

# 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－

あらゆる周波数帯に対応でき、かつ高性能な電力増幅器の研究を行っている。今回、5GHz帯以下の広範囲な周波数において動作可能な可変整合回路によるマルチバンド高効率電力増幅器を設計・開発するとともに、0.9/1.5/2/5 GHz帯クワッドバンド電力増幅器を試作した。

ふくだ あつし      おかざき ひろし      ならはし しょういち  
福田 敦史      岡崎 浩司      檜橋 祥一

## ● Technology Reports ●

### 1. まえがき

将来のモバイル通信サービスは、あらゆるモノがつながり実空間と仮想空間が連携するユビキタス化を促し、「モバイルユビキタス」の世界へ発展することが期待されている。そして、このようなサービスを提供する移動端末（MS：Mobile Station）には、モバイルネットワークとユビキタスネットワークとをつなぐ関門（ゲートウェイ）としての役割が期待されている[1]。MSとモバイルネットワークとの接続には電波が用いられる。

電波を用いるMSにおいて、無線回路は不可欠な要素である。ここで無線回路とは、アンテナから変復調部分までの構成を示し、例えば、電力増幅器（PA：Power Amplifier）などの高周波信号を扱う個々の回路、あるいはそれら全体を示す。

無線回路のキーデバイスであるPAは、周波数変換器からの微弱な高周波信号を無線システムが必要とする電力まで増幅し、送受分波器を介してアンテナへ供給する役割を担う。その消費電力は、多くの場合、他の無線回路の消費電

力に比べて大きいので、大電流を要するとともに放熱量も大きい。よって、特にMSの低消費電力化のため、PAの高効率な動作（高効率動作）は、出力電力などシステムが求める要求を満たす条件の下、最適化されるべき重要な特性である。しかし、1つのPAで高効率特性を維持したままの広帯域化やマルチバンド化は困難である。この課題を克服すべく、著者らは先に、PAの周波数特性を整合回路（MN：Matching Network）内に備えたスイッチにより切り替えるマルチバンドPAの構成法を提案し、0.9/1.9GHzの各バンドにおいて1W以上の高出力電力、60%以上の高効率動作を報告した[2]。本稿では、簡単な調整箇所を追加することで、広帯域にわたる帯域切替動作を可能とするMNの小型化を達成するとともに、PAの動作周波数帯を5GHz帯まで拡張し、対応する周波数帯の数を増加した0.9～5GHz帯マルチバンドPAの設計および試作評価結果について述べる。

## 2. PAのマルチバンド化

### 2.1 PAの設計

PAの基本構成を図1に示す。ここで、入力MNは、トランジスタの入力インピーダンス $Z_{in}$ を信号源インピーダンス $Z_0$ に整合させる回路である。また、出力MNはトランジスタの出力インピーダンス $Z_{out}$ を負荷インピーダンス $Z_0$ に整合させる回路である。各MNは、PAが満たすべき要求条件と最適化すべき性能を勘案しつつ、主に以下の指針により設計される。

- ・出力電力を最大化する
- ・隣接チャネル漏洩電力を規格以下の値とする
- ・電力付加効率（PAE：Power Added Efficiency）を最大化する

なお、PAEとは、PAへの入力電力を $P_{in}$ 、出力電力を $P_{out}$ 、PAが消費する直流電力を $P_{dc}$ とした場合、次式で与えられる効率の評価尺度である。

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{dc}}$$

PAの効率は、使用するトランジスタのもつ固有の性能とその整合条件によって変化する。また、扱う信号が高周波化するにつれて、トランジスタの利得も低減し、また、回

路の損失も増大する傾向があるため、低損失なMNを構成することが必須となる。特に出力MNにおける損失によるPAEの劣化は著しい。出力MNの損失がPAEに与える影響の一例を図2に示す。MNが無損失の場合、得られるPAEが60%であるとする、MNの1dBの損失によりPAEが42%まで劣化してしまう。したがって、トランジスタの性能を最大限引き出し、かつ高効率なPAを構成するには、トランジスタに適切な整合条件を与える、低損失なMNを達成することが必要となる。なお、図2ではPAの利得を5dBとして計算した。

### 2.2 PAのマルチバンド化

トランジスタの $Z_{in}$ や $Z_{out}$ は、周波数に対して変化する。また、MNの特性も周波数に対して変化する。そのため、ある周波数帯でPAEが最大となるようMNを設計しても、他の周波数帯では必ずしもそのように動作せず、多くの場合、所望の出力電力も得られない。よってPAのマルチバンド化に対しては、各周波数帯で増幅素子に対して適切な整

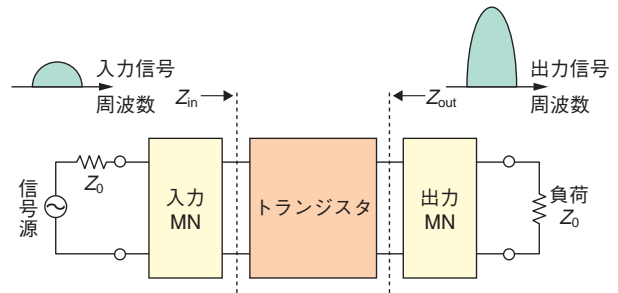


図1 PAの基本構成

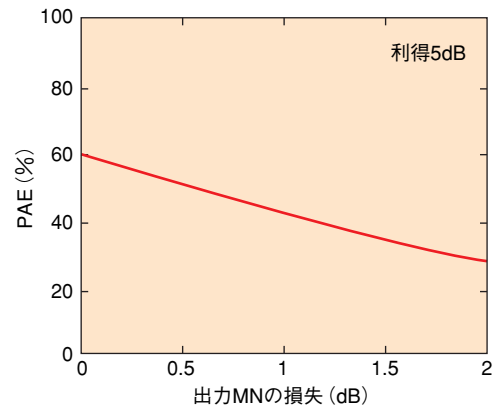


図2 出力MNの損失がPAEに与える影響の一例

合条件を与える構成が要求され、いくつかの方法が検討されている[2].

PAのマルチバンド化の一手法として、例えば図3に示すように、電界効果トランジスタ（FET：Field Effect Transistor）<sup>\*1</sup>などの単一の増幅素子と回路定数の変更が可能な可変MNを用いる構成がある。

一般に増幅素子は広帯域な増幅特性を有し、目的とする周波数帯で適切なMNを用いれば、高効率動作可能なPAの周波数の範囲は広い。著者らはMN内にスイッチを備え、周波数帯に応じてMNの周波数特性を切り替える帯域切替型MNを提案している[3].

### 3. 帯域切替型 PA

以下に帯域切替型MNを用いたマルチバンドPA（帯域切替型PA）の原理および特性について述べる。

#### 3.1 帯域切替型MNの動作原理

帯域切替型MNの構成を図4に示す。ここで、説明を容易とするため対応バンド数を2とした場合の出力MNの基

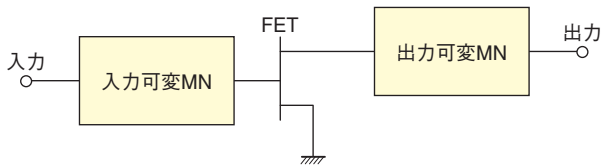


図3 可変MNを用いたマルチバンドPAの構成

本動作を説明する。なお、入力MNに適用した場合も同様に動作する。帯域切替型MNは、第1MNと、負荷インピーダンス $Z_0$ と等しい特性インピーダンス $Z_0$ の伝送線路、スイッチおよび整合ブロック<sup>\*2</sup>で構成されている。第2MNは、図4(b)に示すように上記すべての要素で構成される。また、 $Z_1(f)$ および $Z_2(f)$ はそれぞれ第1MNおよび第2MNの、また、 $Z_{out}(f)$ は増幅器出力端子での周波数 $f$ における出力インピーダンスである。第1MNは、任意の構成をとることができ、周波数 $f_1$ の信号に対するMNで、 $Z_1(f_1)$ がインピーダンス $Z_0$ に整合するよう設計されている。図4(a)のようにスイッチをOFF状態とし、整合ブロックを完全に分離することができれば、第1MNに接続されている伝送線路の特性インピーダンスは $Z_0$ であるので、 $Z_{out}(f_1)$ は負荷のインピーダンス $Z_0$ と整合する。したがって、帯域切替型MNは周波数 $f_1$ の信号に対するMNとして動作する。しかし、FETの入出力インピーダンスは一般的に周波数に応じて変化するため、周波数 $f_1$ と周波数 $f_2$ がよほど近接していない限り、周波数 $f_2$ の信号に対する第1MNの出力インピーダンス $Z_1(f_2)$ が $Z_0$ に整合していることは極めて稀となる。そこで、提案の帯域切替型MNでは、図4(b)のように、スイッチをON状態とし、整合ブロックを伝送線路に接続させる。ここで、伝送線路の電気長<sup>\*3</sup>と、整合ブロックのリアクタンス<sup>\*4</sup>値を適切に選択することにより、いかなる $Z_1(f_2)$ に対しても $Z_2(f_2)(=Z_{out}(f_2))$ を目的とする負荷のインピーダンス $Z_0$ に整合させることが可能である。よって、帯域切替型

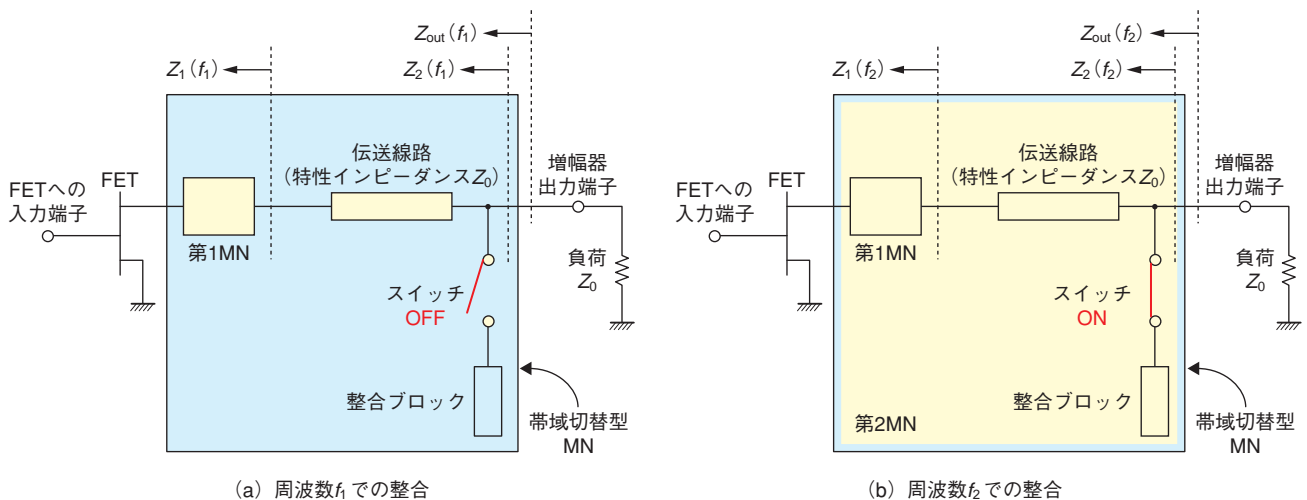


図4 帯域切替型MNの構成

\*1 電界効果トランジスタ：ゲート電極に電圧をかけることによって、電界によりソースとドレイン間の電流を制御するトランジスタ。  
\*2 整合ブロック：整合回路の一部であり、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。

\*3 電気長：電子回路の配線長を、物理長ではなく、交流信号の位相差で表したものを。  
\*4 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 $\Omega$ 。

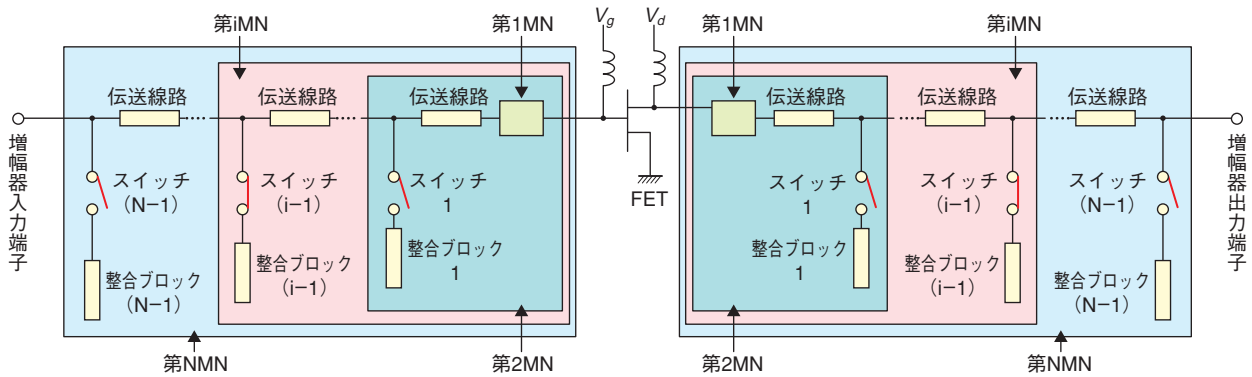


図5 マルチバンド帯域切替型PA

MNは $f_2$ の信号に対しても $Z_{out}(f_2)$ を負荷のインピーダンス $Z_0$ に整合するよう設計できる。

図4で示した帯域切替型MNは同様な構成で容易に3バンド以上へ拡張できる。N-バンド(N:3以上の自然数)へ拡張したPAの構成を図5に示す。ここでは、周波数 $f_1 \sim f_N$ の各信号を増幅でき、例えば周波数 $f_i$  ( $2 \leq i \leq N$ )の信号を増幅する場合、スイッチ(i-1)をON状態とし、その他のスイッチはOFF状態とする。また、バンド数をNとした場合、必要なスイッチ数は、入力側に(N-1)個、出力側に(N-1)個の計2(N-1)個でよい。

ここで、実際のスイッチには、ON時に挿入損失が生じる。しかし本構成においては、各周波数帯での動作時のON状態のスイッチは各MNで1つであり、バンド数を増加しても、スイッチの挿入損失による回路の劣化は最小限となる。さらに、スイッチはすべて信号経路に並列に接続されており、MNの設計により挿入損失の影響を低減できる[4]。帯域切替型PAは複数の周波数帯において動作し、各周波数帯における特性は同じ増幅素子を用いたシングルバンドPAとほぼ同じと期待できる。

### 3.2 MEMSスイッチの適用

帯域切替型PAの適用周波数範囲を増幅素子の増幅可能な周波数帯域まで拡張するためには、その帯域にわたって、低挿入損失、高信号分離(アイソレーション)特性を両立できるスイッチが必要である。特にPAの出力MNに用いる場合には、スイッチの非線形ひずみについても注意を払う必要がある。これらの特性を満たすスイッチとして、マイクロマシン技術を応用したMEMS(Micro-Electro

Mechanical Systems)スイッチが実用化されつつある。MEMSスイッチは、機械的なりレータイプのスイッチを、その駆動機構を含めて数mm角以下の大きさに実現したものである。著者らは、消費電力が少ない静電駆動型<sup>\*5</sup>のMEMSスイッチ[5]に着目するとともに、耐電力特性を含め高周波特性に問題のないことを確認し、帯域切替型PAに同スイッチを適用している。なお、実測したMEMSスイッチの特性は、実装による劣化を含め、直流から5GHzにわたって挿入損失0.6dB以下、アイソレーション特性30dB以上という良好な特性が得られた。スイッチに関する電気的な特徴を表1に示す。

実際に用いるMEMSスイッチの高周波特性を考慮し、帯域切替型PAの0.9/1.9GHz帯デュアルバンド動作特性をシミュレーションにより検証した。各周波数帯(モード)における入力電力に対する出力電力、PAE特性のシミュレーション結果を図6(0.9GHzモード、測定周波数0.875GHz)、図7(1.9GHzモード、測定周波数1.875GHz)に示す。ここでは、スイッチを用いず、各周波数帯、同じトポロジ<sup>\*6</sup>によるシングルバンドPAの入出力特性のシミュレーション結果も併せて示している。帯域切替型MNは、スイッチがON時に0.9GHz帯、OFF時に1.9GHz帯で動作するよう設

表1 MEMSスイッチの特徴

| スイッチのタイプ   | 静電駆動型SPSTスイッチ |
|------------|---------------|
| 制御電圧       | DC15~19V[6]   |
| 直列抵抗       | 0.4~0.45Ω[6]  |
| OFF状態の静電容量 | 10fF          |

fF: femto Farad

SPST(Single-Pole Single-Throw): 1入力1出力のスイッチ。

\*5 静電駆動型: 静電気力によって駆動する形態。

\*6 トポロジ: 機器の位置関係やネットワーク構成。本稿では、回路の構成形態。



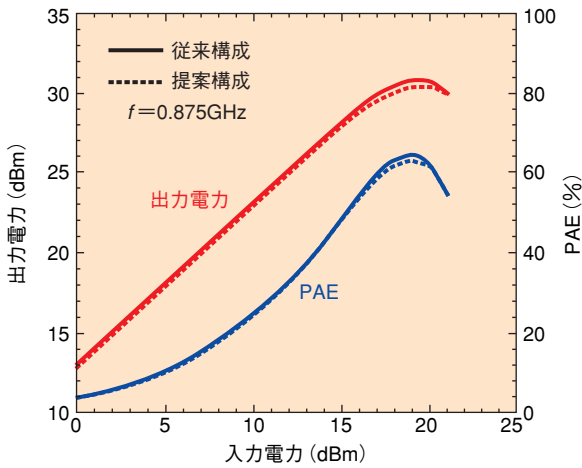


図6 0.9GHzモードにおける入出力特性

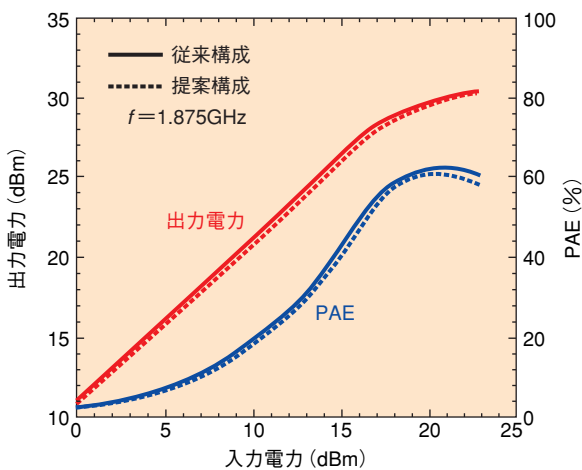


図7 1.9GHzモードにおける入出力特性

計した。また、スイッチのON時の挿入損失により、MNに生じる損失を可能な限り低減するよう設計した。その結果、各帯域において帯域切替型PAは30dBm以上の出力電力、最大効率60%以上という結果を得た。この特性はシングルバンドPAの特性とほぼ同等である。これらの特性から、スイッチの切替えにより、マルチバンドPAの高効率動作を達成できることが分かった。

### 3.3 可変周波数帯の拡大に関する検討

2章で示したように、帯域切替型PAは容易にマルチバンド化が可能である。しかし、動作周波数帯の下限と上限が離れている場合におけるマルチバンド整合では、対象となる増幅素子の入出力インピーダンスは広い範囲に分布する

ことになる。この場合、インピーダンスによっては整合を確立するために、すべての周波数において用いられる伝送線路の線路長が長くなる場合があり、回路が大型化してしまう。そこで、伝送線路長の短縮化のため、図5の第1MNとFETの間に新たに整合ブロック（整合ブロック0）を追加する[7]。提案入力MNの構成を図8に示す。ここでは、第1MNを第2MN以降と同様に伝送線路と整合ブロックによって構成している。また、図で $d_N$ はFETからN番目のMNまでに必要な伝送線路の長さである。一方、伝送線路にスイッチを介して接続される整合ブロックは基本的に単一周波数でのみ利用されるため、例えば、集中定数素子\*7を用いれば小型化ができる。

5GHz帯以下で動作するバンドフリーPAを目指し、図8のMNを用いて、0.9/1.5/2/3/4/5GHz帯6バンドPAの設計を行った。本PAでも、伝送線路長を短縮するために整合ブロック0を追加している。伝送線路長の短縮効果を表2に示す。整合ブロック0がない場合、必要な伝送線路長が46.8mmであるのに対し、整合ブロック0を追加した場合、18.8mmでよく、伝送線路長を半分以下にできる。次に、設計したPAの利得シミュレーション結果を図9に示す。それぞれの周波数帯において、整合ブロック0がない場合と同等以上の利得が得られた。また、伝送線路長の短縮により帯域幅も3dB拡大している。

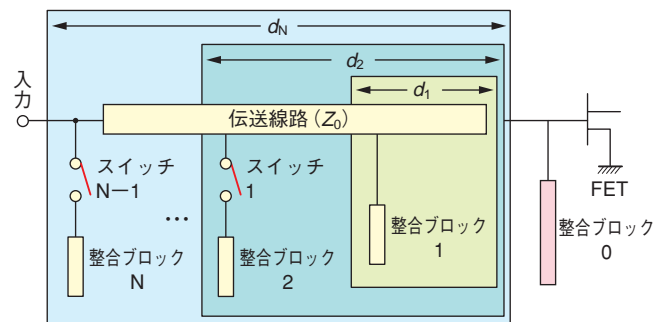


図8 提案入力MNの構成

表2 伝送線路長の短縮効果（設計例）

| 周波数帯 (GHz)       | 0.9  | 1.5  | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| 従来構成の $d_N$ (mm) | 16.8 | 46.8 | 30.6 | 16.6 | 12.8 | 10.8 |
| 提案構成の $d_N$ (mm) | 13.8 | 6.9  | 3.9  | 18.8 | 8.8  | 3.6  |

\*7 集中定数素子：インダクタ、キャパシタ、抵抗など。

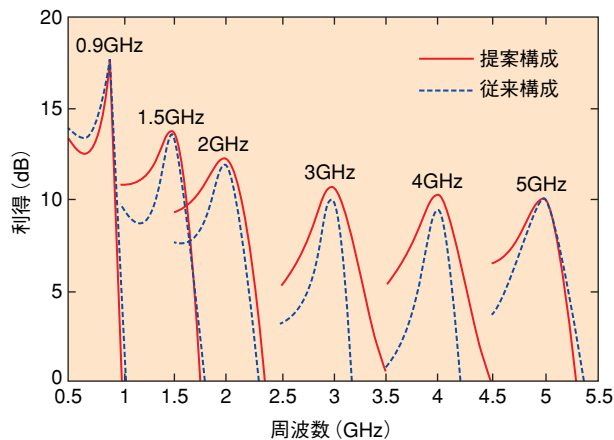


図9 6バンドPAの周波数特性

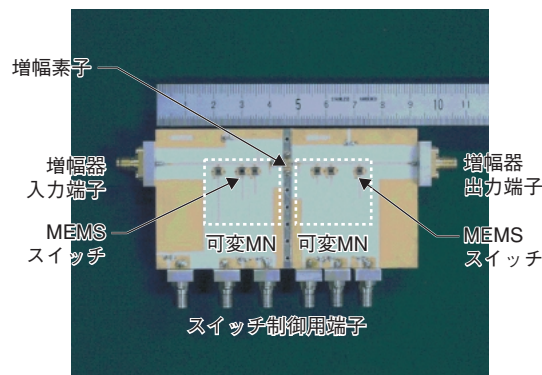


写真1 0.9/1.5/2/5GHzクワッドバンド帯PA

## 4. クワッドバンドPAの設計および試作

### 4.1 0.9/1.5/2/5GHzクワッドバンドPAの試作

前述の0.9～5GHz帯マルチバンドPAの動作確認のため、その下限と上限を含む0.9/1.5/2/5GHz帯クワッドバンドPAの試作を行った。第1MNは5GHz、第2MNは2GHz、第3MNは1.5GHz、そして第4MNは0.9GHzの各周波数帯用として設計した。用いたスイッチは入力MNに3個、出力MNに3個の計6個である。各モードにおけるスイッチの状態を表3に示す。

増幅素子には、1W級の出力電力が得られる市販のGaAs MESFET<sup>\*8</sup>を用いた。所内試作したクワッドバンドPAを写真1に示す。なお、MNは比誘電率<sup>\*9</sup>9.6のアルミナ基板上に製作した。

### 4.2 クワッドバンドPAの評価

入力電力に対する出力電力およびPAE特性について、図10に0.9GHzモード（測定周波数0.9GHz）、図11に1.5GHzモード（測定周波数1.45GHz）、図12に2GHzモード（測定

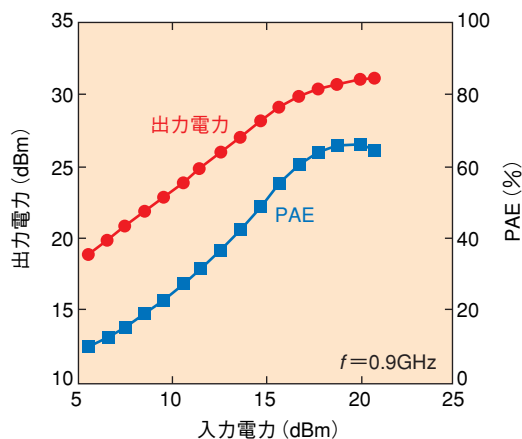


図10 0.9GHzモードにおける入出力特性

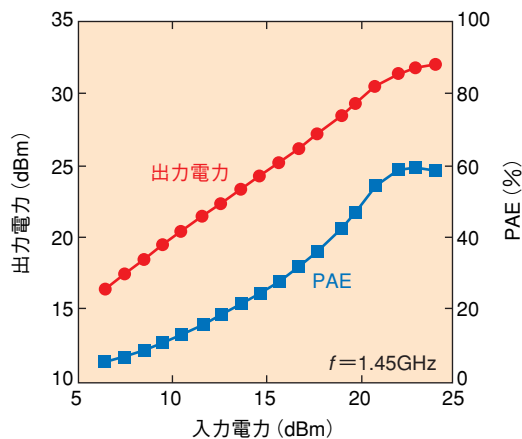


図11 1.5GHzモードにおける入出力特性

表3 動作モードとスイッチの状態

| モード             | 0.9GHz | 1.5GHz | 2GHz | 5GHz |
|-----------------|--------|--------|------|------|
| SW <sub>1</sub> | OFF    | OFF    | ON   | OFF  |
| SW <sub>2</sub> | OFF    | ON     | OFF  | OFF  |
| SW <sub>3</sub> | ON     | OFF    | OFF  | OFF  |

周波数1.85GHz)、図13に5GHzモード（測定周波数4.8GHz）の測定結果をそれぞれ示す。PAの動作は、各モード共通でAB級<sup>\*10</sup>である。各モードのPAEの最大値はそれ

\*8 GaAs MESFET：金属 (MEtal) と半導体 (Semiconductor) を利用した FETである MESFETのうち、半導体にガリウムヒ素 (GaAs) 化合物を使用したもの。

\*9 比誘電率：電束密度と電場との比が誘電率として定義され、物質の誘電率を表す際には、真空の誘電率に対する比誘電率を用いることが一般的である。

\*10 AB級：能動素子のバイアスのかけ方であり、A級とB級の中間の動作を表す。A級は入力に対し出力が直線的で歪みが少なく、B級はA級に比べ出力効率が良い。

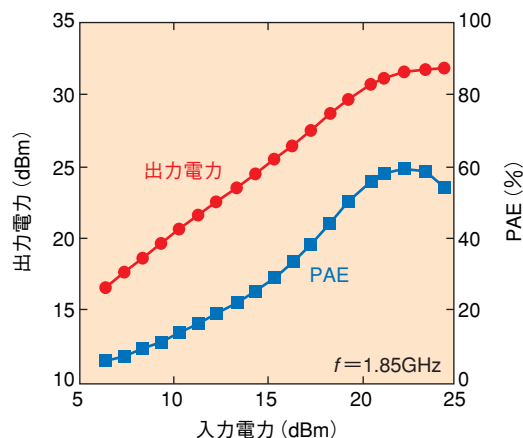


図12 2GHzモードにおける入出力特性

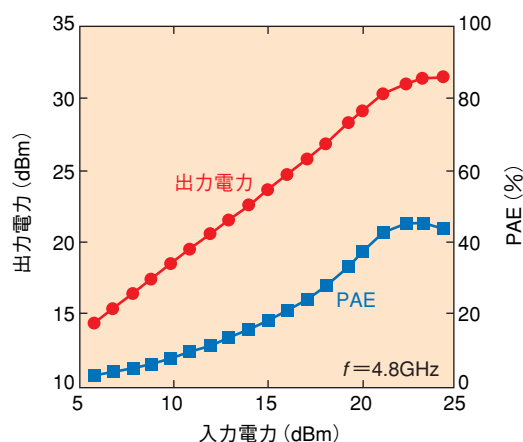


図13 5GHzモードにおける入出力特性

それぞれ64, 58, 58, 45%であった。また、飽和出力電力は、各モードでそれぞれ30.5, 31.0, 31.0, 30.8dBmであった。これらの特性より、単バンドPAに匹敵する高出力・高効率動作を達成できた。

## 5. あとがき

モバイルユビキタスの世界では、あらゆる無線環境に対応できる無線回路が必要となる。本稿では、その研究の一環として、複数周波数帯に対応可能な高効率PAについて、広帯域にわたってマルチバンド動作が可能な帯域可変型PAの構成とその特性について述べた。試作した0.9/1.5/2/5GHz帯クワッドバンドPAにより、広範囲でか

つ多くの周波数帯での特性の切替えと、各周波数帯での高出力・高効率動作を実証した。

## 文献

- [1] 今井, ほか: “4G インフラ研究の新たな方向—ユビキタス世界への広がり—,” 本誌, Vol. 12, No. 3, pp. 6-16, Oct. 2004.
- [2] 岡崎, ほか: “複数の周波数帯に対応可能な高効率電力増幅器—MEMSスイッチを適用した900MHz/1900MHz帯デュアルバンドPA—,” 本誌, Vol. 13, No. 1, pp. 13-19, Apr. 2005.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] T. Seki: “Development and Packaging of RF MEMS Series Switch,” 2002 APMC Workshops. Dig., Kyoto, Japan, pp. 266-272, Nov. 2002.
- [6] G. M. Rebeiz: “RF MEMS Theory, Design, and Technology,” John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003.
- [7] A. Fukuda, T. Furuta, H. Okazaki and S. Narahashi: “A 0.9-5-GHz Wide-Range 1W-Class Reconfigurable Power Amplifier Employing RF-MEMS Switches,” IEEE IMS2006, THPD-05, 2006.