

携帯無線端末向け マルチモード小型ドハティ電力増幅器

Multimode Doherty Power Amplifier Module for Mobile Terminals

加藤 貴之 山口 恵一 栗山 保彦
 ■ KATO Takayuki ■ YAMAGUCHI Keiichi ■ KURIYAMA Yasuhiko

携帯電話などの小型無線端末では、連続通話時間の延長という観点から電力増幅器の高効率動作が求められている。東芝は、電力増幅器の高効率化技術の一つであるドハティアンプの技術開発に取り組み、W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 端末向けに、世界最小レベルのサイズである4 mm角の小型ドハティ電力増幅器を開発した。最大効率改善量が得られる出力電力で、従来21%であった電力付加効率を36%に高効率化するとともに、W-CDMAの上り信号に加え、次世代無線通信システムに用いられるOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号にも対応したマルチモード動作を実現している。

Improvement of the power-added efficiency (PAE) of power amplifiers for mobile terminals is indispensable for calls of long duration.

Toshiba has developed a 4 mm-square miniaturized Doherty power amplifier module for wideband code division multiple access (W-CDMA) mobile terminals. The PAE of the Doherty power amplifier module has been improved from the theoretical PAE of a Class B amplifier; that is, from 21% to 36%. Furthermore, multimode operation corresponding to the uplink of W-CDMA and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals for future mobile communication systems has been realized on the Doherty power amplifier module.

1 まえがき

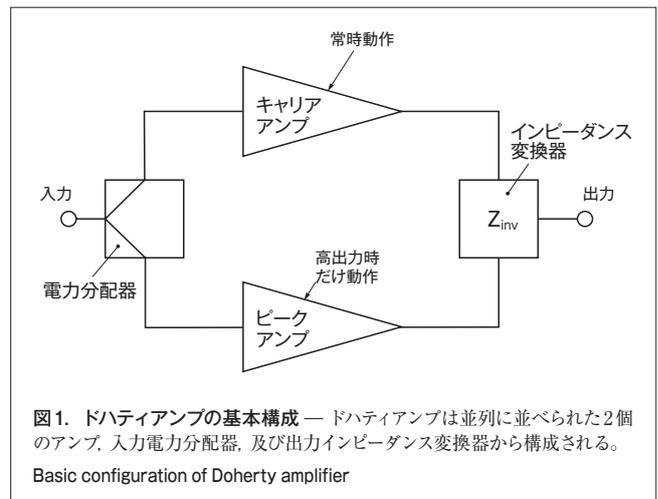
無線通信システムにおけるデータ伝送速度は、年々高速化しており、送信信号のPAPR (Peak-to-Average Power Ratio) ^(注1)が増加している。信号のPAPRが増加すると、携帯電話などの小型無線端末においてもっとも消費電力が大きい電力増幅器の動作効率が大きく劣化することから、連続通話時間が短くなるという問題が生じる。このため、小型無線端末では電力増幅器の動作効率改善が技術課題となっている。

東芝は、この技術課題を解決するため、携帯無線端末向けのドハティ電力増幅器を開発し、W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 用としては世界最小レベルである4 mm角のモジュール化を実現した。更に、W-CDMA信号に加え、よりPAPRの大きな次世代無線通信システムに用いられるOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号も高効率に増幅できるマルチモード化技術も併せて開発した。以下にその概要を述べる。

2 ドハティアンプ技術の概要

ドハティアンプ技術は、電力増幅器の高効率化技術の一つであり、1936年にW.H.Dohertyによって考案された⁽¹⁾。ドハティアンプは、並列に配置されたキャリアアンプとピークアンプ

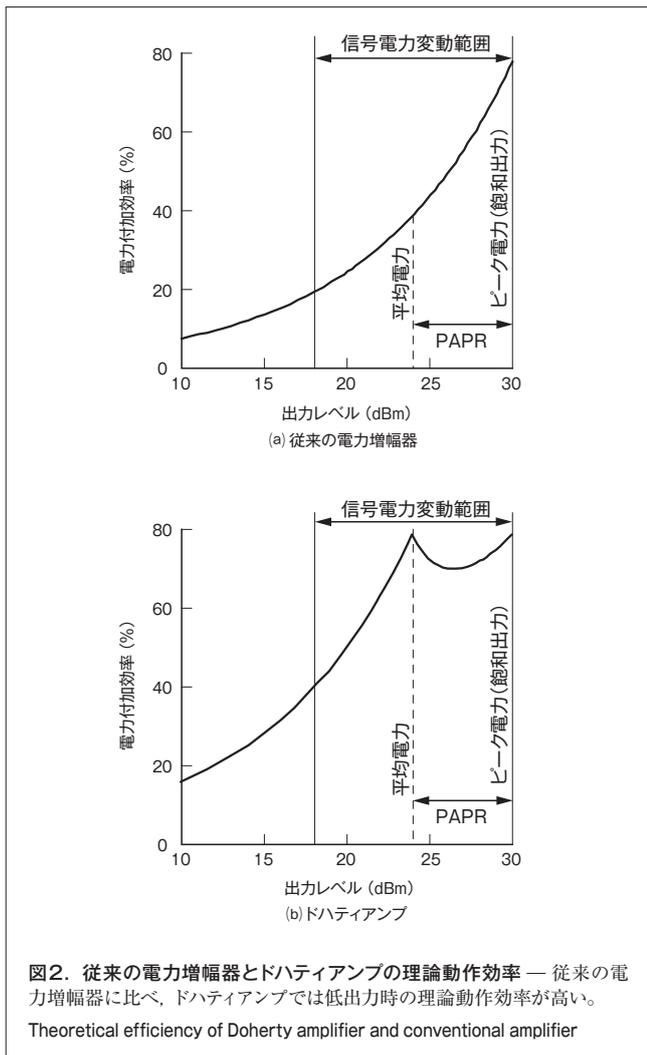
(注1) 信号の単位時間当たりの平均電力に対する瞬時ピーク電力の比で、一般的にPAPRが大きいほど電力増幅器の動作効率は悪くなる。



プ、それらに入力電力を分配するための電力分配器、及び2個のアンプの出力インピーダンスを調整するインピーダンス変換器から構成される(図1)。

ドハティアンプは、高出力時には2個のアンプを同時に動作させるが、低出力時にはピークアンプの動作を休止させ、キャリアアンプだけを動作させることで消費電力を低減できる。この動作により、ドハティアンプは、飽和出力から大きく下がった出力電力のときでも高効率に動作できる。

従来の電力増幅器と理想的なドハティアンプの出力電力に対する理論動作効率を図2に示す。従来の電力増幅器は、図2(a)に示すように飽和出力時に最大動作効率を達成する



が、出力電力が減少するに従って動作効率が急激に劣化する特性を持つ。一方、ドハティアンプは図2(b)に示すように飽和出力時に加えて、飽和出力から6 dB低い出力電力のときにも最大動作効率を達成できる。電力増幅器が信号をひずませることなく増幅するためには、飽和出力電力と信号のピーク電力とを一致させる必要がある。このことから従来の電力増幅器では、PAPRの大きな信号に対しては平均動作効率が大きく下がってしまうが、ドハティアンプでは高い平均動作効率を達成できることになる。

しかし、ドハティアンプは入力側に電力分配器、出力側にインピーダンス変換器を必要とするため、それらの回路を小型かつ低損失に実現することが困難であった。従来は、携帯電話基地局や放送局用送信機など、比較的大型サイズの電力増幅器が利用できる送信機で盛んに開発、実用化されてきている⁽²⁾。

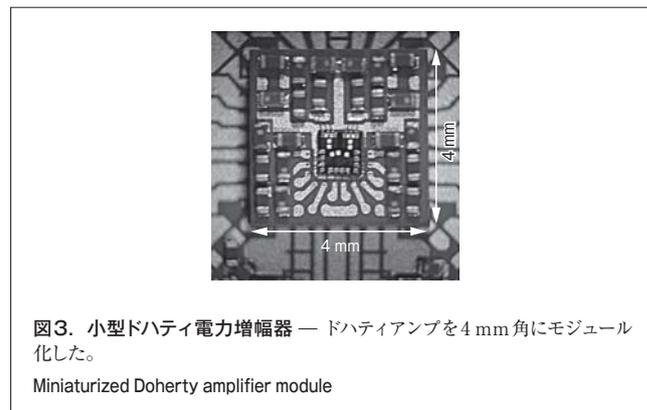
当社は、小型無線端末への適用に向けて、技術課題である入力電力分配器と出力インピーダンス変換器の小型・低損失化を実現することによりドハティアンプの小型化技術を開発した。この技術を基に、W-CDMA 端末用ドハティアンプ電力増幅器

を世界最小レベルの4 mm角で実現した。同時に、OFDM信号にも対応させるため、ドハティアンプのマルチモード化技術も新たに開発した。このマルチモード化技術により、複数の変調信号を利用する次世代無線通信システムや、複数の無線通信システムに利用できるソフトウェア無線機などにも、ドハティアンプを適用することが可能になる。

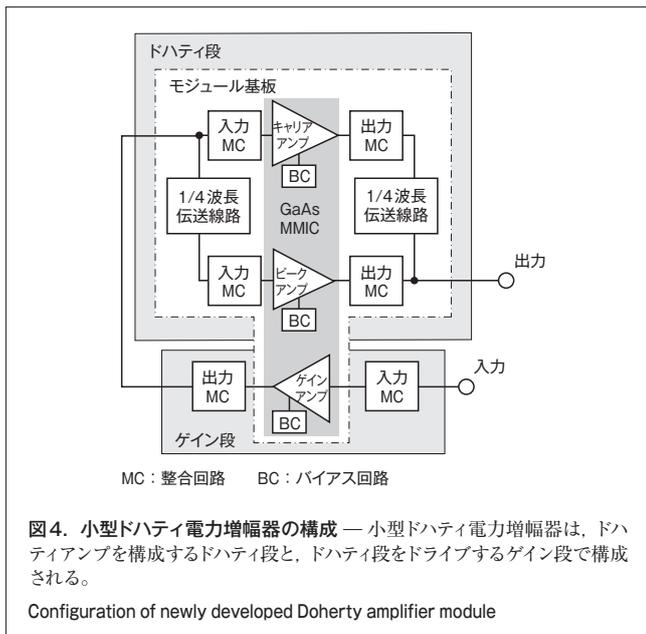
3 マルチモード小型ドハティ電力増幅器の開発

3.1 ドハティアンプの小型化技術

今回、ドハティアンプ小型化のために、電磁界シミュレーションと回路シミュレーションを融合したドハティアンプ用の小型モジュール基板設計技術を開発した⁽³⁾。入力電力分配器と出力インピーダンス変換器は、多層セラミックモジュール基板の内層に形成した1/4波長伝送線路を用いる。開発した技術を用いて、モジュール基板の層構成と配線レイアウト、伝送線路の線路幅や特性インピーダンスなどの設計パラメータを、アイソレーションなどの電気特性と基板の物理寸法が目標値を満たすように最適設計した。その結果、低損失でかつ4 mm角の小型ドハティ電力増幅器を実現した(図3)。



開発した小型ドハティ電力増幅器の構成を図4に示す。ドハティ電力増幅器は、ドハティアンプを構成するドハティ段と、ドハティ段を駆動するゲイン段から構成される。ドハティ段に用いる二つのアンプとゲイン段に用いるアンプは、ガリウムヒ素ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(GaAs-HBT) プロセスで製作し、一つのMMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuits) に集積化することでモジュールサイズを小型化した。各アンプの入出力整合回路は、調整の容易さと低損失特性を考慮して、すべて0603 (0.6 × 0.3 mm) サイズの表面実装部品で構成した。ゲイン段の入出力整合回路は実装面積のつごう上、今回は評価基板上に実装した。ドハティ段に用いる入力電力分配器と出力インピーダンス変換器は、多層セラミックモジュール基板の内層に形成した。



3.2 ドハティアンプのマルチモード化技術

開発したドハティ電力増幅器では、マルチモード動作を実現するために二つの技術を導入している。一つは、従来利用されてきたバイアス切替え技術であり、もう一つは、今回新たに開発した入出力整合回路の共用化技術である⁽⁴⁾。

バイアス切替え技術とは、変調信号のPAPRに応じてアンプに供給するバイアス電流値を切り替える技術である。一般に、アンプに供給するバイアス電流値を増加させるとアンプの線形性は良好となるが動作効率が低下する。逆に、バイアス電流値を減少させるとアンプの線形性は劣化するが動作効率が改善されることから、信号のPAPRに応じたアンプの線形性と動作効率の最適化が可能となる。

一方、入出力整合回路の共用化技術とは、ドハティアンプの動作を実現するために必要な入出力整合条件を、増幅する変調信号が異なる場合でも同一の整合回路で実現する技術である。

ドハティアンプで使用するピークアンプは特別な制御信号を必要とせず、入力電力が大きくなるにつれて自己バイアスにより休止状態から動作状態へと移り変わる。これより、ピークアンプに分配される入力電力からピークアンプの動作状態とドハティアンプの特性が決定される。今回のドハティ電力増幅器では、伝送線路を使用した入力電力分配器を使用しており、二つのアンプに分配される入力電力はアンプの入力整合条件に依存して変化する。このため、ドハティアンプの理想的な動作を実現するには、入力整合条件を最適化する必要がある。

また、二つのアンプに対する出力整合条件は、ピークアンプの状態に応じて影響し合い動的に変化することから、ドハティアンプ特有の高効率動作を実現するには、二つのアンプに対する出力整合条件を動的な変化に対して最適化することが必須となる。

新たに開発した入出力整合回路の共用化技術では、各変調信号に対するアンプのロードプル・ソースプル測定結果と回路シミュレーションを融合させ、入出力整合回路の最適な回路トポロジーと定数を決定した。この技術を用いることで、複数の変調信号に適した入出力整合条件を実現することができ、ドハティアンプのマルチモード動作を実現した。

今回開発したドハティ電力増幅器は、W-CDMAの上り信号として利用されているHPSK (Hybrid Phase Shift Keying) 信号と、OFDM 64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 信号の両者に対応するように設計した。OFDM 64QAM信号は、次世代の無線通信システムで使用されるが、今回は無線LAN規格IEEE802.11g (米国電気電子技術者協会規格802.11g) で利用されるOFDM信号を代用した。信号のPAPRは、それぞれHPSK信号が3 dB、OFDM 64QAM信号が10 dBである。

4 マルチモード小型ドハティ電力増幅器の特性評価

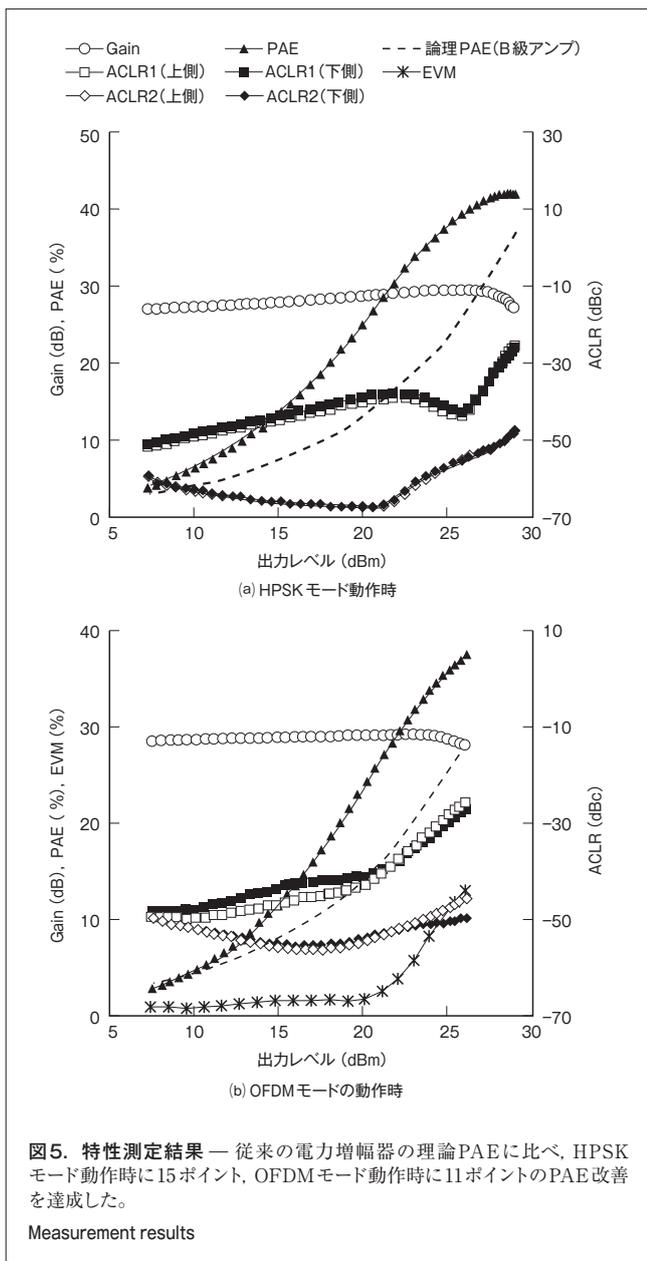
マルチモード小型ドハティ電力増幅器の目標特性を表1に示す。ここでは、HPSK信号を増幅する動作状態をHPSKモード、OFDM 64QAM信号を増幅する動作状態をOFDMモードと呼ぶ。表1の目標特性は、W-CDMA 端末用電力増幅器、及びIEEE802.11g用電力増幅器の性能を基に決定した。

項目	目標値	
	HPSKモード	OFDMモード
最大出力電力 (P_{max})	> 26.5 dBm ^{(*)1}	> 20.0 dBm ^{(*)2}
電力利得 (Gain)	> 25 dB	> 25 dB
隣接チャンネル漏洩電力比 (ACLR1)	<-38.0 dBc (5 MHz 離調)	<-38.0 dBc (10 MHz 離調)
次隣接チャンネル漏洩電力比 (ACLR2)	<-50.0 dBc (10 MHz 離調)	<-50.0 dBc (20 MHz 離調)
電力付加効率 (PAE)	> 40 % ^{(*)3}	> 20 % ^{(*)3}

* 1 : ACLR1 ≤ -38.0 dBc * 2 : EVM ≤ 3.0 % * 3 : 最大出力時

HPSKモード時の電力利得 (Gain)、電力付加効率 (PAE)、隣接チャンネル漏洩 (ろうえい) 電力比 (ACLR1)、次隣接チャンネル漏洩電力比 (ACLR2) の測定結果を図5(a)に示す。OFDMモード動作時のGain, PAE, ACLR1, ACLR2、及び変調精度 (EVM: Error Vector Magnitude) の測定結果を図5(b)に示す。図5の(a), (b)共に、飽和出力時のドレイン効率がドハティ電力増幅器と等しい従来の電力増幅器 (B級アンプ) の理論電力付加効率を、比較のために示している。

HPSKモード動作時では、理論上、もっとも高い効率改善効果が得られる飽和出力電力から6 dB低い出力電力において、従来の電力増幅器の理論PAEが21 %であるのに対し、



ドハティ電力増幅器の測定結果では36%のPAEを達成した(図5(a))。また、OFDMモード動作時では、EVM ≤ 3%を満たす21 dBm出力時に、従来の電力増幅器の理論PAEが16%であるのに対し、ドハティ電力増幅器の測定結果では27%のPAEを達成した(図5(b))。すなわち、HPSKモードでは15ポイント、OFDMモードでは11ポイントのPAE改善量を達成しており、これを連続通話時間に換算すると約10%通話を延長できる特性改善となる。

図5に示した特性測定結果のサマ리를表2にまとめる。各項目で表1の目標値を満足する結果を得た。

5 あとがき

HPSK信号とOFDM 64QAM信号に対応した携帯無線端末向けマルチモード小型ドハティ電力増幅器を開発し、従来の電力増幅器に比べて約10%の通話時間延長に相当する高効率特性を得た。今後も、電力増幅器だけでなく、無線送受信機としての高効率・低消費電力化について技術開発を行っていく。

文献

- (1) Doherty, W. H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves. Proceeding of the IRE. 24, 9, 1936, p.1163-1182.
- (2) Takenaka, I., et al. "A 240 W Doherty GaAs-power FET amplifier with high efficiency and low distortion for W-CDMA base stations". MWE 2004 Workshop Digest, WS12-1, 2004, p.299-304.
- (3) Kato, T., et al. A 4-mm-Square Miniaturized Doherty Power Amplifier Module for W-CDMA Mobile Terminals. IEICE Transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences. E90-A, 2, 2007, p.310-316.
- (4) Kato, T., et al. A Doherty Power Amplifier Module for Mobile Terminals with Variable Linearity Function. Asia-pacific microwave conference proceedings, 3, 2006, p.1881-1884.

表2. 特性測定結果のサマリ

Summary of measurement results

項目	測定値	
	HPSKモード	OFDMモード
最大出力電力 (P _{max})	> 26.7 dBm ^{(*)1}	> 21.0 dBm ^{(*)1, (*)2} > 22.5 dBm ^{(*)1, (*)3}
飽和出力電力 (P _{sat})	30 dBm	
電力利得 (Gain)	> 27 dB	> 28 dB
隣接チャネル漏洩電力比 (ACLR1)	<- 38.0 dBc (5 MHz離調)	<- 39.5 dBc ^{(*)2} (10 MHz離調)
次隣接チャネル漏洩電力比 (ACLR2)	<- 52.5 dBc (10 MHz離調)	<- 52.5 dBc ^{(*)2} (20 MHz離調)
電力付加効率 (PAE)	41% ^{(*)4}	27% ^{(*)2, (*)4} 30% ^{(*)3, (*)4}

* 1 : ACLR1 ≤ -38.0 dBc * 2 : EVM ≤ 3.0% * 3 : EVM ≤ 5.0%
* 4 : 最大出力時



加藤 貴之 KATO Takayuki

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー研究主務。
マイクロ波用電力増幅器の開発及び無線送受信機のシステム設計に従事。電子情報通信学会会員。
Mobile Communication Lab.



山口 恵一 YAMAGUCHI Keiichi, D.Eng.

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー主任研究員, 工博。
マイクロ波・ミリ波用高周波回路及び電力増幅器, リニアライザの設計・開発に従事。電子情報通信学会会員。
Mobile Communication Lab.



栗山 保彦 KURIYAMA Yasuhiko

セミコン社 ディスクリート半導体事業部 小信号半導体製品技術部参事。化合物半導体を用いた電力増幅器の設計・開発に従事。
Discrete Semiconductor Div.