

将来の高速モバイルインフラを支える技術

New Technologies for High-Speed Mobile Communication Infrastructure

あらまし

数年後には第3世代移動通信システムの高度化、さらに2010年頃には第4世代の移動通信システムが商用化されると予想される。富士通研究所では、これらに適用することを想定して伝送速度の一層の高速化を実現するための技術開発を行っている。

一つ目のアダプティブアレイアンテナ技術は、デジタル信号処理によってビームパターンを形成する。これによって干渉を低減できるので、加入者収容数の増加またはセルの拡大を図ることができる。二つ目の高効率アンプは基地局装置の小型化、消費電力削減に寄与する。三つ目の超伝導フィルタはガードバンド幅を狭めて、周波数利用効率向上に寄与する。四つ目の高速伝送用信号処理技術は、100 Mbpsの高速伝送をセルラーシステムで実現するための変復調などの技術である。

本稿では、この四つの技術の開発状況について述べる。

Abstract

Today's third generation of mobile communication systems is expected to be radically upgraded in the coming years, with the fourth generation of such systems being commercialized by around 2010. Fujitsu Laboratories is consequently developing technologies to increase transmission rates even further for application to mobile communication systems of the future. This paper describes four technologies we are now developing. The first technology (an adaptive array antenna) can form beam patterns through digital signal processing, thus allowing us to reduce electromagnetic interference, while expanding subscriber accommodation capacity and cell areas. The second technology is a high-efficiency amplifier that can help downsize and reduce the power consumed by base station equipment. The third technology is a superconducting filter that enables a narrowing of guard bands and a more efficient use of frequencies than ever before. Lastly, we are developing signal processing technology (covering everything from signal modulation and demodulation to high-speed transmission) to achieve high-speed transmission of 100 megabits per second in a cellular communication system.



安井 豊
(やすい ゆたか)

ユビキタスシステム研究センターワイヤレスインターネット研究部 所属
執筆時、第3世代携帯電話システムの基地局装置開発に従事。



田中良紀
(たなか よしのり)

モバイルコミュニケーション開発研究所モバイルアクセス研究部 所属
現在、次世代無線アクセスシステムの研究開発に従事。



大石泰之
(おおishi やすゆき)

モバイルコミュニケーション開発研究所RFソリューション研究部 所属
現在、第3世代携帯電話システムの基地局装置開発に従事。



山中一典
(やまなか かずのり)

材料・環境技術研究所無機・高分子材料研究部 所属
現在、超伝導材料および第3世代携帯電話システム用超伝導フィルタ装置開発などの開発に従事。

まえがき

本格的な移動通信システムは自動車電話サービスから始まった。当初は通信装置が大きく重く、料金も高かった。技術の進歩により装置が劇的に小型化して手のひらに乗る携帯電話端末となり、制度の変更など（1994年の携帯電話販売自由化、1995年のPHSとの競合）で端末の価格や通話料金が下がったことで一気に普及した。一方、移動通信システムのデジタル化により、iモードに代表されるデータ通信サービスが移動通信網でも始まった。インターネットの普及に伴い、携帯電話単独で、また携帯電話とノートPCの組合せでいつでも・どこでもインターネットを利用するという使い方が一般的になっている。今後は更に普及することが予想され、これによって、移動通信システムの伝送速度の一層の高速化が必要になると考えられる。

2001年から商用サービスが開始された第3世代移動通信システムであるIMT-2000では、下り伝送速度は最大2 Mbpsが可能であるが、仕様を策定中のHSDPA (High Speed Downlink Packet Access) では14 Mbpsが、さらに第4世代では100 Mbpsが目標となっている。

しかし、伝送速度の高速化は端末や基地局の消費電力の増大を招くため、セルラーシステム上でのデータ伝送速度の高速化には新しい技術を導入してこの課題を解決する必要がある。

本稿では、移動通信システムのインフラ構築技術のうち、高速データ伝送を実現するための無線伝送に関わる技術を紹介する。

アダプティブアレイアンテナ技術

移動通信システムでは、基地局と端末の間の伝送路にフェージングやドップラ分散があるため、伝送される信号の減衰や品質の劣化が起こる。IMT-2000で採用されたW-CDMA方式は移動環境での高速データ伝送に適した方式の一つであり、ユーザ間の信号の干渉は少なく、伝送される信号の減衰や品質の劣化が少ない。しかし、伝送速度を上げるためには、送信電力を増す必要があり、その結果干渉も増えるため、通信の品質を保つには、同時に通信できるユーザ数を少なく抑えることが必要である。送信電力の増加は一方で端末の電池の消耗が早くなる

ので、ユーザにとっては不便である。

同時使用ユーザ数を減らさないためには、干渉を減らす必要があり、そのための技術として、富士通研究所ではアダプティブアレイアンテナ技術 (AAA) の開発を進めている⁽¹⁾ AAAはアンテナの感度を向上させるので、送信電力の低減にも効果がある。

AAAは以下の要素技術を統合して基地局装置に組み込むものである。

- (1) 上り・下りキャリブレーション技術
- (2) 高感度サーチャー技術
- (3) 上り・下りデジタルビームフォーミング技術
- (4) 一括復調技術
- (5) 光伝送技術
- (6) 並列パワーアンプ

AAAの原理を図-1に基づいて以下に述べる。

上り（携帯電話端末が発信した信号を基地局が受信する）については、まず電波を複数のアンテナ (A0～A3) で受信する。受信したい利用者の電波について、各アンテナからの信号はその到来角度 () に応じた経路差分 ($d \cdot \sin$) の位相のずれがあるので、これを打ち消すように適切な遅延をかけて合成することにより、受信したい信号だけを強め、それ以外の信号を弱めることができる。

なお、下り（基地局が発信した信号を携帯電話端末が受信する）については、送信する電波の位相を適切に設定することで、特定の向きのみ電波を強めることができる。

このような処理はすべてデジタル信号処理によって行われるが、それに付随して、送信・受信のアナログ回路（アンプなど）の回路数増加に対する対策、アナログ部分の特性のばらつきの補正、ビーム

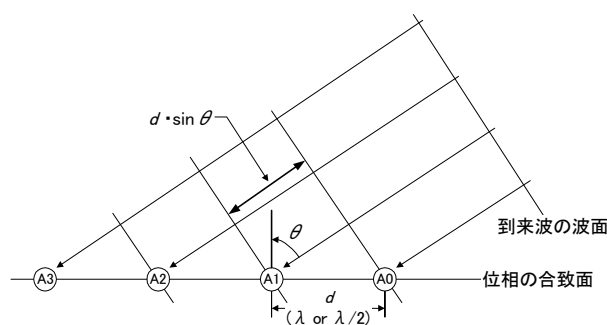


図-1 AAAの原理
Fig.1-Principle of AAA.

フォーミングのためのウェイト計算の高速化，また，低レベルの信号でも検出して到来方向の情報を抽出できる機能などが必要となる。

富士通研究所では，上記(1)～(6)のうち，一部を除いた機能を基地局実験装置に組み込み，2003年3月からフィールド実験を行って，その特性を評価してきた。取得した特性データの一部を図-2に示す。

OMNIが無指向性のアンテナ，DoAおよびOMNI-NLMSがAAAの特性を表す。(DoAおよびOMNI-NLMSはそれぞれビームフォーミングのための演算アルゴリズムを表す。)図-2は無指向性のアンテナとAAAで同じ信号誤り率(BER: Bit Error Rate)では，AAAの方が6 dB電力が少なくてもよいこと，すなわち，AAAの利得が6 dBあることを示しており，この値は理論的な利得とほぼ一致する。

高効率アンプ技術

第3世代移動通信システムの無線基地局では，多数のユーザを収容するために複数のコードチャネル，複数の無線周波数キャリアを多重した信号を，基地局から端末への下りリンク信号として無線伝送する。高効率アンプはこの下りリンク無線信号に必要な電力まで増幅する送信電力増幅器に用いる技術である。近年，移動通信の伝送レートはますます高速化する傾向にあり，第3世代携帯電話の普及と併せて基地局の大容量化が必須となっている。これに伴い必要な無線送信出力も増加しており，基地局装置全体の消費電力と大きさが局舎の収容限界に近づきつつあ

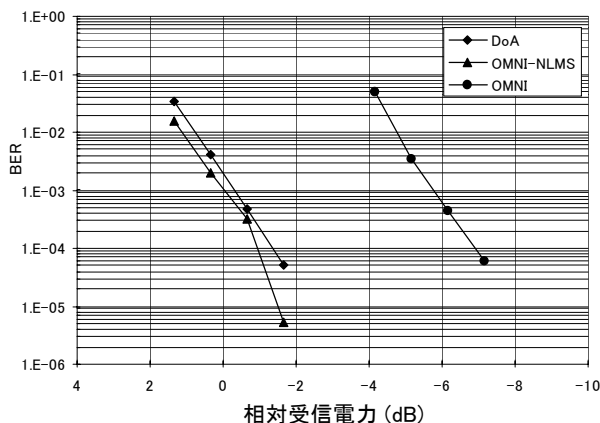


図-2 AAAの利得
Fig.2-Gain characteristic of AAA.

る。送信電力増幅装置の消費電力と容積は基地局の大きな部分を占めるため，本装置の低消費電力化と小型化が今後の大容量基地局の実現のかぎを握っている。

本章では送信電力増幅装置の大幅な低消費電力化と小型化を実現したデジタルプリディストーション(DPD: Digital PreDistortion)型高効率アンプ⁽²⁾について紹介する。電力増幅技術ではその線形性と電力効率の両立が課題となるが，一般にアンプを線形領域で動作させた場合，電力効率(アンプの消費電力に対する無線出力電力の比)は低い。そこでより効率の高い非線形領域を用いて線形な増幅を可能とする歪補償技術が多く研究されている。

今回新しく開発したDPD方式の構成を図-3に示す。DPD方式は，従来のプリディストーション技術をベースに，デジタル信号処理によりアンプの非線形歪を推定し適応的に補償する富士通研究所独自の歪補償技術である⁽³⁾とくに4キャリアW-CDMA信号の共通増幅に要求される広帯域信号に対する歪補償特性を改善している⁽⁴⁾これにより，アンプや周波数変換部で生じる振幅，位相の周波数偏差やデバイスのメモリ効果など，従来のプリディストーション技術では補償が困難であった歪に対しても良好な補償特性を得ることが可能となった。

DPDアンプによりW-CDMAの4キャリア信号を増幅した場合の送信出力スペクトラム特性を図-4に示す。各キャリアの送信信号は3GPP(3rd Generation Partnership Project)で規定されるテストモデル1⁽⁵⁾を用いて評価した。DPDにより高次歪が抑圧され，隣接チャネルへの漏洩電力を大幅に低減していることが分かる。これにより，W-CDMAに要求される送信信号規格(隣接チャネル漏洩電力比，スペクトラムエミッションマスク，変調精度，ピークコードメインエラーなど)を満足

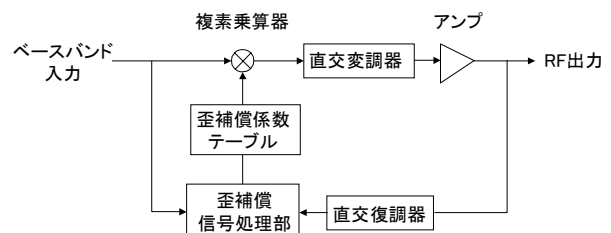


図-3 デジタルプリディストーション方式の構成
Fig.3-Configuration of DPD.

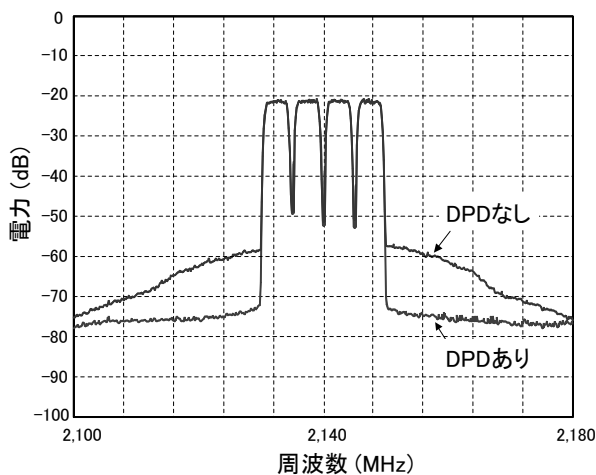


図-4 送信出力スペクトラム
Fig.4-Power spectra of power amplifier.

しつつ、アンプ動作点のバックオフマージンを低減できるため、電力効率を改善することが可能となる。

開発したW-CDMA無線基地局用送信電力増幅装置の外観を図-5に示す。DPD方式の採用により、従来のフィードフォワード方式アンプ⁽⁶⁾に比較して、電力効率を約2倍に改善し、容積を40%削減することに成功した^{(7),(8)}。

超伝導フィルタ技術

携帯電話などの無線通信システムでは、利用の増加に伴い、将来、周波数資源のひっ迫が予想されている。信号周波数のみを効果的に選択できれば、ガードバンドを極限まで減らしつつ他局との使用電波の周波数上での信号干渉を抑制できることになり、周波数資源を有効に活用できる。一方、酸化物高温超伝導体は、移動通信で用いられる準マイクロ波、マイクロ波では通常の銅、銀などの電気良導体に比べて2~3桁ほど、表面抵抗を小さくできることが知られている。このことは、無線基地局で周波数を選択する無線用の高周波フィルタに応用したとき、超伝導ならではのエネルギー損失の割合が小さい高Q値が得られ、高い周波数選択性のフィルタを得るために有効であることを意味する。また、数十K程度の低温動作のため受信の高感度化も両立できる。このため、これまでに世界中の多数の機関で材料、フィルタ化、装置化などの研究開発が進められてきている。

高温超伝導体 (HTS) フィルタ用の材料は、良



図-5 DPD方式送信電力増幅装置
Fig.5-DPD power amplifier.

質な酸化物高温超伝導材料を得ること⁽⁹⁾や、その回路の構成材料、作製プロセスの開発が重要である。例えば材料品質の制御が不良であると、Q値の低下を招きフィルタリングの特性も低下することになる。また、フィルタ回路では超伝導の高Q特性を生かし設計精度が高く小型構造の開発などが重要である。

小型化に有利な平面型回路による超伝導フィルタの構成の場合には、超伝導膜の膜質が重要である。無負荷Q値 (Qu) の膜質や動作温度の影響について、基板両面にYBCO超伝導膜を成膜し、回路パターンを形成したマイクロストリップライン (MSL) の平面回路型共振器により評価した例を図-6に示す⁽⁹⁾。この場合、高密度、高結晶配向に制御よく形成した膜Bの方がQu値が高く、さらに低温域ではMSL型としては2 GHzで10万以上の非常に優れた値が得られた。また、同じ形状の共振器でYBCO膜の代わりに電気良導体である銅膜を用いた場合、評価される無負荷Qは数百からせいぜい千前後なので、これらのYBCO膜による効果は大きいと考えられる。

今回、第3世代移動通信システム基地局への応用に向け、HTSフィルタを搭載した屋外仕様の受信増幅装置を開発した⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。以下に、概要を紹介する。

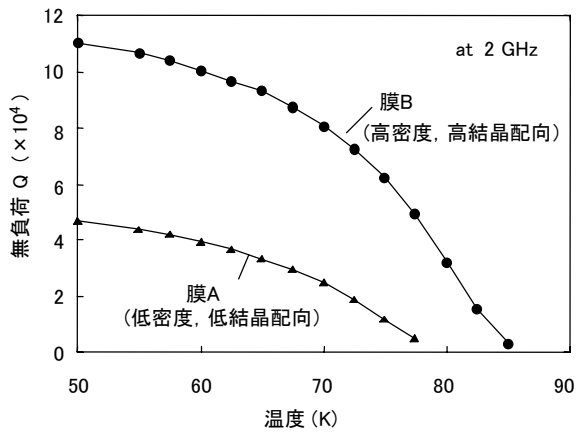


図-6 YBCO超伝導膜を用いたマイクロストリップライン型共振器の無負荷Q
Fig.6-Unloaded Q of MSL type resonators with deposited YBCO films.

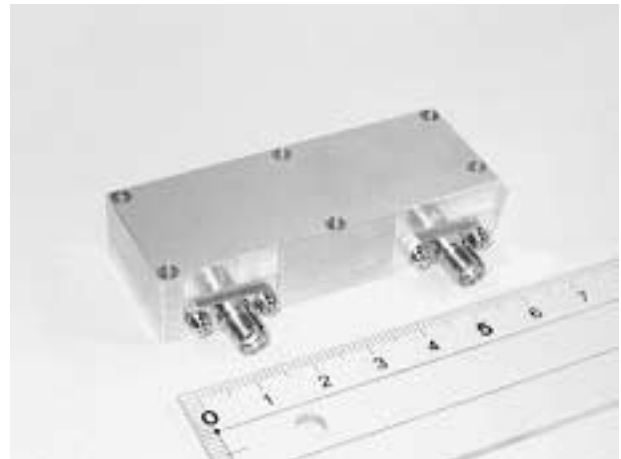
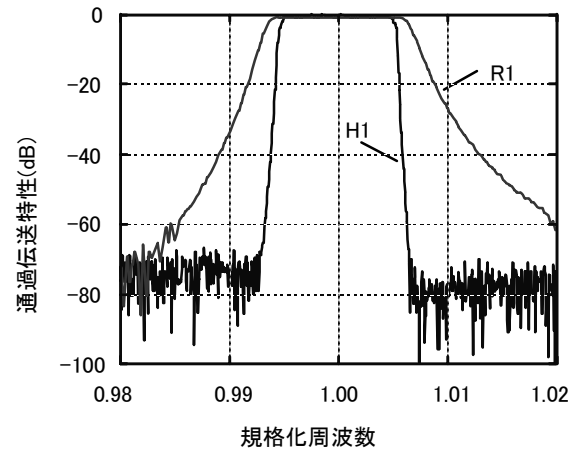


図-8 開発した超伝導フィルタパッケージ外観
Fig.8- Developed HTS receiving filter with the package.



図-7 超伝導フィルタ搭載の屋外受信増幅装置の試作機
Fig.7- Developed open-air receiving front-end with HTS filters for 2 GHz band.



H1: 開発した超伝導フィルタの特性
R1: 常温動作の通常フィルタ

図-9 特性の比較
Fig.9-Comparison of transmission characteristics.

IMT-2000向けに開発した超伝導フィルタ搭載の屋外受信増幅器の試作機の外観を図-7に示す。

この装置の開発では、超伝導フィルタの優れた特性を生かしつつ小型化するため、

- (1) 高温超伝導材料と電極材料構成を工夫したフィルタ回路入出力により超伝導材料のプロセス劣化を抑え優れた伝送特性の確保、
- (2) フィルタパッケージの小型化・軽量化による冷却の熱負荷低減、
- (3) フィルタ内部のマイクロストリップ型共振回路において従来のヘアピン形状に比べ小型で特殊なスパイラル回路パターン形状の開発などを行った。この結果図-8に示すとおり、通常のヘアピン形状のHTSフィルタに比べ占有容積約

50%に小型化した第3世代移动通信システム向けHTSフィルタを試作できた。フィルタリング特性も図-9に示すとおり、常温動作の通常フィルタに比べ優れていることを確認した。また、この新規の小型、低熱負荷型フィルタパッケージなどの開発によって、冷凍出力の小さい小型冷凍機を利用できるようになった。

そのため、冷凍機を搭載しながらも、開発した受信増幅装置全体は従来の常温で動作する受信増幅装置と同程度に小型化できた。

開発した装置は、屋外使用を考えて設計しており、設置が容易な重量とサイズを実現しつつ、受信の高感度化、隣接チャネルからの周波数干渉低減能力の

向上を図った。これにより、高速デジタル通信などの品質向上が期待できる。

第4世代移動通信システムの技術

国際電気通信連合（ITU）では、IMT-2000の導入に目処がたったことから、IMT-2000の今後の発展と将来システムに関する研究を2000年に開始した。2002年にITUの無線通信部門（ITU-R）において、この新世代移動通信システムの将来ビジョンに関する勧告案がまとめられた。⁽¹³⁾ 図-10は新世代移動通信システムに要求される能力を表している。IMT-2000自体は、今後も新しいサービスを提供するため、最大30 Mbps程度までの高速化を含めた能力拡張が継続的に行われる予定である。一方、IMT-2000の拡張では実現できない領域をカバーするため、2010年頃からの導入を目標として、高速移動環境において100 Mbps程度、低速移動環境において1 Gbps程度の最大（ピーク）伝送レートを実現する新しいアクセスシステム（新世代移動アクセスシステム）が必要になるとしている。新世代移動通信システムは、IMT-2000（3G）、新世代移動アクセスシステム、無線LAN、デジタル放送など、様々なタイプのアクセスシステムをネットワークを介して相互に連携し、ローミングによるシームレス化を実現することを目指しており、これに向けた研究開発は既に活発に行われている。新世代移動アクセスシステムのための周波数割当てについては、2007年の世界無線通信会議（WRC）における割当てを目指して検討・議論が行われている。

富士通研究所では新世代移動アクセスシステムを第4世代（4G）の移動アクセスシステムと位置付けている。この第4世代移動アクセスシステムへの適用に向けて検討を行っている主な技術について以下に概説する。

マルチキャリア変調技術

高速伝送実現のためには、より広い帯域を用いることが有効であるため、W-CDMAの帯域幅である5 MHzの数十倍の帯域を用いる方式が検討されている。広帯域伝送ではマルチパス歪および符号間干渉による伝送特性の劣化が問題となるが、これらの影響を受けにくい変調方式として、送信信号をあらかじめ複数の狭帯域の信号に分割し、これを複数のキャリアを用いて伝送を行うマルチキャリア変調技

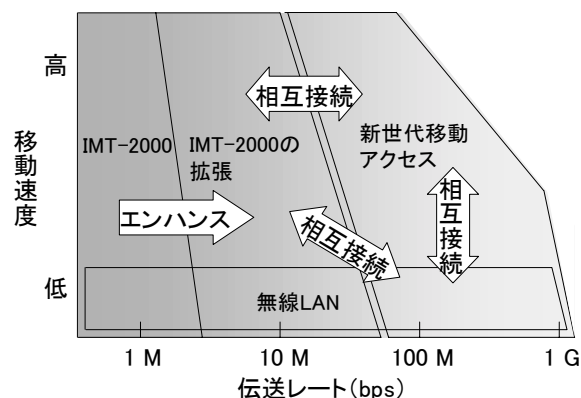


図-10 新世代移動アクセスシステムに要求される能力
Fig.10-Capabilities of IMT-2000 and systems beyond.

術が注目されている。とくに、互いに直交するキャリアを用いる直交周波数多重変調（OFDM：Orthogonal Frequency Division Multiplexing）は周波数利用効率が高いことから、無線LANや地上波デジタルTV放送などに既に採用されている。本変調方式は、個々のキャリア信号の帯域が狭いため、歪を受けにくいことが特徴である。欠点としては、多数のキャリアを用いることで信号波形のピーク対平均電力比が高くなるので、波形歪や隣接チャネルへの電力漏洩を低減するため、線形性の高い電力増幅器を用いる必要がある。富士通研究所では、電力増幅器による歪を補償する技術、遅延時間の大きいマルチパスによる歪の補償技術⁽¹⁴⁾などの研究を行っている。

多重アクセス方式

様々なデータレートや要求品質を持つ伝送トラヒックを効率的に収容するため、どのような多重アクセス方式を用いるかは重要である。OFDM変調方式を適用したシステムとしては、CDMAおよびTDMA（Time Division Multiple Access）の適用が広く検討されている。OFDMとCDMAを組み合わせたものはMC-CDMA（Multi-carrier CDMA）と呼ばれ、CDMAの特徴である基地局配置に高い柔軟性を有することから、富士通研究所でも活発に研究を行っている。

空間多重伝送技術

飛躍的に周波数利用効率を改善できる技術として、送信側、受信側双方において複数のアンテナを用いて通信を行うMIMO（Multi-Input Multi-Output）技術が注目されている。⁽¹⁵⁾ 複数の送信アンテナから

同時に、同じ周波数を用いて異なる情報を送信することで空間多重を行い、受信側でこれらを分離することにより情報を抽出する。送信側、受信側それぞれにおいて4本のアンテナを用いたMIMO通信システムの構成を図-11に示す。4種類の異なるデータ系列A, B, C, Dをそれぞれ異なる送信アンテナより送信すると、これらはそれぞれ異なる伝搬経路を通して受信アンテナに到達する。受信側では4本のアンテナで受信を行うため、送受信アンテナ間には、図の点線で示すように16本の伝搬路が存在する。各伝搬路の特性間の相関が小さい場合、受信側で四つの送信系列を分離再生することが可能である。本技術を用いると伝送帯域を増やさずに、送信アンテナ数に比例した伝送速度の高速化が可能である。さらに、アンテナダイバーシチ利得の向上が得られるため、伝送特性の改善を行うことができる。

受信側で空間多重された信号を分離するためには、素子アンテナ間のフェージング相関が十分小さくなるようにアンテナを配置する必要がある。室内環境では周囲に反射物が多いことから、この相関を小さくすることが比較的容易なため、米国において無線LANへの適用に向けた開発が進められている。セルラーシステムへの適用はIMT-2000への適用が規格作成組織である3GPPで検討されているが、より高速な伝送が必要となる第4世代移動アクセスシステムへの適用に向けた研究も富士通研究所を含む様々な研究機関で進められている。また、MIMOの伝送特性は受信側における分離処理のやり方によっても大きく異なるため、少ない演算量で高品質な伝送特性が得られる分離処理方法の開発が課題となっており、富士通研究所でも研究を進めている。

適応無線パラメタ制御技術

無線伝搬環境は移動機の移動に伴い、時々刻々と変化するため、伝送品質もこれに合わせて変動する。一定の伝送レートで通信を行った場合、伝搬特性の悪い場合はデータ誤りが発生し、逆に良すぎる場合には過剰品質となる。そこで、伝搬特性に応じて伝送パラメタを変えることにより、最適な伝送レートを選択することでスループットを改善することができる。伝送パラメタとしては、変調多値数、誤り訂正符号の符号化率、符号多重数（CDMAの場合）、送信電力などがある。さらに、どのユーザの信号を送るかという制御（これをスケジューリングとい

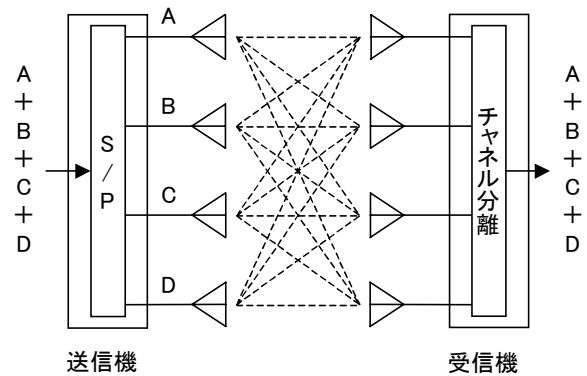


図-11 MIMO通信システムの構成
Fig.11-MIMO communication system.

う)も含めてスループットの改善を図る技術の研究を行っている⁽¹⁶⁾

ソフトウェア無線技術

すでに述べたように、新世代移動通信システムでは様々なアクセスシステムが互いに連携しながら共存する形になると考えられる。ユーザがそれぞれの専用の端末を使い分けるのではなく、端末自身が現在使用できるネットワークを自動的に検出して、動的にその機能を再構成することで、様々な規格のアクセスシステムに対応できるようにする技術がソフトウェア無線技術である。動的再構成が可能なデバイス技術、高速A/D変換技術、チューナブルな高周波回路技術、ソフトウェアのダウンロード方法、規格認証方法など様々な側面から実現に向けた研究開発を行っている。

以上、物理レイヤの技術を中心に解説を行った。これらの技術は、現在研究開発中のものであり、サービス面での要求条件も検討し、真のマルチメディア移動通信システムの実現に向けて、今後も新しい技術の研究開発を進めていく。

む す び

新世代の移動通信システムはセルラーシステムと各種無線LANのシステム、およびそのほかのタイプの無線アクセスシステムが協調して、システム間または事業者間のハンドオーバーなどは利用者が意識しないでシームレスに使えるようになることが期待されている。この方向で各研究機関が各種技術の研究開発を進めている。本稿では、主にセルラーシステムへの適用を想定した技術を四つに絞って紹介した。高効率アンブについては、この技術を適用した

製品を既に納入しているが、ほかは実用化研究の段階にある。これらについて、一層の高性能化、小型化、高効率化を目指して、実験による検証、シミュレーションによる評価に取り組んでいる。

参考文献

- (1) Y. J. Guo et al. : Adaptive Antenna Array for IMT-2000 . *FUJITSU* , Vol.51 , No.1 , p.66-72 (2000) .
- (2) Y. Oishi et al. : Highly Efficient Power Amplifier for IMT-2000 BTS Equipment . *FUJITSU SCI. TECH. J.* , Vol.38 , No.2 , p.201-208 (2002) .
- (3) 石川広吉ほか : W-CDMA基地局用適応歪補償装置の開発 . 電子情報通信学会 , 2002年ソサイエティ大会 , C-2-31 , p.53 (2002) .
- (4) 馬庭透ほか : W-CDMA移動機用ベースバンドプリディストーション方式の検討 . 電子情報通信学会 , 1998年ソサイエティ大会 , B-5-150 , p.400 (1998) .
- (5) The third generation partnership project : Base station conformance testing (FDD) . *3GPP TS 25.141* , v3.10.0 , release 1999 , (2000) .
- (6) R. Meyer et al. : A wide-band feedforward amplifier . *IEEE Journal of Solid-State Circuits* , Sc-9 , 6 , p.442-428 (1974) .
- (7) 富士通 (株) プレスリリース .
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2002/09/5.html>
- (8) (株) NTTドコモ環境レポート .
http://www.nttdocomo.co.jp/corporate/eco/report/2002/implement/index_04.html
- (9) A. Akasegawa et al. : High-Temperature Superconducting Materials for High-Performance RF Filters . *FUJITSU SCI. TECH. J.* , Vol.38 , No.1 , p.31-38 (2002) .
- (10) 富士通プレスリリース , 2002年9月 .
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2002/09/20.html>
- (11) 甲斐学ほか : IMT-2000用超伝導フィルタシステムの開発 . 電子情報通信学会ソサイエティ大会 , SC5-3 , 2002年 .
- (12) K. Yamanaka et al. : HTS filters with YBCO films for 2 GHz band receivers . ISS 2002 , FD-9 , Nov. , 2002 .
- (13) ITU-R PDNR WP8F : Vision, Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT-2000 and Systems beyond IMT-2000 . 2002 .
- (14) W. Bocquet et al. : Extended Frequency Domain Equalization for OFDM System . 2003年電子情報通信学会総合大会 , B-5-94 (March 2003) .
- (15) G. J. Fochini : Layered Space-time Architecture for Wireless Communication in Fading Environment When Using Multi-element Antennas . *Bell Labs. Tech. J.* , vol.1 , p.41-59 (November 1996) .
- (16) 武尾幸次ほか : 下り回線パケット伝送における適応変調/マルチコード数割当ての検討 . 2003年電子情報通信学会総合大会 , B-5-24 (March 2003) .