

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—

将来のモバイルサービス実現のため、あらゆる周波数帯に対応できる「バンドフリー無線回路」の研究を行っている。その一環として、MEMS スイッチを適用した 900MHz/1900MHz 帯デュアルバンド電力増幅器の試作機を完成させた。

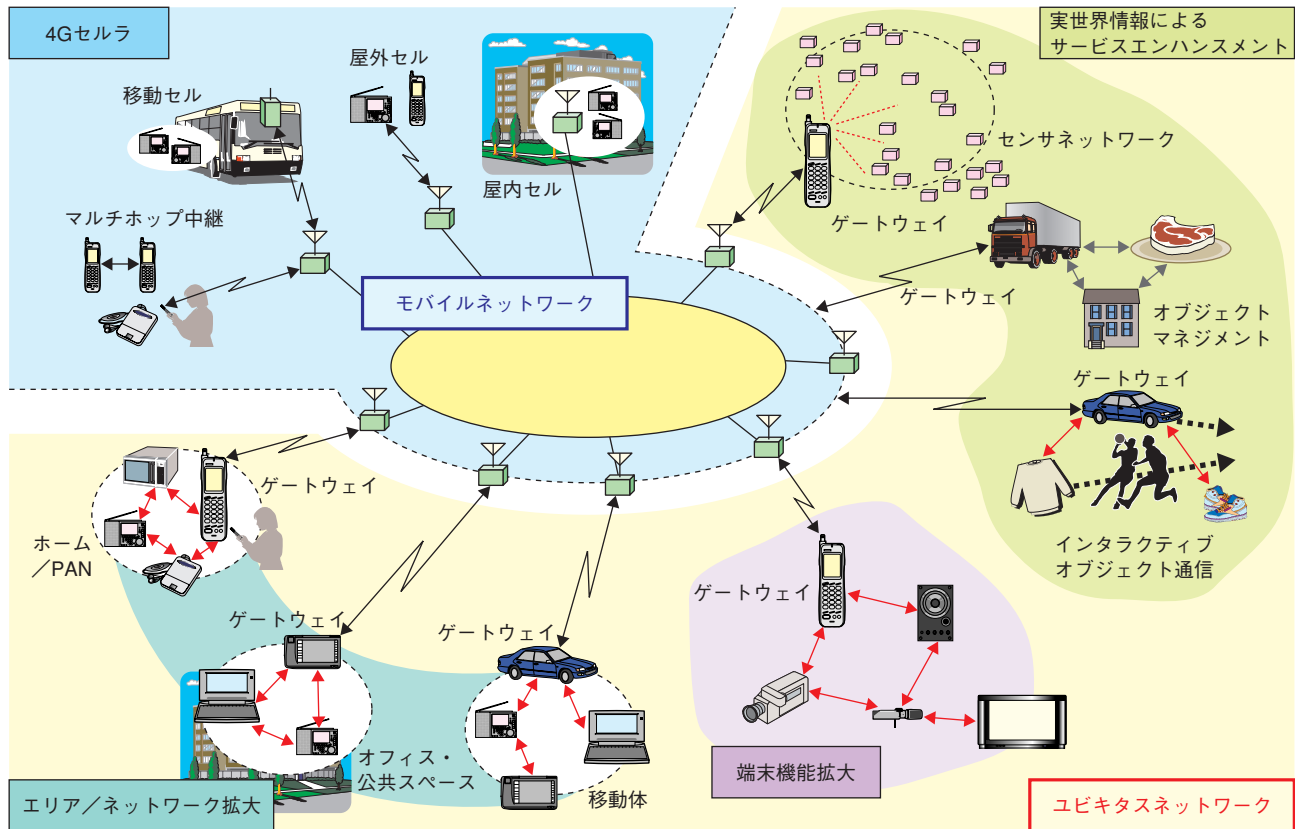
おかざき ひろし ふくだ あつし ならはし しょういち
岡崎 浩司 福田 敦史 檜橋 祥一

1. まえがき

将来のモバイルサービスは、ブロードバンド化とともに、あらゆる機器や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、図1のような「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[1]。ユビキタス化された世界では、あらゆるモノ（ユビキタスデバイス；以下、デバイス）同士が必要に応じて接続され、ユビキタスネットワーク（UN：Ubiquitous Network）を形成する。UNはそれぞれ同時多発的に形成され、また時々刻々と変化すると想定される。各種のUNが混在し、またそれらが共存する必要があることを考慮すれば、電波を用いたシステム（以下、無線システムと記す）がUNにおける接続手段の主流となろう。

モバイルユビキタスの世界では、移動端末（MS：Mobile Station）はモバイルネットワークとUNとをつなぐ関門（ゲートウェイ）としての役割が期待される。MSとUNとの接続およびMSとモバイルネットワークとの接続も同様の理由で電波を用いて行われよう。具体的には、デバイスやユーザの環境に応じたさまざまな無線伝送パラメータ（周波数帯、帯域幅、変調方式、必要な信号対雑音比など）のセットを有する無線システムがこの接続手段として同時に提供され、ユーザの意思あるいはMSやネットワーク側からの制御により、状況に応じて使い分けられると想定される。

無線回路はMSにおいて不可欠な要素である。MSのアンテナから変復調部までのハードウェアの構成例を図2に示す。ここで高周波信号を扱う電力増幅器（PA：Power



PAN: Personal Area Network

図1 ユビキタスネットワークとモバイルネットワークの協調例[1]

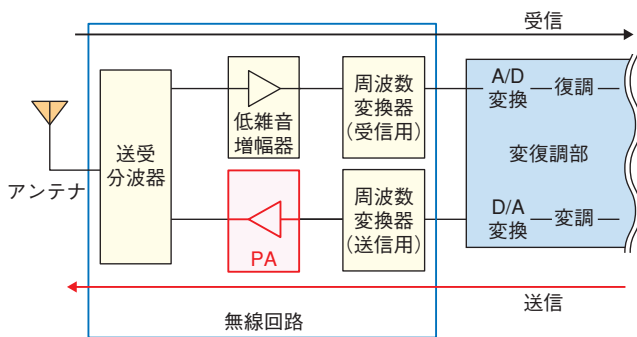


図2 移動端末のハードウェアの構成例(高周波信号を扱う部分の構成例)

Amplifier) や送受分波器などの個々の回路,あるいはそれら全体をまとめて無線回路と呼ぶ。これまで, FOMA (Freedom Of Mobile multimedia Access) などのある特定の無線システムに対し, 専用の無線回路が開発・実用化されてきた。それは, 無線システムの仕様に定められた, 特定の無線伝送パラメータのセットを満たす条件のもと, 個々の無線回路に対する要求条件を定めた上で小型化・省電力化などを図る必要があったためである。

さまざまな無線システムが混在・共存する環境(無線環境)下で, それらすべてに対応することが期待される将来

のMSにおいて, 満たすべき無線伝送パラメータのセットは1つではない。極言すれば, すべての無線システムに対する無線伝送パラメータのセットを満たす, すなわち, あらゆる無線環境に対応することがMS, ひいては無線回路に求められてくる。

これまでの無線システムにおいて, それを代表する無線伝送パラメータは使用する周波数帯である。筆者らは, 無線伝送パラメータとして周波数帯に着目し, あらゆる周波数帯に対応できる無線回路, すなわち「バンドフリー無線回路」の研究を行っている。その一環として, 無線回路が複数の周波数帯へ対応すること(マルチバンド化)に取り組んでいる。無線回路のキーデバイスであるPAについては, 現状ではマルチバンド化は困難であり, これを解決する技術を確認することの意義は大きい。PAのマルチバンド化に際して, 筆者らは整合回路(MN: Matching Network)として複数の周波数帯に対応できる「帯域切替型MN」を新しく提案している[2]。

本稿では, 帯域切替型MNを備えた高効率PAの構成と特徴について概説する。また, 提案構成によるMEMS (Micro-Electro Mechanical Systems) スイッチを適用した900MHz/1900MHz帯デュアルバンドPAについて述べる。

2. PAのマルチバンド化

2.1 PA

PAは無線回路のキーデバイスであり、図2に示すように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。多くの場合、その消費電力は他の無線回路の消費電力に比べて大きく、大電流を要するとともに発熱量も大きい。よって、MSの低消費電力化のため、出力電力など無線システムが求める無線伝送パラメータに関係する要求を満たす条件のもと、PAは高能率（高効率）に動作させる必要がある。

PAの基本構成を図3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
- ・ひずみを最小化する
- ・電力付加効率を最大化する

なお、電力付加効率（PAE：Power Added Efficiency）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。したがって、トランジスタの性能を最大限引き出した高効率PAを構成するには、適切なMNの設計が重要である。

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。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、他の周波数帯では最大化されたPAEが得られないばかりでなく、多くの場合、所望の出力電力も得られない。したがって、高効率PAのマルチバンド化は困難であった。

単なる増幅器に対するマルチバンド化の検討はこれまでにもなされており、その代表的な構成法を図4に示す。図4(a)の「ユニット選択型」[3]は、必要とされる周波数帯に対応した増幅器ユニットをそれぞれ備え、使用する周波数帯に応じて入出力端子にそれぞれ接続された1入力n出力（SPnT：Single-Pole-n-Throw）スイッチを切り替え、使用するユニットを選択する。本構成では増幅器ユニットを周波数帯ごとに専用に設計した高効率PAユニットとすることで、高効率マルチバンドPAが構成できる。各ユニットの設計は単バンドPAと同様であり、容易といえる。しかし、回路規模は要求される周波数帯の数（バンド数）に比例して増加する。また、マイクロ波帯以上の周波数帯では、SPnTスイッチにおいて十分な挿入損失、分離度（アイソレーション）が得られないことが多く、各PAユニットが高効率であっても、特に出力側のスイッチの損失によって、マルチバンドPA全体としての高効率動作が難しくなるという課題がある。図4(b)の「広帯域整合型」[4]では、必要とされる周波数帯（ $f_1 \sim f_n$ ）全般でPAが平坦な周波数特性をもつようにMNが構成される。要求される周波数帯の上限と下限が離れるほど、高出力、高効率を得られる設計は困難となる。図4(c)の「可変整合型」[5]は、電界効果トランジスタ（FET：Field Effect Transistor）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による構成である。ユニット選択型と同様に周波数帯ごとに設計できるため、要求されるバンド数が増加しても、高出力・高効率設計が容易である。回路上で冗長な部分を省くことができ、ユニット選択型に対して小型化も可能であるが、回路定数の変

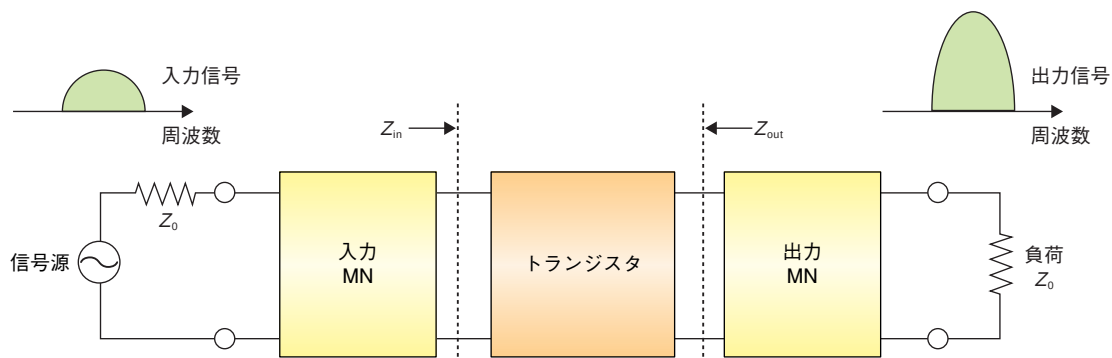


図3 PAの基本構成

更手段として低損失な可変デバイスが必要である。現状のマイクロ波帯の可変デバイスとしては、バラクタダイオードなどがあるが、損失が大きい、ひずみが生じるなどの課題がある。これら各構成を設計の容易性、回路規模そして達成効率の観点から比較した結果を表1に示す。

3. 帯域切替型 PA

3.1 帯域切替型 PA の構成

将来的にバンドフリー化も可能な構成法として、可変整

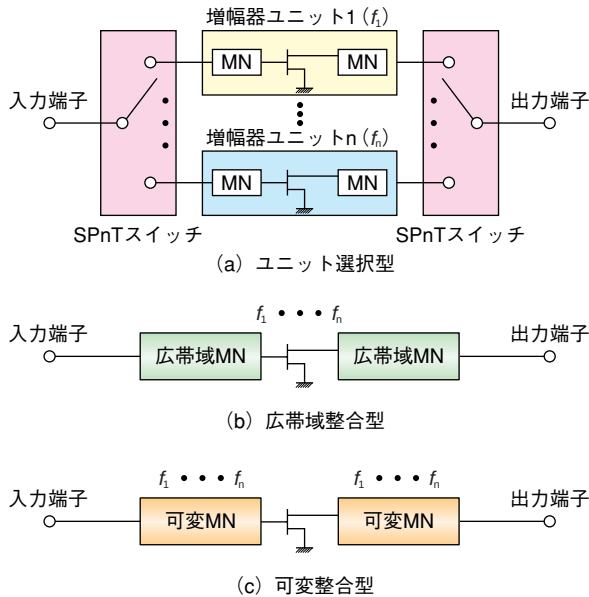


図4 マルチバンド増幅器の構成法

合型に着目し、帯域切替型MN、およびそのMNを用いたPA、すなわち「帯域切替型PA」を新しく提案した[2]。以下、提案構成の原理および特性について述べる。

3.2 帯域切替型 MN の動作原理

帯域切替型MNは、任意の周波数帯で設計でき、複数の周波数帯に対応できる。以下、デュアルバンド切替を例として、帯域切替型MNを出力MNに適用した場合の基本動作を説明する。なお、入力MNに適用した場合も同様の原理で動作する。帯域切替型MNの構成とその動作を図5に示す。帯域切替型MNは、第1MN、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で構成されている。第2MNは、図5(b)に示すように上記すべての要素で構成される。また、 $Z(f)$ および $Z_{out}(f)$ はそれぞれ第1MNおよび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、周波数 f_1 の信号に対するMNで、 $Z(f_1)$ 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5(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でき

表1 マルチバンド増幅器の構成法の比較

構成法	設計容易性	回路規模	効率
ユニット選択型	○	△	○ (要低損失スイッチ)
広帯域整合型	△	◎	△
可変整合型	○	◎	○ (要低損失可変デバイス)

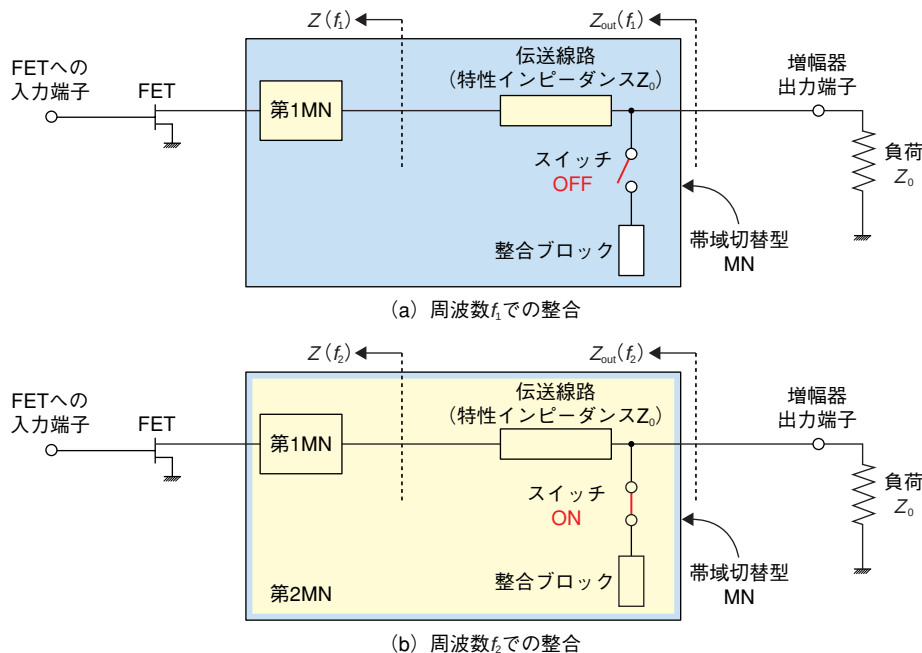


図5 帯域切替型MNの構成と動作

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、増幅器出力端子での出力インピーダンス $Z_{out}(f_1)$ 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 $Z(f_2)$ は Z_0 に整合していない。そこで、提案の帯域切替型MNでは、図5(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、伝送線路の電気長と、整合ブロックのリアクタンス値を適切に選択することにより、いかなる $Z(f_2)$ に対しても $Z_{out}(f_2)$ 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5で示した帯域切替型MNは同様な構成で、さらなるマルチバンド化への拡張が可能である。図6は、 n -バンド (n : 3以上の自然数) へ拡張した帯域切替型MNを用いた帯域切替型PAの回路図である。ここで、図6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_1 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。ただし、 $i=1$ の場合はすべてのスイッチをOFF状態とする。バンド数を n とした場合に必要スイッチ数は、入力側に $(n-1)$ 個、出力側に $(n-1)$ 個の計 $2(n-1)$ 個でよい。理想的な特性(ON状態では無損失で信号を伝送し、OFF状態には完全に線路を分離する)をもつスイッチを用いた場合、帯域切替型PAの各周波数帯における特性は、同じ増幅素子を用いた単バンドPAとほぼ同じと期待できる。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、増幅素子としては高効率動作可能な周波数の範囲は広い。したがって、帯域切替型PAは、広い周波数範囲で高効率動作が期待できる。

3.3 スイッチの特性が与える影響

帯域切替型MNはスイッチの状態(ONまたはOFF)を切り替えることにより、信号を増幅する帯域を変更する。実際のスイッチの特性は理想的ではなく、その挿入損失やアイソレーション特性により、帯域切替型MNにおいて損失が生じる。特に図6のようにマルチバンド化した帯域切替型MNでは、その構成上、第1MNの外側に接続されるOFF状態のスイッチの数はバンド数が増えるとともに増加する。そこで、マルチバンド化の際の、スイッチのアイソレーション特性と帯域切替型MNにおいて生じる損失増加量を計算推定した[6]。その結果によると、例えば、バンド数を10とした場合でも、30dB程度のアイソレーション特性があれば、OFF状態のスイッチがMNに与える損失の増加量は0.1dB以下と十分小さい。

ON状態のスイッチはMNの一部として動作することから、スイッチのON状態での挿入損失はMNに損失を生じさせる。よって、スイッチの挿入損失も小さいことが望ましい。ただし、本構成では信号経路に並列にスイッチを接続するため、スイッチを信号経路に直列に挿入した場合に対して、スイッチの挿入損失による電力損失を低減できる。また、3.2節で示したように、周波数 f_i (ただし、 $i \geq 2$) の信号を増幅する場合、スイッチ(i-1)のみをON状態とするので、スイッチの挿入損失が帯域切替型MNの損失に与える影響はバンド数に依存しない。

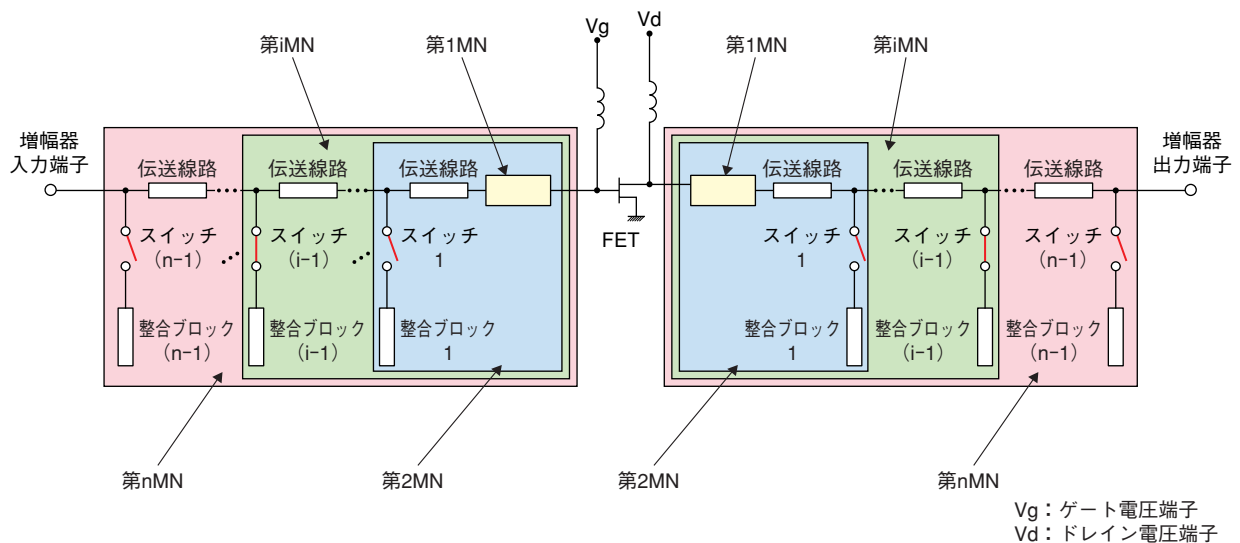


図6 マルチバンド帯域切替型PA

3.4 提案構成の特徴

3.3節で述べたように、本構成によるPAは、スイッチの状態（ONまたはOFF）を制御する、という簡単な方法で高効率動作可能な周波数帯を変更できる。また、信号経路に並列にスイッチを接続する構成であるので、スイッチの挿入損失の影響を小さくできる。加えて、広帯域にわたって高効率に動作し、シンプルな回路構成であるため、性能的にも回路規模的にも、マルチバンド化への拡張が容易といえる。さらに、バンド数が増加しても、出力電力や電力付加効率の低下は小さいことが期待される。

3.5 MEMSスイッチの適用

提案構成PAの利点を最大限発揮するためには、広帯域にわたって、低挿入損失、高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。近年、上記の特性に優れたスイッチとして、マイクロマシン技術に応用したMEMSスイッチが研究開発されつつある[7]。MEMSスイッチは、機械的なリ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。本検討以前にはMEMSスイッチを1W級以上の高効率PAに適用した報告例は、ユニット選択型を含めてもなかった。そこで、消費電力が少ない静電駆動型のMEMSスイッチ[8]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、提案構成PAに同スイッチを適用した。

4. デュアルバンドPAの設計および試作

4.1 900MHz/1900MHz帯デュアルバンドPAの試作

帯域切替型PAの基本動作を確認するために、900MHz/1900MHz帯デュアルバンドPAの設計および試作を行った。図5における f_1 および f_2 をそれぞれ1900MHzおよび900MHzで設計した。第1MNは、伝送線路と先端開放線路（スタブ）で構成した。増幅素子には1W（30dBm）級の出力電力が得られるFETを用いた。MEMSスイッチは、直流から2GHzにわたって、挿入損失0.4dB以下、アイソレーション30dB以上の特性を有する。写真1は、試作したデュアルバンドPAの写真である。

4.2 デュアルバンドPAの評価

製作したデュアルバンドPAのスイッチON状態時およびOFF状態時の利得の周波数特性を図7に示す。スイッチの状態を制御することで、PAの周波数特性が変更され、ON状態時に900MHz帯で、OFF状態時に1900MHz帯でそれぞ

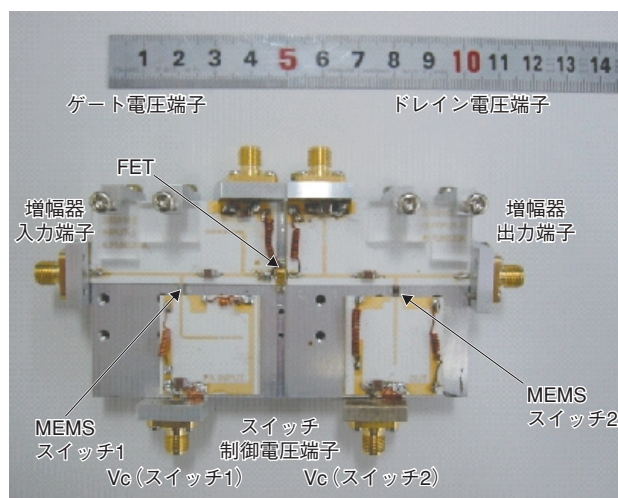


写真1 900MHz/1900MHz帯デュアルバンドPA

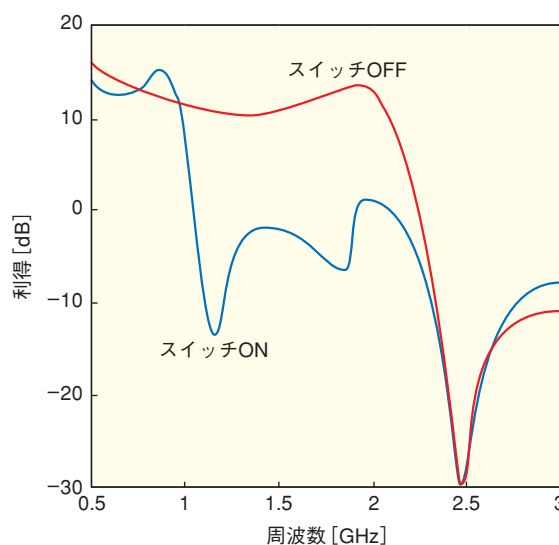


図7 スwitchの各状態における利得の周波数特性

れ所望の利得が得られた。

次に、各周波数帯における入出力特性を図8に示す。875MHzで最大PAE67%，出力電力30.4dBmが、また、1875MHzでは最大PAE63%，出力電力31.5dBmがそれぞれ得られた。すなわち、各周波数帯で、出力電力1W以上かつ最大PAE60%以上という単バンド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、あらゆる周波数帯に対応できるバンドフリー無線回路が必要となる。本稿では、その研究の一環として検討を行っている、複数の周波数帯に対応可能な高効率PAについて、新たに提案した帯域切替型PAの構成とその特性について述べた。試作した提案構成によるデュアルバンドPAにより、簡易な構成であり

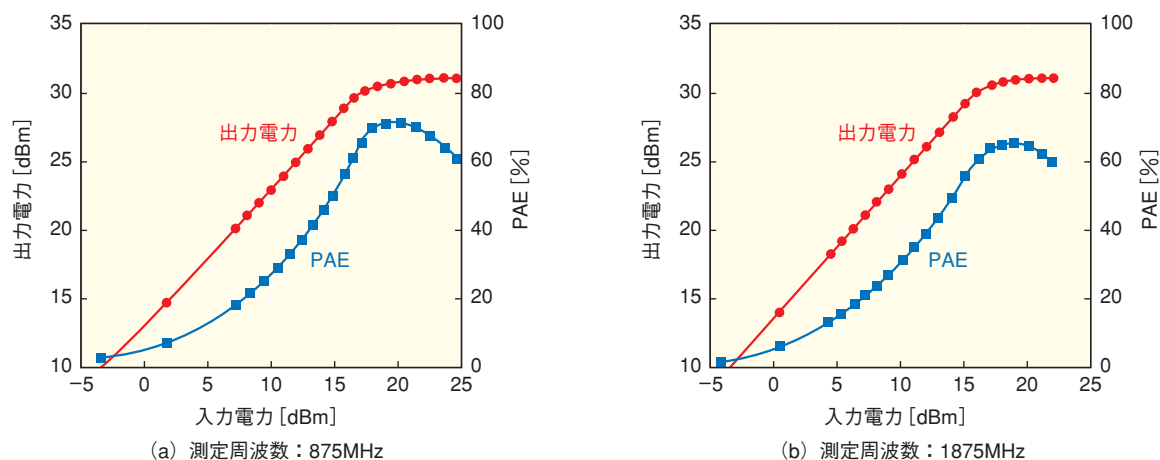


図8 入出力特性

ながら、本構成の特徴である、簡単なスイッチの制御による周波数特性の切替えによって各周波数帯での高出力・高効率動作を実証した。今後、まだ開発途中のデバイスであるMEMSスイッチに対する課題検討と併せ、あらゆる周波数帯に適応可能なPAの実現に向け、高効率PAの多バンド化・高周波化への検討を継続して行っていく予定である。

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] A.Fukuda, et al.: “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.
- [3] R.Magoon, et al.: “A Single-chip quad-band (850/900/1800/1900MHz) direct-conversion GSM/GPRS RF transceiver with integrated VCOs and fractional-synthesizer,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol.37, no.12, pp.1710-1720, Dec.2002.
- [4] Agilent technologies, Datasheet, MGA-52543.
- [5] M.Kim, et al.: “A Monolithic MEMS Switched Dual-Path Power Amplifier,” MWCL, IEEE, vol.11, No.7, pp.285-286, Jul.2001.
- [6] 福田ほか: “バンド切替型マルチバンド電力増幅器におけるスイッチ特性の評価,” 2004年信学ソ大, C-2-8, 2004-03.
- [7] G.M.Rebeiz, RF MEMS Theory, Design, and Technology, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [8] T.Seki: “Development and Packaging of RF MEMS Series Switch,” 2002 APMC Workshops. Dig., Kyoto, Japan, Nov.2002, pp.266-272.

用 語 一 覧

FET: Field Effect Transistor (電界効果トランジスタ)
 FOMA: Freedom Of Mobile multimedia Access
 MEMS: Micro-Electro Mechanical Systems
 MN: Matching Network (整合回路)
 MS: Mobile Station (移動端末)
 PA: Power Amplifier (電力増幅器)
 PAE: Power Added Efficiency (電力付加効率)
 PAN: Personal Area Network
 SPnT: Single-Pole-n-Throw (1入力n出力)
 UN: Ubiquitous Network (ユビキタスネットワーク)