

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560392

研究課題名（和文） 位相の異なる搬送波のベクトル合成を用いた全デジタル化送信機の研究

研究課題名（英文） Study on All-Digital Transmitter with Vector Synthesis of Different-Phase Carriers

研究代表者

榎田 洋太郎 (UMEDA YOHTARO)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：80439918

研究成果の概要（和文）：本研究では、直交変調構成の包絡線パルス幅変調(EPWM)スイッチング動作型送信機について、実験的に初めて電力増幅器を用いた変調精度評価を行った。また、直交変調型 EPWM 送信機の実質的な電力効率の指標として、復調後信号点における振幅の大きさを表す実効復調電力効率を提案した。さらに、周波数可変で、電力損失、変調精度劣化を抑えつつ、量子化雑音による帯域外輻射を低減するため、180° ハイブリッド電力合成を用いた電力増幅器挿入型トランスバーサルフィルタを提案した。

研究成果の概要（英文）：This study first performs an modulation accuracy measurement including a power amplifier for a quadrature-modulation envelope pulse-width-modulation (EPWM) type switching-mode transmitter. In addition, this study proposes effective demodulation power efficiency (EDPE) as a figure of merit to represent the substantial power efficiency for a quadrature-modulation EPWM transmitter. Furthermore, the study proposes a power-amplifier inserted transversal filter with 180-degree hybrids for power combining to suppress the out-of-band quantization noise.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2012年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2013年度	900,000	270,000	1,170,000
2014年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：移動体通信、電力増幅器、高効率、スイッチング動作、デジタル回路、送信機、パルス幅変調、デルタシグマ変調

1. 研究開始当初の背景

移動体通信において、送信機における電力の約半分は電力増幅器により消費されている。従って、電力利用効率が高く、歪みの少ない線形電力増幅器が求められている。線形増幅に広く用いられている AB 級電力増幅器は、出力電力が飽和電力に近い場合はある程度高い電力効率が得られるが、飽和出力電力に対する平均電力のバックオフが大きい場

合、電力効率が大幅に低下する。このため、PAPR（最大電力と平均電力の比）が大きい近年の多値直交振幅変調や OFDM 方式では、電力効率が大幅に低下する問題がある。また、同じ理由により、電力増幅器の出力電力を下げて使用した場合にも電力効率が大幅に低下する。

これらの平均電力を飽和電力より低いところで使用したときの電力効率低下の問題

は、電力増幅器内の出力段トランジスタをスイッチング動作させることにより、トランジスタでの電力消費を抑え、電力効率を向上させる方法により大幅に改善することができる[1]。その中で代表的な包絡線除去復元(EER: Envelope Elimination and Restoration)方式[1]、[2]は、電力増幅器出力段トランジスタの電源電圧を制御することにより、ベースバンド信号の振幅に相当するRF信号の包絡線振幅を変化させる。これにより、トランジスタを常にスイッチング動作させることが可能となり、バックオフを大きくしても高効率を維持することができる。図1に示すように、この方式では、まず入力されたベースバンド信号を包絡線成分と位相成分に分ける。位相成分は搬送波を位相変調する。一方、振幅成分はスイッチングレギュレータで増幅したのち、飽和動作型増幅器の電源電圧に適用することにより、位相変調波の振幅を変調する。飽和電力増幅器は常にスイッチング動作することにより、高い電力効率を得ることができる。しかし、増幅器出力トランジスタの電源バイアスが出力振幅に応じて変化するため寄生容量が変化し、位相ひずみが発生する問題がある[1]。また、スイッチングレギュレータの電力損失により、電力効率が低下する問題がある。さらに、出力段トランジスタの電源電圧と出力振幅の間に非線形性があるため、増幅器の線形性が低下する問題がある。

これらのEERの問題点を解決するために、定包絡線のRF信号をパルス幅変調(PWM)(パルス密度変調を含める)によりオン・オフすることにより、ベースバンド信号である包絡線の振幅情報を定包絡線RF信号の時間幅に置き換えて等価的に表す包絡線パルス幅変調(EPWM: Envelope Pulse-Width Modulation)方式が提案されている[3]-[18]。このEPWM信号を用いて電力増幅器を常にスイッチング動作させることにより高い電力効率を得ることができる。この方式では、電力増幅器のバイアスを固定とするため、EERで発生した位相ひずみの問題を解消できるとともに、スイッチングレギュレータを用いないことにより電力損失が抑えられる。また、PWMにより高い線形性が確保できる。RF信号はバースト状になるが、最終的に受信機の復調用ベースバンドフィルタ出力での識別時点において送信信号が復元される。

EPWM方式によるスイッチング動作型送信機の評価に関する報告としては、EPWMの信号処理についてのシミュレーション、およびFPGA実装による評価の報告は多数あるものの、電力増幅器を含めたシステム評価を行ったものは表1に示すように少なく、直交変調型に関するものは1件のみである。さらに、変調精度(EVM: Error Vector

Magnitude)まで評価したものは、アナログPWMを用いたものの1件のみであり、 $\Delta\Sigma$ 変調を用いたデジタル方式に関する報告はない。この理由は、EPWM方式では信号がバースト状になるため、バイアス変動によるEVM劣化が大きく[18]、良好な特性が得られないことによると思われる。1/4波長伝送線路を用いることによりバイアス変動を抑える報告はある[13]、[18]が、数GHz帯以下では形状が大きい問題がある。

EPWM方式の中でも、図2に示すようなポーラ変調型EPWM方式は、0以上となる振幅成分に対しPWMを行うため、PWM変調出力および電力増幅器出力が0と正值の2値のみで構成できるため、これまで多くの検討が行われている[3]-[8]。しかし、直交信号から振幅、位相成分への変換は非線形であるため、振幅成分は帯域が広がり、デジタル信号処理を行う際に高いオーバーサンプリング率が必要となる問題がある[10]、[19]。また、変換された位相を用いてアナログ回路である位相変調器を変調するため、原理的に位相誤差が発生し、この位相誤差は温度や経年変化により変動する。さらに、近年の微細化CMOSでは耐圧の低下が顕著なため、将

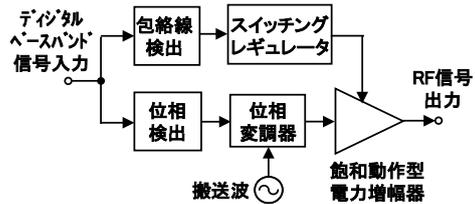


図1 包絡線除去復元(EER)方式の送信機構成

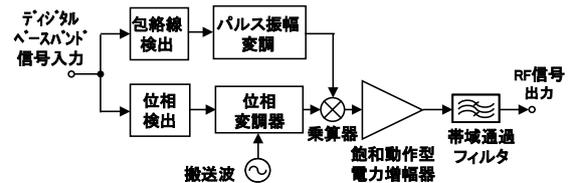


図2 ポーラ変調型EPWM送信機の構成

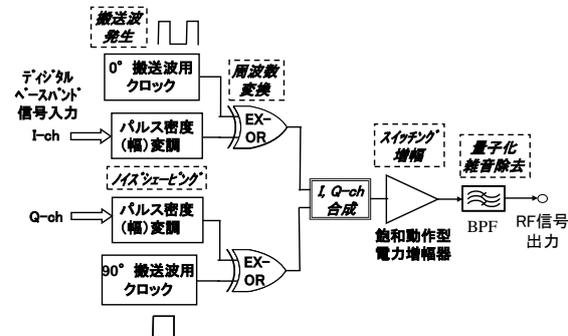


図3 直交変調型EPWM送信機の構成

来さらに微細化が進展した場合、位相変調器のダイナミックレンジが不足し、位相誤差が拡大する懸念がある。

2. 研究の目的

上記のような、EERおよびポーラ変調型EPWMの問題点を解決するために、電力増幅器直前のRF信号までデジタル回路により信号処理するのに適した直交変調型EPWM送信機が報告されている[5]、[9]-[12]。この構成では、直交する2つのベースバンド信号(同相成分(I-ch)と直交成分(Q-ch))を入力とし、それぞれをパルス幅変調する。

さらに、搬送波周波数をもつ 0° と 90° のクロックとの積をとることによりRF信号に周波数変換し、同相成分と直交成分の合成を行う(図3)。合成された信号はスイッチング動作型増幅器に入力することにより高効率電力増幅が可能となる。従来の構成では、パルス幅変調されたベースバンド信号と搬送波クロックとの積をとるためにマルチプレクサを用いる[9]が、本研究では排他的論理和(EX-OR)を用いる方法を提案する。

直交変調型EPWM送信機においては、同相成分と直交成分の2つの成分を出力において合成する必要がある。この合成に単純な2値論理の論理和(OR)を用いた場合、合成回路の同相、直交2入力の論理値がともに"1" (オーバーラップ) のときでも論理値が"2"とならないため歪を生じる [11]、[12]。この歪は、同相成分と直交成分を交互に出力しオーバーラップをなくす構成[5]、[9]、[11]、[12]とすることにより除去できる。

一般にEPWM送信機では、無信号時に電力増幅器の消費電力が0とならないと、無信号時に電力消費が発生し、電力効率が低下する。これに対し、ポーラ変調型の場合、振幅成分は0以上であるため、PWM変調出力および電力増幅器出力は0と正值の2値で構成することにより、上記の不要電力消費の発生を抑えることができる。しかし、直交変調型ではPWM変調出力および電力増幅器出力は0以外に正負両方の値を出力する必要がある。このため、本研究では、パルス密度変調出力に0と±1の3値論理を用いるとともに、正負と消費電力を発生しない0の3値出力が可能な電力増幅器を用いる方法を提案し、その実現性と有効性を明らかにする。

一方、直交変調型EPWMの構成では、同相成分と直交成分の交互出力により、送信機出力においては両成分のベクトル合成がなされないため、電力損が発生することが懸念された。しかし、研究成果の項で述べるように、同相成分と直交成分は、最終的には復調器内のベースバンドフィルタにおいてベクトル合成され、復調後の実効的な信号電力において電力損は生じないことがわかった。このため、

当初計画にあった、搬送波クロックの多相化により所望の信号ベクトルに近い位相の搬送波を発生させ、それを用いることにより電力効率を向上させる研究は不要なことがわかり中止した。

さらに、本研究では、計算機を用いた送信機動作のシミュレーションに加えて、FPGAおよび回路試作により提案する送信機を実装し、その特性を実験的に明らかにすることを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 回路構成の提案

検討する送信機の研究開始当初および実施時の目標性能を表2に、実施した評価系の構成を図4に示す。周波数帯は、高周波動作部分の集積回路試作に $0.18\mu\text{m}$ のCMOSプロセスを用いることを前提に2GHzとしていたが、評価にソフトウェア的に作成したEPWM信号を電気信号にD/A変換する任意波形発生器(AWG)と、オフラインでソフトウェア的に復調を行うためのデータを取得するためにデジタルオシロスコープ(OSC)を使用することとしたため、測定器の周波数制限から1GHzに変更した。

帯域幅は、当初高速型のFPGAで処理可能な100MHzを目標としていたが、量子化雑音による性能劣化を抑えるにはオーバーサンプリング率を十分大きくする必要があるため、10MHzとした。より高速の信号に対しても量子化雑音を低減し、帯域幅を拡大することは今後の課題である。変調方式は、飽和動作型電力増幅器の後のバンドパスフィルタによる帯域制限が伝送系のナイキスト条件に影響を及ぼし伝送特性を劣化させないように、サブキャリア帯域の狭いOFDM方式が最も適しているが、まず基本特性を評価する必要があるため、単一搬送波による

表2 目標性能

項目	当初目標	実施時目標
周波数	2 GHz帯	1 GHz帯
帯域幅	100 MHz以上	10 MHz以上
変調方式	OFDM	16QAM
1次変調方式	256QAM以上	—
信号対雑音比	40 dB以上	40 dB以上
EVM	40 dB以上	32 dB以上
電力効率	80%以上	80%以上

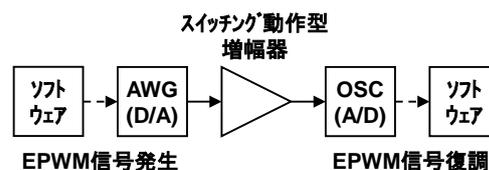


図4 EPWM送信機特性評価実験系

16QAM方式とした。また、送信出力の信号対雑音比は40dB以上、EVMはIEEE802.11acにおける256QAMに必要な値を参考として32dB以上とした。電力効率は、80%以上を実現することを目標とする。

最初に、3値動作 $\Delta\Sigma$ 変調回路、3値動作デジタル方式アップコンバージョン交互出力回路、3値出力電力増幅器を用いる構成について検討を行った。後者2つについては、CMOSプロセスを用いた回路構成を提案した。

(2) 回路特性の理論およびシミュレーションによる検討

提案した回路構成について、理論および計算機シミュレーションにより特性を評価し、各構成の実現性および性能の優劣判断を行い、実験に用いる送信機の構成を決定した。

(3) 動作原理確認実験

集積回路は製作期間が長く、デバッグや修正が行いにくい。製作期間が短く、目標より低い周波数(50MHz)において、個別素子をボード上に実装する方法により電力増幅器を試作し、EPWM送信機動作原理確認のための実験(図4)を行い、提案する送信機の構成が実現可能であるかどうかの検討を行った。

(4) 高周波動作特性評価実験

提案した送信機の高周波回路部分(電力増幅器、アップコンバージョン交互出力部)について、VDECを通して、0.18 μm CMOSプロセスを用いて電気設計、レイアウト設計を行い、試作を行った。現在評価中。

4. 研究成果

(1) 直交変調型とポーラ変調型の比較(表3、本研究1)

復調後のコンスタレーションに対する実効的な電力効率である実効復調電力効率を提案した[5.①]。また、これを評価指標として、直交変調型とポーラ変調型EPWM送信機の比較を行った。その結果、直交変調型は、送信機出力の帯域通過フィルタの帯域を適当に制限することにより、ほぼ100%の実効復調電力効率が得られることがわかった。

(2) 量子化雑音による帯域外輻射の低減(表3、本研究2)

EPWM方式は量子化雑音が大きいため、量子化雑音低減の試みが行われている[17]が、現状では送信機出力に狭帯域、帯域可変、かつ低損失の帯域通過フィルタを用いて量子化雑音を除去する必要がある。このために、トランスバーサルフィルタの各経路に電力増幅器を挿入する構成[20]が提案されているが、各経路の電力増幅器の出力合成にトランスを用いているため、各経路の増幅器の出力段トランジスタが互いに干渉し、EVMが劣化する問題がある。本研究では、出力合成に180°ハイブリッドを用いることにより、EVM

の劣化なしに、狭帯域、帯域可変、かつ低損失の帯域通過フィルタが構成できることを計算機シミュレーションにより示した。現在、実験的評価を進めている。

(3) FPGAによる $\Delta\Sigma$ 変調器および3値アップコンバージョン交互出力部の実装

直交変調型EPWM送信機の3値出力の $\Delta\Sigma$ 変調器および電力増幅器に対応するアップコンバージョン交互出力部をFPGA実装し、ソフトウェア的な信号入力により機能的に動作することを確認した。今後、信号発生部もFPGA実装しリアルタイム動作させることにより、高速動作を確認する予定である。

(4) EPWM送信機のバースト動作による歪とその補正(表3、本研究3)

EPWM送信機では、RF信号がバースト状となることによるEVM劣化の問題に対し、復調信号点の歪をあらかじめ求めた歪の逆特性を用いて補正することにより、EVMを改善できることを示した。

(6) 動作原理確認実験(表3、本研究4、5)

搬送波周波数50MHzのE級電力増幅器を作製し、ポーラ変調型および直交変調型のEPWM送信機を図4の実験系により構成し、信号伝送実験を行った。その結果、ポーラ変調型では-21.9dB、直交変調型では-23.0dBのEVMが得られた。電源供給ラインにインダクタを用いるE級増幅器のバーストRF信号に対する過渡応答により、EVMは良好とはいえない。しかし、本結果による実験的な変調精度評価は、直交変調型EPWM送信機、および $\Delta\Sigma$ 変調を用いたポーラ変調型EPWM送信機については初めてのものである。直交変調型については電力効率が15.9%と低いが、基本的に2値動作のE級増幅器の中間状態を無信号用の0出力の用いたためであり、今後電力増幅器の3値出力化により改善する。

(5) D級増幅器を用いた歪低減および3値出力化(表3、本研究6、7)

E級増幅器のEPWMにより発生するバーストRF信号に対する過渡応答歪による変調精度劣化の問題に対し、電源供給用の1/4波長線路またはインダクタの必要ないD級増幅器を用いることにより過渡応答特性を改善する検討を、ポーラ変調型EPWM送信機に対するシミュレーションにより行った。その結果、nMOSFETのみで構成するD級増幅器では-36.0dB、CMOS構成によるD級増幅器では-32.4dBと良好なEVMを得た。このD級増幅器を0.18 μm CMOSプロセスを用いて試作し、現在評価中である。D級増幅器は、2つの出力段トランジスタをB級に近い動作をさせることにより、無信号時の電力消費を抑えることが可能であるため、3値出力電力増幅器として使用できる、今後、改良したD級増幅器に対し、直交変調型についても評価を行う予定である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計9件)

- ① Hironori Izumi, Michiaki Kojima, Yohtaro Umeda, Osamu Takyu, “Comparison between Quadrature- and Polar-modulation Switching-mode Transmitter with Pulse density Modulation,” International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT2013), 2013年01月30日～2013年01月30日, Phoenix Park (Korea) (査読あり).
- ② Shota Fujioka, Michiaki Kojima, Hironori Izumi, Yohtaro Umeda, Osamu Takyu, “Power-amplifier-inserted Transversal Filter for Application to Pulse-density-modulation Switching-mode Transmitters,” International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2012), 2012年10月03日～2012年10月03日, Gold Coast (Australia).
- ③ 藤岡翔太, 榎田洋太郎, 田久 修, “直交振幅変調信号を包絡線パルス幅変調した時のE級電力増幅器の3段階歪補償”, 電子情報通信学会 2012年総合大会, 2012年3月22日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市).
- ④ 和泉宏典, 小島通彰, 榎田洋太郎, 田久 修, “包絡線パルス幅変調送信機と正負一ビット直交交互出力型送信機の実験比較”, 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2012年3月9日, 横須賀リサーチパーク (YRP) (神奈川県横須賀市).
- ⑤ 小島通彰, 和泉宏典, 榎田洋太郎, 田久 修, “スイッチング動作型送信機の応用へ向けたトランスバーサルフィルタ型電力増幅器の検討”, 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2012年3月9日, 横須賀リサーチパーク (YRP) (神奈川県横須賀市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎田 洋太郎 (UMEDA YOHTARO)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号: 80439918

(2) 研究協力者

田久 修 (TAKYU OSAMU)
信州大学・工学部・助教
(東京理科大学・理工学部・助教 (2010年度))
研究者番号: 40453815

参考文献:

- [1] B. Razavi, RF Microelectronics, Prentice Hall, 1998.
- [2] L. R. Kahn, Proc. IRE, vol. 40, no. 7, pp. 803-806, July 1952.
- [3] A. Jayaraman, et al., IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 8, no. 3, pp. 121-123, Aug. 1998.
- [4] H. Adachi and M. Iida, JP Patent Application, P2002-45388, Feb. 2002.
- [5] Y. Wang, IEEE Radio & Wireless Conference, RAWCON2002, pp. 177-179, 2002.
- [6] Y. Wang, 2003 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., vol. 2, pp. 1327-1330, June 2003.
- [7] M. Taromaru, et al., Proc. of IEEE PIMRC, Sept. 2007.
- [8] E. M. Umali, et al., Proc. of IEEE VTC2008-Spring, Singapore, May 2008.
- [9] Helaoui, et al., IEEE Trans. CAS II: Express Briefs, pp. 1129 - 1133, vol. 55, no. 11, Nov. 2008.
- [10] M. L. S. Penaloza, et al., IEEE Radio and Wireless Symp., pp. 51-54, 2009.
- [11] S. Matsumaru, et al., Triangle Symposium on Advanced ICT, pp. 288-291, Oct. 2009.
- [12] S. Matsumaru, et al., IEICE Technical Report, vol. 109, no. 434, CAS2009-137, p279, March 2010.
- [13] 小寺他, 信学技報, MW2007-114, 2007年10月.
- [14] T. P. Hung, et al., IEEE Trans. Microw. Theory Tech, vol. 55, no. 12, pp. 2845-2855, Dec. 2007.
- [15] J. Choi, et al., IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 55, no. 12, Dec. 2007.
- [16] F. M. Ghannouchi, et al., IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 58, no. 11, pp. 2812 - 2819, Nov. 2010.
- [17] S. Yokozawa and Y. Yamao, “2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1-5, Yokohama, May 2011.
- [18] 高橋他, 信学技報, MW2010-118, 2010年11月.
- [19] V. Bassoo and M. Faulkner, Electron. Lett., vol. 44, no. 22, pp. 1299-1300, Oct. 2008.
- [20] H. Kim, et al., 2010 Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), Berlin, pp. 1-4, July 2010.

表 1 電力増幅器を含む EPWM 送信機評価に関する他機関からの報告

発表者, 発表年		小寺 2007 [13]	Hung 2007 [14]	Choi 2007 [15]	Ghannouchi 2010 [16]
評価方法		実験	実験	実験	実験
包絡線 パルス幅 変調	アーキテクチャ	ボレー変調型	RF 変調型	ボレー変調型	直交変調型
	周波数帯	ベースバンド	RF	ベースバンド	ベースバンド
	変調方法	アナログ PWM	バンドパス ΔΣ 変調	ローパス ΔΣ 変調	ローパス ΔΣ 変調
	量子化レベル数	2 値	3 値	2 値/3 値	2 値
	サンプリングレート	—	3.2 GS/s (PPG)	80 MS/s (FPGA)	40 MS/s
信号	シンボレート	12.2 ksym/s	1.23 Msym/s	1.23 Msym/s	1.25 Msym/s
	搬送波周波数	2.31 GHz	800 MHz	800 MHz 帯	2.45 GHz
	変調方式	64QAM	CDMA (IS-95)	CDMA (IS-95A)	OFDM (WiMAX)
電力増幅器		E 級	D 級 (H-bridge)	D 級	F 級
出力電力		7.34 dBm	15 dBm	22.1 dBm	26.5 dBm
電力効率 (トレイシ効率)		22.5% (PAE)	31% (トレイシ)	51.7% (PAE)	4.4% (トレイシ)
変調精度 (EVM)		-36.4 dB	—	—	—

表 3 電力増幅器を含む EPWM 送信機評価に関する本研究の成果

発表者, 発表年		本研究 1 Izumi 2013 [5.①]	本研究 2 Fujioka 2012 [5.②]	本研究 1 藤岡 2012 [5.③]	本研究 4 (未発表)
評価方法		シミュレーション	シミュレーション	シミュレーション	実験
包絡線 パルス幅 変調	アーキテクチャ	直交変調型	ボレー変調型	ボレー変調型	ボレー変調型
	周波数帯	ベースバンド	ベースバンド	ベースバンド	ベースバンド
	変調方法	ローパス ΔΣ 変調	ローパス ΔΣ 変調	ローパス ΔΣ 変調	ローパス ΔΣ 変調
	量子化レベル数	3 値	2 値	2 値	2 値
	サンプリングレート	500 MS/s	500 MS/s	500 MS/s	25 MS/s
信号	シンボレート	12.5 Msym/s	10 Msym/s	10 Msym/s	500 ksym/s
	搬送波周波数	1 GHz	1 GHz	1 GHz	50 MHz
	変調方式	16QAM	16QAM	16QAM	16QAM
電力増幅器		—	E 級	E 級	E 級 (GaAs FET)
出力電力		—	4.1 mW	—	16.1 dBm (*1)
電力効率 (トレイシ効率)		—	43%	—	44.6% (*1)
変調精度 (EVM)		-42 dB	-20.7 dB	-26.3 dB	-21.9 dB

発表者, 発表年		本研究 5 (未発表)	本研究 6 (未発表)	本研究 7 (未発表)
評価方法		実験	シミュレーション	シミュレーション
包絡線 パルス幅 変調	アーキテクチャ	直交変調型	ボレー変調型	ボレー変調型
	周波数帯	ベースバンド	ベースバンド	ベースバンド
	方式	ローパス ΔΣ 変調	ローパス ΔΣ 変調	ローパス ΔΣ 変調
	量子化レベル数	3 値	2 値	2 値
	サンプリングレート	25 MS/s	500 MS/s	500 MS/s
信号	シンボレート	500 ksym/s	10 Msym/s	10 Msym/s
	搬送波周波数	50 MHz	1 GHz	1 GHz
	変調方式	16QAM	16QAM	16QAM
電力増幅器		E 級 (GaAs FET)	D 級 (nMOSFET)	D 級 (CMOS)
出力電力		15.1 dBm (*1)	—	—
電力効率 (トレイシ効率)		15.9% (*1)	66.0% (*1)	58.5% (*1)
変調精度 (EVM)		-23.0 dB	-36.0 dB	-32.4 dB

*1: 雑音電力を含む