

広帯域・高効率動作を可能とする 基地局用高効率線形電力増幅技術

将来の高速・大容量移動通信に向けた基地局用増幅装置の消費電力削減のために、従来にない高い効率を達成するフィードフォワード増幅器構成法について研究を行った。なお、本研究は北海道大学大学院 情報科学研究科 情報通信システム学講座ワイヤレス情報通信研究室（野島 俊雄教授）との共同研究により実施した。

先進技術研究所
すずき やすのり ならはししょういち
鈴木 恭宜 檜橋 祥一

1. まえがき

携帯電話の普及に伴い、サービスエリアの網羅的な確保の観点から、多数の基地局が設置されている。将来の移動通信方式である IMT-Advanced (4G) 用基地局は、さまざまな基地局の形態が想定されるが、従来のセルラ方式で使用されている基地局と同様の形態にて多数設置されると考えられる。したがって、設置性向上および地球環境負荷軽減に配慮した技術開発の観点から、基地局装置のさらなる小型軽量化・省電力化を図ることは、重要な技術課題の1つである。一般に基地局装置は、送信増幅器、受信増幅器、共用器^{*1}、変復調器、制御器、アンテナなどから構成される。送信増幅器の消費電力は、基地局装置の消費電力の大半を占めることから、基地局装置の小型軽量化および省電力化

を達成するには、送信増幅器の消費電力を削減することが肝要である。

3GPP (3rd Generation Partnership Project) などの標準規格にのっとり帯域外漏洩電力を抑圧する必要があることから、送信増幅器には帯域外漏洩成分を補償する技術（以下、歪み補償技術）を用いた線形増幅器が使用される。

送信増幅器で使用される歪み補償技術には、大別してフィードフォワード (FF: Feed-Forward) [1] とデジタルプリディストーション (DPD: Digital PreDistortion) [2] がある。歪み補償能力の観点では FF が DPD よりも優れるが、消費電力の観点では DPD が FF よりも優れる。PDC 方式用送信増幅器と初期の W-CDMA 方式用送信増幅器には、自己調整型 FF 増幅器 (FFPA: FF Power Amplifier) が使用されている [3] が、現在は DPD が主流である [4]。

IMT-Advanced では、最大使用帯域幅が 100MHz 程度と想定される [5] ことから、基地局装置には広帯域にわたる歪み補償能力が求められる。DPD にて広帯域な歪み補償を行うには、高速演算プロセッサおよび広帯域デジタルアナログ変換器（以下、信号処理デバイス）が必要となるが、これらは通常、大電力を要する。信号処理デバイスを省電力化しない限り、DPD 適用時の消費電力増大が懸念され、DPD の特長を活かすことが困難となる。これに対して、広帯域な歪み補償に効果的な FF を用いた FFPA の消費電力を削減できれば、FFPA は広帯域送信増幅器の有力な候補となる。

FFPA は、主増幅器を含む歪み検出回路と、補助増幅器を含む歪み除去回路にて構成される (図 1)。ここで、FFPA の効率を改善するには、主増幅器と補助増幅器のそれぞれの

*1 共用器：送信フィルタと受信フィルタにて構成され、1本のアンテナで送信と受信を共用するための機器。

効率を改善することが必要である。

補助増幅器は、歪み検出回路で検出した歪み成分を、できる限り無歪みに近い状態で増幅することが求められる[1]。このため、補助増幅器として線形性に優れたA級増幅器^{*2}が使用され、飽和点^{*3}近傍で動作させるような高効率増幅器を適用することは困難である。一方、FFPAの高効率化に向けた主増幅器の効率改善が検討されており、FFPAの効率を改善するには、主増幅器の最大効率を改善することが有効であるとの知見を得ている[6]。ある条件の下、主増幅器の出力バックオフ^{*4}量を4dBとし、主増幅器の最大ドレイン効率^{*5}を80%とすると、FFPAの効率として20%がねらえる[6]。これまで主増幅器に適用する高効率増幅器として、ドハティ増幅器[7]を採用したFFPAが提案されている[6][8][9]。実際、送信増幅器に適用される飽和出力10W超ドハティ増幅器の最大ドレイン効率は、50%程度であることを考慮すると、標準規格を満足しつつFFPAとして効率20%を達成することは困難であるといえる。

ドハティ増幅器以外の高効率増幅器として、高調波リアクション形増幅器（HRA：Harmonic Reaction Amplifier）[10]が提案されている（図2）。これまでに、1.7GHz帯、飽和電力34dBmにて最大電力付加効率75%を達成している[10]。HRAの特長は、高効率に加えて高出力であることから、HRAはFFPAの効率改善に有効な主増幅器の候補となる。

そこで、線形・高効率増幅器に関して深い見識を有する北海道大学野島 俊雄教授との共同研究により、HRAを主増幅器に用いたFFPAについて検討を行い、2GHz帯実験回路にて特性評価を実施した。

本稿では、FFPA構成の検討結果と実験結果について解説する。

2. 検討する高効率FFPA構成

本研究で検討した、主増幅器にHRAを用いたFFPA構成を図3に示す。本検討では、評価用実験回路として2GHz帯飽和出力20W級FFPAを構成した。主増幅器はプリアンプ

とHRA、補助増幅器はプリアンプと最終段増幅器にて構成した。最終段増幅器はA級増幅器である。ベクトル調整器は振幅調整を行う電圧制御型可変減衰器と、位相調整を行う電

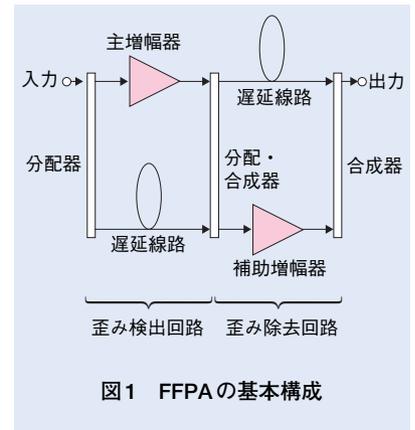


図1 FFPAの基本構成

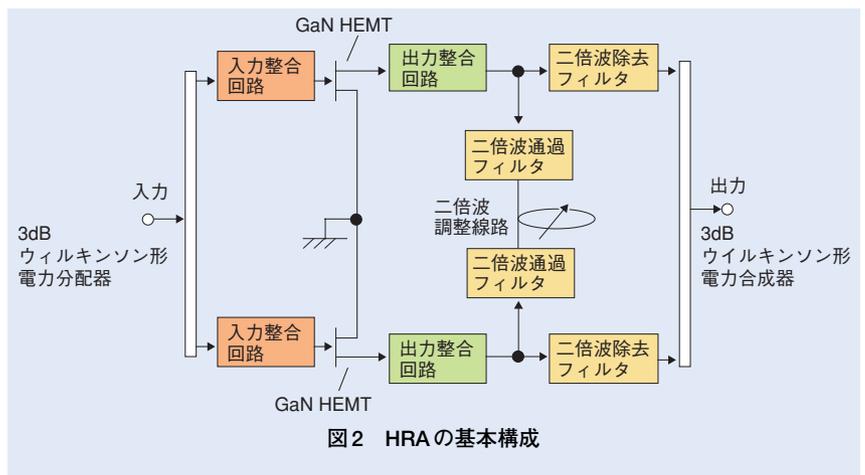


図2 HRAの基本構成

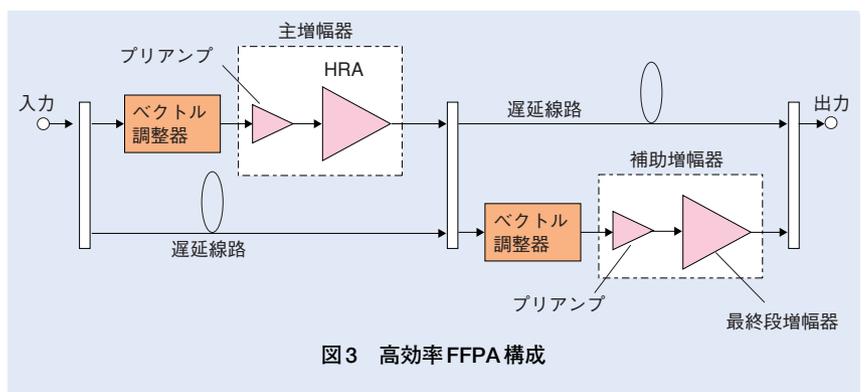


図3 高効率FFPA構成

*2 A級増幅器：増幅器構成法の1つであり、トランジスタのドレイン端子またはコレクタ端子の直流バイアス電流を飽和電流のほぼ1/2に設定したもの。A級増幅器の理論最大効率は50%であり、線形増幅が可能である。

*3 飽和点：増幅器の入出力特性にて、出力電力が飽和する点。

*4 出力バックオフ：一般に、増幅器の出力電力と基準となる出力電力との差。本稿では高効率増幅器を適用したことから、増幅器の出力電力と飽和出力電力の差と

する。
*5 ドレイン効率：増幅器出力電力と増幅器に供給した電力の比。

圧制御型可変移相器にて構成した。

HRAを構成するトランジスタには、近年、基地局用高出力マイクロ波半導体として、線形性と効率に優れる、窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ (GaN HEMT: Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor) [11]を用いた。HRAの設計では、基本波および二倍波をそれぞれ2.14GHzおよび4.28GHzに設定した。また、入力整合回路の整合周波数を2.14GHz、出力整合回路の整合周波数を2.14GHzと4.28GHzとした。HRAのドレイン効率を最大にするように二倍波調整線路の線路長を調整した。入力側電力分配器と出力側電力合成器は、それぞれ設計周波数が2.14GHzのウィルキンソン形電力分配器^{*6}と合成器を用いた。

3. 実験結果

試作した2GHz帯HRAは、利得22dB、飽和出力43.5dBm、最大電力付加効率68%を達成した。このとき、10W級GaN HEMTのバイアス条件はAB級^{*7}相当 (ドレイン電圧50V、ドレイン電流100mA)である。

歪み検出回路と歪み除去回路のベクトル調整は、歪み検出回路出力とFFPA出力のそれぞれをスペクトラムアナライザにて監視し、主波成分と帯域外歪み成分をそれぞれ最小にするように手動にて実施した。また、主増幅器出力とFFPA出力を切り替えてスペクトラムアナライザにて測定し、歪み成分改善量を測定した。FFPAの効率を測定するために、主増幅器と補助増幅器に印加する電

圧と電流を、それぞれ直流電圧計と直流電流計で測定した。入力信号は、中心周波数2.14GHz、帯域幅3.84MHz、ルートロールオフ係数^{*8}0.22のW-CDMAの送信信号1波を使用した。

FFPAは主増幅器の高効率増幅動作により生じる帯域外歪み成分を低減させることができるため、同一の隣接チャンネル漏洩電力比 (ACLR: Adjacent Channel Leakage power Ratio)を規定した場合には、より高効率の主増幅器を実現できる。主増幅器およびFFPAの隣接チャンネル漏洩電力比測定結果を図4に示す。ACLRの定義は文献[12]を参照されたい。FFPA出力電力39dBmにおいて、5MHz離調時にACLR-45dBcを達成した。このときのACLR改善量は15dBであった。さらに、出力電力40.8dBmにて10MHz離調時にACLR-50dBcを達成するとともに、ACLR改善量は7dBであった。

FFPA出力電力36.4dBmにおける

主増幅器出力およびFFPA出力のそれぞれのスペクトルを図5に示す。主増幅器出力のスペクトルでは、歪み成分の周波数依存性が観測されているが、FFPA出力のスペクトルでは、歪み成分の周波数依存性をほぼ抑圧している。

高効率増幅器を低出力バックオフで使用する場合、前述した歪み成分の周波数依存性のように、複雑な非線形歪みが発生する[13]。FF構成は、主増幅器の発生する複雑な歪み

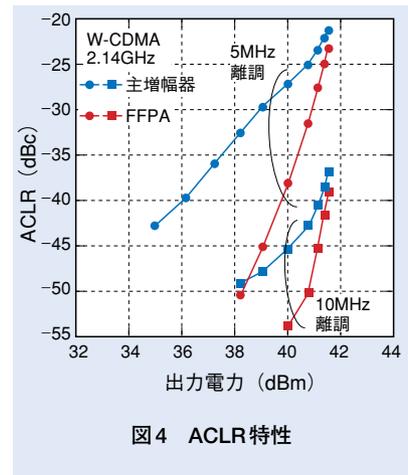


図4 ACLR特性

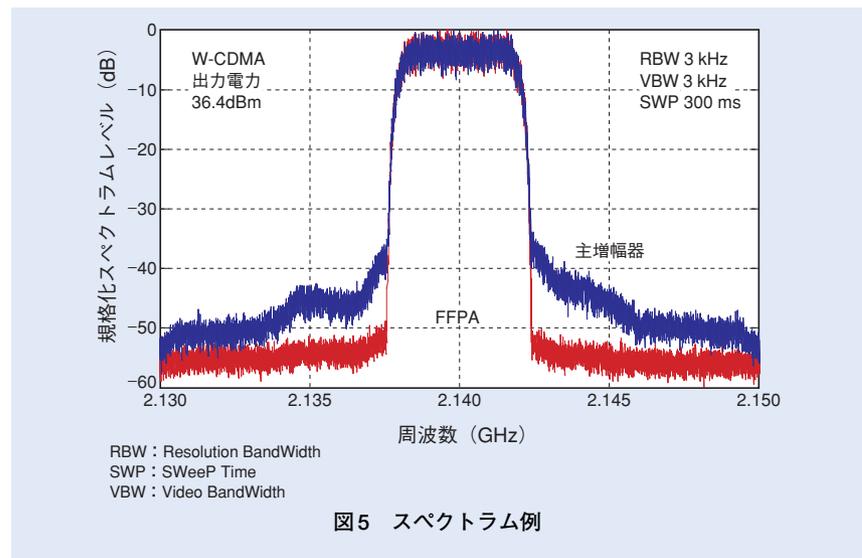


図5 スペクトラム例

*6 **ウィルキンソン形電力分配器**: 入力信号を複数の出力端子に電力分配する電力分配器の1つであり、一般に入力信号を等電力かつ等遅延に分配する。
 *7 **AB級**: トランジスタのドレイン端子またはコレクタ端子の直流バイアス電流を、

飽和電流のほぼ0に設定したB級バイアスと1/2に設定したA級バイアスの間に設定した動作条件。
 *8 **ルートロールオフ係数**: 送信信号の帯域を制限するフィルタの1つであり、フィルタの周波数特性を決める係数。

成分そのものを検出し、等振幅・逆位相にて、再度主増幅器出力に注入することで、このように複雑な歪み成分をも除去できる。このため、図5のように歪み成分の周波数依存性を抑圧することができる。

また、図示していないが、5MHz離調時にACLRが-45dBc以下となるFFPAの歪み補償帯域幅について、2.03~2.15GHzの120MHzが得られた。すなわち、FFPAの特長である広帯域歪み補償特性を確認できた。

主増幅器とFFPAの効率特性を図6に示す。ここでFFPAの効率は、FFPA出力電力と、主増幅器と補助増幅器の供給電力和の比とした。主増幅器の効率は、主増幅器出力電力と主増幅器供給電力の比とした。ただし、本稿ではベクトル調整器の消費電力はわずかであるため、効率計算では考慮していない。5MHz離調時にACLR-45dBcを達成するFFPA出力電力39dBmにおけるFFPAの効率および主増幅器の効率は、それぞれ19.3%および38%である。FFPAの効率は従来、10~15%[14]であることを考慮すると、HRAを用いて検討した構成は、従来構成と比較して効率を改善していることが分かる。

4. あとがき

FFPAの効率を改善するために、高出力にて高効率増幅可能なHRAを主増幅器に適用したFFPA構成を検討した。2GHz帯20W級FFPAを構成し、出力電力39dBm、5MHz離調時のACLR-45dBcにおいて、FFPA効率19.3%、歪み補償帯域幅

120MHzを達成した。HRAを用いたFFPA構成は、従来構成における効率10~15%と比較して、効率を4.3%以上改善した。本検討で達成したFFPA効率19.3%は、移動通信用基地局用20W級FFPAとしては、筆者らが知る限りもっとも高い。

今後は、マルチキャリアW-CDMA試験信号にて提案構成の特性評価を進めていく。

文献

- [1] N. Potheary : "Feedforward Linear Power Amplifier," Artech House, Boston, London, 1999.
- [2] S.C. Cripps : "Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design," Norwood, Artech House, 2002.
- [3] 野島 俊雄, 橋橋 祥一 : "移動通信超低歪多周波共通増幅器," 信学技報, RCS90-4, 1990.
- [4] 野島 俊雄, 山尾 泰監修 : "モバイル通信の無線回路技術," 電子情報通信学会 pp.152-155, 2007.
- [5] 大矢, ほか : "将来の高速大容量通信に向けた無線要素技術," 本誌, Vol.16, No.2, pp.24-30, Jul. 2008.
- [6] Y. Suzuki, T. Hirota and T. Nojima : "Highly efficient feed-forward amplifier using a Class-F Doherty amplifier," in Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Sympo. Digest, paper TU3B-3, pp. 77-80, Jul. 2003.
- [7] W.H. Doherty : "A new high efficiency power amplifier for modulated waves," Proceeding of the IRE, Vol. 24, No. 9, pp. 1163-1182, Sep. 1936.
- [8] K.J Cho, J.H Kim and S. P. Stapleton : "A highly efficient Doherty feed-forward linear power amplifier for W-CDMA base-station applications," IEEE Trans. Micro. Theory Tech., Vol. 53, No. 1, pp. 292-300, Jan. 2005.
- [9] T. Ogawa, T. Iwasaki, K. Horiguchi, M. Nakayama and H. Kurebayashi : "High efficiency feed-forward amplifier using RF predistortion linearizer and the modified Doherty amplifier," in Proc. IEEE MTT-S Int. Micro. Sympo. Digest, paper WE5A-5, pp. 963-966, Jun. 2004.
- [10] S. Nishiki and T. Nojima : "Harmonic reaction amplifier - A novel high efficiency and high-power microwave amplifier -," in Proc. IEEE MTT-S Int. Micro. Sympo. Digest, pp. 963-966, 1987.
- [11] T. Kikkawa and K. Joshin : "High Power GaN-HEMT for Wireless Base Station Applications," IEICE Trans.on Electron., Vol. E89-C, No. 5, pp. 608-615, May 2006.
- [12] UTRA(BS)FDD : Radio Transmission and Reception, 3GPP TS25.104, 1999.
- [13] S. Mizuta, Y. Suzuki and Y. Yamao : "A new adjustment method for the frequency-dependent IMD compensator of the digital predistortion linearizer," in Proc. IEEE Radio Wireless Sympo., pp. 252-258, 2006.
- [14] F. H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popovic, N. Potheary, J. F. Sevic and N. O. Sokal : "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," IEEE Trans. Micro. Theory Tech., Vol. 50, No. 3, pp. 814-826, Mar. 2002.

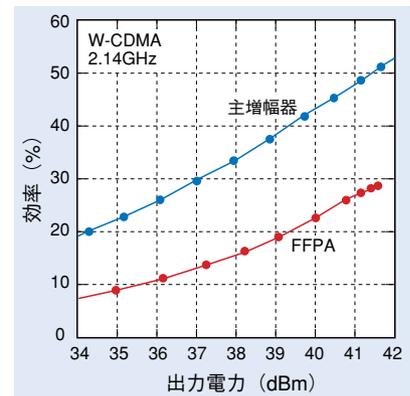


図6 効率特性