

# 携帯電話基地局用高効率増幅器の開発

平田 仁士\*・戸谷 一幸・前 嶋 貴  
志村 竜宏・武 正行・黒川 頼直  
大西 政彦・阿田 祐樹・平田 芳嗣

Development of High Efficiency Amplifier for Cellular Base Stations — by Hitoshi Hirata, Kazuyuki Totani, Takashi Maehata, Tatsuhiro Shimura, Masayuki Take, Yorinao Kurokawa, Masahiko Onishi, Yuuki Ada and Yoshitsugu Hirata — The demand for wireless communications is rapidly growing all over the world, and wireless data traffic is predicted to increase by 10 times in 2015, compared to 2008. To respond to this strong demand, many operators are planning to upgrade their mobile systems from the 2<sup>nd</sup> generation to the 3<sup>rd</sup> generation or newer. Such upgrade, however, involves a big problem for operators increased power consumption by communication equipments for faster and wider broad band services. To this end, we have developed new technologies to reduce the power consumption of high power amplifiers which consume most energy in cellular base stations. We also succeeded in fabricating a trial product of Remote Radio Head for use in base stations and achieving the industry's highest level of efficiency.

Keywords: wireless, cellular, amplifier, envelop tracking, efficiency

## 1. 緒 言

携帯電話を始めとする無線通信の需要が爆発的に広がっている。国内の携帯電話加入件数は2007年に1億件を突破し、既に1人が複数の端末を利用する時代になっているが、データ通信定額制の導入等により、携帯電話システムによるデータ通信量は増加の一途をたどり、世界規模で見ると2015年には2008年比10倍にもなるとの予測も行われている<sup>(1)</sup>。この通信容量増大の要求に向け全世界で携帯電話の世代交代が進みつつあり、現在主流となっているGSM<sup>\*1</sup>やPDC<sup>\*2</sup>などの第2世代の携帯電話から第3世代のWCDMA<sup>\*3</sup>等やさらにその後継システムである3G-LTE<sup>\*4</sup>への交代が進行中である。

一方でこれら世代交代による高速化・広帯域化への取り組みにより無線通信機器の消費電力増大が大きな課題となっている。携帯電話事業者が使用する電力量は通信分野の約10%を占めており、この大半が携帯電話基地局<sup>\*5</sup>や交換機等の通信設備によるものである。

この様な背景から当社では携帯電話基地局の消費電力の大半を占める高出力増幅器の効率を大幅に改善する技術を開発した。またこれらの技術を使った高出力増幅器を含む携帯電話基地局用のリモート・ラジオ・ヘッド（以下RRH: Remote Radio Headと略す）を試作し、業界最高クラスの効率を達成することができたので報告する。

## 2. 高出力増幅器の高効率化技術

増幅器の高効率化は遙か昔のAM放送の時代から研究が進められてきたが、携帯電話という嘗て例を見ない無線シ

ステム普及に伴い近年急速に脚光を浴びるようになった。当初は増幅器をできるだけ効率のよい飽和に近い領域で動作させ、その代償として生じる歪みを補償するための歪補償技術に重きが置かれ、アナログ歪補償<sup>\*6</sup>、フィードフォワード<sup>\*7</sup>、デジタル歪補償（以下DPD: Digital Pre-Distortionと略す）と言った線形化技術が導入された。

一方で近年はさらに高効率化するために増幅器そのものの回路方式を工夫する研究がすすみ、ドハティ方式などの古くて新しい技術が実用化されている<sup>(2)</sup>。

当社では現行主流となっているドハティ方式に比べ、より高効率が期待でき、より広帯域な通信にも対応可能であり、また機器の製造や調整が容易になると考えられるエンベロップ・トラッキング（以下ET: Envelope Trackingと略す）方式を採用した増幅器を開発中である。この増幅器では心臓部である高周波パワートランジスタとして現在主流であるSi-LDMOS<sup>\*8</sup>の代わりにGaN-HEMT<sup>\*9</sup>を導入することで更に高効率化を図っている。

これら2つの高効率化技術で効率は飛躍的に改善されるが、増幅器の線形性が悪化し、歪特性が劣化するため、これらの組合せに最適なDPDの開発を行った。更に増幅器に入力される無線信号のピークを低減し、増幅器をより効率のよい領域で動作させる技術としてピーク低減技術（以下CFR: Crest Factor Reductionと略す）を導入し、これら最新の4つの技術の組合せで、業界最高レベルの高効率増幅器を実現している（図1）。以降それぞれの技術の詳細について述べる。

### 2-1 エンベロップ・トラッキング（ET）方式 ET

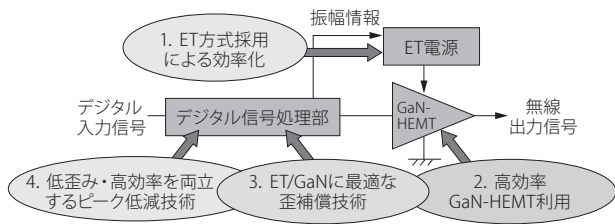


図1 高出力増幅器の効率改善手法

方式は1937年にベル研究所にて初めて提唱された増幅器の高効率化技術である。従来の増幅器では増幅用の高周波パワートランジスタに印可する電源電圧は一定であり、最大振幅の信号が入力されても歪まないように高く設定していた(図2左)。しかしながら近年の携帯電話等で用いられるWCDMAやOFDM<sup>※10</sup>といった変調信号では時間と共にその振幅が大きく変動するため、入力信号の振幅が小さいときは多くの電力が無駄に消費されていた。

ET方式では入力信号の振幅に応じてトランジスタに印可する電源電圧を調整する。その結果これまで無駄に消費されていた電力が大きく削減できる(図2右)。これまでは入力信号の変動に正確に追従できる電源(ET電源)の実現が難しかったが、近年の半導体の高性能化とデジタル信号処理技術の組合せにより携帯電話領域への適用が可能となった。

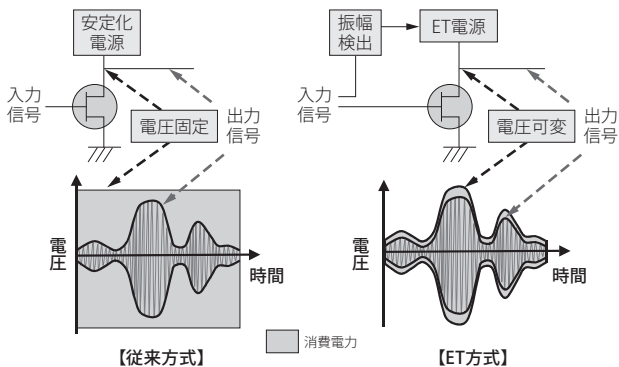


図2 エンベロープ・トラッキング(ET)方式

2-2 GaN-HEMT 現在の携帯電話基地局用の高周波ハイパワートランジスタとしてはSi-LDMOSが主流である。一方で化合物半導体であるGaAsやGaNを用いるとより高速、高周波動作が可能となる。特に住友電工デバイス・イノベーションが世界に先駆けて一早く製品化したGaN-HEMTは、これら特性に加え耐圧も高く、高効率を実現できるデバイスである。

表1にGaNの物性値と従来の半導体の比較を示す<sup>(3)</sup>。

GaNはSiに比べ電圧による破壊に強いいため、高電圧動作が可能であり高効率を得やすい特長がある。また移動度<sup>※11</sup>や飽和電子速度<sup>※12</sup>が高いことも高効率動作や高出力動作に適していることを示している。

表1 高周波トランジスタ用半導体の物性値

材料	破壊電界 (MV/cm)	熱伝導率 (W/cm/K)	移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	飽和電子速度 (×10 <sup>7</sup> cm/s)
Si	0.3	1.5	1,300	1.0
GaAs	0.4	0.5	6,000	1.3
GaN	3.0	1.5	1,500	2.7

2-3 デジタル歪補償(DPD) GaN-HEMTを高周波用ハイパワートランジスタとして使用し、これをET動作させることで効率は大きく改善されるが、増幅器としての線形性が悪くなり、歪特性が大きく劣化する。歪特性の劣化は通信品質の低下のみならず、無線信号の周波数スペクトラムの広がりとなるため、各国の法律や標準規格にてその限度が厳しく決められている。

近年このような増幅器で生じた歪みを補償する技術としてDPDが適用されている。DPDでは増幅器の入力段にプリディストータと呼ばれる歪補償回路が設置される。このプリディストータにより増幅器で生じる歪みを補償するが、そのためには増幅器の歪特性を正確に推定する必要がある。この推定には統計的手法が使われており、増幅器に入力した信号の振幅に応じて、出力信号の振幅および位相がどのように変化するかを計測し、増幅器の歪特性モデルを導き出す。プリディストータはこの増幅器の歪特性モデルの逆モデルを構成し、入力信号に対し増幅器で生じる歪と逆の歪みを事前に与えることで最終的には増幅器出力として歪みのない信号を得ることができる(図3)。

今回当社が採用したGaN-HEMTとET方式を組み合わせ

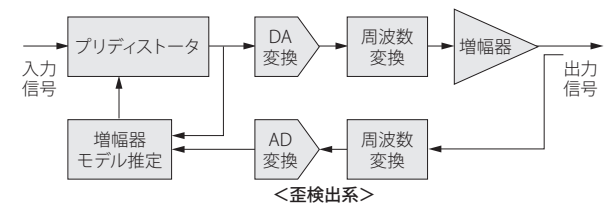
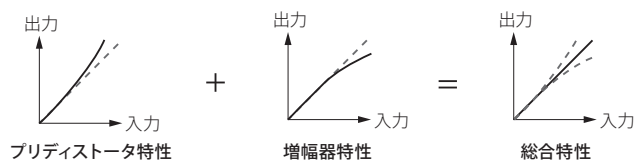


図3 DPDによる歪補償

せた増幅器では、従来の増幅器に比べてより複雑な歪み特性をしているため、増幅器の歪み特性モデルとその推定アルゴリズムを新たに開発し、従来の方式では十分に補償できなかった歪みの補償に成功している。

**2-4 ピーク低減技術 (CFR)** WCDMA や OFDM など現代の携帯電話システムで使用される変調方式では信号電力のピーク値と平均値の比 (以下 PAPR: Peak to Average Power Ratio と略す) が大きく、増幅器の効率を悪化させる要因となっている。ET 方式の増幅器でもこの比を小さくすることは高効率化に有効である。

一方で信号のピークを低減させることは信号品質の劣化に繋がるため PAPR を低下させても品質劣化が少ない CFR が開発されてきた (図 4)。CFR としては、ノイズ・シェーピング法、ピーク・ウィンドウイング法などいくつかの方法が提案されているが、当社は携帯電話システムに適した CFR を開発し、従来より低い PAPR で少ない歪みを実現している。

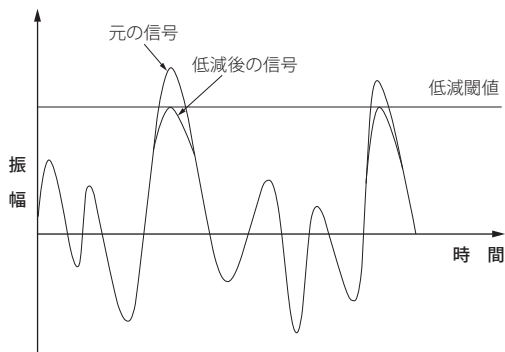


図 4 ピーク低減技術 (CFR)

### 3. 試作機器の仕様

今回これらの高効率化技術を集約した高出力増幅器を開発し、携帯電話システムで標準的な RRH として試作した。試作機器の仕様を表 2 に、試作品の写真を写真 1 に示す。

**3-1 リモート・ラジオ・ヘッド (RRH)** 携帯電話システムの基地局はビルの屋上や鉄塔などに取り付けられている。従来は電波が送受信されるアンテナのみ高所に設置され、高出力増幅器を含む基地局本体は屋内や簡易局舎などアンテナから離れた場所に設置されていた。そのためアンテナと基地局本体間で高周波の無線信号を送受する必要がありその距離は 50m 以上になるケースも多々あった。高周波信号の伝送には同軸ケーブルが使われるが、距離が長いと大きな伝送損失が発生したり、またそれを避けるために大口径の同軸ケーブルを使用するため施工性が悪くなると共に、同軸ケーブル支持のための構造物が必要になるなどの問題点があった。

表 2 試作した RRH の仕様

アンテナ接続端子	送受共用×1
送信周波数帯	2110 - 2170MHz
受信周波数帯	1920 - 1980MHz
最大平均出力電力	40W 以上
対応変調方式	3G および 3G-LTE
出力可能無線帯域幅	20MHz
基地局接続インターフェイス	CPRI (2.4576Gbps)
入力電源電圧	-39 ~ -60V
防水性 (IEC 規格)	IPX4

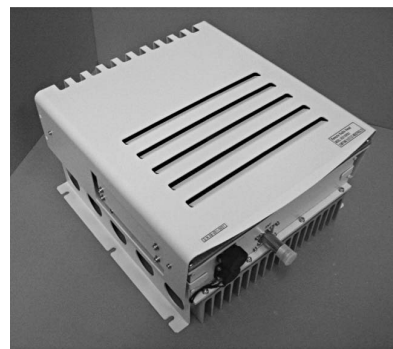


写真 1 試作した RRH

近年このような問題の解決のために基地局本体のうち高周波を扱う送受信部のみを独立したユニットとしてアンテナの直下に設置し、それ以外の部分と分離して信号の送受を光ファイバを伝送路とした光通信により行うタイプの基地局が増加してきている。この送受信部をリモート・ラジオ・ヘッド (RRH) と呼ぶ。RRH は高出力増幅器を含む送信部と、携帯電話からの電波を受信して増幅する受信部とこれら送信部と受信部でアンテナを共用するアンテナ共用部、基地局インターフェイス部、監視制御部、電源部で構成される。RRH のブロック図を図 5 に示す。以下各部の詳細を図中破線で示される基板毎の機能に沿って説明する。

#### 3-2 各部の詳細

##### (1) ET アンプ部

ET アンプ部は GaN-HEMT 増幅器と増幅器に印可する電源電圧を調整する ET 電源およびドライバ段増幅器で構成されている。実際に試作した ET アンプの効率特性の一例を図 6 に示す。ET 方式の特長として電源電圧を調整することで広い出力電力範囲で高い効率を維持でき、この例では約 9dB の出力電力範囲で 50 % 以上の高い効率を保つことができています。

##### (2) デジタル信号処理部

デジタル信号処理部では DPD や CFR と呼んだ高効率化に必要な信号処理と基地局本体から時分割で送信されてくる各無線チャネルの信号を周波数軸上に展開するデジタ

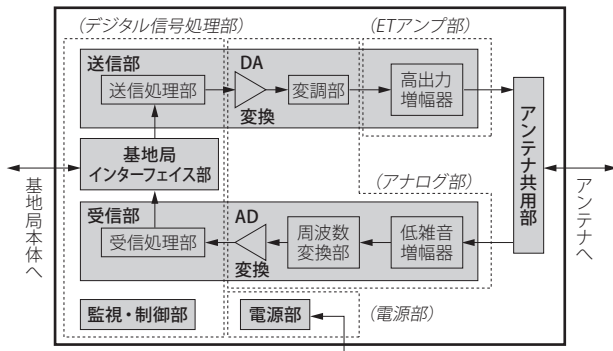


図5 試作したRRHのブロック図

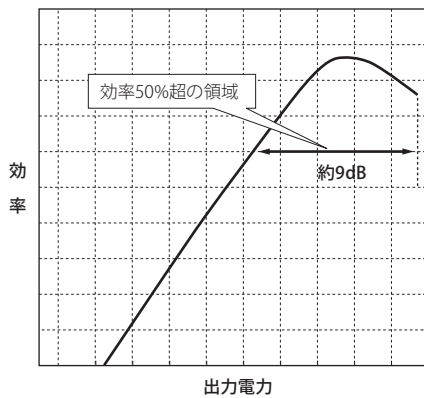


図6 ETアンプの効率特性

ル・アップコンバータ、逆にアナログ部で受信された各チャンネルの無線信号を時分割多重<sup>※13</sup>するデジタル・ダウンコンバータ、これらを基地局との標準通信フォーマットであるCPRI<sup>※14</sup>形式に変換して基地局本体との送受信を行う基地局インターフェイス部と監視制御部が実装されている。

これらの殆どの機能がFPGA<sup>※15</sup>に実装されており、同一のハードウェアでファームウェア<sup>※16</sup>を書き換えることにより、3Gや3G-LTE等の異なったシステムに対応することが可能である。

### (3) アナログ部

RRHの送信機能のうちデジタル信号処理部で生成される送信データを無線信号に変換する機能を有し高速なDA変換器<sup>※17</sup>や直交変調器などで構成されている。

またアンテナに接続される低雑音増幅器を有し、受信信号を十分に増幅し、中間周波数に変換した後高速なAD変換器<sup>※18</sup>でサンプリングすることでデジタル信号処理部で受信データとして処理できるよう変換する機能を有している。

### (4) 電源部

入力電源電圧は一般的なRRHの電源仕様としてDC-48Vとした。電源部ではこの入力電源電圧を機器内部に必要な電源電圧に変換し、供給するのが主な役割である。ま

た安全上の理由から入力電源と機器内部の電源を絶縁する機能を持ち、機器を雷等で発生するサージ電圧から保護する機能も搭載している。

### (5) 筐体

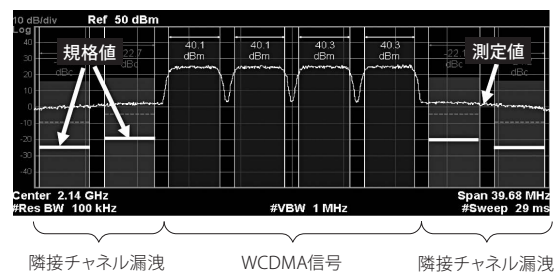
RRHの筐体は屋外に容易に設置できることが必要とされると共に放熱性が重視されるためアルミダイカスト<sup>※19</sup>が一般的に用いられるが、今回の試作では市販のアルミヒートシンクとアルミ板金加工の組合せで製作した。防水コネクタの採用と各部の防水処理によりIEC規格のIPX4相当を達成している。もちろんこれまで効率の悪い増幅器を採用した場合に必要な冷却ファン等は一切必要なくメンテナンスフリーを実現している。

最終的な機器全体の体積は15.8L、重量は12.4kgと非常に小型軽量である。

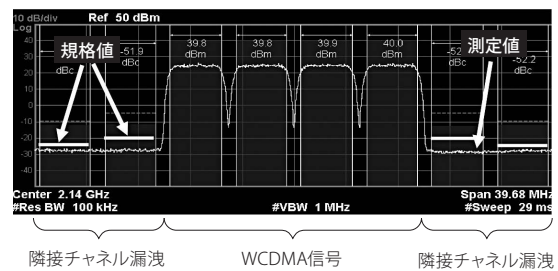
## 4. 評価結果

試作したRRHの評価結果を以下に示す。試作機器はデジタル信号処理部のファームウェアを書き換えることで種々のシステムに対応可能であるが、ここでは第3世代の携帯電話システムである3Gシステム(変調方式はWCDMA)と3G-LTEシステム(変調方式はOFDM)について評価を行った。

4-1 3Gシステム(WCDMA)での評価 図7は試作したRRHで中心周波数2140MHzで5MHzの帯域幅をもつWCDMA信号を4ch出力したときの周波数スペクトラムである。(a)はDPD適用前のスペクトラムであり信号の歪



(a) DPD適用前



(b) DPD適用後

図7 送信周波数スペクトラム(3G)

みが原因で発生する隣接チャンネルへ信号漏洩（隣接チャンネル漏洩；以後 ACLR: Adjacent Channel Leakage Ratio と略す）が非常に高いレベルで観測されている。この状態に対し今回開発した DPD を適用すると（b）に示すように ACLR が大幅に低減され、標準規格<sup>(4)</sup>を満たすことができた。

この際の無線出力電力は 46.1W、機器消費電力は 164.6W であり、効率は 28.0% であった。なおこの効率は受信系を含む RRH の全機能を動作させた際の効率である。

**4-2 3G-LTE システムでの評価** 3G-LTE システムでも 3G システムと同様の評価を実施した。図 8 は 10MHz の帯域幅をもつ OFDM 信号を 2ch 出力した際の周波数スペクトラムであり、DPD を適用することで ACLR を標準規格<sup>(5)</sup>以下に抑えることができた。

3G-LTE ではデータの 1 次変調として 3G に比べてより高速な 64QAM<sup>\*20</sup> を使うため、信号の歪みに対してより厳しい規格が適用されている。具体的には出力された信号を理想的な受信機により復調した際の信号の振幅と位相の理論値からの隔たりを EVM (Error Vector Magnitude) という値で評価しており、その値が標準規格で定められている。写真 2 は送信信号を測定器により復調した時の信号の振幅と位相を同一平面にプロットしたもので通常コンスタレーションと呼ばれるものである。64QAM に対応した 64 個の信号点が十分判別可能であり、EVM も規格<sup>(5)</sup>を満たすことできた。

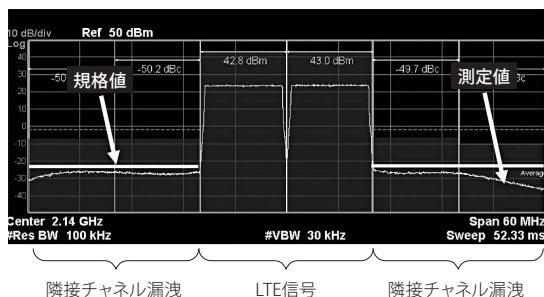


図 8 送信周波数スペクトラム (3G-LTE)

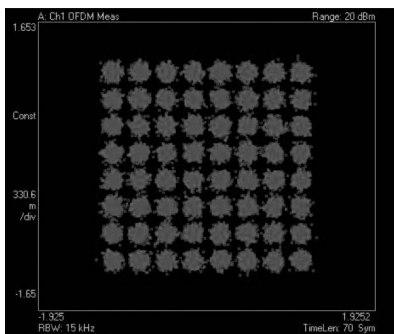


写真 2 送信信号コンスタレーション (3G-LTE)

またこの際の無線出力電力は 44.9W であり、機器消費電力は 161.8W であったので効率は 27.8% であった。3G-LTE のシステムでも 3G システムと同等の効率を実現することができた。

## 5. 結 言

携帯電話基地局等で使用される高出力増幅器の高効率化技術を開発した。これら技術を用いた高効率増幅器を搭載した RRH を試作して、RRH 全体として 28% という業界最高レベルの効率を達成することができた。試作した RRH は十分に実用化できるものであることが確認できている。今後は更なる性能改善を行い、製品化に向けた取り組みを行う所存である。

### 用語集

#### ※1 GSM

Global System for Mobile communications：第 2 世代携帯電話の通信方式の一つ。ヨーロッパやアジアを中心に利用されており事実上の世界標準方式。

#### ※2 PDC

Personal Digital Cellular：日本で開発され日本国内で利用されている第 2 世代携帯電話の通信方式の一つ。

#### ※3 WCDMA

Wideband Code Division Multiple Access：日欧が協力し開発した第 3 世代携帯電話の通信方式の一つ。第 2 世代に比べ高品質な通話と高速なデータ通信が特長。

#### ※4 3G-LTE

3rd Generation - Long Term Evolution：第 3 世代携帯電話の後継システムで、第 3 世代と同一の周波数帯を利用し、より低遅延で高速なデータ伝送を特長とする。

#### ※5 基地局

Base station：携帯電話と直接交信する、携帯電話網の末端にあたる無線装置。

#### ※6 アナログ歪補償

Analog Pre-Distortion：補償する増幅器と相反する特性の歪み特性を持つ別の増幅器やダイオードとの組み合わせで歪みを補償する技術。

#### ※7 フォードフォワード

Feed Forward：増幅器から歪み成分のみを取り出して増幅器の出力に反転して加えることにより歪みを打ち消す補償方式。

※8 LDMOS

Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor：チップ上でドレイン近傍の不純物を横方向に拡散する構造を採用した横型MOSトランジスタ。耐圧を高くできるのが特長。

※9 HEMT

High Electron Mobility Transistor：化合物半導体材料を利用した電界効果型トランジスタで電子移動度が高いこと、電子の飽和速度が高い特長を有する。

※10 OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing：直交周波数分割多重。複数の搬送波を使用するマルチキャリア方式の一つで、隣り合う搬送波を直交するように配置することで周波数利用効率を高めた方式。

※11 移動度

Mobility：結晶中の電子に電界をかけた際に走行する電子の移動速度と印可電界の比。

※12 飽和電子速度

Saturated electron speed：印可電界の強さに比例して増加する結晶中の電子の速度の飽和値。

※13 時分割多重

Time Division Multiplexing：複数の異なるデジタル信号を時間的に配列して、一つの伝送路で伝送を行うことができるようにする多重化方式。

※14 CPRI

Common Public Radio Interface：基地局メーカー間で無線基地局の無線制御部と無線部間の通信方式を標準化した規格。

※15 FPGA

Field Programmable Gate Array：回路の動作をプログラミングすることによって自由に変更できる大規模集積回路。

※16 ファームウェア

Firmware：ハードウェアの基本的な制御を行なうために機器に組み込まれたソフトウェア。

※17 DA変換器

DA converter：デジタル信号をアナログ信号に変換する集積回路。

※18 AD変換器

AD converter：アナログ信号をデジタル信号に変換する集積回路。

※19 ダイカスト

Die casting：金型鑄造法のひとつで、金型に溶融した金属を圧入することにより高い精度の鑄物を短時間に大量に生産する鑄造方式またはその鑄造物。

※20 64QAM

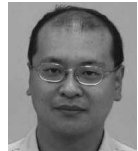
64 Quadrature Amplitude Modulation：位相と振幅をそれぞれ8種類ずつ利用し、それらの組み合わせに値を割り当てることにより、一度に64値のデータを送受信する変調方式。

参 考 文 献

- (1) Report ITU-R M.2023, Spectrum Requirements for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)
- (2) Steve C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, Second Edition, Artech House
- (3) S.Sano et al, "High Efficiency GaN-HEMT PAs for Microwave Solar Power Transmission", IMS2007 Workshop WFG
- (4) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 8), 3GPP TS 25.104 V8.7.0 (2009-05)
- (5) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8), 3GPP TS 36.104 V8.6.0 (2009-05)

執 筆 者

平田 仁士\*：情報通信研究所  
無線伝送システム研究部  
プロジェクトリーダー  
無線アクセス機器の研究・開発に従事



- |       |                     |              |    |
|-------|---------------------|--------------|----|
| 戸谷 一幸 | ：情報通信研究所            | 無線伝送システム研究部  | 主席 |
| 前島 貴  | ：情報通信研究所            | 無線伝送システム研究部  | 主席 |
| 志村 竜宏 | ：情報通信研究所            | 無線伝送システム研究部  | 主席 |
| 武 正行  | ：情報通信研究所            | 無線伝送システム研究部  | 主査 |
| 黒川 頼直 | ：情報通信研究所            | 無線伝送システム研究部  | 主査 |
| 大西 政彦 | ：情報通信研究所            | 無線伝送システム研究部  |    |
| 阿田 祐樹 | ：情報通信研究所            | 無線伝送システム研究部  |    |
| 平田 芳嗣 | ：住友電工システムソリューション(株) | ブロードバンド機器開発部 | 主席 |

\*主執筆者