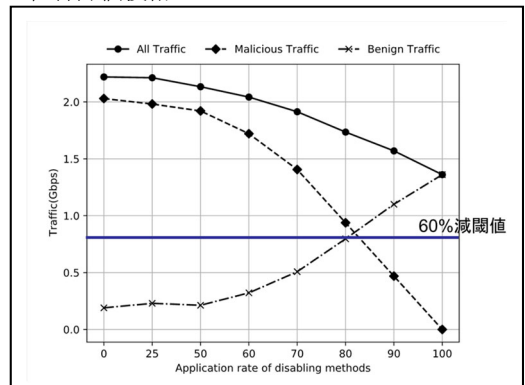


図7：無害化による悪性トラフィックの低減

イ②：IoT マルウェア無機能化技術

イ②(a)：無機能化アルゴリズム基礎技術

IoT 機器制御用アルゴリズムを確立し、想定するセキュリティモデルにおいて基盤アルゴリズムが理論的にほぼ 100%のセキュリティを達成する目標に対し、現代暗号学観点から放送型認証方式と呼ぶ高機能認証技術を世界で初めて提案し（図 8）、システム構成の開

発、及び評価を実施した。認証方式を構成する IoT 制御用アルゴリズムに対して、理論的にほぼ 100% のセキュリティを確保するための推奨パラメータを示し、その条件下で効率的に動作することを確認し、目標を達成した。さらに実用性観点から、軽量かつ高度な制御を可能とする基盤アルゴリズムを完成させた。

イ②(b)：無機能化の実装に向けた応用技術

課題イ②(a)で開発した安全に機能停止させるための暗号的な認証符号や認証アルゴリズムを実装した遠隔安全停止システム及びアルゴリズムの高精度の実装方法の追求のために実証実験システムを構築し、フィールド実証実験環境において、99%以上の実装・実現精度で安全に遠隔機能停止できることを示すことを目標に、遠隔安全停止システムを構築し、軽量認証に基づく放送型認証を実装しスマートファクトリーを想定とした実証環境で評価を行い、100%の精度で安全に遠隔から機能停止できることを確認し、目標を達成した。

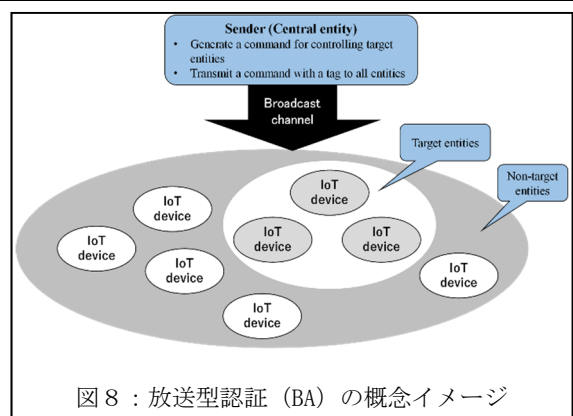


図 8：放送型認証（BA）の概念イメージ

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和 5 年 6 月 22 日)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績については下表の通り。

特に、無機能化のための放送型認証方式の提案(課題イ②(a))を柱として、そのユースケース分析(課題イ②(b))を含めた標準化提案を ITU-T SG17 に提出し、草案の内容として合意を得られた。また、IEEE S&P2022、ASIACCS2021 といった高難易度の採択などを含めた口頭発表数、特許出願件数も当初目標を大幅に上回っており、本研究開発の必要性、有効性が認められた。

主な指標	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	合計
査読付き誌上发表論文数	1 件 (1 件)	4 件 (2 件)	16 件 (14 件)	21 件 (17 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	2 件 (2 件)	22 件 (22 件)	27 件 (26 件)	51 件 (50 件)
その他の誌上发表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	4 件 (3 件)	4 件 (3 件)
口頭発表数	33 件 (2 件)	41 件 (6 件)	69 件 (9 件)	143 件 (17 件)
特許出願数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	3 件 (0 件)	4 件 (0 件)
特許取得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国際標準提案数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)
国際標準獲得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受賞数	1 件 (0 件)	8 件 (2 件)	3 件 (1 件)	12 件 (3 件)
報道発表数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	2 件 (0 件)

報道掲載数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)
-------	--------	--------	--------	--------

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上发表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等及び査読のある小論文、研究速報、レター等を含む)を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集(電子媒体含む)に掲載された論文等(ICC、ECOC、OFCなど、Conference、Workshop、Symposium等でのproceedingsに掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。)を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等(電子情報通信学会技術研究報告など)は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上发表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等(査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む)を計上する。

注5：PCT(特許協力条約)国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何カ国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」及び「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	<p>IoT マルウェアによる被害は近年顕著に増加しており、サイバーセキュリティ戦略(2018年7月閣議決定)などにおいても、IoTセキュリティ対策技術のための研究開発の重要性が指摘されている。</p> <p>本研究開発は、IoT マルウェアの無害化等による周波数の有効利用を実現する技術を開発するだけでなく、IoT環境におけるセキュリティの確保を通じて安全・安心な社会インフラの実現に資することから、研究開発すべき課題として着目した。</p> <p>また、民間が行うセキュリティ対策のうち、IoT機器のユーザがその対価を払うインセンティブがあるような脅威(例えば、プライバシー侵害や個人情報、オンラインサービスのアカウント情報の窃取など)に対しては、民間において対策導入が進む可能性があるものの、DDoS攻撃の踏み台や他機器への感染攻撃などのようにユーザ自身への被害が明確でないものについては、ユーザがコストをかけてまで製品を購入する状況にはなっておらず、民間としてのセキュリティベンダ側も本格的な対策技術の開発に踏み切れていない状況である。</p> <p>これらの点から本研究開発で取り組む先進的な技術は、国民の財産である電波資源の有効利用及び国民の生活インフラであるICT空間の安全・安心の確保に資するものであり、国が実施すべき研究開発として推進する必要がある。よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発を実施するに当たっては、IoTマルウェアの調査・解析及びその特性・性質に関する専門的知識や研究開発実績を有する受託者が、蓄積されたノウハウ・知見を有効に活用することで効率的で質の高い研究開発が進められた。</p> <p>また、実施期間中も受託各機関の研究代表者・実務者においては定期的に各機関の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。</p> <p>最後に、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>IoTマルウェアの挙動検知及び駆除技術及びマルウェアに感染したIoT機器を安全に無害化・停止する技術を確立することにより、不正な無線通信トラヒックの発生を抑止できるようになるため、IoT環境における無線リソース逼迫の解消に寄与することができた。</p> <p>また、学識経験者・有識者で構成される研究開発運営委員会を通じて、技術的内容だけでなく、研究</p>

	<p>成果の展開方策等についても議論をすることで、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。</p> <p>さらに、高度 IoT ハニーポットの攻撃観測結果やマルウェア解析結果を 26 か国 138 研究組織に提供し、一部のセキュリティ商品に実装されていること、本研究開発の技術を活用したマルウェア感染・脆弱性検査サービスを令和 4 年 2 月から開始し 9 万人以上の利用者があること、ITU-T において放送型認証方式の標準化提案を行っていること、計画を超える数の特許申請を行っていること等、実用化に向けて積極的な取組を行っている。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>IoT 機器は多くの分野で利用される一方、IoT 機器に感染して大量の不正な無線通信を行うマルウェアも増加傾向にあり、無線リソースの逼迫が懸念されている。本研究開発は、IoT 機器に感染するマルウェアの詳細分析技術の開発を行うとともに、IoT マルウェアの無機能化及び機能停止を実現するものであり、不正な無線通信トラフィックの発生を抑制し、電波の有効利用に大きく寄与するものであることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。</p> <p>また、本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>IoT 機器はネットワークとの常時接続性、軽量性、管理主体の曖昧さ等の特徴を有していることから、マルウェアに感染し易く DDoS 攻撃等の踏み台となって無線通信トラフィックを増大させ、他の無線サービスによる無線利用を阻害するおそれがある。近年では、このような IoT 機器を踏み台とした大規模な攻撃が度々確認されており、周波数の有効利用の観点から対策が急務となっている。本研究開発は、IoT 機器に感染するマルウェアの無機能化及び機能停止を実現し、IoT 機器へのマルウェア感染に起因するサイバー攻撃による無線リソース逼迫を低減し、健全な IoT 機器を有効に活用できる安心・安全な社会の実現に寄与するものである。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

本研究開発は、IoT 機器の急速な普及に伴う無線リソース逼迫の対策として、IoT マルウェアの検知及び駆除と IoT 機器の無害化・無機能化する技術の確立は必要性を十分に認めるところである。

IoT 機器の急速な普及に伴う無線リソース逼迫の対策として、高度 IoT ハニーポットによるマルウェア詳細分析及び駆除技術、各種サイバー攻撃情報に基づくマルウェア挙動分析及び早期検知技術、IoT マルウェア無害化技術、IoT マルウェア無機能化技術を確立することにより、無線リソースの有効活用に寄与しており、目標を達成することができた。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

- ・課題ア①：マルウェア収集、分析機構の運用を継続し、IoT におけるサイバー攻撃情報の収集・蓄積を図る。これらの情報をネットワークオペレータ、対策機関、研究機関等に提供すると共にマルウェア感染状態や脆弱性を診断するサービスを試験的に展開する。続いて、応用段階で展開するサービスの高度化や他のセキュリティサービスとの連携により、純国産サイバーセキュリティインテリジェンス提供サービスの実現を目指す。
- ・課題ア②：インテリジェンス収集、各分析エンジンを活用した分析結果の収集・蓄積を継続し、IoT におけるサイバー攻撃情報の収集・蓄積を図る。各分析エンジンの効果を継続してモニタリングし、改善に向けた応用開発を実施する。そして、マルウェア活動の発生検知精度の向上、攻撃検知アラートの品質向上、マルウェア進化系統樹の精度向上、インテリジェンス情報高度化等を実現する。続いて、応用開発を通じて収集、蓄積した情報等を外部で活用するサービスを実施する。ハイブリッド分析プラットフォームの分析起点となるダークネットトラフィック等についても、適切な形に加工してデータ公開を適宜実施する。プラットフォームを構成する技術についても、NICT 内部のオペレーションで利用可能な技術をツール化し、そのノウハウを外部機関等に

共有する。

- ・課題イ①：セキュリティ監視支援サービス提供に向けて、実用化に向けた技術提供形態を IoT 機器ベンダー等と検討し、明確化する。続いて、IoT 機器ベンダーの監視サービスの一部として、本無害化技術の技術供与を図る。複数の IoT 機器製品を監視して組織における IoT マルウェアの無害化を行うサービスへの展開を目指す。
- ・課題イ②：遠隔安全制御システムの技術サービスを利用する顧客、市場を発掘する。顧客への提供価値を見極め、付加価値の提供を期待できるサービス事業を特定して、無機能化デバイスの小型化や遠隔安全停止システムの高機能化を目指す。続いて、応用段階で進める小型化や高機能化について、これを特定のサービス供給用の実装することが必要で、これが実用化の鍵となる。応用段階で得たフィードバックを踏まえて想定されるユースケースにおける実証実験を少なくとも 1 件実施することを目指す。また、具体的なサービス提案ができるように準備を進める。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和 5 年 6 月 22 日）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ 目標をすべて達成している。無線リソースのひっ迫の解消効果を定量的に示していただけると、電波資源有効利用の観点ではより良い。サイバー攻撃は日々変化しているが、それらに対応する分析プラットフォームを作成して、情報提供を広く目指している点は高く評価できる。
- ・ 当初計画を超える性能が得られることを確認し、有効性を明らかにした。また著名な海外査読付き論文をはじめとして計画を上回る対外発表数を達成し、多くの受賞を得ている。
- ・ 効果の評価実験のためのテストベッドとマルウェア分析システムなど多数のシステムを短期間に構築して広範囲の検証を行っており、予算は効率的に使用されたと考えられる。
- ・ ITU-T での勧告を目指した取り組みなどが行われている。ハニーポットによる攻撃の観測結果や収集された検体の解析結果を対策機関や企業に提供し、一部のセキュリティ商品に実装されている点や、IoT 機器の脆弱性を IPA 経由でメーカーに届け出て脆弱性が修正された点なども評価できる。
- ・ 本研究開発は、IoT 機器の急速な普及に伴う無線リソース逼迫の対策として、IoT マルウェアの共同検知及び駆除と IoT 機器の無害化・無機能化する技術の確立を目標としたものであり、最終年度にあたる本年度は、各要素技術において、実装・評価を完了し、目標性能を達成している。また、積極的な学術面での取り組みに加えて、ITU-T への草案の提出や計画を超える 4 件の特許申請を行っており、社会実装に向けた取り組みも着実に実施している。本研究開発全体としては、目標性能を達成する成果と学術面での積極性が評価できる。一方で、具体的にどのようにサービスへ実装し、研究開発成果の付加価値を生み出していくかといった点が課題と思われ、我が国のセキュリティ産業の競争力強化の一環として、本技術成果に基づく具体的な取り組みを期待したい。

7 評価に使用した資料等

- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 <電波利用料>
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>
- サイバーセキュリティ戦略（令和 3 年 9 月 28 日）
<https://www.nisc.go.jp/pdf/policy/kihon-s/cs-senryaku2021.pdf>
- サイバーセキュリティ研究・技術開発取組方針（令和元年 5 月 17 日）
https://www.nisc.go.jp/pdf/council/cs/kenkyu/dail2/kenkyu_torikumi.pdf

○電波有効利用成長戦略懇談会 報告書（平成 30 年 8 月 31 日）

https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000273.html

○サイバーセキュリティ戦略（平成 30 年 7 月 27 日）

<https://www.nisc.go.jp/pdf/policy/kihon-s/cs-senryaku2018.pdf>

○＜基本計画書＞電波の有効利用のための IoT マルウェア無害化／無機能化技術等に関する研究開発
（令和 2 年 3 月 23 日）

https://www.soumu.go.jp/main_content/000677037.pdf

令和5年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局電波部移動通信課

評価年月：令和5年8月

1 政策（研究開発名称）

5G基地局共用技術に関する研究開発

2 研究開発の概要等

(1) 研究開発の概要

・実施期間

令和2年度～令和4年度（3か年）

・実施主体

民間企業

・総事業費

2,192百万円

令和2年度	令和3年度	令和4年度	総額
787百万円	731百万円	674百万円	2,192百万円

予算要求段階では総額10億円超となるか未定だったため、事前事業評価は未実施。

・概要

移動通信システムが様々な分野での活用が進み社会経済へ深く浸透していく中、移動通信トラフィックは毎年約1.3倍と加速度的に増加している。

第5世代移動通信システム（以下「5G」という。）の2020年以降の本格的なサービス展開に向けて、5G向けに割り当てられた6GHz以下や準ミリ波帯の周波数だけでは、一部地域において移動通信トラフィックを収容しきれない可能性があり、周波数のひっ迫が想定される。

また、より高度な5Gサービスの早期普及・展開のためには、都市部の駅のプラットフォームやショッピングモール、地下街など高トラフィックの予想されるエリアにおいては高密度な基地局設置が必要であるが、設置場所の広さなどの物理的制約等により複数周波数・複数オペレータ（キャリア）の5G基地局やアンテナを設置することが困難であり、一部の基地局では共用化が望まれている。一方、ルーラル地域においては、早期展開のために基地局や付帯設備の共用等を含む移動通信ネットワークの効率的な構築・運用が必要となる。

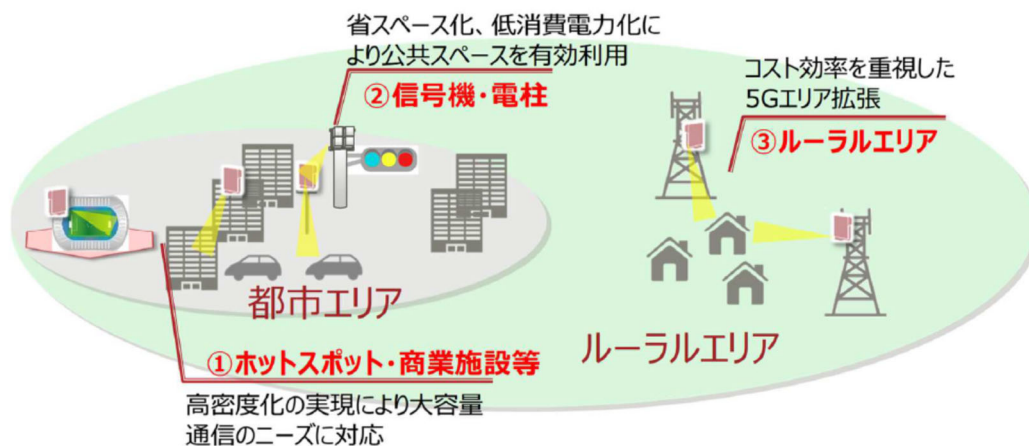


図1 基地局共用化ニーズの例

このようなことから、ひっ迫が予想される 6GHz 以下 (Sub6 帯) や準ミリ波帯の周波数の利用効率の向上、より高い周波数帯の利活用を促進することで 5G サービスの早期普及・展開を図り、また移動通信ネットワークの効率的な構築・運用にも資する技術として、基地局共用技術に関する研究開発を実施する。これにより、各周波数の基地局をキャリア毎に独立した場所に設置した場合と比べ、共用基地局をそれぞれの場所に設置し適切な干渉制御を行うことで、同じ周波数を異なる共用基地局で同時に使用可能になることから周波数の利用効率が 1.5 倍程度増大するとともに、準ミリ波帯及び将来 5G で割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯を含む高周波数帯の利活用を促進するものである。

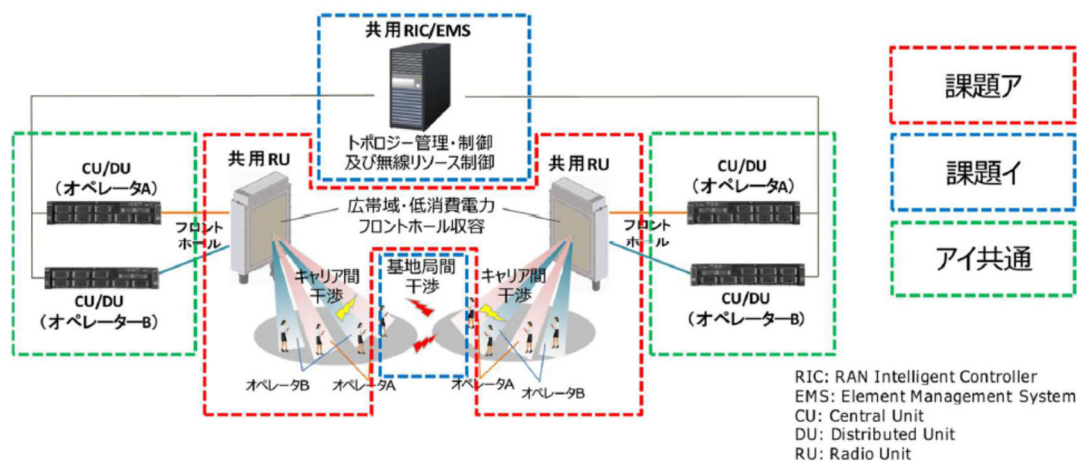


図 2 基地局共用の構成と技術課題

基地局共用を実現するためには、複数オペレータ (複数周波数) の広帯域な信号を扱うことができる共用無線基地局 (以下「共用 RU」(Radio Unit) という。) の開発が必要となる。1 つの装置に複数オペレータの RU を実装することになるため、共用 RU では小型化や低消費電力化が重要な技術課題となる。また、共用 RU では、アレイアンテナ構成に組み込まれた送信アンプの非線形ひずみなどにより、他のキャリアに割り当てられた周波数に発生する「キャリア間干渉」を低減することも重要な技術課題となる。

さらに、共用 RU を複数オペレータの基地局制御局 (CU/DU: Central Unit/Distributed Unit) と接続するためのフロントホールに関して、限られた帯域内でフロントホールを効率的に利用するためのトポロジー管理・制御が重要な技術課題となる。また、共用 RIC/EMS (RAN Intelligent Controller/Element Management System) により、共用 RU が高密度に設置されることによって生じる RU 間干渉の低減を含む無線リソース制御も周波数の利用効率を向上する上で重要な技術課題となる。

上記の課題に対し、技術課題ア「5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術」及び技術課題イ「有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術」について、研究開発を実施した。

技術の種類	技術の概要
技術課題ア： 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術	<p>本技術課題では、複数キャリア (オペレータ) の無線周波数の広帯域な信号を同時送信できる共用 RU を実現するために、キャリア間干渉抑圧技術を開発し、その評価を行った。加えて共用 RU の送信アンプの消費電力を低減するために、共用 RU に搭載するアレイアンテナの高利得化技術を開発し評価を実施した。</p> <p>また、共用 RU を実現するための複数フロントホールの収容する技術を搭載し、複数キャリアに対応したビームフォーミング技術を実装した共用 RU を設計・製造した。共用 RU の装置単体評価及びアンテナビームフォーミング動作検証を行い、複数のキャリア毎に異なる送受信動作が可能な共用 RU の検証を実施した。加えて、「有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術」のシステムと組合せて共用 RU を効率的に活用する無線通信システムを構築し、フィールド検証において複数キャリアの UE と同時接続の評価を実施し</p>

た。

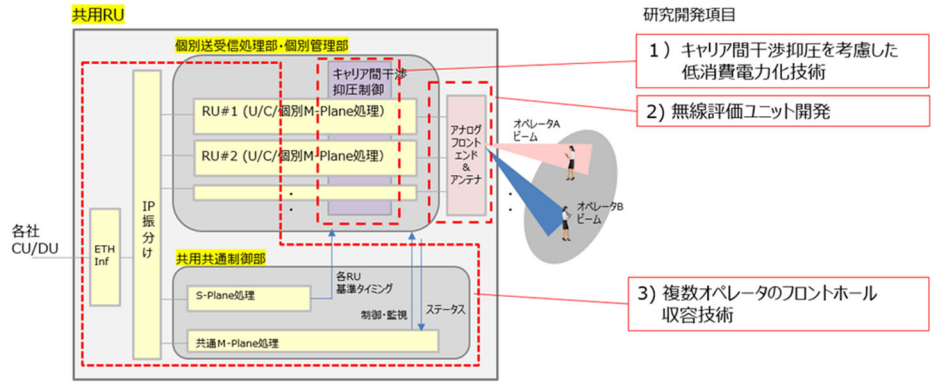


図3：共用RUイメージと研究開発項目

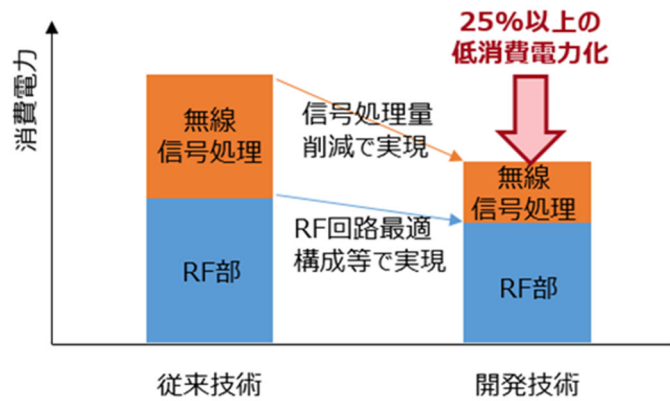


図4：消費電力低減対策

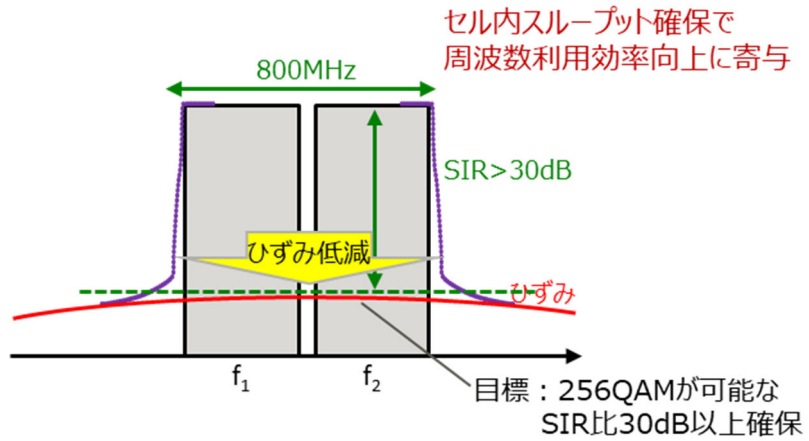


図5：キャリア間干渉低減対策

本技術課題では、キャリア間で協調した適切なトポロジー管理・制御と同時に適切な無線リソース制御を実現する統合的な制御技術を開発した。

具体的には、フロントホール帯域の制約を満たしつつ、複数地点の RU、複数キャリアへ周波数帯域幅などの無線リソース配分を最適化する統合無線リソース制御アルゴリズムの開発と計算機シミュレーションによる性能評価、O-RAN (Open RAN, Open Radio Access Network) 標準化を準拠しつつ独自 IF を追加した RIC を用いた制御アーキテクチャの検討と実験システムの開発、「5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術」で開発された共用 RU と本技術課題の制御技術を接続した実証実験を実施した。

技術課題イ：
有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

フロントホール容量増大を2倍以下に抑えつつ、システム容量を1.5倍以上改善

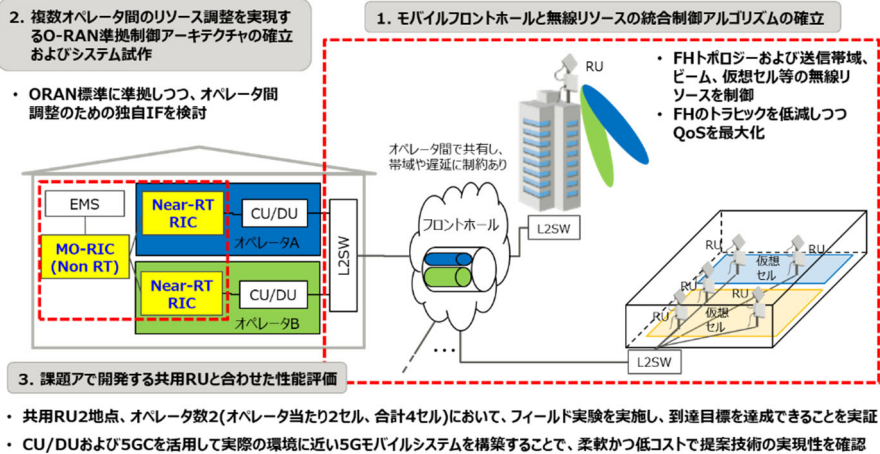


図6：有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

また、本技術課題では、上記アーキテクチャ検討の一部を、O-RAN で標準化するための提案活動を実施した。

・スケジュール

技術の種類	令和2年度	令和3年度	令和4年度
技術課題ア： 5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 干渉抑圧技術の基本方式の確立 ・ 実験評価系の準備 ・ 無線ユニット仕様検討・技術評価 ・ Sub6 帯共用原理試作装置の設計・製造 ・ 複数キャリア収容のためのフロントホールの方式仕様策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 干渉抑圧技術の基本方式の動作確認 ・ 準ミリ波帯の無線ユニットの性能効果の検証 ・ Sub6 帯共用 BF の検証 ・ 共用 RU の基本設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低消費電力・干渉抑圧効果の総合評価 ・ 共用 RU の製造・評価 ・ フィールド評価
技術課題イ： 有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 統合制御アルゴリズムの基本方式確立・評価 ・ キャリア間協調制御システムのアーキテクチャ策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 統合制御アルゴリズムの完成・評価 ・ キャリア間協調制御システムの動作確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・ フィールド評価

(2) 達成目標

技術課題ア：5G 基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術

準ミリ波帯においては2以上のキャリアの周波数帯域幅に対応する広帯域な RF デバイス・モジュールを搭載し、最大4キャリア毎に異なる送受信動作が可能な無線ユニット及びデジタル信号処理部などの研究開発を行う。その際、複数オペレータの無線ユニットの高効率化、対消費電力化などにより、従来の1キャリア分の周波数帯域幅の無線ユニット（一個）と比較して、例えば2キャリアに対応する場合、無線ユニットを用意すると消費電力は2倍に増えるが、これを2キャリア換算で消費電力1.5倍以下とすることを目標とする。

6 GHz 以下の周波数帯においても、同程度の広帯域化及び消費電力を低減することとする。

技術課題イ：有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

複数周波数・複数キャリアの基地局共用を実現する広帯域無線通信システムにおいて、地理的に異なる場所に配置したミリ波帯以上の超高周波数帯、あるいは準ミリ波帯、6 GHz 以下の複数の無線基地局を集約基地局から制御し、有線（光ファイバ）及び無線フロントホール、アクセスリンクを統合したトポロジー管理・制御を行うアルゴリズム及び高密度に配置された無線基地局官の干渉制御を含む無線リソース制御を行うアルゴリズムを試作開発する。その際、基地局共用を行わず、各キャリアが独自に独立した場所に5G 基地局・アンテナ設置した場合のあるエリアの総システム容量（例：1設置場所当たり、ある1キャリアの基地局1局×4か所）に対して、基地局共用を行ってそれぞれの場所に設置し適切な干渉制御を行った場合（例：1設置場所当たり4キャリア分の共用基地局1局×4か所）の総システム容量との対比で、1.5倍以上の改善を目標とする。

また、準ミリ波帯及び将来5G で割り当てられる可能性のあるミリ波帯以上の超高周波数帯における複数周波数・複数キャリアの基地局共用を実現する広帯域無線通信システムに、試作開発したトポロジー管理・制御アルゴリズム及び無線リソース制御アルゴリズムを適用する。従来の各周波数・各キャリアの基地局をキャリア毎に独立した場所に比べ、4キャリア分の共用基地局のサービスエリアが広がることから、28GHz 帯などの高周波数帯では周波数の繰返し利用により1.5倍程度の利活用促進効果を示すことを目標とする。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT 政策） 政策13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
成長戦略実行計画（令和元年6月21日）	第2章 Society5.0 の実現 1. デジタル市場のルール整備 (2) 対応の方向性 ⑥5G 整備やG空間社会実現に向けて 「Society5.0 の実現に向けて、2020 年度末までに全都道府県で5G サービスを開始するとともに、セキュリティの確保に留意しつつ、通信事業者等による5G 基地局や光ファイバなどの情報通信インフラの全国的な整備に必要な支援を実施し、2024 年度までの5G 整備計画を加速する。」
世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和元年6月14日）	第1部 世界最先端デジタル国家創造宣言 V.社会基盤の整備 1. 5G を軸とした協業促進によるインフラ再構築 (3) 5G 環境等の普及、光ファイバ網の整備 「今後の電波利用ニーズの拡大への対応として5G の普及・高度化に向け、5G 基地局の小型化や高エネルギー効率化、高信頼化やその

	円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境等に関する研究開発を推進するとともに、既存システムとのダイナミックな周波数共用を可能とするシステムの構築を令和2年度末までに行う。あわせて、5G のサービスを支える基地局や光ファイバなどの情報通信インフラの整備を進めるとともに、5G による地域課題解決に向けた開発実証を推進していく。」
デジタル田園都市国家インフラ整備計画（令和4年3月29日）	第2章 整備方針・具体的施策等 2-2 5G (3) 具体的施策 ④ インフラシェアリングの推進 「基地局のインフラシェアリングを可能とするため、複数事業者の送信機を一つの無線装置に集約できる技術を2022年度末までに開発する。」
デジタル田園都市国家構想基本方針(令和4年6月7日)	第2章 デジタル田園都市国家構想の実現に必要な施策の方向 1. 取組方針 (2) デジタル田園都市国家構想を支えるハード・ソフトのデジタル基盤整備 ① デジタルインフラの整備 「【5G】(中長期的な取組の方向性) 第一フェーズとして、2023年度末までに全ての居住地で4Gを利用可能な状態を実現するとともに、5Gの親局(高度特定基地局)を全国展開し、5G基盤展開率を2023年度末に98%とすることを目指す。第二フェーズとして、子局(基地局)を地方展開し、エリアカバーを全国で拡大することを目指す。具体的には、5G人口カバー率を、2023年度末に全国95%、全市区町村に5G基地局を整備、2025年度末までに全国97%、各都道府県90%程度以上、2030年度末までに全国・各都道府県ともに99%とすることを目指す。さらに、将来的には、5Gを必要とする全地域の整備を目指す。 このための施策として、新たな5G用周波数の割当て、制度整備(5G中継局用基地局等の制度整備等。また、基地局開設の責務の創設は、5Gの地方での活用にもつながるものと考えられる。)、補助金による支援や税制措置の活用、鉄塔やアンテナなどのインフラシェアリングの推進(補助金要件での優遇、技術開発、基地局設置が可能な施設のデータベース化等)を進める。」

(3) 目標の達成状況

3年間の研究開発を通じて、周波数効率が高い基地局共用を目的とした各要素技術について、当初の目標どおり達成することができた。具体的には、技術課題ア「5G基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術」については共用RUの消費電力の25%以上の削減(2キャリア換算での消費電力が1.5倍以下)を実現、技術課題イ「有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術」についてはフロントホール容量増大を2倍以下に抑えつつシステム容量を1.5倍以上改善したネットワーク接続管理・制御技術を実現し、目標を達成した。

技術の種類	目標の達成状況
技術課題ア： 5G基地局の共用を実現する広帯域な無線通信システム構成技術	1. キャリア間干渉抑圧を考慮した低消費電力化技術 1)-1 Sub6帯干渉抑圧技術 Sub6帯の共用RUにおける消費電力削減を実現するために、複数キャリア信号の共通増幅構成において、最大500MHz送信時に信号帯域幅の2倍程度(従来5倍)で動作する干渉抑圧技術の実証実験を実施した。3GPP無線規格をクリアするひずみ補償動作を実現しながら、DAC(Digital to Analog Converter)/ADC(Analog to Digital Converter)を含むデジタル信号処理を低速化したことにより消費電力を17%削減し、

RU の低消費電力化 2%を実現する技術を確立した (図 7)。

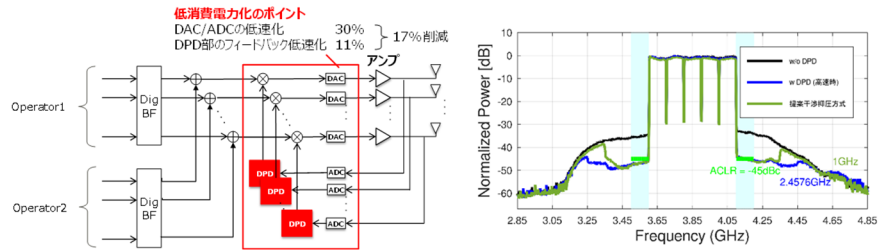


図 7 Sub6 帯のキャリア間干渉抑圧技術構成と干渉抑圧効果

1)-2 準ミリ波帯干渉抑圧技術

準ミリ波帯の共用 RU における消費電力削減を実現するために、フィールドを模擬した電波伝搬 (Over The Air) の評価環境において、複数キャリア送信時のキャリア間干渉抑圧技術 (基本方式および拡張方式) の検証を実施した。個別増幅・個別アンテナ構成に提案干渉抑圧技術を適用することでアンプのバックオフを 3.0dB 低減し、アンプを高効率化できることを確認した (図 8)。

準ミリ波帯の共用 RU の所定条件において、本干渉抑圧技術で 19%の低消費電力化が可能であることを確認した (図 9)。

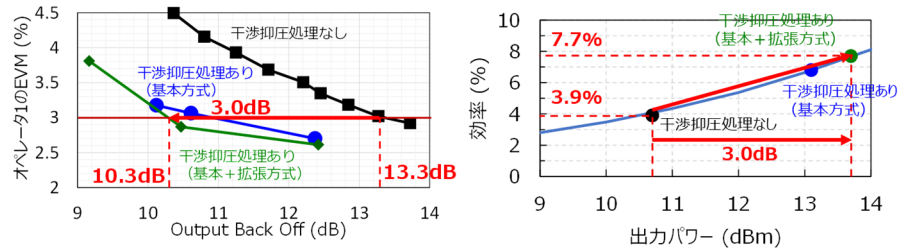


図 8 準ミリ波帯のキャリア間干渉抑圧技術効果

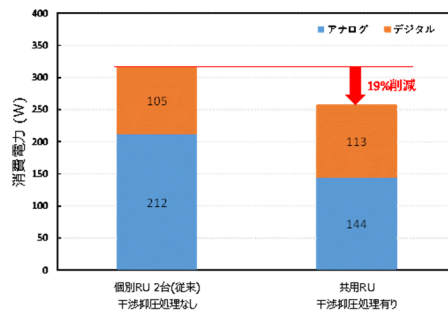


図 9 準ミリ波帯の干渉抑圧技術を適用した場合の消費電力削減効果

1)-3 準ミリ波帯アンテナ高利得化技術

準ミリ波帯の共用 RU における消費電力削減を実現するために、高い利得を持つアレイアンテナを設計・製造し、設計検証を実施した。1×16 のアンテナ素子構成のメタマテリアルマッシュルームアンテナ (メタアンテナ) において、アンテナ利得 17dBi 以上が得られ、高利得のアンテナ素子の設計技術を確立した (図 10)。本アンテナ技術を 256 素子のアレイアンテナの共用 RU に適用することで、共用 RU の 9%の低消費電力化につながる。

準ミリ波帯の干渉抑圧技術とアンテナ高利得化技術を合わせて共用 RU に適用することで、従来の RU2 台と比較して、28%の消費電力削減が可能であることを示し、準ミリ波帯の共用 RU の消費電力を 25%以上削減する本研究開発の目標を達成した (図 11)。

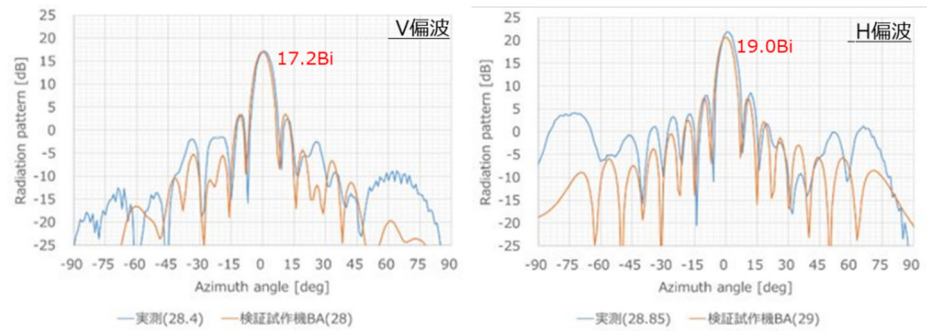


図 10 メタアンテナ利得特性

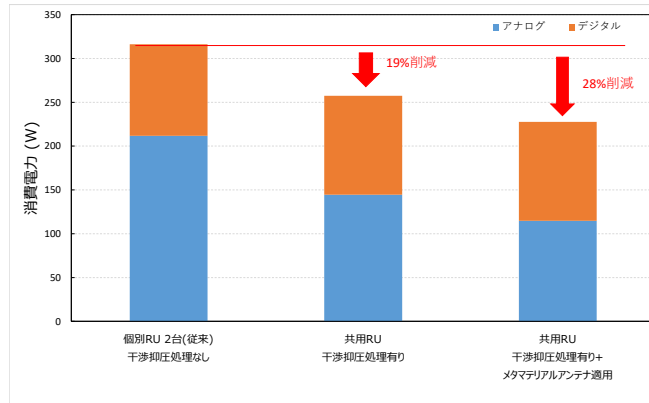


図 11 準ミリ波帯の干渉抑圧技術とメタアンテナ技術を合わせた消費電力削減効果

2. 共用 RU の開発・検証

近年のトラフィック容量の増加から、Massive-MIMO に対応した RU が求められており、市街地の High Traffic なユースケースや、Urban macro エリアカバーが可能なユースケースを想定した、Massive-MIMO かつ高 EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) に対応した共用 RU 装置を開発・製造した (図 12)。

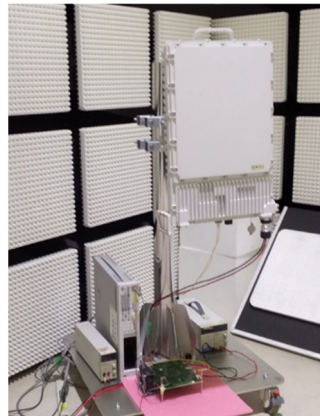


図 12 開発した共用 RU

共用 RU の諸元を表 1 に示す。送受信ポートを 32 ポート有し、96 素子のアレイアンテナ素子を有する構成とする。共用 RU 機能処理を、プログラマブルデバイス (FPGA) の回路にインプリし、VLAN-ID 追加による複数オペレータ識別処理、0-RAN 仕様に準拠した Category A/B の両方式に対応可能な Precoding、Beam forming weight 処理及び Beamforming ID 処理によりビーム方向割付機能を実装した。アンテナ部は、キャリア共通で使用しているが、Beamforming weight 処理を個別に実施可能な機能を実装しているため、複数キャリア合わせて最大 8 方向へ送受信可能なアンテナビーム動作が実現可能となった。共用 RU のフロントホール收容部は 0-RAN 仕様に準拠し、2 キャリアの CU・DU と L2 スイッチを介して 25Gbps の光インターフェース 1 本で接続される。

表 1 共用 RU 主要諸元

No	Specification	共用RU (32TRX)
1	Frequency	3600-3800MHz
2	Total EIRP	50 ~ 70dBm/200MHz/2pol
3	TRX・Antennas	32
4	IBW	200MHz
5	OBW	100MHz×2 (1オペレータ当たり最大100MHz)
6	Modulation	DL : 256QAM UL : 64QAM
7	Subcarrier spacing	30kHz
8	Component Carrier	最大2 (1/Operator)
9	Stream	DL : 4(1オペレータ当たり) UL : 2(1オペレータ当たり)
10	接続オペレータ数	2
11	O-RAN Cat	7-2x Cat A
12	SFP rate	25Gb/E
13	PTP GM接続方式	LLS-C3
14	Size	390mm×600mm×117mm
15	Volume/Weight(Max)	≦28L. ≦16kg

無線規格に対しては、32ポート有する送受信ポート全てにおいて、3GPP 無線特性規格に準じた評価を行い、全 32ポートにおいて、2オペレータの送受信で無線特性規格を満足することを確認した。

また、課題イのシステムと組み合わせて共用 RU を効率的に活用する無線通信システムを構築し、フィールド評価を実施した。2キャリアの UE (User Equipment) と同時接続動作を行い、1キャリア単独で通信する場合と比較して、共用時での通信でスループットに劣化なく通信できることを確認した。

今回、研究開発した共用 RU を使用することで、個別の RU を 2台用意する場合と比較して、合計で 35%の消費電力削減効果が得られた (図 13)。

上記により、Sub6 の共用 RU の消費電力を 25%以上削減し、かつ 5G 基地局の共用が可能無線通信システムを実証する本研究開発の目標を達成した。

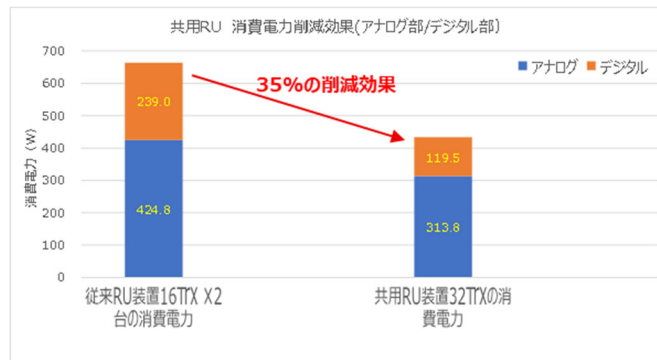


図 13 Sub6 共用 RU の消費電力削減効果

技術課題イ：
有線・無線を統合したネットワーク接続管理・制御技術

本技術課題で開発した統合制御アルゴリズムの制御構成を図 14 に示す。システム帯域幅を複数の周波数領域に分割し、各分割された周波数領域を周波数ブロックと呼ぶ。多数の UE のデータは、CU/DU 内のスケジューラにて ms 単位でスケジューリングして通信を行うが、ここで、本制御アルゴリズムは、RIC(RAN intelligent controller)により各 MNO の RU 毎に、どの周波数ブロックを利用可能とするかの制約事項を CU/DU に通知する。この RIC 制御は、ms よりも長い秒~分などのレベルで行う。このような制御機構により、CU/DU は、セル毎に個別に独立してスケジューリング動作を行うことが出来るが、セル間干渉を低減させるセル間の協調を行うことが出来る。

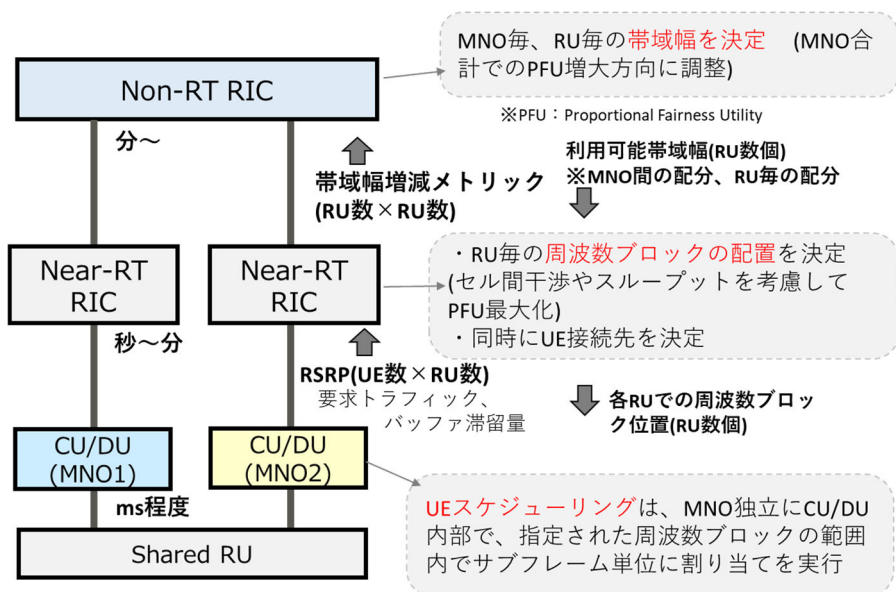
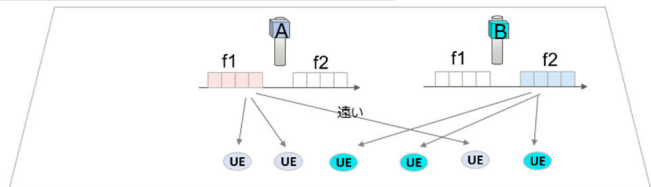


図 14 統合制御アルゴリズムの制御構成

統合制御アルゴリズムの基本的な動作イメージを図 15 に示す。色のついた周波数帯域は、RIC から通知された周波数ブロックの配置である。図に示す様に MNO 個別に RU を設置する場合には、単一 MNO にとっては RU の設置場所が少なく、セル端の端末から遠い場所にある RU と通信する必要があったものが、共用 RU を用いたシステムでは、近くの RU と通信できるようになることが分かる。また RU 当たりで利用している通信帯域の合計は、共用しない場合と共用システムで同じ流量に制約し、RU 毎の FH 流量を増大しないようにしている。また、隣接する共用 RU 間で帯域の配置をずらすことで、干渉低減を行っている。この様に、統合無線リソース制御は、エリア内の多数の RU の全体に対して、全体としての無線リソースの総量、各 RU での FH 流量、多数のセル間の干渉影響やエリア内の合計スループットなど様々な要素を考慮して最適な周波数ブロックの配置を決める制御である。

各オペレータが独自に独立した場所に基地局を設置している場合



基地局共用システム

- ・共用RUにより、同じRU設置数でも高密度化
- ・フロントホール流量をRU共用しないシステムと同等に制約
- ・UE/トラフィック分布に応じて、無線リソース配分および無線帯域の配置を最適化

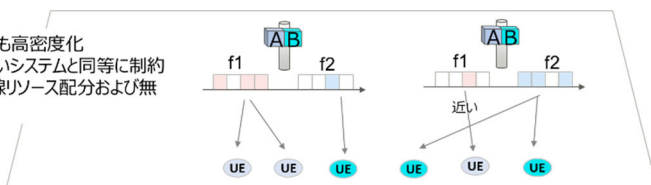


図 15 共用 RU を用いた帯域制御例

上記のアルゴリズムの改善効果进行评估するため、技術課題アの共用 RU 構成を想定し、技術課題イの制御技術を用いて、屋外都市部エリアに共用 RU システムを適用した場合を模擬した評価条件として、計算機シミュレーションによる効果検証を実施した。またアルゴリズムの処理量について、PC サーバを用いた演算量見積を実施した。

結果として、屋外評価により、個別 RU システムの場合に比べ、4 通信キャリア共用によりエリア内の基地局数を 4 倍に高密度化した共用 RU システムにおいて、FH 流量の増加を 1 倍 (≦目標 2 倍以下) に抑えつつ、システム容量を 50%CDF で 2.7 倍、平均 2.4 倍 (≧目標 1.5 倍) に向上させる効果を確認した (図 9)。また、共用 RU120 台、個別 RU システムのセル当たり 1500UE/通信キャリアなどの最大構成を仮定した条件における PC サーバを用いた処理時間測定結果から、10 秒以下の目標に対し、sub6 で 1.2 秒、ミリ波をターゲットと

した MIMO 多重制御の場合にも 10 秒以下の結果を確認した。

その他、将来に向けたさらなるアルゴリズムの拡張・改良として、上りリンクへ統合無線リソース制御アルゴリズムを適用した場合の性能向上効果の評価により、上りリンクに対しても十分な効果が得られること、複数スライスを用いた場合への統合無線リソース制御アルゴリズムの拡張検討を実施した。

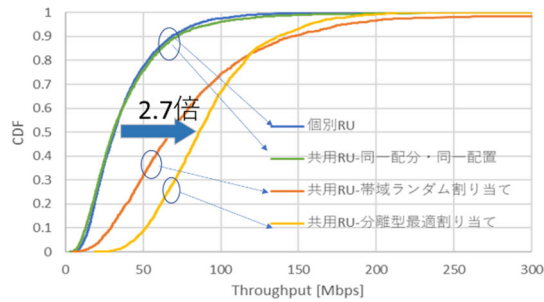


図 16 計算機シミュレーションによる都市部模擬環境での統合無線リソース制御効果検証

また、検討した制御方式の有効性を実験によって実証するために、技術課題アで開発した共用 RU と令和 3 年度に開発した共用 RIC を含むキャリア間協調制御システムを結合することでフィールド実験システムを構築し、RU 共用および無線リソース制御の有効性を検証した (図 17)。その結果、セル間干渉が生じないように適切に帯域割当をした上で RU を共用化し、統合無線リソース制御を実施することで 2.1 倍となることを確認した (表 2)。これにより、Sub6 帯や 28GHz 帯において、本研究開発の目標である共用前後のスループット改善比 (周波数の利活用促進効果) 1.5 倍以上が達成されることを確認した。

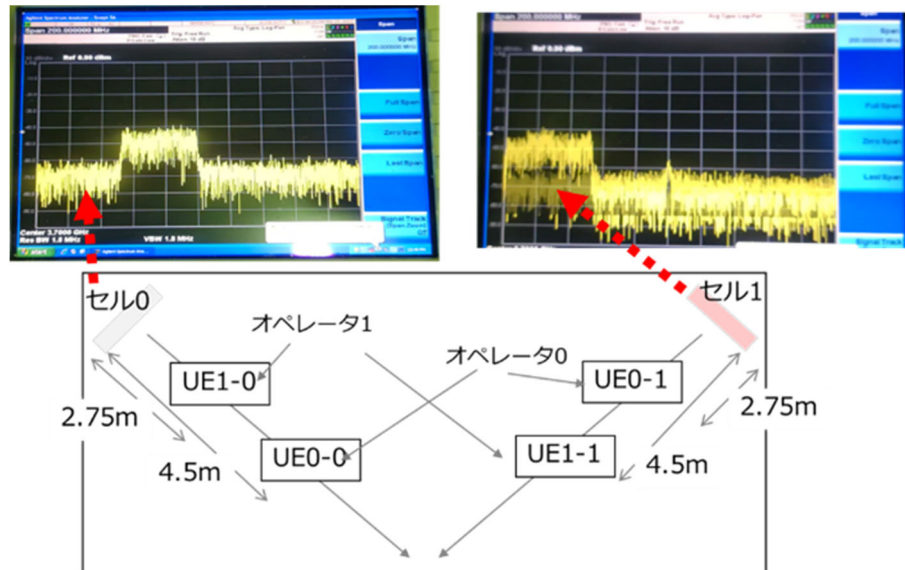


図 17 実験系構成と帯域割当の様子

表 2 スループット測定結果

シナリオ	スループット (Mbps)	スループット改善率
個別 RU	405.5	1
共用 RU (同一帯域)	378.5	0.93
共用 RU (異なる帯域)	558.5	1.37
共用 RU (全帯域占有)	637.0	1.57
共用 RU (最適化)	850.8	2.09

本プロジェクトの研究・開発の成果の一部であるセル間干渉制御技術に関連した制御インターフェースについては、0-RAN 標準化仕様として提案活動を実施し、WG1 Use Case Detailed Specification、WG3 E2SM-CCC 等の規格文書に採用されている。

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和5年6月22日）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表国際標準の実績から、合計2件の査読付き誌上発表論文及び合計14件の口頭発表に加え、海外を含む合計29件の特許出願を行い、2件の海外特許が登録された。また、O-RAN標準化仕様として提案活動を実施し、本研究開発成果の国際標準化を推進している。

以上より、本研究開発は数多くの成果を上げており、その必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和2年度	令和3年度	令和4年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件（0件）	0件（0件）	2件（0件）	2件（0件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	0件（0件）	3件（3件）	4件（4件）	7件（7件）
その他の誌上発表数	0件（0件）	0件（0件）	1件（0件）	1件（0件）
口頭発表数	4件（0件）	5件（0件）	5件（0件）	14件（0件）
特許出願数	6件（0件）	13件（7件）	10件（6件）	29件（13件）
特許取得数	0件（0件）	0件（0件）	2件（2件）	2件（2件）
国際標準提案数	0件（0件）	0件（0件）	16件（16件）	16件（16件）
国際標準獲得数	0件（0件）	0件（0件）	2件（2件）	2件（2件）
受賞数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
報道発表数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
報道掲載数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読（peer-review（論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの）のある出版物に掲載された論文等（Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注3：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注5：PCT（特許協力条約）国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。（何カ国への出願でも1件として計上）。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行った

のち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	<p>5Gの本格的なサービス展開に向け、設置場所の制約等により複数周波数／複数キャリアの5G基地局やアンテナの設置が困難な場合、基地局を共用することは非常に有効である。5Gネットワークの早期展開、高密度な基地局設置、ルーラルエリアでの効率的なネットワーク展開等を踏まえると、インフラ設備を共用可能とする研究開発は極めて重要である。</p> <p>また、基地局の共用は省エネの点からも有効と考えられ、特に伝送速度が高速化すれば消費電力も増える方向になることから、本研究開発は実施すべき課題である。</p> <p>加えて、本研究開発の成果は比較的無線技術の利用が進んでいない高周波数帯の利用の促進に資するものである。</p> <p>よって、本研究開発は必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発の実施にあたっては、5G基地局に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業のノウハウを積極的に活用することにより、効率的に研究開発が実施できる体制が構築されている。</p> <p>また、研究開発の実施期間中も、通信事業者や学識経験者の専門家等で構成される外部有識者と受託者による研究開発運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。</p> <p>加えて、経費執行の効率性については、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後において、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的な実施を図った。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発では、キャリアの個別RU2台と比較して消費電力を25%以上削減した共用RUの開発を行い、目標を達成した。また、研究開発したオペレータ間協調制御技術を用いて、4通信キャリア共用によりエリア内の基地局数を4倍に高密度化した共用RUシステムにおいて、個別RUシステムの場合に比べ、システム容量1.5倍以上の効果を確認し、目標を達成した。</p> <p>本研究開発の成果は、移動通信ネットワークの効率的な構築・運用が可能になり、ひっ迫が予想される無線周波数の利用効率の向上に寄与し、5Gサービスの早期普及・展開に貢献することが期待できる。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発は、複数キャリアによる基地局共用化を実現するものであり、その成果は必ず複数のキャリアにより活用されるものであることから、特定の事業者のみが恩恵を受けることはない。また、本研究開発の成果により、都市部の駅のプラットフォームやショッピングモール、信号機、地下街など高トラヒックの予想されるエリア等における5Gサービスの早期普及・展開や、ルーラルエリアにおける5Gネットワークの効率的な展開が可能となり、広く国民の利益につながるものである。</p> <p>また、比較的使用率の低い高周波数帯の活用に大きく寄与するものであることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。</p> <p>委託先の選定にあたっては、開示する基本計画に基づき実施希望者の公募を広く行い、研究提案については提案者と利害関係を有しない外部専門家から構成される評価会において審査し、最も優れた提案を採択する方式により、競争性を担保した。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>本研究開発の成果は、5Gネットワークの早期展開、高密度な基地局設置、ルーラルエリアでの効率的なネットワーク展開等に寄与するものであり、通信インフラの整備に資するものであることから、優先的に取り組むことが適切である。</p> <p>また、本研究開発は、より高い周波数の利用技術を確立するものであり、周波数ひっ迫対策にも資することから、優先的に実施していく必要がある。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

本研究開発は、ひっ迫が予想される Sub6 帯や準ミリ波帯の周波数の利用効率の向上、より高い周波数帯の利活用を促進することで 5G サービスの早期普及・展開を図り、また移動通信ネットワークの効率的な構築・運用にも資する技術として、基地局共用技術に関する研究開発を行ったものである。

本研究開発において、共用 RU の消費電力の 25%以上の削減（2 キャリア換算での消費電力が 1.5 倍以下）を実現するとともに、フロントホール容量増大を 2 倍以下に抑えつつシステム容量を 1.5 倍以上改善したネットワーク接続管理・制御技術を実現し、目標の達成を確認した。

また、論文・口頭発表、特許出願や国際標準化に向けた活動など、実用化に向けた検討もあわせて実施されている。

以上より、本研究開発は有効性、効率性等があると認められた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

今後は、本研究開発で確立した基地局共用技術を実用化するため、引き続き、事業者において、本研究開発技術を搭載したネットワーク機器の採用を国内外の通信キャリア、シェアリング事業者に働きかけ、5G 共用基地局共用の普及を図る。これにより、5G サービスの早期普及・展開を通して、周波数利用効率の向上とより高い周波数の利活用の促進に貢献する。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和 5 年 6 月 22 日）において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・5G 基地局共用を実現する共用 RU を研究開発して、フィールド検証を実施。共用 RU の消費電力をオペレータの個別 RU 2 台と比較して 25%以上削減し、目標を達成している。また、研究開発したオペレータ間協制御技術を用いて、個別 RU システムの場合に比べ、4 通信オペレータ共用によりエリア内の基地局数を 4 倍に高密度化した共用 RU システムにおいて、システム容量 1.5 倍以上の効果を確認し、目標を達成している。本研究開発の成果により、移動通信ネットワークの効率的な構築・運用が可能になる。ひっ迫が予想される無線周波数の利用効率の向上に寄与し、5G サービスの早期普及・展開に貢献することが期待できるため、本研究開発は有益であったと判断する。
- ・本研究開発は、複数オペレータが運用可能な 5G 基地局共用技術を無線ユニット・信号処理とフロントホール帯域制御の点から要素技術開発し、それらを統合することにより確立するものであり、最終年度にあたる本年度は、各要素技術の試作・動作確認を完了させ、全体として、目標性能を着実に達成している。知財への対応については、目標（15 件）を大きく上回る 29 件の特許申請を行い、既に海外 2 件の特許登録を獲得しており、高く評価できる。また、標準化対応についても、研究開発成果を ORAN 標準化の規格文書に反映させており、実用化に向けた取り組みを着実に進捗させている。今後は、速やかに通信オペレータと連携し、実ネットワークにおける基地局共用のメリット（特に低消費電力化）を明確化し、国際展開を含め、我が国のモバイル分野の国際競争力に資する取り組みを期待したい。

7 評価に使用した資料等

○成長戦略実行計画（令和元年 6 月 21 日）

<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/ap2019.pdf>

○世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和元年 6 月 14 日）

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190614/siryoul.pdf>

○デジタル田園都市国家インフラ整備計画（令和 4 年 3 月 29 日）

https://www.soumu.go.jp/main_content/000803507.pdf

○デジタル田園都市国家構想基本方針（令和 4 年 6 月 7 日）

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digital_denen/pdf/20220607_honbun.pdf

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>

- 令和2年度 電波利用料による研究開発 基本計画書（本案件の基本計画書はP14～19）
https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/200207_keikakusho.pdf