

3-2 第4世代移動体通信システム用端末をソフトウェア無線端末で実現するための技術／デバイス研究開発

3-2 *Technology and Devices for 4th Generation Mobile Communication Terminals using Software Defined Radio*

須永輝己 寺島美昭 清原良三 末松憲治 板倉哲朗 広瀬佳生
SUNAGA Terumi, TERASHIMA Yoshiaki, KIYOHARA Ryoza, SUEMATSU Noriharu,
ITAKURA Tetsuro, and HIROSE Yoshio

要旨

2010年以降に実用化が想定される第4世代移動体通信システムでは、複数の無線システムが地理的に混在することが予想されている。このような将来の移動体通信システムにおいて、端末は複数の無線システムと通信可能なマルチバンド／マルチモード端末であることが望まれている。このマルチバンド／マルチモード端末を実現する技術の一つとしてソフトウェア無線技術がある。本論文では、ソフトウェア無線技術を用い第4世代移動体通信システム用端末を実現するための要素技術とデバイスの研究開発成果の概要を述べる。

In the future mobile communication, it is expected that various wireless communication systems will coexist. Therefore mobile terminal must have multi-band / multi-mode features. Software defined radio (SDR) is one of the technique achieve these functions. In this paper, we describe the development results of device and element technology for SDR.

[キーワード]

第4世代移動体通信システム, ソフトウェア無線, マルチバンド, マルチモード
4th Generation mobile communication system, Software defined radio, Multi-band, Multi-mode

1 まえがき

近年、第3世代の携帯電話や無線LAN等の移動体通信システムが急速に普及してきた。2010年以降には、移動時の最大情報伝送速度100 Mbit/s級の第4世代移動体通信システムの実用化が見込まれている。将来の移動体通信システムでは、第4世代移動体通信システムのみですべてをカバーするのではなく、現在普及している第3世代システムや無線LAN等の複数の無線システムが混在し、ユーザーの要求等に合わせて、適切な無線システムを選択して通信が行われると予想されている^[1]。そのため、将来の移動体通信システム用の端末は、周波数帯や方式の異なる複数の無線システムと通信可能なマルチバンド／マルチモード端

末である必要がある。このマルチバンド／マルチモード端末の実現技術の一つとしてソフトウェア無線技術がある。そこで、三菱電機、東芝、富士通は情報通信研究機構の委託研究「第4世代移動体通信システム実現のための研究開発」として2002年8月から2006年3月まで、ソフトウェア無線技術を用いてマルチバンド／マルチモード端末を実現するための要素技術及びデバイスの研究開発を行った。本論文では2でマルチバンド対応のアンテナ、高周波(RF)回路/デバイス技術を、3で端末向け高速低消費電力A/D、D/A変換器、4ではマルチモード端末の構成及び2から4の成果を統合した評価系の概要を記す。さらに、5ではマルチモード端末を実現するための機能の再構成が可能なプラットフォームLSI技術について

記す。6 で分散オブジェクト及びダウンロード技術の委託研究成果の概要について説明する。

2 アンテナ、RF回路／デバイス技術

マルチバンド／マルチモード端末を実現するため、各周波数に対応できる RF 回路技術、小形アンテナ技術は必須である。特に、変調方式、信号帯域幅も異なること及び端末への適応のための小形化、IC 化が必要となることから、800 MHz ～ 5 GHz 帯のマルチバンド／マルチモードを送受信できるアンテナ技術、RF 回路技術の開発を行った。

図 1 に、携帯端末内部の実装基板のグラウンド面を放射素子、端末を持つ人体をアンテナの仮想接地導体とした小型で広帯域なアンテナの動作原理図を示す。アンテナ専用の部品は、人体と実装基板グラウンド面の接触を確保する数 mm 角程度の接触端子のみであり、携帯端末実装時の性能は図 2 に示すように 0.8 ～ 6 GHz において $VSWR < 3$ を実現している。また、人間が手に端末を保持している状態における水平面内の平均化利得は $-8.0 \sim -4.3$ dBi (0.8 ～ 6 GHz) であり、実用に十分供する性能を得ている [2]。

委託研究ではマルチバンド／マルチモード端末を実現するための RF 回路／デバイスとして端末の RF 回路構成や、直交ミキサ、直交変調機、広帯域アンプの検討を行った。開発成果の一例として、図 3(a)、(b) に、マルチバンド／マルチモードに対応する広帯域な受信機用直交ミキサ (Q-MIX)、送信機用直交変調器 (Q-MOD) のチップ写真をそれぞれ示す。両デバイスとも SiGe-MMIC 化により広帯域で且つ高精度な直交特性を実現しており、図 4 に示すように Q-MIX において W-CDMA 変調信号を用いたベクトル誤差を評価した結果、800 MHz にて 2.1% rms、2.1 GHz にて 2.7% rms、また無線 LAN (IEEE 802.11a) 変調信号を用いた評価の結果、5.2 GHz にて 2.1% rms を得た。Q-MOD においても同様に W-CDMA 変調信号を用いた評価の結果、800 MHz にて 1.6% rms、1.95 GHz にて 1.9% rms、また無線 LAN (IEEE 802.11a) 変調信号を用いた評価の結果、5.2 GHz にて 1.5% rms と良好な値を得た。本 Q-MIX と Q-MOD 及び前述のアンテナを用いることにより、800 M/2 GHz 帯の W-CDMA

及び 5.2 GHz 帯の無線 LAN での送受信を可能にすることを確認した [3]。

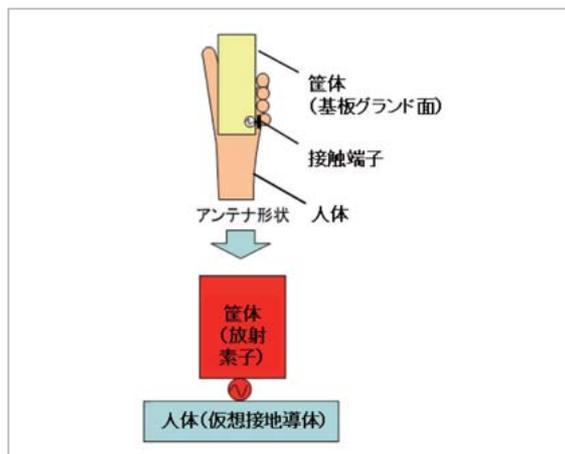


図 1 アンテナの動作原理

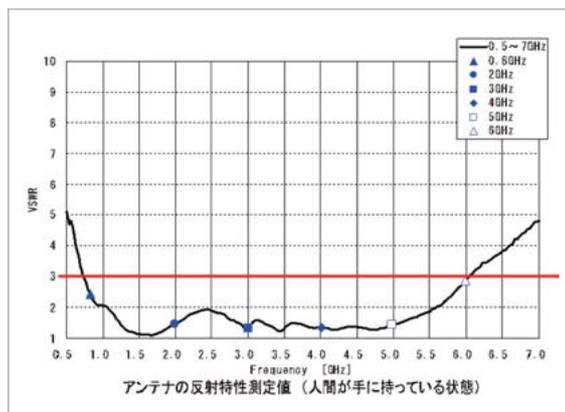


図 2 アンテナの反射特性測定値

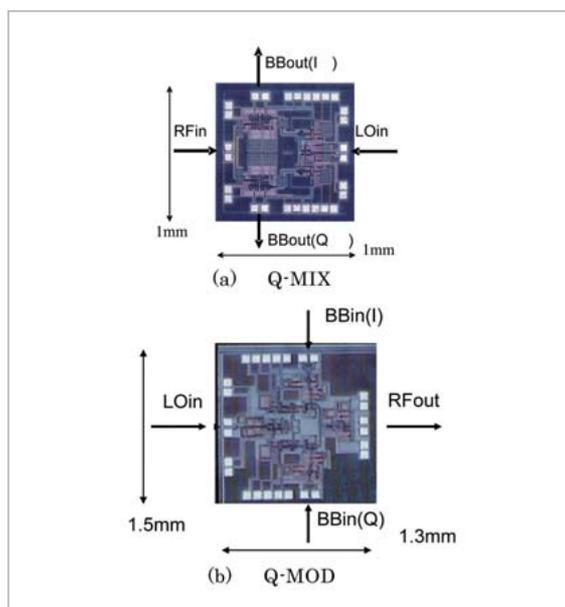


図 3 RFデバイス チップ写真

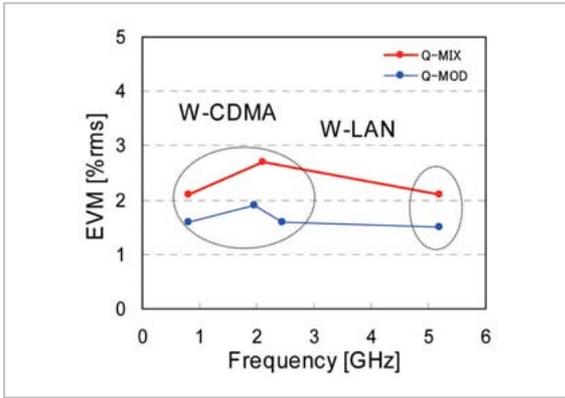


図4 ベクトル誤差評価結果

3 端末用A/D・D/A変換器

マルチモード端末に用いる A/D・D/A 変換器は、利用する通信方式の中で最も広帯域のものに対応することがまず必要である。第4世代移動体通信システムは高周波で 100 MHz、ベースバンド信号として 50 MHz 程度の帯域を利用することを前提に、サンプルレートの目標を 100 ~ 200 Msample/s とした。また、OFDM のようにピーク電力と平均電力の比が大きい変調方式に対応するため、分解能の目標を 10 ~ 12 bit とした。さらに電池駆動のために消費電力は可能な限り小さくすべきであり、目標を 100 mW 以下とした。

A/D 変換器の開発は消費電力を重視し、100 mW 以下の電力で実現可能な範囲で性能向上を図ることとした。まず、10 bit、100 Msample/s の一次試作[4]を行い、次に 200 Msample/s への高速化に挑戦した[5]。最終年度は 12 bit の高分解能化[6]に挑戦し、いずれも目標の 100 mW 以下での動作を確認した。消費電力削減のため要素回路の時分割利用を徹底した。特に、無線受信機のベースバンドは I チャネル、Q チャネルの 2 信号であることを利用し、2 組の A/D 変換器の間で回路の時分割共用を行う技術は、電力の削減効果が大きく、最高の電力当たり信号変換効率を実現した。

D/A 変換器については、その消費電流が最大出力信号電流とほぼ一致し、電流削減は困難である。このため低電源電圧での性能確保に注力した。微細化が進んだ半導体は耐圧が低下するために電源電圧が下がる傾向にあり、今後低電源電圧対応

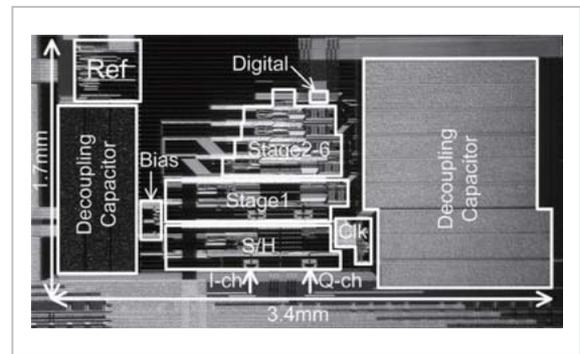


図5 55 mW 12 bit, 100 Msample/s A/D 変換器チップ写真

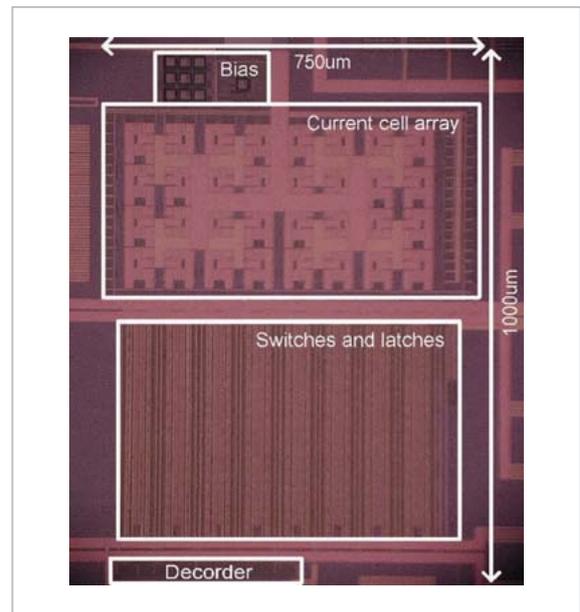


図6 20 mW 12 bit 200 Msample/s D/A 変換器チップ写真

が重要となる。低い電源電圧を効率よく配分する配線形状の工夫などにより、1.2 V の電源電圧で 200 Msample/s 12 bit の D/A 変換器が 20 mW で動作することを確認した[7]。

4 マルチモード端末構成とマルチバンド / マルチモード端末評価系

次世代の移動体通信システムに対応したマルチバンド / マルチモード端末では、異なる無線システム間でのシームレスな切替えの実現が課題となる。そこで、発生要因等の分析等を行い、シームレスな無線システムの切替えを実現する端末の無線伝送部の構成を検討した。図7に端末の無線伝送部の構成を示す。シームレス切替え対応の端末

は2系統の無線伝送機能を有し、1系統の無線伝送機能である通信システムと通信中に他方の無線伝送機能のソフトウェアの入替え等を行うことでシームレスな無線システムの切替えを実現するものである。また、図の構成を例として、マルチモード端末でシームレスな無線システムの切替えを実現する場合の、端末内のソフトウェアの変更手順等のシーケンスを明らかにした[8]。アーキテクチャの検討に基づき、本研究の成果の一部を統合した統合評価系の開発を行い、基本的な評価を実施した。開発した評価系では、ソフトウェア無線によるマルチバンド/マルチモード端末の受信部を想定したものであり、第3世代システム(W-CDMA)と、第4世代システムを想定した変調方式としてOFDMとCDMAを組み合わせたMC-CDMA[9]を送信し、受信側で無線システムの切

替えを行った。ここで、W-CDMA 信号は2GHz帯を用い、3.84 Mchip/s(伝送速度 384 kbit/s)、MC-CDMA 信号は5GHz帯、帯域幅20MHzの信号を用いた。開発した統合評価系のイメージを図8に示す。なお、統合評価系では、本研究で開発したサンプリングレート変換技術[10]、ソフトウェアの入替えに対応した復調モジュールに加え、**2**で示した広帯域アンテナ、広帯域RF回路(受信用直交ミキサ)及び**3**に示す端末用A/D・D/A変換器の一次試作で開発した10bit A/D変換器を80 Msample/sで動作させたものを組み合わせた。なお、A/D変換器とサンプリングレート変換はA/D基板上に実装し、復調モジュールは、既存のDSPを使用したDSP基板[11]に実装した。このDSPの処理能力の制約から、MC-CDMAについては、帯域幅を20MHzとし、IEEE802.11aと同じOFDMのサブキャリア数を用いた。

評価系による評価の結果、送受信機間を無線で接続した状態で端末(受信機)として機能すること及び本課題で検討したモジュール/端末構成の妥当性を確認した。さらに、提案した端末構成でシームレスな無線システムの切替えが実現可能であることを確認した。本評価系のソフトウェア入替えによる無線システムの切替え時間を評価した結果、無線システム切替え時間は約1秒を実現した。

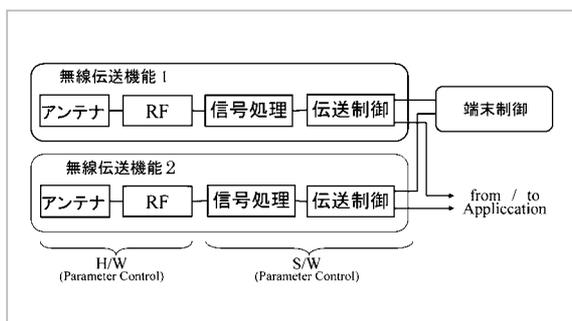


図7 マルチモード端末機能ブロック図

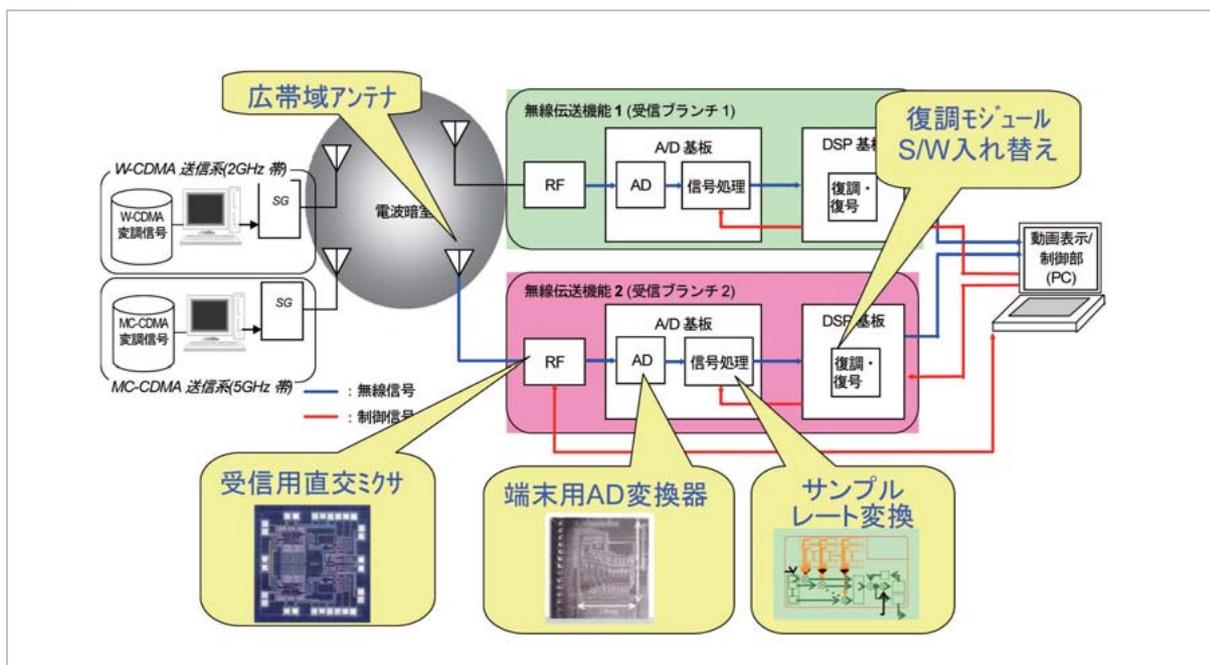


図8 統合評価系のイメージ図

5 ソフトウェア無線向けプラットフォームLSI技術

無線システムのデジタルベースバンド処理では、無線方式の高度化、データ転送速度の高速化に伴って、要求処理量が飛躍的に増加している。その増加率はムーアの法則に従って伸びていくDSPの性能向上率よりはるかに大きい。ソフトウェア無線(特に端末)といっても、すべての処理をDSPで処理するのは現実的でなく、処理内容に適したハードウェアを利用すべきと考えられる。

我々は、ある程度定型的、共通的な処理はパラメータ設定可能なハードウェアで実行し、自由度が必要な処理は演算器アレイ型のリコンフィギュラブル回路で実行するのが最適と考えている。前者に対応する処理には、例えばフィルタ回路や誤り訂正処理のように、無線方式が違ってても基本的な処理は同じでパラメータが違うようなものがある。後者に対応する処理には、同期や補正処理のように、同じ無線方式でも無線性能の差別化のため、いろいろ工夫が凝らされる処理が相当する。

本プロジェクトでは、上記のようなパラメータ設定可能なハードウェア回路と、リコンフィギュラブル回路のハイブリッド構成のLSIを試作した。今後の無線方式の基本はOFDM技術とCDMA技術であると考え、前者の例としてIEEE802.11aを、後者の例としてCDMAそのものではないがその基礎となっているDS-SS方式のIEEE802.11bを実現できるものをターゲットとした。

表1にプラットフォームLSIの仕様を、図9にLSIのチップ写真と評価ボードを示す。

LSIの約2/3をリコンフィギュラブル回路(RLB)が占める。RLBは我々が新たに開発した[12]。ALUやMAC、RAM、アドレス演算器といった各種の要素回路32個で一つのクラスタが構成され、クラスタ7個で一つのクラスタグループを構成している。LSIには3個のクラスタグループが搭載されている。RLBの演算性能は、3クラスタグループ全体で103GOPS(Giga Operation Per Second)になる。

2枚の評価ボードを対向し、IEEE802.11aとIEEE802.11bの二つの無線方式がそれぞれ動作す

表1 プラットフォームLSIの仕様

テクノロジー	0.11 μ m CMOS、8層銅配線
チップサイズ	16.7 mm \times 16.7 mm
トランジスタ数	5600万個(論理)、 3400万個(メモリ)
電源電圧	1.2 V(コア)、2.5 V(I/O)
動作周波数	160 MHz@1.2 V (RLB部) 100 MHz@1.2 V(他)
パッケージ	1156ピンFCBGA

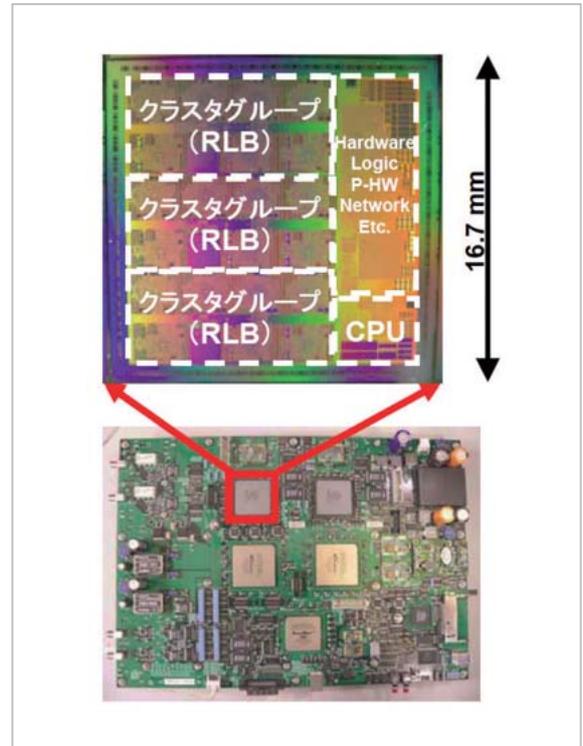


図9 チップ写真及び評価ボード

ること、また高速に方式が切り替えられることを確認した。無線方式の切替えに要する時間は約5msである。

6 分散オブジェクト / ダウンロード技術

6.1 分散オブジェクト技術

ソフトウェア無線などソフトウェア部品の多様な組合せにより、自由度の高い無線方式を提供する環境では、流通性の高いソフトウェア開発が重要である。このため、JTRS(Joint Tactical Radio System)が提供するSCA(Software Communication Architecture)など、IDL

(Interface Definition Language)を用いた分散オブジェクト構成として無線方式を実現する、共通のソフトウェア部品化の方法が注目されている。

本研究では無線方式を実現するオブジェクト構成を動的に再構成する差分更新方式を提案し、この機能を備えたりコンフィグレーション・ミドルウェアの実装実験により有効性を検証した。差分更新とは、異なるレイヤ機能やアルゴリズムを実現する部分的なオブジェクトのみを更新することにより、無線方式を変更する方法である。更新のためにダウンロードするソフトウェア量や、再構成手順を削減できるため、更新性能の向上に適している。提案する差分更新方式は、再構成失敗時のロールバックなど安全な再構成を実現しつつ、IDL Call 構成の複雑さを原因とする二つの負荷増大を解決する。

第一の負荷はオブジェクト構成を再起動する手順分析によるものである。再起動とは新たなオブジェクト構成を構築するために、差分となる個々の新旧オブジェクトが実行する手順である。例えば一つのオブジェクトを更新する影響は、クライアントやサーバとして関連付けられる他のオブジェクトにも及ぶ。このため複数のオブジェクト更新の影響が、タイミングによる遅延や、差分となるオブジェクト発見の手順を複雑にする。第二の負荷は、新たに連携するクライアントとサーバの間で IDL Call の通信路を確保する処理である。差分更新の過程では、クライアントは開発時に想定していないサーバの特定が必要であるため、検索の手順が発生する。差分更新方式は、差分更新

管理機能と間接接続機能により、負荷の問題を解決しつつ、分散オブジェクト構成の複雑な再構成手順を実行する。リコンフィグレーション・ミドルウェアの実験により、安全、高速なオブジェクト再構成を実現する差分更新方式の有効性を確認した[13]。

6.2 ダウンロード技術

ソフトウェア無線を動的に入れ替えるためには、無線部のソフトウェアの必要な無線伝送機能をダウンロードし入れ替える必要がある。そのためには端末に組み込む共通の I/F の定義、実装が必要である。また、シームレスな通信を実現するためには、無線伝送部機能の更新中も動作の継続を要する。そのために、端末の状態(通信中、圏外などの状態)を管理し、無線モジュールの動的更新機能が必要となる。

本研究では、シームレスに通信方式を入れ替えるために、以下の2点の方式検討、実装評価を実施した。

(1) 無線伝送機能の動的更新方式の実装と評価

具体的には AT コマンドベースの標準 I/F 規定部を決め、仕様を策定し、移動機を利用して無線部を切り替える実装と評価を実施した。

(2) 分散オブジェクト技術との統合を目的とした端末内の状態管理技術の実装

具体的には、端末の内部の状態を管理し、網側と協調して無線伝送部を切り替えられるようにした。

これらの機能の実現により、ダウンロードを実

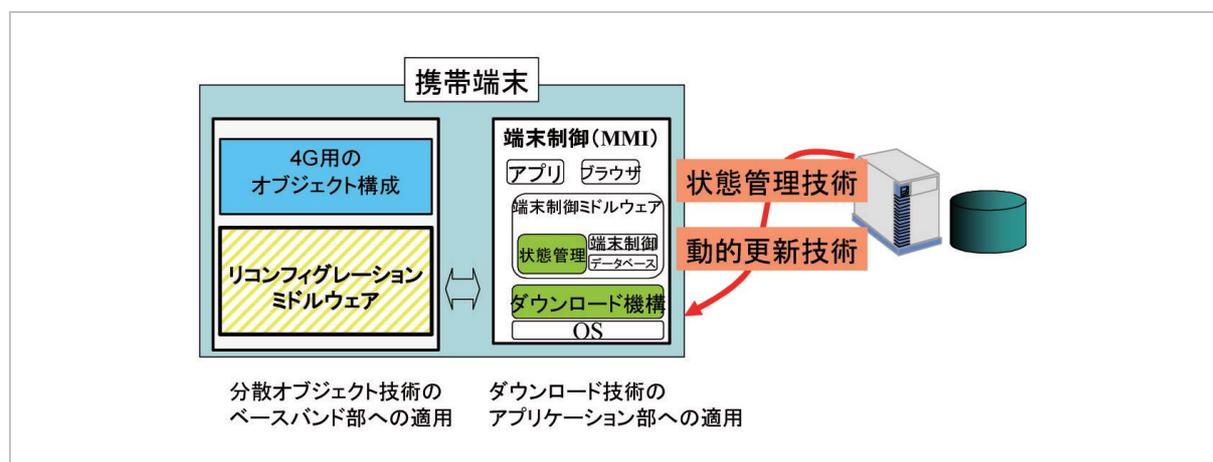


図10 分散オブジェクト技術とダウンロード技術

際に行っても通信機能を継続して行うことができる無線伝送機能の動的更新と、網側と協調して端末を管理し、端末主導でも、網側主導でもハンドオーバを可能となることを確認した[14]。

7 まとめ

本研究開発では、2010年以降に実用化が想定される第4世代移動体通信システムの実現に必要なソフトウェア無線技術のデバイス／要素技術の研究開発を行った。以上示した研究開発により、

ソフトウェア無線を用いてマルチモード／マルチバンド端末を実現するための基本的な要素技術を確立した。さらに委託研究を受託した3社共同でITU-Rへの標準化活動を行い、成果/技術課題の一部がITU-R WP8F レポートに採録された[15]。

謝辞

本研究は、独立行政法人情報通信研究機構による委託研究「第4世代移動体通信システム実現のための研究開発」により行われたものである。

参考文献

- 1 “新世代モバイル委員会報告書”，総務省 情報通信技術審議会，2001年。
- 2 早乙女秀之ほか，“人体を利用した広帯域モノポールアンテナ”，電子情報通信学会，信学技報SR2005-44，2005年7月。
- 3 N.Suematsu et al., "Multi-Band Multi-Mode RFIC for SDR/Cognitive Radio Terminals", Microwave Workshops and Exhibition2005, pp.249-254, Nov.2005.
- 4 T.Ito et al., "Low-power design of 10-bit 80-MSPS pipeline ADCs", IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E89-A, No.7, pp.2003-2008, Jul.2006.
- 5 D.Kurose, et al., "55-mW 200-MSPS 10-bit Pipeline ADCs for Wireless Receivers", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.41, No.7, pp.1589-1595, Jul.2006.
- 6 T.Ito et al., "55-mW 1.2-V 12-bit 100-MSPS Pipeline ADCs for Wireless Receivers", in Proceedings of European Solid-State Circuits Conference, Sep.2006.
- 7 T.Ueno et al., "A 1.2-V, 12-bit, 200-Msample/s current-steering D/A converter in 90-nm CMOS", in Proceedings of the IEEE 2005 Custom Integrated Circuits Conference, pp.742-745, Sep.2005.
- 8 須永輝己ほか，“次世代移動体通信向けマルチモード端末構成の一検討”，電子情報通信学会，信学技報RCS2005-11，2005年4月。
- 9 中川正雄，“CDMAとOFDMの融合変調技術”，電子情報通信学会，信学誌，Vol.84，No.9，pp.643-648，2001年9月。
- 10 元吉克幸ほか，“4G SDR 端末用サンプルレート変換フィルタの試作評価”，電子情報通信学会，2004年信学総大B-17-13，2004年3月。
- 11 岡崎彰浩ほか，“ソフトウェア無線に適したプラットフォームの提案と開発”，電子情報通信学会，2004年信学総大 B-17-10，2004年3月。
- 12 M.Saito et al., "Cluster Architecture for Reconfigurable Signal Processing Engine for Wireless Communication", International Conference on Field Programmable Logic and Applications, 2005.
- 13 寺島美昭ほか，“差分更新を実現する分散オブジェクト再構成ミドルウェアの実装と検証”，情報処理学会論文誌，Vol.46，No.9，pp.2288-2299，2005年9月。
- 14 前田慎司ほか，“シームレス通信のためのソフトウェア無線端末の管理方式”，情報処理学会，情処研究報告2005-MBL-35，2005年11月。

- 15 "The impact of software-defined radios on IMT-2000, the future development of IMT-2000, and systems beyond IMT-2000", ITU-R Report M.2063, 2005.

すながてる み
須永輝己

三菱電機株式会社情報技術総合研究所
無線通信技術部専任 博士(工学)
ソフトウェア無線技術の研究・開発

きよはらりょうぞう
清原良三

三菱電機株式会社情報技術総合研究所
ユビキタスネットワークシステム部
チームリーダー
携帯端末ミドルウェア

いたくらてつる
板倉哲朗

株式会社東芝研究開発センターモバイル
通信ラボラトリー研究主幹 博士
(工学)
アナログ集積回路

てらしまよしあき
寺島美昭

三菱電機株式会社情報技術総合研究所
ネットワークセキュリティ技術部専任
博士(工学)
分散処理、アドホックネットワークの
研究・開発

すえまつのりはる
末松憲治

三菱電機株式会社情報技術総合研究所
光・マイクロ波回路技術部チームリー
ダ 博士(工学)
ソフトウェア無線用RFデバイスの研
究・開発

ひろせよしお
広瀬佳生

株式会社富士通研究所システムLSI開
発研究所主管研究員
リコンフィギュラブルLSI、システム
LSI