

28GHz帯フェーズドアレイアンテナモジュールのOver-The-Air試験

電子応用技術R&Dセンター 藤乗 優治郎¹・長谷川 雄大²・高橋 智和³

Over-The-Air Test of Phased Array Antenna Module for 28GHz Band

Y. Tojo, Y. Hasegawa, and T. Takahashi

近年の第5世代移動通信システム (5G) 対応部品のデバイス需要から、当社はミリ波インフラ用途向けに、業界最高水準の性能を誇る最先端の28GHz帯フェーズドアレイアンテナモジュール (Phased Array Antenna Module : PAAM) 「FutureAccess™」を開発した。PAAMはアレイアンテナ、ビームフォーマIC (BFIC)、周波数変換IC (FCIC) およびバンドパスフィルタ (BPF) を集積したモジュールである。PAAMの各機能を総合的に動作させた際のモジュール送信/受信特性を把握するため、Over-The-Air (OTA) 試験によりPAAMの出力パワー特性、ビームフォーミングによる送信/受信パターンを確認した。

In response to the recent demands for devices for the 5th generation mobile communication systems (5G) available components, we have developed the state-of-the-art 28-GHz band Phased Array Antenna Module (PAAM) "FutureAccess™", which has the highest performance for millimeter-wave infrastructure applications. The PAAM is a module that integrates an antenna array, beamformer IC (BFIC), frequency conversion IC (FCIC) and band-pass filter (BPF). In order to confirm the module transmitting / receiving performances for active devices, we have measured the output power performances, and the transmitting / receiving patterns in beam forming with the Over-The-Air (OTA) test.

1. ま え が き

5Gとは、「第5世代」を意味する“The fifth generation”に由来する。携帯電話はほぼ10年ごとに技術的な世代替わりが行われており、各世代で積み上げられた技術進歩やシステム発展は次世代に継承されながら一層の発展をする構図である。第3世代移動通信システム (3G) の提供がはじまった2000年代初頭から移動通信システムの通信量も右肩上がりであり、2019年時点での総月間トラフィック (通信量) は1000テラバイト、1契約あたりの月間の通信量 (ダウンロード方向) は4ギガバイトとなる。このような通信量の需要増加にこたえるには、飛躍的に高い通信容量を提供可能な5Gを導入・展開していくことがその解決策の一つである¹⁾。

5Gでは主にSub6GHz帯 (6GHz未満の周波数帯) およびミリ波帯 (おおむね30GHz以上の周波数帯) の周波数を用いる。図1に固定無線アクセス (Fixed Wireless Access : FWA)、移動無線アクセス (Mobile Wireless Access : MWA)、基地局への無線周波数 (Radio frequency : RF)

モジュール適用イメージを示す。FWAのCPE (Customer Premises Equipment: 顧客宅内機器) や携帯端末等と基地局の間の大容量伝送の実現には、ミリ波帯による通信は必要不可欠となる²⁾。

これらの要求にこたえるため、当社は2019年に米国 International Business Machines Corporation 社 (以下IBM) より5G関連のミリ波Radio Frequency Integrated Circuit (以下, RFIC) 技術のライセンスを受けることで合意し、これに基づいて次世代のミリ波RFICを開発した。そして、2020年に3GPPバンドn257 (28GHz帯)、n258 (26GHz帯)、およびn261 (27GHz帯) で動作する5Gミリ波通信用のフェーズドアレイアンテナモジュール(Phased Array Antenna Module,以下PAAM) FutureAccess™を開発した。本稿では、開発した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2 (a) - (c) に、当社が開発したPAAMのアンテナ面外観、PAAMのIC実装面外観、PAAMの断面概念図^{3,4)}を示す。PAAMは、64素子のアレイアンテナを有し、送信/受信信号の増幅、位相制御をになう8つのビームフォー

1 5G無線デバイス開発部 博士(工学)
2 5G無線デバイス開発部
3 5G無線デバイス開発部 グループ長

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	Beamformer IC (BFIC)	特定方向へのビームの送信/受信を行うIC.
FCIC	Frequency Conversion 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/分波するコンバイナ/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	空間をかいて電波の送信/受信を行う測定.
3G	The third generation mobile communication systems	第3世代移動通信システム.
Sub6GHz	Sub6GHz	5Gで利用される周波数帯のうち0.45-6 GHzの周波数帯.
ミリ波	Millimeter wave	波長が1-10 mm, 30-300 GHzの周波数の電波であり, 主に5Gで利用される周波数帯の24.25-52.6 GHzの周波数帯.
FWA	Fixed Wireless Access	固定無線アクセス.
MWA	Mobile Wireless Access	移動無線アクセス.
CPE	Customer Premises Equipment	顧客宅内機器.
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. 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で定義される.
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.
FSPL	Free Space Path Loss	自由空間伝搬損失. 電波が自由空間を通る際に受ける減衰量.
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.

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
SA	Spectrum Analyzer	スペクトラム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、縦軸は強度を表示する測定器
VNA	Vector Network Analyzer	ベクトルネットワークアナライザと呼ばれ、入力信号として正弦波が用いられ、振幅と位相の比較測定や回路のインピーダンスと減衰量の測定を行う測定器
Sパラメータ	Scattering parameters	高周波の電子回路や電子部品の特性を表すパラメータであり、入射波に対する反射波、伝送波の変化を振幅と位相で表現し、VNAで測定する
OP_{sat}	Output saturated power	飽和出力。アンプの出力が飽和した際の出力電力で定義される
OP_{1dB}	Output 1dB compression power	1 dB利得圧縮出力。アンプの入力/出力の線形関係より1 dB低下した時の出力電力で定義される
実時間遅延回路	The true-time-delay circuit	遅延線路を用いた、線路長さに応じて位相量の調整が可能な回路
PAE	Power Added Efficiency	電力付加効率。パワーアンプのパワー変換効率の指標
ISSCC	International Solid-State Circuits Conference	半導体に関する世界最大の国際会議である、国際固体素子回路会議



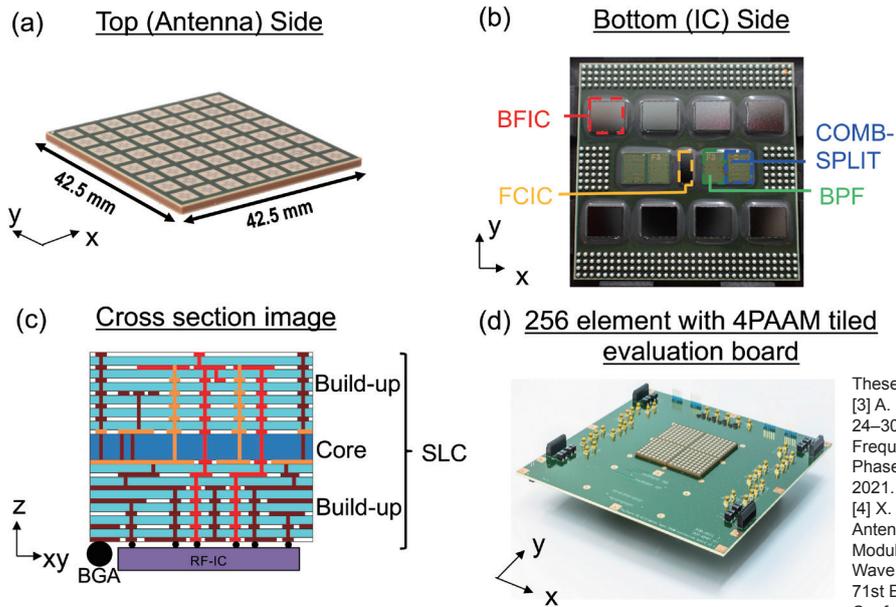
図1 FWA, MWA基地局のRFモジュール適用イメージ

Fig. 1. Application image of RF module for FWA and MWA base station.

マIC (Beamformer IC (BFIC), 以下BFIC), RF信号を合成/分波するコンバイナ/スプリッタ (Combiner / Splitter, 以下COMB-SPLIT), 所望帯域以外の不要信号を抑制するバンドパスフィルタ (Band-Pass Filter, 以下BPF), および中間周波数 (Intermediate Frequency, 以下IF) 信号とRF信号とを変換する周波数変換IC (Frequency Conversion IC, 以下FCIC) で構成される。そしてBFICごとに送信 (以下Tx) モードと受信 (以下Rx) モードの切り替えが可能であり、時分割複信動作をサポートする両偏波対応のフェーズドアレイトランスミッタ/レシーバとして機能する。

PAAMは水平偏波 (H-polarization, 以下H pol.) と垂直偏波 (V-polarization, 以下V pol.) での両偏波の送受信が

可能である。この機能により、偏波多重通信 (2つの異なる通信を同時に行うこと) ができる。そして、アレイアンテナが水平方向と垂直方向の2次元に配列されていることで、PAAMは水平方向および垂直方向に指向性をもつビームを送信、受信することが可能であり、水平と垂直の両方向で $\pm 60 \text{ deg.}$ の範囲でビームフォーミングが可能である。また、図2 (d) に示すようにPAAMを複数並べること (タイリング) により、アンテナ素子数を拡張することが可能である⁵⁾。本稿では、64素子のアレイアンテナをもつPAAM (以下、64素子PAAM) と4つのPAAMをタイリングした256素子のアレイアンテナをもつPAAM (以下、256素子PAAM) の評価結果を示す。



These figures are reproduced from ref.[3,4,5].
 [3] A. Paidimarri et al., "A High-Linearity, 24–30 GHz RF, Beamforming and Frequency-Conversion IC for Scalable 5G Phased Arrays", IEEE RFIC, pp. 103-106 2021.
 [4] X. Gu et al., "Novel Phased Array Antenna-in-Package Development and Active Module Demonstration for 5G Millimeter-Wave Wireless Communication," 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference, pp. 1144-1149, 2021.
 [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", IEEE ISSCC, pp. 436-438, February, 2022.

図2 (a) PAAMのアンテナ面外観, (b) PAAMのIC面外観,
 (c) PAAMの断面概念図, (d) 256素子PAAMの評価ボード外観³⁻⁵⁾

Fig. 2. (a) Overview of PAAM from antenna side, (b) Overview of PAAM from IC side,
 (c) Cross section image of PAAM, (d) 256 element with 4PAAM tiled and evaluation board³⁻⁵⁾.

2.1 PAAMの適用周波数帯域

28GHz帯における複数の周波数帯域をカバーするため、PAAMは広帯域のFCICとBFICが実装されている。しかしながら、広帯域であるために、周波数が離れたスプリアスやイメージ信号まで送受信される問題が生じる。そこで、同一のBFIC、FCIC、およびCOMB-SPLITを使用しながら、所望の周波数帯域に適したBPFを使用する。表1にPAAMの適用周波数帯域とBPFのもつ周波数帯域を示す。当社は、使用する周波数帯域に応じたF1 (BPF type F1), F2 (BPF type F2), F3 (BPF type F3), F4 (BPF type F4) の4種のBPFをそれぞれ実装したPAAMを個別に作製した。固有の周波数帯域に応じたPAAMを選択することで、24-30GHzの範囲のすべての3 GPPバンドn257 (28GHz帯), n258 (26GHz帯), およびn261 (27GHz帯) をカバーする。

表1 PAAMの適用周波数帯域とBPFの帯域

Table 1. Frequency band and covered frequency range of PAAM.

Frequency band	BPF type	Frequency range (GHz)	
		Min.	Max.
n258	F1	24.25	26.25
	F2	25.50	27.50
n257	F3	26.50	28.50
	F4	27.50	29.50

2.2 OTA試験系

OTA試験系のブロック図を図3に、外観を図4に示す⁴⁾。PAAMのOTA試験は周囲を電波吸収体で覆った環境下に評価ボードを設置して行う。電波暗室内の反射や干渉の影響を防止するためには、電波暗室内のすべての壁を電波吸収体で覆う必要がある⁶⁾。

2.2.1 実効等方放射電力の定義、測定方法

実効等方放射電力 (Effective Isotropically Radiated Power, 以下EIRP) は、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である。等方性アンテナとは、すべての方向に均等に電力を放射するアンテナである。一般にEIRPと表記した場合、アンテナ利得が最も高い方向にアンテナから放射される最大電力を表す場合もある。EIRPは、RFデバイスの送信特性を表すための重要な指標であり、RFデバイスの放射電力の上限を設定するための法令や規制上の指標としても使用されている⁶⁾。

EIRPは、本来、信号発生器の出力電力を P_T 、アンテナ利得を G_A 、ケーブル損失を L_C として、式(1)により算出される。

$$EIRP \text{ (dBm)} = P_T \text{ (dBm)} + G_A \text{ (dBi)} - L_C \text{ (dB)} \quad (1)$$

しかしながら、PAAMにおいては信号発生器とアンテナ

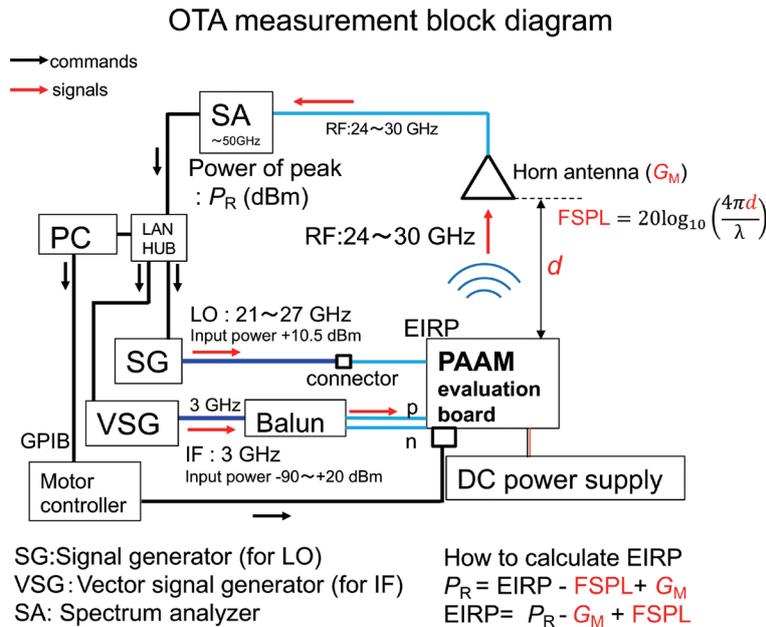


図3 TxモードにおけるOTA試験ブロック図とEIRPの計算方法

Fig. 3. OTA measurement block diagram for Tx mode and how to calculate EIRP.

ナを分割してそれぞれの値を測定することが困難なため、ホーンアンテナを用いて空間伝搬後の電力 P_R を測定し、EIRPを逆算する方法がとられる。すなわち、ホーンアンテナの利得を G_M 、自由空間伝搬損失 (Free Space Path Loss) をFSPL (dB) とすると、

$$EIRP \text{ (dBm)} = P_R \text{ (dBm)} - G_M \text{ (dBi)} + FSPL \text{ (dB)} \quad (2)$$

にて算出できる。なお、Friis伝達公式⁷⁾によれば、距離を d 、波長を λ として、

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \log_{10} (4\pi d / \lambda) \quad (3)$$

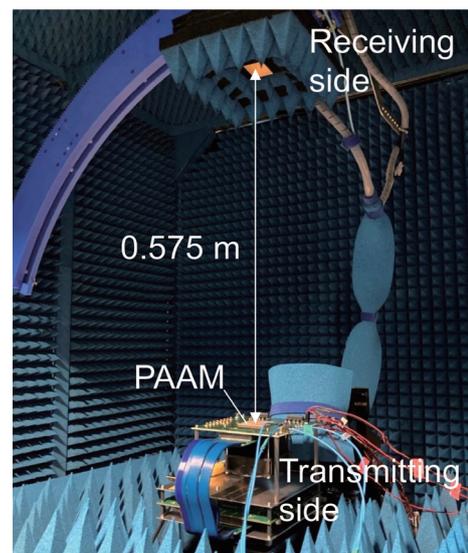
と導出される。

2.2.2 連続波による基礎特性評価

図3に示すOTA試験系を用い、連続波 (Continuous Wave, CW) によりPAAMの基礎特性を評価した。信号発生器 (Signal Generator, SG) よりLO信号を、ベクトル信号発生器 (Vector Signal Generator, VSG) よりIF信号を、PAAMの評価ボードにそれぞれ入力する。PAAM内でRF信号にアップコンバートされ、RF信号はアンテナをかいして空間に伝搬する。空間を伝搬したRF信号は、ホーンアンテナで受信され、スペクトラムアナライザ (Spectrum Analyzer, 以下SA) を用いてRF信号の強度、品質を評価する。

OTA試験は距離 d だけ離れたPAAMとホーンアンテナを対向させて行うが、高精度の測定を行うためには d を遠方界以上にする必要があるため、64素子PAAMの評価では図4に示すように $d = 0.575 \text{ m}$ とし、256素子PAAMの評価では $d = 3.0 \text{ m}$ とした。式 (2)、式 (3) にしたがって、EIRPをそれぞれ算出している。

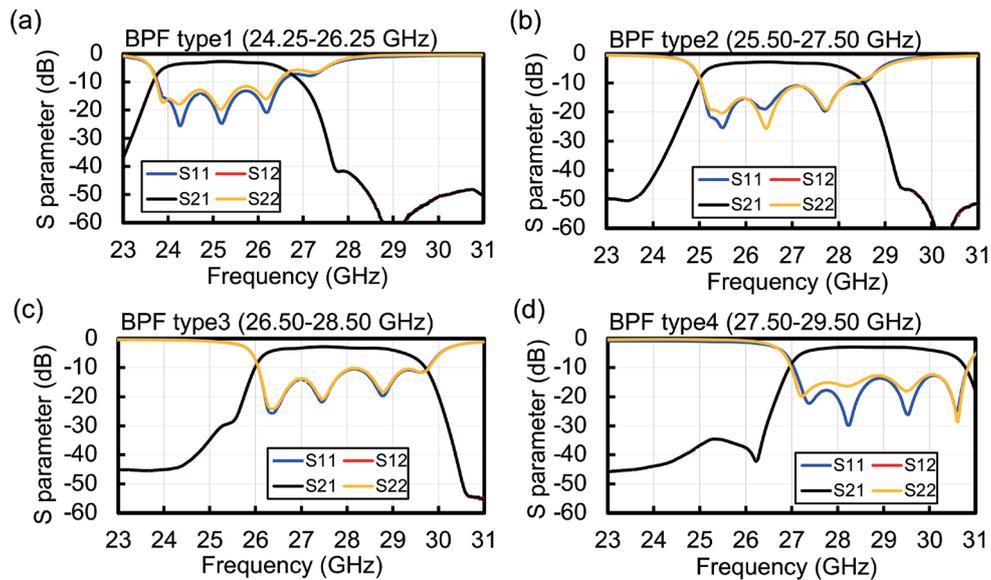
Overview of OTA measurement system



This figure is reproduced from ref.[4].
 [4] X. Gu et al., "Novel Phased Array Antenna-in-Package Development and Active Module Demonstration for 5G Millimeter-Wave Wireless Communication," IEEE ECTC, pp. 1144-1149, 2021.

図4 OTA試験の測定系外観⁴⁾

Fig. 4. OTA test measurement system setup⁴⁾.



These figures are reproduced from ref.[8].

[8] X. Gu et al., "Antenna-in-Package Integration for a Wideband Scalable 5G Millimeter-Wave Phased-Array Module", IEEE MWCL, Vol. 31, no. 6, pp. 682-684, 2021.

図5 BPFのSパラメータ測定結果 (a) 24.25-26.25 GHz, (b) 25.5-27.50 GHz, (c) 26.5-28.50 GHz, (d) 27.50-29.50 GHz⁸⁾

Fig. 5. BPFs S-parameter measurement results (a) 24.25-26.25 GHz, (b)25.50-27.50 GHz, (c) 26.50-28.50 GHz, (d) 27.50-29.50 GHz⁸⁾.

3. 試験結果

3.1 BPFの周波数依存性

図5にベクトルネットワークアナライザ (Vector Network Analyzer, VNA) により実測したBPFのSパラメータ (反射特性: S11, S22, 通過特性: S21, S12) の測定結果⁸⁾を示す。図5より各BPFの中心周波数は、それぞれ25.25 GHz, 26.50 GHz, 27.50 GHz, 28.50 GHzであり、それぞれ2 GHzの帯域幅をもつ。通過特性において、各BPFの帯域内の24.25-29.50 GHzにおける信号強度は、最大値からの変化が3 dB以内であり、各BPFの帯域外における信号強度は帯域内に比べ30 dB以上減衰する。これらの結果から、各BPFの周波数特性は3GPPバンドの周波数帯域を十分にカバーする。

3.2 PAAMの出力パワー特性

64素子PAAMのアンテナ正面方向の飽和出力 (oP_{sat}) は、EIRPに換算してH pol./V pol. にて55.3 /57.6 dBmである。また、256素子PAAMの oP_{sat} は66.4/68.6 dBm⁵⁾である。ここで256素子のアレイアンテナにおいて、すべての素子がビーム結合した際に得られる結合利得⁹⁾は、 $20 \log_{10}(256) = 48.2$ dB, 64素子のアレイアンテナでは、 $20 \log_{10}(64) = 36.1$ dBであり、両者の差は約12 dBである。ここで、256素子PAAMの $oP_{sat} = 66.4 / 68.6$ dBmは、64素子PAAMの $oP_{sat} = 55.3 / 57.6$ dBmに対し約11-12 dB高い。すなわち、タイリングしたPAAMにおいても十分にビーム結合がで

きており、タイリングによりEIRPを増加させることが可能である。

3.3 ビームパターン

3.3.1 64素子PAAMのビームパターン

図6に64素子PAAMの、Txモードにおける送信ビームパターン、Rxモードにおける受信ビームパターンを示す⁵⁾。Txモードでは、LO信号25 GHz, IF信号3 GHzをPAAMに入力し、PAAMよりRF信号28 GHzが放射される。また、RxモードではSGに接続されたホーンアンテナよりPAAMへ28 GHzの電波送信を行い、PAAMにLO信号25 GHzを入力し、PAAMからのIF信号3 GHzがSAで受信される。 θ は送信および受信ビームパターンの指向角度を示し、 $\theta = \pm 60$ deg.の範囲で指向性のあるビームの送信/受信を確認した。この測定において、個別に位相のキャリブレーションは行っていない。すなわち、この結果は位相のキャリブレーションを実施することなく $\theta = \pm 60$ deg.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の送信/受信が可能であることを示している。ここでベクトル型の位相器では、位相が90 deg.異なる信号のそれぞれの振幅の調整が必要であり¹⁰⁾、それらの誤差によって出力の信号振幅が変動する問題等があった。一方、当社の開発したRFIC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。さらに波長に依存せず指向方向が決定でき、広帯域のビームフォーミングでは有利である¹¹⁾。

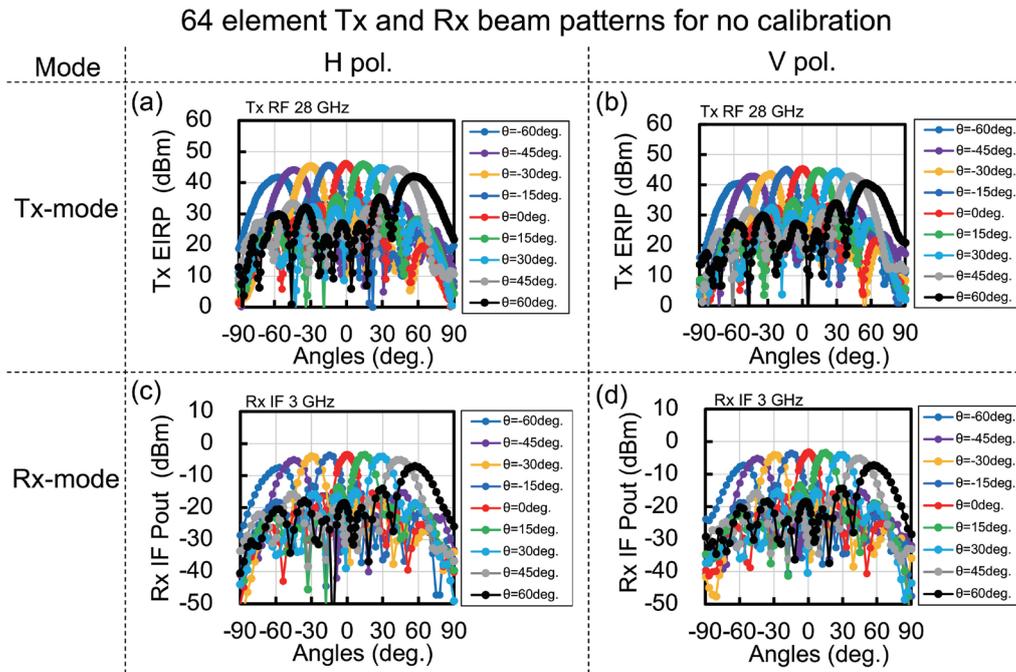


図6 Txモード, Rxモードにおける64素子PAAMのビームパターン ((a) Txモード H pol., (b) Txモード V pol., (c) Rxモード H pol., (d) Rxモード V pol.)⁵⁾
 Fig. 6. Measured beam patterns of 64 element PAAM in Tx mode and Rx mode ((a) Tx mode H pol., (b) Tx mode V pol., (c) Rx mode H pol., (d) Rx mode V pol.)⁵⁾.

These figures are reproduced from ref. [5].
 [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", IEEE ISSCC, pp. 436-438, February, 2022.

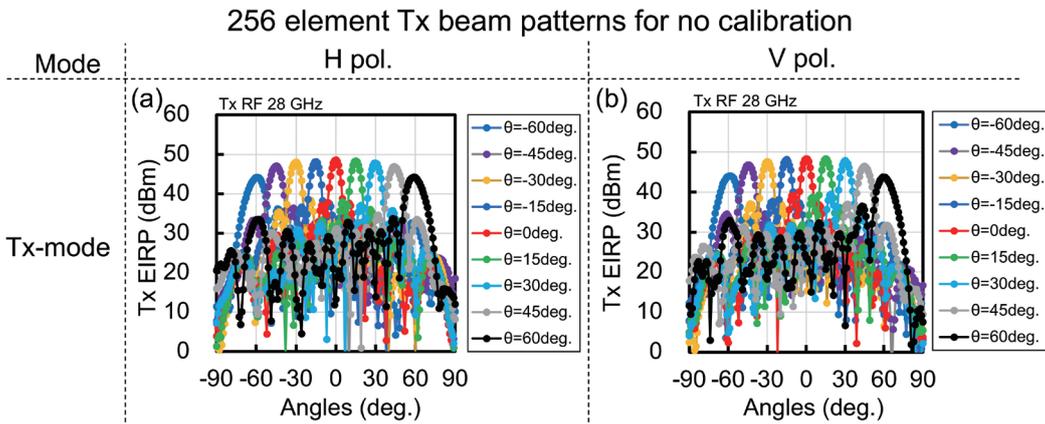


図7 Txモードにおける256素子PAAMのビームパターン ((a) H pol. Txモード, (b) V pol. Txモード)⁵⁾
 Fig. 7. Measured beam patterns of 256 element PAAM in Tx mode ((a) H pol. Tx mode, (b) V pol. Tx mode)⁵⁾.

These figures are reproduced from ref.[5].
 [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", IEEE ISSCC, pp. 436-438, February, 2022.

表2 IBM/Fujikura PAAMの仕様概要³⁾と他社の報告値との比較¹²⁾⁻¹⁷⁾ (AZ : 方位方向, EL : 仰角方向)

Table 2. Comparison of overviews of IBM / Fujikura PAAM specification ³⁾ and reported values of other companies ¹²⁾⁻¹⁷⁾ (AZ : Azimuth direction, EL : Elevation direction).

Reported society and groups	This work ISSCC2022 IBM /Fujikura ³⁾	ISSCC2017 JSSC2017, IBM /Ericsson ¹²⁾⁻¹³⁾	ISSCC2018 DMS2018, Qualcomm ¹⁴⁾	JSSC2021, Tokyo IT/NEC ¹⁵⁾	TMTT2021, UCSD ¹⁶⁾	ISSCC2020 Samsung ¹⁷⁾
IC Technology	130 nm SiGe BiCMOS	130 nm SiGe BiCMOS	28 nm RF CMOS	65 nm CMOS	180 nm SiGe BiCMOS	28 nm CMOS
Unit IC number of elements	2x8 TRx	2x16 TRx	24 TRx	2x4 TRx	4 TRx	16 TRx
Unit tile module array size	64, Dual Pol.	64, Dual Pol.	—	64, Dual Pol.	64, Single Pol.	—
Scaled tiles module array size	256, Dual Pol.	—	256, Dual Pol. (†)	—	—	—
RF frequency (GHz)	24-30	27-28.5	26.5-29.5	26.5-29.5	23.5-29.5	37-40
IF frequency (GHz)	2-5	3	6.5	—	—	11 ± 0.2
5G NR band support	Yes (n257, n258, n261)	Yes (n261)	Yes (n257, n261)	Yes (n257, n261)	Yes (n257, n258, n261)	Yes (n260)
BF-IC die area (mm ²)	37,	166,	27.7,	16,	—	30,
die area / TRx element (mm ²)	1.2	5.2	1.2	2	—	1.9
Module Tx EIRP at boresight (dBm)	56 at P _{sat} (64Tx) 68.5 at P _{sat} (256Tx)	54 at P _{sat} (64Tx)	35 at P _{sat} (8Tx) 64 at P _{sat} (256Tx) (†)	52.2 at P _{sat} (64Tx)	54.8 at P _{sat} (64Tx)	OTA measurements not reported
Module Rx oP _{sat} ¹⁸⁾ (dBm)	11	-	-	-	-	
Tx and Rx beam scan range (deg.)	AZ ±60 EL ±60	AZ ±50 EL ±50	AZ ±45 EL ±45	AZ ±40 EL ±30	AZ ±60 EL ±40	
Module Tx PAE (%)	20.5 at P _{sat} >30,000 (beamcalc mode)	13.8 at P _{sat}	-	-	8.6 at P _{sat}	
Num. of beams supported for fast beam-switching	256 (beam table mode)	128 (†)	-	-	-	
Fast beam-switching speed (ns)	8	4	-	-	-	
Beam-switching latency (ns)	200 (beamcalc mode) 120 (beam table mode)	-	-	-	-	

†From IMS18 paper by authors

3.3.2 256素子PAAMのビームパターン

図7に256素子PAAMの、Txモードにおける送信ビームパターンを示す⁵⁾。この測定において、64素子PAAMと同様に個別に位相のキャリブレーションは行っていない。すなわち、4つのPAAMをタイリングした際でも、キャリブレーションを実施することなく $\theta = \pm 60$ deg. 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の送信が可能である。

4. 他社フェーズドアンテナモジュールとの性能比較

表2に当社の開発したPAAMの仕様値の概要⁵⁾と、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との報告値¹²⁾⁻¹⁷⁾との比較を示す。当社の開発したPAAMの主要な特長を重要なものから順に下記に示す。

- ・位相のキャリブレーションを実施することなく $\theta = \pm 60$ deg. 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の送信/受信が可能
- ・5Gで使用する周波数帯の帯域幅をすべてカバーし、ほかの報告値に比べ広帯域
- ・PAAMのタイリングによりアンテナ素子数の拡張が可能
- ・高速スイッチングモードにより、サポートするビーム最大数30000以上

- ・飽和領域における256素子PAAMのEIRPが68.5 dBmとほかの報告値に比べ高い送信電力
- ・Siベースのフェーズドアレイで最高の電力付加効率 (Power Added Efficiency, PAE)¹⁹⁾ 20 %

これらのPAAMの性能は、2022年2月に行われた International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) にてIBMと共同報告した⁵⁾。

5. むすび

当社は、5Gミリ波通信用のPAAMを開発した。OTA試験により64素子のアレイアンテナを有するPAAMおよび4つのPAAMをタイリングすることにより256素子のアレイアンテナを有するPAAMの出力パワー特性およびビームフォーミングによる送信/受信パターンを確認した。開発したPAAMは、5Gミリ波通信用アンテナモジュールとして十分適用可能であり、他社に比べても優れた特性を有することを確認した。

今後は、PAAM同士を対向させた相互の送信/受信試験や信頼性試験をとおして実使用環境下での評価を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 飯盛英二ほか：「図解丸わかり 5Gのしくみ」, 翔泳社, pp.18-22, 2020.
- 2) 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/> (2022年1月20日閲覧).
- 3) A. Paidimarri et al., "A High-Linearity, 24–30GHz RF, Beamforming and Frequency-Conversion IC for Scalable 5G Phased Arrays", IEEE RFIC, pp. 103-106 2021.
- 4) X. Gu et al., "Novel Phased Array Antenna-in-Package Development and Active Module Demonstration for 5G Millimeter-Wave Wireless Communication", IEEE ECTC, pp. 1144-1149, 2021.
- 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", IEEE ISSCC, pp. 436-438, February, 2022.
- 6) 株式会社フジクラ：「ミリ波デバイスの Over-The-Air 試験」, ホワイトペーパー, https://mmwavetech.fujikura.jp/ja/assets/pdf/White_Paper_over-the-air-testing-of-mmwave-devices.pdf (2022年1月24日閲覧).
- 7) H.T. Friis "A Note on a Simple Transmission Formula". Proc. IRE, vol. 34, no. 5, pp 254-256, May, 1946.
- 8) X. Gu et al., "Antenna-in-Package Integration for a Wideband Scalable 5G Millimeter-Wave Phased-Array Module", IEEE MWCL, vol. 31, no. 6, pp. 682-684, 2021.
- 9) R. J. Mailloux, "Phased Array Antenna Handbook", 2nd ed., ARTECH HOUSE, INC., pp 68-88, 2005.
- 10) A. Bacchetta et al. "Sivers function in a spectator model with axial-vector diquarks", Phys. Lett. B, vol. 578, pp. 109-118, 2004.
- 11) 株式会社フジクラ：「第5世代移動通信システム用 ミリ波帯 RFIC とその半導体技術」, ホワイトペーパー, <https://mmwavetech.fujikura.jp/ja/> (2022年1月26日 閲覧).
- 12) 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", IEEE ISSCC, pp. 128-129, February, 2017.
- 13) B. Sadhu et al., "A 28-GHz 32-Element TRX Phased-Array IC With Concurrent Dual-Polarized Operation and Orthogonal Phase and Gain Control for 5G Communications", IEEE JSSC, vol. 52, no. 12, pp. 3373-3391, December, 2017.
- 14) J. D. Dunworth et al., "A 28GHz Bulk-CMOS Dual-Polarization Phased-Array Transceiver with 24 Channels for 5G User and Basestation Equipment", IEEE ISSCC, pp. 70-71, February, 2018.
- 15) J. Pang et al., "A CMOS Dual-Polarized Phased-Array Beamformer Utilizing CrossPolarization Leakage Cancellation for 5G MIMO Systems," IEEE JSSC, vol. 56, no. 4, pp. 1310-1326, 2021.
- 16) 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, pp. 235-247, 2021.
- 17) H.-C. Park et al., "A 39GHz-Band CMOS 16-Channel Phased-Array Transceiver IC with a Companion Dual-Stream IF Transceiver IC for 5G NR Base-Station Applications", IEEE ISSCC, pp. 76-77, February, 2020.
- 18) R. Mahmou and K. Faitah,, "Designing of RF Single Balanced Mixer with a 65 nm CMOS Technology Dedicated to Low Power Consumption Wireless Applications", International Journal of Computer Science Issues, vol. 9, Issue 1, no 3, pp. 358-363, January, 2012.
- 19) 福田敦史ほか：「第3世代を超えるブロードバンド化が可能な電力増幅器の開発-MEMSスイッチを用いた移動端末用マルチバンド高効率電力増幅器-」, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol. 14 no3. pp. 25-31.