

2021年2月5日

報道機関各位

国立大学法人東京工業大学
日本電信電話株式会社

テラヘルツ帯でのフェーズドアレイ無線機を実現 — 次世代無線通信システムの実用化へ大きな一歩 —

【要点】

- 200 GHz以上の周波数帯で動作するCMOSフェーズドアレイ(用語1)無線機を世界で初めて実現、通信に成功
- 新たに考案した双方向無線機によりアンテナ共有および高集積化を達成
- スマートフォン等のモバイル機器に搭載可能

【概要】

東京工業大学 工学院 電気電子系の岡田健一教授らと日本電信電話株式会社の研究グループは、テラヘルツ帯(用語2)で通信が可能なアクティブフェーズドアレイ無線機を世界で初めてCMOS集積回路により実現した。テラヘルツ帯は5Gに続く次世代の無線通信システムでの利用が期待されており、今回の成果により実用化を大きく進展させることができた。

このテラヘルツ無線機は、安価で量産が可能なシリコンCMOSプロセス(用語3)で製造したICで構成され、サブハーモニック型(用語4)の双方向ミキサにより同じ回路を送信にも受信にも切り替えて利用することができる。液晶ポリマー基板(用語5)上の銅箔にアンテナパターンを形成し、薄化したCMOSICを実装したものを4層積層することでフェーズドアレイアンテナを構成した。

実験の結果、テラヘルツ帯での無線通信が可能であり、電波の放射方向を制御回路から操作できることを確認した。

研究成果の詳細は、2月13日(米国太平洋時間)からオンライン開催される国際会議ISSCC 2021「International Solid-State Circuits Conference 2021(国際固体素子回路会議)」で発表する。

●開発の背景

国内外で**5G**（用語6）のサービスが開始され、史上初めて**ミリ波**（用語7）帯を用いる大規模商用サービスの利用が広がりを見せている。ミリ波帯無線通信の更なる高度化が必要とされる一方で、早くも**5G**の先を見据えた無線通信に関する研究が活発に行われている。より高速・大容量な無線通信を実現するために、**5G**におけるミリ波帯よりもさらに10倍以上高い周波数帯であるテラヘルツ帯の利用が期待されている。テラヘルツ帯を用いることで大幅な通信速度の向上が期待できる。

ミリ波帯やテラヘルツ帯に共通する課題として、通信距離の確保が難しいことが挙げられる。通信に用いる搬送波周波数が高くなるほど、単一のアンテナによる通信可能な距離は周波数に反比例して短くなるためである。そのため、**5G**では、アンテナと送受信機を多数アレイ状に並べたアクティブフェーズドアレイ技術が用いられており、数百メートル以上の通信距離を確保している。アンテナ数を増やすほどに通信距離を比例して伸ばすことが可能である。

さらに高い周波数帯であるテラヘルツ帯では、よりフェーズドアレイ化への要求が強いが、周波数に比例して高密度にアンテナと送受信機を並べる必要があり、これまでテラヘルツ帯でのアクティブフェーズドアレイ技術による通信機は実現されていなかった。代替として、高利得な指向性アンテナが用いられてきたが、特定方向としか通信ができず、用途が限定されたものであった。このような背景から、テラヘルツ帯無線通信の実用化のために、フェーズドアレイの実現が強く求められていた。

●従来技術と課題

フェーズドアレイでは、アンテナを半波長ピッチでアレイ状に配置する。**5G**で用いる**28 GHz**帯であれば**5.4 mm**程度となり、一般に、プリント基板上にアンテナを縦横に配置する構成のものが用いられる。フェーズドアレイにはアクティブ型とパッシブ型がある。通信距離を伸ばすために、個々のアンテナにそれぞれ送受信機が接続されているアクティブ型のフェーズドアレイが用いられている。

300 GHz帯ではアンテナピッチが**0.5 mm**となるため、非常に高密度な配置が要求される。**CMOS**チップ上にアンテナを内蔵するものもあるが、シリコン基板による損失が大きく、配線層が薄すぎるため、十分なアンテナ利得を確保できない。プリント基板上に高密度に配置されたアンテナに、同一ピッチで送受信機を配置する必要がある。

●研究成果

本研究では、アンテナの配置方法の工夫と、新たに考案した**CMOS**フェーズドアレイICによる高密度化により、テラヘルツ帯でのフェーズドアレイ無線機を実現した(図1、2)。

従来のテラヘルツ帯無線機では、送信機単体、受信機単体や、それらを単一**CMOS**チップ上に集積したものがあるが、面積が大きくなるのが問題であった。

本研究成果では、双方向回路を用いることで、同じ回路を送信にも受信にも切り替えて利用することができる。従来のテラヘルツ帯のミキサ回路（用語 8）では、ダイオード型や通倍器型のものが用いられており、送受信で別々のミキサ回路を用意する必要があった。本研究成果では、サブハーモニック型のミキサにより、双方向動作を実現した。

フェーズドアレイでは、送受信する信号の位相制御が必要である。本研究成果では、テラヘルツ帯でも広帯域動作が可能な LO 移相方式を用いた。搬送波となる局部発振器（LO）の信号の位相を変化させる LO 移相器（用語 9）を用いる。LO 移相器を 4 通倍器（用語 10）に前置することで、線形な移相特性を実現した。双方向増幅器を分布型とすることで広帯域化に成功し、送受信機全体として 38 GHz の非常に広い変調帯域（用語 11）を実現した。また、2 系統ある信号経路（図中 IF1 と IF2）のそれぞれに LO 移相器を設けることにより、送信時にはアウトフェージング構成（用語 12）、受信時にはハートレー構成（用語 13）とすることができる（図 2）。アウトフェージング構成にすることで、理論値と比較して平均送信電力を約 5dB 向上することができた。

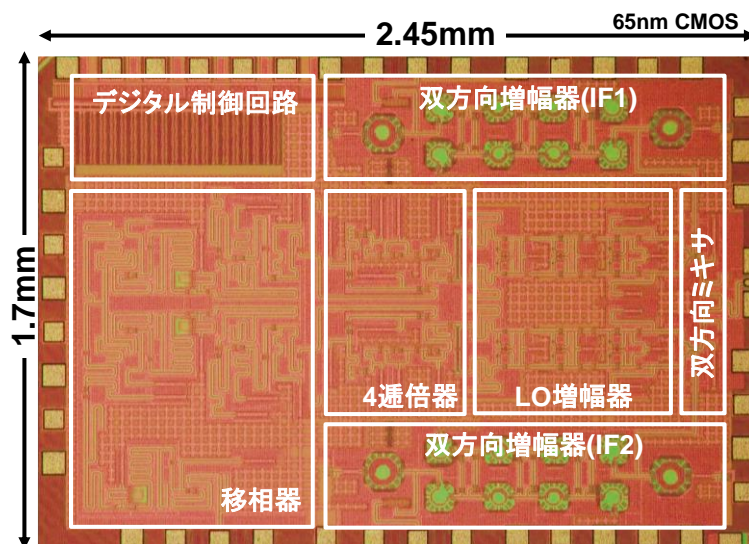
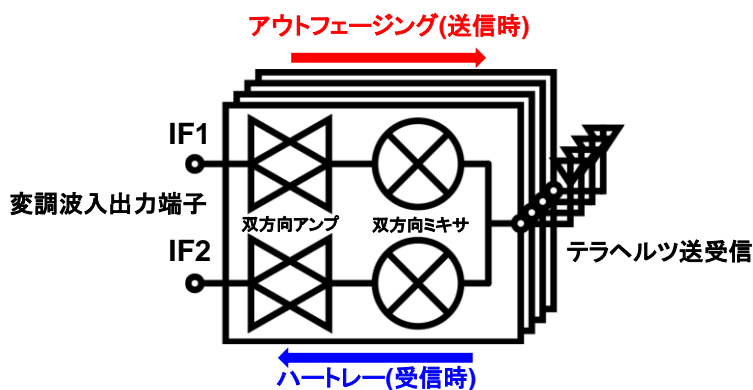


図 1 テラヘルツフェーズドアレイ無線機のチップ写真



※搬送波生成回路およびフェーズシフタは図示省略

図 2 テラヘルツフェーズドアレイ無線機の回路構成

特殊な製造技術を利用せず、安価で量産を可能とするために、現状の 5G と同じくプリント基板上にテラヘルツ帯フェーズドアレイを構成する方法を考案した(図 3)。液晶ポリマー基板にアンテナパターンを形成し、薄化した CMOS IC を実装したものを 4 層積層することでフェーズドアレイアンテナを構成した。各アンテナ素子はビバルディ型 (用語 14) とした。

本開発品のテラヘルツフェーズドアレイ IC は 65 nm のシリコン CMOS プロセスで試作し、1.70 mm×2.45 mm の小面積にフェーズドアレイ送受信機を搭載した。IC に搭載した制御回路から移相器を操作し、アンテナ放射パターンを測定したところ、位相の設定値にあわせてビームステアリング (用語 15) ができていることを確認できた(図 3)。消費電力は送信時・受信時ともに 0.75W である。次に変調波による評価を行った。QPSK (用語 16) から 16QAM (用語 17) の変調方式に対応可能であり、242-280 GHz の変調帯域を有する。送信機の最大変調速度は 52 Gb/s であった(16QAM 時)。

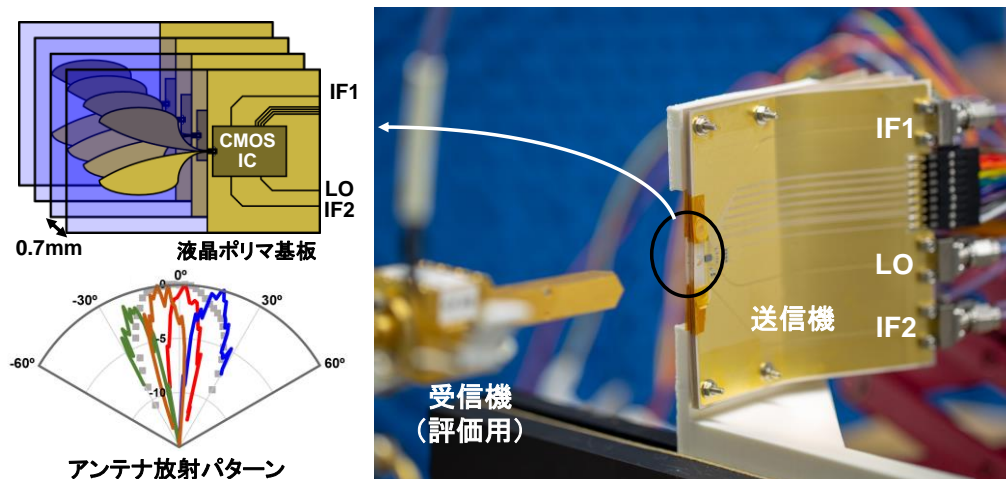


図 3 液晶ポリマー基板上に作成した積層型フェーズドアレイアンテナ

●今後の展開

本研究成果によりテラヘルツ帯でもアクティブフェーズドアレイの利用が可能となった。アレイ数を増やすことにより通信距離を比例して伸ばすことができるので、テラヘルツ帯の無線通信で問題となっていた通信距離の問題が解決できる。これまでのテラヘルツ帯無線通信では指向性アンテナが用いられてきたが、今後はミリ波帯同様にアクティブフェーズドアレイによるものが主流になっていくと考えられる。

今回は 1 次元アレイによる実証であったが、プリント基板上にアンテナパターンを並べて配置し、それをさらに積層することで 2 次元アレイの実現も可能であり、今後はより高密度なフェーズドアレイを実証し、テラヘルツ帯無線通信の実用化に向けて研究開発を推進する。

【用語説明】

- (1) **フェーズドアレイ**：複数のアンテナへ位相差をつけた信号を給電する技術。**ビームステアリング**（用語 15）の実現に利用される。フェーズドアレイには、アクティブ型とパッシブ型があり、アクティブ型では各アンテナに対して増幅器が接続されているが、パッシブ型では各アンテナに接続されているのは**移相器**（用語 9）のみである。パッシブ型の方が容易に実現できるが、通信距離を伸ばすためにはアクティブ型のフェーズドアレイが必要である。
- (2) **テラヘルツ帯**：5G（用語 6）等で用いられる**ミリ波**（用語 7）帯より高い周波数帯で 300 GHz から 3000 GHz（3 THz）の周波数帯。テラヘルツ帯を用いる通信規格としては **IEEE802.15.3d**（用語 18）が知られている。IEEE802.15.3d では 252-325 GHz の周波数帯を用いるため、252-300 GHz の周波数帯も含めて広義にテラヘルツ帯と呼ばれることが多い。
- (3) **シリコン CMOS プロセス**：CMOS プロセスは N 型と P 型の MOSFET（金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）を相補的に用いた集積回路であり、バイポーラプロセスと比較し消費電力の削減と高い集積率を実現したプロセスである。近年の集積回路はほぼ CMOS プロセスとなっている。
- (4) **サブハーモニック型**：低調波。高調波が所望信号の n 倍の周波数を示すのに対して、低調波は $1/n$ 倍の周波数を示す。例えば、搬送波周波数が 300 GHz のサブハーモニック型の**ミキサ回路**（用語 8）では 150 GHz の信号により周波数変換を行う。
- (5) **液晶ポリマー基板**：フレキシブルプリント基板材料の一種で、高周波での損失が少なく、5G 向け等の用途で利用が広がっている。
- (6) **5G**：第 5 世代移動通信システム。これまでの第 4 世代移動通信システム（4G）では、6GHz 程度までの限られた帯域の周波数範囲を使用していたが、5G ではミリ波帯もあわせて利用するようになり、10 Gbps（ギガビット/秒）以上の通信速度でのサービスが計画されている。
- (7) **ミリ波**：波長が 1~10 mm、周波数が 30~300 GHz の電波。自動車レーダで使われる 24 GHz 帯や、5G で使われる 28 GHz のように近傍周波数である準ミリ波帯も、広義にミリ波と呼ばれることがある。
- (8) **ミキサ回路**：無線トランシーバにおいて、送信するために所望の周波数帯まで周波数を上げたり、受信のために中間周波数帯まで周波数を下げたりする回路。
- (9) **移相器**：入力信号に対して、位相が一定量増減した信号を出力する回路。位相の変化量はデジタル信号や電圧により制御可能なものもあり、**ビームステアリング**（用語 15）の実現に利用される。
- (10) **通倍器**：入力された信号の周波数を整数倍して出力する回路。4 通倍器では 4 倍の周波数に変換して出力する。
- (11) **変調帯域**：変調信号を送受信するために使う周波数の領域。本開発品では 242 GHz から 280 GHz の周波数帯を用いる。広いほど高速な通信が

可能。

- (12) **アウトフェーシング構成 (Outphasing)** : 振幅の等しい 2 つの信号を異なる位相で合成することで振幅および位相の変調を行う方式。Linear Amplification with Nonlinear Components (LINC) と呼ばれる。通常、アウトフェーシング方式は電力効率の改善を目的に利用されるが、本研究では変調時の平均電力の向上のために利用している。
- (13) **ハートレー構成 (Hartley)** : ハートレー型のイメージ除去受信機を意味する。位相の直交した 2 つの局部発振信号を用いることにより、不要波であるイメージ信号を抑圧することができる。
- (14) **ビバルディ型 (Vivaldi)** : ビバルディアンテナはアンテナ部が指数関数型の曲線形状を持つ平面アンテナの一種で、広帯域かつ高利得が実現できる。
- (15) **ビームステアリング** : アンテナの指向性パターンを制御する技術。通常、フェーズドアレイ (用語 1) を用いて電氣的に制御する。
- (16) **QPSK** : Quadrature Phase Shift Keying の略。搬送波の 4 つの位相を用いる変調方式。
- (17) **16QAM** : 16 Quadrature Amplitude Modulation の略。搬送波の振幅および位相変化の 16 値を用いる変調方式。
- (18) **IEEE802.15.3d** : IEEE (米国電子電気学会) において標準化された 300 GHz 帯の無線規格。

【発表予定】

この成果は 2 月 13 日 (米国太平洋時間) からオンライン開催される国際会議 **ISSCC 2021 「2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference: 2021 年米国電気電子学会 国際固体素子回路会議」** における講演セッション「Session 22 - Terahertz for Communication and Sensing」において、「A 300GHz-Band Phased-Array Transceiver Using Bi-Directional Outphasing and Hartley Architecture in 65nm CMOS (65 nm CMOS による双方向型アウトフェーシング・ハートレー方式による 300 GHz 帯フェーズドアレイ無線機)」の講演タイトルで、現地時間 2 月 17 日午前 8 時 38 分から発表される。

講演セッション : Session 22: Terahertz for Communication and Sensing

講演時間 : 現地時間 2 月 5 日午後 5 時より講演ビデオが視聴可能

現地時間 2 月 17 日午前 8 時 38 分より質疑

講演タイトル : A 300GHz-Band Phased-Array Transceiver Using Bi-Directional Outphasing and Hartley Architecture in 65nm CMOS (65 nm CMOS による双方向型アウトフェーシング・ハートレー方式による 300 GHz 帯フェーズドアレイ無線機)

会議 Web サイト : <http://isscc.org/>

<https://submissions2.miramart.com/ISSCC2021/PDF/ISSCC2021AdvanceProgram.pdf>

【問い合わせ先】

東京工業大学 工学院 電気電子系 教授
岡田 健一（おかだ けんいち）
TEL: 03-5734-3764 FAX: 03-5734-3764
Email: okada@ee.e.titech.ac.jp

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課
TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661
Email: media@jim.titech.ac.jp

日本電信電話株式会社
先端技術総合研究所 広報担当
TEL: 046-240-5157
Email: science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp