

ミリ波帯通信カバレッジ拡大に向けた無線電力伝送型中継器の研究開発

Study on Relay Transceivers Using Wireless Power Transfer for Extending Millimeter-Wave Communication Coverage

研究代表者

白根 篤史 東京科学大学
Atsushi Shirane Institute of Science Tokyo

研究期間 令和5年度～令和7年度

概要

本研究では、ミリ波帯無線電力伝送型中継器を研究開発することで、あらゆる場所に設置可能なミリ波帯中継器の実現を目指した。独自に開発したシリコン CMOS で製造したトランシーバ IC とアンテナ素子をそれぞれ接続し、256 素子フェーズドアレイ無線機を作成した。本無線機は、最終目標として設定した $\pm 45^\circ$ のビームフォーミング性能や、128mW の無線電力伝送による直流生成電力を大幅に上回る性能を達成した。また、実際に 28GHz 帯のミリ波 5G の信号を用いて通信性能の測定評価を行い、256QAM までの高精度な無線通信に成功した。

Abstract

In this study, we aimed to realize millimeter-wave relay transceivers that can be installed in any location by researching and developing a wireless power transfer type relay system. We fabricated a 256-element phased-array transceiver by integrating antenna elements with a custom-developed transceiver IC manufactured using Si CMOS technology. The developed transceiver achieved performance levels that significantly exceeded our final targets, including a beamforming range of $\pm 45^\circ$ and a DC power generation of 128 mW via wireless power transfer. Furthermore, we evaluated the communication performance using actual 28 GHz band 5G NR signals and successfully demonstrated high-precision wireless communication up to 256QAM.

1. まえがき

本研究の目的は、あらゆる場所に配置可能なミリ波帯中継器を実現することで、ミリ波帯通信エリアを拡大し、我々の生活にミリ波帯高速通信を浸透させることである。昨今、サービスが開始された 5G 移動体通信では、従来のサブ 6GHz 帯に加え、ミリ波 28GHz 帯を用いた高速通信が提供されている。ミリ波帯を用いることで、10Gbps を超える高速通信が可能となる。しかし、現状では、ミリ波帯 5G 対応の携帯端末を持っていたとしても、ミリ波帯の高速通信の恩恵にあずかることができるエリアは非常に限られている。

ミリ波帯通信のエリア拡大の課題となっているのが、基地局や中継器の設置場所の確保や、設置コストである。ミリ波帯通信では、電波の直進性が強く、遮蔽物等により通信エリアが狭まってしまう。そのため、サブ 6GHz 帯と比較して、より密度の高い、きめ細やかな基地局、中継器の設置が必要である。しかし、比較的小型のフェムトセル基地局や中継器の設置でも、光ファイバネットワークの接続や電源の引き回しが必要であり、設置場所が限られ、設置コストも増大してしまう。

これまででも、光ファイバや電源を必要とせず設置が容易な中継技術として、メタマテリアルを用いた反射板が研究されている。反射方向を変えることで基地局から見通せない範囲にも電波を届けることができるが、パッシブ型の中継であるため信号を増幅することができない。また、屋外から屋内といった壁やガラスなどの遮蔽物を通過させて、電波を中継する用途には用いることができない。

本研究では、ミリ波帯無線電力伝送型中継器を研究開発することで、光ファイバや電源を必要とせずあらゆる場所に設置可能な、信号増幅機能を持つ中継器を実現する(図 1)。本中継器は、従来のアクティブ型の中継器が備えるビームフォーミング機能および信号増幅機能を持ちながら電源不要で動作可能である。無線電力伝送 (WPT) と中継

器を融合させることで、中継器を動作させるための電力生成だけでなく、電力を消費することなくミリ波帯通信信号を中間周波数 (IF) に変換し、ビームフォーミングや信号増幅に必要な消費電力を大幅に低減できる。さらに比較的低い中間周波数帯で低損失に信号を送送できるため、ガラスや壁といった遮蔽物をケーブルで通過・迂回させるような中継器の使い方も可能となる。

2. 研究内容及び成果

(1) 最終目標

本研究の最終目標は、ミリ波帯無線電力伝送型中継器を実現することである。具体的な目標として、下記を設定した。

- 通信周波数は、現在ミリ波帯 5G で利用されている 26.5GHz から 29.5GHz に対応
- 1 キャリアあたりの帯域幅は 400MHz
- 中継器を構成する 256 素子フェーズドアレイを作成し、OTA (Over The Air) 測定評価を行い、 $\pm 45^\circ$ のビームフォーミング機能を実現
- 無線電力伝送について、256 素子全体で 128mW の直流電力を生成

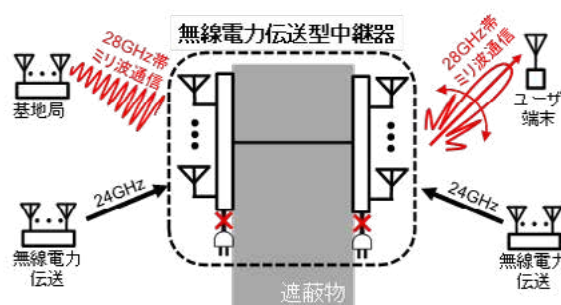


図 1 本研究の無線電力伝送型中継器の概要

- 2つの256素子フェーズドアレイ無線機をケーブル接続し、中継器を構成
- そのうえで無線電力伝送の生成電力を用いて、双方向アンプおよび制御用マイコンの動作を実現
- 中継器のOTA測定評価を行い、ミリ波帯5G信号を用いてダウンリンクおよびアップリンクの回線設計を模擬した条件で-31dB以下のEVMを達成

(2) 無線電力伝送型中継器の構成

中継器全体は、主要な回路ブロックである整流器型ミキサ、移相器、双方向アンプで構成される。整流器型ミキサは、2つの機能を持ち、無線通信においては28GHzの周波数を4GHzの中間周波数へとRF-IF変換し、無線電力伝送においては24GHzの信号から直流電力を取り出すRF-DC変換を行う。移相器は、中継器のビームフォーミング機能の実現に必須のブロックであり、 360° の位相変化レンジを、3bitの分解能、すなわち 45° の位相分解能で変化させることで、サイドロープのレベルをメインロープに対して10dB以下まで下げることを目指した。また、移相器は電力を消費しないパッシブ型を採用した。双方向アンプは、中間周波数に変換された通信信号の増幅を、ダウンリンクおよびアップリンクのどちらの方向に対しても行う。また、全体の消費電力目標より、1つの双方向アンプの消費電力は32mW以下を目指して開発を行った。

(3) 研究成果1 市販デバイスを用いた256素子無線電力伝送型中継器

図2にGaAsダイオードをはじめとする市販のディス

クリット部品を用いて、大規模・大電力化を目指した256素子WPT型中継器の構成を示す。本中継器では、市販のデバイスを用いることで、比較的容易に構成が可能であり、また大電力の出力を可能としている。一つのアンテナに対して一つのGaAsダイオードを接続し、整流および周波数変換動作を行う。また整流器の後段に1bitの移相器を設けることで、ビームフォーミングも可能としている。本中継器では、アンテナピッチが5.3mmとなっており、5.3mm角に、多くの部品を持つ高分解能の移相器を実現するのは困難である。しかし、本中継器は256素子と素子数が多いため、各素子の1bitの粗い位相制御による誤差が全体として平均化され、結果としてある程度のビームフォーミングを実現可能である。

図3に、1系統分の詳細な回路図を示し、WPTおよびミリ波5G信号の流れを示す。ダイオードと伝送線路で整流器が構成されており、半端整流で直流電力を生成しながら、ダイオードミキサとしても動作し、受信時には、28GHzの5G信号と24GHzのWPT信号を乗算することで、4GHz帯まで周波数変換を行う。送信時は、4GHz帯のIF信号とWPT信号がダイオードのアノードおよびカソードそれぞれに入力されて、同様に乗算され、28GHz帯まで周波数アップコンバージョンが行われる。伝送線路のTL1およびTL2は、それぞれ24GHzおよび4GHz帯において1/4波長となるように設計し、各周波数においてRFC(Radio Frequency Choke coil)としてふるまう。180度の1bit移相器は、バランとDPDT(Double Pole Double Throw)スイッチで構成し、差動信号の正負を入れ替えることで位相を反転させている。

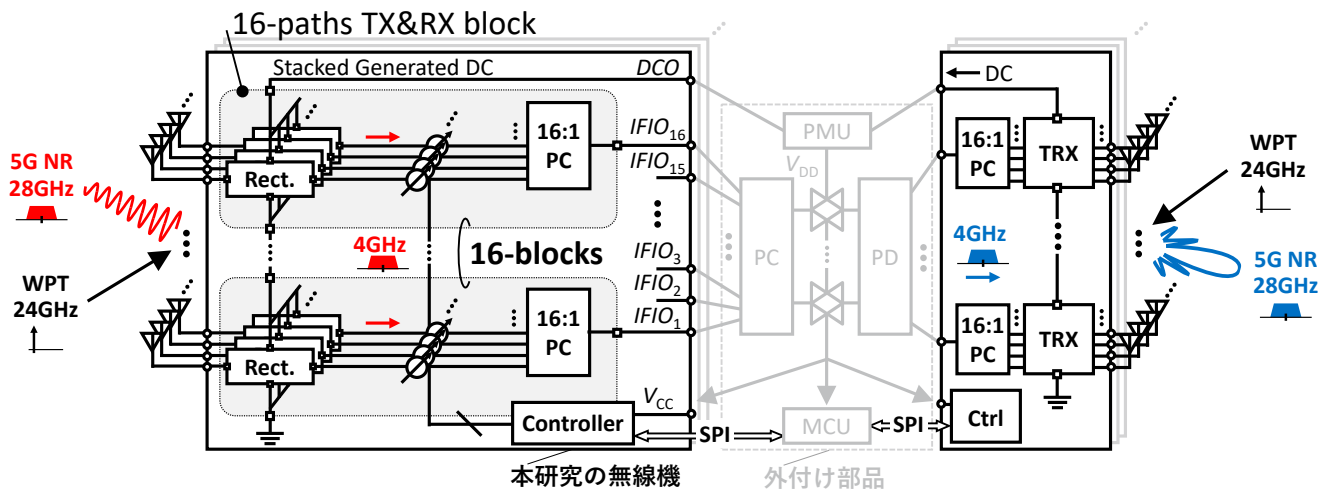


図2 256素子無線電力伝送型中継器のプロトタイプ

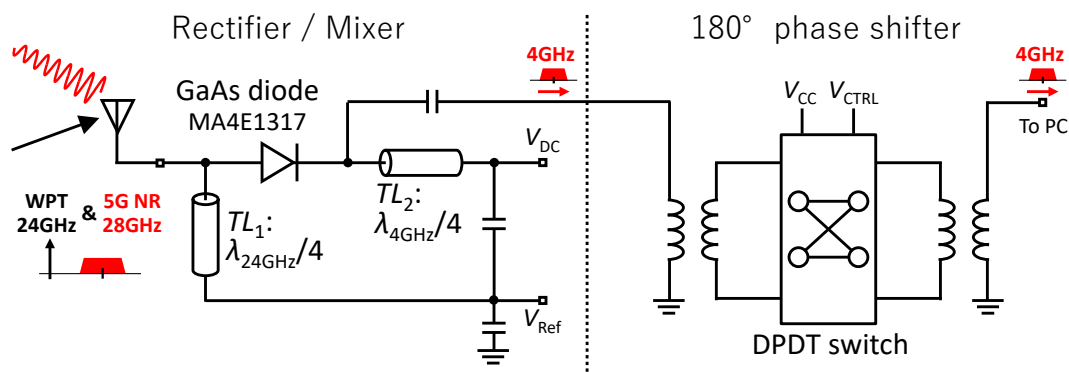


図3 1素子分の詳細回路図および動作の説明

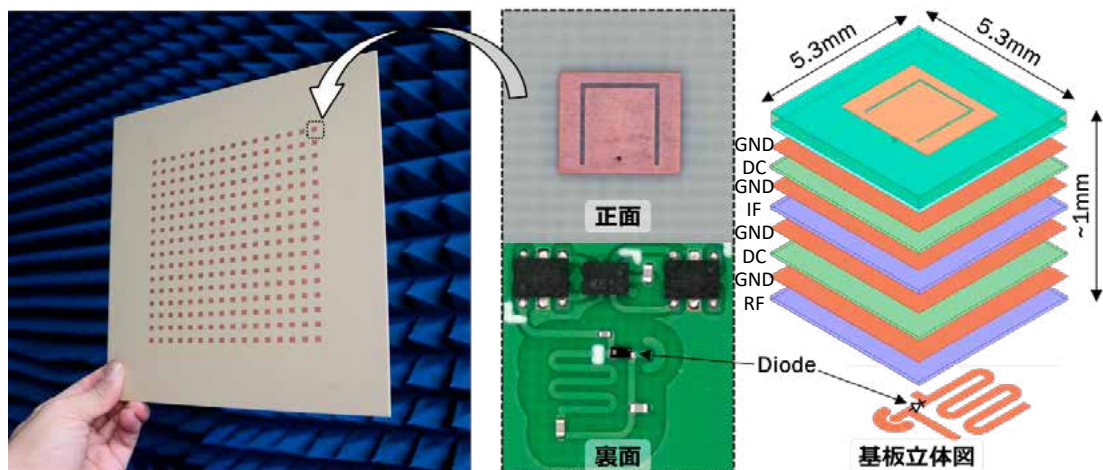


図 4 試作した 256 素子無線電力伝送型中継器

図 4 に示すような 256 素子のアレイアンテナを持つ WPT 型中継器を作成した。基板は Megtron6 材を用いて、GaAs ダイオード等、市販のディスクリート部品を実装している。アンテナは、スロットを入れることで広帯域化を実現している。本中継器を OTA 環境で測定評価を行い、WPT の特性では、1 素子あたり 54% の電力変換効率を達成し、入力電力 3dBm のとき 128 素子の整流器の合計電力は 56mW であった (図 5)。さらに大きな WPT 電力を 256 素子全体に入力できれば、1W 以上の出力電力が生成可能である。これは、高出力かつ高機能な中継器として動作させたときにも十分な生成電力である。また 5G NR の信号を用いて、EVM (Error Vector Magnitude) の測定を行い、送受共に 64QAM まで通信が可能であることを確認した。

(4) 研究成果 2 カスタム開発した CMOS チップを用いた 256 素子無線電力伝送型中継器

前述した研究成果 1 では、市販品のデバイスを用いたため、比較的容易に無線機を構成することができたが、ディスクリート部品を用いているため、集積度を上げることができず、性能・機能の面で、最終目標を満たすことができない部分があった。そこで、Si CMOS プロセスを用いてカスタム IC を作成し、最終目標の中継器を実現した。

執筆時点で、本研究成果は未発表[査読付き口頭発表論文 1]であり Prepublication ポリシーの関係で詳細な結果を示すことができないが、最終目標を達成していることを確認した。中継器を構成する 256 素子フェーズドアレイを作成し、OTA 測定評価を行い、 $\pm 45^\circ$ を大きく上回るビームフォーミング性能を達成した。また、無線電力伝送について、256 素子全体で 128mW を大きく上回る直流電力を生成することに成功した。2 つの 256 素子フェーズドアレイ無線機をケーブル接続し、中継器を構成し、そのうえで無線電力伝送の生成電力を用いて、双方向アンプおよび制御用マイコンの動作を実現した。中継器の OTA 測定評価を行い、ミリ波帯 5G 信号を用いてダウンリンクおよびアップリンクの回線設計を模擬した条件で目標の -31dB 以下の EVM を達成した。

3. 今後の研究成果の展開

本研究開発の成果である無線電力伝送型中継器は、今後、実際にフィールド実証実験を行い実用化に向けて開発を行っていく。本中継器の社会実装の 1 つの形として、ミリ波帯を用いた固定無線アクセス (FWA) サービスを各キャ

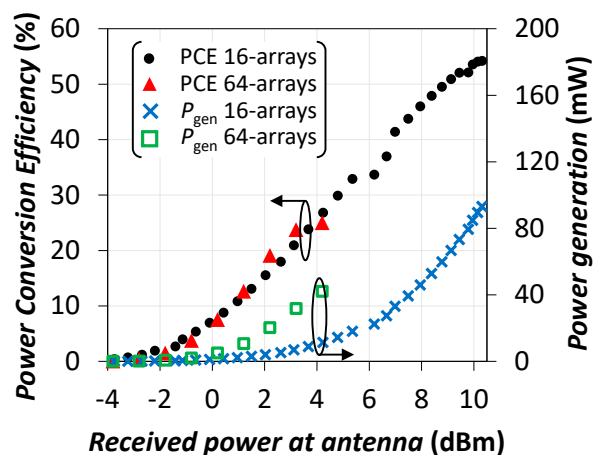


図 5 無線電力伝送の測定評価結果

リアやベンダーと連携して提供していくことを想定している。FWA サービスを契約している商業施設、あるいは住宅においては、ミリ波帯の高速通信にアクセス可能となる。商業施設においては、すでに無線 LAN が利用可能であるが、多くの場合快適な通信速度を提供できているとは言い難い。また、日本においては光ファイバを住宅に引いてくることは、現状困難ではないが、住宅の密度が低い地域や、過疎化が進む地域では、無線でネットワークをつなぐほうが低コストとなる。さらに、無線電力伝送によって、中継器だけではなく身の回りの比較的消費電力の低い電化製品への電力供給を可能にすることで、我々の生活をより豊かにする無線通信および無線電力サービスの提供を実現する。

また、これまでに数多くの無線電力伝送型中継器の研究開発を行っており、技術的な展開という点でも、多くの可能性を有している (図 6)。本研究では、24GHz 帯の無線電力伝送と 28GHz 帯の 5G ミリ波通信を想定していたが、無線電力伝送を 5.7GHz にすることで、より長距離かつ大電力を送ることが可能となる。また、通信周波数を D-band を用いることで、より高速な無線通信を実現することが可能である。

4. むすび

無線電力伝送型のミリ波帯中継器の研究開発を行い、実際に 256 素子のフェーズドアレイで構成される中継器の試作評価を行った。本研究で開発した技術を利用すること

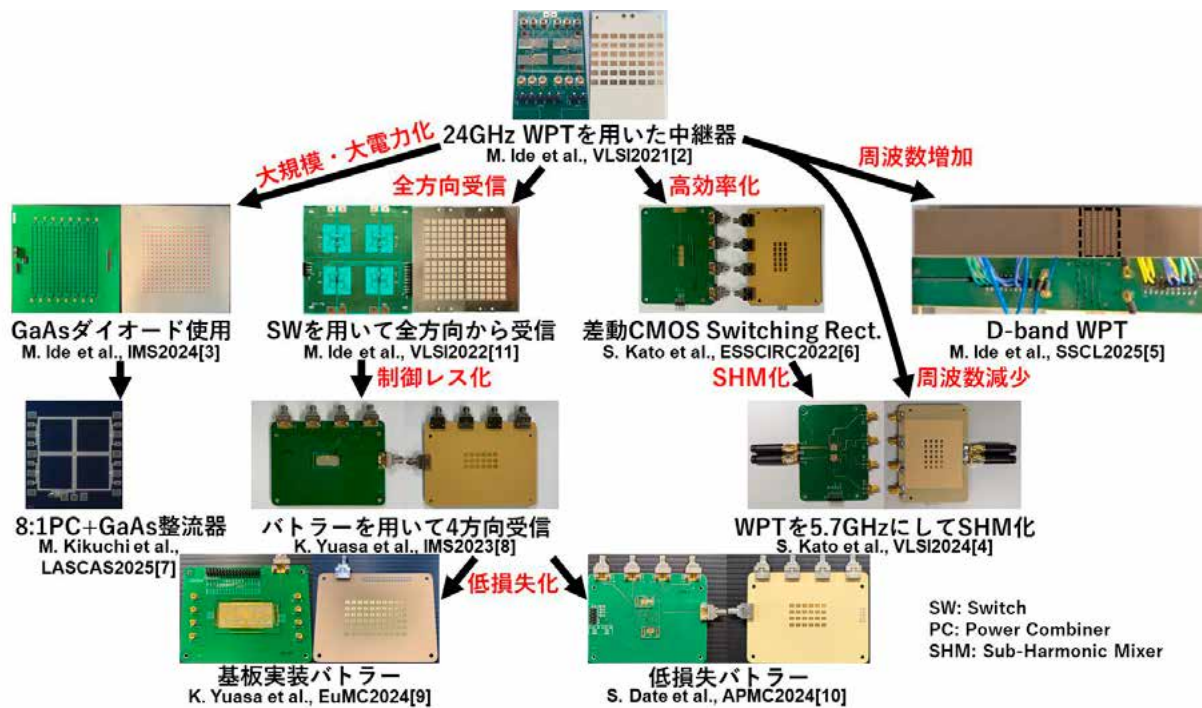


図 6 無線電力伝送型中継器の研究成果と技術的展開

で、光ファイバや電源を必要とせずあらゆる場所に設置可能なミリ波中継器が実現可能である。本研究成果を実社会に展開していくことで、ミリ波通信のカバレッジ拡大、逼迫する周波数資源の有効利用に貢献することが期待される。

【査読付き誌上発表論文】

- [1] Sena Kato, Keito Yuasa, Michihiro Ide, Kenichi Okada, and Atsushi Shirane, "Millimeter-Wave Wirelessly-Powered Phased-Array Relay Transceiver Utilizing CMOS Switching Rectifier-Type Mixer," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E108-C, No. 10, pp. 545-554, Oct. 2025.
- [2] Michihiro Ide, Keito Yuasa, Sena Kato, Shu Date, Takashi Tomura, Kenichi Okada, and Atsushi Shirane, "A 122GHz Wirelessly Powered Active Reflector for D-band Communications," IEEE Solid-State Circuits Letters (SSC-L), Vol. 8, pp. 97-100, 2025.
- [3] Michihiro Ide, Keito Yuasa, Sena Kato, Takashi Tomura, Kenichi Okada, and Atsushi Shirane, "A 256-Element Phased-Array Relay Transceiver for 5G Network Using 24-GHz Wireless Power Transfer With Discrete ICs," IEEE Microwave and Wireless Technology Letters (MWTL), Vol. 34, No. 6, pp. 793-796, June 2024.

【その他の誌上発表】

- [1] 白根 篤史, 「無線電力伝送と通信の融合によるミリ波帯中継器」, 解説論文, 通信ソサイエティマガジン, No. 74, 秋号, 2025.

【査読付き口頭発表論文】

- [1] Shu Date, Atsuya Hirayama, Sena Kato, Keito Yuasa, Michihiro Ide, Masayuki Kikuchi, Takashi Tomura, Jill Mayeda, Atsushi Shirane, "A 256-Element 28GHz 5G NR Wirelessly-Powered Active Relay Transceiver with TDD Synchronization Free Bidirectional Amplifiers," IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Boston, MT,

June 2026. (Accepted)

- [2] Masayuki Kikuchi, Michihiro Ide, Jill Mayeda, Sena Kato, Keito Yuasa, Atsushi Shirane, "A GaAs HEMT Rectifier-Type Mixer for Battery-Less Wirelessly Powered Relay Transceivers," IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS), Scottsdale, AZ, Oct. 2025.
- [3] Keito Yuasa, Shu Date, Sena Kato, Michihiro Ide, Takashi Tomura, Kenichi Okada, and Atsushi Shirane, "A Triple-Band Transceiver for Formation Flying Satellite Communication with Dual Circular Polarized Wireless Power and LO Transfer," IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSI Circuits), Kyoto, Japan, June 2025.

【口頭発表】

- [1] 湯浅 景斗, 井出 倫晃, 加藤 星風, 岡田 健一, 白根 篤史, 「ビーム制御不要 28GHz 中継機および 24GHz 無線電力伝送」, 電子情報通信学会 総合大会, Mar. 2024.
- [2] 菊地 真之, 加藤 星風, 井出 倫晃, 湯浅 景斗, 伊達 脩, 岡田 健一, 白根 篤史, 「ミリ波帯無線電力伝送受信器に用いる低損失 32 対 1 電力合成器」, 電子情報通信学会 総合大会, Mar. 2024.
- [3] 井出 倫晃, 湯浅 景斗, 加藤 星風, 伊達 脩, 岡田 健一, 白根 篤史, 「122GHz 帯無線電力伝送向けクロスカップルド整流器」, 電子情報通信学会 総合大会, Mar. 2024.

【受賞リスト】

- [1] 電子情報通信学会 論文賞 (2025 年 6 月 5 日)
- [2] ドコモ・モバイル・サイエンス賞, 先端技術部門 優秀賞 (2024 年 10 月)

【報道発表リスト】

- [1] 「複数の超々小型衛星の編隊飛行による「非結線型フェーズドアレイ無線機」の開発に成功」 2026 年 2 月 18 日, <https://www.isct.ac.jp/ja/news/vauvffzb67g8>
- [2] 「市販半導体を用いてデータ電力同時伝送可能なミリ

波帯フェーズドアレイ無線機の開発に成功」、2024 年
6 月 18 日

<https://www.titech.ac.jp/news/2024/069449>

- [3] 「5.7 GHz 帯無線給電で動作するミリ波帯 5G 中継器
を 実 現 」 、 2024 年 6 月 17 日
<https://www.titech.ac.jp/news/2024/069458>