



WiMAX 向け Remote Radio Head の開発

朝夷名 巧*・荒 木 正・向 井 英 之
桂 勇 男・山 本 剛 史・西 村 修 一
勝 海 繁 範・木 戸 智

WiMAX Remote Radio Head — by Takumi Asaina, Tadashi Araki, Hideyuki Mukai, Isao Katsura, Takeshi Yamamoto, Shuichi Nishimura, Shigenori Katsumi and Satoshi Kido — As the demand for radio data communication increases, WiMAX services have expanded throughout the world. With limited radio frequency resources, efficient use of the radio frequency will become more important as the service expands. For this reason, the multi-antenna technology is expected to be a solution to improve transmission efficiency.

Along with the increase in the transmission rate and frequency bandwidth of radio broadband service, rising power consumption by radio systems has become another problem. To this end, we have been studying technology that improves the energy efficiency of power amplifiers used in base stations.

In this paper, we describe our new WiMAX remote radio head that features low power consumption, and a multi-antenna system with 4 channels.

Keywords: WiMAX, multi-antenna, DPD, RRH, amplifier

1. 緒 言

WiMAX™¹は、無線 MAN²として FTTH などの有線メディアで実現されてきた高速性と、どこでも接続できる無線メディアの利便性の両立を目指したシステムである。IEEE802.16 として世界標準規格となっていることもあり、サービスが世界的に広がってきている。PC 等のモバイル機器のみならず、常時インターネット接続という利点をいかして、自動販売機や電力メータ等と接続する M2M³ サービスへの応用も考えられている^{(1),(2)}。利用可能な無線周波数には限りがあるため、M2M で多くの端末を収容し、高速接続を実現するには、周波数の有効利用技術が不可欠である。

一方、無線通信の高速化・広帯域化により無線システム全体での消費電力の増大が大きな問題となっている。当社では、基地局側で使う高出力増幅器の消費電力の削減が重要と考え、増幅器の電力効率を大幅に改善する高効率増幅技術を開発してきた。最初の応用例として携帯電話基地局⁴用の Remote Radio Head (以下 RRH) を試作し、業界最高クラスの効率を達成できたことを確認した⁽³⁾。

そこで、当社の高効率増幅技術を大きな伸びが期待できる分野に広げていくことを考え、WiMAX 基地局用に周波数有効利用が可能な 4 送信・4 受信の RRH を開発した。

2. 機器の特長と仕様

WiMAX は広域の高速データ通信向けの無線通信規格であり、アクセス方式として OFDMA⁵を採用し、

Downlink⁶ (以下 DL)、Uplink⁷ (以下 UL) ともに同じ周波数を時分割で使う TDD⁸システムである。OFDMA に使われる OFDM⁹方式は電力効率は良くないが、周波数あたりに載せる情報量が多いため、アンテナ当たりの周波数利用効率を高めることができる。TDD 方式は、UL 信号から DL 信号の伝播経路推定ができるため、周波数有効利用技術の一つであるマルチアンテナ技術に適している。WiMAX の次世代規格でも周波数有効利用で 4 本以上のマルチアンテナ技術の本格的な導入が検討されており^{(4),(5)}、今後採用が増えていくものと考えられる。

当社は以前から WiMAX 技術の有用性に着目し、WiMAX 基地局の試作実験⁽⁶⁾や WiMAX 用のアダプティ

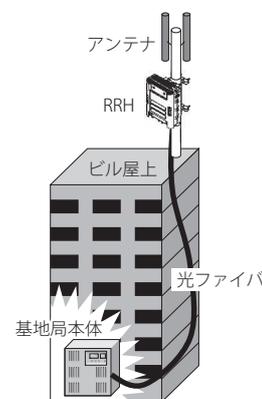


図1 Remote Radio Head の設置形態

ブレイの開発⁽⁷⁾をしてきた。この経験も踏まえ、高効率増幅技術をWiMAX用途に展開するにあたっては、低消費電力化を進めつつ、周波数利用効率の向上と管理運用の利便性を実現するため、マルチアンテナ基地局に対応し、200MHzの広帯域をカバーするRRHを開発することにした。

2-1 Remote Radio Head (RRH) 技術 携帯電話やWiMAXでは基地局側のアンテナは端末との見通しの良い通信路を確保するために通常はビルの屋上や鉄塔などに取り付けられる。これに対し、高出力増幅器を含む基地局本体は屋内のアンテナから離れた場所に設置されていた。この場合、アンテナと基地局本体間で高周波無線信号を同軸ケーブル経由で伝送する必要がある。ケーブルによる伝送損失は避けられないため、高出力増幅器では損失分を見込んでアンテナ出力よりも更に高出力で送信する。距離が長いと消費電力が増大し、問題となる。損失をできるだけ軽減するためには大口径のケーブルを使用することになるが、施工性が悪く、設置が大掛かりになっていた。

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信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。図1に例を示す。この送受信部をRemote Radio Head (RRH) と呼ぶ。RRHは高出力増幅器を含む送信部と、端末からの電波を受信して増幅する受信部と、基地局インタフェース部等で構成される。アンテナの直下に設置することで同軸ケーブルによる伝送損失を抑えることができ、増幅器の出力を抑え低消費電力化につながる。基地局本体とは光ファイバで接続するため、施工が簡易で信号の劣化が少なく、無線信号の品質を向上させることができる。

2-2 マルチアンテナ技術 電波は一定の広がりを持って放射されるため、基地局から端末へ届く経路が複数存在する。直接届く経路以外に建物の壁などで反射する経路があり、経路により時間遅れや振幅の差が発生する。受信側ではこれを一括で受けるため、遅延による位相差によって信号が強められたり、弱められたりする。マルチアンテナ技術は基地局側、端末側双方もしくは片側で複数のアンテナを使う無線伝送技術のことで、一定の距離を置いたアンテナから振幅、位相を個々に制御して電波を放射する技術である。無線信号到達エリアの拡大、干渉回避、スループットの向上といった効果を得ることができる。

(1) 信号到達エリアの拡大

基地局と端末間の伝播特性が判明している場合には、複数アンテナから出てくる信号の位相と振幅を適切に調整することで、受信機がいる位置で強めあうように調整したり、逆に弱めあうように調整したりすることができる。これにより遠くの端末まで電波を到達させることが可能となる。

(2) 干渉回避

WiMAXでは限られた周波数を使うため、近隣のセル間で同じ周波数を繰り返して使用することがありうる。この場合、他セルからの干渉により無線信号の品質の劣化が考えられる。たとえば、基地局AとBがありそれぞれに端末A2、B2が接続されていると考える。基地局Bと端末B2間の通信においては、基地局Aと端末A2間の通信信号は干渉波となり、通信品質を劣化させる。図2のように複数のアンテナで信号の位相と振幅を調整すれば、別の基地局にいる端末に対しては信号が弱くなるように調整することもでき、干渉を抑圧することができる。

(3) スループットの向上

WiMAXも無線LAN同様にMIMO^{*10}技術に対応している。図2のように同一周波数で、複数のデータストリームを、複数アンテナで送信し、複数アンテナで受信する。予め測定しておいた伝播特性と複数の受信信号を使って解析すると、混じり合って受信した複数のデータストリームの分離ができる。アンテナ本数に応じ、ストリームを増やすことができるため、スループットの向上につながる。

本RRHでは、これらのマルチアンテナ技術を用いたWiMAX基地局へ対応するため、4系統の送受信系を用意した。各送受信系の特性を統一するためにキャリアレーション回路を入れる構成を採用した。

2-3 広帯域・高効率化技術 WiMAXは世界標準規格であるが、周波数割り当ては、それぞれの国や地域で管理されるため若干の差異がある。通常は、通信事業者への割り当て帯域幅は数10MHzなので特定地域に限定すれば、数10MHzがカバーできれば良い。しかし、管理や設置コスト削減には、地域によらず対応できることが必要である。そのため、WiMAX Forumで想定する2.5GHz帯の全帯域にあたる2.5GHz～2.7GHzを本装置一台で対応可能とした。

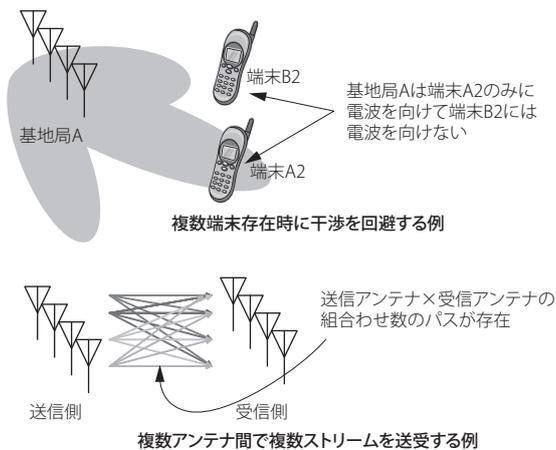


図2 マルチアンテナの適用例

本装置では、広帯域と高効率を実現するため、GaN-HEMT^{*11}を送信の増幅器の最終段アンプに採用した。GaNは一般的に使われるLDMOS^{*12}と比較して整合インピーダンスが高いため、広帯域に特性を調整することが可能となる。広帯域・高効率にすることで信号に歪が発生するが、デジタル信号処理による歪補償を用いて対応している。

2-4 機器仕様 図3に本装置のブロック図を、表1に本装置の仕様を示す。アルミ製筐体の中に、4系統のRF送受信部、補正用のキャリブレーション送受信部と基地局とのインタフェースや信号処理用のデジタル部が入る。小型軽量低消費電力で、広い動作温度範囲を持つ。

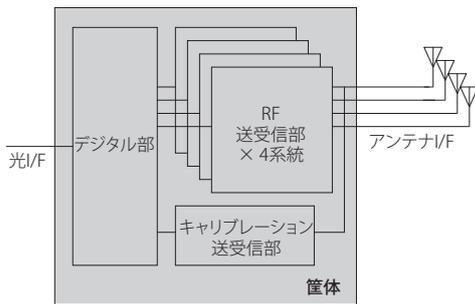


図3 WiMAX用RRHブロック図

表1 試作したRRHの仕様

無線方式	IEEE802.16e (Mobile WiMAX)
周波数帯	2.5GHz～2.69GHz
チャンネル帯域幅	5MHz/10MHz
アンテナ接続端子数	4系統
最大平均出力電力	16W (4W × 4)
基地局接続	標準光インタフェース
サイズ	420(H) × 350(W) × 125(D)mm
重量	12.5Kg
消費電力	< 150W
動作温度	-40℃～50℃

通常の送信系はベースバンド信号処理部^{*14}からのデジタルIQ信号^{*15}をDAコンバータでアナログ信号に変換する。このアナログIQ信号は直交変調器(MOD)を用いて2.5GHz帯のRF変調信号に変換される。そしてドライバアンプによってパワーアンプを駆動するために必要な電力に引き上げられた後、最終段にあるGaN-HEMTのパワーアンプによって4Wクラスの電力へと増幅される。受信系では低雑音アンプ(LNA)を用いて微弱なRF受信信号を十分なレベルにまで引き上げた後、ダウンコンバータ^{*16}によってIF周波数へ変換される。そしてBPF^{*17}を通過した後に、ADコンバータによってサンプリングされる。

本RRHは、4アンテナのマルチアンテナ技術に対応しているが、複数アンテナを使った信号処理では各送受信系間の無線特性のばらつきがその性能を左右する。ばらつきの校正をする必要があるため、本装置では、キャリブレーション用送受信器を用意し、系毎の特性の差異を測定する。受信系の校正では基準送信器の信号を各受信系に入力し、送信系の校正では各送信系の送信信号を基準受信回路に入力して測定する。キャリブレーション用の送受信回路は、この基準送受信器となる。

また、キャリブレーション受信器は、送信の歪補償処理でも使用する。最終段アンプの歪は、キャリブレーション受信器によって定期的に測定し、デジタル部の歪補償用の信号処理部に引き渡される。

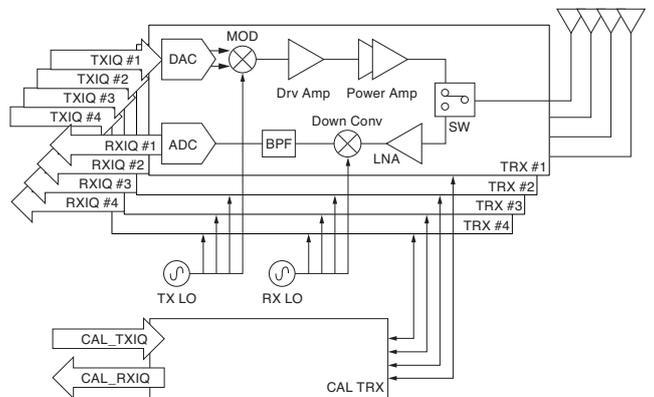


図4 RFブロック図

3. RRH各部詳細

今回試作したRRHの詳細について以下に述べる。

3-1 RF部 RF部の構成を図4に示す。TDDシステムになっているため、各送受信回路は、送受信切り替え用のRFスイッチを通して、送受信共用のアンテナへと繋がっている。通常の送受信系と別にキャリブレーション用の送受信回路を用意しており、RFスイッチとアンテナ出力間に方向性結合器^{*13}を設置し、各送受信回路と接続している。

3-2 デジタル部 デジタル部は基地局インタフェース部、デジタル信号処理部、および全体を制御する監視制御部から構成される。光ファイバ経由で基地局から送られてきたデジタルIQ信号は信号処理部で補償をされた後、RF部送信系のDAコンバータに送られる。受信側はADコンバータから入力したデータをデジタルIQ信号に変換し基地局へ転送する。送信系信号処理としてピーク低減

(CFR) と歪補償 (DPD) を用いて、低消費電力化と通信品質向上を図っている。

(1) CFR : Crest Factor Reduction

WiMAXで採用されているOFDMなど現代の移動通信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。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5）。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WiMAXシステムに適したCFRを開発し、従来製品よりも小型の回路でPAPRの低減を実現している。

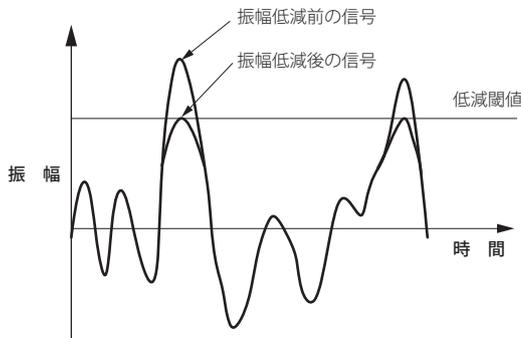


図5 ピーク電力低減技術 (CFR)

(2) DPD : Digital Predistortion

増幅器の性能として求められるのは電力効率と線形性であるが、この2つはトレードオフの関係にある。消費電力を低減するために電力効率を向上させると、増幅器としての線形性が悪くなり、歪特性が劣化する。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

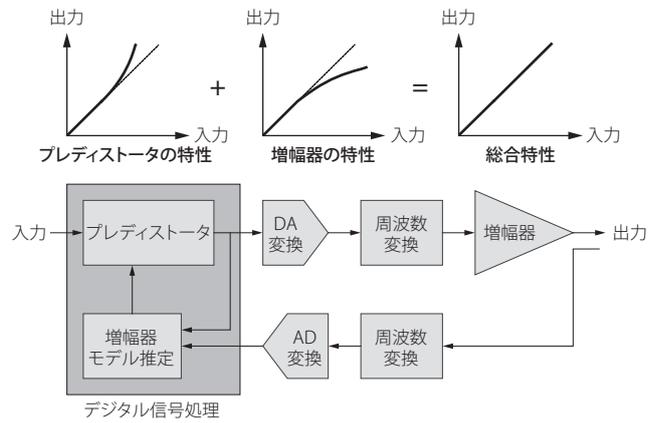


図6 DPDによる歪補償

して歪みのない信号を得ることができる（図6）。

当社ではアンテナ間で一部回路を共有化するなどマルチアンテナに適したDPD回路を新たに開発しており、従来製品よりも回路規模を増大させることなく4アンテナの歪を除去することに成功している。

3-3 筐体 RRH筐体は小型軽量で屋外に容易に設置できることが求められる。本RRHでは、放熱フィンを一体化したアルミ筐体を用いてパワーアンプの熱を直接外部へ逃がすことでファンレス、小型化を実現した。アルミ筐体は熱を吸収しやすいため、直接日光にさらされる場合に備えて樹脂製の日除けを取り付ける構造とした。コネクタ類は全て防水性の高いものを用意し、屋外での長期運用に対応している。

4. 評価

市販測定器、ソフトウェアを使用し擬似基地局を構成してRRHの評価を実施した。

4-1 評価環境 図7にDL評価時の評価環境を示す。信号源となるパタージェネレータ（以下PG）と、光ファイバでRRHと接続されて信号をRRHに送り出す擬

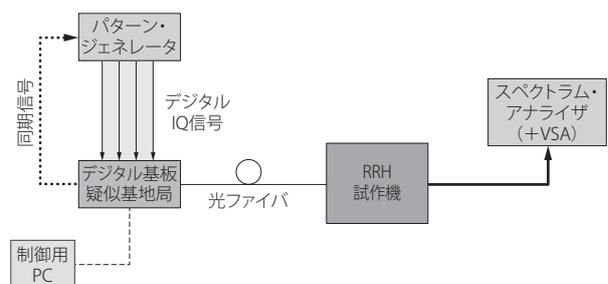


図7 試作機の評価環境 (DL評価)

似基地局、RRHの無線信号を取り込むためのスペクトラムアナライザ（以下SA）から構成される。評価用のWiMAXデジタルIQ信号は、各変調方式を組み合わせた評価信号としてシミュレータソフトウェア上で作成して、予めPG上にセットする。PGの信号は擬似基地局に転送され、擬似基地局からRRHに送られ、RRHで各チャンネル4Wの無線信号となる。RRHのアンテナコネクタからの信号は同軸ケーブルでSAに取り込まれる。

SA上では、送信マスクやスプリアス、歪み量を示す隣接チャンネル漏洩電力比 ACLR（Adjacent Channel Leakage Ratio、以下 ACLR）を解析し、付属するVSA（Vector Signal Analyzer）システムを用いて変調解析を行い、変調精度EVM（Error Vector Magnitude、以下EVM）を評価する。

4-2 無線性能評価 主な性能項目の特性評価結果について述べる。

図8は、WiMAX信号帯域幅を10MHzに設定し、DPDを適用した場合の、4W出力時の送信スペクトラムである。隣接チャンネル漏洩電力比ACLR特性はETSI規格⁽⁸⁾を満足している。図9は、QPSK、16QAM、64QAMの送信信号

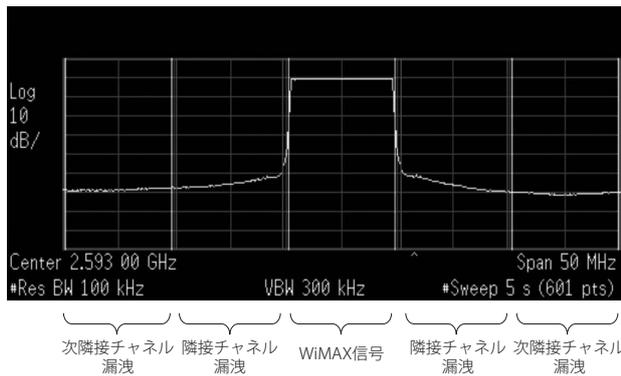


図8 送信周波数スペクトラム (10MHz)

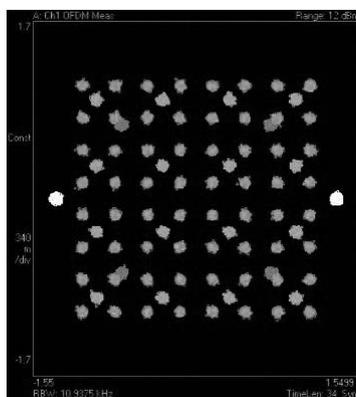


図9 送信信号コンスタレーション

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。たとえば、64QAMに対応した64個の信号点が十分判別可能であるなど、WiMAX Forumで規定するEVM規格を満足する。

本RRHは、高精度のレベル検出回路により200MHzの広帯域で送信出力レベルを調整する機能（ALC：Automatic Level Control）を有している。調整性能を図10に示す。

受信信号はRFフロントエンドのBPFの低損失化及び受信系アンプの適切なレベルダイヤグラム設計により広帯域に渡る低ノイズ特性と高耐入力レベル特性を実現している。受信のダイナミックレンジは55dB以上である。使用周波数に適したBPFを使用することで帯域外不要波を除去しETSI規格のブロッキング性能を満足している。WiMAX Forum及びETSI規格で規定されている項目での結果を表2に示す。十分に規格を満足する結果となっている。

消費電力についてはTDDのDL/UL区間に合わせ各系統への給電を制御し低消費電力を実現している。DL信号4W×4ch出力（DL信号長35シンボル、UL信号長12シンボル）にて消費電力147W以下である。

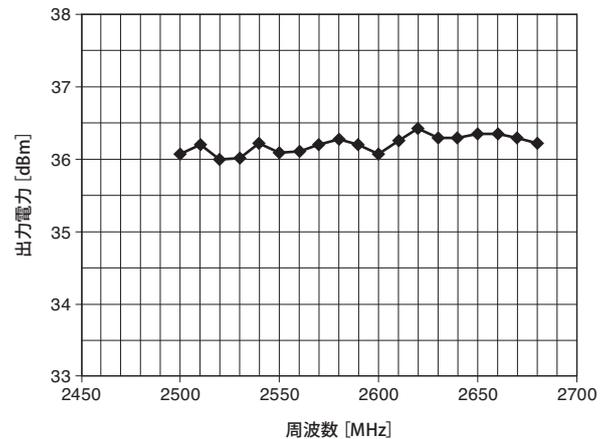


図10 周波数特性

表2 WiMAX Forum/ETSI規格への適合判定

項目		規格	判定
DL信号	ACLR特性	<-44.2dBc (隣接チャンネル) <-49.2dBc (次隣接チャンネル)	適合
	変調精度	<-18dB @QPSK-3/4 <-30dB @64QAM-5/6	適合
UL信号	干渉波入力レベル	下記条件でBER10 ⁻⁶ 以下 -40dBm (WiMAX信号) -15dBm (CW信号)	適合

5. 結 言

本稿では、当社が開発したWiMAX向けRRHの特長、機器仕様、性能評価について報告した。評価を通して、本装置が、実運用に耐えうる性能を持つことが確認できた。今後は国内外の市場動向調査を行うとともに、マルチアンテナ技術ベンダーの協力も得て、製品化に向けた取り組みを行う所存である。

用語集

※1 WiMAX

Worldwide Interoperability for Microwave Access：無線通信標準規格IEEE802.16の呼称。WiMAX、Mobile

・WiMAX、WiMAX Forumは、米国WiMAX Forumの米国及びその他の国における商標または登録商標です。

※2 MAN

Metropolitan Area Network：半径数kmのエリア(都市)をカバーするネットワーク。

※3 M2M

Machine to Machine：人の手を介さない機器同士の通信。

※4 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。

※5 OFDMA

Orthogonal Frequency Division Multiple Access：直交周波数分割多重アクセス。OFDMで複数ユーザが無線帯域を共有する。

※6 Downlink

無線基地局から端末へ向けて送信する通信。

※7 Uplink

端末から無線基地局へ向けて送信する通信。基地局は受信側となる。

※8 TDD

Time Division Duplex：時分割複信。アップリンクとダウンリンクで同じ通信帯域を使用し、両通信を時間的に分離する方式。

※9 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。

※10 MIMO

Multiple Input Multiple Output：複数の送信アンテナ、受信アンテナを用いて複数のデータストリームを送信する方式。

※11 GaN-HEMT

GaN High Electron Mobility Transistor：窒化ガリウム(GaN)製のHEMT。化合物半導体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。

※12 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。

※13 方向性結合器

特定の方向に伝播する電力のみを取り出すことができる結合器。送信、受信の監視に使用する。

※14 ベースバンド信号処理部

情報量に一致した周波数を使った処理ブロック。電波を飛ばす時には、無線周波数との変換を行う。

※15 デジタルIQ信号

In-phase(同相成分)、Quadrature(直交位相成分)の2つのデジタル量で信号の振幅と位相を同時に表現したものの。直交変調、周波数変換を介してRF信号となる。

※16 ダウンコンバータ

Down Converter：周波数変換器。高い周波数から低い周波数へ変換するものをダウンコンバータ、逆のものをアップコンバータと呼ぶ。

※17 BPF

Band Pass Filter：帯域通過フィルタ。特定の帯域成分のみを取り出すフィルタ。

参 考 文 献 -----

- (1) WiMAX Forum whitepaper, "WiMAX Applications for Utilities", Oct. (2008)
- (2) M2M 端末例
http://www.sei-networks.com/product/wireless_j.html
- (3) 平田仁士、戸谷一幸他、「携帯電話基地局用高効率増幅器の開発」、SEIテクニカルレビュー、第176号、pp51-56 (2010)
- (4) IEEE Standard 802.16-2009
- (5) IEEE P802.16m/D4 February (2010)
- (6) 三田雅樹、荒木正他、「WiMAX基地局の概要・機器構成・通信性能およびフィールド実験の結果について」、SEIテクニカルレビュー、第174号、pp45-49 (2009)
- (7) 平川満、山本剛史他、「Mobile WiMAX上り回線用アダプティブアレーの開発」、SEIテクニカルレビュー、第174号、pp37-44 (2009)
- (8) ETSI EN 302 544-1, European Telecommunications Standards Institute

執 筆 者

朝夷名 巧* : 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



荒木 正 : 情報通信研究所 無線伝送システム研究部 主席
向井 英之 : 情報通信研究所 無線伝送システム研究部 主席
桂 勇男 : 情報通信研究所 無線伝送システム研究部 主査
山本 剛史 : 情報通信研究所 無線伝送システム研究部
西村 修一 : 情報通信研究所 無線伝送システム研究部
勝海 繁範 : 住友電工ネットワークス(株) アクセス機器部 主席
木戸 智 : 住友電工ネットワークス(株) アクセス機器部 課長補佐

*主執筆者