

24–30 GHzをカバーするミリ波帯5G基地局向け電力増幅器

電子応用技術R&Dセンター 上 滝 千 尋¹・奥 山 裕 磨²・久 保 達 夫³・山 口 陽⁴・官 寧⁵

A Power Amplifier for Millimeter-Wave 5G Base Stations Covering 24-30 GHz

C. Kamidaki, Y. Okuyama, T. Kubo, Y. Yamaguchi, and N. Guan

本稿では、ミリ波帯第5世代移動通信システム（5G）基地局向けに開発した電力増幅器（PA）について紹介する。時分割複信をサポートするために送受信スイッチが組み込まれた出力整合回路を採用し、5G規格（5G NR）で規定される周波数帯n257, n258, n261をカバーする24-30 GHzにおいて出力電力と電力付加効率（PAE）を最大化すると共に、振幅-振幅歪み（AM-AM歪み）を低減して線形性を向上する設計を行った。130-nm SiGe BiCMOSプロセスを使用して作製したPAは最大利得30.3 dB、3 dB帯域幅9.8 GHz、かつ24-30 GHzにおける飽和出力電力20 dBm以上、PAE 22%以上、AM-AM歪み0.1 dB以下を達成した。これらのパラメータから計算されるPAの性能指数（ITRS FoM）は最大で93.3と高く、優位性のある値となった。また、変調信号測定において、エラーベクトル振幅-25 dB（5.6%）のときのPAの出力電力、PAE、隣接チャネル電力比はそれぞれ12.3 dBm、8.8%、-32.7 dBcであり、良好な特性を確認した。

In this paper, we introduce a millimeter-wave-band power amplifier (PA) for the 5th generation of mobile technology (5G) base stations. The PA adopts an output matching network with integrated transmit-receive switches to support time-division duplexing, while being designed to maximize the saturated output power (P_{sat}) and power-added efficiency (PAE) and higher linearity (i.e. lower AM-AM distortion) in the n257, n258, and n261 frequency bands specified by the 5G NR. The PA fabricated in a 130-nm SiGe BiCMOS process exhibits a maximum gain of 30.3 dB and a 3 dB bandwidth of 9.8 GHz, and it achieves a P_{sat} over 20 dBm, a PAE of over 22%, and an AM-AM distortion of less than 0.1 dB in the 24-30 GHz range. The performance figure of merit (ITRS FoM) calculated from these parameters reaches competitive value of 93.3. Furthermore, in modulation signal measurements, the PA demonstrates an output power of 12.3 dBm, a PAE of 8.8%, and an adjacent channel power ratio of -32.7 dBc when the error vector magnitude is -25 dB (5.6%) .

1. ま え が き

2019年より世界各国で第5世代移動通信システム（5G）による通信サービスが開始された。ユーザによる右肩上がりの旺盛な通信需要にこたえるため、5Gでは通信の高速化・大容量化を可能にするミリ波帯の商用サービスが提供されており、第5世代移動通信システム規格（5G NR）で規定されるn257（26.5–29.5 GHz）、n258（24.25–27.5 GHz）、n261（27.5–28.35 GHz）の各周波数帯の基地局の設置が進んでいる¹⁾。一方で、無線通信において搬送波周波数が高くなると、自由空間伝搬損失の増大によって単一のアンテナによる通信距離が短くなったり、回折のしにくさによって通信方向が限定されたりするといった課題がある。

フェーズドアレーアンテナモジュール（PAAM）²⁾は、

複数のミリ波信号の位相と振幅をそれぞれ独立に制御する機能を有するビームフォーマIC（BFIC）、周波数変換機能を有する周波数変換IC（FCIC）³⁾、バンドパスフィルタ⁴⁾やコンバイナ/スプリッタといった受動部品、アンテナインパッケージ（AiP）⁵⁾を組み合わせで構成されるモジュールであり、ミリ波のビームフォーミングを実現し、これにより通信距離の延伸と電波の指向性制御を可能にする。このモジュールの内部でミリ波信号が生成されアンテナより放射されるため、PAAMのユーザ（例えば基地局ベンダ）は取り扱いのしにくいミリ波を直接扱わずに済む利点がある。

電力増幅器（PA）はBFICに含まれる回路のひとつであり、PAAMが出力モードの時に送受切替スイッチ（TRX SW）をかいしてアンテナに接続される。そのため、PAの出力電力の増大は、PAAMの等価等方放射電力（EIRP）を増大させ、通信距離をさらに延伸するための有効な手段である。また、5G通信においてはマルチキャリア伝送かつ高次の位相振幅変調が適用されるので、通信品質の向上

1 ミリ波デバイス開発部 主席研究員
2 ミリ波デバイス開発部 アソシエイト
3 ミリ波デバイス開発部 グループ長
4 ミリ波デバイス開発部 部長
5 電子応用技術R&Dセンター フェロー

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
5G	Fifth Generation Mobile Communication System	第5世代移動通信システム
5G NR	5G New Radio	第5世代移動通信システム規格
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第3世代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・各地域の標準化団体によるプロジェクト
TDD	Time Division Duplex	時分割複信. 送信・受信を時間ごとに切り替え, 同一周波数帯域で全二重通信を可能にする電気通信技術
n257, n258, n261	n257, n258, n261	5G新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
PAE	Power Added Efficiency	電力付加効率. 出力電力および入力電力の差と直流消費電力の比
AM-AM歪み	Amplitude Modulation - Amplitude Modulation Distortion	入力電力に対する出力電力の大きさの非線形的な応答
BiCMOS	Bipolar CMOS	バイポーラトランジスタ回路とCMOS回路を組み合わせた半導体回路, またはその製造技術
BW _{3dB}	3 dB bandwidth	3 dB帯域幅. 利得が最大レベルから3 dB低下する上限周波数と下限周波数の差
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors	半導体国際技術ロードマップ
FoM	Figure of Merit	性能指数
EVM	Error Vector Magnitude	エラーベクトル振幅. 変調信号の品質を表す指標であって, 理想信号に対する測定信号の乖離を理想信号ベクトルとエラーベクトルのそれぞれの二乗平均平方根値の比率で表したもの
ACPR	Adjacent Channel Power Ratio	隣接チャネル電力比. 隣接するチャネル帯域の電力と帯域内の電力の比で表される変調信号の品質の指標
PAAM	Phased Array Antenna Module	フェイズドアレイアンテナモジュール
BFIC	Beamformer IC	特定の方向へ電波を送信, または特定の方向からの電波を受信する機能を有するIC
FCIC	Frequency Conversion IC	周波数変換IC. 局部発振信号を用いて中間周波数を無線周波数に変換する機能を有する
AiP	Antenna in Package	配線板上にプリント配線で形成したアンテナと, 高周波信号を送信・受信するための電子回路を実装集積化し, 通信機能を実現するためのパッケージ

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
ビームフォーミング	Beamforming	電波を特定方向に向けて送信，または特定方向から受信する技術
AM-PM歪み	Amplitude Modulation - Phase Modulation Distortion	入力電力に対する通過位相の非線形的な応答
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power	等価等方輻射電力．指向性アンテナから特定の方向に放射される電波の送信電力の強さを表す
LNA	Low Noise Amplifier	低雑音増幅器．発生する雑音を小さく保ちながら微弱な信号を増幅することを特徴とする増幅器
P_{sat}	Saturated Output Power	飽和出力電力．増幅器が飽和したときの出力電力
CW	Continuous Wave	無変調波
$OP_{1\text{dB}}$	Output 1dB Compression Point	出力の1dB圧縮点．増幅器の線形性を表す指標の1つであって、利得が小信号利得よりも1dB低下した点での出力電力
スミスチャート	Smith Chart	極座標表示された反射係数平面上に、等レジスタンス円と等リアクタンス円と呼ばれる目盛線を書き加えたグラフ
Sパラメータ	S Parameter	高周波回路の通過・反射電力特性を表すための回路網パラメータ
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	直交振幅変調．変調方式の1つであって、互いに独立で直角位相関係にある2つの搬送波の振幅を調整することによって信号を伝達する
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	直交周波数分割多重方式．マルチキャリア変調方式の1つであって、隣り合う周波数のサブキャリア同士の位相を直交させることでサブキャリアのスペクトルの一部が重なった状態で伝送できるため、周波数利用効率が高い
CMOS	Complementary MOS	P型とN型のMOSトランジスタを基本素子とする半導体回路，あるいはその製造技術
SOI	Silicon On Insulator	MOSトランジスタの下に酸化膜絶縁層を設け高速化，低消費電力化する技術

のために振幅-振幅歪み（AM-AM歪み），振幅-位相歪み（AM-PM歪み）といった指標で表されるPAの線形性向上が重要になる⁶⁾．さらに，PAは各ICに含まれる回路の中でも特に消費電力が大きく，高効率な省エネルギーの通信を実現するために，高い電力付加効率（PAE）が求められる⁷⁾．最後に，これらの特性を上で述べた周波数帯をカバーする24.25-29.5 GHzで実現することで，製造品種数の

増大を抑制し，管理コストを低減できる．

本稿では，24-30 GHzの周波数範囲において飽和出力電力（ P_{sat} ）が20 dBmを超えるPAを設計し，試作にて良好な特性を得たので紹介する^{8) 9)}．開発したPAは時分割複信（TDD）モードで使用されるため，出力整合回路にTRX SWと低雑音増幅器（LNA）を含んで設計された．試作したPAは無変調波（CW）を用いた測定で高い線形性と効

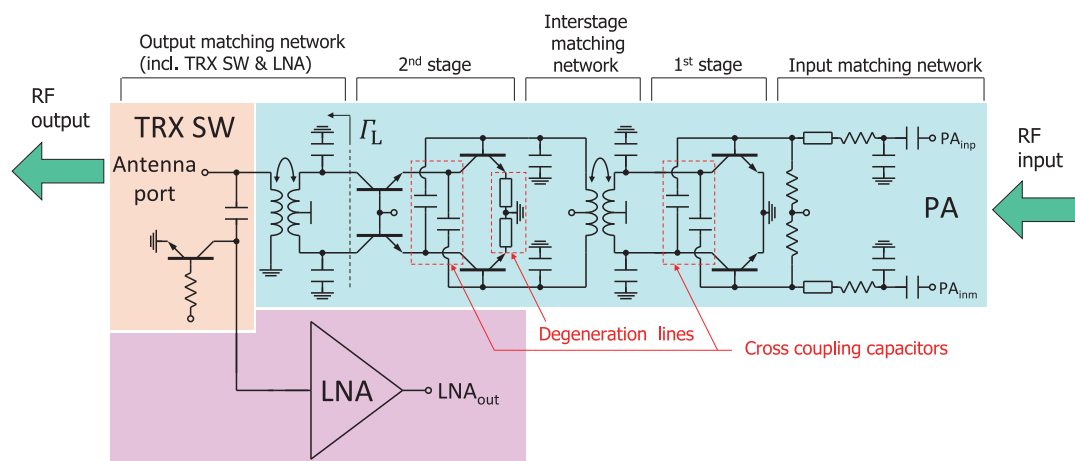


図1 開発したLNA, TRX SWと一体化したPAの回路図

Fig. 1. Schematic diagram of proposed PA with LNA and TRX SW.

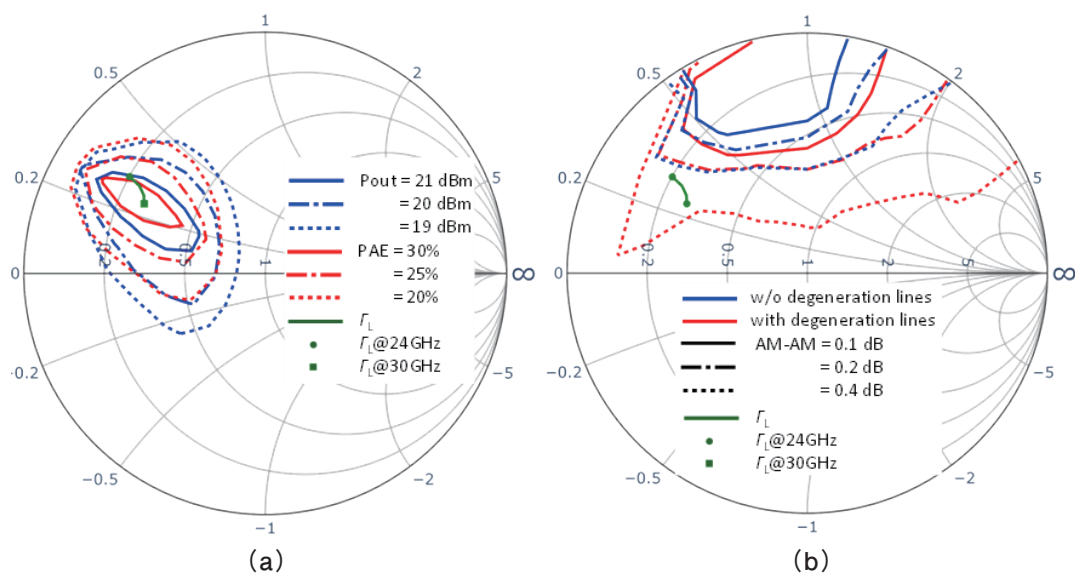


図2 28 GHzにおけるPAのコンター図 (a) PoutおよびPAE (b) AM-AM歪み.

Fig. 2. (a) Pout and PAE contour of the PA at 28 GHz. (b) AM-AM contour of the PA at 28 GHz.

率を示し、またInternational Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) によって定義される性能指数 (ITRS FoM) において優位性のある値を示した。最後に、PAは変調信号を用いた測定で低いエラーベクトル振幅 (EVM) 値を保ちながら大きな電力を出力できることを示した。

2. PAの設計

開発したPA, LNA, TRX SWの回路図を図1に示す。PAの第1ステージと第2ステージはそれぞれ差動コモンエミッタ増幅器と差動カスコード増幅器として構成され、トランスフォーマを用いた段間整合回路で接続することに

よって広い周波数帯域を実現している。各ステージはそれぞれクロスカップリングキャパシタを備え、トランジスタの寄生容量を中和して安定性の向上を図った。第2ステージの下位トランジスタのエミッタは縮退線路が接続され、RF信号に負のフィードバックを与えることにより、利得 (Gain) の低減と引き換えに歪を抑制し線形性の向上を図っている。

図2 (a) はロードプルシミュレーションによって得られた、28 GHzにおけるPAの出力電力 (Pout;青) およびPAE (赤) のコンター図である。ロードプルシミュレーションにおいては、出力整合回路を任意の値の反射係数を持つ負荷ポートに置き換え、反射係数を変化させた状態での第2ステージまでのPAの出力電力を解析する。解析により得

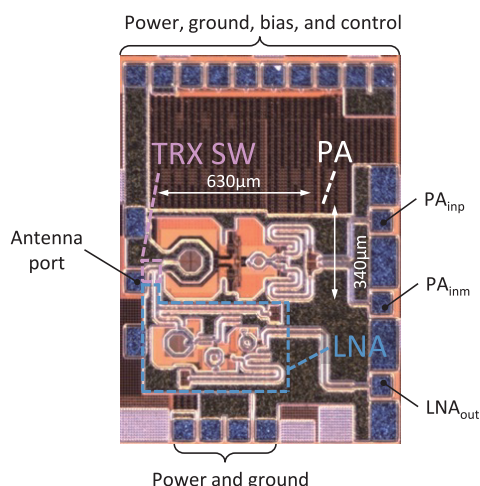


図3 130-nm SiGe BiCMOSプロセスを使用して作製した回路の外観写真

Fig. 3. Micrograph of implemented circuits fabricated in 130-nm SiGe BiCMOS process.

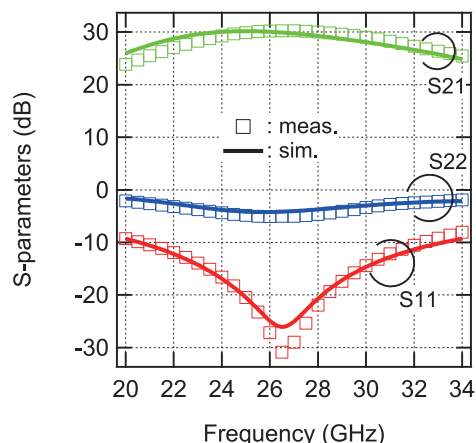


図4 PAのSパラメータの測定結果と設計結果の比較
Fig. 4. Comparison of measured and simulated S-parameters of the PA.

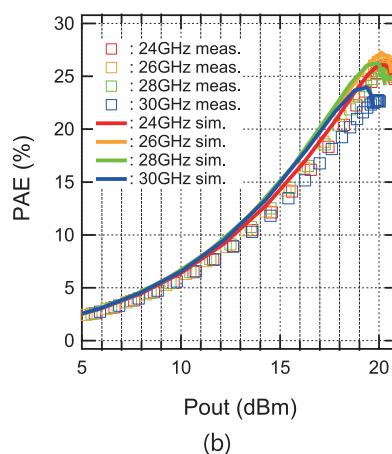
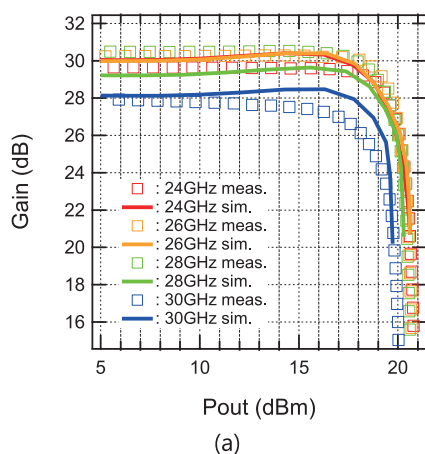


図5 PAのCW大信号特性の測定結果と設計結果の比較 (a) Gain (b) PAE⁹⁾
Fig. 5. CW large-signal measurement and simulation. (a) Gain. (b) PAE. ⁹⁾

られた出力電力はスミスチャート上にプロットされ、PAの出力電力が一定となる負荷インピーダンスを読み取ることができる。図2 (a) には、第2ステージから見た出力整合回路 (TRX SW, LNA, アンテナポートを含む) の24-30 GHzにおける入力インピーダンス (Γ_L ; 緑) も同時に示した。 Γ_L はPoutが21 dBm以上となるインピーダンス領域にプロットされており、この周波数範囲において一定の電力を出力することを示している。さらにPoutとPAEのコンターはよく重なっており、これらを同時に最大化できることが分かる。

図2 (b) は、ロードプルシミュレーションにおいて負荷ポートの反射係数と入力電力を変化させて得られたAM-AM歪みのコンター図である。ここで、AM-AM歪み

は入力電力を変化させたときのGainの最大値と小信号利得の差として計算している。縮退線路があることによって、AM-AM歪みが抑制されるインピーダンスの領域が広がり、 Γ_L はAM-AM歪みが0.4 dB以下となる範囲にプロットされる。

3. 測定結果

図3に130-nm SiGe BiCMOSプロセスを使用して作製した回路の外観写真を示す。PAコア部分のサイズは0.63 mm×0.34 mmである。

図4はPAの送信モードにおけるSパラメータの設計結果と、Keysight N5247A Vector Network Analyzerを用いて

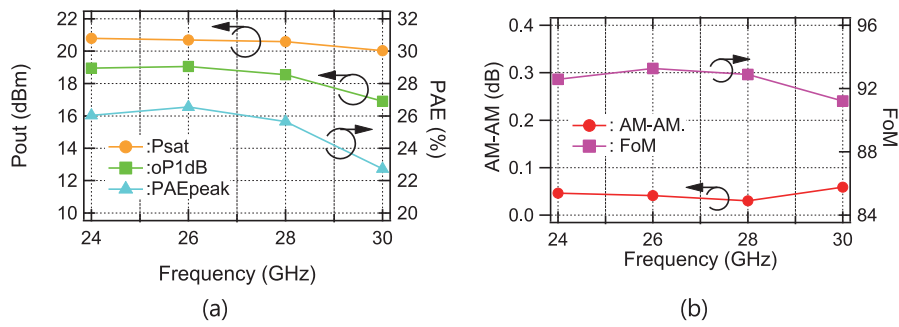
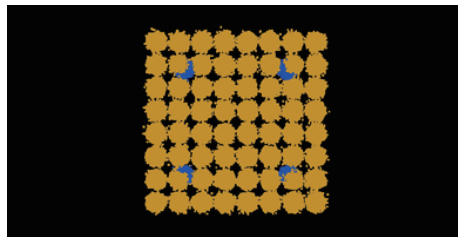
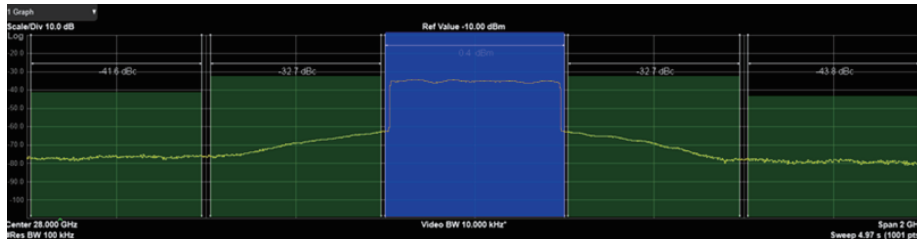


図6 開発したPAの測定結果 (a) P_{sat} , $oP_{1\text{dB}}$, PAE_{peak} (b) AM-AM歪み, ITRS FoM

Fig. 6. Measured performances of the proposal PA. (a) P_{sat} , $oP_{1\text{dB}}$, PAE_{peak} (b) AM-AM, ITRS FoM



(a)



(b)

図7 中心周波数28GHz, 帯域幅400MHz, 64-QAM OFDM変調信号を用いたEVMが -25 dBのときの変調信号測定結果⁸⁾

⁹⁾ (a) コンステレーション (b) スペクトル

Fig. 7. Measurement results of (a) constellation and (b) output spectrum and using 64-QAM OFDM signals at 28 GHz with bandwidth of 400 MHz at EVM = -25 dB^{8) 9)}.

測定した測定結果の比較である。設計において詳細な電磁界モデルの作成および寄生抽出を行ったことにより、設計結果と測定結果はよく一致した。測定結果においてPAの S_{21} は20.6–33.2 GHzの範囲で -10 dB以下であり、 S_{21} は26.7 GHzにおいて30.3 dBのGainピークを示し、9.8 GHz (22.2–32.0 GHz)の3dB帯域幅 ($BW_{3\text{dB}}$)を示した。 S_{22} は22.6–30.0 GHzの範囲で -3 dB以下を示した。

図5に24, 26, 28, 30 GHzにおけるPAのCW大信号特性を示す。CW大信号特性の測定においては、Keysight E8257 Signal Generatorで入力信号を作成し、Keysight N8487A Power Sensor を用いて出力電力を測定した。図5 (a) は各周波数におけるGainの設計結果および測定結果、図5 (b) は各周波数におけるPAEの設計結果および測定

結果である。全体的に、設計結果と測定結果はよく一致した。

図6に各周波数における、PAの特性を示すパラメータである P_{sat} , 1 dB利得圧縮点 ($oP_{1\text{dB}}$), PAEのピーク値 (PAE_{peak}), AM-AM歪み, 計算されたITRS FoMを示す。 P_{sat} は24–30 GHzの範囲で20 dBmを超えた。図2 (a) で示したようにPAの第2ステージの出力は約21 dBmなので、スイッチを含むPAの出力整合回路のロスが約1 dBで設計されていることを示している。同様に、図2 (b) で示されたPAEは約30%であるが、出力が21 dBmから20 dBmに低下することによってPAEは約24%に低減すると計算され、測定結果とおおよそ一致する。

図7は中心周波数28GHz, 帯域幅400MHz, 64-QAM

表1 PAの特性比較^{8) 9)}Table1. Comparison of PA performances^{8) 9)}.

	This Work				[6] ISSCC 2018	[11] RFIC 2021	[7] JSSC 2016	[10] IMS 2020	[12] PAWR 2022
Technology	130-nm SiGe				130-nm SiGe	130-nm SiGe:C	28-nm Bulk CMOS	28-nm Bulk CMOS	45-nm SOI CMOS
Topology	Dif. 2-stage CE+CC with TRX SW				Dif. 2-stage CE+CE	Dif. 1-stage CC	Dif. 2-stage CS+CS	Dif. 2-stage CS+CS	1-stage 4-stacked-FET, Adaptive cap. & bias
BW _{3dB} [GHz]	22.2–32.0				19.0–29.5*	23.5–34.0	27.35–31.2	—	—
Frequency [GHz]	24	26	28	30	28.5	28	30	28	25
Gain [dB]	30	30	29.3	28.1	20	19.4	15.7	18.5	17.6
P_{sat} [dBm]	20.8	20.7	20.6	20	17	22.7	14	18.9	21.5
oP_{1dB} [dBm]	19	19.1	18.6	16.9	15.2	22.1	13.2	18.5	—
PAE _{max} [%]	26	26.5	25.6	22.7	43.5	38.1	35.5	39.7	39
FoM**	92.6	93.3	92.9	91.2	82.5	86.9	74.7	82.3	83.2
Active area [mm ²]	0.21				0.29	0.16	0.16	0.31	0.22
Modulation signal	64-QAM OFDM				64-QAM OFDM	64-QAM OFDM	64-QAM OFDM	64-QAM OFDM	—
EVM [dBc]	-25				-25	-25.2	-25	-25.4	—
Pout@EVM [dBm]	12.3				9.8	16.2	4.2	9.3	—

* Pout 1dB Bandwidth

** ITRS FoM= P_{sat} (dBm) +Gain (dB) +10 log₁₀ (PAE_{max} [%]) +20 log₁₀ (Frequency [GHz]) [13].

OFDM変調信号をPAに入力し、出力されたスペクトルとコンスタレーションの測定結果である。変調信号測定においては、Keysight VXG Signal Generator M9384Bで入力変調信号を生成した。PAの出力信号は分波され、一方はKeysight UXA Signal Analyzer N9040B を用いてスペクトルとコンスタレーションを測定し、もう一方はKeysight N8487A to monitor を用いて出力電力を測定した。EVMが-25 dB (5.6%) のときの出力電力、PAE、隣接チャネル電力比 (ACPR)、はそれぞれ12.3 dBm, 8.8%, -32.7 dBc であった。

表1に開発したPAの各パラメータと、近年報告されたPAの比較をまとめた。開発したPAのみがTRX SWを含むが、もっとも高いITRS FoMを示した。

4. むすび

本稿では、開発したミリ波帯5G基地局向け高線形広帯域PAを紹介した。本PAは130-nm SiGe BiCMOSプロセスを用いて作製され、5G NRで規定されるn257, n258, n261の周波数帯をカバーする24–30 GHzの周波数帯において、 P_{sat} 20dBm以上、AM-AM歪み0.1dB以下、PAE 22–27%と良好な特性を示した。64-QAM OFDM信号を用いた変調信号測定では、EVMが-25 dB (5.6%) のとき、PAの出力電力、PAE、ACPRはそれぞれ12.3 dBm, 8.8%, -32.7 dBcであり、高効率で高品質な通信に有用であることを示している。また、PAの総合的な性能指標であるITRS FoMは26 GHzにおいてこれまでに報告されているPAと比較して優位性のある93.3を示した。

参考文献

- 1) 3GPP, 5G NR specs, <http://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm>
- 2) B. Sadhu et al.: "A 24-to-30 GHz 256-element dual-polarized 5G phased array with fast beam-switching support for >30,000 beams," Proc. IEEE Int. Solid-State Circuit Conf. (ISSCC), pp. 436-438, Feb. 2022.
- 3) A. Paidimarri et al.: "A high-linearity, 24–30 GHz RF, beamforming and frequency-conversion IC for scalable 5G phased arrays," Proc. IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp. (RFIC) , pp. 103–106, Jun. 2021.
- 4) Y. Hasegawa et al.: "Compact and low-loss stripline bandpass filters made of liquid crystal polymer for n257 and n258 applications," Proc. European Microw. Conf. (EuMC) , pp. 437-440, Apr. 2022.
- 5) X. Gu et al.: "Antenna-in-package integration for a wide-band scalable 5G millimeter-wave phased-array module," IEEE Microw. Wirelss Compon. Lett., vol. 31, no. 6, pp. 682–684, Jun. 2021.
- 6) T. W. Li et al.: "A continuous-mode harmonically tuned 19-to-29.5GHz ultra-linear PA supporting 18Gb/s at 18.4% modulation PAE and 43.5% peak PAE," Proc. IEEE Int. Solid-State Circuit Conf. (ISSCC), pp. 410–412, Feb. 2018.
- 7) S. Shakib et al.: "A highly efficient and linear power amplifier for 28-GHz 5G phased array radios in 28-nm CMOS," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 51, no. 12, pp. 3020-3036, 2016.
- 8) C. Kamidaki et al.: "A 24–30 GHz power amplifier with >20-dBm Psat and <0.1-dB AM-AM distortion for 5G applications," Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC), Nov. 2022.
- 9) C. Kamidaki et al.: "A 24–30 GHz power amplifier with >20-dBm Psat and <0.1-dB AM-AM distortion for 5G applications in 130-nm SiGe BiCMOS," IEICE Trans. Electron., vol.E106-C, no.11, pp. 625-634, Nov. 2023.
- 10) Y. W. Chang et al.: "A 28 GHz linear and efficient power amplifier supporting wideband OFDM for 5G in 28nm CMOS," IEEE/MTT-S Int. Microw. Symp. (IMS) Dig., pp. 1093–1096, Aug. 2020.
- 11) T. C. Tsai et al.: "A linear and efficient power amplifier supporting wideband 64-QAM for 5G applications from 26 to 30 GHz in SiGe:C BiCMOS," Proc. IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp. (RFIC), pp. 127–130, July 2021.
- 12) T. Sugiura et al.: "25-GHz-band high efficiency stacked-FET power amplifier IC with adaptive controlled gate capacitor in 45-nm SOI CMOS," Proc. IEEE Topical Conf. on RF/Microw. Power Amplifiers Wireless Radio Appl. (PAWR), pp. 26-28, Jan. 2022.
- 13) International Technology Roadmap for Semiconductors 2001, System Drivers Edition, p. 10.