

W-CDMA 端末用 電力増幅器モジュール

Power Amplifier Module for W-CDMA Mobile Cellular Phones

山口 恵一

YAMAGUCHI Keiichi

上野 豊

UENO Yutaka

長沢 弘憲

NAGASAWA Hironori

W-CDMA(Wideband-Code Division Multiple Access)端末向けに小型で高効率の電力増幅器モジュールを開発した。これは、体積 0.047cm^3 で 47% の電力付加効率を持ち、また、出力電力 27.5 dBmW、電力利得 26 dB、電源電圧 3.6 V と W-CDMA 端末向けとして十分な性能を実現している。このモジュールでは、ひずみが少なく高信頼性の、InGaP 系 HBT(リン化インジウム-ガリウム系の異種半導体接合バイポーラトランジスタ)を採用したほか、回路内部の損失を最適配分することで小型・高効率を両立している。

Toshiba has successfully developed a miniaturized, high-efficiency, two-stage power amplifier module employing an InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistor (HBT) for 1.95 GHz-band W-CDMA mobile cellular phones. This power amplifier module with a small volume of 0.047cm^3 ($7.0 \times 7.0 \times 0.95\text{mm}$) exhibited high power added efficiency (PAE) of 47% with an adjacent channel leakage power ratio (ACLR) of -38 dBc at an output power level of 27.5 dBm under a supply voltage of 3.6 V.

1 まえがき

2001年10月に首都圏でサービスが開始されたIMT-2000(International Mobile Telecommunications-2000)は、高ビットレートモバイルインターネットサービスを実現する新たな携帯電話規格である。IMT-2000は、従来の携帯電話システムに比べて数十倍高速な通信が可能である。これにより、品質の高い音声通話、電子メール、オーディオ、高解像度の静止画、ビデオの送受信が実現できる。また、IMT-2000では、携帯電話の型にとられない、PC(パソコン)カード型、腕時計型、PDA(携帯情報端末)型、機器内蔵型など、多種多様な端末形態が提案されている。

一方で、従来の携帯電話システムも規格拡張により目覚ましく発展しており、IMT-2000に肉薄するサービスも出現し始めている。IMT-2000端末には、高ビットレートサービスを享受するために従来の携帯電話にはない新規機能が数多く実装されるが、このような状況にあって、従来の携帯電話と同等の連続通話時間、デザイン、寸法、質量、コストを備えるIMT-2000端末の開発が求められている。このため、端末用個別部品に対する要求はますます厳しさを増している。

当社は、IMT-2000の一つであるW-CDMA方式の端末の連続通話時間、デザイン、寸法、質量、コストを改善できる小型、低消費電力の電力増幅器モジュールを開発した(図1)。以下に、開発した電力増幅器モジュールについて、特長と設計コンセプトを述べる。

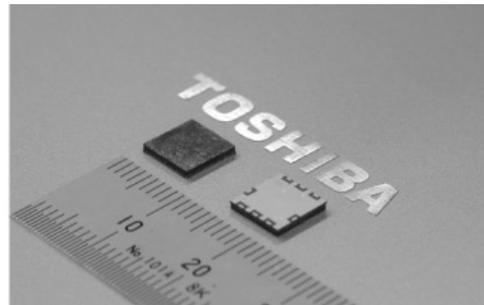


図1. IMT-2000 端末用電力増幅器モジュール - 体積 0.047cm^3 で 47% の電力付加効率を実現した。

Power amplifier module for IMT-2000 mobile terminals

2 電力増幅器モジュールの差異化要素

ここでは、電力増幅器モジュールの役割、端末の中での位置づけ、差異化となる重要な性能について述べる。

2.1 高効率化

電力増幅器は、微弱な入力信号と相似な大電力の信号を、電池から供給される電力で新たに作り直して出力する部品である。出力信号電力と入力信号電力の比が利得、差が付加電力であり、付加電力と電池から供給した電力(消費電力)の比が効率である。電力増幅の過程で電力損失を生じるため、消費電力の大半は出力信号にはならず、電力増幅器内部で熱として消費される。携帯電話の場合、電力増幅器の

入力端子は搬送周波数の変調信号を発生する回路に接続され、出力端子はアンテナに接続されており、変調信号は電波となってアンテナから放射される。しかし、効率が40%程度なので、電波になるのは40%で、60%は熱になる。

電力増幅器は、端末全体の半分程度の電力を消費することもあり、その消費電力は通話時間、電池の寸法・質量に大きく反映される。例えば、高効率の電力増幅器であれば、小型・軽量で小容量の電池でも十分な通話時間が確保できる。このため、電力増幅器の高効率化は、端末の質量、寸法、デザイン、通話時間の改善につながるため、重要な差異化要素である。

2.2 薄型化

近年の携帯電話は折畳み式が主流であり、薄型化が差異化要素となっている。

携帯電話の内部では、いくつかの機能部品が数段積み重なるように実装されている。各階層の高さは、もっとも背の高い部品で決定される。階層内の部品高の違いは、低い部品の上部にむだなスペースを生じ、端末体積をむだに費やす原因となる。

回路基板上で、もっとも背の高い部品が電力増幅器モジュールである。ほとんどの部品が1mm前後の高さであるのに比べ、電力増幅器モジュールは2mm程度もある。背の高い部品には、フィルタや発振器もあるが、フィルタはチップ部品への置換えが進んでおり、発振器もIC内蔵化の動きがある。回路基板上の部品の高さをそろえ、端末の薄型化を実現するには、電力増幅器モジュールの薄型化が必要である。

2.3 小型化

液晶画面の大型化やキーの押しやすさなど、使い勝手の観点から、携帯電話の小型化は幅や長さの短縮から薄型化に移行したかに見える。しかし、多様化する端末形態への対応と、端末の寸法増加を伴わない機能追加の実現に、部品レベルでの実装面積の削減は依然として重要である。

電力増幅器モジュールの小型化の対象は、モジュールそのものと、付帯部品を含めた実装面積である。最近では、端末のマルチバンド化が進み、複数の電力増幅器を搭載することが増えている。そのため、電力増幅器モジュールの小型化は、今後いっそう重要度を増すと考えられる。

2.4 送信電力制御対応

W-CDMAでは、基地局と端末の距離や電波の状況に応じて送信電力を制御している。2.1節の高効率化では電力増幅器一般に要求される高効率化の重要性について述べたが、ここでは、W-CDMA特有の送信電力制御が行われる実使用環境における実効的な低消費電力化について述べる。

W-CDMA 端末の送信電力は時々刻々と変化するが、その確率が最大となる電力は、最大出力電力よりも15dB程度低い値であると考えられている。一般に、電力増幅器の効率

は、出力電力の低下に伴い劣化する。このため、単に最大出力時の効率だけを伸ばした電力増幅器よりも、広範囲に行われる送信電力制御の条件下で、平均して効率を高めた電力増幅器のほうが、実効的な消費電力が少ない。したがって、W-CDMA用の電力増幅器モジュールには、低出力時の効率劣化を抑制する機構が要求されるとともに、これが重要な差異化要素となっている。

3 電力増幅器モジュールの設計

3.1 小型・薄型化

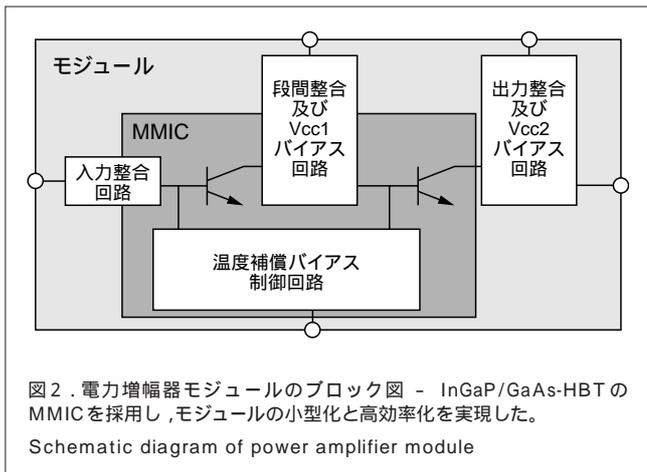
一般的な電力増幅器は、トランジスタに電界効果トランジスタ(FET)を利用しているため、電源用外付け回路として、電源スイッチと負電源発生回路が必要であった。これらの回路の実装面積は、電力増幅器モジュールの面積とほぼ同じであり、小型化に不利であった。

当社はトランジスタに電源用外付け回路が不要なバイポーラトランジスタを採用した。W-CDMAは1.95GHzの高周波帯を使用するため、高速動作が可能なInGaP/GaAs HBT(リン化インジウム-ガリウムとヒ化ガリウムの異種半導体接合バイポーラトランジスタ)を採用した。InGaP/GaAs HBTは従来のAlGaAs/GaAs HBT(ヒ化アルミニウム-ガリウムとヒ化ガリウムのHBT)に比べて、高電流密度における信頼性が高いことで知られており、電力増幅器に適している。

HBTはFETに比べて単位素子面積当たりに流せる電流が多く、同じ電力を扱うために必要な半導体チップ面積が少なく済む。また、HBTはFETに比べて電力利得が高いため、通常3段必要な増幅回路を2段にできる。これにより、モジュール内部の部品点数を削減できる。

更に部品点数を削減するために、GaAs基板上に電力増幅用トランジスタのほかに入力整合回路の一部と、段間整合回路、バイアス回路を集積化したモノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)を採用した。バイアス回路は、従来外付けであった電源用外付け回路に相当する機能を持ち、加えて、温度補償機構も備え、電力増幅器モジュールの特性の温度変動を抑えている。当社が開発した電力増幅器モジュールのブロック図を図2に示す。

一般的な電力増幅器モジュールは、FETだけが載った半導体チップ、20数点のチップ部品、半導体チップを収めるくぼみを持った多層セラミック基板で構成されるため、小型・薄型化は困難であった。MMICの採用により電力増幅器モジュール内の部品を7個のチップコンデンサに抑え、単層セラミック基板の利用を可能にし、モジュールの小型・薄型化を実現した。モジュールの外形寸法は7mm×7mm×0.95mm、体積は0.047cm³である。



3.2 高効率化

電力増幅器モジュールの高効率化を図るため、効率劣化要因をデバイス内部損失、直流回路損失、高周波回路損失の三つに分類して検討した。数パーセント刻みの地道な効率改善は、これら三つの要因を総合的に最適化することで実現した。また、送信電力制御下での実使用環境における実効的な低消費電力化は、低出力時の動作条件を変更することで実現した。

3.2.1 デバイス内部損失 デバイス内部損失とは、電力増幅に伴う不可避な効率劣化で、理論的な限界である。先に挙げた三つの中でもっとも大きな劣化要因である。

デバイス内部損失を最適化するには、トランジスタに与える直流電源電圧と電流(バイアス条件)、高周波の出力インピーダンス(負荷条件)、交流電圧振幅と電流振幅(出力電力)を素子寸法ごとに調整する。パラメータが多く、非常に煩雑で、時間を要する作業である。最適条件は、自動インピーダンスチューナシステムと呼ばれる特殊な測定系を用いて求めた。実験で得られた最適インピーダンスを与える整合回路を、電磁界シミュレーションを併用した回路シミュレーションを用いて、モジュール基板上に作製した。

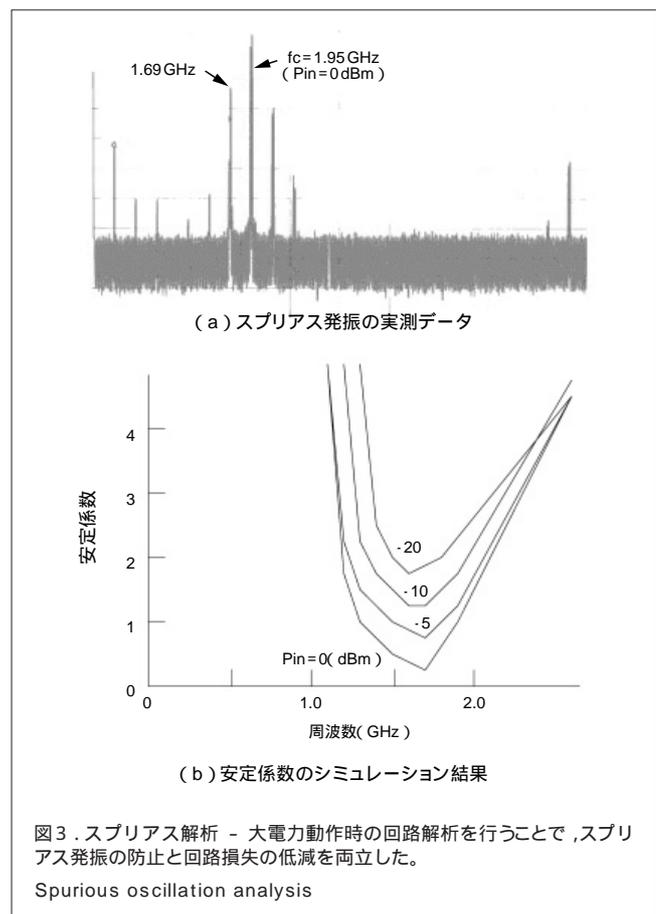
3.2.2 直流回路損失 直流回路損失は、電源回路の電圧降下が原因で、主に最終段の電源用配線で発生する。電力増幅器モジュールの消費電流は数百mA程度あり、数百mの回路抵抗でも0.1V程度の電圧降下を招く。これは1%の効率劣化に相当する。このため、回路の配線幅と配線長を極力低抵抗になるように設計した。

3.2.3 高周波回路損失 高周波回路損失は、整合回路の高周波損失によるものである。一般的なW-CDMA用電力増幅器の条件では、出力整合回路の0.1dBの損失が1%の効率劣化に相当し、段間整合回路の1dBの損失が1%の効率劣化に相当する。損失は部品の抵抗成分により発生してしまうものと、発振防止のために意図的に与えるものに分類される。整合回路の低損失設計はもちろん、発振

防止用の安定化抵抗の最適化についても検討した。

電力増幅器モジュールは、最大出力時に負荷インピーダンスを変化させても、発振・破損しないことが要求される。信号が微弱な場合、発振の可能性は、回路固有の安定係数と呼ばれる値を計算することで予測できる。安定係数が1以下になると発振の可能性がある。しかし、この方法は高電力で動作する電力増幅器の発振の予測には向かない。そこで、従来は設計マージンを考慮し、経験的に安定係数を設定し、それを満足するまで回路に損失を与えていた。今回の設計では、高電力動作時の安定係数を求め、必要な損失だけを回路に与えることで、効率の劣化を必要最低限に抑えた。

スプリアス発振解析の一例を紹介する。実測したスプリアスのスペクトルを図3(a)に示す。入力電力レベル(Pin)が0dBm以上で1.95GHzの信号波の近傍1.69GHzにスプリアス発振が現れ、周辺に電力増幅器の非線形性により生じた複数のスペクトルも観測された。安定係数の解析結果を図3(b)に示す。入力信号レベル(Pin)の増加に伴い安定係数が低下し、-5dBm入力時には発振の可能性がある1以下になっている。安定係数がもっとも低い周波数は1.7GHzであり、周波数、入力電力レベルとも実験結果とよく一致している。



3.2.4 送信電力制御対応 送信電力制御の下では、最大出力まで電力を出す必要がない場合が多い。また、電力増幅器モジュールが不要になるほど出力電力が絞られることもある。このため、電力増幅器による電力付加量を調整し、むだな電力を付加させずに、消費電力を抑える必要がある。

一般に電力増幅器は、ひずみを基準値以下に抑制するために、バイアス電流と呼ばれる電流をトランジスタに流している。この電流は電力増幅には寄与しないため、効率劣化の要因となる。出力電力に比例して大きなバイアス電流が必要となるため、最大出力時のバイアス電流に固定して利用するのが一般的である。このため、低出力時に効率が劣化したり、ひずみが減少して基準値に対して余裕がでくる。

HBTはバイアス電流により付加電力を制御できる。すなわち、低出力時の過剰なバイアス電流を削減するとともに、不要な電力付加を抑制することが可能である。

4 測定結果

開発した電力増幅器モジュールの入出力特性を図4に示す。測定周波数は1.95 GHz、電源電圧は3.6 Vである。出力電力(Pout) 27.5 dBmにて、電力付加効率(PAE) 47%、

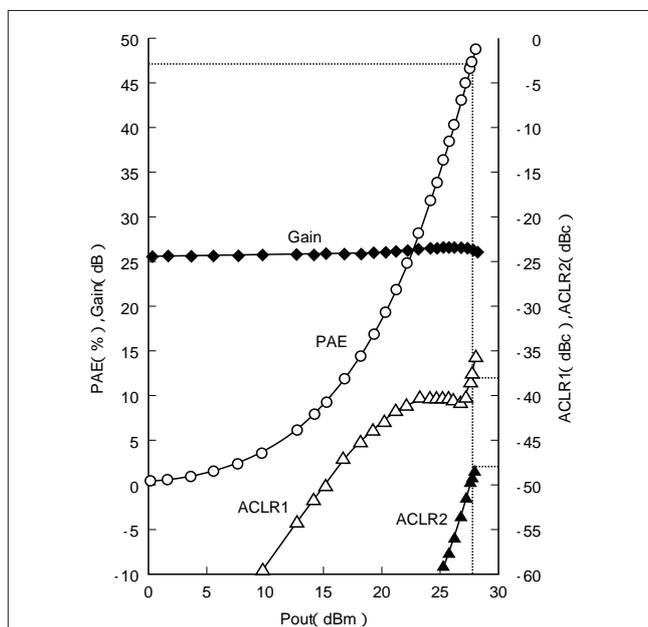


図4. 電力増幅器モジュールの入出力特性 - 出力電力27.5 dBmにて電力付加効率47%を達成した。

Measured ACLR, PAE, and gain of power amplifier module

利得(Gain) 26 dBを得た。10 MHz離調の隣接チャネル漏えい電力(ACLR1)は-38 dBc, 同20 MHz離調(ACLR2)は-48 dBcである。

送信電力制御でもっとも確率密度が高いと考えられる出力電力10 dBmWでは、ベースバイアス制御により消費電流を70%に削減できた。また、-10 dBmWでは10%にまで削減できた。ベースバイアス制御により、送信電力制御を考慮した消費電力は、25%から50%の削減効果があることが確認できた。また、遮断時のリーク電流は1 μA以下であった。

5 あとがき

InGaP/GaAs HBTを用いたW-CDMA 端末向けの電力増幅器モジュールを開発した。MMICの採用により、外形寸法7.0 mm × 7.0 mm × 0.95 mm、体積0.047 cm³と超小型、薄型ながら、隣接チャネル漏えい電力-38 dBcで電力付加効率47%、出力電力27.5 dBmW、利得26 dBを達成した。

最後に、ここで述べた電力増幅器モジュールの量産モデルを紹介する。製品の“S-AL51”では、モジュールの再設計により小型・薄型化を追求し、外形寸法6.0 mm × 6.0 mm × 1.15 mm、体積0.041 cm³を実現した。この電気特性は、隣接チャネル漏えい電力-41 dBcで電力付加効率47%、出力電力26 dBm、利得26 dB、アイドル電流40 mAであり、世界最小・最高性能を実現している。既にサンプル出荷を開始しており、2002年第3四半期から、月産50万個で量産の計画である。今後も、W-CDMA向け電力増幅器モジュールの小型化、高性能化に注力していく。



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 研究主務、工博。高周波回路設計・実装の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。

Mobile Communication Lab.



上野 豊 UENO Yutaka

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 小信号デバイス統括部主務。高周波用化合物半導体デバイスの製品開発に従事。

Discrete Semiconductor Div.



長沢 弘憲 NAGASAWA Hironori

東芝エルエスアイシステムサポート(株) ディスクリート技術統括部 ディスクリート技術部主任。化合物半導体ICの設計に従事。電子情報通信学会会員。

Toshiba LSI System Support Co., Ltd.