

高効率GaNスイッチング増幅器を適用した 複数周波数対応デジタル送信機技術

新庄真太郎* 坂田修一*
Rui Ma** 中溝英之***
小松崎優治*

Multiband Digital Transmitter Techniques Using High Efficient GaN Switching-mode Amplifiers

Shintaro Shinjo, Rui Ma, Yuji Komatsuzaki, Shuichi Sakata, Hideyuki Nakamizo

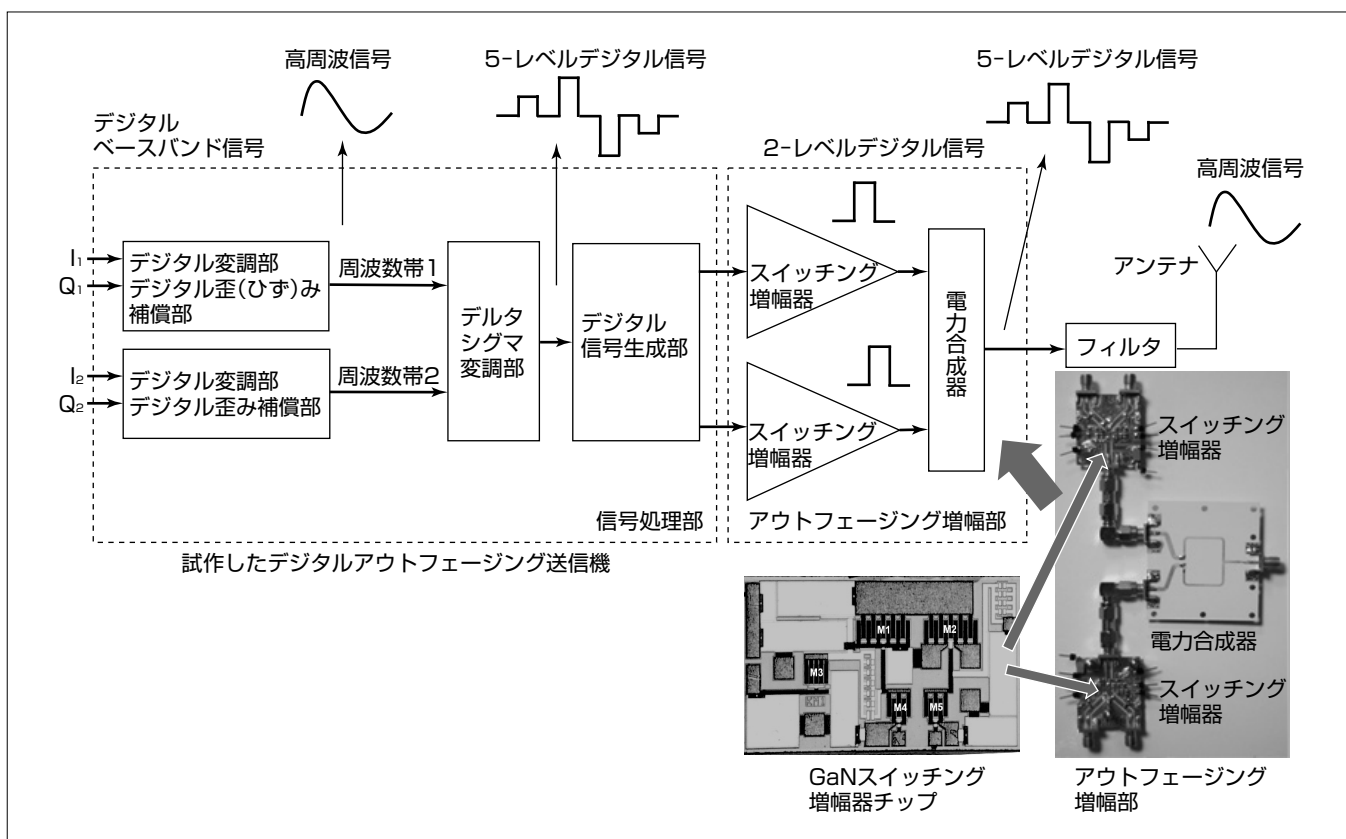
要 旨

携帯電話基地局などの無線装置向けの送信機では、半導体プロセスの微細化に伴いデジタルベースバンド部の小型・高速動作化が進む反面、送信増幅器を含むアナログ高周波部の顕著な高効率化が困難な状況にある。そのため、高周波信号をデジタル信号処理し、高周波部の大半をデジタル動作させるデジタル送信機構成が次世代送信機構成として注目されている。

デジタル送信機構成の実現に向けた主要技術課題の一つは、高効率スイッチング増幅回路技術である。三菱電機はGaN(窒化ガリウム)プロセス技術の進展を踏まえ、スイッチング増幅回路に高速動作と高耐圧特性を両立させるGaNトランジスタを採用し、かつ二つのスイッチング増幅回路をアウトフェーシング動作させることによる高性能

化に着目した。

試作した244MHzと500MHzの2周波数同時送信に対応するデジタルアウトフェーシング送信機は、ブートストラップ型駆動回路を適用したGaNスイッチング(D級)増幅器を備え、さらに二つのD級増幅器を電力合成器でアウトフェーシング増幅動作させることによって高効率・高出力動作を実現する。評価の結果、送信機として最大全体効率50%、最大出力電力38.0dBmを達成した。この結果は、今後ますます高性能・多機能化が要求される携帯電話基地局向けデジタル送信機実現に向けてこの構成が有効であること、さらにGaNデバイスの新たな展開の可能性を示すものである。



GaNスイッチング増幅器を備えた2周波数対応デジタルアウトフェーシング送信機

携帯電話基地局などの無線装置向けにGaNスイッチング増幅器を備えた2周波同時送信に対応するデジタルアウトフェーシング送信機を試作した。この送信機は、信号処理部とアウトフェーシング増幅部及びフィルタを用いて構成し、アウトフェーシング増幅部にGaNトランジスタを用いたスイッチング増幅器を適用することによって、高周波帯でも高効率・高出力動作を実現した。

1. ま え が き

携帯電話基地局などの無線装置向けの送信機では、半導体プロセスの微細化に伴いデジタルベースバンド部の小型・高速動作化が進む反面、送信増幅器を含むアナログ高周波部の顕著な高効率化が困難な状況にある。そのため、高周波信号をデジタル信号処理し、高周波部の大半をデジタル動作させるデジタル送信機構成が次世代送信機構成として注目されている。デジタル送信機構成の主な特長は、①プログラマブルかつ適応的動作が可能のため複数規格への対応が容易、②高集積化・外部部品削減による送信部の小型化、③スイッチング増幅回路構成の採用による高効率化が可能なことである。

デジタル送信機の実現に向けて解決すべき主要技術課題の一つは、高効率スイッチング増幅回路技術である。スイッチング増幅器を携帯電話基地局用送信機で用いるためには高周波帯での高効率・高出力特性が求められることになる。現在ではGaNトランジスタを採用することによって、ギガヘルツに近い周波数帯で高効率・高出力動作するスイッチング(D級)増幅器が報告されてきており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、この増幅器技術を用いることによる高性能・多機能な携帯電話基地局向けデジタル送信機の実現が期待されている。

本稿では、スイッチング増幅器を備えた複数周波数対応デジタルアウトフェーシング送信機構成を示し、提案構成に基づくGaN D級増幅器を備えた2周波数対応デジタルアウトフェーシング送信機の試作結果について述べる。GaN D級増幅器にはブートストラップ型駆動回路を適用することによって高効率化を実現し、さらに二つのD級増幅器をChireix電力合成器でS級アウトフェーシング増幅動作させることによって高効率・高出力動作を可能にした。この送信機は244MHzと500MHzの2周波同時送信条件

下で良好な高周波を示し、GaNデバイスによる新たな次世代送信機構成展開の可能性を期待させるものである⁽⁴⁾。

2. 複数周波数対応デジタルアウトフェーシング送信機の構成

図1に提案のスイッチング増幅器を備えた複数周波数対応デジタルアウトフェーシング送信機の構成を示す。この送信機は、デジタルベースバンド信号から複数(例えばq個)レベルのアウトフェーシング対応デジタル信号を生成する信号処理部、D級増幅器と電力合成器からなるS級アウトフェーシング増幅部及び複数周波数対応フィルタによって構成する。

信号処理部では、個々のデジタルベースバンド信号(I_i, Q_i)をデジタル変調部によって高周波信号へと周波数変換した後、信号処理効率を高めるために複数周波数-複数ビット対応帯域通過型デルタシグマ変調部が $(2q+1)$ レベルの高線形なデジタル信号を生成する。次に複数レベルアウトフェーシング対応デジタル信号生成部によって、 $(2q+1)$ レベルのデジタル信号に対応しかつアウトフェーシング角を持った二つのqレベルのデジタル信号を生成して出力する。表1に一例としてqが2の場合、すなわち5レベルのデジタル信号から2レベルのアウトフェーシング角を持った二つのデジタル信号A, Bを生成するテーブルを示す。

信号処理部から出力された二つのデジタル信号は、S級

表1. デジタル信号の生成テーブル例(q=2)

デルタシグマ変調部生成 デジタル信号レベル	デジタル信号生成部出力	
	デジタル信号A	デジタル信号B
2	1, 1, 1, 1	1, 1, 1, 1
1	1, 1, 1, -1	-1, 1, 1, 1
0	-1, -1, 1, 1	1, 1, -1, -1
-1	-1, -1, -1, 1	1, -1, -1, -1
-2	-1, -1, -1, -1	-1, -1, -1, -1

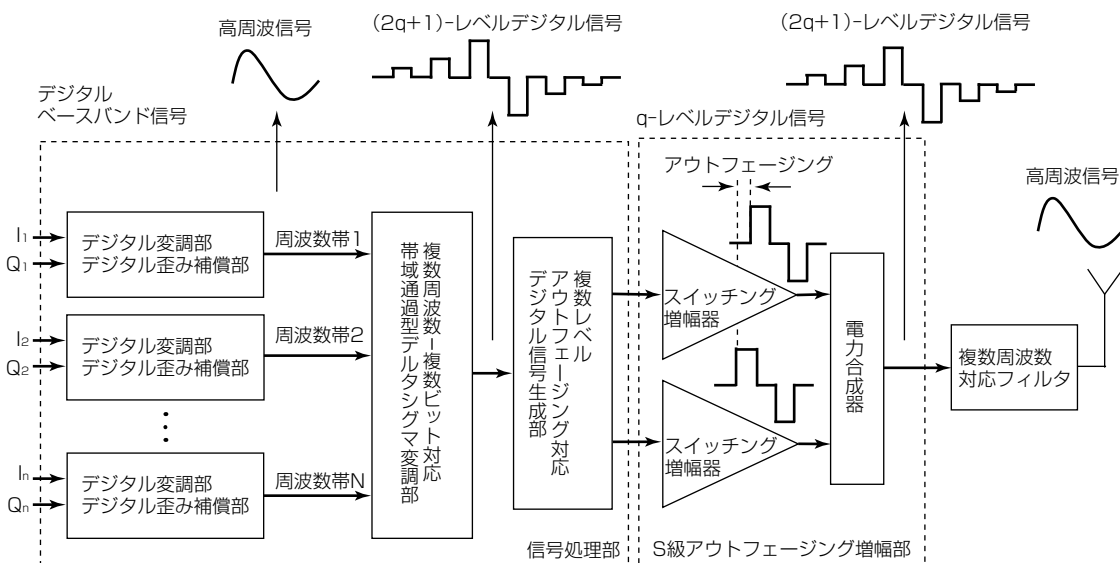


図1. 複数周波数対応デジタルアウトフェーシング送信機の構成

アウトフェージング増幅部を構成する二つのD級増幅器にそれぞれ入力されて増幅される。増幅された信号は電力合成器によってアウトフェージング角に応じて合成された後、複数周波数対応フィルタで高調波成分が除去されてアンテナから出力される。これによって、複数周波数信号を高効率・高出力動作のもと同時送信することが可能なデジタル送信機が実現されることになる。

3. 2周波数対応デジタルアウトフェージング送信機の試作結果

図1の構成に基づいて2周波数対応のデジタルアウトフェージング送信機を試作した。二つの周波数は244MHzと500MHzを選択し、低域信号のチャンネル帯域幅とピーク対平均電力比は5MHzと11.0dB、高域信号のチャンネル帯域幅とピーク対平均電力比は10MHzと11.7dBとした。

3.1 S級アウトフェージング増幅部

図2にD級増幅器とChireix電力合成器を用いて構成するS級アウトフェージング増幅部の回路図を示す。D級増幅器には、高速動作と高耐压の特性を両立させるGaNトランジスタを採用し、図3に示すチップに集積した。チップサイズは $1.6 \times 0.9(\text{mm}^2)$ である。D級増幅器は二つのトランジスタ(M₁, M₂)からなるスイッチング回路と、M₁及びM₂のゲート側に接続する駆動回路からなる。特にM₁のゲート端子にはしきい値電圧近傍からドレイン電圧V_{DD}までの大電圧振幅を高効率に供給する駆動回路が求められる

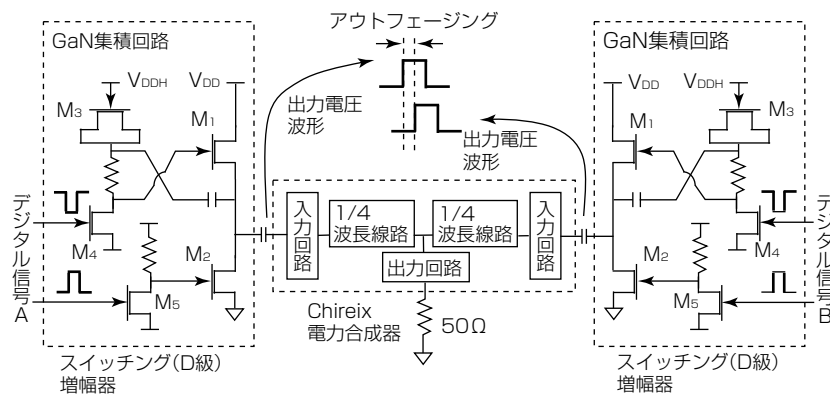


図2. S級アウトフェージング増幅部の回路図

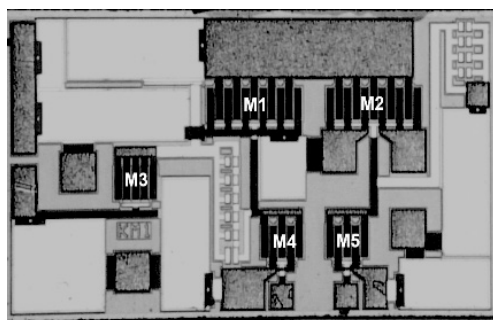


図3. GaN スイッチング(D級)増幅器のチップ

が、電圧を充放電する容量を用いたブートストラップ型駆動回路を適用することによってM₁側駆動回路のドレイン電源V_{DDH}をV_{DD}より低下させて使用することが可能になり、その結果、D級増幅器全体の低消費電力動作を実現できる。

図4にD級増幅器の評価結果を示す。入力信号は周波数465MHz、Duty50%のパルス波を用いた。評価の結果、最大ドレイン効率77%、最大全体効率67%、最大出力電力35.2dBmと高効率・高出力な結果を得た。

3.2 デジタルアウトフェージング送信機

図1の構成に基づいて2周波数対応のデジタルアウトフェージング送信機を試作した。図5にデジタルアウトフェージング送信機を構成するS級アウトフェージング増幅部の試作品を示す。デジタルアウトフェージング送信機に入力される2種類のデジタルベースバンド信号は、表1のデジタル生成テーブルに従って二つのデジタル信号(デジタル信号A, B)に変換処理された後、図5に示すS級アウトフェージング増幅部に出力される。S級アウトフェージング増幅部で増幅・合成された信号はスペクトラムアナライザで信号解析を行う。

図6にデジタルアウトフェージング送信機の評価結果を示す。D級増幅器の電源電圧V_{DD}は35Vとし、アウトフェージング角は0から45度の範囲に限定した。評価の

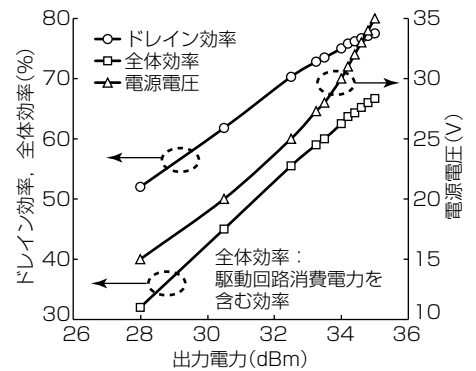


図4. スイッチング(D級)増幅器の評価結果

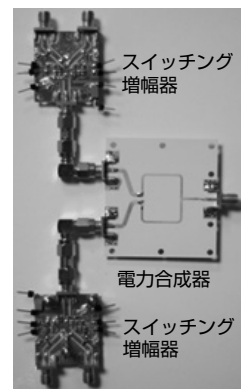


図5. S級アウトフェージング増幅部の試作品

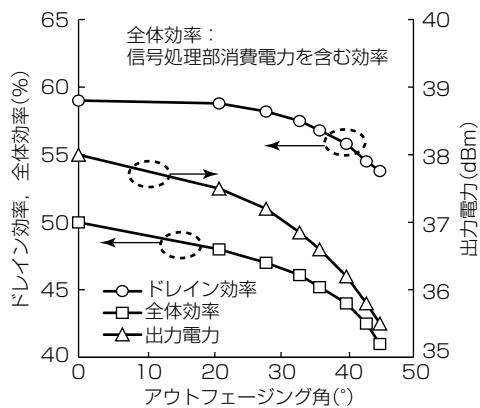
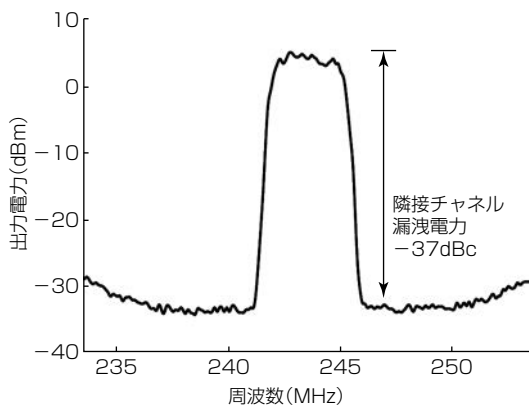
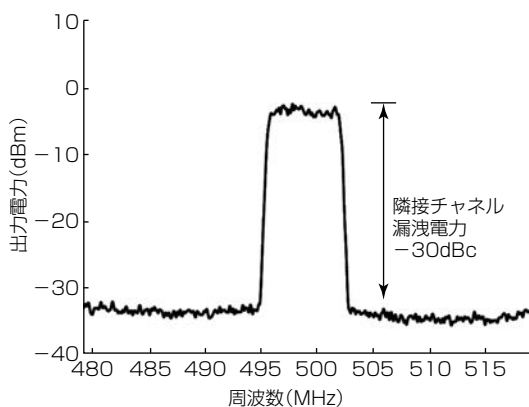


図6. デジタルアウトフェーシング送信機の評価結果



(a) 周波数244MHz, チャンネル帯域幅5MHz



(b) 周波数500MHz, チャンネル帯域幅10MHz

図7. デジタルアウトフェーシング送信機の出カスペクトラム

結果, 最大ドレイン効率59%, 最大全体効率50%, 最大出力電力38.0dBmと高効率・高出力な結果を達成し, さらに出力電力を低下させた場合にも高効率な特性を維持していることを確認した。図7にデジタルアウトフェーシング送信機の出カスペクトラムの評価結果を示す。(a)は周波数244MHz, チャンネル帯域幅5MHz信号, (b)は周波数500MHz, チャンネル帯域幅10MHz信号条件での結果であり, それぞれ隣接チャンネル漏洩(ろうえい)電力は-37dBc, -30dBcと良好な歪み特性を実現していることに加え, 2周波同時送信を実現できていることが確認できた。

表2. デジタルアウトフェーシング送信機の性能比較

		文献(5)	文献(6)	本稿
動作周波数(MHz)	低域	781	800	244
	高域	1,250	1,500	500
チャンネル帯域幅(MHz)	低域	1.5	5	5
	高域	1.25	5	10
隣接チャンネル漏洩電力(dBc)	低域	-42	-50	-37
	高域	-48	-48	-30
D級増幅器		なし	なし	あり

表2にこのデジタルアウトフェーシング送信機の評価結果の性能比較を示す。この送信機はD級増幅器が含まれていることを特徴とし, 非線形で動作する増幅器を備えながら送信機全体として-30dBc以下の歪み特性を実現できていることが分かる。

4. むすび

D級増幅器を備えた2周波数対応デジタルアウトフェーシング送信機の試作結果について述べた。評価の結果, 良好な高効率・高出力特性を達成し, 今後ますます高性能・多機能化が要求される携帯電話基地局向けデジタル送信機の実現に向けてこの構成が有効な手法であることを確認するとともに, GaNデバイスの新たな展開の可能性を示した。

参考文献

- (1) Hori, S., et al.: Linear and Efficient Digital Transmitters for Future Mobile Communication, IEEE International Microwave Symp. Workshop (2017)
- (2) Andreas, W., et al.: Digital Transmitters for the Wireless Infrastructure, IEEE International Microwave Symp. Workshop (2017)
- (3) Nakamizo, H., et al.: Over 65% PAE GaN Voltage-Mode Class D Power Amplifier for 465 MHz Operation Using Bootstrap Drive, IEEE Radio Wireless Symp. (2015)
- (4) Sung, W. C., et al.: Concurrent Multiband Digital Outphasing Transmitter Architecture Using Multidimensional Power Coding, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., **63**, 598~613 (2015)
- (5) Nelson, V. S., et al.: Design and optimization of flexible and coding efficient all-digital RF transmitters, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., **61**, 625~632 (2013)
- (6) Maehata T., et al.: Concurrent dual-band 1-bit digital transmitter using band-pass delta-sigma modulator, IEEE European Microwave Symp. (2013)