

テラヘルツ波による超大容量無線 LAN 伝送技術の研究開発

Research and development of ultra-large capacity wireless LAN transmission technology
using terahertz waves

研究代表者

坂野 寿和 株式会社国際電気通信基礎技術研究所

Toshikazu SAKANO Advanced Telecommunications Research Institute International

研究分担者

中川 洋一¹ 中林 陽子² 岡田 健一³ 戸村 崇³ 長 敬三⁴ 枚田 明彦⁴ 笠松 章史⁵ 原 紳介⁵
三浦 賢⁶ 久保 俊一⁶ 鈴木 貴之⁶ 藤島 実⁷ 田中 聡⁷ 榊原 久二男⁸ 杉本 義喜⁸ 高野 恭弥⁹
片山 光亮¹⁰ 矢野 一人¹¹ 清水 聡¹¹ 川本 雄一¹² 橋田 紘明¹² 日比 龍平¹² 留場 宏道¹³
中村 理¹³

Yoichi NAKAGAWA¹ Yoko NAKABAYASHI² Kenichi OKADA³ Takashi TOMURA³ Keizo CHO⁴
Akihiko HIRATA⁴ Akifumi KASAMATSU⁵ Shinsuke HARA⁵ Satoshi MIURA⁶ Shunichi KUBO⁶
Takayuki SUZUKI⁶ Minoru FUJISHIMA⁷ Satoshi TANAKA⁷ Kunio SAKAKIBARA⁸
Yoshiki SUGIMOTO⁸ Kyoya TAKANO⁹ Koryo KATAYAMA¹⁰ Kazuto YANO¹¹ Satoru SHIMIZU¹¹
Yuichi KAWAMOTO¹² Hiroaki HASHIDA¹² Ryuhei HIBI¹² Hiromichi TOMEBA¹³
Osamu NAKAMURA¹³

¹ パナソニック インダストリー株式会社 ² 新光電気工業株式会社 ³ 国立大学法人東京科学大学

⁴ 学校法人千葉工業大学 ⁵ 国立研究開発法人情報通信研究機構 ⁶ ザインエレクトロニクス株式会社

⁷ 国立大学法人広島大学 ⁸ 国立大学法人名古屋工業大学 ⁹ 学校法人東京理科大学 ¹⁰ 徳山工業高等専門学校

¹¹ 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 ¹² 国立大学法人東北大学 ¹³ シャープ株式会社

¹ Panasonic Industry Co., Ltd. ² Shinko Electric Industries Co., Ltd. ³ Institute of Science Tokyo

⁴ Chiba Institute of Technology ⁵ National Institute of Information and Communications Technology

⁶ THine Electronics, Inc. ⁷ Hiroshima University ⁸ Nagoya Institute of Technology

⁹ Tokyo University of Science ¹⁰ National Institute of Technology, Tokuyama College

¹¹ Advanced Telecommunications Research Institute International ¹² Tohoku University

¹³ Sharp Corporation

研究期間 令和4年度～令和7年度

概要

本研究開発は、超大容量無線通信が実現可能な広帯域のテラヘルツ帯において、将来的に 1 Tbps を見据えたマルチストリーム無線 LAN 伝送技術確立することを念頭に、アクセスポイント及び端末間を 100 Gbps 以上で伝送可能かつ実利用環境を考慮した無線通信技術確立し、新たな周波数帯の利用を促進することにより電波資源の拡大に資することを目標として実施した。

Abstract

This research and development project aimed to establish a multi-stream wireless LAN technology in the broadband terahertz band, which enables ultra-high-capacity wireless communication, with a view to achieving 1 Tbps in the future. The goal was to establish a wireless communication technology that can transmit data between access points and terminals at speeds of 100 Gbps or more, taking into account practical usage environments, and to contribute to the expansion of radio wave resources by promoting the use of new frequency bands.

1. まえがき

5G の普及や、AI や映像技術の進歩に伴い、通信回線のトラフィック量は劇的に増加している。図 1-1 に示すような大量のデータを扱うデータセンター内には大量の配線があり、サーバーの移設などには困難が伴う。そのような利用シーンで超大容量の無線 LAN を使うことができれば、物理的な配線による束縛から解放され、レイアウトの自由度が大きく改善する。また、図 1-2 に示すような AR・VR などを用いた Immersive Experience（没入型体験）における映像の高解像化による没入感の向上も期待されており、そのようなユースケースにおいても大容量かつ同時多接続伝送技術が求められている。

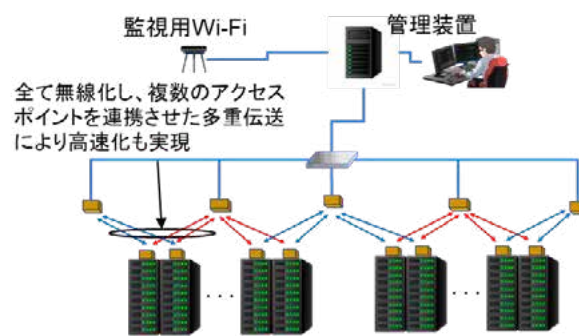


図 1-1 データセンター

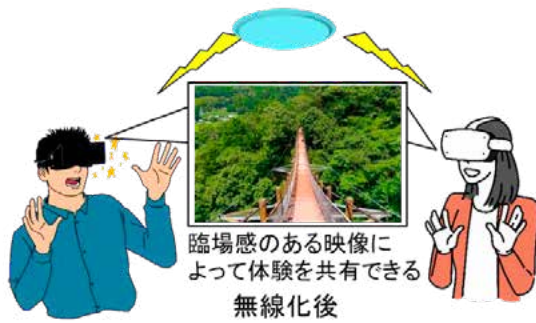


図 1-2 Immersive Experience

そのような背景の下、本研究開発課題では 150 GHz 帯や 300 GHz 帯といったサブテラヘルツ帯を活用する無線 LAN システムの実現に向けた研究開発を実施した。課題構成としてはサブテラヘルツ帯の通信モジュールの確立に向けた課題ア「MIMO 対応多素子アンテナモジュールの研究開発」と課題イ「トランシーバ技術の研究開発」、無線 LAN システム化技術の確立に向けた課題ウ「マルチ周波数協調動作技術の研究開発」の 3 課題構成とし、150 GHz 帯ならびに 300 GHz 帯を用いた 100 Gbps 級の無線 LAN の実現を目指した。

2. 研究内容及び成果

課題ア「MIMO 対応多素子アンテナモジュールの研究開発」ではテラヘルツ無線 LAN 電波伝搬特性の把握に向けた研究を実施し、300 GHz 帯/150 GHz 帯における MIMO パス環境特性の明確化、アンテナの指向性および反射板の形状や配置への指針を策定した。加えて、AiP (Antenna-in-Package) モジュール技術の確立に向けた研究開発を行い、高密度 AiP 設計および実装による体積 1 cm³ 以下で偏波 MIMO 対応の 16 素子フェーズドアレーモジュールを開発し、150 GHz 帯において通信距離 3 m、伝送速度 100 Gbps の達成を伝送実験により確認した。

課題イ「トランシーバ技術の研究開発」では 300 GHz 帯を用いて、ビーム方向を制御できる高利得アンテナと、それに対応したシリコン CMOS 集積回路を用いたトランシーバの研究開発を実施した。2 次元フェーズドアレー構造を用い、平面で小型のモジュールの開発を志向した。空間内の複数の端末間で同時に無線伝送を行うことができる複数ストリーム通信に対応可能とし、1 ストリームあたり 40 Gbps 以上の伝送速度、±30 度以上の 2 次元ビーム制御の実現を目指した。

課題ウ「マルチ周波数協調動作技術の研究開発」ではサブテラヘルツ帯を活用する無線 LAN の実現に向けて、低オーバーヘッドで接続可能なアクセスポイントを探索する技術、サブテラヘルツ帯を対象にした無線リソースの割り当て技術および Intelligent Reconfigurable Surface (IRS) を用いた伝搬路制御技術、ならびに複数のサブテラヘルツ帯アクセスポイントが連携して超高速なマルチストリーム伝送 (Joint Transmission) を行うために必要となるアクセスプロトコルとバックホール通信システムを対象とした研究開発を実施した。

以下、これらの詳細について述べる。

2. 1. 技術課題ア：MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発

技術課題アでは、150 GHz 帯において MIMO 対応が可能な体積 1 cm³ 以下の両偏波 8 素子アンテナモジュールを実現するための研究開発に取り組んだ。課題ア-1 では、

300/150 GHz 帯の MIMO パス環境の明確化、アンテナ指向性及び反射板の形状や配置への指針策定を目標とし、屋内環境をユースケースに想定したテラヘルツ帯電波伝搬特性の研究開発に取り組んだ。また、課題ア-2 としては、体積 1 cm³ 以下の多素子アンテナモジュールの設計、試作・評価を行い、3 m 以上の通信距離で 100 Gbps 以上の伝送速度を達成することを目標として、高精度なアンテナ設計技術、精密なアンテナ加工及び RF フロントエンド IC 実装技術、高密度な RF フロントエンド IC 設計技術の研究開発に取り組んだ。

2. 1. 1 課題ア-1：MIMO アンテナを想定した電波伝搬測定技術の研究開発

(ア) 150/300GHz 帯における室内反射特性の実測

ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いた伝達特性測定系を構築し、153-163 GHz および 253-295 GHz で電波免許を取得して、千葉工業大学内の会議室および講義室において、壁面や窓、机等における反射電力の入射角特性を実測評価した。金属壁ではほぼ 1 の反射係数が得られるが、窓や石膏ボードでは入射角により TE 入射で 5 dB ~ 10 dB 程度、TM 入射では 5 dB ~ 15 dB、角度によっては 20 dB 以上の反射損失が生じることを確認した。また建材によっては表面に加え内部構造からの反射の合成と考えられる周波数特性が生じることが確認された。

(イ) アンテナ指向性/AP 配置の指針策定

レイトレーシング伝搬解析を用いた MIMO 伝搬特性評価ツールを構築し、千葉工業大学内会議室に机を配置した室内モデルを作成して、150 GHz 帯で 2 ブランチ MIMO 伝送により 120 Gbps 伝送を実現するために必要な UE アンテナ指向性及び AP 配置数/配置位置をシミュレーションにより評価した。評価には人体による遮蔽の影響も考慮した。その結果、UE アンテナはビームスキャン幅±30 度のアンテナを 4 方向に配置し 10 名から 15 名の人をランダム配置した際に、AP を 2 つ配置で 81 %、3 つ配置で 95 % のカバー率 (3 dB マージン考慮) が得られることを明らかにした (図 2.1.1-1)。また 3D 到来特性の測定によりシミュレーション環境のパス到来特性が概ね一致することを確認した。

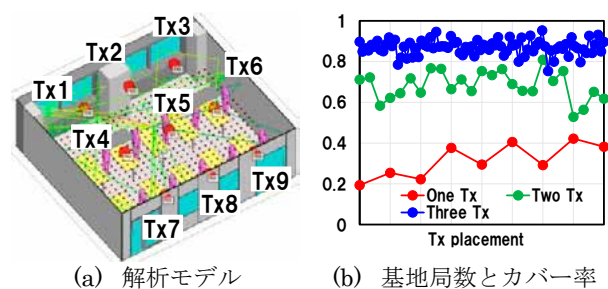
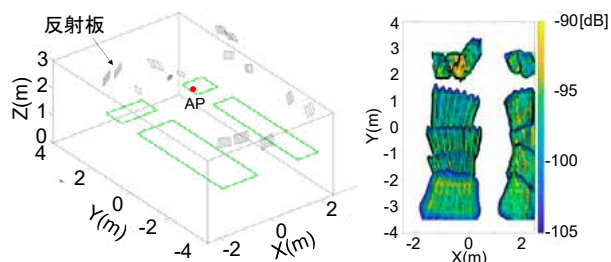


図 2.1.1-1 MIMO パス確保のための AP 配置解析

(ウ) 凸型金属反射板による伝搬チャネル環境変化

反射範囲を拡大しつつ反射電力を確保可能な平板結合型凸型反射板の設計手法を提案し、2 つのオフィスモデルを例に 150 GHz 帯で 120 Gbps MIMO 伝送を実現するために必要となる反射板の数、大きさ、配置位置についてレイトレーシング伝搬解析により評価した。7 m×8 m の部屋に AP を一つ配置し部屋の 75% を照射するためには、最大高さ 67 cm の反射板が壁に沿って 116 枚必要となり、8 m×10 m の部屋に AP を 2 つ配置し、人体遮蔽を回避しながらアイランドレイアウトの机上を照射するには、平均高さ 32 cm の反射板が 30 枚必要であることを示した (図

2.1.1-2)。試作反射板の測定評価により、一回反射時の照射エリアは概ね解析結果と一致したが、二回反射時は解析よりもエリアが縮小した。解決法として天井反射を利用する方法を提案した。



(a) 反射板設計結果 (b) 机上照射結果
図 2.1.1-2 オフィス環境における反射板配置例

2. 1. 2 課題ア-2：電波伝搬特性に基づく多素子アンテナモジュール技術の研究開発

2. 1. 2. 1 課題ア-2-a：多素子アンテナモジュール設計技術

ユーザー端末向けに超小型の 150 GHz 帯 AiP (Antenna-in-Package) モジュールを開発した。コンセプトは、3 次元集積化により RF-IC とアンテナ間距離を短縮、伝送損失を低減して高効率な無線伝送を実現することである。具体的には、Substrate Integrated Waveguide (SIW) を導入し、スリットとリフレクタを備えた端部開放型アンテナ構造を考案、設計した (図 2.1.2.1-1)。本 AiP モジュールに対して、NICT の B5G 電波暗室棟における評価実験を実施した (図 2.1.2.1-2)。対向にレンズアンテナを用いた 150 GHz 帯マルチストリーム伝送実験の結果、通信距離 3 m で伝送速度 102.4 Gbps (51.2 Gbps×2) を達成することができた。

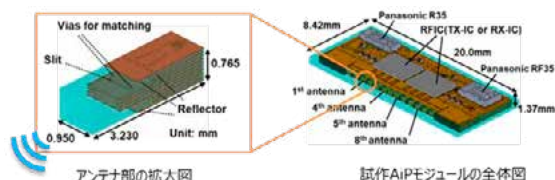


図 2.1.2.1-1 端部開放型 SIW アンテナ

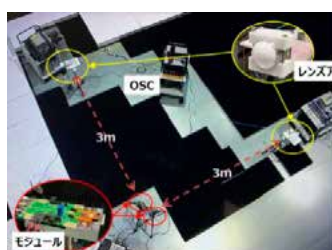


図 2.1.2.1-2 AiP モジュールの評価実験系

広角対応小型モジュール用アンテナ及び長距離通信用高利得アンテナを開発した。小型モジュール用アンテナは単一偏波アンテナ及び偏波共用アンテナ (図 2.1.2.1-3) を検討し、多層基板内にスロットおよびモノポールを配置する構成とした。双対な構成とすることで偏波共用動作を可能にした。8 素子アレーアンテナをパッケージ基板で試作し、151.5 GHz ~ 164.0 GHz において反射 -10 dB 以下、ポート間結合 -20 dB 以下を測定で得た。

長距離通信用高利得アンテナは全てプリント基板で構成するリフレクトアレーアンテナ形式とした (図 2.1.2.1-

4)。一次放射器にはプリント基板の積層で構成し、リフレクトアレーは実遅延型の反射素子を用いることで簡易な構成でありながら広帯域特性を実現した。測定の結果、アンテナ利得 37.6 dBi、帯域幅 112 GHz ~ 136 GHz の比帯域 19.4 %を得た。

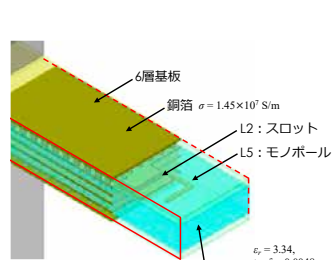


図 2.1.2.1-3 小型モジュール
用偏波共用アンテナ素子



図 2.1.2.1-4 長距離通
信用リフレクトアレー

2. 1. 2. 2 課題ア-2-b：アンテナ加工、チップ実装技術

高周波特性・放熱特性を両立し、かつ端末への搭載が可能な小型アンテナモジュールの実現を目的として、材料、製造プロセス、構造設計、実装評価を一体的に検討した。

RF フロントエンドとアンテナ基板の接続に向けて TEG チップを用いた評価を実施し、低温はんだによる実装プロセスを選定した。アンテナ基板については高周波用途に適した粗化レス樹脂材料への配線形成が要求されることから MSAP を採用した。さらに、低誘電樹脂と電解銅めっきの密着確保する表面処理技術によりピール強度 0.3 kgf/cm 以上を達成した。

高周波伝送設計において重要となるビア導波路については CO2 レーザーを用いた加工プロセスを策定し、樹脂厚 70 μm に対し開口径 φ 70 μm、ピッチ 125 μm のビア形成を確認した。信頼性試験の結果から壁間の十分な絶縁性が確保できることを確認した。

これらの技術を用いて、積層基板内に三次元積層アンテナを内蔵したアンテナモジュールを試作し、アンテナ特性および高周波伝送特性評価へ提供した。

小型モジュールにおける放熱課題に対応するため、放熱ビアおよび放熱部品を組み込んだアンテナモジュールの構造を検討した。熱流体解析、および、過渡熱抵抗測定により放熱ルートの要件を抽出し、シミュレーションモデルの高度化と実証試作をおこなった。さらに、スタック型アンテナモジュールを試作し、サーモグラフィ評価により放熱成立性を実証した。

小型化に向けては、狭ピッチビア形成および基板薄型化が可能な低誘電樹脂を選定し、その加工性を評価した。加えて、高剛性材料と低剛性材料を複合化した積層構造およびスタック型構造について応力解析を実施し、RFIC とアンテナ接続に関する技術検証を完了した。

本研究により、高周波対応・高放熱・小型高密度実装を同時に満たす三次元積層アンテナモジュールの社会実装に向けた基盤技術を確立した。

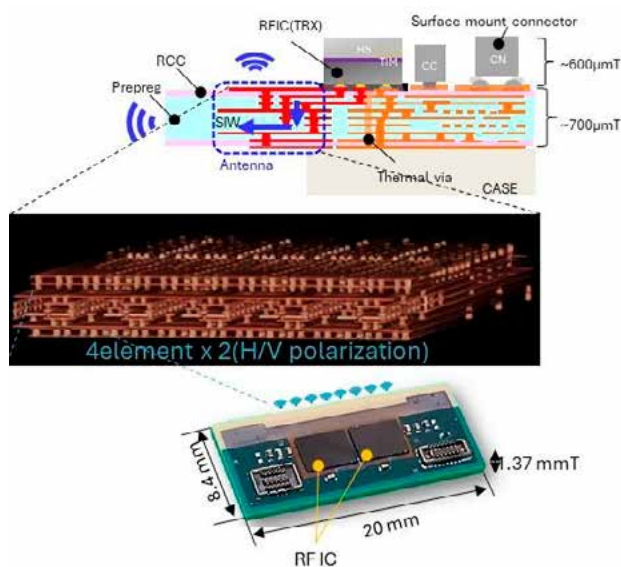


図 2.1.2.2-1 テラヘルツ波アンテナモジュール

2. 1. 2. 3 課題ア-2-c：高密度 RF フロントエンド設計技術

多素子内蔵 RF フロントエンドの性能向上に向けて、超小型・高密度 RF のフロントエンドモジュールに実装する送受信一体の RF フロントエンド IC を設計した。V 偏波、H 偏波用それぞれ 4 素子、計 8 素子分の送受信一体回路を 4 mm×3 mm のチップに集積化することに成功した。各素子の消費電力は各素子の消費電力は送信時 124 mW 受信時 90 mW と小さく、目標を大きく上回る結果が得られた。本 IC を TSMC 65 nm のシャトルにて試作し、2. 1. 2. 1 で試作したアンテナ一体モジュールに実装して（図 2.1.2.3-1）、実際に OTA 評価を行い（図 2.1.2.3-2）、RF フロントエンド単体で 72 Gbps、2 ストリーム MIMO で 144 Gbps の伝送レートを実現、目標を上回る結果を達成した。

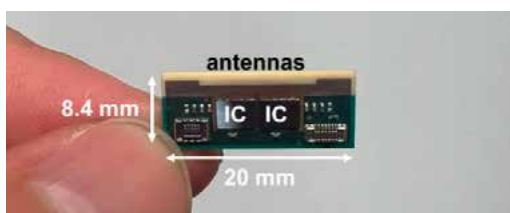


図 2.1.2.3-1 端末用 超小型・高密度 RF のフロントエンドモジュール

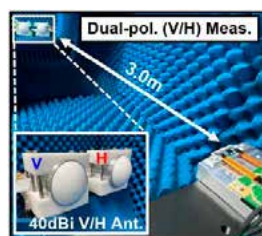


図 2.1.2.3-2 偏波 MIMO 伝送実験の様子

端末用モジュールに加え、追加した長距離化の目標達成に向け、長距離通信用モジュールの検討も行った。先行開発として D 帯の長距離通信用 IC を設計、65 nm CMOS プロセスでチップを作製し、情報通信機構の暗室にて長距離通信の実験を行った。長距離用モジュールと IC のチップ写真を図 2.1.2.3-3 に示す。送信 IC の消費電力は

1150 mW、135 GHz での出力電力は 13 dBm であり、受信 IC の消費電力は 550 mW、NF は 13 dB である。IC チップは導波管変換機構を有する PCB 基板に実装し、導波管フランジと一体化したモジュールからアンテナに接続して OTA 測定を行った。短距離では 32QAM で 200 Gbps、4×4 MIMO にして 640 Gbps を達成、30 m 伝送でも 100 Gbps を実現した。フェーズドアレー化することで 10 km 超の伝送も可能である。

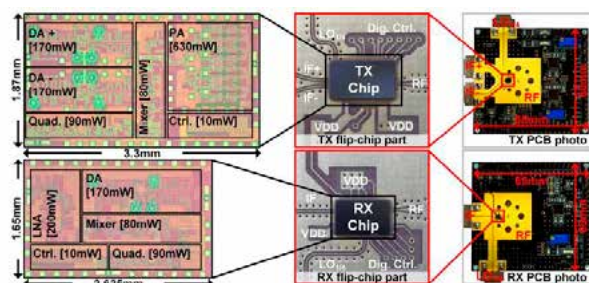


図 2.1.2.3-3 長距離通信用モジュールと IC チップ写真

2. 2. 技術課題イ：トランシーバ技術の研究開発

本技術課題では、ビーム方向を制御できる高利得アンテナに対応し、同一空間内の複数の端末間で同時に無線伝送を行うマルチストリーム伝送に対応したトランシーバ技術を開発した。1 チャンネル、1 ストリームあたり毎秒 40 G ビット以上の伝送を可能とする 300 GHz 帯 CMOS トランシーバを用い、±30 度以上の 2 次元ビーム制御可能な技術の開発に取り組み、複数チャネルや複数ストリームの利用により毎秒 100 G ビット以上の伝送を可能であることを示すことを目指した。含まれる個別技術として、イ-1-a 多素子アンテナ対応 RF フロントエンド高性能化技術の研究開発、イ-1-b フェーズドアレー対応ベースバンド処理技術の研究開発、イ-2 MIMO 対応ビーム制御技術の研究開発を研究の柱とした。

2. 2. 1. 課題イ-1：テラヘルツ帯集積回路のアーキテクチャ及び実装技術の研究開発

2. 2. 1. 1. 課題イ-1-a：多素子アンテナ対応 RF フロントエンド技術の研究開発

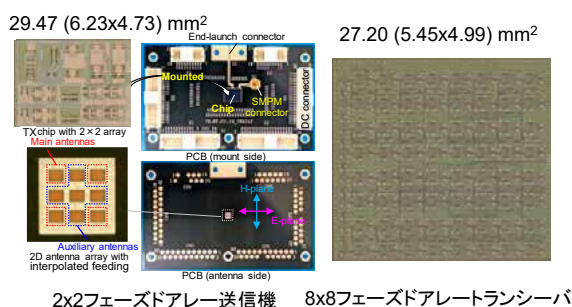
本プロジェクトでは、300 GHz 帯において電氣的に 2 次元ビームステアリング可能な CMOS フェーズドアレーチップの実現を目指した。300 GHz では波長が約 1 mm と極めて短く、グレーティングロブを抑制しつつ 2 次元走査を行うためには、アンテナ素子を約 1/2 波長ピッチ、すなわち約 500 μm 間隔で高密度に配置する必要がある。一方で、このような高密度配置では、各アンテナ素子に対応する送受信回路、給電配線、電源配線、デカップリング回路、制御線を限られた面積内に収めなければならず、回路実装と電磁設計の両立が本研究の主要課題となる。

そこで本研究では、この課題に対して段階的にアーキテクチャを発展させながら検証を進めた。まず初期段階では、補間給電アーキテクチャを用いた送受信機を提案した。この方式では、直接給電されるアンテナに加え、周囲のアンテナから電磁的に信号を受けて放射・受信に寄与する補助アンテナを組み合わせることで、回路配置の自由度を確保しつつ、高密度なアレー動作を実現することを狙った。動作実証のため、回路構成としては 2×2、アンテナ配置としては 3×3 の試作チップを設計・作製し、送信機および受信機の双方について動作を確認した。これらの成果は、送信機を RFIC 2024、受信機を ASSCC 2024 にて発表した。

次に、補完給電方式による概念実証を踏まえ、より高い

開口効率を得るため、全素子給電型の 2 次元フェーズドアレーへ展開した。全素子給電では、各アンテナ素子に対応する回路を 1/2 波長ピッチで直接配置する必要があり、回路の小型化と配線構造の高度化が不可欠となる。そこで本研究では、電源、デカップリング、制御線を縦方向に集約した「電源パネル」構造を考案し、回路ブロックを高密度に並べるための実装手法を構築した。この手法を用いて、回路とアンテナのピッチ 612 μm で 8×8 の 64 素子 2 次元フェーズドアレーチップを設計・試作し、測定による評価を行った。この成果は CICC 2026 で発表予定である。

以上により、本プロジェクトでは、補完給電による概念実証から、全素子給電による 64 素子アレーの実証までを段階的に達成した。すなわち、300 GHz 帯 2 次元フェーズドアレーの実現に向けて、アーキテクチャ提案、送受信回路の試作実証、高密度実装技術の構築、大規模アレイチップの試作・測定までを一貫して進め、300 GHz 帯大規模フェーズドアレー実現への技術的見通しを得た。



2x2フェーズドアレー送信機 8x8フェーズドアレートランシーバ

図 2.2.1.1-1 2×2, 8×8 フェーズドアレーチップ

2. 2. 1. 2. 課題イ-1-b: フェーズドアレー対応ベースバンド処理技術の研究開発

本研究課題では、ミックスドシグナル技術を用いることで、高解像度 ADC や大規模 DSP を使用せず、コストと消費電力を抑えたベースバンド技術の実現を目指した。そのために、以下の 3 つの要素技術に着目して研究開発を行った。

- ① フェーズドアレーに対応した RF 制御技術
- ② テラヘルツ向けのイコライザ技術
- ③ ミックスドシグナル技術を用いたキャリア・データリカバリ技術

以下、各項目について述べる。

まず①について、テラヘルツ帯は直進性が高く、従来と同等のビームフォーミング手法をそのまま適用することが困難であるという課題に着目した。そこで研究開発として、ビームフォーミングに関する MAC (課題ウ) と PHY (課題イ) のインターフェースを検討した。役割分担としては、課題ウでビームフォーミングアルゴリズムの検討を行い、課題イではビーム制御および受信電力検出の検討を担当した。受信電力の検出には、後述する③の構成で実現したベースバンド受信機を用いた。試作したベースバンド受信機と RF フロントエンドを組み合わせ評価した結果、角度の変更に応じて受信電力が変化することを確認し、ビームの向きを検出できる見通しを得た。

次に②では、テラヘルツ帯における FDE (Frequency Domain Equalizer) および TDE (Time Domain Equalizer) の実現性が、これまで十分には議論されていない点に着目した。テラヘルツ帯は直進性が高いため、マルチパスの影響による波形劣化は従来よりも小さいと考えられる。一方で、FDE を広帯域で実現する場合には回路規模が増大するため、実現性に懸念が生じる。これに対して TDE は FDE と比べ回路規模を抑えられる余地があり、本研究では

TDE の実現性を確認した。具体的には、TDE として n Tap の FIR (Finite Impulse Response) フィルタを用い、係数を最適化して EVM (Error Vector Magnitude) の比較を行った。その結果、EVM は TDE によっても改善できる見込みがあることを確認した。よって、テラヘルツ帯においては、TDE を用いた補正が実現できる見通しを得た。

さらに③では、テラヘルツ帯を用いて広帯域通信を実現する際、従来手法では高速・高解像度 ADC や大規模 DSP が必要になるという課題に対して、ミックスドシグナル技術を用いることで、高速・低解像度 ADC と小規模 DSP を用いたキャリアリカバリ技術を実現した。本技術では、ダウンコンバージョンを行うミキサを ADC に置き換え、位相差の検出をデジタル部で実現し、位相調整をアナログ回路で実現した。これにより、任意の位相に同期させることが可能となり、低解像度 ADC であっても必要な位置でデータを取得できる見通しを得た。また、本技術については、CICC 2024 でキャリアリカバリ技術として発表を行っている。

以上により、本プロジェクトではテラヘルツ帯におけるベースバンド処理技術に関して技術的な見通しを得た。

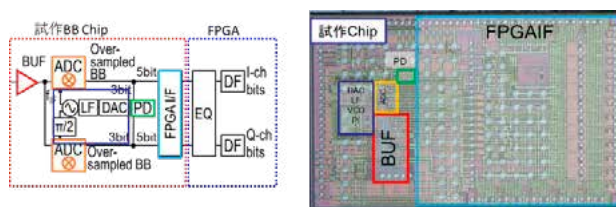


図 2.2.1.2-1 試作したベースバンドチップのブロック図とチップ写真

2. 2. 2. 課題イ-2: MIMO 対応ビーム制御技術の研究開発

本研究では、広帯域かつ低損失で 2 次元ビーム走査を実現するフェーズドアレーアンテナの開発を目的とし、その素子アンテナおよびアレーアンテナと、その設計技術を開発した。

まず、素子アンテナが集積回路と低損失に接続できるように、集積回路を実装する多層基板内にアンテナを構成し、並行差動線路から低損失に電磁結合の原理で給電する開口アンテナ構造を考案し、各層の金属パターンを独立に最適化することで、広帯域特性が得られるように設計した。集積回路を実装する層のパターンには、電源配線をレイアウトでき、高周波信号線との共存ができるように配線設計した。

アレー構成については、グレーディングロブが発生しないように、素子間隔を約 1/2 自由空間波長以下の間隔で配列する必要がある。そのために、高周波回路サイズを大幅に小型化して全素子に給電する全素子給電方式と、高周波回路の大きさはアンテナ素子間隔の 2 倍でも、高周波回路を配列している素子アンテナへ、1 つおきに接続し、高周波回路に接続していない素子には、隣接素子からの結合によって励振する補間給電方式の二通りの方式を開発した。

全素子給電方式については、8×8 素子配列のフェーズドアレーを設計し、電磁界解析により、そのビーム走査特性を評価した。補間給電方式については、まず、その動作原理を検証するために、最も少ない素子数である 3×3 素子配列の補間給電アレーについて、最外周の四隅の 2×2 素子にのみ高周波回路を接続し、残りの内側 5 素子は隣接する素子アンテナからの結合で励振する補間給電方式を設計した。さらに高利得化を期待して、上記の 3×3 素子補

間給電アレーの外周に 16 個の拡張素子アンテナを配列することで、高周波回路を接続するアンテナ数は 2×2 素子のままで、 5×5 素子を給電した補間給電アレーを設計した。

これらの、素子アンテナ、 3×3 素子補間給電アレー、 5×5 素子補間給電アレーの特性を、高精度に実験で評価する測定技術を開発した。実験においては、これらの給電に用いられている平面線路と導波管を広帯域に接続する伝送線路変換回路を設計し、平面線路と、伝送線路変換回路と、測定ジグ内の導波管の損失を測定し、アンテナの特性を測定した生データからこれらの損失を差し引くことにより、アンテナの利得を高い精度で評価する測定技術を開発した。

電磁界シミュレーションおよび上記の測定により、開発したアンテナが、広帯域で低損失に、2 次元ビーム走査可能であることを示した。

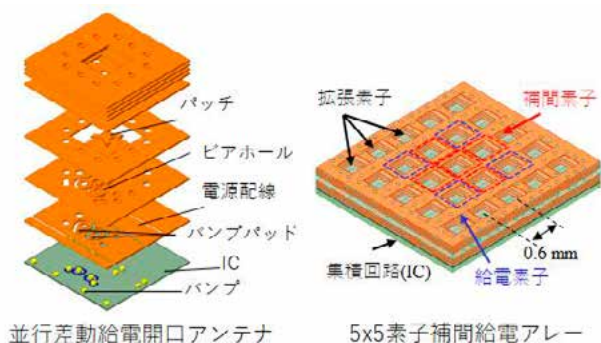


図 2.2.2-1 並行差動給電開口アンテナと 5×5 素子補間給電アレー

2. 3. 技術課題ウ：マルチ周波数協調動作技術の研究開発

課題ウ「マルチ周波数協調動作技術の研究開発」ではサブテラヘルツ帯を活用する無線 LAN の実現に向けて、システム化技術の研究開発を実施した。課題ウ-1「複数周波数帯の電波指紋を活用した無線リンク利用可能性予測技術の開発」ではマイクロ波・ミリ波の伝搬情報からテラヘルツ帯無線リンクのリンク利用可能性を予測する技術の研究開発を実施した。課題ウ-2-a「課題ウ-2-a：連携先アクセスポイントの選定と各無線リソースへのトラフィック割り当て技術」では複数のアクセスポイント (AP)・端末 (STA)・利用可能周波数帯が存在する下で、機械学習ベースの AP 選択と無線リソース割り当て技術の研究開発を実施した。課題ウ-2-b「IRS を利用したアクセスポイント連携高度化技術」では連携可能 AP 数と接続端末数の増加とマルチストリーム伝送実現のための IRS 制御及び割当技術の研究開発を行った。課題ウ-2-c「連携データの分配技術とアクセスプロトコル」では複数の AP を連携させるための無線 LAN 向けプロトコルと高速バックホールの研究開発を行った。そして、課題ウ-3「複数周波数帯統合評価系の構築」では開発技術を適用したマルチバンド無線 LAN の技術検証系・シミュレーション系の開発を実施した。以下、各々の成果について述べる。

2. 3. 1. 課題ウ-1：複数周波数帯の電波指紋を活用した無線リンク利用可能性予測技術の開発

テラヘルツ帯を用いて 100 Gbps 級の大容量通信が可能な無線 LAN を実現するためには、テラヘルツ帯の利用に伴って生じる大きな距離減衰を、送受信双方で高利得な狭ビームを用いることで補償する必要がある。しかし、狭ビームを用いる場合、通信を確立するためにはビームを適切

な方向に制御することが不可欠である一方、ビーム方向の探索を網羅的に実施すると大きなオーバーヘッドが生じる。そこで我々は、テラヘルツ帯で網羅的なビーム探索を行う代わりに、比較的取得容易なマイクロ波帯の CSI 情報や、テラヘルツ帯より広いビーム幅により探索負荷が相対的に小さいと考えられるミリ波無線 LAN の接続情報を用いて、テラヘルツ帯リンクの可用性や有望なセクタペアを推定する技術の研究開発を実施した。

開発した機械学習モデルでは、マイクロ波帯の CSI 情報やミリ波無線 LAN の接続情報と、テラヘルツ帯における最大受信電力および対応するセクタペアとの関係を学習する。学習モデルには、Probabilistic Neural Networks (PNN) を用いたマルチラベル推定を採用した (図 2.3.1-1)。本モデルでは、PNN を用いることで、回帰モデルでは対応しにくい離散的なセクタ情報を推定に反映できるほか、少数、あるいは欠落のある教師データでも推定を可能としている。

開発モデルの有効性、推定に有用な入力特徴量、および推定に必要な教師データ密度の評価を、レイトレースシミュレーションとガウス過程回帰による補間を用いて作成した高解像度の評価用データにより実施した。図 2.3.1-2 は学習・推定結果であり、横軸は教師データの取得に使用したグリッド幅を、各線は学習・推定に使用した入力特徴量を示す。この結果から、推定にはミリ波のセクタスイープ情報を用いることが有効であり、4 cm のグリッド幅で教師データを取得することで、90 % 以上の推定精度を達成できることを確認した。

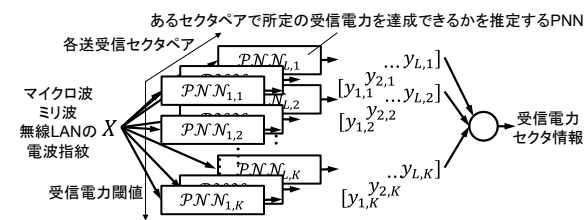


図 2.3.1-1 受信電力推定モデル

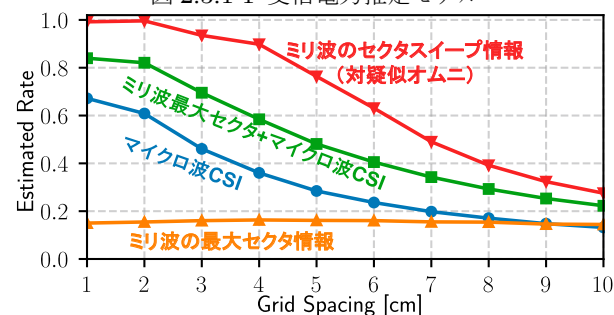


図 2.3.1-2 教師グリッド幅と推定精度

2. 3. 2. 課題ウ-2：テラヘルツ帯複数アクセスポイント連携マルチストリーム伝送技術の開発

2. 3. 2. 1. 課題ウ-2-a：連携先アクセスポイントの選定と各無線リソースへのトラフィック割り当て技術

複数 AP が存在する環境において、各 AP のリソース割り当てを教師あり学習によって行うことが考えられる。教師あり学習では、所定の粒度で時間リソースを分割し、リソース割り当てパターンを全探索し、各 STA におけるチャネル容量を計算し、各 STA のチャネル容量の総和 (システムチャネル容量) が最大となる割り当て比率 $\mathbf{bm}$ 、 $\mathbf{n}$ の組み合わせを教師ラベルとする、チャネル状態と割り当て比率の教師ラベルの組み合わせを多数用意し、学習を進

める必要があるが、割り当て比率の組み合わせは AP/STA 数が増加すると指数関数的に増加するため、教師あり学習は実現が難しくなる。

そこで自己教師あり学習を適用することを検討した。教師あり学習では DNN (Deep Neural Network) の出力と教師ラベルによる損失関数が最小になるように DNN のウェイト、バイアスの更新を行うが、自己教師あり学習では、DNN の出力から算出される損失関数を最小化するように DNN 内のウェイト、バイアスの更新を行う。このため、教師ラベルなしで学習を行うことができる。なお、損失関数としてシステムチャネル容量の逆数を用いる。

2 台の AP と 2 台の STA をエリア内に配置し、STA におけるアンテナパネル数 L は 2 とした。サブテラヘルツ帯の帯域幅は 2.16 GHz とし、ターゲット伝送レートは 20 Gbps とした。評価環境は $U-1$ で想定した環境を想定し、 $U-1$ で得られた受診品質の予測値を用いて無線リソース制御の評価を行った。

図 2.3.2.1-1 に、システム容量最大基準における、理想的な割り当てからの自己教師あり学習の改善率を示す。指標とは異なる STA 容量は 10%以上の劣化が見られるが、指標であるシステム容量は 10%以内の劣化に収まっていることが分かる。図 2.3.2.1-2 に、最小 STA 容量最大基準における、理想的な割り当てからの自己教師あり学習の改善率を示す。図より自己教師あり学習は、理想からの劣化を 10%以内に抑えることができることが分かった。

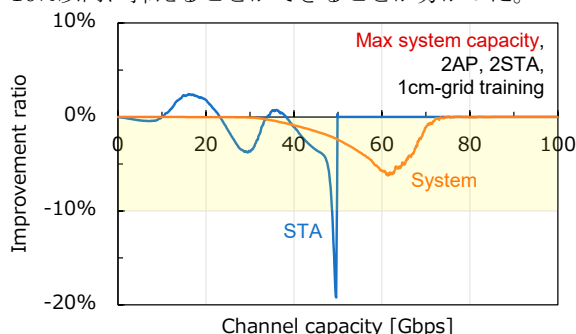


図 2.3.2.1-1 システム容量最大基準時の理想からの劣化

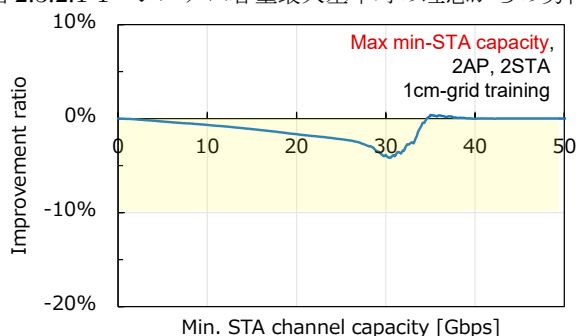


図 2.3.2.1-2 最小 STA 容量最大基準時の理想からの劣化

2. 3. 2. 2. 課題ウ-2-b: IRS を利用したアクセスポイント連携高度化技術

本課題では、複数のアクセスポイント (AP) と Intelligent Reflecting Surface (IRS) を高度に連携させることにより、伝搬環境の変動に対してロバストなマルチストリーム伝送技術の確立に取り組んだ。

具体的には、ユーザー移動に伴うチャネル変動環境において、AP と IRS の組み合わせを動的に最適化する必要があることに着目し、AP-IRS クラスタリング方式を設計した。本方式では、各ユーザーに対して通信に寄与する AP および IRS の組をクラスタとして定義し、クラスタ単位で伝送制御および IRS 位相制御を行う。ユーザー移動に

起因するチャネル変動に対して、カルマンフィルタを用いた状態予測に基づきクラスタ構成を適応的に再構成することで、環境変動に対するロバスト性を確保した。その結果、電波強度や位置情報に基づく従来のクラスタリング手法と比較して、システムスループットを 30 % 以上向上可能であることを確認した。

さらに、IRS を用いた通信において支配的なオーバーヘッドとなるビームトレーニングに着目し、IRS と AP およびユーザー間の距離・角度などの幾何関係に基づき、C-BF (Coordinated Beamforming) における効率的なビーム探索を実現するコードブック設計および探索手法を構築した。従来のように距離ごとに独立した階層ビーム探索を行うのではなく、角度方向と距離方向を分離した二段階の階層ビームトレーニング構造を導入した。これにより、探索量は従来の $O(r \log n)$ から $O(\log n + \log r)$ に削減される。角度探索では、低階層において広ビームによる探索領域の粗探索を行い、高階層において多焦点ビームによる高精度な方向推定を行う。一方、距離探索では、階層的なビームフォーカシングによりユーザー位置に応じた最適焦点距離の効率的な決定を行う。これらの手法により、ビーム探索に必要な試行回数は約 235 回程度まで削減可能であることを確認した。これは、設定精度を満たすために全探索を行った場合に必要となる約 8000 万回の試行と比較して、大幅なオーバーヘッド削減である。

以上より、本課題で提案した AP-IRS クラスタリングおよび階層型ビームトレーニング手法により、環境変動に対するロバスト性を維持しつつ、探索オーバーヘッドを大幅に削減した高効率な IRS 制御およびマルチストリーム伝送が実現可能であることを示した。

2. 3. 2. 3. 課題ウ-2-c: 連携データの分配技術とアクセスプロトコル

テラヘルツ帯において伝送速度 100 Gbps を達成するためには、複数ストリームでデータを送信するマルチストリーム伝送が必要である。しかし、高周波数であるテラヘルツ波は直進性が高く、1 台の AP による散乱波に基づく multi-input multi-output (MIMO) 伝送が難しい。そこで我々は、複数の AP を連携して別々でデータストリームを 1 台の STA に同時送信する Joint Transmission (JT) を実現するアクセスプロトコルの研究開発を行った。

本研究では、multi-link-operation (MLO) に基づく non-standalone 運用を想定したテラヘルツ帯無線 LAN システムのアクセスプロトコルを考案した。考案したプロトコルでは、AP と STA は到達性の良いマイクロ波帯で接続し、高周波数帯での接続の際に必要なビームフォーミング (BF) を省略する。また、テラヘルツ帯通信はフレーム衝突を回避して従来のランダムアクセスによる MAC 効率の低下を抑えるために、コーディネータによる一括管理を行う。コーディネータは STA と未接続の周辺 AP との BF をスケジューリングし、その結果を収集することで JT を行う連携する AP や端末のシームレスな移動のためのローミング先 AP を即時に選定するための情報として活用する。

開発したプロトコルを課題ウ-3 で開発したシステムレベルシミュレーションに実装し、性能評価により図 2.3.2.3-1 に示すように使用周波数帯 150 GHz、帯域幅 25.92 GHz (2.16 GHz $\times$ 12ch) において、十分なバックホールの容量を確保できるとき、2 つの AP が連携した JT で受信側の伝送速度 100 Gbps が達成可能であることを確認した。

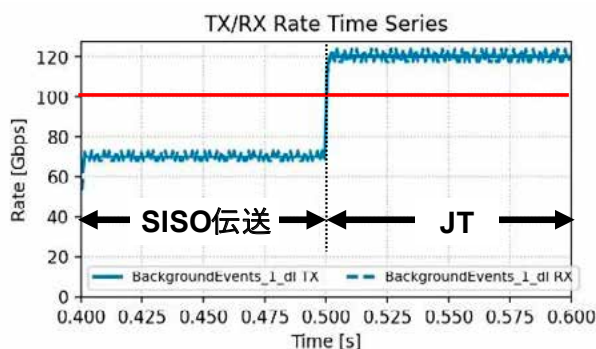


図 2.3.2.3-1 システムレベルシミュレーション評価結果

また、IEEE 802.11 の標準化を念頭に、JT のリンクレベルにおける利得を確かめるべくマイクロ波における JT の面的周波数利用効率についての評価を行った。JT では複数の AP が 1 つの STA に対して重畳伝送を行ことができるため、総送信電力を AP 数倍できることが期待できる。その効果も含めて、マイクロ波帯を想定したリンクレベルシミュレーションにより評価を行い、図 2.3.2.3-2 に示すように JT が単一 AP による伝送と比較して実効データレートを 35 % 向上させることを確認した。

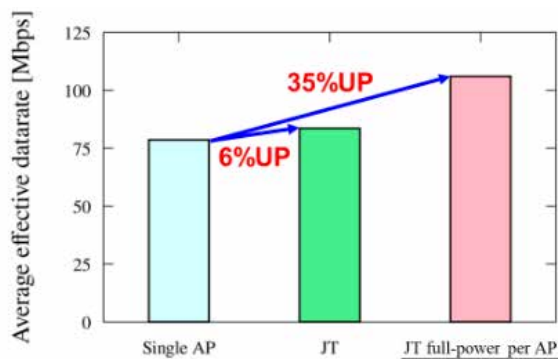


図 2.3.2.3-2 リンクレベルシミュレーション評価結果

2. 3. 3. 課題ウ-3：複数周波数帯統合評価系の構築

テラヘルツ帯等の無線通信の高速化に伴い、対応する有線バックホール回線の伝送能力がシステム全体のボトルネックとなる懸念がある。従来の標準的なネットワークスタックである TCP/UDP 通信では、OS のカーネル処理によって多大な CPU 負荷が生じ、100 Gbps を超えるような超広帯域通信を実現する上で障壁となる可能性がある。

本研究では、カーネル処理をバイパスする RoCE (RDMA over Converged Ethernet) プロトコルを用い、TCP (62.6 Gbps) を上回る 196 Gbps (ハードウェア限界付近) のスループットを達成した。さらに、パケットの再送制御に利点がある DPDK (Data Plane Development Kit) についても検討し、115 Gbps の通信速度を確認した。

有線バックホールネットワーク (図 2.3.3-1) の試作では、システムを統括するストリームコーディネータ (Src) から複数のアクセスポイント (AP) へのデータを最適に分配・制御する機能を開発した。MAC アドレスの動的書き換えにより特定の AP を経由させるマルチルート伝送を行い、複数経路の同時利用によるスループット向上を実現した。本システムの評価では、複数経路合計で 118 Gbps のスループットを確認した。さらに、実用化を見据えた検証として、開発したバックホールに Wi-Fi 7 を用いた無線

区間 (AP-STA 間) を構成し、映像伝送試験を実施した。その結果、4K/30 fps の非圧縮映像のリアルタイム伝送に成功した。

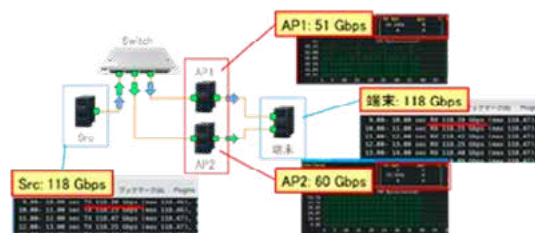


図 2.3.3-1 マルチルートバックホールシステム

最終的に、本バックホールにテラヘルツ波、ミリ波、マイクロ波の 3 周波数帯を統合した「マルチバンド統合型評価システム (図 2.3.3-2)」を構築した。テラヘルツ波には WiGig をアップコンバートしたデバイスを用い、「THz 疑似 Joint Transmission」「THz SISO」「ミリ波」「マイクロ波」の 4 つの通信形態を確立した。加えて、テラヘルツ通信を最優先しつつ、遮蔽や移動等により通信が切断された際にミリ波へと切り替える動的ルート制御機能を実装した。移動体模擬環境を用いたデモンストレーションでは、端末の移動に伴いテラヘルツ帯の品質が低下した際、ミリ波通信へ切り替わる挙動を確認した。

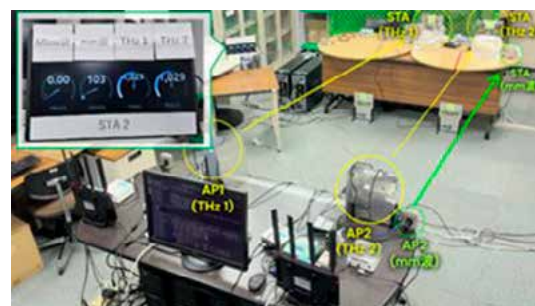


図 2.3.3-2 マルチバンド統合評価システム

3. 今後の研究成果の展開

課題ア「MIMO 対応多素子アンテナモジュールの研究開発」としては、本研究開発を通じて獲得することができた 150GHz 帯 AiP モジュールを成立させる技術 (RF-IC、アンテナ・伝搬解析、材料・製造プロセス) の優位性を保ちつつ、将来市場に備える必要があると考えている。システム視点では、様々なユースケース (データセンター等) に応じた伝搬特性およびアクセスポイント配置やアンテナ指向性に関する指針の明確化が求められる。また、デバイス技術としては、アクセスポイント向け高 EIRP フェーズドアレイフロントエンド IC の実現やバックホール向けサブテラヘルツ帯長距離通信向けアンテナの低コスト化等が求められる。さらに、100 GHz 超対応基板材料や三次元集積化基板製造の競争力を維持しつつ実用化につなげていくためには、国内外におけるマーケティング活動等を継続していく必要がある。

課題イ「トランシーバ技術の研究開発」では、2 次元平面にアレー状に配置可能な送受信回路とアンテナ素子によって、300 GHz 帯で 30 度以上の角度で 2 次元ビーム走査と 1 チャネル 40 Gbps の伝送速度が可能であることを示したが、製品化・実用化に向けて更に必要な点としては、以下のようなことが挙げられる。

- (1) アレー数の増加や、実装損失の低減、バルク CMOS より高性能な SOI (Silicon On Insulator) などの技術の採用による高出力化と通信距離延伸。

- (2) モジュール基板の低損失化（材料と構造の両面による）、加工精度の向上等による高性能化や、低コスト化。
(3) 300 GHz 帯無線や多素子フェーズドアレーのキャリブレーションや試験方法の開発。

これらの事項に取り組むと同時に、開発した技術を潜在ユーザー等に周知していくための展示広報活動を既に CEATEC 展示会や大阪・関西万博等で実施しているが、今後も継続して実施していく予定である。

課題ウ「マルチ周波数協調動作技術の研究開発」において研究開発を実施した超高速無線 LAN システムの実現にはフレームの誤り符号化・復号化処理をはじめとした超高速ディジタルベースバンド系の開発が今後必要になると共に、標準規格の策定が不可欠である。無線 LAN の標準化作業が行われている IEEE 802 標準化委員会では 2029 年度を目途に Sub-7 GHz 帯と連携して運用されるミリ波帯無線 LAN 規格 (IEEE 802.11bq) の標準化作業が進められている。本研究開発の成果のうち、ミリ波帯においても適用可能なものについては当該標準化作業に提案を行っており、今後も将来的なサブテラヘルツ帯無線 LAN の標準化作業開始を念頭におきつつ、継続的な提案活動を行っていく。また、サブテラヘルツ帯無線 LAN の広い普及に向けてはユースケースの開拓と装置価格の低減が必要である。本研究開発課題においてユースケースとして想定したデータセンターでは装置価格が比較的高価格であっても導入の可能性がある、そのようなユースケースに向けた装置開発を進める必要がある。その装置をフィールドで使用するためには特定実験局免許を取得する必要がある。一般的に特定実験局制度を使えば、手続きが大幅に簡略化され、申請から 2 週間以内に免許が下りる。しかしサブテラヘルツ帯の場合は、免許取得に向けた登録点検で使用する測定器が高額なうえ、その指定校正や補正值の取得に半年以上の時間がかかるなど、多くの課題が存在する。サブテラヘルツ帯無線装置のデモや実験を容易にするために、制度の大胆な見直しが必要である。

4. むすび

以上、「テラヘルツ波による超大容量無線 LAN 伝送技術の研究開発」にて実施した研究開発の内容と成果について概説した。本研究開発において、対外発表・知財権利化の観点では、38 件の査読付き誌上発表論文、104 件の査読付き口頭発表論文、248 件の口頭発表を実施した。これらに対して 19 件の受賞があり、研究成果は国内外で高い評価を得ている。また、52 の標準化寄書入力を実施すると共に、国内外において 53 件の特許出願を行い、そのうち 5 件については特許登録に至っている。また、報道発表についても 8 件実施し、研究成果の社会的周知に務めた。

【査読付き誌上発表論文】

- [1] Y. Yamazaki, et al., “A 142–164-GHz Phased-Array AiP Module With High-Power-Density and High-Efficiency Transceiver in 65-nm CMOS for 6G UE”, IEEE Journal of Solid-State Circuits (Early Access), March 2026.
[2] S. Tanaka, et. al., “A 300-GHz-Band 36-Gb/s Scalable 2D Phased-Array CMOS Double Superheterodyne Receiver,” IEEE Solid-State Circuits Letters, May 5, 2025. DOI:10.1109/LSSC.2025.3566726
[3] R. Hibi, H. Hashida, Y. Kawamoto, and N. Kato, “IRS-Aided Near-Field Communication: Prospects and Challenges with Codebook Approach,” IEEE Wireless Communications, August 2025. DOI:10.1109/MWC.010.2400251

【その他の誌上発表】

- [1] 枚田明彦、“テラヘルツ帯無線通信におけるアンテナ・伝搬技術”、電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン B-plus (2024 年 9 月 4 日)

【査読付き口頭発表論文】

- [1] Y. Morishita, et al., “150 GHz-Band Compact Phased-Array AiP Module for XR Applications Toward 6G”, 2025 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium June 2025.
[2] S. Kubo, et. al., “A 20Gb/s QPSK Receiver with Mixed-Signal Carrier, Timing, and Data Recovery Using 3-bit ADCs”, 2024 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (Apr. 24-25, 2024)
[3] Keiichiro Mori, Norimasa Yafune, Kazunobu Serizawa, Takuya Kurihara, Kazuto Yano, and Toshikazu Sakano, “Study on architecture and procedure for joint transmission including frame retransmission for IEEE 802.11 wireless LAN,” The 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall), October 10, 2024

【口頭発表】

- [1] 長敬三他、“150GHz 帯および 300GHz 帯における室内建材の誘電率の測定”、電子情報通信学会総合大会 (2025 年 3 月 26 日)
[2] K. Sakakibara, et. al., “Multi-Beam Phased Lens Array for MIMO Systems in Sub-Terahertz Band,” IEEE International RF and Microwave Conference, (Sept. 18, 2025)
[3] 森敬一郎、矢船憲成、芹澤和伸、栗原拓哉、矢野一人、坂野寿和、“IEEE 802.11 無線 LAN の複数アクセスポイント連携による Joint Transmission 方式の検討”、電子情報通信学会技術研究報告、SR2023-88、2024 年 3 月

【申請特許リスト】

- [1] 柳場亮佑、戸村崇他、アンテナ装置及びアレイアンテナ装置、PCT、2023 年 12 月 26 日
[2] 久保俊一、受信装置及び送受信システム、日本、令和 5 年 2 月 24 日
[3] 藤晋平、中村理、難波秀夫、無線通信装置及び無線通信方法、PCT、PCT/JP2025/010782、2025 年 3 月 19 日

【登録特許リスト】

- [1] 種子田浩志、配線基板、日本、2023 年 3 月 29 日、2025 年 9 月 22 日、特許第 7746645 号
[2] FUJISHIMA Minoru, ARRAY ANTENNA DEVICE, US, 2023/02/17, 2025/05/22, US-A-2025/0167458
[3] 森敬一郎、矢船憲成、芹澤和伸、栗原拓哉、矢野一人、坂野寿和、発通信方式および通信システム、日本、2024 年 12 月 24 日、2026 年 2 月 18 日、特許第 7821546 号

【受賞リスト】

- [1] 山崎雄大、「第 38 回 独創性を拓く先端技術大賞」文部科学大臣賞、“第 6 世代 (6G) 以降の移動通信システムに対応した無線機の超小型化”、2025 年 7 月 14 日
[2] Chatchai Chokchai, el. al., Best Poster Award, 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, “Broadband GCPW-to-Waveguide Transition in Multi-Layer Dielectric Substrate with Double Patch and Corrugation Structures in 275 GHz Band,” October 2023.
[3] Ryuhei HIBI, IEEE VTS Tokyo/Japan Chapter 2024 Young Researcher's Encouragement Award, “3D Codebook Construction Strategy based on Control Accuracy Index for Intelligent Reflecting Surface in Near-field, 2024 年 10 月 17 日

【報道発表リスト】

- [1] “サブテラヘルツ帯 CMOS IC で 640 Gbps の無線伝送