6Gに向けたサブテラヘルツ帯超高速無線伝送に関する研究

富士通株式会社　多木（おおき）　俊裕（としひろ）
日本電気株式会社　丹治（たんじ）　康紀（こうき）
日本電気株式会社　丸田（まるた）　靖（やすし）
株式会社NTTドコモ　鈴木（すずき）　恭宜（やすのり）
日本電信電話株式会社　高橋（たかはし）　宏行（ひろゆき）

1. はじめに

第6世代（6G）に向けて移動通信システムの研究開発が世界中で推進されている。6Gでは、更なる高速伝送を可能にするために、広い帯域幅を確保できるサブテラヘルツ帯の利用が提案されている。本稿では、総務省の電波資源拡大に関わる研究開発である「100GHz以上の高周波数帯通信デバイスに関する研究開発」の受託研究成果を概説する。

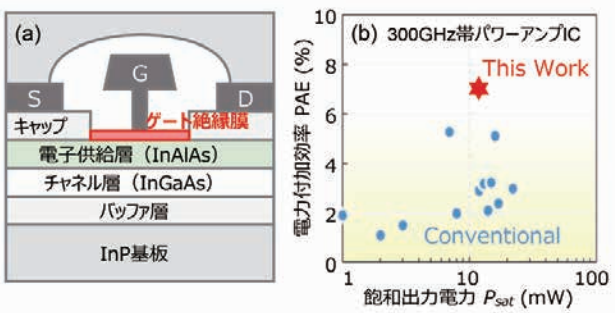
2. サブテラヘルツ帯パワーアンプ（富士通）

100GHz以上のサブテラヘルツ帯は幅広い周波数帯域により100Gbps超の高速通信を実現する有力な候補である。しかしながら、電波の到達距離や障害物に対する回り込みの課題も存在し、これらの直接的な克服や低い周波数帯との共存が実用化への鍵といえる。サブテラヘルツ帯での通信距離の短さは、自由空間伝搬損失や大気減衰など電波の有する特徴以外に、現存の送信用パワーアンプの出力が低いことに起因する。また、更なる課題として、伝送線路や素子内の電力損失が大きく、消費電力の増大も挙げられる。パワーアンプを構成するトランジスタでは動作周波数が高いほど利得が下がるため、同じ構造であれば出力及び効率は共に低くなり、トレードオフの関係を有する。本章においては、100・300GHz帯の高出力化及び高効率化技術について紹介する。

まず100GHz帯では、化合物半導体である窒化ガリウム（GaN）材料系を採用した。GaNは原子同士が強固に結合するいわゆるワイドバンドギャップ半導体であり、破壊電界強度が高いことによる高出力及び高効率動作が期待できる。また、デバイス構成として高電子移動度トランジスタ（HEMT：High Electron Mobility Transistor）を用いた。HEMTは異種接合により電子供給層と走行層（チャネル）を空間的に分離し、GHzオーダーの高周波動作に適する。

我々はGaN系HEMTで通常広く用いられているAlGaN電子供給層（障壁層とも呼ぶ）をInAlGaNから成る4元混晶に変更した。GaN系材料は、その強い自発分極とピエゾ分極によりHEMTの2次元電子ガス濃度を高くでき、ワイドバンドギャップに起因する高耐圧性能と相まって高出力動作を可能とする。今回、InAlGaNを供給層として用いることで自発分極を更に大きくでき、そのため供給層の薄膜化が可能となった。供給層はゲート電極とチャネルの間に位置し、その距離を短くすることでゲートの効き、つまり利得を向上でき、高出力化と高効率化につながる。このInAlGaN薄膜供給層は、結晶成長そのものも困難であるが、成膜後にダメージを受けやすい。そのため、SiNから成る半導体保護膜について、成膜後熱処理やプロセスフローの工夫による材料内及び絶縁膜/半導体界面の結晶欠陥を低減し、高周波かつ高出力/高効率動作を可能とした。具体的には、100GHz帯において飽和出力603mW、電力付加効率（PAE：Power-Added Efficiency）30.5%、ドレイン効率43.7%を得ることができた。これらの値は単体トランジスタの性能として世界トップクラスである。

次に300GHz帯においては、同じく化合物半導体であるリン化インジウム（InP）をベースとした材料系を採用した。InP系HEMTはInP基板に格子整合するInGaAsをチャネルとするHEMTであり、InGaAsの室温での電子移動度が10,000cm²/Vs程度と非常に高いため、超高周波動作に適する。InP系HEMTの課題は、他材料のHEMTに比べて電圧耐性が低く出力を上げづらいことにある。そこで今回、ゲート電極の直下に絶縁膜（酸化膜）を有する、いわゆる



■図1.（a）InP系MOS-HEMT断面、(b）特性ベンチマーク

MOS構造を検討した（図1 (a)）。膜厚2nmと非常に薄い酸化アルミニウム成膜後のスチームアニールにより不純物低減及び緻密化といった高品質化を行い、これまで実現困難とされてきたInP系HEMTのMOS化に成功した。作製したHEMTを6段直列構成の集積回路化し、図1 (b) に示すように、300GHz帯において飽和出力11.5mW、効率（PAE）は世界一となる7%の値を得た[1]。

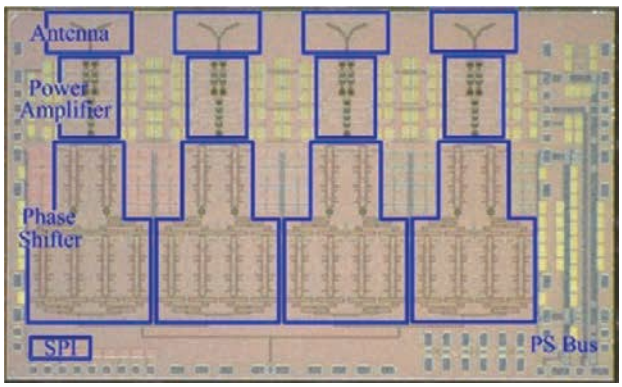
3. アンテナ一体型フロントエンドIC技術（日本電気）

本技術課題の目的は、150GHz帯でビームフォーミングICとアレーアンテナを一体化した100素子以上のAPAA（Active Phased Array Antenna）モジュールの試作を行い、EIRP（Equivalent Isotropic Radiation Power：等価等方輻射電力）50dBm以上、ビームステアリング角±30°以上の特性を有していることを実証することである。

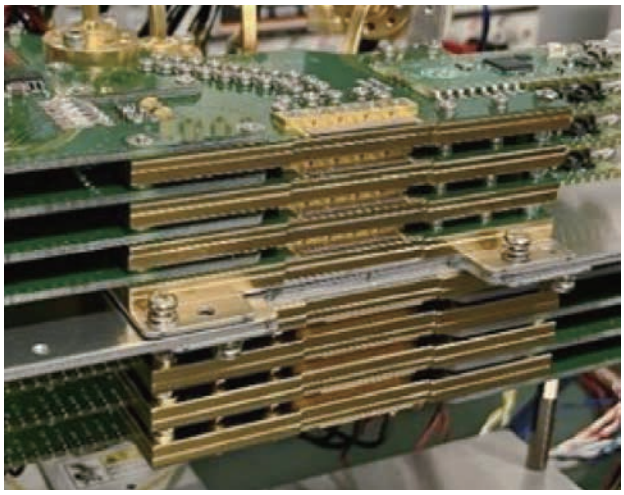
ビームフォーミングICは、半導体製造プロセスとして性能とコストのバランスに優れた22-nm FDSOI CMOSを採用した。アンテナは、アンテナオンチップに適した小型なテーパードスロットアンテナを採用した。アンテナ利得は-1dBiであった。増幅器は、差動7段構成で最大利得が28dB、飽和電力10dBmであった。独自構成による移相器は、±180°以上の範囲で位相ステップ5°以下を実現した。図2に示すビームフォーミングICは、4.5mm x 3.0mmのサイズで、アンテナ/増幅器/移相器からなる送信4系統を1チップ上に集積している。アンテナ素子間隔は、150GHzの半波長1mmである。

APAAモジュールは、アンテナ4素子入りのビームフォーミングICをプリント基板上に4個並列に実装した16素子のモジュールを開発し、更にこのモジュールを図3のように8段重ねて128素子モジュールとし、100素子以上の多素子化に成功した。水平方向は、図4 (a) に示すように約±45°の範囲でビームステアリング可能であり、垂直方向は、図4 (b) に示すようにグレーティングローブがあるが、こちらも約±45°の範囲のビームステアリング可能であることを確認した。また、128素子モジュールで飽和EIRPが50dBmとなることを確認した。

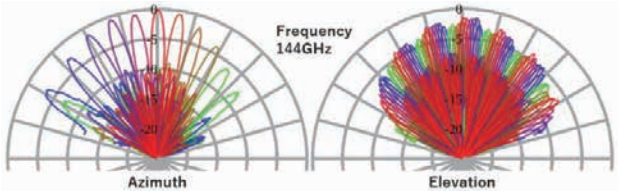
伝送試験/多重化検討として、開発したAPAAモジュールを使用し、帯域幅2GHzの多値変調信号（128QAM）で10Gbpsの伝送を確認した。さらに、キャリアアグリゲーションによる周波数多重、サブアレーによる同一周波数の空間多重、垂直/水平の偏波多重の検証を行い、いずれの場合も伝送容量の倍化が可能であった。これらはいずれも組合せ可能であり、目標となる100Gbps級の大容量伝送の実現に向けて、重要な成果が得られた。



■図2. ビームフォーミングIC



■図3. 128素子モジュール



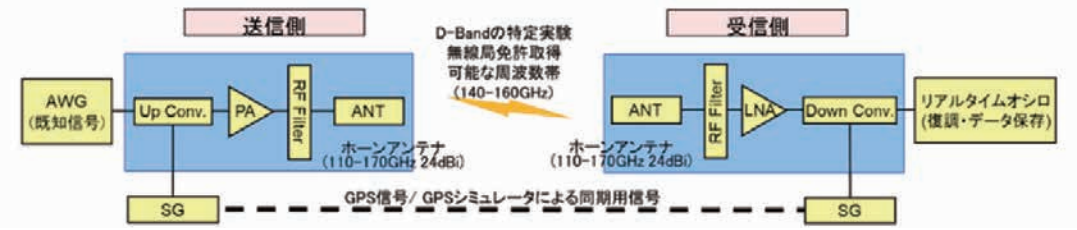
(a) 水平方向 (b) 垂直方向
■図4. アンテナパターン測定結果

4. 高周波数帯における無線システム構成技術

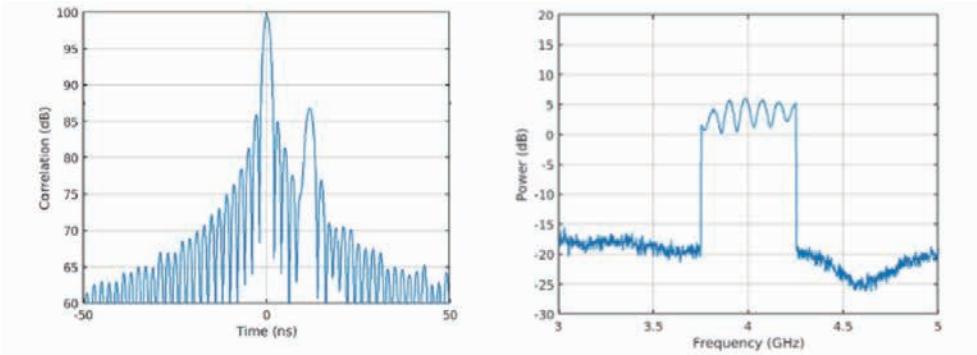
(1) 100GHz超帯での伝搬路特性（日本電気）

100GHz超帯の移動通信向け無線装置・システム仕様策定のため、屋内外の基本伝搬・伝送特性の測定・解析を行う伝搬路測定システムを構築し、伝搬路測定･解析を行った。

図5に、伝搬路測定システム構成を示す。送信側にて



■図5. 伝搬路測定システム構成



■図6. 反射・散乱のある屋内環境下での伝搬特性測定結果

150GHz帯、500MHz帯域幅のOFDM信号に準拠した既知信号を出力し、受信側にて測定した波形を基に、伝搬路解析を行う。**図6**に、反射・散乱のある屋内環境下での伝搬特性測定結果を示す。遅延プロファイルと周波数特性の解析結果から、反射と散乱によるマルチパスによるフェージングが発生していることが分かり、100GHz超帯の移動通信システムとして反射・散乱の影響を考慮すべきと考える。

(2) 100GHz超帯での無線伝送実験（NTTドコモ）

100Gbps以上を達成する高速な送受信機を既存のSystem on Chip（SoC）で構成する場合、SoCのデータレート10Gb/s程度と低く、高データレートにするためには複数のSoCの入出力を束ねる必要がある。そこで、チャネルボンディング（CB：Channel Bonding）技術を検討した。CB送受信機ではベースバンド（BB：Base Band）信号発生器をn台並列に並べ、それぞれの信号を異なる周波数にアップコンバート、ボンディングし、その後サブテラヘルツ帯にアップコンバート、電力増幅後に送信する。また、受信信号を増幅しダウンコンバート、n分波し、各BB信号に対して復調処理を行う。受信機も同様な構成となっている。SoCでは1.6Gbaudで128QAMが可能であるが、100Gbpsを超えるには10チャネル以上が必要となる。そこで4波をCBし、中心周波数10GHz、帯域幅10GHzの信号を生成、RF帯に変換後伝送する系を3系用意した。各系におけるRFの中心周波数は121.2、132.2、143.2GHzであり、これらを同時送信する。

見通しで100mとれる状況において、上記の送信機及び受信機を用いて無線伝送実験を行った。実験環境での電源設備の都合から、3系統の送受信機を同時作動させることができないため、1系統ごとに実験を行った。スループットはBaud rateと符号誤り率から計算で求めた。中心周波数132GHzと142GHzの送信機及び受信機において、128QAMにて各チャネルのスループット10.2Gbpsを達成した。中心周波数122GHzの送信機及び受信機において、64QAMにて各チャネルのスループット8.7Gbpsを達成した。これにより3系統の合計スループットは、116.4Gbpsを達成した。

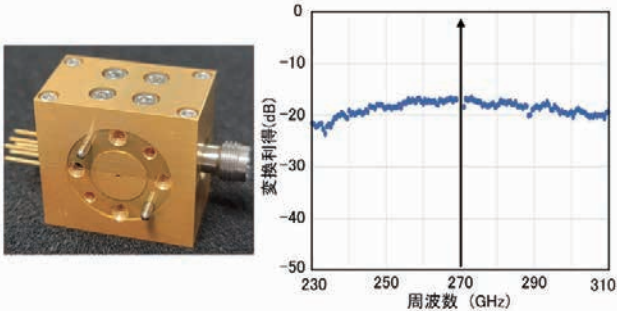
(3) 300GHz帯における無線システム構成技術（NTT）

300GHz帯を用いた無線通信技術では、数10GHz以上の周波数帯域の活用が議論[1]されており、従来と比較して桁違いに広帯域であることが特長である。しかし300GHz帯無線装置の検討や伝送評価は十分進んでいない。本報告では、300GHz帯無線技術の可用性を検証するため、広帯域ミキサを設計し、実験装置を構築して100Gbps/ch、100mの無線伝送を評価した結果について述べる。

本検証にあたり、目標とするRF帯域を60GHzと設定した。サブテラヘルツ帯で期待される無線伝送容量の1つである100Gbpsの変調方式の典型例として、16QAMの単側波帯変調を考える場合、周波数スペクトルのメインローブの

占有帯域は25GHz程度必要となる。今回目標としたRF帯域は、100Gbpsの変調波を、十分なガードバンドを確保した上で2つ収容可能であり、300GHz帯よりも低い周波数帯では確保が極めて困難な帯域幅である。

図7に試作したミキサモジュールと動作帯域を示す。本ミキサにはInP HEMT（Indium-phosphide high-electron-mobility transistor）を用いたミキサICが格納されている。本ミキサでは、LO周波数が270GHzの際に240GHz～310GHzの70GHzにわたって平坦な帯域特性が得られており、目標とした60GHzの帯域を満たすことが分かる。本ミキサを導波管で直接接続した系でのデータ伝送実験を実施した結果、本ミキサは100Gbps以上の伝送が可能であり、かつRFフィルタやLO周波数の変更により、100Gbps級の無線チャネル切替えや、2つの100Gbps信号の同時伝送が可能であることを実証した[2]。



■図7. 300GHz帯ミキサモジュールと変換利得

図8に本ミキサを用いて構築した300GHz帯無線装置の外観及び伝送試験の模様を示す。アンテナには利得50dBiのカセグレンアンテナを用いた。伝送実験は大型電波暗室の中で実施し、2枚の反射板を用いて105mの実距離を確保した。実験の結果、16QAMの単側波帯変調による100Gbps/ch変調波に対し、105mの伝送距離で受信信号のコンスタレーションのSNRが16.5dB以上得られることを確認できた。本数値は誤り訂正符号の使用によって通信が可能となる性能である。以上の検証により、300GHz帯を用いて100Gbps/ch、100mの伝送が可能であることを示すことができた。

5. おわりに

本稿では、総務省より受託した研究開発の内容を概説した。サブテラヘルツ帯でこれまでにない研究成果を創出した。本研究開発は基礎的な段階の取組みであり、今後も継続した取組みを推進することが必要である。

謝辞

本稿には、総務省から委託を受けて実施した「電波資源拡大のための研究開発（JPJ000254）」の成果の一部が含まれています。

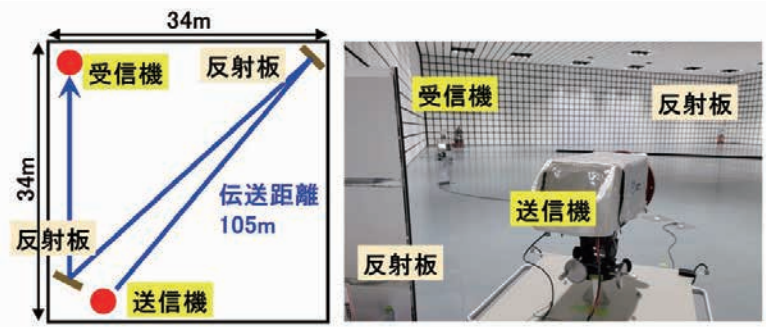
（2024年5月24日 ITU-R研究会より）

参考文献

[1] Y. Kumazaki, S. Ozaki, N. Okamoto, N. Hara, Y. Nakasha, M. Sato, T. Ohki, “High-Efficiency 250-320GHz Power Amplifiers Using InP-Based Metal-Oxide-Semiconductor High-Electron-Mobility Transistors,” IEICE Trans. Electron., vol. E106-C, No.11, pp. 661-668, November 2023, doi：10.1587/transele.2023MMP0005

[2] V. Petrov, T. Kürner, and I. Hosako, “IEEE802.15.3d: First Standardization Efforts for Sub-Terahertz Band Communications toward 6G,” IEEE Communications Magazine Nov. 2020, pp. 28-33.

[3] T. Jyo, H. Hamada, T. Tsutsumi, I. Abdo, S. Kawahara, D. Kitayama, M. Nagatani, H. Takahashi, “220-to-320-GHz Fundamental Mixer in 60-nm InP HEMT Technology Achieving 240-Gbps Dual-Band Data Transmission,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 72, issue 1, January 2024



■図8. 300GHz帯100Gbps、100m伝送試験