

複数システムを統合するコグニティブ無線システムの研究開発

花岡 誠之 山本 淳二 片岡 幹雄 下川 功 石川 崇 山岡 綾史

(株)日立製作所中央研究所

1. 緒言

移動通信システムにとって使い勝手の良い 6GHz 以下の帯域(VHF, UHF, 低マイクロ波帯)については、第 3 世代携帯電話や無線 LAN など稠密に利用されており、深刻な電波の逼迫状況が生じている。こうした状況の中、逼迫している電波をより有効かつ効率的に活用しつつ、特にニーズの高い移動通信に必要な周波数帯域を確保するためには、移動通信をはじめとする複数の電波利用システム間における電波の高度な共同利用を実現する技術の研究開発が不可欠である。

このような状況において電波の高度な共同利用を実現する技術としてコグニティブ無線技術が注目を浴びている。コグニティブ無線技術は周波数が空いているかをセンシングしその結果に基づき通信を行うものであり、現在のところ大きく分けてセンシングの結果として複数の無線システムを臨機応変に使用する「マルチシステム」の考え方 [1][2][3][4]と、センシングの結果に基づき主となる無線システムに干渉を与えないレベルで別の無線方式を使用する「ダイナミックスペクトルアクセス」の 2 つの潮流がある。

報告者は「マルチシステム」の考え方にに基づき、複数の無線システムを統合するコグニティブ無線システムについて検討し、実験機システムを構築しその効果を検証した。具体的には WiMAX と無線 LAN を対象システムとした基本実験機システムを用いた屋内実験及び、EVDO, WiMAX, 無線 LAN の 3 システムを対象とした実験機システムを用いた屋外実験を行い、コグニティブ無線システムが周波数有効利用の観点から有望な無線システムであることを確認した。

2. コグニティブ無線システム概要

周波数及び時間軸において各無線システムの使用状況を図示すると図 1 に示す通りとなる。この時、無線システムが使用されていない時空間を White Space と呼ぶ。コグニティブ無線は空き周波数やシステムをセンシングすることで White Space を検知(認知)し、これを有効に活用する無線システムである。現在日本においては周波数毎に使用する無線システムが定められているため、空き周波数帯や空き時間帯にこれとは別の通信方式で通信を行うことはできない。したがってセンシングした結果として複数の候補となる無線システムを効率よく活用する、すなわち「マルチモード/マルチシステム」の観点からコグニティブ無線システムの検討を行っている。

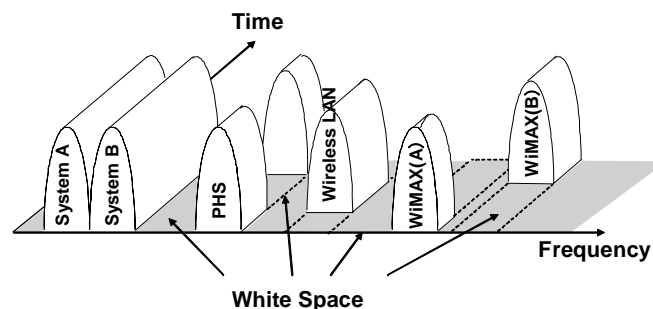


図 1 コグニティブ無線のコンセプト

「マルチモード/マルチシステム」としてのコグニティブ無線システムは無線状況等に応じて頻繁にシステム切替が生じる為、システム構築の際には下記 2 点を考慮する必要がある。

1. システム間高速切替の為のシステム構成が必要
2. 端末に割り当てられる IP アドレス(ホームアドレス)は一つとし、通信相手はシステム切替を意識しないようなシステム構成及び IP アドレス構成が必要

3. 基本実験機システム

3.1. システム構成

まず、都市部などにおけるワイヤレスブロードバンドシステムとして有力な WiMAX(2.5GHz 帯), 及びオフィスや屋内などにおける無線通信として最も普及している無線 LAN (2.4GHz 帯)の 2 つの無線システムを用い、無線状況に応じてシステム切替を行うことを仮定する。これまでのシステム構成では図 2 の左側に示すようにそれぞれのシステムが独立に運用され、ネットワーク側で接続されていたため、無線の状況に応じたシステム切替を行って周波数の利用効率を向上するための仕組みがないため、図 2 の右側に示すように各無線システムのアクセスポイントとネットワークの間にシステム切替を行う為の制御ノードを具備する。さらにシステム切替を行うために必要な無線情報を収集するための監視ノードもアクセスポイントよりも上位に具備し監視ノードと制御ノードとの連携によりシステム切替を実現する。

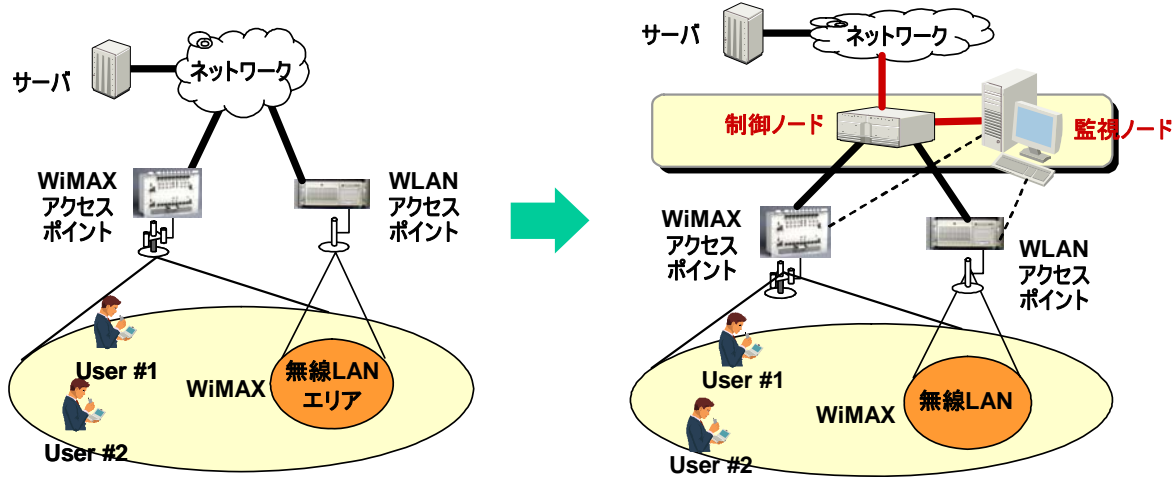


図 2 コグニティブ無線システム構成 (2 システムを対象システムとした場合)

本システム構成に基づき、WiMAX と無線 LAN の 2 システムを対象とした基本実験機を開発した。表 1 にシステム仕様を、図 3 に基本実験機システムの外観をそれぞれ示す。ユーザ数=2 としているが各ユーザの要求速度を高く設定しており、より多くの複数のユーザの振る舞いを 2 ユーザにて等価的に扱うものとする。また今回の基本実験機システムでは、基地局側と端末側を RF ケーブルにて接続し、WiMAX 系は広いエリアをカバーするシステムとして固定減衰器を挿入するにとどめ、無線 LAN 系については各ユーザに対応するフェージングシミュレータを用意して端末の移動に応じて減衰量を随時変化させることにより伝搬路減衰を模擬することとした。

表 1 基本実験機システムパラメータ

無線システム	仕様	
WiMAX	準拠方式	IEEE802.16e based
	周波数帯	2.5GHz
	帯域幅	5MHz
	変調/多重方式	OFDM/TDD
	最大送信電力	36dBm (送信端に固定減衰器挿入)
無線 LAN	準拠方式	IEEE802.11g
	周波数帯	2.4GHz
	最大送信電力	18dBm (送信端に固定減衰器挿入)
伝搬路	RF ケーブル接続にて実現 WiMAX - 可変減衰器挿入 無線 LAN - フェージングシミュレータ挿入	
データ伝送	<ul style="list-style-type: none"> ユーザ#1: 動画ストリーミング(UDP, 4.0Mb/s) ユーザ#2: ファイルダウンロード(UDP) 	

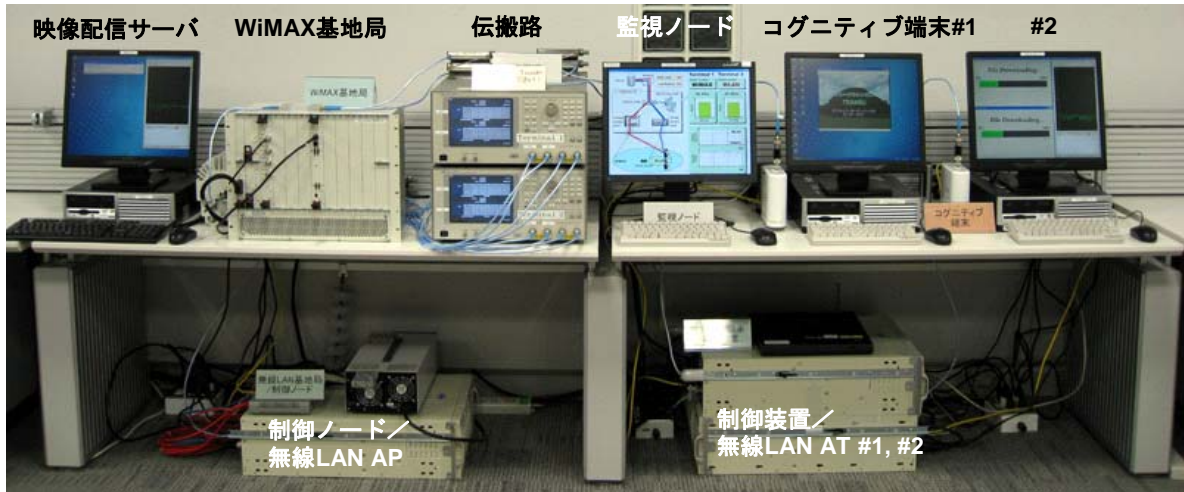


図3 基本実験機システムの外観

3.2. 実験シナリオ

ユーザ#1 は動画ストリーミング受信等のリアルタイム性を有するアプリケーションを行い、ユーザ#2 はファイルダウンロード等リアルタイム性を必要としないアプリケーションを行うこととする。またユーザ#1 とユーザ#2 は初期状態として WiMAX エリアの同一位置に配置され、同一速度、同一方向にて無線 LAN のエリアに向かって移動し、無線 LAN エリア到達後は同一速度にて再び初期状態の位置へ移動する動作を繰り返す。この時ユーザの移動に応じてフェージングシミュレータの減衰量が制御され伝搬路変動を模擬することとした。

さらにコグニティブ無線における無線環境の認識、及びこの認識結果に基づく制御方法として以下の3つを実装し、そのそれぞれについて実験を行う。システム切替は端末主導で行う場合とネットワーク主導で行う場合が考えられるが、特に③のシステム負荷は端末側では測定できない情報であり、本実験機システムではこれらの切替制御をネットワーク主導で行うこととした。

- ①無線環境情報として何も使用しない場合の制御（従来の無線システム）
- ②無線環境情報として無線 LAN の受信電力値に基づいた切替制御
- ③無線環境情報として無線 LAN の受信電力値に加えシステム負荷を考慮した切替制御

3.3. 実験結果

上記シナリオにて基本実験機を動作させた結果、制御方法①、②、③いずれの場合もユーザ#1 はシステム切替の有無に関わらず途切れることなくストリーミング映像を受信できることを確認した。またユーザ#2 についてもシステム切替方法①、②、③いずれの場合においてもシステム切替の有無に関わらず再接続等を端末側から行う必要がなく、ファイルダウンロードを継続可能なことを確認し、複数ユーザ環境下で基本実験機システムが動作すること、また無線環境の変化に応じたシステム切替を意識することなくユーザは通信可能であることを確認した。

次に2ユーザを WiMAX と無線 LAN の両方の電波を受信できるエリアに固定し、上記①②③の順に制御方法を切替えた場合の各ユーザのスループット特性を測定した。測定結果を図4に示す。

まず制御方法①ではユーザ#1,#2 が無線 LAN エリアに入ってきてても無線環境情報として無線 LAN の RSSI 値を参照しないため、無線 LAN の存在に気づかず両方とも WiMAX で通信を行っていることがわかる。WiMAX は QoS をサポート可能なシステムであり、リアルタイム性を要するアプリケーションを実施しているユーザ#1 の帯域を保証するように設定することが可能である。従ってユーザ#1 のスループット特性は 4.0Mb/s 程度で一定となっている。一方ユーザ#2 は WiMAX の空きリソースを使用することとなり高速通信が出来ずに 2.6Mb/s 程度のスループットに抑えられている。

次に制御方法②で動作させた場合、無線環境情報として無線 LAN の受信電力値を参照し、無線 LAN の電波強度が強いと判断した場合にはシステムとしての帯域がより広い無線 LAN への切替を行う。この場合ユーザ#1,#2 両方とも無線 LAN に切り替わり、ユーザ#2 は無線 LAN の有する広帯域性によりスループットは大きく向上する。しかしながらユーザ#1 はほぼ同じスループットをめざすも無線 LAN がリアルタイム性を必ずしも保証するものではないためスループットの変動が激しく、ストリーミング時のブロックノイズ等として現れる。

さらに制御方法③で動作させた場合、無線 LAN の RSSI 値に加えシステム負荷を考慮するため、無線 LAN が使

えるエリアであるにも関わらずユーザ#1にはWiMAXで通信をするように（切替しないように）制御する。この制御により無線LANが使えるエリアにおいてユーザ#1はWiMAXの有するQoSサポートによりリアルタイム性が保証されコンテンツを一定の品質で楽しむことができ、またユーザ#2は無線LANのリソースを一人で占有することができるため、スループットは12.5Mb/s程度とシステム切替方法②と比較してさらにスループットが向上する。

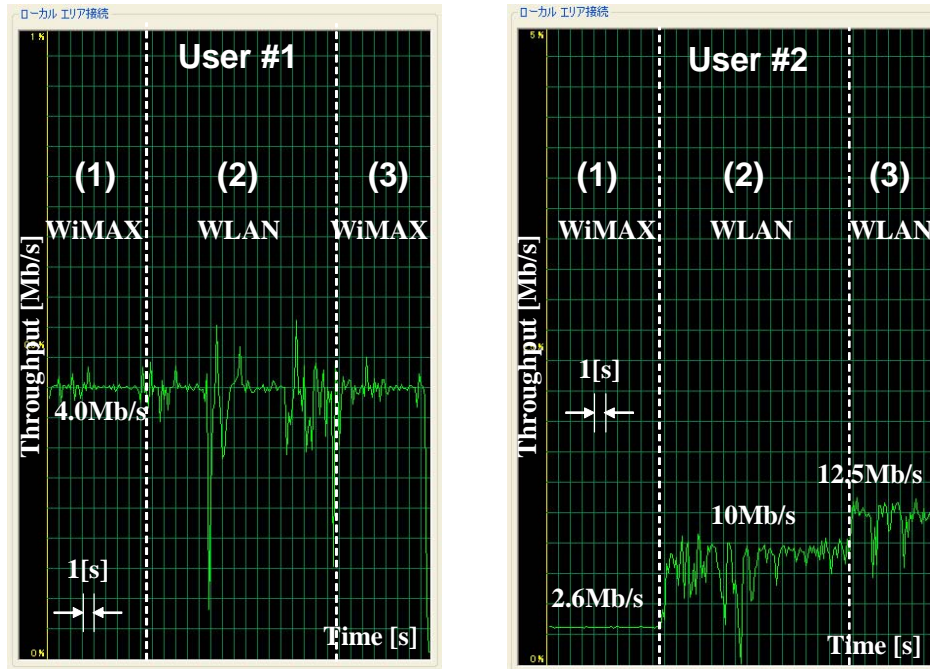


図4 基本実験機の動作結果（左：ユーザ#1のスループット、右：ユーザ#2のスループット）

以上の実験からコグニティブ無線システムにおいてネットワーク主導でシステム切替を実施することにより負荷分散が図られ、結果として周波数の時間利用率が向上しかつユーザスループット向上が可能であることを確認した。

4. 実験機システム

4.1. システム構成

さらにセルラシステムであるEVDO(cdma 1x Evolution Data Optimized)を対象システムとして加えた場合、そのシステム構成は図5に示す通りとなる。商用システムとの親和性を考慮し、制御ノードは複数のEVDOのアクセスポイントを制御し端末とのPPP(Point to Point Protocol)セッションを確立するPDSN(Packet Data Serving Node)の上位に配置している。WiMAXも同様に複数のWiMAXのアクセスポイントを制御するASN-GW(Access Service Network Gateway)を配置し、無線LANもIPSecを端末との間で確立するためにPDIF(Packet Data Interworking Function)を配置している点が基本実験機システムと異なる。さらに広範囲な端末移動をサポートするためのHA(Home Agent)や端末認証のためのAAA(Authentication, Authorization and Accounting)もシステムとして具備している。

今回の実験機システムでは図5に示すコグニティブ基地局を2局、弊社研究所の敷地内に設置した。コグニティブ基地局2局分の制御ノードや監視ノードは有線で接続されるため、各アクセスポイントの設置場所に必ずしも設置する必要はない。そこで本実験機システムではこれらの機能を同一筐体に収容し、一箇所に設置することによるメンテナンス性の向上を図った。実験機システムの外観を図6に示す。

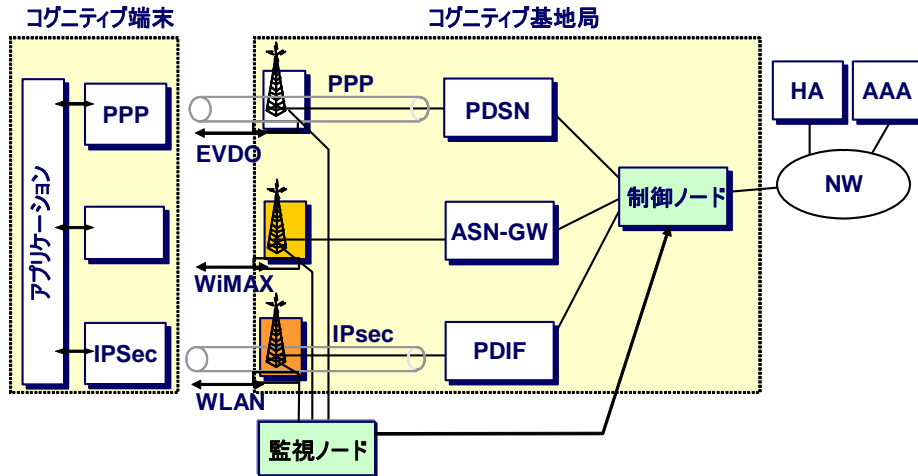


図5 実験機システムのシステム構成

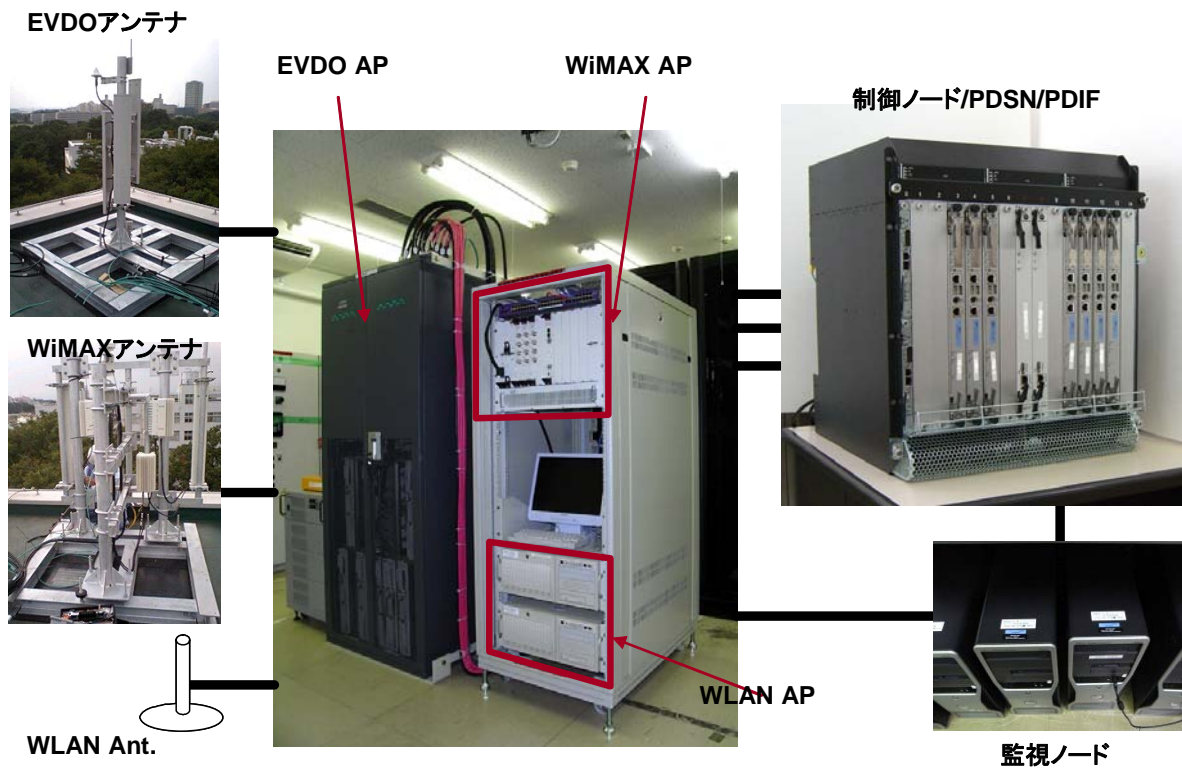


図6 実験機システム (コグニティブ基地局) の外観

また各無線システムの受信電力値やシステム切替の様子を視覚的に把握するための状態表示機能も合わせて開発した。この表示機能は図7に示すとおり、4つの領域から構成され、それぞれ①：現在選択している通信方式の文字表示、②：現在選択している通信経路の視覚的表示 ③：各無線システムの受信電力値の瞬時値の表示、④：受信電力値の履歴やシステム切替の履歴等の表示、となっている。

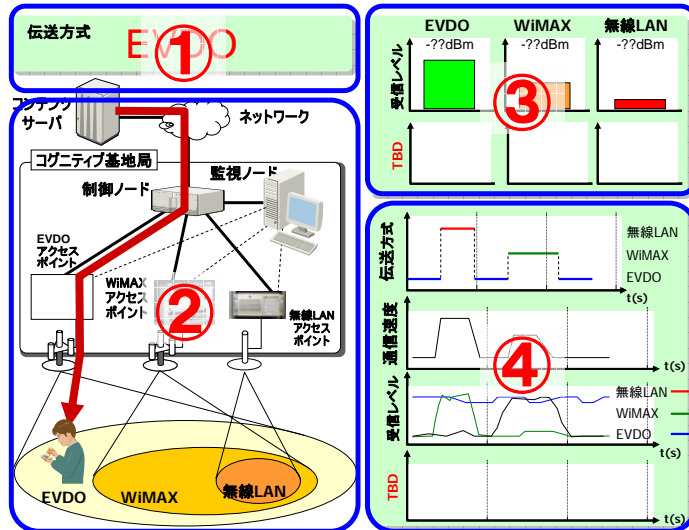


図7 状態表示機能のイメージ図

4.2. 実験結果

4.2.1. 無線環境の変化によるシステム切替

前節で述べた実験機システムについては 2007 年度に実験局免許を取得し、弊社敷地内にて屋外実験を行った。

まず各無線システムの受信電力値を測定し、設定した閾値に従った無線システムの切り替えにつき確認した。具体的には弊社敷地内の図 8 に示す経路に沿ってコグニティブ端末を移動させ、無線 LAN のアクセスポイントから遠ざかることによる無線環境変動 (=受信電力値の低下) に応じて EVDO ヘシステムが切り替わるか確認した。

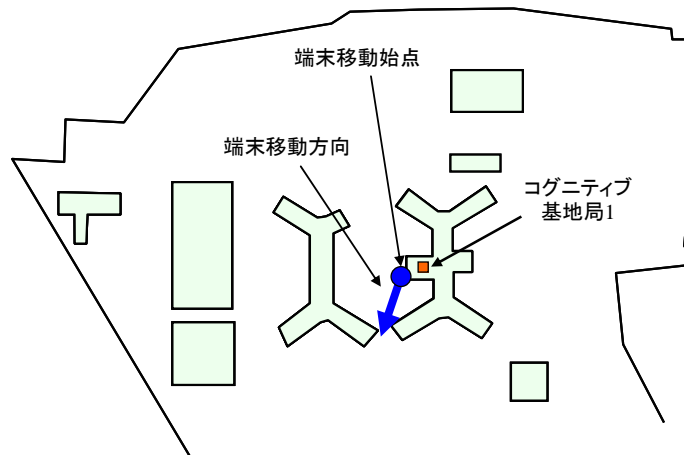


図8 コグニティブ端末の移動経路

図 9 左側の図は端末移動始点におけるコグニティブ端末の状態表示を示している。コグニティブ端末は無線 LAN にて通信を行っており、現在の通信システムとして無線 LAN が利用されていることがわかる。

次に、コグニティブ端末を移動させていくと、無線 LAN の受信電力値が低下しコグニティブ端末が無線 LAN のサービスエリア外へと移動していくため、図 9 中央の図に示すように無線 LAN の無線環境が悪化したことが表示される。基地局における監視ノードでは、設定した閾値(本実験においては、受信電力値=-83dbm)を下回ったことを検知し、基地局の制御ノードにシステム切替を指示し、ネットワーク主導にてシステム切替が実施される。この結果、コグニティブ端末は EVDO からパケットを受信するようになり、図 9 右側の図に示すように選択しているシステムが EVDO に変更されたことが確認できる。なお、システム切替の間も通信が途切れないことを確認し、無線環境に応じたシステム切替が実現可能であること、ユーザ(端末)はシステム切替を意識せずに通信可能であることを屋外環境において確認した。



図9 システム切替の様子（左：無線LANでの通信，中央：受信レベル劣化，右：EVDOでの通信）

4.2.2. 高速なシステム切替の評価

次に無線環境の変動に応じた高速なシステム切替が可能であることを確認するために監視ノードから非常に短い間隔(100msec)でシステム切替を強制的に指示した場合の動作を確認した。結果を図10に示す。100msの一定間隔で周期的に無線システムが切り替わっていること、またシステムが頻繁に切り替った場合でも通信は途切れることがないことが確認でき、フェージング等の無線状況に応じた柔軟なシステム切替が実現可能であることを確認した。

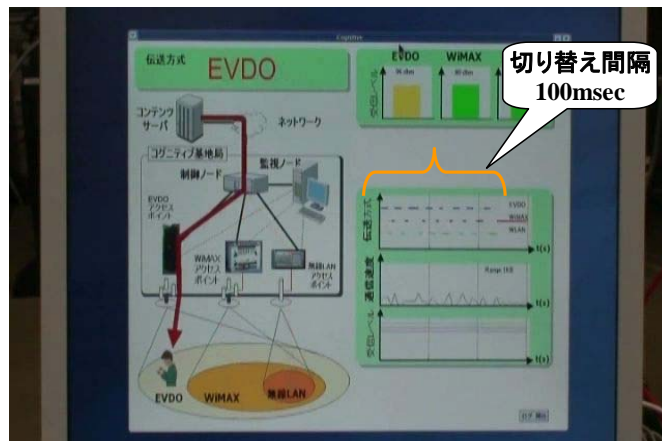


図10 高速システム切替の様子（100msでのシステム切替時）

5. まとめ

本稿では複数の無線システムを統合するコグニティブ無線システムについてWiMAXと無線LANを対象システムとした基本実験機システムの屋内実験結果と、EVDO, WiMAX, 無線LANの3システムを対象システムとした実験機システムを用いた屋外実験結果について述べた。コグニティブ無線システムでは無線状況の変動やシステム負荷等に応じた柔軟なシステム切替制御が可能であり、複数の無線システム間の負荷分散を図ることによる周波数の有効利用及びユーザの平均スループット向上が可能であることを示した。

6. 謝辞

本研究の一部は総務省の委託研究「コグニティブ無線通信技術の研究開発」の成果である。

参考文献

- [1] 野原他：“電波資源拡大のためのコグニティブ無線通信に関する研究” 信学技報, SR2006-11, 2006年4月.
- [2] 榎木他：“コグニティブ無線通信に関する研究開発～これまでの研究成果～” 信学技報, SR2006-22, 2006年7月.
- [3] 野原他：“ネットワーク適用の観点からの期待と技術課題” 電子情報通信学会2006年ソサイエティ大会 BP-3-1, 2006年9月
- [4] 野原他：“コグニティブ無線通信の研究開発動向ーネットワーク適用の観点からー” 第263回ITU-R(無線通信)研究会資料, 2006年10月
- [5] 吉澤他：“複数システムを統合するコグニティブ無線技術ーシステム構成の一検討ー” 電子情報通信学会2006年総合大会 B5-124, 2006年3月.
- [6] 花岡他：“複数システムを統合するコグニティブ無線技術ー実験機システムの基本構成ー” 電子情報通信学会2006年ソサイエティ大会 B17-6, 2006年9月.
- [7] 花岡他：“コグニティブ無線のための複数システム切替方式の提案”, 信学技報, SR2006-42, 2006年11月
- [8] 花岡他：“コグニティブ無線による複数システム切替方式の基本実験”, 信学技報, RCS2006-215, 2007年1月
- [9] 花岡他：“コグニティブ無線のための複数システム切替方式の基本評価”, 信学技報, SR2006-66, 2007年3月
- [10] 原田, “コグニティブ無線を利用した通信システムに関する基礎検討”, 信学技報, SR2005-18, 2005年5月
- [11] Mitola, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications”, 1999 IEEE Int Workshop on Mobile Multimedia Communications Digest, Nov. 1999.
- [12] Mitora, etc., “Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal”, 1999 IEEE Personal Communication, Vol.6, No.4, 1999
- [13] Harada, etc., “The Overview of the New Generation Mobile Communication System and the Role of Software Defined Radio Technology”, IEICE Trans. Communication, Vol. E86-B, No.12, Dec.2003.
- [14] Bourse, etc., “E2R Project: Major European Initiative on Reconfigurability”, Proceeding 2004 SDR Technical Conference 1.3-3, Nov.2004
- [15] Harada, “Software defined radio prototype for W-CDMA and IEEE802.11a wireless LAN”, IEEE VTC'04 Fall, Nov. 2004
- [16] Hung-Yun Hsieh, etc., “An end-to-end approach for transparent mobility across heterogeneous wireless networks”, Mob. Network Application Vol.9 No.4, 2004.