

Technology Reports

700MHz から 2.5GHz までの 9 つの周波数帯に対応する 携帯電話用増幅器の開発

現在、1台の移動端末で複数の周波数に対応するために、それぞれの周波数に対応する単一バンド電力増幅器を複数搭載している。これに対し、各単一バンド電力増幅器と同等の利得、出力電力などの特性を達成しつつ、1つの電力増幅器で9つのバンドに対応するマルチバンド化技術を開発した。目的とする複数のバンドに対応するような可変入出力整合回路に半導体スイッチを適用することで、無線回路の小型化・集積化が可能となる。これにより、移動端末を大型化せずにLTE、W-CDMA、GSMなど、国内外のほぼすべての携帯電話サービスへの対応が可能となる見通しを得た。

先進技術研究所

ふくだ あつし
福田 敦史ふる た たかゆき
古田 敬幸おかざき ひろし
岡崎 浩司ならはし しょういち
榎橋 祥一

1. まえがき

携帯電話サービス開始当初の主な目的は通話であったが、携帯電話の普及とともに、電子マネー、デジタルカメラ、音楽/映像再生機能などの通話以外の多様な機能が導入されてきた。携帯電話の機能を増やしても、移動端末には小型・軽量であることが求められるため、結果として限られた端末空間を、各種機能を具体化するための回路や部品などで分け合う状況にある[1]。移動端末において、無線(RF: Radio Frequency)回路^{*1}は不可欠な要素である。現在、ドコモが展開するFOMAサービスは、800MHz帯、1.7GHz帯および2GHz帯の3つの周波数帯(バンド)を用いており、この3バンドに

対応する移動端末はバンドごとに個別のRF回路を3系統搭載し、GSMに対応するためには、さらにGSM用のRF回路も必要とする[2]。このように、対応するバンドおよびシステムそれぞれにRF回路を搭載する構成は、既存システムに加えて、次の世代であるLTE^{*2}も想定した将来の移動端末において、大きさ、コストの観点から現実的でない。その解決策として、1系統でさまざまなバンドやシステムに対応可能なRF部(以下、マルチバンドRF部)の検討を行っている。

移動端末用のマルチバンドRF部を構成する際、電力増幅器(PA: Power Amplifier)^{*3}はキーデバイスの1つである。PAは電池から供給される電力をRF信号^{*4}電力に変換する

機能を有する。しかし、移動端末に内蔵された電池から供給できる電力量は限られており、PAには、マルチバンド化したうえで、さらに、高い電力利用効率でシステムが所望するレベルまでRF信号電力を増幅することが課せられる。ここで、PAの性能は、増幅素子であるトランジスタと整合回路(MN: Matching Network)^{*5}の特性により決定されるため、低損失な「マルチバンドMN」すなわち対応バンドそれぞれに対して、電力利用効率を最適化できるMNの構成を確立することが鍵となる。そこで、マルチバンドMNを搭載し、複数の周波数帯に対応可能なマルチバンドPAを試作し評価した[3][4]。

本稿では、まず、マルチバンド

*1 無線(RF)回路: RF信号を扱うPA(*3参照)や送受分波器などの個々の回路またはそれら全体。送受分波器は、異なる周波数帯の信号を分波、合波する装置。

*2 LTE: 3GPPで検討されている第3世代移動通信システムの拡張規格。ドコモが提

唱したSuper3Gと同義。

*3 電力増幅器(PA): 信号を通信に必要な所定の出力電力まで増幅する電子回路。

*4 RF信号: 無線周波数帯の信号。

MNとして提案している帯域切替型MNの構成について解説する。さらに、半導体スイッチを適用した帯域切替型MNによる9バンド対応帯域切替型PAの試作品の評価結果により、携帯電話搭載用マルチバンドPAとして設定した目標値が達成され、構成の妥当性を確認できたことを示す。

2. マルチバンドPA

2.1 PAの構成

PAの基本構成を図1に示す。PAはトランジスタ、入力MNおよび出力MNで構成される。ここで、対応バンドにおける入力MNと出力MNは、トランジスタの入力インピーダンス Z_{in} 、出力インピーダンス Z_{out} をそれぞれ外部回路のインピーダンス Z_0 に変換する（整合させる）回路である。各MNは、対応バンドにおいてPAの仕様などに基づく利得^{*6}、出力電力、隣接チャネル漏洩電力^{*7}などの要求条件を満足しつつ、高い電力付加効率（PAE：Power Added Efficiency）を達成するように設計される。ここで、PAEとは、PAに入力されるRF信号電力を P_{in} 、PAから出力されるRF信号電力を P_{out} 、PAに電池などから供給される直流電力を P_{DC} とした場合、式(1)で与えられる電力利用効率を評価する尺度である。

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (1)$$

2.2 PAのマルチバンド化

近年の半導体製造技術の進歩に伴

い、非常に高い周波数の入力信号電力を増幅できるトランジスタが商用化されている。ところが、従来のMNの回路構造および特性は、PAに対する要求条件を満足できる帯域を特定のバンドに限定していた。言い換えれば、多くの場合、ある特定のバンド用に設計されたMNでは、他のバンドにおけるPAへの要求条件を満たすことはできなかった。その理由は、図1に示したトランジスタの Z_{in} や Z_{out} は、周波数によって異なり、MNの特性も周波数によって変化するためである。したがって、商用端末では、対応バンド数分のPAが並列に備えられている[2]。しかし、計画されている新バンドおよび海外ローミング用バンドの増加への対応において、PAの並列接続構

成は、回路規模が対応バンド数に比例して増大してしまい、現実的でない。その解決法として、複数のバンドで動作可能なマルチバンドMNを検討した。マルチバンドMNを用いることで、各バンドで必要とされていたトランジスタやMN、またその周辺回路の一部を共通に用いることができ、回路の小型化が期待できる。具体的には、MN内に少数の開閉スイッチを備え、スイッチのオン/オフでMNの特性を切り替え、各バンドにおけるMNを最適化できる「帯域切替型MN」を提案した[5]。

2.3 帯域切替型MN

帯域切替型MNの基本構成を図2に示す。図2は、対応バンド数が N （バンド b_1 から b_N 、本稿においては

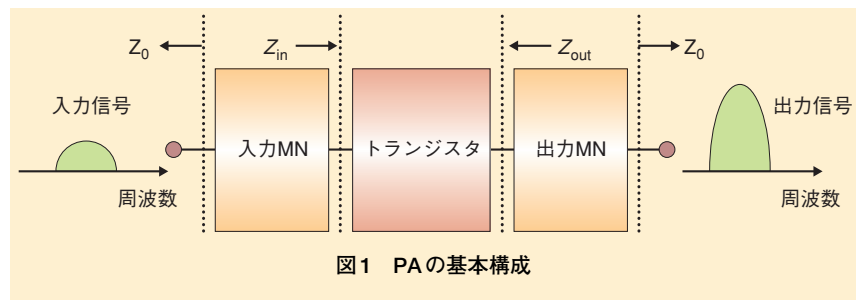


図1 PAの基本構成

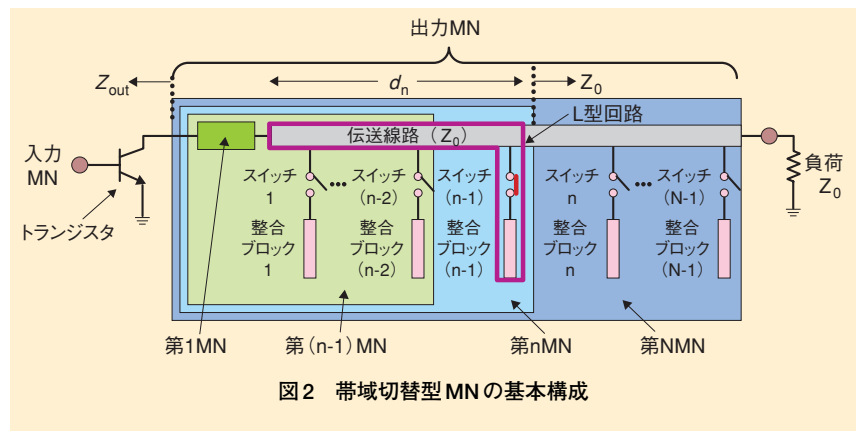


図2 帯域切替型MNの基本構成

*5 整合回路 (MN)：電気信号の品質を確保するため、伝送路内に生じる反射などによる電力の損失を防ぐもの。
*6 利得：信号がある電力（入力電力）で増幅器に入力した際に、増幅器の出力端子にて得られた電力（出力電力）と入力電

力の比。
*7 隣接チャネル漏洩電力：増幅器の非線形歪みにより、送信信号の周波数帯に隣接する周波数帯へ漏洩する電力。

$N \geq 3$; ただし N は整数) の出力 MN 構成である。入力 MN として用いる場合には、出力 MN をトランジスタに対して対称に構成する。帯域切替型 MN は、バンド b_1 に対する MN である第 1MN, 外部回路のインピーダンス Z_0 に等しい特性インピーダンス Z_0 の伝送線路、 $(N-1)$ 個のスイッチおよび $(N-1)$ の整合ブロック^{*8}により構成される。

バンド b_n に対する MN である第 n MN は、第 $(n-1)$ MN と伝送線路上に接続されたスイッチ $(n-1)$ と整合ブロック $(n-1)$ で構成される。ただし、 $(2 \leq n \leq N)$ とする。スイッチをオン/オフすることで、回路の構造を変化させ (リコンフィギュラブル化), MN の特性を変化させることができる。また、バンド数は、スイッチと整合ブロックの組の数で決まるため、バンド数の増減に柔軟な設計が可能である。

次に、帯域切替型 MN の基本動作および設計法を説明する。バンド b_1 の信号を増幅する場合は、すべてのスイッチはオフとする。また、バンド b_n の信号を増幅する場合には、スイッチ $(n-1)$ をオンとし、スイッチ $(n-1)$ 以外はオフとする。バンド b_n での整合は、図 2 の伝送線路長 d_n と整合ブロック $(n-1)$ のリアクタンス^{*9}値を設計する。図 2 に示すように、伝送線路とスイッチに接続された整合ブロックによる L 型回路により、任意のインピーダンスを Z_0 に整合できる。これにより、バンド b_n での整合が可能となる。ここで、第 n MN と負荷との間に接続されて

いる伝送線路の特性インピーダンスは Z_0 であり、オフのスイッチに接続された整合ブロックを完全に回路から分離することができれば、増幅器出力端子まで、バンド b_n での整合は保たれる。したがって、帯域切替型 MN は全体として、バンド b_n の信号に対する MN として動作する。 n が 3 以上の場合において、スイッチ 1 からスイッチ $(n-2)$ までのいくつかのスイッチをオン状態として (同時にオン状態となるスイッチを 2 つ以上として)、整合ブロック 1 から $(n-2)$ までのいくつかの組合せによっても、同様に設計できる。本構成では、スイッチはすべて信号経路に並列に接続されており、MN の設計により、スイッチを挿入しても損失の小さい MN を達成できる [6]。また、他バンド用 MN の設計の影響を受けにくいため、複数のバンドにおいて独立に設計が可能である。さらに、各バンドにおいて、従来の MN を用いた場合と同様な整合条件をトランジスタに対して提供できるため、同種のトランジスタを用いた単一バンド PA とほぼ同等の特性が期待できる [6]。

2.4 課題の検討経緯

筆者らは、これまで将来的に移动通信への適用が検討されている 5GHz 帯までを展望するとともに、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) スイッチ^{*10}の有する特長 [7]に注目し、帯域切替型 MN に MEMS スイッチを適用して PA のマルチバンド化と高効率化の両方をね

らう構成の有効性を検証してきた [8]。しかし、MEMS スイッチには、信頼性の確保や動作電圧の低減など、移動端末への搭載に対して解決すべき課題が残されている。一方、半導体スイッチ^{*11}は、アンテナ切替用スイッチとして搭載実績があり、3GHz 以下のバンドに限れば、電気的特性も実用上問題なく、また、マルチバンド PA の集積化における親和性も高いと想定される。よって、3GHz 帯以下の用途で MEMS スイッチに替えて半導体スイッチを用いるというアプローチは、現時点で現実的である。そこで、これまで検討してきた帯域切替型 MN への半導体スイッチの適用について、対応バンド数を大幅に増加させた 9 バンド対応 PA により検証することにした。

3. 設計および試作

3.1 設計要件

マルチバンド PA の設計、試作を行った (写真 1)。試作 PA の性能目標値を表 1 に示す。対応バンドは、LTE, W-CDMA, GSM など、国内外の複数の移動通信システムで利用が想定されている 700MHz から 2.5GHz までの 9 バンドとした。トランジスタには、高速動作が可能で単一電源で利用でき、高効率かつ低歪みという特長から、HBT (Hetero-junction Bipolar Transistor)^{*12}を用いた。また、利得は 30dB 以上、GSM を考慮し出力電力は 33 ~ 35dBm と設定した。さらに、PAE は 40% 以上を目標とした。また、携帯電話で利用できる電圧の制限から、電圧は

*8 整合ブロック：MN の一部であり、整合を取るために用いられる素子、または複数の素子からなる回路。

*9 リアクタンス：交流回路におけるインピーダンスの虚数部分。単位は Ω 。

*10 MEMS スイッチ：MEMS テクノロジーによって構成された機械的ナリレータイプのスイッチ。

*11 半導体スイッチ：トランジスタあるいはダイオードで構成する電子スイッチの総称。機械式スイッチに比べ、オン/オフ

の応答速度が速く、接点が消耗しないため長寿命などの特長をもつ。

*12 HBT：異なる構造を有する半導体を接合して作製したトランジスタ。ベースに流す電流に応じて、コレクタに流れる電流を制御する素子。

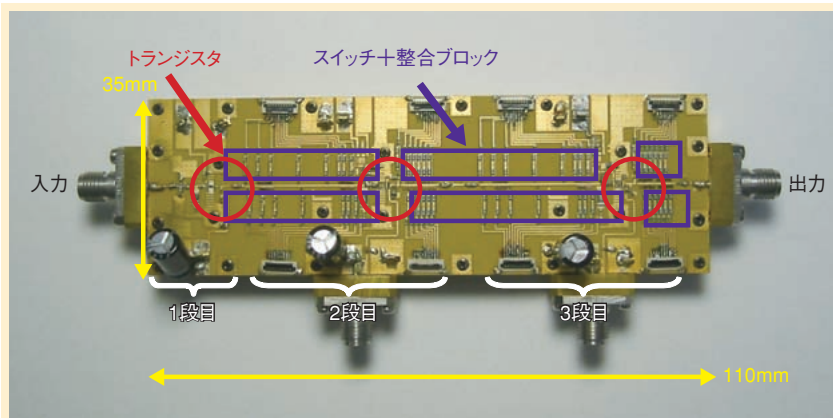


写真1 9バンド対応帯域切替型3段PA

表1 性能目標値

バンド (GHz)	0.7, 0.8, 0.9, 1.5, 1.7, 1.8, 1.9, 2.3, 2.5
利得 (dB)	≥ 30
出力電力 (dBm)	33~35
PAE (%)	≥ 40
電圧 (V)	3.5

3.5Vとした。

半導体スイッチには、GaAs (Gallium Arsenide) -FET (Field Effect Transistor)^{*13} スイッチを用いた。GaAs-FETスイッチの選定理由は、動作周波数範囲 (2.5GHz帯以下) で、低挿入損失^{*14}と高アイソレーション^{*15}特性の、ある程度の両立が可能であること、耐電力特性がPAの目標出力電力 (35dBm以上) に対応していること、PAを構成する他の素子との集積化に関する親和性が高く、将来的に小型化が期待できること、である。

なお、本試作の目的は、9バンドPAの動作確認、基本特性の取得、帯域切替型MNへのGaAs-FETス

イッチの適用性検証にある。そのため、例えば、帯域内、帯域外歪みなど、PAに要求されるこのほかの特性は、設計において考慮していない。

9バンドそれぞれの利得が30dB以上となるように、試作PAの構成は、増幅器3段直列接続とした (図3)。ここで、3段目は扱う電力が最も大きく、供給される直流電力も大きい。したがって、PAを高効率動作させるには、3段目のMNは低損失で、各バンドで最適なインピーダンス条件をトランジスタに提供しなければならない。一方、1段目と2段目は、十分な利得と電力を3段目に提供することが求められるが、整合条件は3段目ほど厳しくない。そのため、広帯域にわたって、平坦な利得特性を有する広帯域MNなどを併用してもよい。本試作では、1段目は広帯域MNとし、2段目と3段目は帯域切替型MNを用いた。また、2段目の設計では十分な利得が、3段目の設計では目標出力電力が得られるよ

うに、各素子値を設定した。なお、各段個別の評価を行うため、各段の入出力インピーダンスがそれぞれ50Ωとなるように設計した。

3.2 GaAs-FETスイッチの特性

試作に用いたGaAs-FETスイッチの基本特性を図4と図5に示す。図4は周波数に対する挿入損失とアイソレーションである。周波数が上がるに従って挿入損失は増大し、アイソレーションは低下するため、高周波におけるGaAs-FETスイッチの不完全性が問題となる。今回の試作PAにおいて、対応すべきバンドの最高周波数帯 (2.5GHz帯) 以下では、挿入損失0.6dB以下、アイソレーション12dB以上が得られた。図5は、GaAs-FETスイッチの耐電力特性であり、2.5GHzの連続波 (CW: Continuous Wave)^{*16}入力時の入力電力に対する挿入損失と、アイソレーションの変動を示している。35dBm以下の入力電力における挿入損失とアイソレーションは、ほぼ一定の値を示していた。この入力電力の範囲では、挿入損失およびアイソレーションの入力電力依存性は少なく、良好に動作し得ることを確認した。なお、他の周波数でも同様に、入力電力35dBm以下において良好な耐電力特性を確認した。

写真1に示したように、試作した9バンド対応帯域切替型3段PAでは、プリント基板上に3つのHBTと複数のGaAs-FETスイッチをそれぞれ実装した。

*13 FET: ゲート電極にかける電圧に応じて、ドレインに流れる電流を制御する素子。

*14 低挿入損失: 素子を回路中に挿入することによって生じる損失であり、スイッチの場合、オン状態での信号の損失の程度を表す。

*15 アイソレーション: 信号の分離度を表す指標であり、スイッチの場合では、オフ状態での信号の漏れる度合いを表す。

*16 連続波 (CW): 変調されていない高周波信号 (正弦波)。

4. 測定結果

試作PAの利得に関する周波数特性の測定結果を図6に示す。図6の(a)~(h)は各バンドごとのスイッチのオン/オフ状態に対応している。図6より、試作したマルチバンドPAは、すべてのバンドにおいて30dB以上の利得を達成した。このことから、スイッチの状態を変更することで、帯域切替型MNが各バンドに対応した特性に変更され、所望のバンドの信号を所望の利得分増幅できていることを確認した。なお、低周波側の利得が高周波側よりも高い理由は、各段のトランジスタの利得が低周波側で大きいことが原因である。

CW入力時の飽和出力電力^{*17}と最大PAEの周波数特性を図7に示す。図7(i)は0.7/0.8/0.9GHzバンドを含むLowバンド、図7(ii)は1.5/1.7/1.8/1.9GHzバンドを含むMiddleバンド、図7(iii)は2.3/2.5GHzバンドを含むHighバンドの測定結果をまとめている。各バンドでの利得、飽和出力電力および最大PAEを表2に示す。これらの測定結果より、設計目標を達成でき、GaAs-FETのような半導体スイッチを用いても、高出力・高効率なマルチバンドPAの実現可能性が確認できた。

5. あとがき

現行の単一バンドPAと同等の無線回路特性を達成しつつ、1つのPAで9つのバンドに対応する技術を開発した。今回試作したマルチバンドPAは、MNをリコンフィギュラ

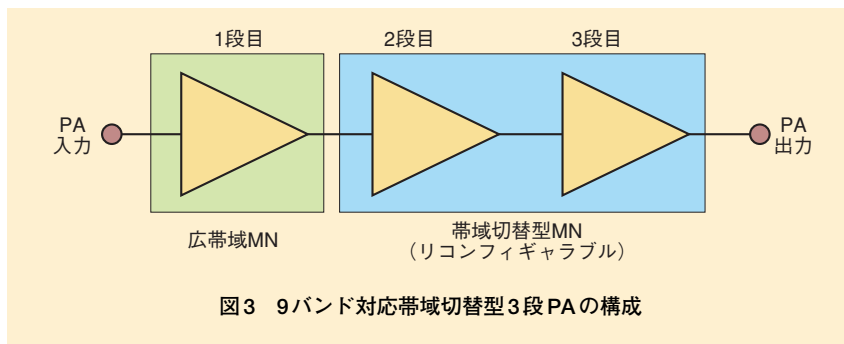


図3 9バンド対応帯域切替型3段PAの構成

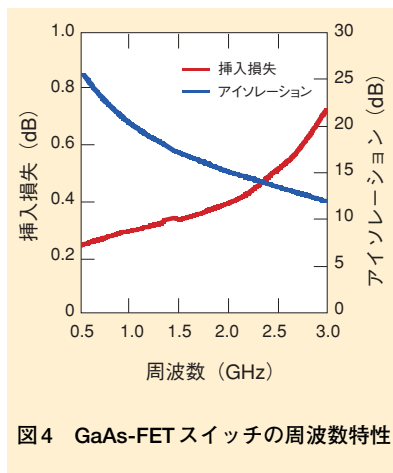


図4 GaAs-FETスイッチの周波数特性

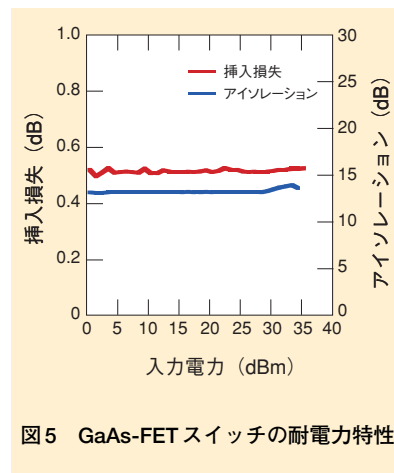


図5 GaAs-FETスイッチの耐電力特性

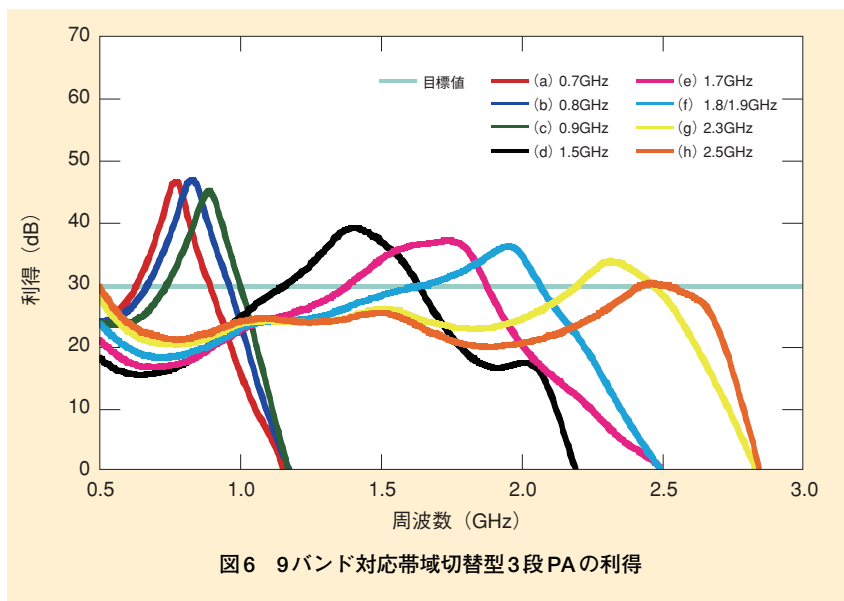


図6 9バンド対応帯域切替型3段PAの利得

ル化し、PAの周波数特性をGaAs-FETスイッチにて調整することで、

使用するバンドごとに所望の特性を得ることができた。結果として9バ

*17 飽和出力電力：入力を増加させた場合に、出力の増加の割合が低減し、最終的に飽和状態となったときの出力電力。

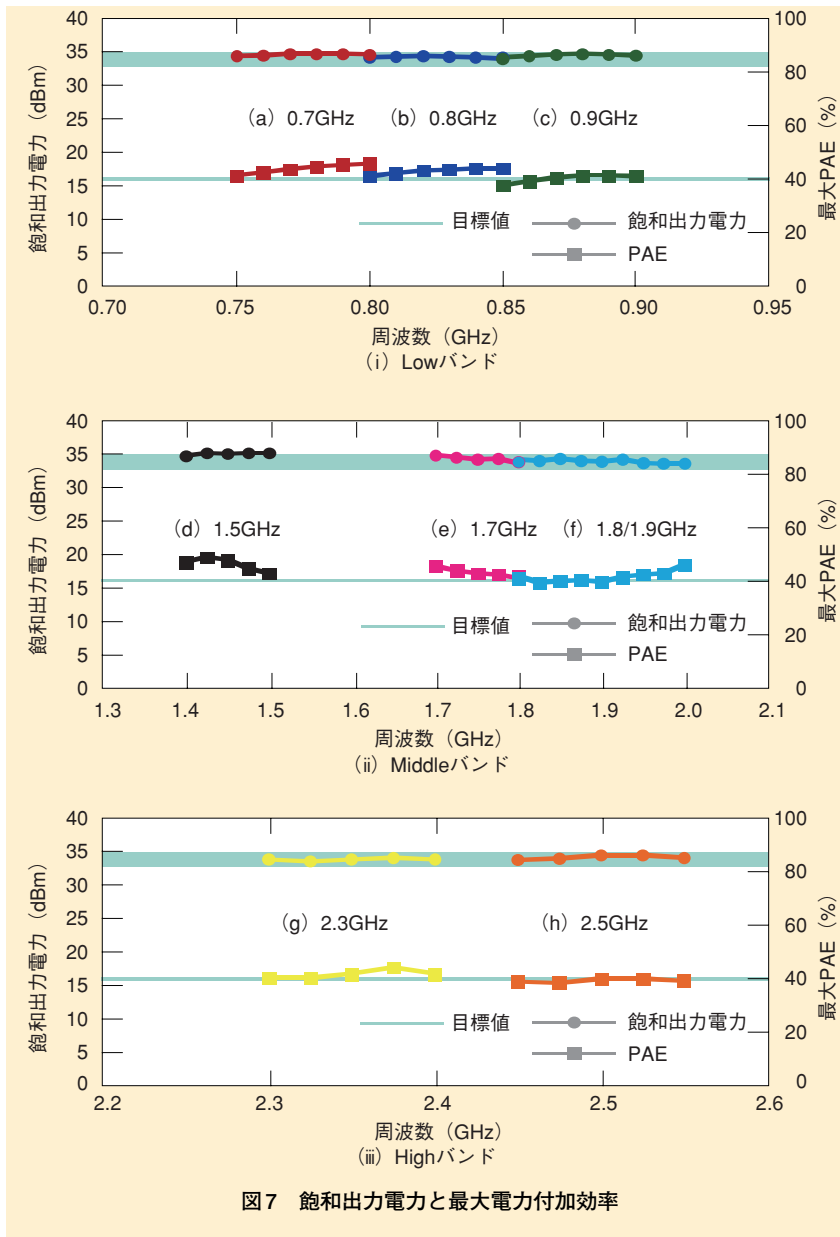


表2 9バンド対応帯域切替型3段PAの特性

バンド (GHz)	0.7	0.8	0.9	1.5	1.7	1.8	1.9	2.3	2.5
利得 (dB)	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30	> 30
出力電力 (dBm)	34	34	34	35	34	34	34	34	34
PAE (%)	42	43	40	47	43	40	40	41	40

ンドで利得30dB以上、最大出力34dBm以上を達成し、実験検証を通

してデバイスとしての集積化に対する方向性を示すことができた。これ

により、PAとして移動端末を大型化せずに、LTE、W-CDMA、GSMなど、国内外のほぼすべての携帯電話サービスに対応できる性能を達成する見通しを得た。今後は、小型化、効率の改善などの技術課題に取り組む予定である。

文献

- [1] 丸山, ほか: “携帯電話の高機能化を支える端末プラットフォーム開発,” 本誌, Vol. 16, No.2, pp.41-44, Jul. 2008.
- [2] 岡田: “容量/エリア拡大・国際ローミングを実現する携帯電話無線回路技術,” 本誌, Vol.16, No.2, pp.45-53, Jul. 2008.
- [3] A. Fukuda, K. Kawai, T. Furuta, H. Okazaki, S. Oka, S. Narahashi and A. Murase: “A High Power and Highly Efficient Multi-band Power Amplifier for Mobile Terminals,” Radio and Wireless Symposium 2010, pp.45-48, Jan. 2010.
- [4] NTTドコモ報道発表資料: “700MHzから2.5GHzまでの8つの周波数帯に対応した電力増幅器を開発,” Jan.2010.
- [5] A.Fukuda,H.Okazaki,T.Hirota and Y.Yamao: “Novel 900MHz/1.9GHz Dual-Mode Power Amplifier Employing MEMS switches for Optimum Matching,” MWCL IEEE, Vol.14, No.3, pp.121-123, Mar. 2004.
- [6] A.Fukuda,H.Okazaki,T.Hirota and Y.Yamao: “Novel Band-Reconfigurable High Efficiency Power Amplifier Employing RF-MEMS Switches,” IEICE, Electron, Vol.E88-C, pp.2141-2149, Nov.2005.
- [7] G.M.Rebeiz: “RF MEMS Theory, Design, and Technology,” John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, p.5, 2003.
- [8] 福田, ほか: “第3世代を超えるブロードバンド化が可能な電力増幅器の開発-MEMSスイッチを用いた移動端末用マルチバンド高効率電力増幅器,” 本誌, Vol.14, No.3, pp.25-31, Oct. 2006.