

# 直交振幅変調信号を包絡線パルス密度変調した時の D級電力増幅器による歪改善

7309011 飯倉 祥晴

## 1. はじめに

近年、無線通信における送信機は高い電力効率と線形性が求められる。E級電力増幅器を用いた包絡線パルス密度変調[1][2]は電力効率と線形性に対する要求に応えているといえる。しかし、E級電力増幅器にバースト信号が入力されるため、トランジスタのドレインバイアスの過渡応答による歪が発生する問題がある。この問題に対して、E級電力増幅器を用いた歪補償法[3]が提案されている。しかし、この方法では高効率は実現できるが歪を改善しきれない。本研究では、包絡線パルス密度変調に従来用いられているE級電力増幅器に対し、E級と同じく理論的には電力効率が100%となるD級電力増幅器を適用した時の16QAM信号に対する歪を、EVM(Error Vector Magnitude)[4]を用いて定量的に評価し、比較検討する。

## 2. 包絡線パルス密度変調

### 2.1 動作原理

包絡線パルス密度変調の構成を図1に示し、動作原理について説明する。変調された入力信号を振幅成分と位相成分に分解する。その2つの信号に対して、振幅成分は、 $\Delta-\Sigma$ 変調器により、サンプリング周波数 $f_s$ で振幅成分に比例したパルス密度変調信号を生成する。位相成分は搬送波周波数 $f_c$ の搬送波を変調することにより、定振幅の位相変調信号を生成する。そして、この2つの信号を乗算する事により、バースト状の方形波信号を発生する。この信号を、バンドパスフィルタ(BPF)を内蔵する電力増幅器により高効率に増幅するとともに、高調波と量子化雑音を低減し、信号をアンテナから送信する。

### 2.2 利点と問題点

包絡線パルス密度変調の第1の利点は、電力増幅器の入力信号が飽和動作する方形波であることから、トランジスタがONとOFFのスイッチング動作を行うことである。これはトランジスタのドレイン電圧と電流が交互にオーバーラップなく発生するので、消費される電力は理論的に0となり、電力効率が100%となる。実際には、トランジスタのドレイン・ソース間に内部抵抗が存在するため、ドレイン電流が流れているときにドレイン・ソース間電圧は完全に0にはならないが、高い電力効率が得られる。

第2の利点は、振幅成分を $\Delta-\Sigma$ 変調することにより、信号に付帯する量子化雑音に対しノイズシェーピング特性を得ることである。これより、その後のBPFで量子化雑音を大幅に除去することで、高いSNR(Signal to Noise Ratio)を得られる。

問題点として、バースト信号が入力されるのでパルス密度変調信号による振幅に比例した周期のたびに入力信号が発生し、ドレインバイアスの過渡応答による歪が発生してしまうことが挙げられる。

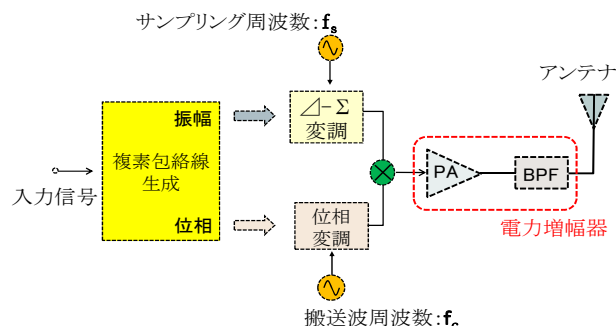


図1. 包絡線パルス密度変調の構成図

## 3. シミュレーションによる評価方法

### 3.1 D級電力増幅器 構成図

シミュレーションを行ったD級電力増幅器の構成を図2に示す。前段がパワーアンプで後段がバンドパスフィルタである。トランジスタは共にNMOSを使用している。そのため $V_{in1}$ ,  $V_{in2}$ , どちらかの入力信号を基準とし、もう一方の入力信号を反転させることでD級動作させる必要がある。

この回路にバースト信号を入力した時の、ドレイン効率、PAE(Power Added Efficiency), EVMの評価を行った。

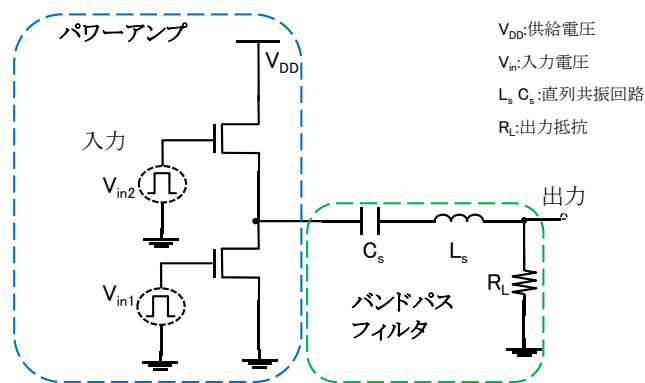


図2. D級電力増幅器 構成図

### 3.2 評価方法

#### 3.2.1 シミュレーション方法

シミュレーションの構成を図3に示す。

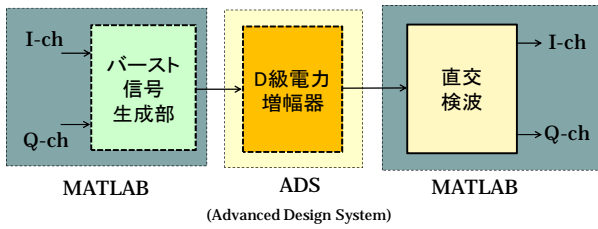


図 3. シミュレーション構成図

構成として、Math Works 社のシミュレーションソフト MATLAB を用いて I,Q チャネルのベースバンド信号を電力増幅器に入力するバースト信号に変調する。さらに変調した信号を Agilent 社の Advanced Design System をもちいて電力増幅器で増幅する。そして再び MATLAB により増幅した信号を直交検波することで I,Q チャネルに復調する。

### 3.2.2 シミュレーション諸元

表 1~4 にシミュレーションの諸元を各部分ごとに示す。

表 1. MATLAB の諸元

変調方式	16 QAM	
シンボルレート	10 [Msymbol/s]	
シンボル数	500	
ロールオフフィルタ	ロールオフファクタ	0.7
	打ち切りサンプル数	16
RF 信号	搬送波周波数	1 [GHz]
	サンプリング周波数	500 [MHz]
Δ-Σ変調器	オーバーサンプリングレシオ	100
	次数	2 次

表 2. 入力の諸元

入力周波数	1 [GHz]
V <sub>DD</sub>	1.0 [V]
V <sub>in1</sub> , V <sub>in2</sub>	0~1.8 [V]

表 3. トランジスタの諸元

種類	NMOS
ゲート長	0.18 [μm]
ゲート幅	300 [μm] (フィンガー数 30)
動作	D 級

表 4. 受動素子の諸元

R <sub>L</sub>	50 [Ω]
C <sub>s</sub>	10 [pF]
L <sub>s</sub>	2.5 [nH]

### 3.2.2 ドレイン効率

評価方法としてドレイン効率を用いた。

$$\eta_{dc} = \frac{P_{out}}{P_{dc}}$$

P<sub>out</sub> : 出力電力  
P<sub>dc</sub> : 電源から消費した電力

### 3.2.3 PAE

評価方法として PAE(Power Added Efficiency)を用いた。PAE とはトランジスタに供給した DC 電力が、どれだけ RF 電力に変換されたかを示し、下式のように示される。

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{dc}}$$

P<sub>in</sub> : 入力電力

### 3.2.4 EVM

評価方法として EVM(Error Vector Magnitude)を用いた。EVM は変調精度を表し、図 4 のように示される。ただし I は同相成分、Q は直行成分である。

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N |S_{ideal,r} - S_{meas,r}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N |S_{ideal,r}|^2}}$$

図 4. EVM の概念図

## 4 評価結果

評価結果を表 5 に示す。トランジスタの入力信号を V<sub>in2</sub> を基準とし、V<sub>in1</sub> の信号を反転させた場合のほうが良い結果となり、EVM は 35.0 dB となった。E 級電力増幅器を適用した時と比較して約 12 dB 大きな値となっており、歪が大幅に改善されたことが確認できた。一方、ドレイン効率及び PAE は E 級電力増幅器を適用した時の方が高効率となっているので、EVM を保持したまま高効率を目指すのが今後の課題である。

表 5. 評価結果

動作	トランジスタの入力信号	ドレイン効率[%]	PAE[%]	EVM[dB]
D 級	V <sub>in2</sub> 基準 V <sub>in1</sub> 反転	73.5	70.5	35.0
	V <sub>in1</sub> 基準 V <sub>in2</sub> 反転	67.4	62.8	35.7
E 級	1 入力	85.7	84.8	23.1

## 5 まとめ

本研究では、包絡線パルス密度変調で用いられる D 級電力増幅器の集積化に向けた設計を行い、ドレイン効率、PAE、および復調信号におけるドレインバイアスの過渡応答による歪の発生量を EVM により評価した。E 級電力増幅器と比較して、効率は劣るが EVM は高い数値を示すことが確認でき、歪が改善されることを示した。今後の課題として、EVM を保ったまま効率を向上させる方法を検討する。また実際に 0.18 μm CMOS プロセスを用いて試作した D 級電力増幅器の包絡線パルス密度変調により発生するバースト信号に対する特性の評価を行う。

### 参考文献

- [1] 大岩 朝洋, 山尾 泰, “Δ-Σ 包絡線変調による飽和形高効率線形増幅法,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2007.
- [2] 高橋 秀一郎, 山尾 泰, “EPWM 送信法における RF パースト信号の増幅法,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2010.
- [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 級電力増幅器の歪補償,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2012.
- [4] Michael D. McKinley, Kate A. Remley, Maciej Myslinski, J. Stevenson Kenney, Dominique Schreurs, Bart Nauwelaers, “EVM Calculation for Broadband Modulated Signals,” 2004.