

高ON/OFF比と利得調整機能を備えた5G向け小型SPDTスイッチアンプ

電子応用技術R&Dセンター 久保達夫¹・山口陽²・奥山裕磨³・武田凌⁴・官寧⁵

An SPDT Switch Realized High ON/OFF ratio and Function of Gain Tune for 5G Millimeter-wave Applications

T. Kubo, Y. Yamaguchi, Y. Okuyama, S. Takeda, and N. Guan

3GPPが規定した第5世代移動通信システム規格（5G NR）の周波数帯n257, n258, n261で動作する周波数変換IC（FCIC）に使用するために開発したSPDTスイッチアンプについて報告する。本SPDTスイッチアンプは、局部発振（LO）信号を送信用ミキサまたは受信用ミキサへ供給するもので、29.15 GHzから34.40 GHzで動作し、52 dB以上のON/OFF比、ならびに動作周波数帯において12 dBの小信号利得を実現した。要求されたLO信号強度を満足するような信号出力強度へ調整するために、利得を変化させる機能をもつ。ICプロセスは0.13 μm SiGe BiCMOSを使用し、コア部分のサイズは0.24 mm^2 である。

A newly developed SPDT switch amplifier is presented. It is designed to implement in a frequency conversion IC for 3GPP n257, n258 and n261 bands and is operated at a frequency range from 29.15 GHz to 34.40 GHz. The SPDT provides LO signals to either a TX mixer or an RX mixer and achieves more than 52 dB ON/OFF ratio and 12 dB small signal gain over the frequency range. Its gain can be changed to adjust the output power to the required LO power. It is fabricated using 0.13 μm SiGe BiCMOS technology and the size of core area is 0.24 mm^2 .

1. ま え が き

近年、第5世代移動通信システム（5G）技術の導入が進められており、第5世代移動通信システム規格（5G NR）周波数帯のn257, n258, n261で使用する機器が報告されている^{1) 2)}。5G基地局では、遠距離通信を実現するために、多数のアンテナエレメントをもつフェーズドアレイアンテナモジュール（PAAMs）が使用されており、アンテナインパッケージ³⁾、バンドパスフィルタ⁴⁾、ビームフォーミングIC（BFIC）、ならびにFCIC⁵⁾を構成要素としたPAAM⁶⁾が報告されている。FCICは、局部発振（LO）信号と送信中間周波数（TX IF）信号を用いて送信RF信号を生成する機能と、LO信号と受信RF信号を用いて受信中間周波数（RX IF）信号を生成する機能をもつ。n257, n258, n261の規定を満足するRF信号周波数帯は、24.25 GHzから29.50 GHzである。FCICのミキサがこのRF信号周波数帯を下側波帯（LSB）として動作する場合、IF信号の中心周波数を4.9 GHzと仮定すると、29.15 GHzから34.40 GHzの周波数帯のLO信号が必要である。したがって、

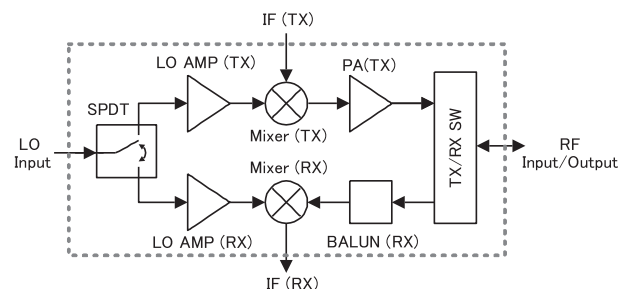


図1 一般的なFCICのブロック図¹²⁾

Fig. 1. Block diagram of a conventional frequency conversion IC¹²⁾.

LO信号を扱う回路は、29.15 GHzから34.40 GHzの周波数帯において良好な特性が必要とされる。

図1に一般的なFCICのブロック図を示す。LO信号の経路を送信側のLOアンプ、または受信側のLOアンプのいずれかへ切り替えるために単極双投（SPDT）スイッチを使用している。SPDTスイッチでは、チップコスト低減のためのサイズ縮小、ならびに不要波を低減させるための高ON/OFF比が重要となる。ミリ波帯のSPDTスイッチについては、過去に複数の報告^{7) 8) 9) 10)}がされているが、アイソレーション特性は低く、サイズも大きなものになっている。サイズを縮小するためにLOアンプとスイッチを統合し、さらに良好なON/OFF比を実現したスイッチ付きア

1 5G無線デバイス開発部 主席研究員
2 5G無線デバイス開発部 グループ長
3 5G無線デバイス開発部 アソシエイト
4 5G無線デバイス開発部 アソシエイト
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
ON/OFF比	ON/OFF ratio	スイッチをONしたときの通過利得と、スイッチをOFFしたときの通過利得の差を示す。
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。
SPDTスイッチ	Single-Pole Double-Throw Switch	単極双投スイッチ。3つの端子を備えたスイッチ。その内の1つが共通端子であり、その端子からはほかの2つの端子いずれかへ排他的に接続する機能を持つ。
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。
n257	n257	26.50GHzから29.50GHzの5G新無線周波数帯。主に日本、韓国で使用されている。
n258	n258	24.25GHzから27.50GHzの5G新無線周波数帯。
n261	n261	27.50GHzから28.35GHzの5G新無線周波数帯。主に米国で使用されている。
LO信号	Local Oscillator Signal	局部発振周波数信号。ヘテロダイン受信機の参照信号として周波数変換に使用される。
ミキサ	Mixer	周波数変換回路。2つの交流信号を入力し、それらの和または差の周波数を持つ信号を出力する。
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。
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。
PAAM	Phased Array Antenna Module	アンテナアレイ、BFIC、FCICおよびフィルタを一体化したモジュール。ミリ波を利用した固定ワイヤレスアクセス (FWA)、モバイルブロードバンド (MBB)、バックホールアプリケーションなどの各用途に使用される。
BFIC	Beam Forming IC	フェーズドアレイアンテナを使用して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IC。
FCIC	Frequency Conversion IC	送信IF信号を送信RF信号へ変換する、または受信RF信号を受信IF信号へ変換するIC。周波数変換するためにLO信号が使用される。
IF信号	Intermediate Frequency Signal	RF信号をベースバンド信号に変換する、またはその逆の周波数変換過程で利用される中間周波数の信号。
HEMT	High Electron Mobility Transistor	半導体ヘテロ接合に誘起された高移動度の二次元電子ガスを利用した高速な電界効果型トランジスタ。
Sパラメータ	Scattering parameter	高周波回路の特性を表すために使用されるパラメータ。

ンプが報告¹¹⁾ されているが、このアンプは大電流駆動をとまうドレイン電圧制御が必要であり、さらにコストの高いGaAs HEMTプロセスが使用されている。そのうえ、スイッチアンプの利得を調整することができない。スイッチ付きアンプからミキサへ供給するLO信号の強度は、温度変動やプロセス変動に応じて最適な値へ調整する必要があり、電圧制御発振器 (VCO)、または合波器からスイッチ付きアンプへ入力されるLO信号の強度も温度変動やプロセス変動に応じて変化する。したがって、ミキサへ供給

するLO信号の強度を最適化するために、LOアンプの利得を調整する機能が求められる。これらの課題を解決した良好な特性をもつSPDTスイッチアンプ¹²⁾ を考案し、試作にて特性を確認したので報告する。

2. SPDTスイッチアンプの設計

開発したSPDTスイッチアンプは、図2に示すように共通の入力整合回路と2個のアンプから構成される。各々の

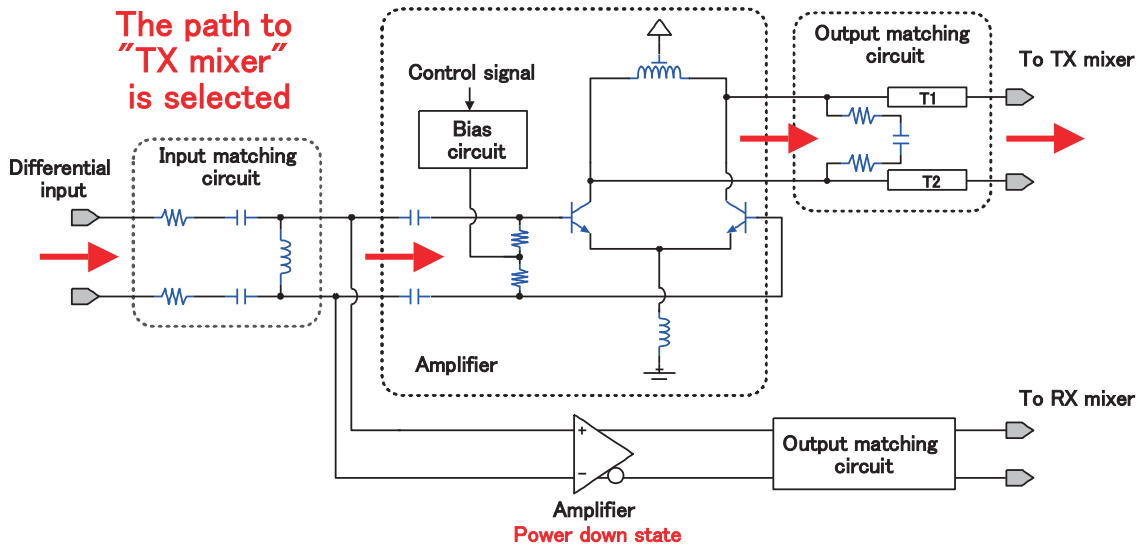


図2 提案するSPDTスイッチアンプのブロック図と回路構成¹²⁾

Fig. 2. Block diagram and circuit configuration of the proposed SPDT switch amplifier¹²⁾.

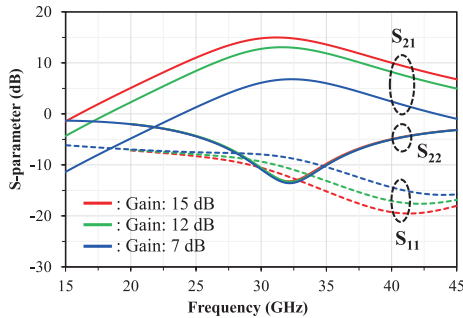


図3 LOアンプの利得を外部からの制御信号によって7 dB, 12 dB, 15dBと変化させた際のSパラメータのシミュレーション結果

Fig. 3. Simulated S-parameters when the gain of amplifier changes to 7 dB, 12 dB and 15 dB by the outer control signal.

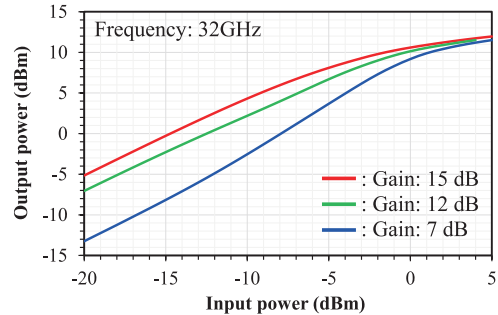


図4 32 GHz入力信号強度と出力信号強度のシミュレーション結果

Fig. 4. Simulated input power versus output power characteristics at 32 GHz.

アンプのパワーダウン機能を用いて出力経路の選択を行う。スイッチ回路や信号分配器を使用していないので、SPDTスイッチアンプのサイズを縮小し、さらに良好なON/OFF比を実現することができる。

入力整合回路は、R-C-Lネットワークで構築される。この入力整合回路は、2個のアンプの一方がON、もう一方がOFFの条件で50 ohmに整合されるように設計されている。

2個のアンプは同じ構成であること、SiGeプロセスのnpnトランジスタを使用すること、ON/OFFおよび利得制御機能をもつこと、インダクタ負荷をもつことを主な特徴としている。インダクタ負荷はスパイラルインダクタで構成され、インダクタに接続するnpnトランジスタのコレクタへのバイアス電圧は、サイズを縮小するためにスパイラルインダクタのセンタータップから供給される構成を採用

した。npnトランジスタのベースバイアス電圧を生成するバイアス回路は、2個のLOアンプにそれぞれ配置した。外部からの制御信号によってバイアス回路はLOアンプの利得を変化させることによりLOアンプの入出力信号強度範囲の拡張を可能としている。さらに、バイアス回路はLOアンプのON/OFF切替制御も行う。図3はLOアンプの利得を変化させた際のSパラメータのシミュレーション結果を示す。出力整合回路はR-Cネットワーク、ならびに50 ohm整合するためのインピーダンス変換線路 (T1とT2) で構成した。

SiGe npnトランジスタは小さいサイズで高利得、ならびに高出力強度の特性をそれぞれ満足することができるので、LOアンプの寄生容量は小さく高いアイソレーション特性をもつ。したがって、良好なON/OFF比を実現すること

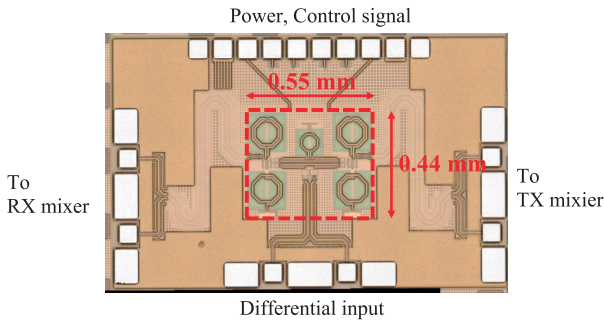


図5 SPDTスイッチアンプのチップ写真¹²⁾
Fig. 5. Photograph of the fabricated SPDT switch amplifier¹²⁾.

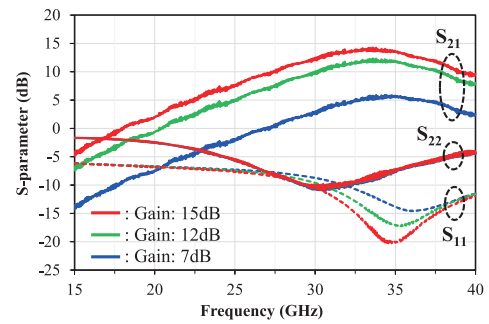


図6 LOアンプの利得を外部からの制御信号によって7 dB, 12 dB, 15 dBと変化させた際のSパラメータの測定結果

Fig. 6. Measured S-parameters when the gain of amplifier changes to 7 dB, 12 dB and 15 dB by the outer control signal.

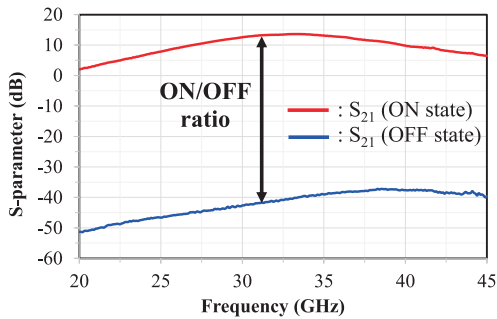


図7 ON/OFF比の測定結果
Fig. 7. Measured ON/OFF ratio.

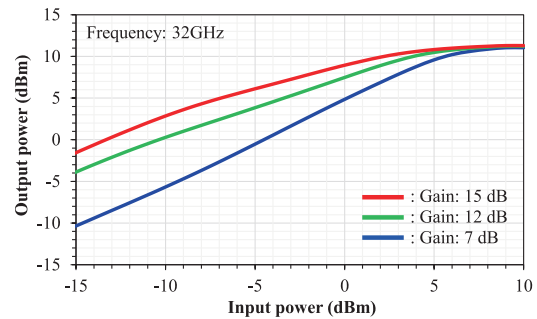


図8 32 GHz入力信号強度と出力信号強度の測定結果
Fig. 8. Measured input power versus output power characteristics at 32 GHz.

ができる。

著者らが以前に報告したFCICは、5 dBmの強度のLO信号を必要としている⁶⁾。図4はLOアンプの利得を変化させた際の32 GHz入力信号強度と出力信号強度の関係をシミュレーションした結果を示す。すべての利得設定条件において、LOアンプの出力強度を要求された5 dBm以上とすることが可能である。

3. 測定結果

図5に0.13 μm SiGe BiCMOSプロセスを使用して製造したSPDTスイッチアンプのチップ写真を示す。チップサイズは1.6 mm \times 1.6 mmであり、コア部分のサイズは0.55 mm \times 0.44 mmである。チップの左方向に配置されたLOアンプの出力パッドを50 ohmで終端した条件で、右方向に配置されたLOアンプの特性を測定した。図6にLOアンプの利得を変化させた際のSパラメータの測定結果を示す。これらの結果は、シミュレーションの結果とよく一致している。29.15 GHzから34.40 GHzの周波数範囲において、

S11は-8 dB以下、S22は-7 dB以下である。利得最大設定の条件においてS21は12 dB以上であり、さらに周波数範囲内の平坦性は1.6 dB以下と良好な結果が測定された。これらの測定結果もシミュレーションの結果とよく一致している。

LOアンプがON時のS21と、OFF時のS21の差分で定義されるON/OFF比は、SPDTスイッチアンプの最も重要な特性の一つである。図7に示すように、ON/OFF比の測定結果は29.15 GHzから34.40 GHzの周波数範囲において52 dB以上と良好な特性である。図8にLOアンプの利得を変化させた際の32 GHz入力信号強度と出力信号強度の関係の測定結果を示す。こちらについても良好な結果が確認されている。

表1は過去に報告されているSPDTスイッチ、アンプ、ならびにSPDTスイッチアンプに対して主な特性を比較した結果を示しており、本稿で提案するSPDTスイッチがより小さなサイズ、ならびに良好なON/OFF比をそれぞれ実現していることが確認できる。

表1 過去に報告されているSPDTスイッチ、アンプ、ならびにSPDTスイッチアンプに対して主な特性を比較した結果¹²⁾
Table 1. Comparison with some published SPDT switches, amplifiers, and SPDT switch amplifiers¹²⁾.

Reference	This work	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
Topology	SPDT switch amplifier	SPDT switch	SPDT switch	SPDT switch	SPDT switch and LNA	SPDT switch amplifier
Frequency	29.15–34.40 GHz	27–50 GHz	17–100 GHz	50–67 GHz	19.15–34.40 GHz	24–27.5 GHz
Area	0.24 mm ²	0.4 mm ²	0.42 mm ²	0.3 mm ²	0.77 mm ²	0.37 mm ²
Gain	12 dB	–2.7 dB	–2.8 dB	–1.9 dB	22 dB	6 dB
ON/OFF ratio	52 dB	23.3 dB	17.2 dB	39.9 dB	25 dB	24 dB
Technology	0.13 μm SiGe	0.13 μm CMOS	65 nm CMOS	90 nm CMOS	0.13 μm SiGe	0.15 μm pHEMT

4. むすび

0.13 μm SiGe BiCMOSプロセスを使用して新たに開発した利得調整機能付きSPDTスイッチアンプを本稿で紹介した。過去に報告されているミリ波帯SPDTスイッチ、ならびにSPDTスイッチアンプと比較して小型化、ならびに高ON/OFF比を実現しており、FCICのコスト削減と不要波抑圧に貢献することができる。

参考文献

- 1) 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 J. Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 12, pp.3373-3391, Dec. 2017.
- 2) J. Pang et al.: "A CMOS dual-polarized phased-array beamformer utilizing cross-polarization leakage cancellation for 5G MIMO systems," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 4, pp. 1310–1326, Apr. 2021.
- 3) X-X. Gu et al.: "Antenna-in-package integration for a wide-band scalable 5G millimeter-wave phased-array module," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 6, pp. 682–684, Jun. 2021.
- 4) Y. Hasegawa et al., "Compact and low-loss stripline bandpass filters made of liquid crystal polymer for n257 and n258 applications," *51st European Microwave Conference*, pp.437-440, Apr. 2022.
- 5) A. Paidimarri et al.: "A high-linearity, 24–30 GHz RF, beamforming and frequency-conversion IC for scalable 5G phased arrays," *2021 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium RFIC*, pp. 103-106, Jun. 2021.
- 6) B. Sadhu et al.: "A 24-to-30GHz 256-element dual-polarized 5G phased array with fast beam-switching support for >30,000 beams," *2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, pp.436-437, Feb. 2022.
- 7) M-C. Yeh et al.: "A millimeter-wave wideband SPDT switch with traveling-wave concept using 0.13-μm CMOS process," *2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 53-56, Apr. 2005.
- 8) X-L. Tang et al.: "A traveling-wave CMOS SPDT using slow-wave transmission lines for millimeter-wave application," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 34, Issue 9, pp. 1094-1096, Sept. 2013.
- 9) C.W. Byeon et al.: "Design and analysis of the millimeter-wave SPDT switch for TDD applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 61, Issue 8, pp. 2858-2864, Aug. 2013.
- 10) C. Ulusoyet et al.: "High-performance W-band LNA and SPDT switch in 0.13μm SiGe HBT technology," *2015 IEEE Radio and Wireless Symposium*, Jan. 2015.
- 11) T. Kaho et al.: "A compact K/Ka-band transceiver MMIC using GaAs 3D-MMIC technology," *2010 Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 822-825, Dec. 2010.
- 12) T. Kubo et al.: "A Compact SPDT Switch Amplifier with High ON/OFF Ratio and Variable Gain for 5G Millimeter-wave Applications," *2022 Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 285-287, Dec. 2022.