

28 GHz 256素子タイリングフェーズドアレイアンテナモジュールの Over-The-Air評価

電子応用技術R&Dセンター 徐 磊¹・Fabrício Dourado²・東 海 林 孝 仁³・藤 乘 優 治 郎⁴

Over-The-Air Evaluation of 28 GHz 256-Element Tiling Phased Array Antenna Module

Lei Xu, Fabrício Dourado, T. Shoji and Y. Tojo

低遅延かつ高速でデータをリアルタイムに無線伝送できるミリ波は、第5世代移動通信システム（5G）への応用が期待されている。当社は、5G通信向け用途として28 GHzフェーズドアレイアンテナモジュール（Phased Array Antenna Module：PAAM）「FutureAccess™」を開発している。従来のPAAMに比べ出力を向上させたFutureAccess™ Type-C PAAMは、64素子、256素子ともにミリ波信号における高出力と高品質の両立を実現した。本稿では、OTA（Over-The-Air）試験を通じて、64素子PAAM単体、およびタイル状に並べて256素子に拡大した場合の性能を検証した結果について報告する。

Millimeter-wave based technology, capable of transmitting large amounts of data in real-time with low latency and high speed, is expected to play a significant role in the fifth-generation (5G) mobile communication systems. We are developing a 28 GHz band Phased Array Antenna Module (PAAM) 「FutureAccess™」 for the 5G applications. Comparing to previous PAAM, 64-element and 256-element Type-C PAAM achieving a balance between high output power and high-quality millimeter-wave signals. In this paper, we report on the performance evaluation of a 64-element PAAM and a 256-element tiled Type-C PAAM through OTA (Over-The-Air) testing.

1. ま え が き

第5世代（5G）のネットワークは、既存の第4世代Long Term Evolutionのネットワークより、高速、大容量かつ低遅延の通信が求められている。また、AIの発展に伴い、データセンタなどで大容量データの高速通信需要が見込まれており、無線通信においても同様に需要が高まる見込みである。このような無線通信の需要に対して、5Gネットワークではミリ波の活用が検討されている（図1）。ミリ波周波数帯は広い帯域幅を提供できるため、5Gネットワークで要求される大容量通信を可能にする。しかし、ミリ波の周波数帯は低周波数帯と比較して損失が大きく、カバレッジ範囲が狭いという課題もある^{1, 2)}。

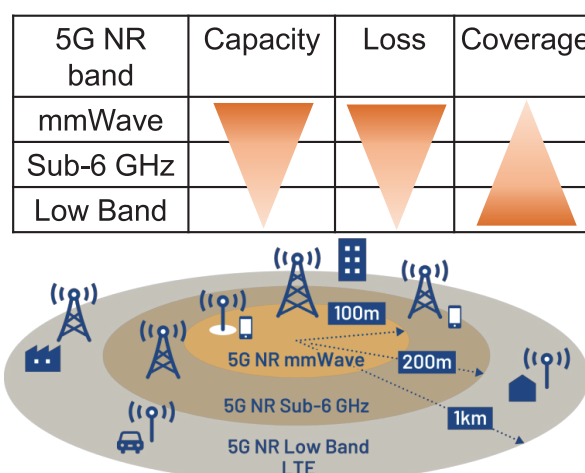


図1 5Gネットワークイメージ

Fig. 1. 5G network imaging.

このような高い損失による信号強度の減衰を克服するために、フェーズドアレイアンテナ（Phased Array Antenna）が用いられる。ミリ波は従来の無線周波数に対して短波長であるため、アンテナ素子を小型に形成でき、これらを平面に並べたアレイアンテナを小型の電子基板サ

1 ミリ波デバイス研究部

2 Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG Application Development Test and Measurement

3 ミリ波デバイス研究部

4 戦略センター 技術マーケティング部 博士（工学）

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
5G	The fifth generation mobile communication systems	第5世代移動通信システム
PAAM	Phased Array Antenna Module	フェーズドアレイアンテナモジュール
RF	Radio Frequency	無線周波数
IF	Intermediate Frequency	中間周波数
BFIC	Beam Former IC	特定方向へのビームの送信/受信を行うIC
FCIC	Frequency Converter IC	IF信号とRF信号とを変換する周波数変換IC
COMB-SPLIT	Combiner / Splitter	RF信号を合成/分配するコンバイナ/スプリッタ
BPF	Band Pass Filter	所望帯域以外の不要信号を抑制するフィルタ
OTA試験	Over-the-Air test	空間を介して電波の送信/受信を行う測定
ミリ波	Millimeter wave	波長が1-10 mm, 周波数が30-300 GHzの電磁波. 5Gで利用される24.25-52.6 GHzの周波数帯を含む.
ビームフォーミング	Beam Forming	所定方向の電波指向性を高める技術
基地局	Base station	無線局の種別の一つで, 陸上移動局と通信するために陸上に開設する移動しない無線局
FWA	Fixed Wireless Access	固定無線アクセス
リピーター	Repeater	基地局からの電波を増幅する無線中継器
RFIC	Radio Frequency Integrated Circuit	無線周波数IC
3GPP	Third Generation Partnership Project	3G以降の移動体通信システムの標準規格の仕様の検討や調整を行う各国標準化機関によるプロジェクト
n257, n258, n261	n257, n258, n261	5G無線周波数帯のうち, n257 (26.50 – 29.50 GHz), n258 (24.25 – 27.50 GHz), n261 (27.50 – 28.35 GHz) の帯域
Tx	Transmitter	送信機
Rx	Receiver	受信機
H pol. , V pol.	H-polarization, V-polarization	水平偏波, 垂直偏波
EIRP	Effective Isotropically Radiated Power	実効等方放射電力と定義され, 指向性を有するアンテナの, ある方向における放射と等価な放射電力を与える, 理想的な等方性アンテナからの放射電力

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
ホーンアンテナ	Horn antenna	主に高周波で使用される四角錐や円錐状のアンテナであり、ゲインが既知であるため、測定時の標準としても用いられる。
FE	Front-End	アンテナ側の送受信端の回路部分
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	直交周波数分割多重方式
帯域幅	Bandwidth	通信などに用いる周波数の範囲
256QAM	256Quadrature Amplitude Modulation	直交振幅変調の一つで、256値のシンボルを用いて一度に8ビットを伝送できる方式
電波暗室	Electromagnetic anechoic chamber	外部からの電磁波の影響を受けず、かつ外部に電磁波を漏らさず、さらに内部で電磁波が反射しないようにシールドされた特殊な実験室
HPBW	Half Power Beam Width	アンテナ放射パターンのメインローブにおいて、信号電力がピーク値の半分(-3 dB) を示す点で測定される角度幅
CW	Continuous wave	連続波
LO	Local oscillator	局部発振器
SG, VSG	Signal generator, Vector signal generator	信号発生器、ベクトル信号発生器と呼ばれ、周波数・電力・変調の電気信号を出力する電気計測器であり、無線機や受信機の試験用信号源として用いられる
SA	Signal Analyzer	シグナルアナライザと呼ばれ、入力信号がもつ個々の周波数成分に分離し、横軸は周波数、縦軸は強度を示す計測器であり、変調解析(信号解析)機能を有する
Test model	Test model	5G NR物理チャネルのセットアップを記述した定義済み信号
IMD	Intermodulation distortion	相互変調歪と呼ばれ、非線形回路に複数の信号を加えた場合に発生する歪
EVM	Error Vector Magnitude	理想波形と計測波形の差を定量的に示す、デジタル変調信号の品質の指標。値が小さいほど信号品質が良好
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio	隣接チャネル漏洩電力比と呼ばれ、無線周波数上で隣接チャネルへの不要な漏洩信号電力比
CP	Cyclic Prefix	マルチパス環境での信号信頼性向上のためのガード区間
OTA beam switching time	Beam switching time	OTA測定上でのデジタル信号の入力からビーム方向変更までの時間

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
Beam switching periodicity	Beam switching periodicity	連続してビーム方向を切り替えられる周期
実時間遅延回路	The true-time-delay circuit	遅延線路を用いて位相変更する方式。当社のBFICの移相器は遅延線路が分割されており、各々の分割された線路のインダクタンスLとキャパシタンスCを変更することで、遅延量(位相量)を制御することが特徴。
DDPD	Direct Digital Pre-Distortion	入力信号に対して出力信号が線形となるように、補正値をかける反復的なプロセス
NTN	Non-Terrestrial Network	人工衛星や無人航空機を利用して地上の通信基地局の範囲外をカバーするネットワークシステム
SCS	Sub-Carrier Spacing	OFDM(直交周波数分割多重方式)などのマルチキャリア伝送において、信号を伝送する個々のキャリアの間隔のこと。FR2(28 GHz帯)の場合は、60kHz, 120kHz, 240kHz(帯域幅400 MHzの場合のみ)となっている。

イズに高密度に配置することが可能である。ビームフォーミングにより、送信および受信信号を特定の方向に動的に指向性を集中させ、カバレッジ範囲を拡大することができる。さらに、他の信号源からの干渉を抑制し、個々のアンテナ素子の位相と振幅を動的に調整することで、不要な信号を打ち消し、システム全体の性能を向上させることができる³⁾。

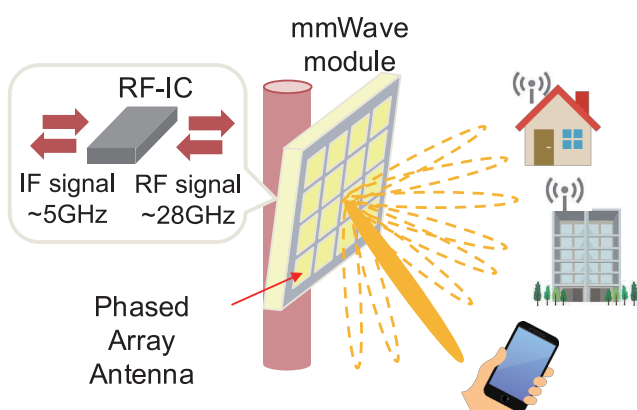


図2 ビームフォーミングイメージ

Fig. 2. Beamforming imaging.

当社は、2019年からn257帯、n258帯、およびn261帯に対応するフェーズドアレイアンテナモジュール（Phased Array Antenna Module）（以下PAAMと呼称）の開発に着手した。図2のように、PAAMは、高品質の信号出力、高速のビーム切り替え、高精度のビームコントロールなどの特徴をもち、5Gの基地局、FWA、リピーターとして活用できる。現在、第二世代の開発品（Type-C PAAM）⁴⁾の提供を開始している。

本稿では、FutureAccess™ Type-C PAAMのOver-The-Air (OTA) 試験による性能評価結果について報告する。

2. 概要

図3 (a) はType-C PAAMのアンテナ面を示している。モジュールの外形寸法は4.25 cm × 4.25 cmであり、3GPPで定義されたn257帯 (26.50 - 29.50 GHz)、n258帯 (24.25 - 27.50 GHz)、n261帯 (27.50 - 28.35 GHz) にて動作可能である。アンテナ部は磁気電気ダイポールアンテナ⁵⁾を採用し、8×8の64素子で構成され、水平偏波 (H pol.) および垂直偏波 (V pol.) の送受信が可能である。n257帯向けとn258帯向けの2種類の製品を開発し、それぞれ約3GHzの広帯域をカバーしている。

図3(b) はType-C PAAMの裏面を示している。モジュール

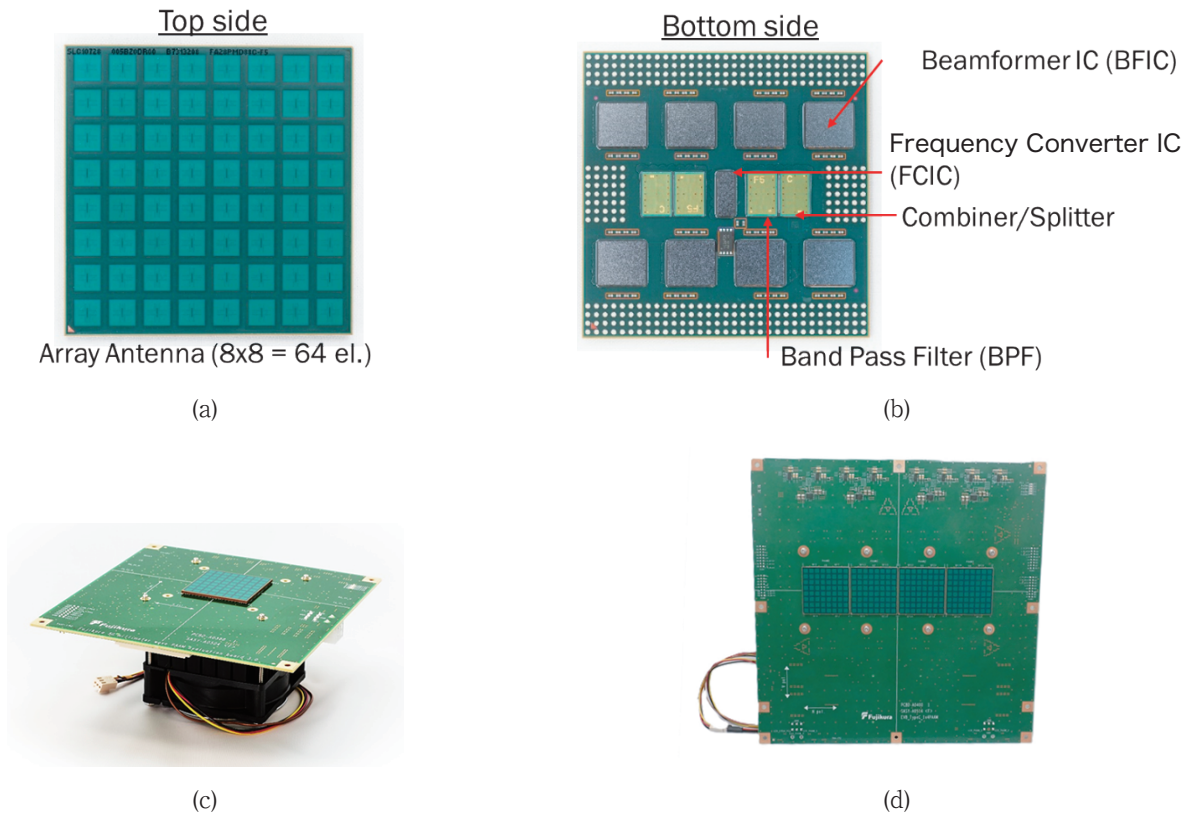


図3 TypeC PAAMと評価ボードの外観

Fig. 3. Appearance of Type-C PAAM and Evaluation Board.

ル中央には1つのFCIC（Frequency Converter IC）が配置されており、PAAMに入出力される中間周波数（Intermediate Frequency, IF）信号と無線周波数（Radio Frequency, RF）信号とを相互変換する役割を果たす。また、FCICによる周波数変換で発生した不要信号を除去するため、FCICの左右に1つずつBPF（Band Pass Filter）が実装されている。さらに、フィルタリングされたRF信号を合成/分配するCombiner/SplitterがBPFの両側に配置されている。BFIC（Beamformer IC）は8つ搭載されている。それぞれのBFICには、移相器や可変利得増幅器などのフロントエンドが1偏波あたり8個ずつ（合計16個）構成されており、RF信号の位相と振幅の制御を行う。

PAAMは、1つのフロントエンドがアレイアンテナ1素子と接続され、8個のBFICと合計64素子のアレイアンテナで構成される。それぞれが移相器や可変利得増幅器を内蔵しており、RF信号のビームフォーミングを行う。

図3（c）はType-C PAAMを搭載した評価ボードを示している。このボードには降圧DCDCコンバータが搭載されており、12Vの入力電圧から1.2V、1.5V、1.8V、2.7Vを生成して基板内部に供給している。また、FCIC→BPF→Combiner/Splitter→BFIC→アンテナまでの配線経路を各フロントエンドごとに等長に設計することで、各アンテナ間の位相のばらつきを最小限に抑えている。

また、当社の開発したBFICでは、移相器として実時間遅延回路を用いており、位相に対する振幅変動が極めて小さい。これらの設計により、PAAMは、位相のキャリブレーションなしでも高精度のビームフォーミング制御が可能である。

図3（d）は4台のType-C PAAMを横一列にタイリングした評価ボードを示している。この構成により、ICを4倍に増やしただけでなく、アンテナ数を増加させて指向性を高めることで、電力密度を16倍に向上させることができ、より長距離の伝送に適している。

2. 1 伝送速度の試算

伝送速度は、下記の式（1）⁶⁾で理論的に計算できる。

$$\text{Data rate [bps]} = N_{\text{mimo}} \times N_{\text{mod}} \times f \times R_{\text{max}} \times (N_{\text{RB}} \times 12 / T_{\text{symbol}}) \times (1 - R_{\text{OH}}) \times R_{\text{DL/UL}} \quad (1)$$

ただし、 N_{mimo} ：最大MIMOレイヤ数 N_{mod} ：変調シンボルあたりのビット数

f ：スケーリングファクタ（ここでは1） R_{max} ：最大符号化率 N_{RB} ：1コンポーネントキャリア（CC）あたりのリソースブロック

T_{symbol} : 1OFDMシンボルあたりの時間長 R_{OH} : 無線フレームあたりのオーバーヘッド率 (ミリ波は0.2)
 $R_{\text{DL/UL}}$: TDDのUL/DLの割当て比率

例えば、帯域幅400 MHz、64QAM OFDMのミリ波信号の場合、64素子PAAM単体 (MIMOレイヤ2) の伝送速度は2.52 Gbpsである。

複数のPAAMを用いれば、より高速なデータ伝送を実現できる。4台のPAAMを独立に動作させた場合 (MIMOレイヤ8) の伝送速度は10.08 Gbpsである。

2. 2 試験環境

試験環境は、図4 (a) に示すように、大型電波暗室内に構築されている。暗室の内部は全面がミリ波対応の電波吸収材、遮蔽材で覆われており、反射波を十分に減衰させることができる。暗室内の一方に、PAAM評価ボードを二軸回転台上に設置し、PAAMの対向に、ホーンアンテナを設置した。必要な装置はPAAMまたはホーンアンテナの近くに置き、暗室の扉を閉めて完全に密閉した状態で試験を行う。装置類の操作は暗室外からリモートで行う。

2. 2. 1 連続波での基礎特性評価

図4 (b) に示すOTAブロック図の通り、連続波 (Continuous Wave, CW) を用いてPAAMの基礎特性を評価した。信号発生器 (SG) としてR&S[®] SMW200Bを用い、PAAMへのLO信号入力を行った。

また、ベクトル信号発生器 (VSG) として、R&S[®] SMW200Aを用い、PAAMへのIF信号入力を行った。

PAAM内部で処理されたミリ波のRF信号は空間に放射される。空間を伝搬したRF信号は反対側のホーンアンテナで受信され、シグナル・スペクトラム・アナライザ

(R&S[®] FSW) を使ってRF信号の強度を評価する。本評価では、FSWで取得した電波強度を基に、Friis伝達公式⁷⁾を変形し、下記の式 (4) を用いて実効等方放射電力 (Effective Isotropically Radiated Power, EIRP) に換算し、各方向の放射強度を評価した。

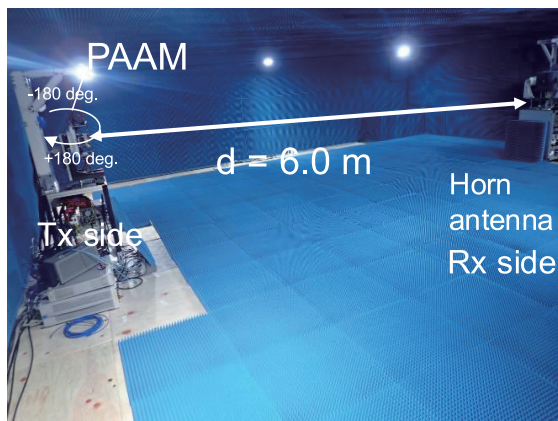
$$\text{EIRP (dBm)} = P_R \text{ (dBm)} - L_s \text{ (dB)} - G_M \text{ (dBi)} + \text{FSPL (dB)} \quad (4)$$

ただし、 P_R : FSWで計測した電波強度、 L_s : ホーンアンテナに接続した同軸ケーブル損失、 G_M : ホーンアンテナ利得、FSPL : 自由空間伝搬損失

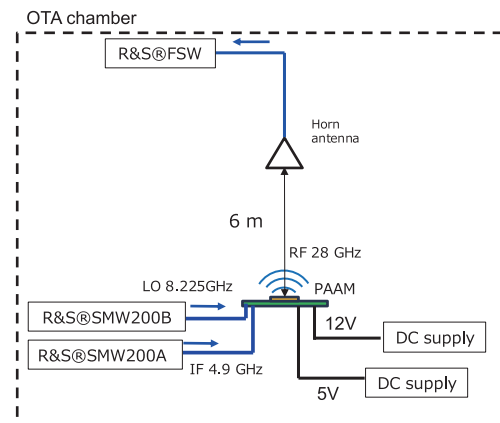
2. 2. 2 変調信号での信号品質評価

3GPPに規定された変調信号⁸⁾ (Test model 3.1a, Test model 1.1) を用いてEVM (Error Vector Magnitude) と ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio) の測定を行い、信号の品質を評価した。EVMは、実測した信号と理想信号とのベクトル差から算出され、%として表示され、EVMが低いほど信号の品質が良いとされる。Type-C PAAMでは、BFICとFCICのレベルダイヤを最適化し、信号の非線形特性を改善したことで、良好なEVMとACLR特性を得られた。

5G NRではOFDMが採用されている。ICの増幅性能によっては、OFDMの振幅方向のひずみが相互変調 (IMD) によって雑音となり、EVMが悪化しやすくなる。また、ACLRの劣化も顕著になる。3GPPでは、EVMとACLRをそれぞれTM3.1aとTM1.1の信号で測定することが規定されており、EVMは4.5%以下、ACLRは-25.7 dBc以下と定められている⁸⁾。



(a)



(b)

図4 試験環境及び測定ブロック図

Fig. 4. Test environment and measurement block diagram.

2. 2. 3 ビーム立ち上がり及び切り替え時間の確認

大容量の情報を確実に複数の端末へ届けるためには、高速なビームスイッチングが必要不可欠となる。サイクリックプレフィックス (CP) は、5G NR OFDMデータフレームのシンボル間に存在するもので、240 kHzのサブキャリア間隔 (SCS) を使用する場合、その時間は $0.29 \mu\text{s}$ ⁹⁾と非常に短い。また、ビーム切り替えは、CPの80 %以内¹⁰⁾で行うことが要求されている。PAAMでは、ICへのデジタル信号指示に要する時間を含むビーム切り替え時間をオシロスコープ (R&S® RTP) で確認した。

3. 試験結果

3. 1 64素子Type-C PAAMの結果

3. 1. 1 64素子PAAMのビームパターン

試験にて使用したLO, IFの周波数は、それぞれ8.225 GHz, 4.9 GHzであり、RF信号は28 GHzである。PAAMからのビームは水平偏波 (H pol.), 垂直偏波 (V pol.) であり、ホーンアンテナの電界面 (E plane), 磁界面 (H plane) に対して、PAAMからのビーム放射方向 θ を図5のように定義する。 θ を $-60^\circ \sim +60^\circ$ の範囲で 15° 間隔で設定し、取得したビームパターンを図6 (a) - (d) に示す。

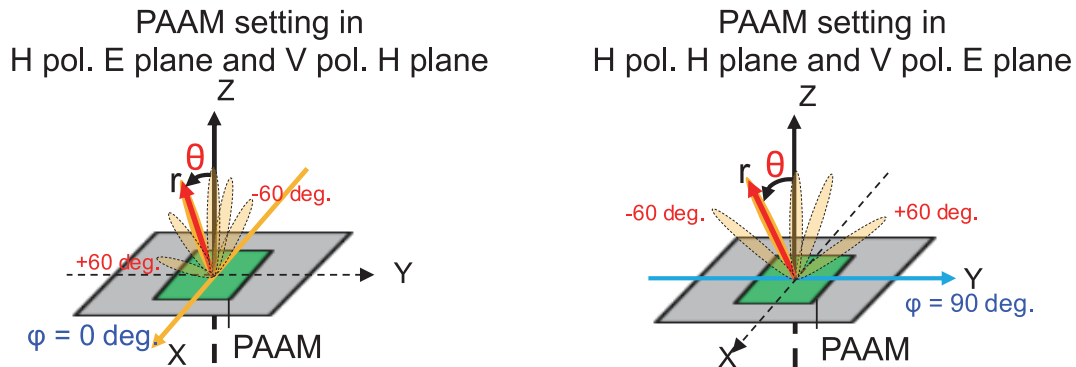


図5 PAAMからのビーム放射方向の定義

Fig. 5. Definition of beam direction from PAAM.

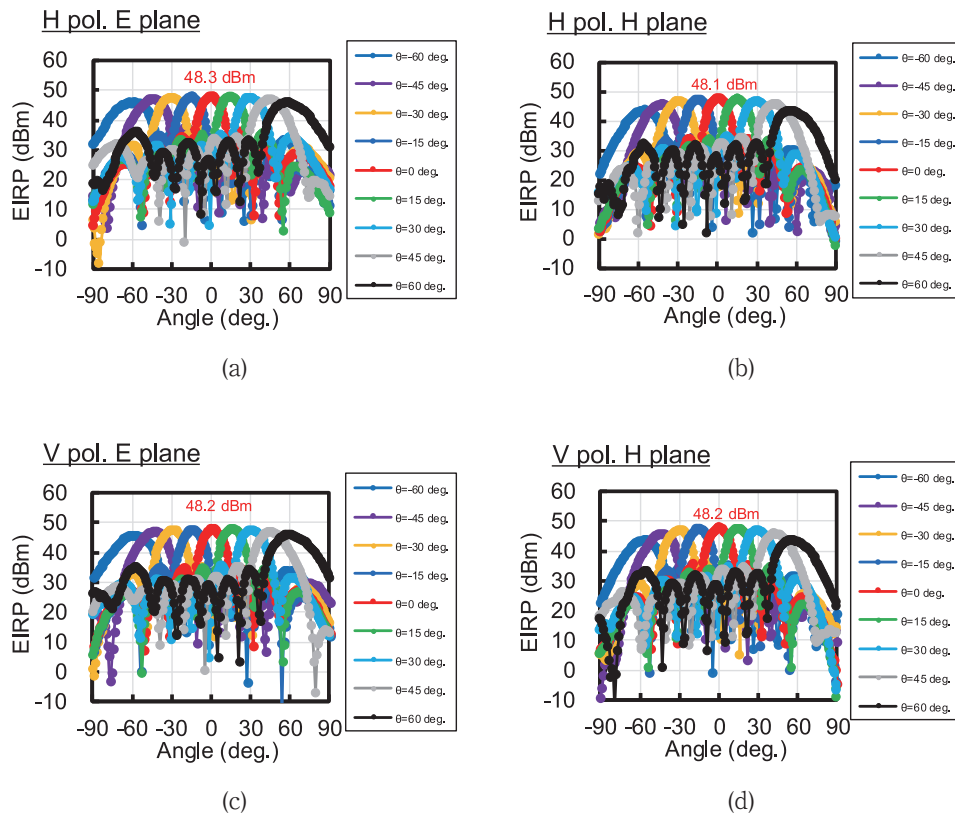


図6 64素子PAAMのビームパターン

Fig. 6. Beam pattern with 64 elements PAAM.

それぞれの測定では、PAAMを載せている回転台を -90° ～ 90° の範囲で 1° ステップずつ動かしながら、ホーンアンテナに接続したシグナル・スペクトラム・アナライザで表示されたRF信号の強度を読み取り、ビームパターン形状を描画した。一般的に、各アレイごとに位相のキャリブレーションを実施しない場合、各アンテナ素子間の位相ばらつきが大きく、理論計算で予測されるパターンとは異なる。一方で、当社の開発したPAAMは、H pol., V pol. の各偏波において、位相のキャリブレーションなしでも十分な方向精度を示すビーム形状を確認した。

3. 1. 2 64素子PAAMのEVM&ACLR

EVM, ACLRの試験は、それぞれ3GPPに定められた Test model 3.1aと Test model 1.1のテスト信号を用いて実施した。PAAMのEIRPに対するEVMとACLRのバスタブ曲線を図7に示す¹³⁾。従来の開発品Type-B PAAMと比べて、Type-C PAAMのEVMは、帯域幅100 MHzの場合ではEIRP 48 dBmの条件で4.1%から2.3%まで、8CC×100 MHzの場合では7.9%から3.8%まで大幅に改善できることを確認した。いずれも3GPPの規格値4.5%を満たしている。また、ACLRも同様に、帯域幅100 MHzの場合では-30.2 dBcから-33.5 dBcまで、帯域幅8CC×100 MHzの場合では-20.3 dBcから-29.5 dBcまで改善し、3GPP規格の-25.7 dBcに対して十分なマージンを有する。

3. 2 256素子タイリングType-C PAAMの結果

3. 2. 1 256素子PAAMの出力確認

図8にPAAMタイリングのコンセプトを示す。図8 (a)のように、4台のPAAMを横一列に並べて256素子の評価ボードを作成することができる。図8 (b)¹⁴⁾はアンテナ結合のイメージを示しており、PAAMのタイリング数を増やすことで、ビーム幅は小さく、ビーム強度は大きくなる。図9 (a)はアクティブな素子数とEIRPの関係を示しており、8×8素子のEIRPは49.1 dBmであったのに対し、8×16素子のEIRPは55.1 dBm、16×16素子のEIRPは60.2 dBmまで増加する。64素子から256素子へ増加することで得られるビームの結合利得は、理論上、 $20 \times \log_{10} (256/64) = 12$ dBである。

実験で得られた結合利得は11.1 dBであり、これは理論値と大きく矛盾せず、十分にビーム結合できていることを示す。

また、図9 (b)はアクティブな素子数とビーム半値幅(HPBW)との関係を示す、素子数の増加とともにビーム幅が小さくなり、半値幅(HPBW)は64素子の 12.1° に対して256素子は 3.0° となる。

3. 2. 2 256素子PAAMのビームパターン

256素子のビームパターンを図10に示す。すべてのビームパターンは、キャリブレーションなしで測定されたものである。H pol., V pol.ともに、良好な形状を確認している。 $\theta = \pm 60^{\circ}$ の範囲にて、サイドローブレベルは、メインローブの強度比にて11 dBc以上を示す。

また、 $\pm 60^{\circ}$ の各方向におけるメインローブの最大EIRPの変化は、4 dB以下である。

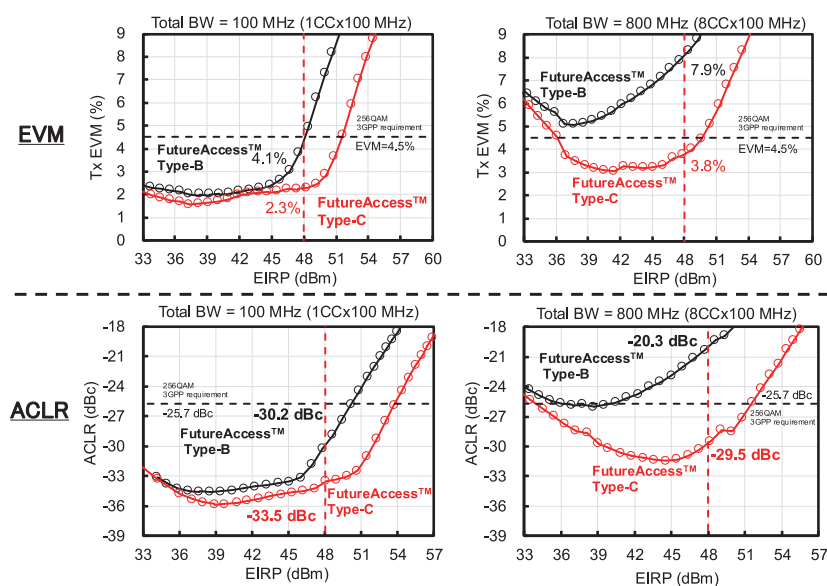


図7 64素子PAAMのEVM&ACLR

Fig. 7. EVM&ACLR results with 64 elements PAAM.

FutureAccess™ Type-C
1x4 tiling 4PAAM

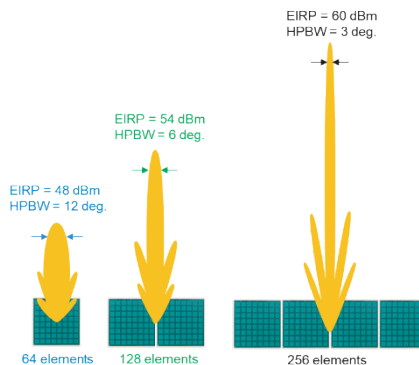
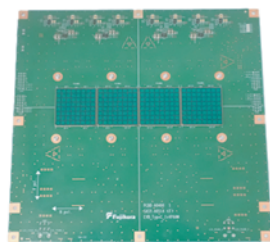


図8 PAAMタイリングのコンセプト

Fig. 8. Concept of PAAM tiling.

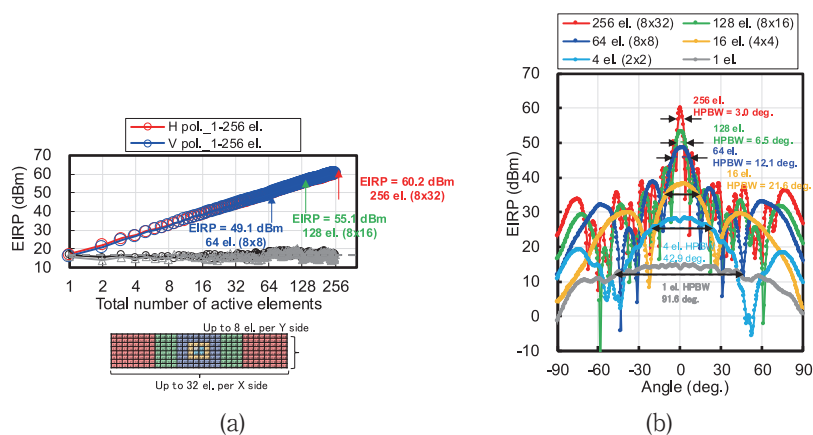


図9 アクティブな素子数と出力パワーとの関係

Fig. 9. Relationship between active elements and output power.

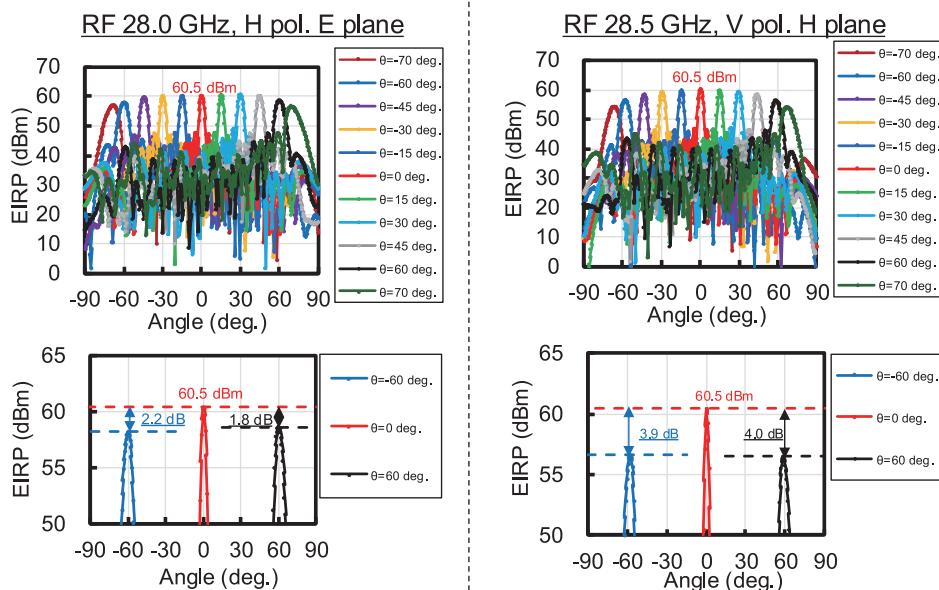


図10 256素子のビームパターン

Fig. 10. Beam pattern of 256 elements.

3. 2. 3 256素子PAAMのEVM&ACLR

図11 (a) に, EIRPに対するEVMのバスタブ曲線を示す. EVM 4.5 %の条件でのEIRPは, 64素子のType-C PAAMと比べて11.2 dB増加したことを確認した.

ここで, タイリングによるEVMのバスタブ曲線の傾向は顕著な変化は見られず, 信号品質の劣化は見られない.

図11 (b) に, EIRPに対するACLRのバスタブ曲線を示す. EIRP 60 dBmの条件でのACLRは-29 dBcであり, 3GPP規格の-25.7 dBcより3 dBほどのマージンがある.

図12に, ビーム放射方向を $\pm 60^\circ$ の範囲に設定した場合のEVMのバスタブ曲線を示す. いずれのビーム放射方向において, 位相のキャリブレーションを実施しなくてもキャリブレーション済みの場合と同等な特性を得られることを確認した.

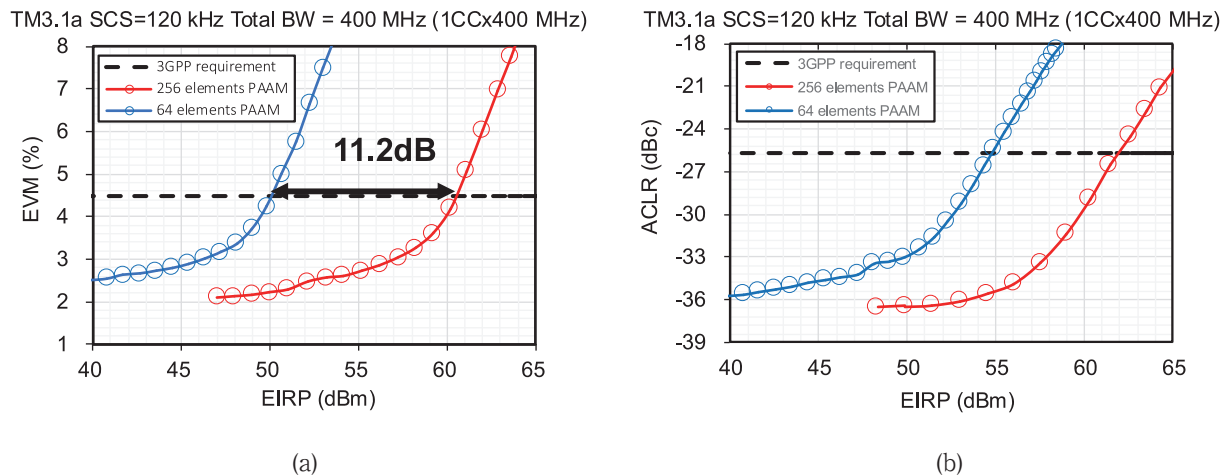


図11 64, 256素子PAAMのEVM&ACLRの比較

Fig. 11. EVM&ACLR comparison of 64 and 256 elements PAAM.

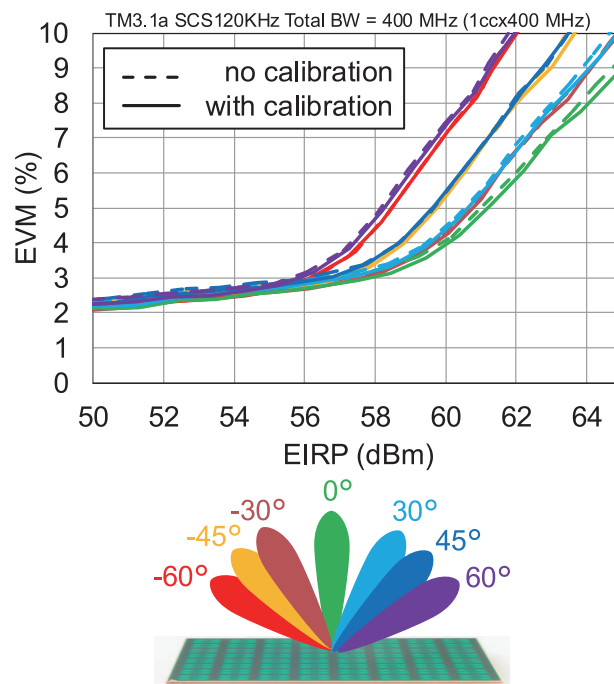


図12 各ビーム放射方向におけるEVM

Fig. 12. EVM for each beam directions.

3. 2. 4 256素子PAAMのひずみの原因推定

本節では、帯域幅800 MHz (8CC×100 MHz) における解析結果を示す。

R&S® FSW-K18¹⁵⁾ を使用して、ひずみの原因を推定した。一般的に、周波数応答、雑音(熱雑音、位相雑音)および非線形性^{16,17)} がEVMに影響を与えるひずみ要因と考えられている。図13の曲線は、イコライズしていない(生データ) EVMの平均二乗誤差 (MSE) に対するこれらの要因の寄与率をサンプルごとに測定した結果を示す。EIRPが60 dBm未満の場合、256素子PAAMの非線形ひずみは非常に低く、EVMに影響を与える主要因は振幅および位相の周波数応答に起因することがわかる。これらの結果は、256素子PAAMが非常に低い位相雑音および非線形性を有していることを示唆している。

3. 2. 5 DDPDによるEVM&ACLR

デジタルプリディストーション (DPD) は、非線形領域で動作するパワーアンプ (PA) の出力信号を線形化するための一般的な手法である¹⁸⁾。線形化は通常、モデルの作成が必須だが、R&S® FSW-K18D Direct DPD (DDPD)¹⁹⁾ を使用することで、モデル作成を必要とせず、複雑な周波数変換を伴うRFフロントエンド (RFFE) をOTAテストで線形化することが可能である。実用的な観点から見ると、DDPDを適用することで、理想的なキャリブレーションおよび線形化条件下でPAAMの性能を検証することができる。

図14は、R&S® SMW-K555拡張帯域幅と組み合わせた4.8 Gsps DDPDの有無による256素子のEVMおよびACLRを示す。DDPDを適用することで、EIRPが60 dBmの場合、PAAMのEVMは2 %未満に、ACLRは-40 dBc未満にそれぞれ大幅に改善された。このようなアプローチにより、PAAMをさらに高い電力効率で動作させることが可能となり、商業展開への道を広げられる。

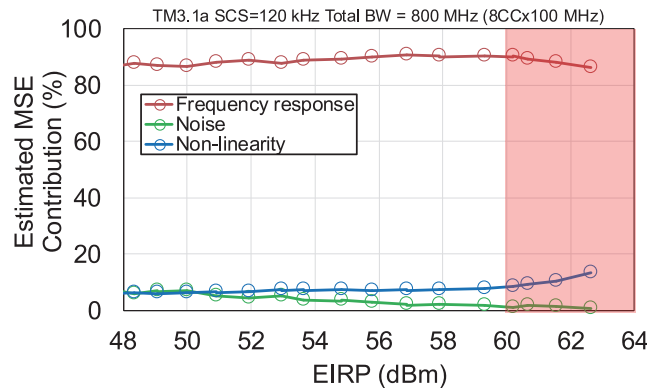


図13 256素子PAAMのひずみの原因推定

Fig. 13. Estimation of source distortion in 256 elements PAAM.

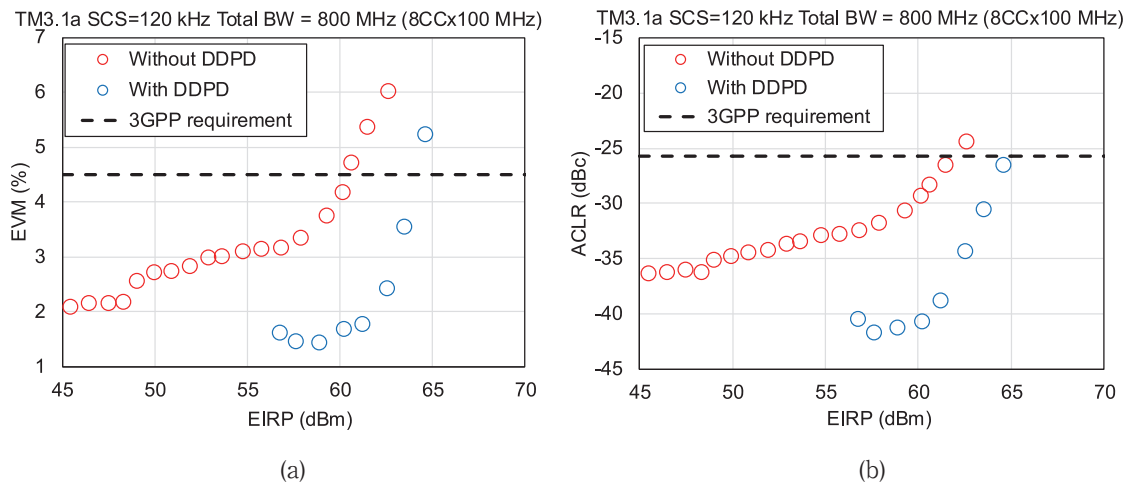


図14 4.8 Gsps DPDDによる256素子PAAMのEVM&ACLR

Fig. 14. EVM&ACLR on 256 elements PAAM w/wo 4.8 Gsps DDPD.

3. 2. 6 高速ビームスイッチング

ビーム方向切り替え時間を観測するため、PAAMから送信された28 GHzのRF信号をIF信号へ周波数変換し、オシロスコープ（R&S® RTP）にて解析した。PAAMより出力されるビームの方向を $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 60^\circ$ とで交互に切り替えて制御し、正面方向のビーム強度をホーンアンテナで測定した。ビーム方向 $\theta = 0^\circ$ のときにはホーンアンテナへの入力パワーが増加するため、オシロスコープにて観察した信号の振幅は最大となる。一方、ビーム方向 $\theta = 60^\circ$ のときにはホーンアンテナへの入力パワーが著しく減少するため、オシロスコープにて観察した信号の振幅は最小となる。図15にオシロスコープの測定結果を示し²⁰⁾、ビームスイッチング時間（Beam switching periodicity）はアナログ回路の遅延および制御時間を含んで160 nsである。要求されるビームスイッチング時間はCPの80 %以下であり、SCS = 240 kHzの場合は234 nsなので、試験で確認したビームスイッチング時間160 nsは上記要求を満たす。また、ビーム方向の変更に要する時間（OTA beam switching time）は5.4 nsであり、既報の8 ns⁴⁾と整合する。

4. 他社フェーズドアレイアンテナモジュールとの性能比較

表1は他社から公開されているシリコンベースのフェーズドアレイアンテナモジュールの報告値²¹⁻²⁶⁾との比較を示す。当社の開発したPAAMの主要な特長は下記の通りである。

- $\theta = \pm 60^\circ$ の範囲でH pol., V pol. の両偏波において、良好なビームフォーミングが可能
- 位相のキャリブレーションなしでも良好な動作
- PAAMのタイリングにより、大きなアンテナアレイを実現可能
- 64素子PAAMの線形範囲出力はEIRP = 48 dBmであり、256素子では、EIRP = 60 dBmである
- PAAMの線形出力範囲のEVM, ACLRは、3GPP規定の4.5%, -25.7 dBc⁸⁾を満たす
- 帯域幅800 MHzの広帯域信号でも、EIRP = 60 dBmにおいて、EVM $\leq$ 4.5%, ACLR $\leq$ -25.7 dBcを示す。
- ビームスイッチング時間は< 220 ns, サポートするビーム方向の数> 20,000



図15 256素子PAAMのビームスイッチング時間

Fig. 15. Beam switching time with 256 elements PAAM.

表1 FutureAccess™ Type-C PAAMの仕様概要と他社の報告値との比較²¹⁻²⁶⁾Table 1. Comparison of overviews of FutureAccess™ Type-C specification and reported values of other companies²¹⁻²⁶⁾

Reported society and groups	This work	ISSCC2017, JSSC2017, IBM /Ericsson ²¹⁾	IMS2018, Qualcomm ²²⁾	SCIS2022, Xphased Technology ²³⁾	TMTT2021, UESTC ²⁴⁾	TMTT2023, HUST ²⁵⁾	IMSD2022, UCSD ²⁶⁾
Chip performance comparison							
IC Technology	130 nm SiGe BiCMOS	130 nm SiGe BiCMOS	28 nm RF CMOS	65 nm RF CMOS	180 nm SiGe BiCMOS	180 nm SiGe BiCMOS	180 nm SiGe BiCMOS
Unit IC number of elements	2×8 TRX	2x16 TRX	24 TRX	2x2 TRX	2x2 TRX	8 x 4 TRX	2 x 8 TRX
Unit tile module array size	64, Dual Pol.	64, Dual Pol.	—	128, Dual Pol.	64, Single Pol.	32, Single Pol.	64, Single Pol.
Scaled tiles module array size	256, Dual Pol.	—	256, Dual Pol.	—	—	—	—
RF frequency (GHz)	24.25-29.5	27-28.5	26.5-29.5	24.25-29.5	23.5-29.5	26-28.5	16-50.5
IF frequency (GHz)	4.3-5.5	3	6.5	—	—	—	—
5G NR band support	Yes (n257, n258, n261)	Yes (n261)	Yes (n257, n261)	Yes (n257, n258, n261)	Yes (n257, n258, n261)	Yes (n257)	Yes (n257, n258, n259, n260, n261, n262)
Tx OP1dB (dBm)	18		—	16.8	15-16	10	13.5-14.7
Rx NF (dB)	4		—	5.5	5.5	5.5	6.2
Reported society and groups	This work	ISSCC2017, JSSC2017, IBM /Ericsson ²¹⁾	IMS2018, Qualcomm ²²⁾	SCIS2022, Xphased Technology ²³⁾	TMTT2021, UESTC ²⁴⁾	TMTT2023, HUST ²⁵⁾	IMSD2022, UCSD ²⁶⁾

Phased array antenna performance comparison							
TX EIRP @ P1dB(dBm)	56 (64Tx) 68 (256Tx)	54 at P _{sat} (64Tx)	35 at P _{sat} (8Tx) 64 at P _{sat} (256Tx)	47.7 (128Tx)	54.8 (64Tx)	39 (32Tx)	64 (64Tx)
TX and RX beam scan range (deg.)	AZ ±60 EL ±60	AZ ±50 EL ±50	AZ ±45 EL ±45	AZ ±60 EL ±60	AZ ±60	AZ ±55	AZ ±60
Tx EVM (%)	≤4.5% at EIRP 60 dBm (256Tx), 400 MHz bandwidth	—	-25 dB (5.6%) at EIRP 56 dBm, 400 MHz bandwidth	5.6% at EIRP 52.5 dBm, 400 MHz bandwidth	-26 dB (5.0%) at EIRP 47 dBm, 200MHz bandwidth	3% at 36 dBm EIRP with 64 QAM, 200 MHz bandwidth	2.90% at 36 dBm EIRP with 64 QAM, 400 MHz bandwidth
ACLR (dBc)	≤-30 dBc at EIRP 60(256Tx) dBm, 400MHz bandwidth	—	—	—	—	—	—
Num. of beams supported for fast beam- switching	> 20,000 (beam calc mode)	128	—	—	—	—	—
	2048 (beam table mode)	—	—	—	—	—	—
OTA beam switching time (ns)	<8	4	—	—	—	—	—
Beam- switching periodicity (ns)	< 220 (including control time)	—	—	—	—	—	—

5. むすび

5G通信向けの高出力PAAMを開発した。Over-The-Air試験を通じて、キャリブレーションなしでも安定した放射パターンを得られることを確認した。また、64素子のPAAMをタイリングして配置することで、出力をさらに向上させるとともに、優れた変調特性を実現できることも確認した。

ミリ波無線基地局にてMIMOが求められるため、マルチビームの送受信特性を評価し、実環境に近い条件下で性能を検証する予定である。また、地上局だけでなく、非地上系ネットワーク（NTN：Non-Terrestrial Network）への適応性にも注目し、温度特性や円偏波特性などの評価を行う計画である。

参考文献

- 1) Fujikura Ltd., “28 GHz Fujikura’ s state-of-the-art 5G Phased Array Antenna Module: FutureAccess™” , <https://mmwavetech.fujikura.jp/5g/> (Viewed on 19th Mar., 2025)
- 2) S. Pramono et al., “Design and Challenges on mmWave Antennas: A Comprehensive Review” , E3S Web of Conferences 465, 02067, 2023.
- 3) A. K. Pandey, “Phased Array Antenna with Beamforming Network” , Proceedings of the 50th European Microwave Conference.
- 4) 株式会社フジクラ：「5G ミリ波 フェーズドアレイアンテナ」，ホワイトペーパー，<https://mmwavetech.fujikura.jp/ja/>（2025年2月1日閲覧）。

- 5) B. Sadhu et al., "A 24-to-30GHz 256-Element Dual-Polarized 5G Phased Array with Fast Beam-Switching Support for >30,000 Beams", ISSCC, February. 2022.
- 6) 新世代モバイル通信システム委員会:「新世代モバイル通信システムに関する技術的条件」のうち「第5世代移動通信システム(5G)の技術的条件」, 資料9-1, 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告概要(案)。
- 7) H.T. Friis "A Note on a Simple Transmission Formula". Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp 254-256, May, 1946.
- 8) 3GPP TS 38.141-2 V17.15.0, Base Station (BS) Conformance Testing, Part 2: Radiated Conformance Testing, Sep, 2024.
- 9) S. Ahmadi, 5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards. New York, NY, USA: Academic, 2019.
- 10) J.A. Fabien, "Channel Model Implementation and Application for New Radio (NR) 3GPP REL-15", Institute for Telecommunication Sciences, 2018.
- 11) R. Hamarneh, "Analytical Calibration Scheme Suitable for Modern Mobile Communication Systems", EECS, p34, Stockholm Sweden, 2020.
- 12) M. Sierra-Pereza et al., "Integration, Measurements and Calibration of A UMTS Smart Antenna". 2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE Cat. No.04TH8754), Sep, 2004.
- 13) Y. Tojo "Over-The-Air test of phased array antenna module of 28 GHz band", Rohde & Schwarz Technology Symposium 2024 - Japan, Session 4 of Automotive and wireless related technologies, https://rohde-schwarz-japan.com/download/techsympo2024/AUT-WIC04_rs_techsympo2024-seminar-text.pdf
- 14) Y. Tojo, "Beam direction accuracy and 2D radiation antenna pattern measurements of 256 elements phased array", THMA5, IMS2024, Washington. D.C., U.S. (2024)。
- 15) F. Ramian, "Amplifier characterization using non-CW stimulus," 2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), pp. 198-200, June, 2017, Padua, Italy.
- 16) F. Ramian, D. Tipton, "Detailed EVM, statically independent contribution to EVM," Short Tutorial Video in the R&S Amplifier Master Class Series, Munich, Germany, June 2020, https://www.youtube.com/watch?v=v2CatcQAm7c&list=PLKxVoO5jUTlvZVUh2Gn_6BYZtAsQtUHAC&index=5
- 17) F. Dourado, L. Xu, "Over-the-air mmWave phased array distortion analysis and linearization testing", IWWE3, IMS2024, Washington. D.C., U.S. (2024)。
- 18) F. Ramian, "Iterative Direct DPD," White Paper, Munich, Germany, Sept. 2017, <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1EF99>
https://www.rohde-schwarz.com/jp/applications/dpd-white-paper_230854-478144.html
- 19) S. Obernberger, S. Kehl-Waas, "Digital pre-distortion for improved EVM performance," Application Note, Munich, Germany, Aug. 2023, <https://www.rohde-schwarz.com/appnote/1GP139>
https://www.rohde-schwarz.com/jp/applications/digital-predistortion-for-improved-evm-performance-application-note_56280-1401410.html
- 20) L. Xu et al., "How to measure beam switching speed why is it important and what is the necessary performance", THMA5, IMS2024, Washington. D.C., U.S. (2024)。
- 21) B. Sadhu et al., "A 28GHz 32-Element Phased-Array Transceiver IC with Concurrent Dual Polarized Beams and 1.4 Degree Beam-Steering Resolution for 5G Communication", ISSCC, pp. 128-129, Feb. 2017.
- 22) J. Pang et al., "A 28-GHz CMOS Phased-Array Beamformer Utilizing Neutralized Bi-Directional Technique Supporting Dual-Polarized MIMO for 5G NR", IEEE JSSC, vol. 55, no. 9, Sep, 2020.
- 23) H. Liu et al., "A 24.25-27.5 GHz 128-element Dual-polarized 5G integrated Phased Array with 5.6%-EVM 400-MHz 64-QAM and 50-dBm EIRP", Sci China Inf Sci, vol. 65, 214401:1-3, Nov, 2022.
- 24) Y. Yin et al., "Wideband 23.5-29.5-GHz Phased Arrays for Multistandard 5G Applications and Carrier Aggregation", IEEE TMTT, vol. 69, no. 1, Jan, 2021.
- 25) S. Wang et al., "Dual-Band 28- and 39-GHz Phased Arrays for Multistandard 5G Applications", TMTT, vol. 71, no. 1, Jan, 2023.
- 26) A. Alhamed et al., "16-52 GHz 5G Transmit and Receive 64-Element Phased-Arrays With 50-51.7 dBm Peak EIRP and Multi-Gb/s 64-QAM Operation", IEEE/MTT-S, Jun, 2022.