

文部科学大臣賞

次世代無線端末の実現に向けた
超小型サブテラヘルツ半導体無線機

東京科学大学 工学院電気電子系 電気電子コース
博士後期課程2年

山崎 雄大

1. 緒言

半導体集積回路 (IC) を用いた無線携帯端末は、通信速度の向上や新たなアプリケーションの登場を繰り返しながら、情報通信社会の基盤として不可欠な存在となってきた。これまでの第1世代(1G)から第4世代(4G)の携帯端末では、主にマイクロ波 (6GHz 以下) の周波数帯が使用されており、周波数自体は大きく変えずに、無線ICの集積度向上や通信方式のアップデートなどによって携帯端末の小型化や通信の高速化が進められた。さらに、スマートフォンの普及や動画配信、クラウドサービスなどの利用拡大に伴い、携帯端末に要求されるデータ通信量は年々指数関数的に増加している (図1 (a))。その結果、現在ではマイクロ波を利用した通信量は極めて多くなり、マイクロ波の限られた周波数帯域は年々逼迫している [1]。近年では、第5世代 (5G) 移动通信システムの実現に向けて、新たにミリ波 (28GHz、39GHz など) を用いた数 Gbps 規模の無線通信の開発が進められている [2-14]。しかし、IoT やウェアラブル端末、AR/VR などの無線端末の増加により、通信量の要求は今後さらに加速していくと予測でき、20-30年後にはミリ波も同様に逼迫していくと考えられる。そのため、第6世代 (6G) 以降の移动通信システムでは、ミリ波のさらに上の周波数であるサブテラヘルツ波 (100GHz~300GHz) を用いた 100Gbps 以上の超高速無線通信が不可欠である。

サブテラヘルツ波は、従来の周波数帯と比較して極めて広帯域な周波数資源を有しており、ミリ波を超える超高速通信や大規模な同時多接続通信が可能である [15-16]。一方で、電波の空間伝搬損失は周波数の二乗に比例して増大するため、サブテラヘルツ波の空間伝搬損失はマイクロ波やミリ波と比べて非常に大きい (図1 (b))。従来の1G~4Gにおいては、1つの無線ICと1つのアンテナで構成されたシンプルな無線機が主流であった。しかし、この方式では送信時の放射電力が比較的小さく、サブテラヘルツ波の大きな伝搬損失を補うには不十分である。そのため、サブテラヘルツ波による無線通信の実現にはフェーズドアレイ無線機が不可欠となる。フェーズドアレイ無線機とは、半波長間隔で配置された複数のアンテナからなるアンテナアレイと、移相器や増幅器などの送受信回路を搭載した無線ICによって構成された無線機である (図2 (a))。各アンテナから出力された信号を合成し、放射出力を増大させることで、サブテラヘルツ波による長距離通信を可能にする。さらに、フェーズド

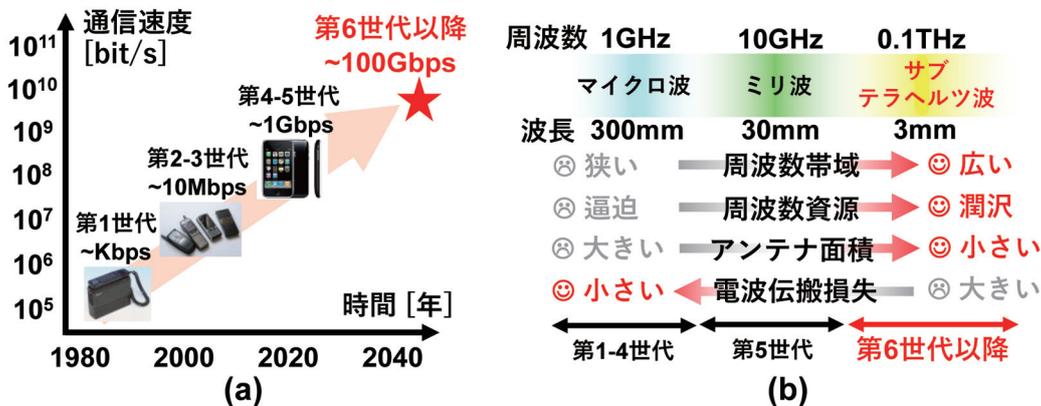


図1 (a)無線通信速度と携帯端末の変遷。第6世代以降の無線端末では100Gbps以上の通信速度が必要となると予測される。(b)各世代での利用周波数。第6世代以降の無線通信に向けて、サブテラヘルツ波に注目が集まっている。

アレイ無線機は指向性のある電波を放射し、ビームフォーミングが可能である(図2(b))。従来のマイクロ波の無線機では、電波が全方向に放射されるため、対象端末以外への不要な干渉波が発生していた。一方で、フェーズドアレイ無線機は特定の方向に電波を集中的に送信できるため、高効率な無線通信を実現できる。さらに、無線IC内の移相器を用いて信号の位相を調整することで、ビーム角を動的に制御し、複数の端末や基地局への通信を高速に切り替えることができる。そのため、フェーズドアレイ無線機は、将来的な無線端末の爆発的増加にも対応可能な無線通信技術としても期待されている。以上の理由から、6G以降の次世代無線通信において、サブテラヘルツフェーズドアレイ無線機は極めて重要な役割を担うと考えられており、現在、多くの研究機関や企業がその実用化に向けた研究開発を進めている。

これまでの研究では、次世代の基地局やアクセスポイント、バックホール通信向けの大規模なサブテラヘルツ無線機の試作や評価が実施されてきた[17-39]。しかしながら、次世代の無線端末に向けた小型サブテラヘルツ無線機に関する研究は、これまで世界で例がない。これは、端末に搭載可能な小面積・低消費電力なサブテラヘルツ無線ICの実現が困難であったためである。さらに、これまでのサブテラヘルツ無線機は放射電力密度が低く、大規模なアンテナアレイを必要とするため、端末への搭載には適していなかった。そこで本研究では、世界初の次世代端末に向けた、高電力密度な超小型サブテラヘルツフェーズドアレイ無線機を提案する。

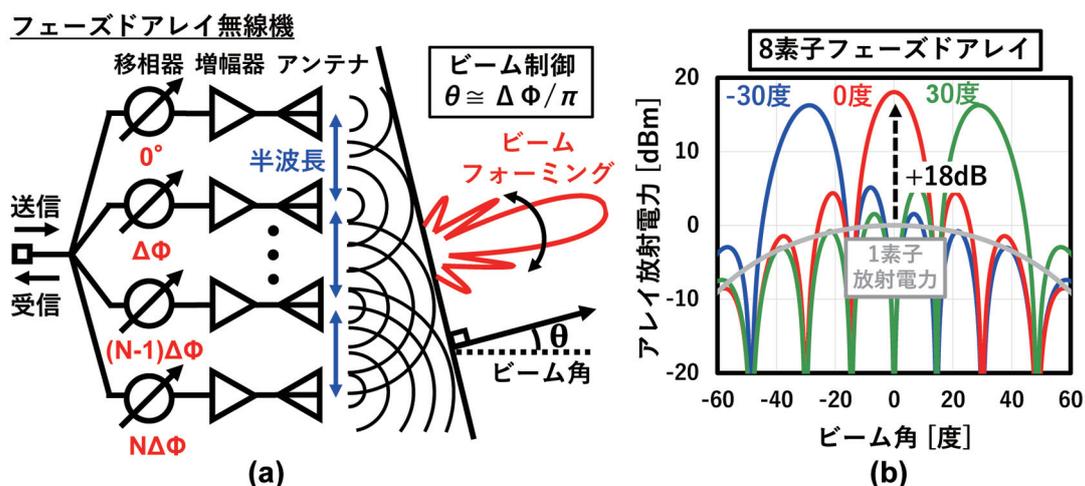


図2 (a)フェーズドアレイ無線機によるビームフォーミングの概要。(b)理想的な8素子フェーズドアレイ無線機の放射電力と、-30度、0度、+30度方向のビームステアリング。ただし、1素子の場合の0度方向の等価等方放射電力(EIRP)を0dBmとした。

2. 次世代端末向けサブテラヘルツ無線機

端末向けサブテラヘルツフェーズドアレイ無線機を実現する上で最も大きな課題となるのが、無線ICの集積度の向上である。先述したように、フェーズドアレイ無線機は、半波長間隔で並べられたアンテナアレイに無線ICをそれぞれ接続することで構成される。図1で示したように、電波の波長は周波数に反比例して短くなる。そのため、利用周波数が高くな

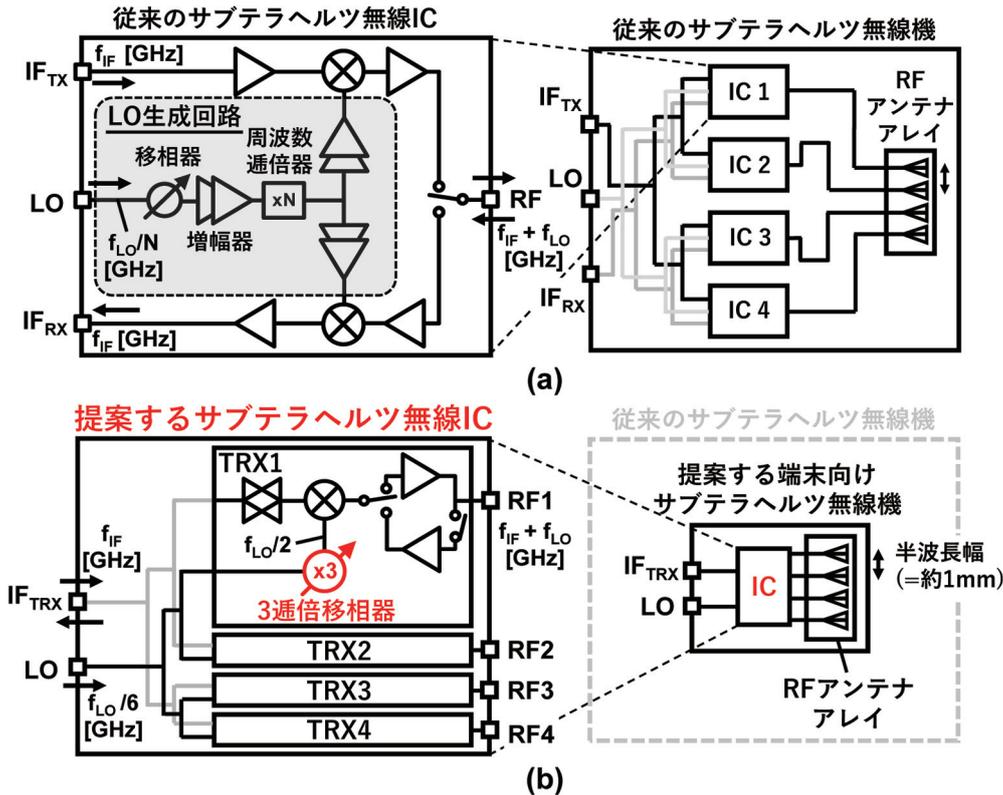


図3 (a) 従来のサブテラヘルツ無線機。無線 IC の面積の大部分を LO 生成回路が占めており、高集積化が困難であった。(b) 本研究で提案する超小型サブテラヘルツ無線機。LO 生成のための注入同期型3通倍移相器(ILTPS)を新たに提案し、より高集積化が可能な無線 IC を実現した。

るほど、アンテナアレイのサイズは周波数の2乗に反比例して小さくなっていき、それに伴い無線 IC の許容面積も縮小する。例えば、サブテラヘルツ波 (150GHz) フェーズドアレイ無線機のアンテナサイズは、ミリ波 (30GHz) と比較して、約1/25まで小型化できる。これは、サブテラヘルツ波が無線機の小型化という点で大きなメリットを有することを示している。このとき、アンテナ基板に搭載される無線 IC のサイズも同様に1/25に縮小する必要がある。しかしながら、サブテラヘルツ無線 IC は、通信する情報を含む中間周波数 (IF) 信号をサブテラヘルツ波へ周波数変換するための追加回路を必要とし、その結果、ミリ波無線 IC と比較して面積が大きくなってしまふ。また、無線 IC の大部分はアナログ回路で構成されており、デジタル回路のように半導体プロセスの微細化による集積度向上の恩恵を受けにくい。したがって、従来のサブテラヘルツ無線 IC はアンテナアレイよりも面積が大きくなり、端末に搭載可能な小型サブテラヘルツ無線機の実現が困難であった。

図3(a)の左図に、従来のサブテラヘルツ無線 IC の回路図を示す。1つの無線 IC で送信 (TX) と受信 (RX) の両方を実現するために、TX/RX 回路をそれぞれ搭載している。また、サブテラヘルツ無線 IC を構成する回路として、IF 増幅器、IF-サブテラヘルツ周波数変換のためのミキサ、サブテラヘルツ増幅器、そしてミキサ動作のための局部発振信号 (LO) 生成回路などが挙げられる。その中でも特に大きな面積を占めるのが LO 生成回路である。LO 生成回路は、ビームフォーミングのための移相器やサブテラヘルツ変換のための周波数通倍器、高変換利得を得るための多段増幅器などによって構成されている。図3(a)の右図

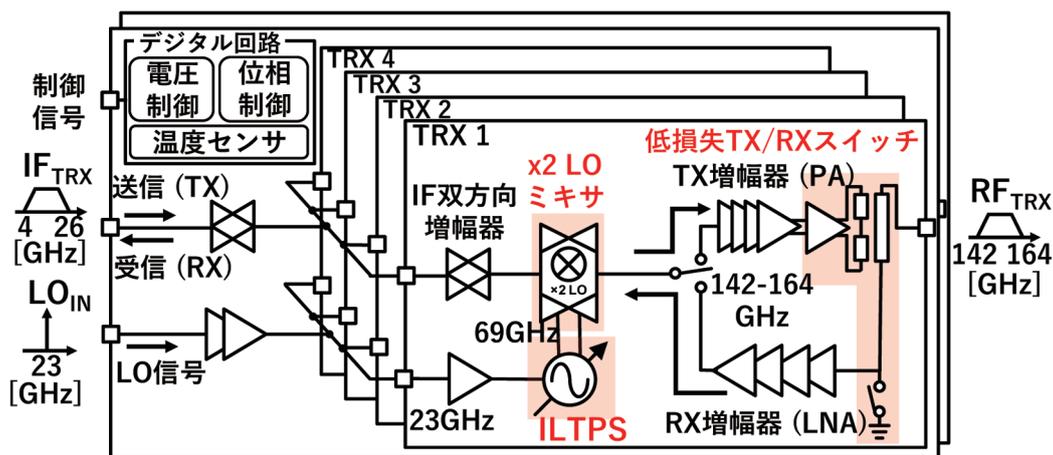


図4 提案するサブテラヘルツ無線 IC の回路図。1-IC 内に4素子の送受信回路 (TRX 1-4) を搭載。

は、従来のサブテラヘルツ無線機の構成を示しており、アンテナアレイよりも IC の占める面積の割合が高く、大型な無線機となっている [23, 40]。さらに、IC-アンテナ間の給電損失が大きく、アンテナあたりの放射電力密度が低い。そのため、従来のサブテラヘルツ無線機では、アンテナのアレイ数を増やし、無線機のサイズを大きくする必要があったことから、端末搭載は困難であった。

そこで本研究では、新たに注入同期型3通倍移相器 (ILTPS) を用いた小面積な双方向送受信回路を提案し、サブテラヘルツ無線 IC の集積度を向上させることで、端末搭載可能な超小型サブテラヘルツ無線機を実現した (図3 (b))。提案する ILTPS は、単一回路で周波数3通倍器と移相器の両方として動作可能であり、さらに発振器ベースの回路であるため、増幅器無しで大きな電圧振幅を出力できる。加えて、単一回路で TX/RX の双方向で動作可能な送受信 (TRX) 回路を採用することで、より小面積かつ低消費電力なサブテラヘルツ無線 IC を達成した。これにより、従来の無線機と比較して大幅な小型化を実現し、端末搭載可能な超小型サブテラヘルツフェーズドアレイ無線機を実現した。

図4に提案するサブテラヘルツフェーズドアレイ無線 IC の詳細なブロック図を示す。提案する無線 IC は4素子の送受信回路から構成され、送信時には4-26 GHz の IF 信号入力と 23 GHz の LO 信号入力によって動作する。入力された LO 信号は各素子に分配された後、ILTPS によって周波数通倍され、69 GHz 信号としてミキサに入力される。これにより、ミキサの周波数変換動作を通じて、IF 信号は142-164 GHz (IF 周波数 + 69 × 2 GHz) のサブテラヘルツ周波数にアップコンバージョンされ、高出力増幅器 (PA) によって信号が増幅・出力される。一方、受信時には、アンテナから入力されたサブテラヘルツ信号を低雑音増幅器 (LNA) で増幅し、ミキサにて IF 信号へダウンコンバージョンして出力される。このとき、ILTPS の位相制御によりビームステアリングを行う。さらに、双方向アクティブなサブハーモニックミキサや低損失スイッチングが可能なサブテラヘルツ PA/LNA を活用することで、従来の無線機と比べてはるかに高電力密度なフェーズドアレイ無線機を実現している。

3. 提案するサブテラヘルツ無線 IC に向けた回路素子

次に、端末向けサブテラヘルツ無線 IC の実現に向けた回路素子の詳細について説明する。初めに、無線 IC の大幅な小面積化を実現する ILTPS について紹介する。提案する ILTPS は、発振器の注入同期現象を利用し、周波数3通倍と移相シフトを同時に行う小面積な回路である。図5(a)に ILTPS の回路図を示しており、差動バランと LC 発振器から構成されている。注入同期現象の原理を図5(b)に簡単に示す [4-7, 11, 41]。LC 発振器は、インダクタとキャパシタの共振により 69GHz 付近 ($\sim f_0$) で発振している。この発振器に外部から 23 GHz ($f_0/3$) の強い信号を注入すると、発振信号への周期的な干渉が生じ、発振周波数は入力周波数の整数倍のうち発振周波数に近い周波数 (f_0) で同期する。このため、注入同期現象を利用することで、高変換利得な周波数3通倍が可能となる。さらに、発振器内部の可変容量を電圧制御することで LC 共振周波数を変化させ、 -45° から $+45^\circ$ の線形な位相シフトを実現している。また、入力側の差動バランは、入力信号を差動信号にして分配する回路である。このバランに 1bit スイッチトランジスタとインダクタ素子を追加で搭載することで、30度の位相切り替えが可能となる(図5(c))。これらの位相シフト量は、3倍(ILTPS)と2倍(ミキサ)の周波数通倍を経由することで、最終的に合計 360° の位相シフトとなる。また、ILTPSは発振器ベースの回路であるため、位相制御時の利得変動が小さく、非常に小さい位相誤差・利得誤差で動作可能である(図5(d))。図5(e)に、従来の LO 生成回路と ILTPS の性能比較表を示す。提案する ILTPS は、消費電力 15 mW・面積 0.088 mm² で 360 度位相シフトと周波数3通倍を実現した。したがって、従来の LO 生成回路と比較して、ILTPS は大幅な低消費電力化と小面積化を達成しており、フェーズドアレイ無線 IC の端末搭載に大きく貢献している。

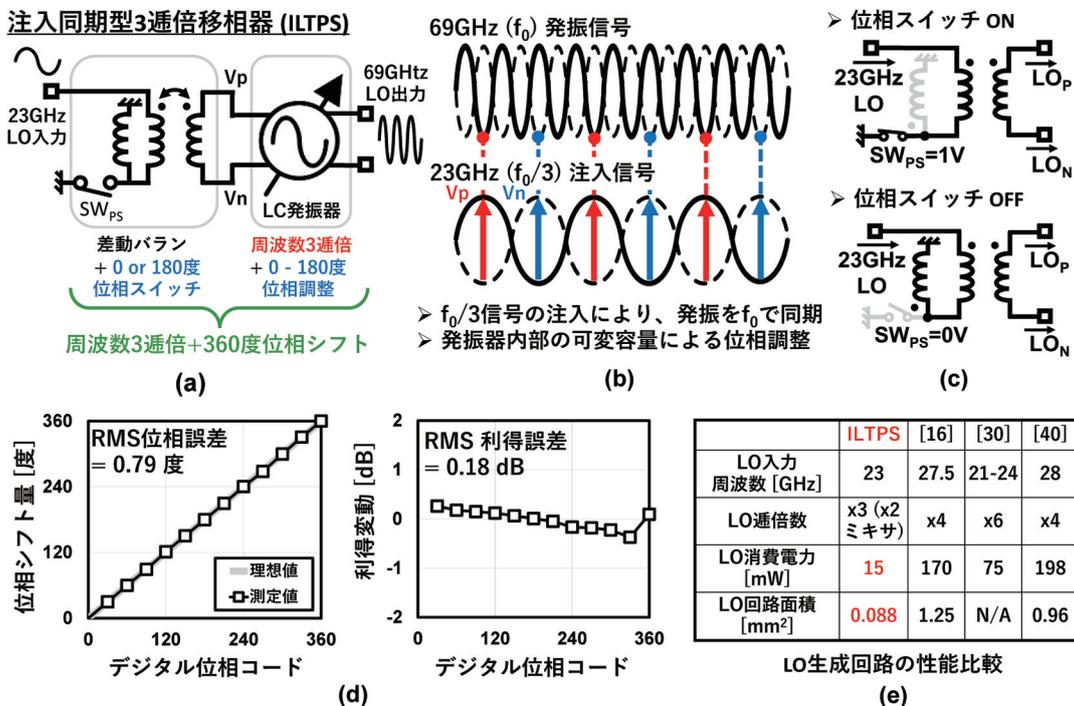


図5 (a) 提案する ILTPS の回路図 (b) 注入同期現象を用いた周波数3通倍および位相制御 (c) 差動バランによる位相スイッチ (d) ILTPS を用いた無線 IC の位相制御の測定結果。 (d) 他のサブテラヘルツ無線機の LO 生成回路との性能比較

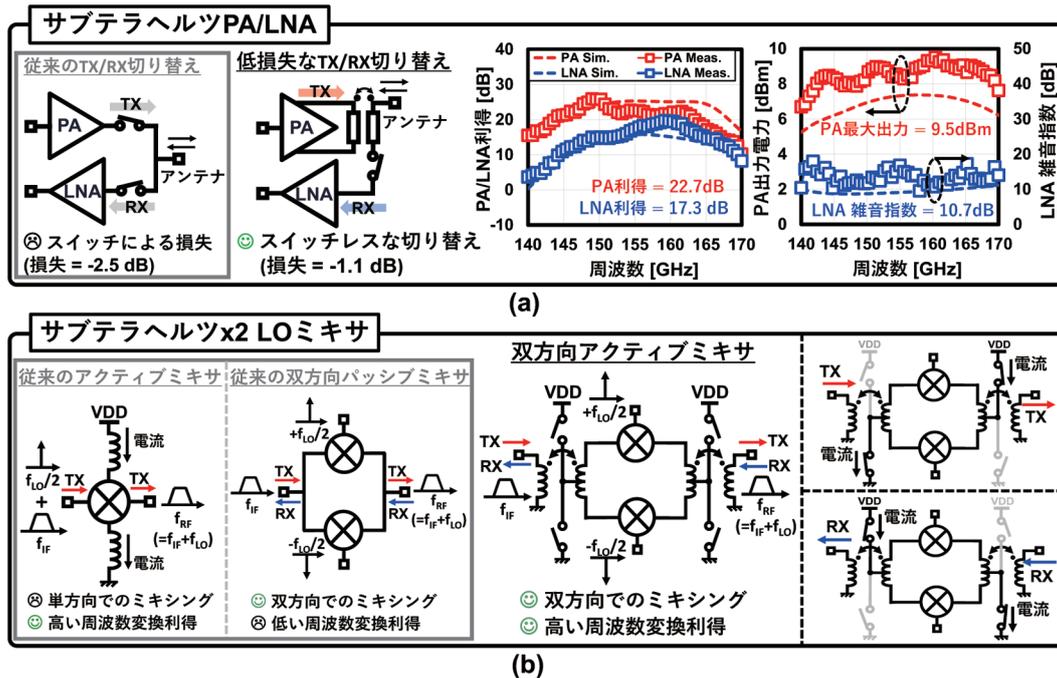


図6 高電力密度な無線機のためのサブテラヘルツ回路。(a)低損失TX/RX切り替え手法を用いたサブテラヘルツPA/LNAの回路図と測定結果。(b)双方向アクティブなサブハーモニック(x2 LO)ミキサによる高利得な周波数変換。

また、端末向けフェーズドアレイ無線機の実現には、無線ICの小型化に加え、アンテナあたりの放射電力密度を向上させ、少ない素子数の小型無線機でも通信距離が確保できる必要がある。そのために、本研究では新たに二つの回路を提案する。1つは、低損失なTX/RX切り替えスイッチを搭載した高効率なサブテラヘルツPA/LNAである(図6(a))。TX/RXの切り替え方は通信方式によって変わってくるが、本研究では回路面積の削減を目的として時間分割(TDD)通信方式を採用している。TDD方式では、TX/RXのアンテナを共有し、時間ごとにPAとLNAの信号経路をスイッチで切り替えることでTX/RXの動作を実現する。従来のTX/RX切り替えでは、PAとLNAの信号パスの両方にスイッチを搭載し、TX時にはPAをオン・LNAをオフ、RX時にはPAをオフ・LNAをオンにすることでTDD動作を行っている。しかし、この方式ではPA/LNAの両方の経路にトランジスタスイッチを搭載しているため、トランジスタの寄生成分によるスイッチ損失が大きい。従来のTX/RX切り替えでは約2.5dBの損失が生じており、出力電力の約半分がスイッチによって損失されていた[20, 27]。そこで本研究では、サブテラヘルツPAをスイッチとして再利用した、低損失なTX/RX切り替えを提案する。ソース接地のトランジスタを用いた最終段のPAをバイアス切り替えによってスイッチとしても利用できる構成にし、差動バランとPAスイッチの組み合わせにより高効率なTX/RX切り替えを実現した。この提案手法により、TX動作時のスイッチ損失を1.1dBまで低減し、従来と比較して高出力電力なTX動作を達成した。また、提案するサブテラヘルツPA/LNAは5段のPAと4段のLNAから構成されており、インダクティブ・フィードバック方式を用いることで高利得かつ広帯域な特性を実現している[42]。テスト用の個別回路の測定を行ったところ、140-170GHzでの広帯域動作が可能であり、154GHzにおいてPAの利得は22.7dB、LNAの利得は17.3dBとなった。また、PA

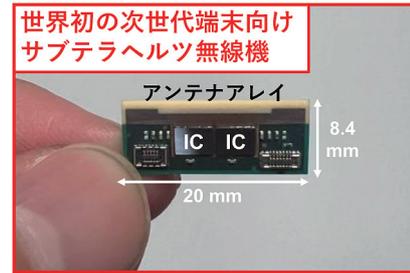
の飽和最大出力電力は9.5dBm、LNAの雑音指数は10.7dBとなり、高出力・低雑音なサブテラヘルツPA/LNAを達成した。

2つ目の提案回路は、双方向動作が可能な高利得サブハーモニックミキサである(図6(b))。サブハーモニックミキサは、入力したLO周波数の2倍成分を用いて周波数変換動作を行うミキサであり、必要なLO逡倍数を減らすことでLO生成回路の面積と消費電力の削減に貢献する。しかし、従来のサブハーモニックミキサは、高変換利得と双方向動作の両立が困難であった。高変換利得の実現には、直流電流をミキサトランジスタに流し、アクティブな動作を行う必要がある。しかし、従来のアクティブミキサは、IF信号とLO信号を同一端子から入力するため、単方向でしか動作できなかった[34]。一方で、従来の双方向ミキサでは、IF、LO、RF信号を別々の端子から入出力することで双方向動作を可能としている。しかし、直流電流を供給しないパッシブ動作のため、高利得化が困難であった[18-19]。そこで、本研究では、これらのトレードオフを解決するため、双方向アクティブ動作が可能なサブハーモニックミキサを提案する。IF、RFの入出力端子

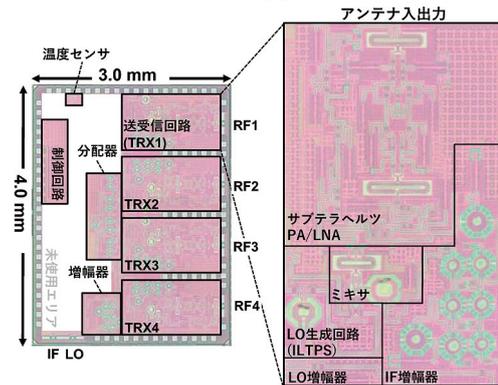
に差動バランを接続し、さらに二つの差動バランの中心にVDDとGNDに接続したスイッチペアを配置する。このスイッチペアのオンオフを制御することで直流電流の向きを変え、TX/RXのアクティブ動作を切り替える。これにより、双方向動作と高周波数変換利得を両立したサブハーモニックミキサを実現した。本手法により、シミュレーションにおいて従来の双方向ミキサよりも4dB以上高い変換利得を達成した。また、バランによる差動入出力により、同相成分であるLOリークを除去し、高精度な周波数変換を実現している。

4. 提案する端末向けサブテラヘルツ無線機および測定結果

図7(a)に、無線IC評価のための、超小型サブテラヘルツフェーズドアレイ無線機の試作機を示す。この無線機は二つの無線ICと8素子のアンテナから構成されている。アンテナ基板は、アンテナ-IC間の給電配線長を最小化し損失を減らすために、基板側面にポスト壁導波路アンテナを埋め込んでいる。また、このアンテナ基板に関する研究内容は、一部既発表の部分を含んでいる[25-26, 43-44]。図7(b)は、提案するサブテラヘルツフェーズドアレイ無線ICのチップ写真である。3mm×4mmのチップサイズに4素子の送受信回路と分配器、無線機制御のためのデジタル回路、さらに温度モニタのための温度センサが搭載されている。このチップには未使用なエリアも含まれており、実際に使用されているチップ面積は約8.5mm²である。この半導体集積回路は、65nm CMOSプロセスで設計されており、非常



(a)



(b)

図7 (a) 世界初の次世代端末向けサブテラヘルツ無線機のモジュール写真。(b) 提案するILTPSを用いたサブテラヘルツフェーズドアレイ無線ICのチップ写真。

に安価かつ低消費電力な無線 IC を実現している。TX 時における素子当たりの消費電力は 150 mW、受信時では 93 mW となり、従来の無線機と比較して非常に低消費電力な動作を達成した。提案したサブテラヘルツ無線 IC により、世界初の次世代端末向け超小型サブテラヘルツ無線機が実現された。

図 8 (a) に、提案するサブテラヘルツ無線機の評価のための無線通信実験セットアップ写真を示す。無線通信実験では、提案するサブテラヘルツ無線機を実際の無線端末に近い環境で評価するため、熱的・電氣的にスマートフォンを模擬した評価基板を用いて測定を行った。また、無線機の性能を評価するために、もう一方にはサブテラヘルツ評価用の外部素子とアンテナを設置し、通信性能を確認した。図 8 (b) は、154GHz 信号による 8 素子フェーズドアレイのビームパターン測定結果を示している。各送受信回路に搭載された ILTPS の高精度な位相制御により、-45 度から +45 度の範囲でのビームステアリングに成功した。この範囲において、サイドローブは約 -10 dB まで抑制され、不要な方向への電波を十分に抑えた無線通信を達成した。また、このときの等価等方放射電力(EIRP)の最大値は 25.7 dBm となり、高密度な放射電力を実現している。図 8 (c) は、送信・受信時の通信速度の測定結果を示す。通信速度の測定には、現在の無線通信で一般的に使用される直行振幅変調 (QAM) 方式を採用し、この変調データを用いて無線機の最大通信速度を評価した。QAM 方式では、1 シンボルあたり複数ビットの情報を送受信できるため、広く利用されている通信方式の 1 つである。本測定では 16QAM (1 シンボルあたり 4 ビット) を使用し、0.3m の距離において、送信

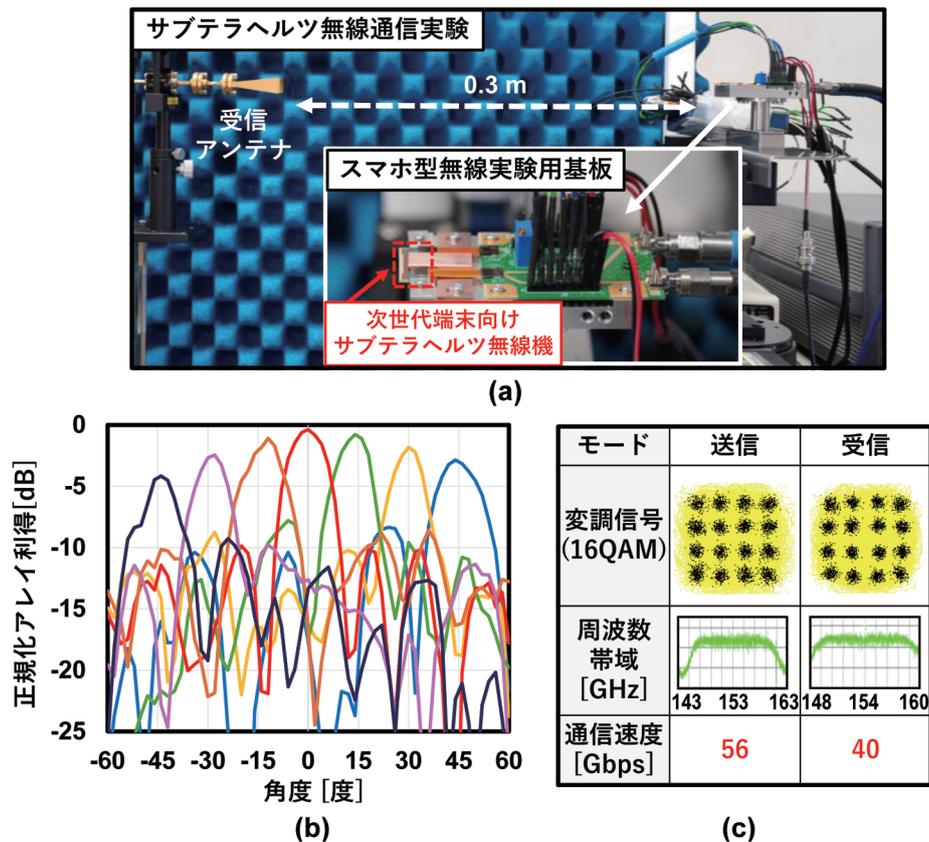


図 8 (a) サブテラヘルツ無線機の性能評価のための実験セットアップ (b) ILTPS 位相制御による -45 度～ +45 度ビームステアリングの測定結果 (c) 提案するサブテラヘルツ無線機の通信速度測定

時の最大通信速度は56Gbps、受信時の最大通信速度は40Gbpsを達成した。また、5m距離での通信実験では、送信時において20Gbpsの通信速度を達成した。

図9(a) (b)は、従来のサブテラヘルツ無線機と、本研究成果である次世代端末向けサブテラヘルツ無線機の性能比較を示している。図9(a)より、ILTPSなどの提案回路技術を用いて無線ICを大幅に小面積化したことで、非常に小さいアンテナ面積の実現に貢献した。さらに、低損失なサブテラヘルツTX/RXスイッチを用いたPAや双方向アクティブミキサなどの高出力な回路素子を搭載したことで、1mm²あたりのアンテナの放射電力密度は、従来のサブテラヘルツ無線機の5倍以上に向上した。また、図9(b)は、送信時の消費電力あたりの通信速度効率を示している。ILTPSや双方向送受信回路などの提案回路を採用したことで、低消費電力な無線ICを実現し、従来の2倍以上の通信速度効率を達成した。

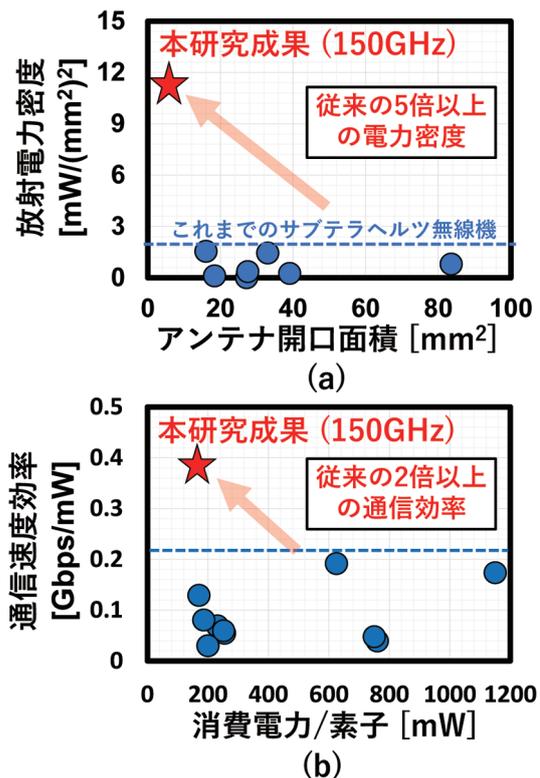


図9 本研究成果と、これまで研究成果との比較。(a)放射電力密度は従来の5倍以上、(b)通信速度効率は2倍以上の性能を実現しており、非常に高効率なサブテラヘルツ無線機を達成した。

5. まとめと今後の展望

本研究では、6G以降の次世代無線端末に向けたサブテラヘルツ無線機を提案した。従来の無線ICでは、端末に適した小型のサブテラヘルツ無線機の実現が困難であった。しかし、本研究では、提案するILTPSによる無線ICの大幅な面積削減に加え、低損失なTX/RX切り替えが可能なPA/LNAや双方向アクティブミキサなどの高出力回路を新たに提案することで、世界初の端末向けサブテラヘルツフェーズドアレイ無線機を実現した。この無線機の無線通信実験を行ったところ、最大56Gbpsの通信速度となり、さらに、これまでのサブテラヘルツ無線機の研究成果と比較して、放射電力密度が5倍以上、通信速度効率が2倍以上向上したことを確認した。この結果より、本研究成果が次世代端末向け無線機として最も優れた性能を達成したことを示している。加えて、この無線ICは、低コストな65nm CMOSプロセスで試作されており、実際の端末搭載に向けた量産化が容易であることも大きな利点である。

本研究では、開けた環境において最大5mでの通信実験に成功した。しかし、実際の動作環境では、通信を遮る障害物や移動体の影響により、通信性能が大きく劣化する可能性がある。そのため、今後の研究課題として、サブテラヘルツ無線機の動作環境における通信接続の安定性向上が不可欠である。具体的には、複数の通信経路を確保できるサブテラヘルツ多重入出力(MIMO)通信の研究や、異なる偏波の信号を送受信できる多偏波サブテラヘルツ無

線機および無線 IC に関する研究を進めていく。サブテラヘルツ無線機の端末搭載を実現することで、3D ホログラム投影可能なウェアラブル端末やフルダイブ型 XR デバイスなど、これまでサイエンスフィクションとされてきた大容量無線デバイスの実現が期待される。これらの端末により、実現可能なアプリケーションの幅は大きく広がり、人々の精神的・身体的・社会的な様々な課題の解決に大きく貢献できると確信する。

謝 辞

本研究は、東京科学大学工学院電気電子系の岡田健一教授による多大なご指導とご鞭撻の元で行われました。また、本研究は、パナソニックインダストリー株式会社、パナソニックシステムネットワークス開発研究所、新光電気株式会社、東京科学大学工学院電気電子系の戸村崇助教との共同研究によるものです。お世話になりました皆様に心からの感謝を申し上げます。本研究の一部は、総務省委託研究 (JPJ000254)、東工大基金、並びに東京大学 V D E C 活動を通して、ケイデンス株式会社、メンターグラフィクス株式会社、キーサイトテクノロジー株式会社の協力で行われました。

参考文献

- [1] NTT Docomo, Inc., 2020. [Online]. Available: https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_v5.0.pdf.
- [2] **Y. Yamazaki**, J. Alvin, P. Jian, A. Shirane and K. Okada, *IEICE TRANSACTIONS on Electronics*, Vols. E106-C, pp. 149-156, April 2023.
- [3] **Y. Yamazaki**, J. Alvin, J. Pang, A. Shirane and K. Okada, in *IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications (ICTA)*, 2021.
- [4] **Y. Yamazaki**, J. Pang, A. Shirane and K. Okada, in *IEEE 48th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, 2022.
- [5] **Y. Yamazaki**, J. Sakamaki, J. Pang, J. Alvin, Z. Li, A. Shirane and K. Okada, in *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, 2022.
- [6] **Y. Yamazaki**, J. Sakamaki, J. Pang, J. Alvin, Z. Li, D. You, J. Mayeda, A. Shirane and K. Okada, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 58, pp. 2851-2860, 2023.
- [7] Z. Li, J. Pang, Y. Zhang, **Y. Yamazaki**, Q. Wang, P. Luo, W. Chen, Y. Liao, M. Tang, Y. Wang, X. Fu, D. You, N. Oshima, S. Hori, J. Park, K. Kunihiro, A. Shirane and K. Okada, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 58, pp. 901-914, 2023.
- [8] S. Kato, J. Mayeda, K. Yuasa, M. Ide, T. Ota, S. Date, **Y. Yamazaki**, X. Wang, X. Fu, D. You, M. Higaki, J. Sudo, H. Takizawa, M. Shirakura, T. Tomura, H. Sakai, K. Kunihiro, K. Okada and A. Shirane, in *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, 2025.
- [9] J. Pang, Z. Li, R. Kubozoe, X. Luo, R. Wu, Y. Wang, D. You, A. A. Fadila, R. Saengchan, T. Nakamura, J. Alvin, D. Matsumoto, B. Liu, A. T. Narayanan, J. Qiu, H. Liu, Z. Sun, H. Huang, K. K. Tokgoz, K. Motoi, N. Oshima, S. Hori, K. Kunihiro, T. Kaneko, A. Shirane and K. Okada, "A 28-GHz CMOS Phased-Array Beamformer Utilizing Neutralized Bi-Directional Technique

- Supporting Dual-Polarized MIMO for 5G NR,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, pp. 2371-2386, 2020.
- [10] J. Pang, Z. Li, X. Luo, J. Alvin, R. Saengchan, A. A. Fadila, K. Yanagisawa, Y. Zhang, Z. Chen, Z. Huang, X. Gu, R. Wu, Y. Wang, D. You, B. Liu, Z. Sun, Y. Zhang, H. Huang, N. Oshima, K. Motoi, S. Hori, K. Kunihiro, T. Kaneko, A. Shirane and K. Okada, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, pp. 1310-1326, 2021.
- [11] J. Pang, S. Maki, S. Kawai, N. Nagashima, Y. Seo, M. Dome, H. Kato, M. Katsuragi, K. Kimura, S. Kondo, Y. Terashima, H. Liu, T. Siriburanon, A. Tharayil Narayanan, N. Fajri, T. Kaneko, T. Yoshioka, B. Liu, Y. Wang, R. Wu, N. Li, K. K. Tokgoz, M. Miyahara, A. Shirane and K. Okada, “A 50.1-Gb/s 60-GHz CMOS Transceiver for IEEE 802.11ay With Calibration of LO Feedthrough and I/Q Imbalance,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 54, pp. 1375-1390, 2019.
- [12] J. D. Dunworth, A. Homayoun, B.-H. Ku, Y.-C. Ou, K. Chakraborty, G. Liu, T. Segoria, J. Lerdworatawee, J. W. Park, H.-C. Park, H. Hedayati, D. Lu, P. Monat, K. Douglas and V. Aparin, in *IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*, 2018.
- [13] B. Sadhu, Y. Tousi, J. Hallin, S. Sahl, S. K. Reynolds, Ö. Renström, K. Sjögren, O. Haapalahti, N. Mazar, B. Bokinge, G. Weibull, H. Bengtsson, A. Carlinger, E. Westesson, J.-E. Thillberg, L. Rexberg, M. Yeck, X. Gu, M. Ferriss, D. Liu, D. Friedman and A. Valdes-Garcia, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, pp. 3373-3391, 2017.
- [14] K. Kibaroglu, M. Sayginer, A. Nafe and G. M. Rebeiz, in *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, 2018.
- [15] K. Okada, in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2024.
- [16] C. Liu, Z. Li, **Y. Yamazaki**, H. Herdian, C. Wang, A. Tian, J. Sakamaki, H. Nie, X. Fu, S. Kato, W. Wang, H. Huang, M. Tang, D. Xu, S. Hara, A. Kasamatsu, T. Tomura, H. Sakai, K. Kunihiro, A. Shirane and K. Okada, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, pp. 1-18, 2024.
- [17] T. Uchino, **Y. Yamazaki**, S. Park, C. Liu, A. Tian, A. Shehata, H. Sakai, K. Kunihiro, A. Shirane and K. Okada, in *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, 2024.
- [18] I. Abdo, T. Jyo, A. Pander, H. Wakita, Y. Shiratori, M. Muto, H. Hamada, M. Nagatani, C. d. Gomez, C. Wang, K. Hatano, C. Liu, A. A. Fadila, J. Pang, A. Shirane, K. Okada and H. Takahashi, *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 33, pp. 887-890, 2023.
- [19] I. Abdo, C. da Gomez, C. Wang, K. Hatano, Q. Li, C. Liu, K. Yanagisawa, A. A. Fadila, T. Fujimura, T. Miura, K. K. Tokgoz, J. Pang, H. Hamada, H. Nosaka, A. Shirane and K. Okada, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, pp. 2292-2308, 2022.
- [20] A. Ahmed, L. Li, M. Jung, S. Li, D. Baltimas and G. M. Rebeiz, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 72, pp. 2852-2868, 2024.
- [21] M. Elkhoully, J. Ha, M. J. Holyoak, D. Hendry, M. Sayginer, R. Enright, I. Kimionis, Y. Baeyens and S. Shahramian, in *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, 2022.
- [22] M. Elkhoully, M. J. Holyoak, D. Hendry, M. Zierdt, A. Singh, M. Sayginer, S. Shahramian and Y. Baeyens, in *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, 2020.
- [23] A. A. Farid, A. S. H. Ahmed, A. Dhananjay and M. J. W. Rodwell, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, pp. 3396-3405, 2022.

- [24] A. Hamani, F. Foglia-Manzillo, A. Siligaris, N. Cassiau, B. Blampey, F. Hameau, C. Dehos, A. Clemente and J. L. Gonzalez-Jimenez, in *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, 2021.
- [25] R. Hasaba, K. Takahashi, T. Abe, Y. Morishita, T. Murata, K. Takinami, H. Taneda, in *IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP)*, 2023.
- [26] A. Hernández-Escobar, T. Tomura, R. Hasaba, H. Taneda, I. Watanabe, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 107144-107152, 2024.
- [27] A. Karakuzulu, W. A. Ahmad, D. Kissinger and A. Malignaggi, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 58, pp. 1310-1322, 2023.
- [28] J. Kim, C.-G. Choi, K. Lee, K. Kim, S.-U. Choi and H.-J. Song, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, pp. 1866-1876, 2023.
- [29] B. A. Abdelmagid, B. Lin and H. Wang, in *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, 2025.
- [30] S. Li, Z. Zhang and G. M. Rebeiz, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, pp. 1635-1648, 2022.
- [31] S. Li, Z. Zhang, B. Rupakula and G. M. Rebeiz, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 57, pp. 385-399, 2022.
- [32] D. del Rio, J. F. Sevillano, R. Torres, A. Irizar, P. Roux, M. M. Pirbazari, A. Mazzanti, J. Säily, A. Lamminen, J. de Cos, M. G. L. Frecassetti, M. Moretto, A. Pallotta and V. Ermolov, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, pp. 854-869, 2023.
- [33] J. Zhang, B. Dai, X. Meng, Y. Hu, M. Guan, H. Deng, B. Zhang and C. Wang, in *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, 2024.
- [34] T. Yoshida, H. Adachi, K. Takano, K. Katayama, S. Amakawa, M. Fujishima, in *IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)*, 2016.
- [35] S. Ma, J. Lin, C. Ma and H. Yu, "A 140 GHz Transceiver for 4× 4 Beamforming Short-Range Communication in 65nm CMOS," in *IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2019.
- [36] S. Ma, T. Wu, Z. Xu, Z. Sun, X. Li, L. Wu, B. Hu, J. Ren, Y. Chen and J. Pan, in *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, 2022.
- [37] W. Shin, B.-H. Ku, O. Inac, Y.-C. Ou and G. M. Rebeiz, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 48, pp. 2041-2055, 2013.
- [38] A. Singh, M. Sayginer, M. J. Holyoak, J. Weiner, J. Kimionis, M. Elkhoully, Y. Baeyens and S. Shahramian, in *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, 2020.
- [39] A. Townley, N. Baniasadi, S. Krishnamurthy, C. Sideris, A. Hajimiri, E. Alon and A. Niknejad, in *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, 2020.
- [40] C. Wang, I. Abdo, C. Liu, C. d. Gomez, J. Mayeda, H. Herdian, W. Wang, X. Fu, D. You, A. Shehata, S. Park, Y. Wang, J. Pang, H. Sakai, A. Shirane and K. Okada, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 59, pp. 978-992, 2024.
- [41] B. Razavi, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 39, pp. 1415-1424, 2004.
- [42] H. Bameri and O. Momeni, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, pp. 357-370, 2017.
- [43] M. Tsukahara, K. Murayama, H. Ota, H. Taneda, Y. Nakagawa, in *IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, 2024.

- [44] K. Murayama, H. Taneda, M. Tsukahara, R. Hasaba, Y. Morishita, **Y. Yamazaki**, K. Okada, Y. Nakabayashi, in *IEEE Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 2024.