

適応型高効率無線通信システム に関する研究

Adaptive High Efficient Wireless Communication System

2014年5月

早稲田大学大学院国際情報通信研究科
国際情報通信学専攻 無線・衛星通信研究Ⅱ

芝 宏礼

目次

| | |
|--|----|
| 1. 概要 | 3 |
| 2. ソフトウェア無線と応用技術 | 6 |
| 2. 1. ソフトウェア無線の概念と特徴 | 6 |
| 2. 2. ソフトウェア無線機のハードウェア構成 | 7 |
| 2. 3. ソフトウェア無線機のソフトウェア構成 | 9 |
| 2. 4. コグニティブ無線技術 | 10 |
| 2. 5. ヘテロジニアスネットワーク | 11 |
| 3. マルチプロセッサ構成を用いたソフトウェア無線機に関する研究 | 14 |
| 3. 1. はじめに | 14 |
| 3. 2. マルチプロセッサアーキテクチャを用いたソフトウェア無線機的设计 | 15 |
| 3. 2. 1. マルチバンド RF と AD/DA 変換器 | 17 |
| 3. 2. 2. リコンフィギュラブル IF 部 | 17 |
| 3. 2. 3. ベースバンド信号処理部 | 19 |
| 3. 3. ソフトウェア設計 | 19 |
| 3. 3. 1. ソフトウェアアーキテクチャ | 19 |
| 3. 3. 2. PHS ソフトウェア | 20 |
| 3. 3. 3. IEEE 802.11 無線 LAN ソフトウェア | 21 |
| 3. 3. 4. 無線ダウンロードソフトウェア | 22 |
| 3. 4. 性能評価 | 24 |
| 3. 4. 1. 物理層 | 24 |
| 3. 4. 2. システム性能 | 27 |
| 3. 5. まとめ | 31 |
| 4. コグニティブ無線における信頼度に基づいた協調センシング方法に関する研究 | 33 |
| 4. 1. はじめに | 33 |
| 4. 2. センシング情報の信頼度に基づいた協調センシング方法 | 34 |
| 4. 3. 性能評価 | 35 |
| 4. 4. まとめ | 40 |
| 5. 無線ネットワークリソース制御方法に関する研究 | 42 |
| 5. 1. はじめに | 42 |
| 5. 2. 回線交換型無線リソース制御方法 | 42 |
| 5. 2. 1. 研究背景 | 42 |
| 5. 2. 2. AO/DI 技術 | 43 |
| 5. 2. 3. ワイヤレス AO/DI システム | 44 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 5. 2. 4. システム構成..... | 45 |
| 5. 2. 5. 性能評価..... | 47 |
| 5. 2. 6. 結び..... | 53 |
| 5. 3. ユーザ行動特徴に基づいたセル再選択方法..... | 54 |
| 5. 3. 1. 研究背景..... | 54 |
| 5. 3. 2. 基地局間負荷分散..... | 55 |
| 5. 3. 3. 性能評価..... | 59 |
| 5. 3. 4. 結び..... | 67 |
| 5. 4. まとめ..... | 68 |
| 6. まとめ..... | 72 |
| 業績リスト..... | 75 |

1. 概要

スマートフォンの普及に伴い、アプリケーションやリッチコンテンツの利用によるモバイルトラフィックの急増が問題となっている。モバイルトラフィックは年率2倍で増加し、今後10年で100から1000倍になると予想されている[1-1]。一方、一般に無線通信で広く利用されている6GHz以下の周波数は、携帯電話システムや無線LAN、センサネットワーク等多種多様な無線方式に周波数が割り当てられ、稠密に利用されている[1-2]。そのため、高速化・大容量化のために新たな帯域を割り当てることは難しい。無線通信システムの大容量化・高速化を目的として、MU-MIMO(Multiuser-Multi Input Multi Output)技術等の空間多重技術や多値変調方式における多値数の増加等に関する研究が行われているが[1-3][1-4]、急増するトラフィックを収容するために、さらなる周波数利用効率の向上が期待される。

無線通信の普及に伴い、図1-1に示すように携帯電話、無線LANやセンサネットワーク等の多種多様な無線規格が標準化されると共に様々な無線通信システムが運用され、無線通信サービスの提供が行われている。一方無線サービスは、スマートフォン等の端末の高機能化により、電話やメールといった従来の無線サービスから高精細映像の視聴やオンラインショッピング、オンラインゲーム等のリッチコンテンツまで幅広く提供されている。さらに、コンテンツのリッチ化の流れとは別に、ソーシャルネットワークサービスやセンサネットワークサービス等データ量が小さく、データの発生間隔も疎であるようなサービスも同様に普及し始めており、無線サービスの多様化が進んでいる。通信における対象も従来の人と人との通信だけではなく、モノとモノとの通信へと通信の対象が拡張されている。また、インターネットや無線通信インフラの普及により、ユーザのライフスタイルがこれまでと大きく変化しており、無線通信が行われる時間帯や場所等の利用環境も多様化している。このようにサービスや利用環境が多様化している状況において、従来の単一の無線通信システムで全てのサービスを効率的に提供することは難しく、その上、それぞれの無線通信システムは独立して運用されているため、トラフィックの急増時においても、全ての無線通信システムが余すところなく利用されているわけではない。そこで、各無線通信システムの利用状況を正確に認識し、無線通信システムを柔軟に組み合わせ各無線通信システムの能力を余すことなく利用することが可能となれば、無線通信システム全体としての周波数利用効率のさらなる向上が期待できる。全ての無線通信システムを連携させ、高効率に利用するために、基地局や端末等の無線機の機能を適応的に変化させる技術、電波環境やユーザの利用環境、或いは無線通信システムの利用状況等を認識する技術、さらに、認識した状況を基に周波数リソースや無線ネットワークリソース等を制御するリソース制御技術を確立する。これにより、多種多様な無線通信システムを状況に応じて適応的に利用する適応型高効率無線通信システムの実現を目指す。



図 1-1 適応型高効率無線通信システム

本論文における各章の技術的な位置づけを図 1-2 に示す。まず、適応型高効率無線通信システムの要素技術である多種多様な無線方式への柔軟な対応を実現するソフトウェア無線について 3 章で述べる。次に、無線通信特有の課題である周波数の有効利用を実現するために電波環境の高精度な認識とそれに基づいた効率的な電波利用を実現するコグニティブ無線による電波環境認識について 4 章で言及する。そして、さらなる高度な環境認識と無線ネットワークリソースの効率的な利用を目指し、無線ネットワークリソース制御方法として回線交換ネットワークにおける無線リソース制御方法とユーザ行動を認識し、ユーザ行動特徴に基づいた負荷分散制御方法について 5 章で述べる。尚、2 章では、適応型高効率無線通信システムの要素技術となるソフトウェア無線技術とその応用技術であるコグニティブ無線技術の基礎について述べる。また、6 章で本論文のまとめを行う。

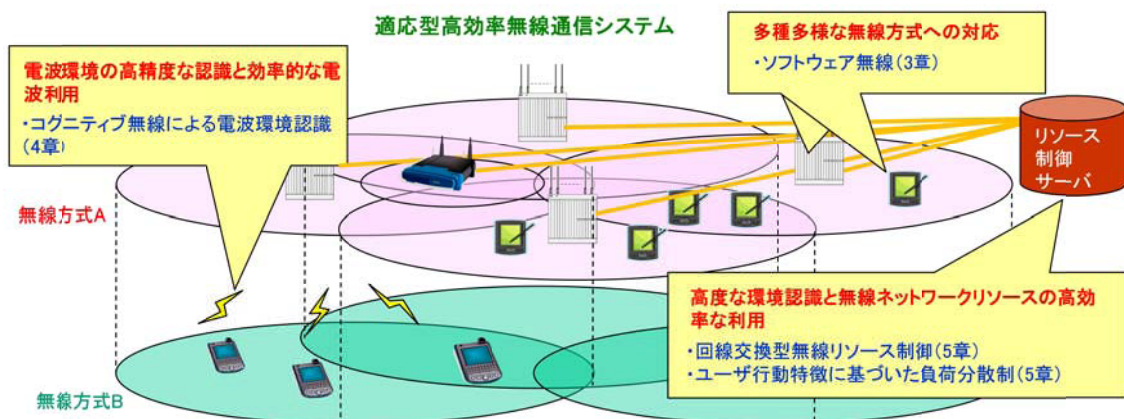


図 1-2 本論文の構成

3章のソフトウェア無線に関する研究では、ソフトウェア無線を実現するためのハードウェアとソフトウェアの構成方法について検討を行い、ソフトウェア無線機の実装を行う。ソフトウェア無線機の構成方法としてマルチプロセッサアーキテクチャを提案する。さらに、フレキシブルプリポストプロセッサを新たに提案することで、広帯域な無線通信システムである無線LANをサポート可能な20MHz以上のチャンネル帯域の無線方式にも柔軟に対応するソフトウェア無線機を実現する。

4章のコグニティブ無線技術に関する研究では、環境認識を行う際に重要となるセンシング技術について検出精度の向上に取り組む。複数センサの周波数センシング結果を利用することで周波数センシングを行う協調センシング方法において、センサが取得するセンシング情報に新たに信頼度を設定することで更なるセンシング精度の向上を図る。

5章のリソース制御に関する検討では、回線交換型の無線通信システムにおいて、回線のトラヒック量に基づいた無線リソース制御を行うことで常時接続サービスと帯域保証サービスを効率的に実現するワイヤレスAO/DIシステムと、セルラシステムにおける基地局間の負荷分散を行うことで無線リソースの利用効率を向上とユーザ間の公平性を改善するセル再選択方法について検討を行う。

ワイヤレスAO/DIシステムの検討では、既存のPHSの機器を利用し、無線回線を含んだシステムに関してAO/DIの概念を実現するワイヤレスAO/DIシステムを提案する。計算機シミュレーションを用い提案方式の性能評価を行うことで、従来方式である回線交換型のデータ通信時に比べ、ワイヤレスAO/DIを利用することで無線回線占有率を低減することができ、無線リソースが効率的に利用されていることを明らかにする。

セル再選択方法に関する検討では、待受け中のユーザ端末の行動特徴とセルの混雑度状況を基に基地局間負荷分散を行うユーザ行動特徴を考慮したセル再選択方法を提案する。計算機シミュレーションにより、各セルにおける待受け中のユーザ端末数、リソース要求率、総通信路容量について性能評価を行い、提案方式が従来方式に比べ、システム全体の総通信路容量を増加できることを示す。さらに、ユーザ間の公平性に関する性能評価を行い、提案方式を用いることでユーザ間の通信路容量差を小さくすることができ、ユーザ間の公平性を改善できることを示す。

参考文献

- [1-1] Cisco Visual Networking Global Mobile Data Traffic Forecast for 2010 to 2015, 2011.
- [1-2] <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/>
- [1-3] H. Inanoglu, "Multiple-Input Multiple-Output System Capacity: Antenna and Propagation Aspects," IEEE Antennas and Propagation Mag., pp. 253-273, vol. 55, Issue:1, March 2013.
- [1-4] Y. Kim, H. Ji, H. Lee, J. Lee, B. Loong, J. Zhang "Evolution beyond LTE-advanced with Full dimension MIMO," IEEE Conference on ICCW2013, pp. 111-115, 2013.

2. ソフトウェア無線と応用技術

ソフトウェア無線技術は、米国の国防省（DoD:Department of Defense）で1990年代初頭に陸海空軍用に利用されている多種多様な無線通信システムに対応し、安全な通信を実現可能とする技術として研究が開始された。ソフトウェア無線技術は軍事目的で当初研究が行われていたため、世間に広く認知されることはなかった。1995年にIEEE Communication Magazineに初めてソフトウェア無線技術が特集されたり[2-1]、SPEAKeasyが軍用のソフトウェア無線機として実際に開発されたりしたため、それを契機に多くの研究機関がソフトウェア無線に関する研究開発に取り組むようになった[2-2]。

米国では、ソフトウェア無線の標準化における支援活動を目的として1996年にMMITS (Modular Multifunction Information Transfer System) Forum(現, Wireless Innovation Forum)が発足し、ソフトウェア無線技術に関する制度化、実用化に力をいれている[2-3]。法規制においては、2001年9月にFCC (Federal Communications Commission) がソフトウェア無線の製品化を考慮したFCC規定の改定である「First Report and Order」を採択した[2-4]。First Report and Orderでは、端末の周波数、出力、変調方式等の変更をソフトウェアの変更で認めている。一方、日本においては、電波産業界 (ARIB) で「ソフトウェアで受信機能を実現する受信技術の調査検討会」が1996年に発足し、ソフトウェア無線技術の調査、検討、及びソフトウェア受信機の試作・評価が行われた。その後、ソフトウェア無線に対応した新たな基準認証方法をつくるために、2003年12月に総務省がソフトウェア無線に関する基準認証制度に関するパブリックコメントで意見の募集を行った。その結果をもとに、ソフトウェア無線の実用化に向け2005年に特定無線設備の技術基準適合証明等に関する規則の一部改正（平成17年総務省令94号）が行われた。この省令改正により、無線LAN機器(IEEE802.11a)の利用周波数帯の変更がソフトウェアにより実施された。

2. 1. ソフトウェア無線の概念と特徴

ソフトウェア無線は、「ハードウェアを変更することなくソフトウェアの変更のみで無線機の機能の変更が可能」と定義することができ、ソフトウェア無線機の大きな特徴として、次の3つが挙げられる。

① 複数の無線方式に対応可能

ソフトウェア無線端末とすることで、ユーザは複数の無線端末を持ち歩く煩わしさから解放され、ソフトウェアを変更するだけで利用環境に応じた無線通信システムの利用ができる。一方、ソフトウェア無線基地局とすることで、一つの基地局で複数の無線通信システムに対応することができるため、基地局の設置スペースや運用コストを削減することが可能となる。

② 無線方式の追加が可能

新たな無線方式や海外旅行時等における現地方式の追加等が専用の無線機を新たに購入することなく、ソフトウェアを追加するだけで利用することが可能となる。

③ バグフィックスやバージョンアップが可能

ソフトウェアをサーバからダウンロード，或いは販売店で購入することでバグフィックスやバージョンアップを実施することが可能となる。これにより，従来は不具合が発生した場合，無線機を回収しなければならなかったが，ソフトウェア的に不具合を改修することで，ユーザが販売店に来店したり，製造メーカーや通信事業者が無線機を回収したりする必要がなくなる。ソフトウェア無線化することで，ユーザ，製造メーカー，通信事業者の負担を軽減することができる。

これらの特徴を実現するために，ソフトウェア無線機の構成は従来の無線機の構成と大きく異なっている。従来の無線機は，予め規定された無線規格に準拠するために専用の RF 回路と無線規格で決められた信号処理を行う専用の ASIC で構成されている。それに対し，図 2-1 に示すようにソフトウェア無線機は，予め規定された無線方式だけでなく，多種多様な無線方式に柔軟に対応するために，広帯域，或いはマルチバンドの RF 回路とリコンフィギュラブル，或いはプログラマブルな信号処理デバイスで構成されている。これにより，ハードウェアを変更することなく，ソフトウェアを変更するだけで無線機が利用する周波数，フィルタ等の RF 回路や変調方式や符号化方式といった無線方式に関する機能変更を可能にする。

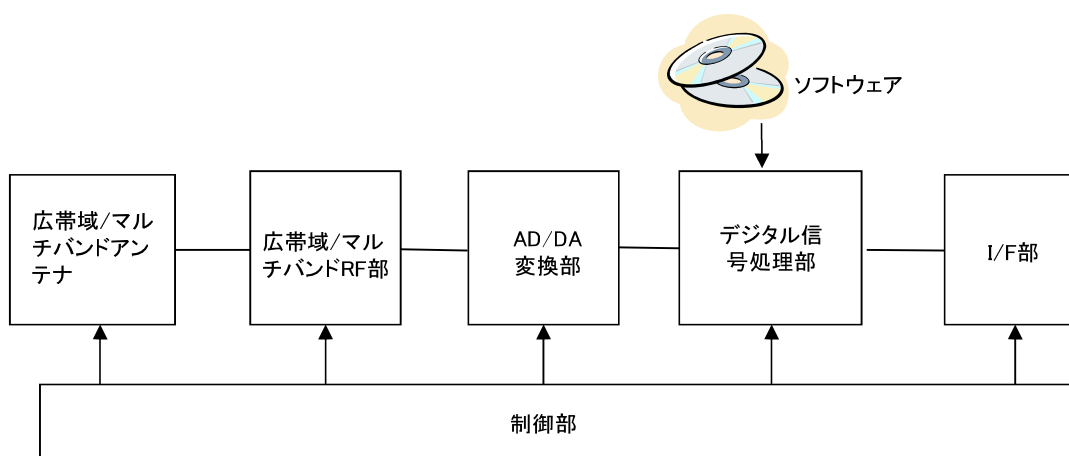


図 2-1 ソフトウェア無線機

2. 2. ソフトウェア無線機のハードウェア構成

図 2-1 で示したソフトウェア無線機のハードウェア構成における研究課題を次に示す。ソフトウェア無線を実現する上で，アンテナとアナログ RF 回路における広帯域化，或いはマルチバンド化が研究課題となる。アンテナとアナログ RF 回路において，無線通信方式で使用する複数の周波数が決まっている場合は，広帯域化するよりも，複数点共振化によるマルチバンドアンテナや複数のフィルタ等を切り換えることで複数の周波数帯に対応するマルチバンド RF 回路を利用

した方が無線機の特性は良くなる。さらに、広帯域化、或いはマルチバンド化した場合、単一バンドに対応したアナログ RF 回路に比べダイサイズが大きくなる恐れもあるため、小型化も重要な研究課題となる。

無線方式の高速化に伴い、AD/DA 変換器の高速化及び低消費電力化やデジタル信号処理プロセッサの高速化、低消費電力化が研究課題となる。AD/DA 変換器の変換方式の代表的な方法として逐次比較型、パイプライン型と $\Delta \Sigma$ 型がある。パイプライン型 AD 変換器の性能は 10bit の分解能でサンプリング速度が 100MSPS の際に、消費電力は数十 mW～数百 mW の性能が実現されている。 $\Delta \Sigma$ 型 AD 変換器は、サンプリング速度が低速であるが、高分解能を得ることができるといった特徴がある。

汎用的なデジタル信号処理プロセッサとして Field Programmable Gate Array (FPGA), Digital Signal Processor (DSP) や Central Processing Unit (CPU) 等がある。FPGA はフリップフロップと Look Up Table (LUT) から成る基本論理セルを組み合わせた回路であり、任意の論理回路を書き込めるデバイスである。FPGA は Hardware Description Language (HDL) で実際の回路を記述するため、デジタル信号をハードウェアレベルで高速に処理することができるため、DSP や CPU では処理が困難な高速信号処理が実現できる。しかしながら、消費電力が大きいこと、開発が容易でないことや機能の再構築に時間がかかるなどの問題が存在する。DSP や CPU は汎用型のプロセッサであるため、FPGA に比べ開発は容易となる。その他にも、プロセッサの機能やデータパス等を変更可能なリコンフィギュラブルプロセッサの利用も検討されている [2-5]。

ソフトウェア無線機の理想的な構成例を図 2-2 に示す。図 2-2 に示すようにアンテナで受信した電波を AD 変換し、信号処理をソフトウェアで実施する構成がソフトウェア無線機の理想的な構成ではあるが、数 GHz 帯の電波を直接サンプリングする AD 変換機が必要となるため現実的ではない。そこで、現実的なソフトウェア無線機の構成として IF サンプリング方式とダイレクトコンバージョン方式によるソフトウェア無線機の構成例を図 2-3, 図 2-4 にそれぞれ示す [2-6]。図 2-3 に示す IF サンプリング方式の構成では、IF 帯の信号を AD 変換機でアンダーサンプリングし、デジタル化を行う。その後、周波数変換やチャネルフィルタリング等をデジタル信号処理としてソフトウェア的に処理することで柔軟な信号処理を実現する。図 2-4 に示すダイレクトコンバージョン方式の構成は、RF 周波数を直接ベースバンド帯の周波数に変換する方式である。この方式は、IF 帯の回路やプログラム化が難しいイメージ抑圧フィルタを利用しなくてすむという特徴があるためソフトウェア無線に適した方式である。また、回路の部品数を少なくすることができるため、集積化による小型化やできるといった利点がある。しかし、ダイナミックレンジの確保が難しい点やセルフミキシングによる DC オフセットの問題等がある。

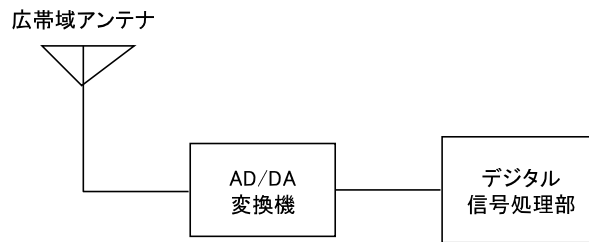


図 2-2 理想的なソフトウェア無線機の構成

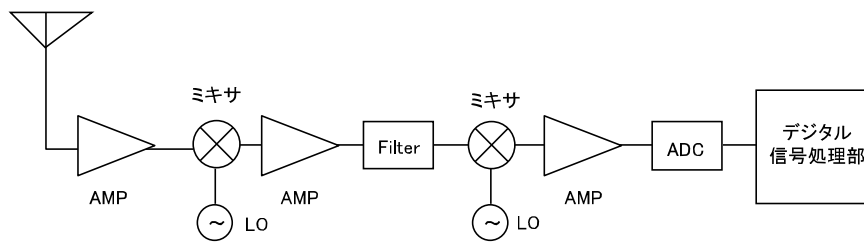


図 2-3 IF サンプリング方式

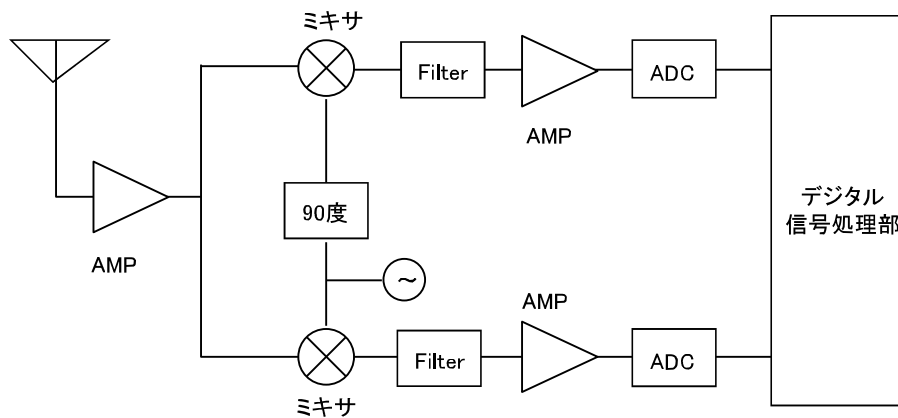


図 2-4 ダイレクトコンバージョン方式

2. 3. ソフトウェア無線機のソフトウェア構成

ソフトウェア無線機のソフトウェアは、無線の標準規格に関する無線特性だけではなく、ソフトウェア無線機のハードウェア構成や保守等のコスト面においても大きな影響を与えるため、ソフトウェア無線における効率的、且つ効果的なソフトウェア設計手法の確立は重要な技術課題である。効率的なソフトウェア設計を行うために、関数の汎用性、API 等のインタフェースの規定やバージョン間の互換性等を十分に考慮する必要がある。ソフトウェア無線におけるソフトウェアのオープンアーキテクチャとして Software Communication Architecture(SCA)が標準化されている [2-7]。SCA のソフトウェアフレームワークは Common Object Request Broker Architecture(CORBA)をベースに開発されており、各モジュールがコンポーネント化されている

点が特徴である。API が規定されており、ハードウェアを抽象化してソフトウェア設計を行うため、SCA を利用したソフトウェア設計ではモジュールの再利用や追加を容易に行うことができる。

2. 4. コグニティブ無線技術

ソフトウェア無線の特徴を利用し、周波数等の無線リソースを高度利用するための技術としてコグニティブ無線の研究が行われている[2-8]。図 2-5 はコグニティブ無線の提唱者である Mitora 博士の示したコグニティブサイクルである[2-8]。観測、指向、計画、判断、行動の一連の動作が繰り返し行われることにより、ユーザの通信環境の改善がなされていく。コグニティブ無線は、通信を行う際に周囲の無線環境をセンシングすることで、無線通信に適した周波数を選択して通信を行うため、有限である周波数資源の有効利用を実現する技術として期待されている。

コグニティブ無線を実現するためにダイナミックスペクトラムアクセス技術/ダイナミックスペクトラム割当技術が要素技術として検討されている[2-9]。ダイナミックスペクトラムアクセス技術では、既存無線通信システムに割り当てられた周波数の利用状況を観測し、空き周波数を2次利用することで、周波数の効率的な利用を実現する。従って、ダイナミックスペクトラムアクセスによる周波数利用を行うコグニティブ無線システムを実現する場合、周波数の一次利用者への与干渉を防ぐための高精度な周波数センシング技術が重要な要素技術となる。周波数センシング技術は、主に受信電力を利用して信号検出を行う Energy detection と、信号の特徴を利用して信号検出を行う Feature detection に大別される[2-10]-[2-13]。Energy detection は、観測する周波数帯の受信電力と判定閾値を比較することにより信号を検出する方法であり、装置を比較的簡易に構成できるといった利点があり、IEEE802.11 におけるキャリアセンス機能等に利用されている[2-10][2-11]。一方、Feature detection は、さらに Matched filter detection と Cyclostationary feature detection に大別することができる。Matched filter detection は、パイロットやプリアンブル、拡散符号等の信号パターンを利用した検出方法である[2-12]。一方、Cyclostationary feature detection は、繰り返し信号やCyclic prefixなどの信号の周期性を利用した検出方法である[2-13]。Feature detection は高い検出精度を期待できるが、信号のパターンや周期性をあらかじめ把握しておく必要があり、さらに信号を検出するための専用の受信装置が必要となる。

ダイナミックスペクトラムアクセス技術の標準化として周波数の2次利用を行なう無線システムの標準化が IEEE 802.22 で行なわれている[2-14]。IEEE 802.22 で検討されている無線通信システムはセル半径 30-100 km をカバーする Wireless Regional Area Network (WRAN) であり、米国における地上波 TV 放送用の周波数を2次利用することを想定している。また、地上波 TV 放送帯の2次利用に関して、FCC は米国における地上波 TV 放送用に割り当てられている周波数帯域のうち、使用されていない周波数帯であるホワイトスペースにおいて、免許不要で2次利用できる Report&Order (R&O) を2008年に採択を行った[2-15]。

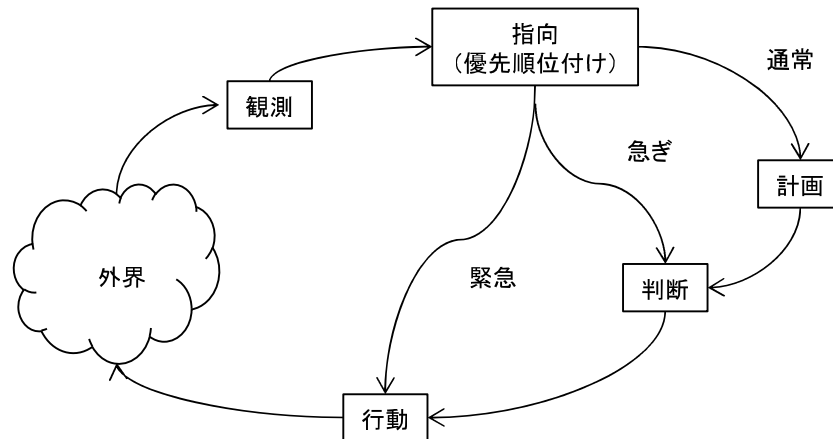


図 2-5 コグニティブサイクル

2. 5. ヘテロジニアスネットワーク

複数の無線通信システムが混在するようなヘテロジニアスネットワーク環境下において、従来の単一の無線通信システムでは提供できなかった通信環境に応じたシームレスで効率的な複数の無線通信システムの適応的な利用に関する検討が新たに行われている[2-16]. ソフトウェア無線端末は、ヘテロジニアスネットワーク環境下において、各無線通信システムの状況を把握することで QoS や各自で設定した無線通信システムの選択ポリシーに従い、無線通信システムを切り換えながらサービスの利用や通信を行うことができる. 一方、通信事業者においても、無線通信システムの利用状況に応じて、ユーザを他の無線通信システムに移動させることが可能となるため、通信設備を有効に活用することが可能となる. ヘテロジニアスネットワークシステムに関する標準化は IEEE 1900.4 で行なわれている[2-17].

ヘテロジニアスネットワークは、図 2-6 に示す複数の異なる無線方式を一つのネットワークと想定して利用する異方式ネットワークの概念と、同一の無線方式において、図 2-7 に示す同一エリア内にセル半径の異なる基地局（マクロセル/スモールセル/ピコセル/フェムトセル）を併存させる不均一セルネットワークの概念の 2 種類に大別できる. 異方式ネットワークは、無線通信システム間で異なる利用状況や伝搬環境に着目し、通信環境の良い無線通信システムを選択し利用することを目的としている. 一方、不均一セルネットワークは、ユーザの行動に伴いトラフィックがあるエリアに偏在するといった課題に対し、通信容量を拡大し、マクロセルにおける不感エリアに対し、スポット的に設置することでデッドスポットを解消するセルサイズの小さなピコセルやスモールセルをマクロセルと併用し、セル内におけるユーザ収容容量を増加させる. 本ネットワークは 3GPP で LTE の HetNet (Heterogeneous Network) 技術や SON (Self Organized Network) 技術として標準化が進められている[2-18].

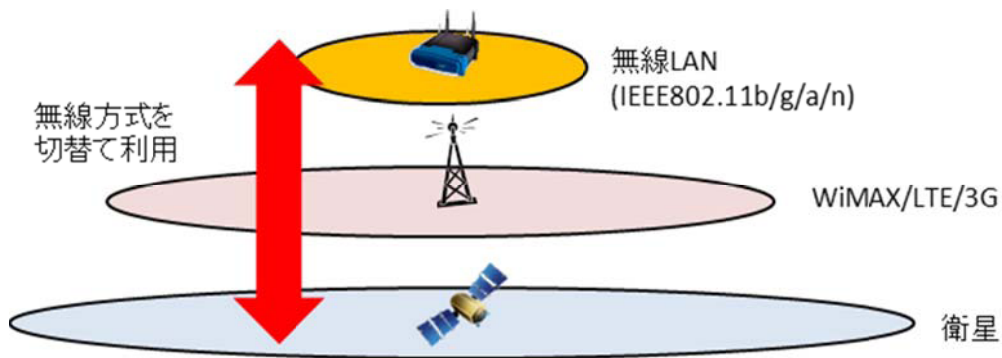


図 2-6 異方式ネットワークによるヘテロジニアスネットワーク

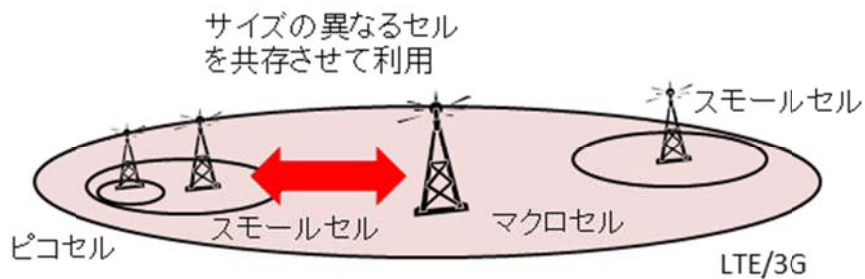


図 2-7 不均一セルネットワークによるヘテロジニアスネットワーク

参考文献

- [2-1] J. Mitola, “The software radio architecture,” IEEE Commun. Mag., vol. 33, no. 5, pp. 26-38, May 1995.
- [2-2] P. Cook, W. Bonser, “Architectural overview of the SPEAKeasy system,” IEEE Journal on Vol.17, pp. 650-661, 1999.
- [2-3] <http://www.wirelessinnovation.org/>
- [2-4] Federal Communication Commission Document 08-260: “First report and order: In the Matter of Authorization and Use of Software Defined Radios,” Sept. 14, 2001.
- [2-5] 小曾根, 平瀬, 飯塚, 中島, 平松, 木村, “ALU アレイベースのリコンフィギュラブルプロセッサによるソフトウェア無線機,” 信学技法, SR2006-38, pp. 173-178, July. 2006.
- [2-6] 荒木, 鈴木, 原田, “ソフトウェア無線の基礎と応用,” リアライズ理工センター, 1998.
- [2-7] G. Jianxin, Y. Xiaohui, G. Jun, L. Quan, “The Software Communication Architecture specification: Evolution and trends,” IEEE PACIIA 2009, pp. 341-344, 2009.
- [2-8] J. Mitola III, G. Q. Maguire Jr., “Cognitive radio: making software radios more personal,” IEEE Personal Commun., vol.6, no.4, pp.13-18, Aug. 1999.
- [2-9] R. Tandra, A. Sahai, “SNR Walls for Feature Detectors,” DySPAN 2007, pp. 559-570 Apr. 2007.
- [2-10] G. Zheng, N. Han, X. Huang, S. H. Sohn, J. M. Kim, “Enhanced Energy Detector

- for IEEE 802.22 WRAN Systems Using Maximal-to-Mean Power Ratio,” ISWCS 2007, pp.370-374, Oct. 2007.
- [2-11] J. Lee, S. J. Lee, W. Kim, D. Jo, T. Kwon, Y. Choi, “RSS-based Carrier Sensing and Interference Estimation in 802.11 Wireless Networks,” SECON ’07, pp.291-500, Jun. 2007.
- [2-12] H. Puska, H. Saarnisaari, “Matched Filter Time and Frequency Synchronization Method for OFDM Systems using PN-sequence Preambles,” PIMRC 2007. pp.1-5, Sep.
- [2-13] T. Yucek, H. Arslan, “Spectrum Characterization for Opportunistic Cognitive Radio Systems,” MILCOM 2006, pp.1-6, Oct. 2006.
- [2-14] <http://www.ieee802.org/22/>
- [2-15] Federal Communication Commission Document 08-260: “Second report and order and memorandum opinion and order: In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands,” Nov. 14, 2008.
- [2-16] S. Lee, K. Sriram, K. kim, Y. Kim and N. Golmie, “Vertical Handoff Decision Algorithms for Providing Optimized Performance in Heterogeneous Wireless Networks,” IEEE Transaction Vehicular Technology, Vol.58, pp.865-881, 2009.
- [2-17] <http://grouper.ieee.org/groups/dyspan/4/>
- [2-18] W. Lei, W. Hai, Y. Yinghui and Z. Fei, “Heterogeneous network in LTE-advanced system,” IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS) 2010, pp.156-160, Nov. 2010.

3. マルチプロセッサ構成を用いたソフトウェア無線機に関する研究

3. 1. はじめに

ハードウェアを変更することなしにソフトウェアを変更するだけで無線機の機能を変更することができるソフトウェア無線技術が次世代無線通信システムの要素技術として期待されている[3-1][3-2]. デジタル信号処理デバイスの低コスト化と演算能力の向上といった技術の進歩がソフトウェア無線の研究開発を促進している[3-3]-[3-8]. ソフトウェア無線技術は, FCCが2001年9月に新たなルールとして, 製造業者や通信事業者が無線機を出荷後にその機能を再構成することを許可したことで実用化に関する取組が加速された[3-9]. ソフトウェア無線技術はセルラシステム等の通信分野だけではなく, ITSや放送等にも幅広く適用することができる[3-10].

移動通信分野では, 3GシステムやLTE, WiMAX等複数の無線通信システムが運用され, 商用サービスとして提供されている. 一方, ホームネットワークにおいては, 無線LAN (IEEE 802. 11a/b/g/n/ac) やBluetooth等が利用されている. それらの無線通信システムを利用する場合, 利用者はそれぞれの専用の無線機を購入する必要がある. さらに, 利用する無線通信システムのカバーエリア内ではしか通信できないといった制約がある. これらの問題に対し, ソフトウェア無線技術を利用することで, 図3-1に示すように複数の無線通信システムをシームレスに効率的に利用することが可能となる[3-11].

ソフトウェア無線機を実現する場合, ソフトウェア無線機は, 無線プロトコルの規定時間内に信号処理を完了する必要がある. 従来の無線機は高速な信号処理を行うため専用のASICによるハードウェア処理を行うことで, 規定時間内でのプロトコル処理を完了している. 一方ソフトウェア無線機では, 様々な無線方式への柔軟な対応や機能追加等への対応を行う必要があるため, ソフトウェアによる信号処理を行う必要がある. ソフトウェア処理において, 無線プロトコルで規定される時間的な制約を遵守するために, ソフトウェア無線機のハードウェア構成や信号処理をどのプロセッサへ割り当てるかといったソフトウェア構成が重要な課題となる. 更に, 様々な無線方式に対応するためには, 無線方式毎に異なる周波数や伝送速度等に起因する帯域幅やクロックレートの違いに柔軟に対応しなければならない. 本章では, 低速な無線通信であるPHSから高速な無線通信である無線LAN (IEEE 802. 11) に対応したマルチプロセッサアーキテクチャのソフトウェア無線機を提案し, その設計と試作結果について述べる. 直接拡散方式の無線LANに対応するために, 新たにflexible-rate pre-/post-processor (FR-PPP) を提案し, 帯域幅を20MHz以上とし, 柔軟性の改善を図る. さらに, ユーザが家庭においても無線方式のアップデートやバグフィクス等ができるように無線ダウンロード機能の実装を行う.

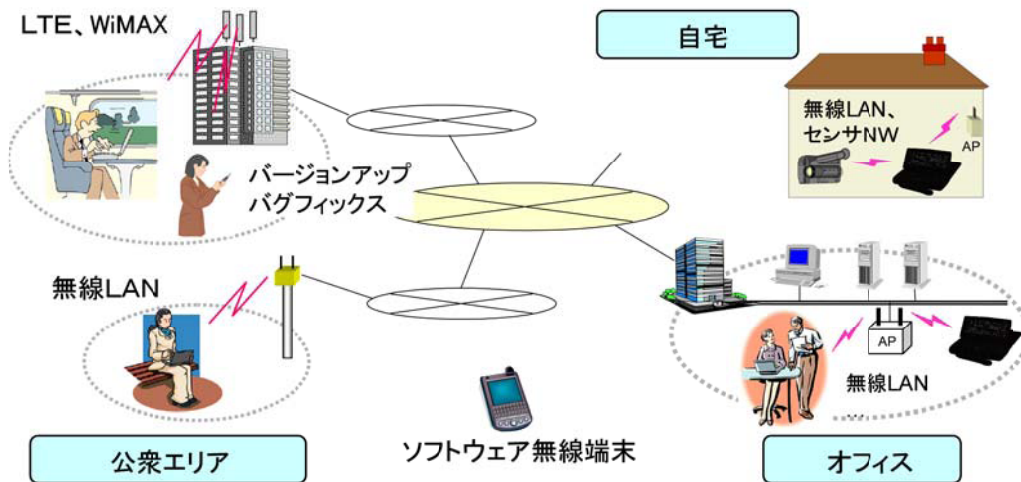


図 3-1 ソフトウェア無線を用いたサービスイメージ

3. 2. マルチプロセッサアーキテクチャを用いたソフトウェア無線機的设计

試作機は、RF 部、IF 部、ベースバンド部から構成され、RF 部と IF 部はマルチバンド対応のアナログ回路で構成される。AD/DA 変換は中間周波数で行われる。デジタル IF 部とベースバンド部プログラマブルデバイスで構成される。図 3-2 は試作機のブロック図である。試作機は図 3-3 に示すマルチプロセッサ構成とし、4つの DSP、1つの CPU、及び3つのプリ・ポストプロセッサ(PPP)から構成されている。DSP 部、CPU 部、及び外部インターフェース部は 64bit の VME バスにより接続される。試作機は3つの独立したアナログ系統を持つ構成となっているため、複数システムの同時運用が可能である。

試作機の諸元を表 3-1 にまとめる。DSP 部は固定小数点演算 DSP (演算能力 1,600 MIPS) を 4つ搭載した汎用の DSP ボードを用いる。CPU は動作周波数 400MHz の PowerPC であり、OS はリアルタイム OS である VxWorks を利用している。メモリやハードディスクはバスを介して接続されている。またソフトウェア無線機を操作するための入力デバイスやディスプレイは GUI 端末として接続されている。

外部インターフェース部は基地局では、PHS モード用の ISDN インターフェースと無線 LAN モード用の Ethernet 端子を、端末では PHS モード用の音声入出力及び非制限デジタル・ベアラ入出力端子と無線 LAN モード用の Ethernet 端子をそれぞれ実装する。試作機の外観を図 3-4 に示す。

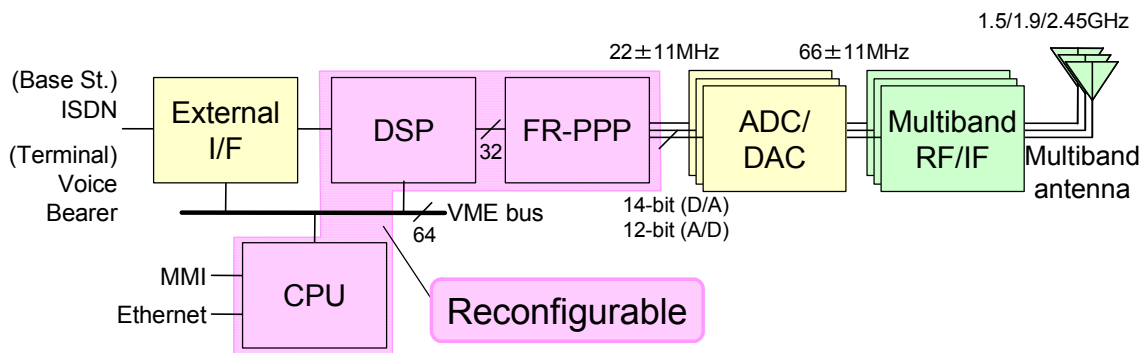


図 3-2 試作機のブロック図

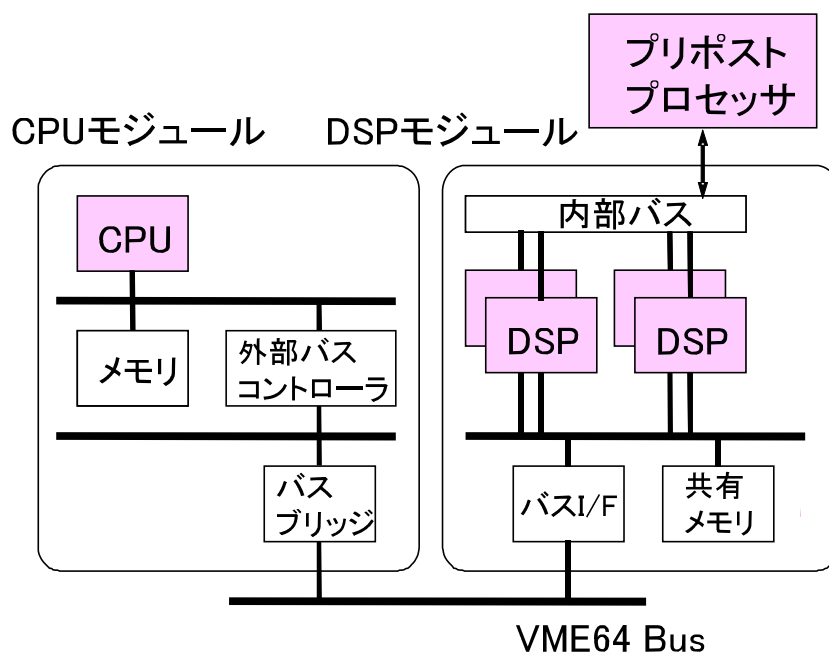


図 3-3 マルチプロセッサアーキテクチャ

表 3-1 試作機の諸元

| | |
|-----|--------------------------------------|
| DSP | |
| CPU | PowerPC750(400MHz) |
| OS | VxWorks 5.2 (Real-time OS) |
| ADC | IF undersampling (12-bit, 88MSPS) |

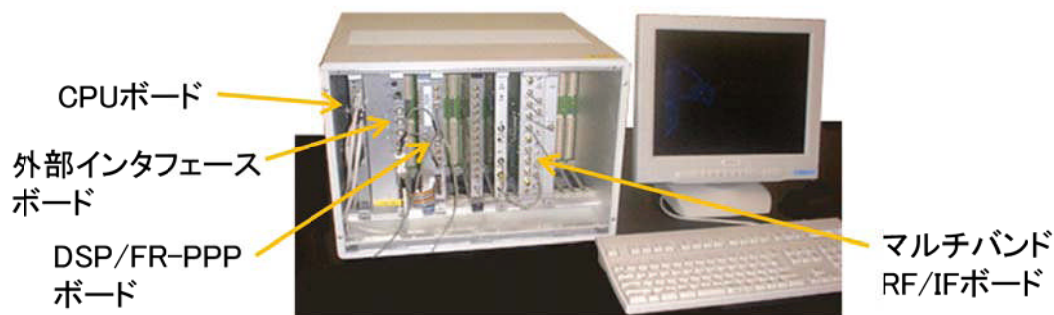


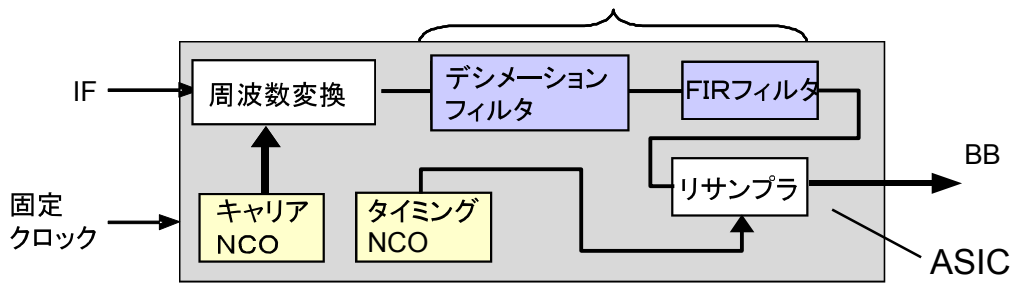
図 3-4 試作機外観

3. 2. 1. マルチバンド RF と AD/DA 変換器

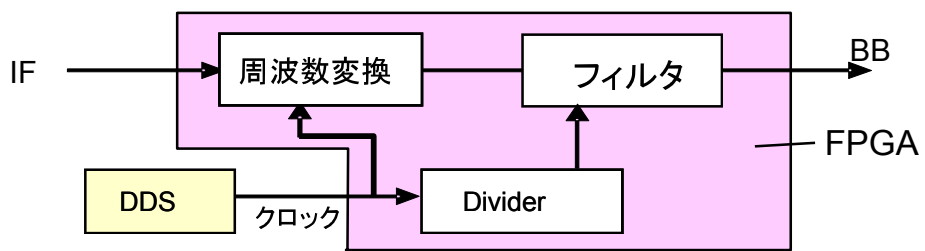
マルチバンド RF 部の周波数は、PHS, PDC, 無線 LAN でそれぞれ利用している 1.5GHz, 1.9GHz, 2.45GHz の周波数帯に対応する。受信した RF 信号はスーパーヘテロダイン方式で中心周波数 66MHz, 帯域幅 22MHz の IF 信号に変換され、IF 信号は AD 変換機で 12 ビット, 88MSPS でアンダーサンプリングされ、デジタル信号に変換される。DA 変換機は中心周波数 22MHz, 帯域幅 22MHz のベースバンド信号をアップサンプリングした後、デジタル信号をアナログ信号に変換する。中心周波数 66MHz, 帯域幅 22MHz のイメージ信号が IF 信号として利用される。

3. 2. 2. リンコンフィギュラブル IF 部

IF 帯で行われるフィルタ処理や波形整形処理, 周波数逆拡散処理で要求される信号処理負荷は大きいので、ベースバンド信号処理プロセッサを用いた信号処理では、時間内に処理を完了することができない。そこで、リアルタイム信号処理を実現するために、プリポストプロセッサを利用する。新たに提案するフレキシブルレートプリポストプロセッサ (FR-PPP) は 2 つの 1M ゲート規模の FPGA とダイレクトデジタルシンセサイザ (DDS) から構成される。図 3-5 は従来のプリポストプロセッサとフレキシブルレートプリポストプロセッサの受信ブロック図の構成を示している。従来のプリポストプロセッサは商用のアップコンバータとダウンコンバータを利用しており、対象とした無線通信システムに対応した様々なフィルタを含むパラメータが事前設定されたハードワイヤード回路により構成されている [3-12]-[3-15]。そのため、回路規模は必要以上に大きくなり、帯域幅は 1MHz から 5MHz に制約されている。一方、FR-PPP は、システム毎に必要なとされるフィルタとして FPGA が変更されるため、回路規模は非常に小さくなる。さらに、従来のプリポストプロセッサは、対象とする無線通信システムの多様なクロックレートに対応するためにリサンブラと数値制御発振器から構成される複雑なインターポレーション回路を利用しているが、FR-PPP は DDS を用い柔軟に要求されたクロックレートを生成することができる。これらにより、従来の回路規模に比べ 75% の削減と 20MHz 以上の広帯域信号に対応した高速処理が可能となり、無線 LAN と PHS に対応したソフトウェア無線機実現のブレイクスルーとなる。



(a) 従来のプリポストプロセッサ



(b) 提案するフレキシブルレートプリポストプロセッサ

図 3-5 従来のプリポストプロセッサと提案するプリポストプロセッサ(受信ブロック)

3. 2. 3. ベースバンド信号処理部

試作機はCPUとDSPでベースバンド信号処理と制御を実行する。CPUは動作クロック400MHzのPowerPCを利用し、PHSの呼制御や無線LANのMAC制御を含む上位層のプロトコル処理を行う。無線信号の変復調、音声符号化、復号化等の物理層の信号処理はDSPで実行される。DSPの演算処理能力は1600MIPSであり、送信処理と受信処理がそれぞれ1つのDSPを用いて実行される。表3-2にプロセッサへの機能割当についてまとめる。

表 3-2 プロセッサへの機能割当

| | Common | PHS mode | Wireless LAN mode |
|--------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| CPU | システム制御 GUI 無線ダウンロード 制御 | 呼制御 | MAC 制御 |
| DSP | | 変調処理 復調処理 音声符号化処理 | 変調処理 復調処理 周波数拡散 |
| FR-PPP | | ダウンコンバージョン フィルタ処理 | ダウンコンバージョン フィルタ処理 逆拡散処理 |

3. 3. ソフトウェア設計

3. 3. 1. ソフトウェアアーキテクチャ

ソフトウェア無線機は無線通信システムのソフトウェアをプロセッサ等にロードした後、無線機として動作する。PHSと無線LANの主要機能を試作機用のプログラムとして設計を行う。

PHS方式はRCR STD-28[3-16]で標準規格化されている4チャンネル多重TDMA-TDD方式であり、本試作ではこれを一部変更・簡易化したものをC言語で記述した。PHSは音声コーデックとして32kbit/s ADPCM方式を変復調方式として $\pi/4$ -QPSK、遅延検波方式を利用している。IEEE 802.11無線LANはDBPSKとDQPSK変調方式を利用した無線方式である[3-17]。表3-3にPHSと無線LANの仕様をまとめる。

ソフトウェアアーキテクチャはOSやプロトコルスタックに強く依存しており、プログラムのオーバーヘッドやシステム性能に影響を与える。図3-6に本試作で用いたプログラムコンポーネントアーキテクチャを示す。ソフトウェア無線機のOSとして、リアルタイムOS (RTOS) を利用し、高速な割り込みとCPUプログラムによる信号処理タスクのスケジューリングを行う。装置制御プログラムは、ユーザインタフェースを持ち、ソフトウェア無線機の状態管理や制御を行うCPUプログラムである。通信制御プログラムは、無線通信プロトコルを記述したプログラムであり、FR-PPPのコンフィグレーションデータ、DSPプログラム及びCPUプログラムを一つのパッケージにまとめ

た実行形式のファイルである。無線ダウンロードプログラムは、無線通信方式に拘わらずTCP/IP上で通信制御プログラムのダウンロードを実行するCPUプログラムである。

表 3-3 無線方式の諸元

| | PHS (RCR STD-28) | 無線LAN (IEEE 802.11) |
|---------|--------------------|---------------------|
| 周波数 | 1.9GHz | 2.45GHz |
| アクセス方式 | TDMA-TDD | CSMA-CA |
| 変調方式 | $\pi/4$ -QPSK | DSSS |
| 伝送速度 | 384kbit/s | 11Mchip/s |
| ユーザ伝送速度 | 32kbit/s | 1Mbit/s, 2Mbit/s |
| 未実装機能 | 移動管理, 認証, 課金, 等 | パワーマネジメント機能, 等 |

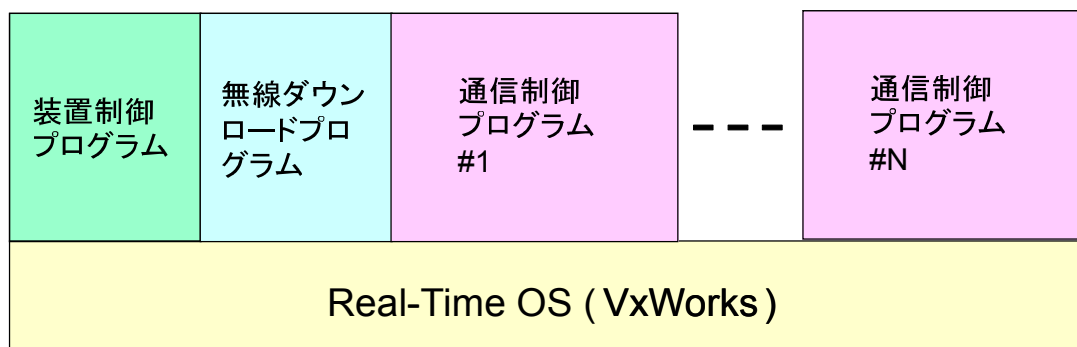


図 3-6 試作機のソフトウェアコンポーネント構成

3. 3. 2. PHS ソフトウェア

PHS方式において、呼制御等はCPUプログラムが行い、変復調や音声符号化等の信号処理はDSPプログラムが行う。CPUプログラムは呼制御タスク、DSP管理タスク等を生成する。各タスクはRTOSにより、優先順位が設定されている。PHS方式はTDMA/TDD方式であるので、規定のスロットタイミグまでに所定の信号処理を行う必要がある。そのため、DSPの負荷を分散させ、規定の時間までに信号処理が終了するように、あらかじめ表3-4に示すようにDSPタスクのスケジューリングを行う。このDSPタスクのスケジューリングは、CPUタスクのひとつであるDSP管理タスクが行う。

図3-7にCPUプログラムからDSPプログラムへAPIコマンドを発行する一例を示す。CPUプログラム内でDSPプログラムに対するコマンドが発生した場合、CPUプログラムは、共有メモリ上にAPIコマンドの発行、及びパラメータの設定を行う。その後、CPUプログラムからDSPプログラムに対して割り込みを行う。この割り込みは、TDMAのスロットに同期して実行される。これにより、共有メモリに対するアクセス権はDSPに移行する。DSPプログラムは割り込みを受けた後、共有メモリにアクセスし、実行タスクの認識及びパラメータの取得を行う。DSPプログラムはタスクを実

行した後、実行結果を共有メモリに書き込む。その後、CPUプログラムに対し、割り込みを行う。上記の処理をスロット時間毎に行うことで、PHSにおけるリアルタイムな信号処理を実現する。

表 3-4 DSP のタスクスケジューリング

| TDMA slot# | TX | RX |
|------------|---------------|---------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | 音声符号化 | |
| 3 | | (Downlink slot) |
| 4 | | クロック再生, 検波, AGC, ユニークワード検出, CRC |
| 5 | | |
| 6 | フレーム構築 変調 | 音声復号 |
| 7 | (Uplink slot) | |
| 8 | | |

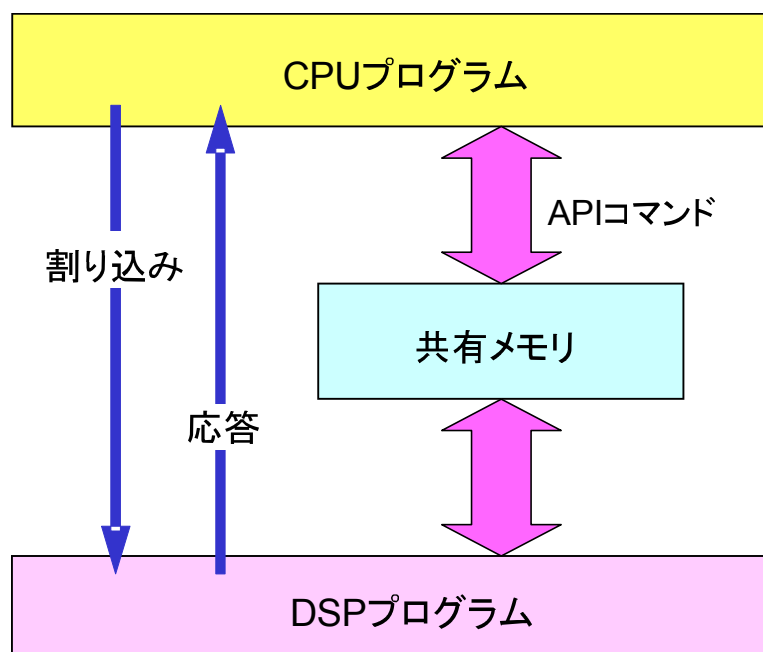


図 3-7 CPU と DSP 間の API

3. 3. 3. IEEE 802.11 無線 LAN ソフトウェア

無線LANソフトウェアは、セキュリティ機能やパワーマネージメント機能等の一部機能を除き基本機能を全て実装する。送受信応答処理の信号処理デバイスへの機能配分として、物理層のフ

フレーム送受信処理はDSP、MAC層のプロトコル処理はCPUにそれぞれ割当てて。物理層の信号処理において、逆拡散やフィルタリング等のDSPの処理能力を超える信号処理はFR-PPP部に割当てて。周波数拡散の信号処理量は小さいため、DSPに割当てて。また、Frame check sequence (FCS)は積和演算処理であるためDSPに割当てて。CPUとDSP間のAPIの割り込みはMPDUのタイミングで行う。

試作機は、CPUとDSPをVMEバスで接続しているため、バスを利用することにより生じる処理遅延が大きな問題となる。例えば、VMEバスを利用した際のデータ転送時間は約40 μ 秒であり、割り込み応答時間は約3 μ 秒となる。このためIEEE802.11で規定しているSIFS時間10 μ 秒を遵守することが困難となるため、IEEE802.11規格の各IFS時間にIFS係数を乗じた値を規定して実装を行い、評価を行った。

$$SIFS' = M \times SIFS,$$

$$DIFS' = M \times DIFS = M \times (SIFS + 2 \times Slot-Time),$$

ここで、 M はIFS係数として規定する。

図3-8はIFS係数 M とスループット特性の関係を示している。MPDUの最大伝送レートが図3-8のスループットとして定義される。IFS係数 M が10の時、 M が1の時に比べスループットは約70%となる。

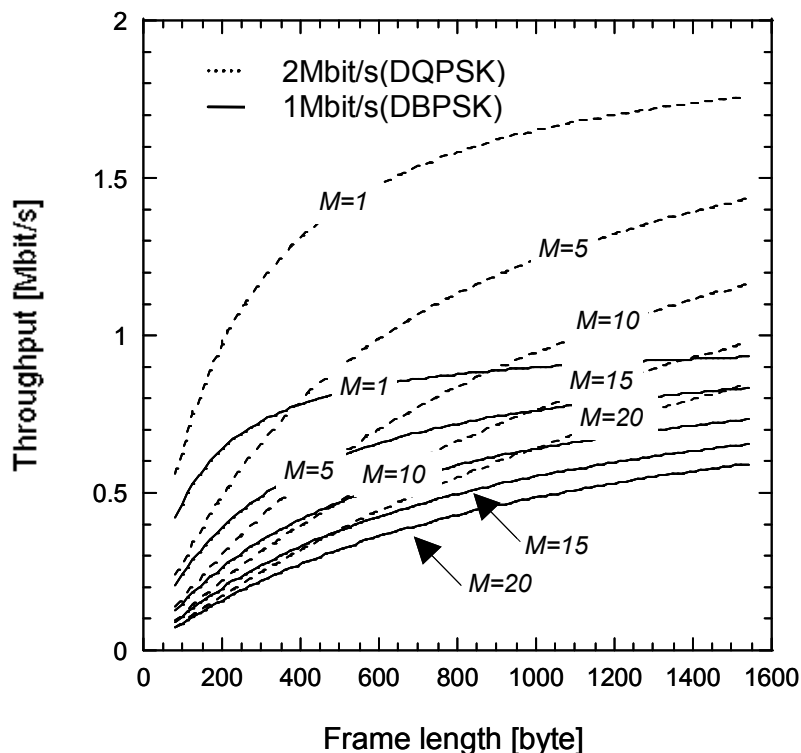


図 3-8 IFS とスループット特性の関係

3. 3. 4. 無線ダウンロードソフトウェア

試作機でソフトウェアを柔軟に変更できるように、TCP/IPをベースとした汎用型無線ダウンロードプロトコルの実装を行った。図3-9に無線ダウンロードのプロトコルスタックを示す。TCP/IP上に新たに無線ダウンロードプロトコルを規定した。これにより、通信モードが変更された場合

も無線ダウンロードプロトコルへの影響を抑えることができる。無線ダウンロードプロトコルは、Secure Socket Layer (SSL) を利用し、認証及びデータの暗号化を行うことで安全性を向上している。

図 3-10 に無線ダウンロードシーケンスを示す。ユーザが無線ソフトウェアのダウンロードを要求すると、ソフトウェア無線端末は無線ダウンロードサーバに SSL を用いた接続を行う。この時、無線ダウンロードサーバで SSL を利用したユーザ認証が行われる。ユーザ認証が成功となった場合、SSL を用いたセッション上で暗号化されたデータの送受信が行われる。認証が完了した後、ソフトウェア無線端末は CPU、DSP、OS、ベンダ等の端末情報を無線ダウンロードサーバに送信する。無線ダウンロードサーバは端末情報に基づきソフトウェア無線端末にインストール可能な無線ソフトウェアの一覧を作成し、ソフトウェア無線端末へ送信する。ユーザは受信した無線ソフトウェアの一覧からダウンロードを希望する無線ソフトウェアを決定し、無線ソフトウェアの要求を行う。ソフトウェア無線端末は、無線ソフトウェアのダウンロードが完了した後、受信した無線ソフトウェアの完全性の検証を行う。その後、ソフトウェア無線端末はダウンロードの完了通知を無線ダウンロードサーバに通知し、SSL セッションを切断する。その後、ソフトウェア無線機の再構築が行われる。

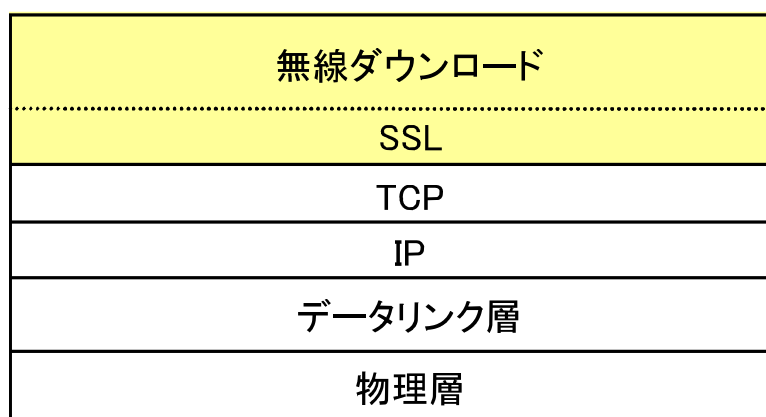


図 3-9 無線ダウンロード機能のプロトコルスタック

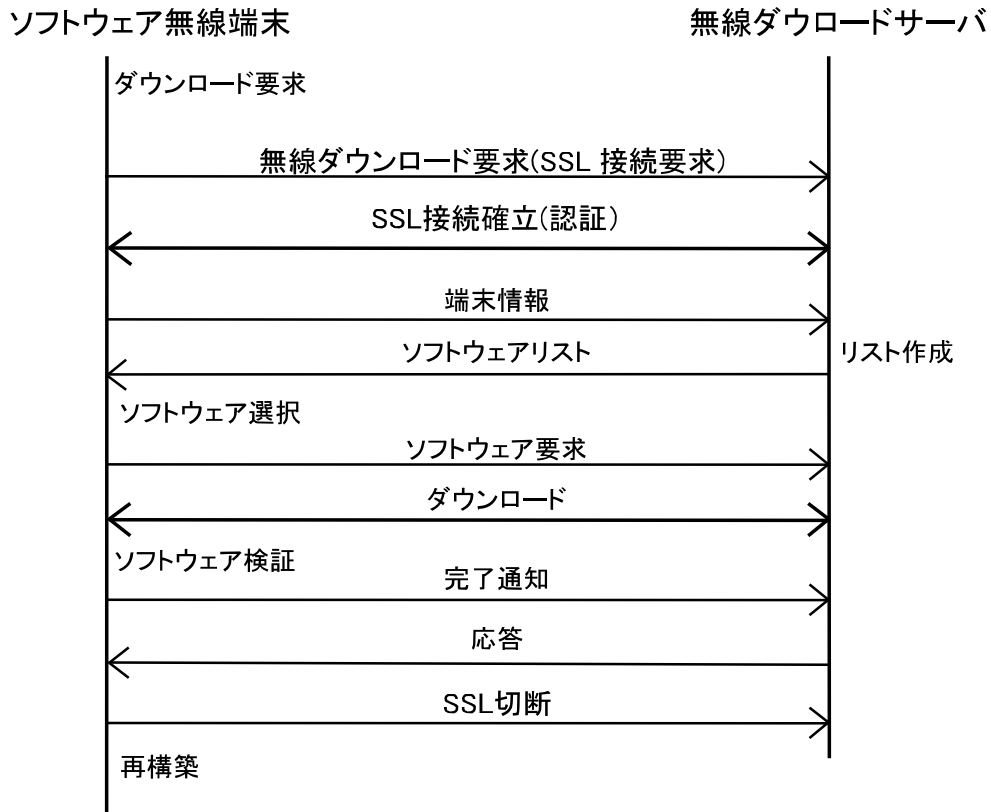


図 3-10 無線ダウンロードシーケンス

3. 4. 性能評価

3. 4. 1. 物理層

物理層の性能評価を行うためにFR-PPP部の出力信号の測定を行った。無線LANモードの送信時にFR-PPPで出力される送信スペクトラムを図3-11に示す。測定結果より、送信スペクトラムは、IEEE802.11で規定されているスペクトラムマスク ($11\text{MHz} < |f-f_c| < 22\text{MHz}$; less than -30dBm, $|f-f_c| > 22\text{MHz}$; less than -50dBm)を満たしていることが分かる。図3-12は無線LANモードのFR-PPPの受信信号の出力結果である。観測結果より、22サンプルごとにピークが検出されており、設計通り動作していることが分かる。

図 3-13 は PHS モード時の送信スペクトルを図 3-14 は PHS モードのコンスタレーションの結果をそれぞれ示している。図 3-14 のコンスタレーションの EVM (Error Vector Magnitude) は 1.9% と精度良く実現されていることが分かった。これらの評価結果から、提案する FR-PPP が PHS モードと無線 LAN モードで正しく動作していることが確認できた。

各通信モードのFPGAのリソース利用率を表 3-5 に示す。FR-PPP の設計の自由度を確保するために 100 万ゲート規模のFPGAを使用したため、FPGAのリソース利用率は最大でも 33%程度である。

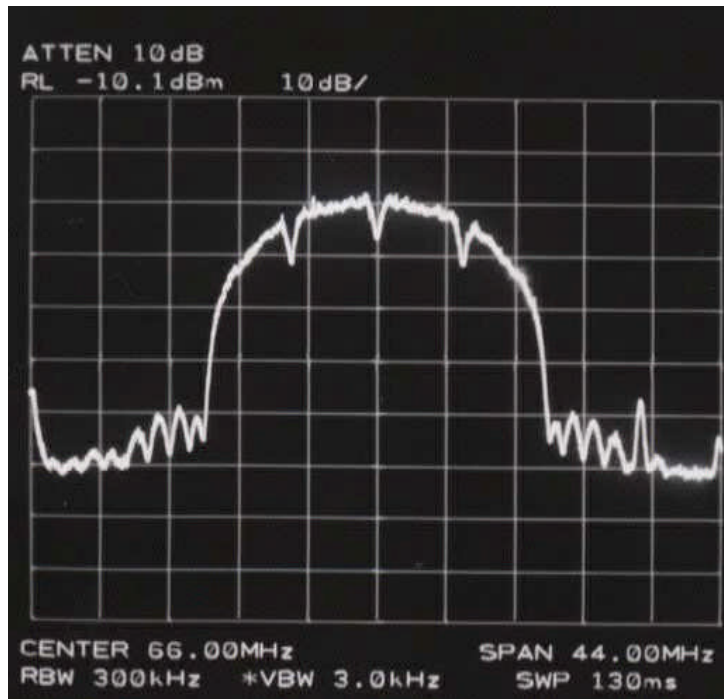


図 3-11 無線 LAN モードの送信スペクトラム

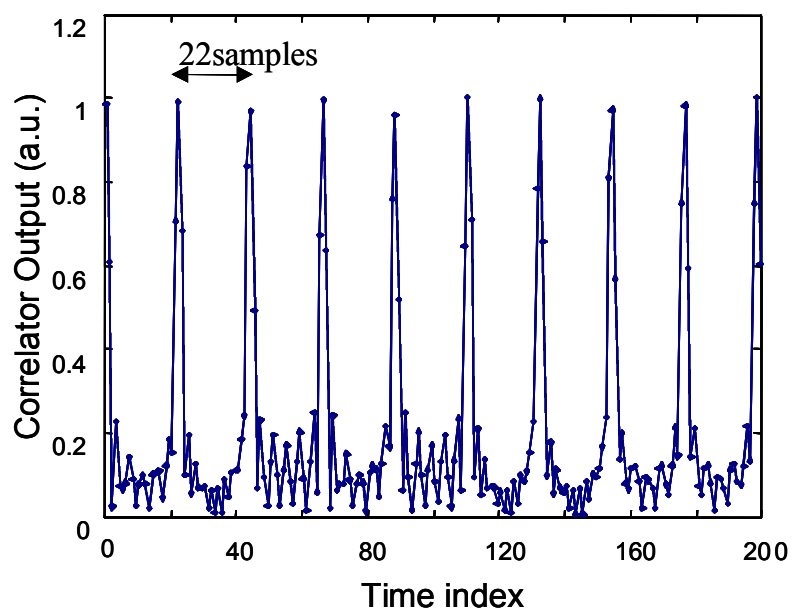


図 3-12 無線 LAN モードの相関出力

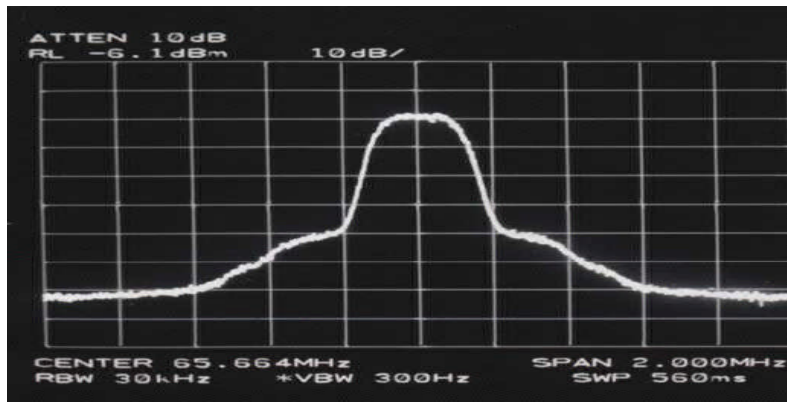


図 3-13 PHS モードの送信波形

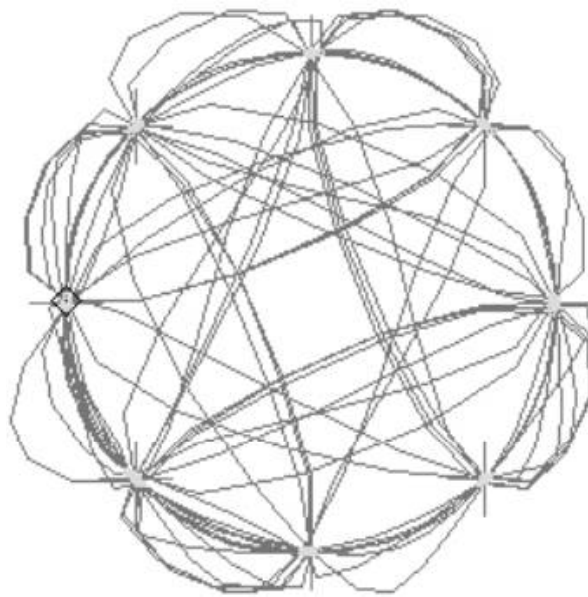


図 3-14 PHS モードのコンスタレーション

表 3-5 FPGA の利用率

| モード | FPGAの利用率[%] |
|------------|-------------|
| 無線LANモード送信 | 4 |
| 無線LANモード受信 | 33 |
| PHSモード送信 | 7 |
| PHSモード受信 | 10 |

3. 4. 2. システム性能

実験系を図 3-15 に示す. PHS モードと無線 LAN モードの無線ソフトウェアのプログラムサイズは非圧縮時でそれぞれ 2MB と 3MB である.

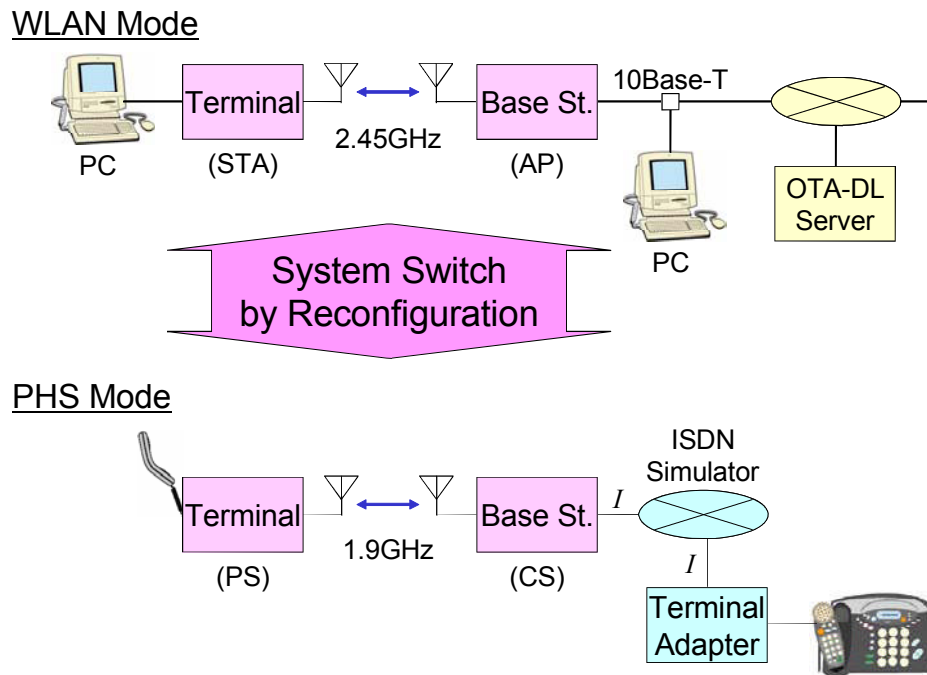


図 3-15 実験系

実験系を用いた性能評価として、まず、無線 LAN ソフトウェアが試作機にロードされ、アクセスポイントと端末間の通信が確立され、ソフトウェア無線機に接続された PC 間でデータ通信が実現されていることを確認した。図 3-16 は無線 LAN モードのシンボル毎の平均負荷の測定結果である。CRC, 変調 (modulation), 復調 (demodulation) やデスクランブル (descrambling) 等の送信信号処理と受信信号処理を行った際の DSP 負荷である。無線 LAN モードでは、送信信号処理、受信信号処理にそれぞれ一つの DSP を割り当てている。本結果より、DSP 負荷は 60% 以下となっているため、信号処理は処理落ちすることなくスケジュール通り実行されていることが確認できた。図 3-17 に 1Mbps モード、2Mbps モードにおけるスループット特性を示す。評価結果より、測定結果とシミュレーション結果はよく一致しており、試作機上でプログラムが設計通り動作していることが分かる。IFS 係数 M を変え測定した結果、シミュレーション結果と一致する最小値は 10 であることが確認された。

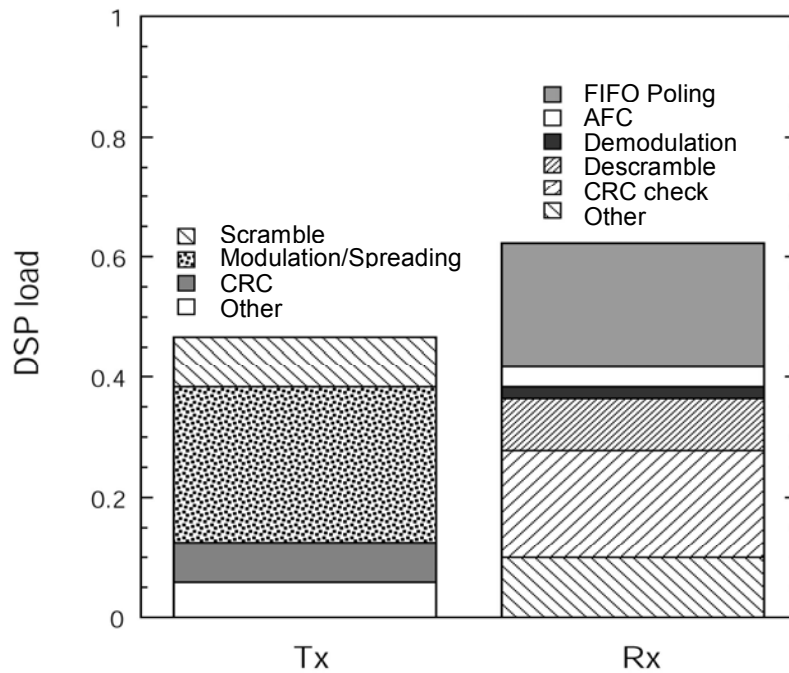


図 3-16 無線 LAN モードにおける各シンボルの DSP 処理負荷

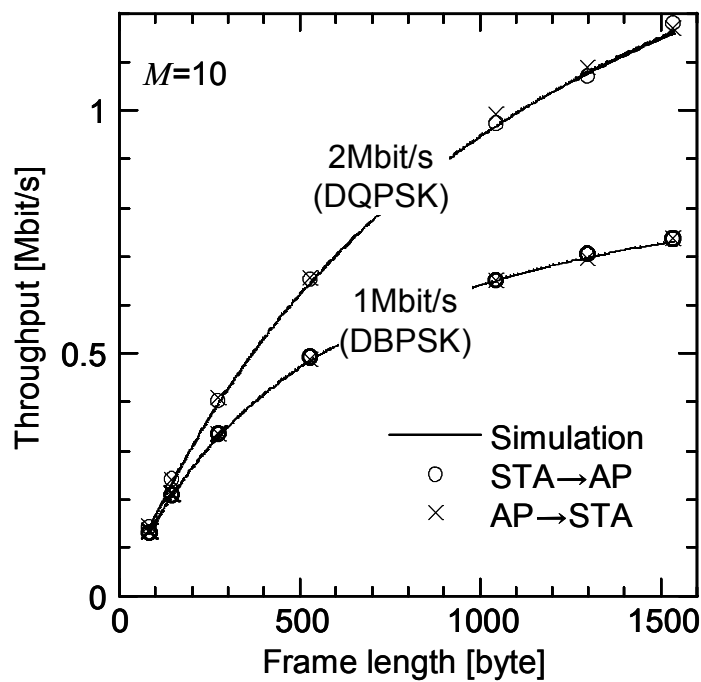


図 3-17 無線 LAN モードにおけるスループット特性

次に、通信制御プログラムが無線ダウンロード機能を用い無線ダウンロードサーバからPHSソフトウェアをダウンロードする。無線ダウンロードが成功した後、装置制御プログラムは、ソフトウェア無線機の再構築を行う。図3-18において、再構築として、まず、FR-PPPのFPGAのコン

フィグレーションデータが装置制御プログラムによりDSPにロードされる。装置制御プログラムはFPGAのコンフィグレーションデータをデュアルポートメモリに書き込む。デュアルポートメモリはCPUとDSPの両方からアクセスできる共有メモリである。FPGAのコンフィグレーションデータは共有メモリからFIFOへ転送され、FR-PPPのコントローラがFIFOからデータを読み出し、FPGAの書き換えが行われる。FR-PPPの書き換え完了後、DSPの送信プログラムと受信プログラムが装置制御プログラムによりDSPにロードされる。最後にPHSのCPUプログラムが実行され、試作機の再構築が完了となる。

無線LANモード上で、PHSソフトウェアのパッケージを無線ダウンロード、及びソフトウェア無線機の再構築動作を確認した。その結果、PHSソフトウェアは無線ダウンロードサーバより正常にダウンロードされ、ソフトウェア無線機の装置制御プログラムによりソフトウェア無線機が無線LANモードからPHSモードへ設計通り再構築されることを確認した。図3-19に示すように再構築時にかかる各プロセッサへのプログラムの総ロード時間は約11秒であった。総ロード時間の約70%は、FPGAのコンフィグレーションデータのロードに費やされる時間である。

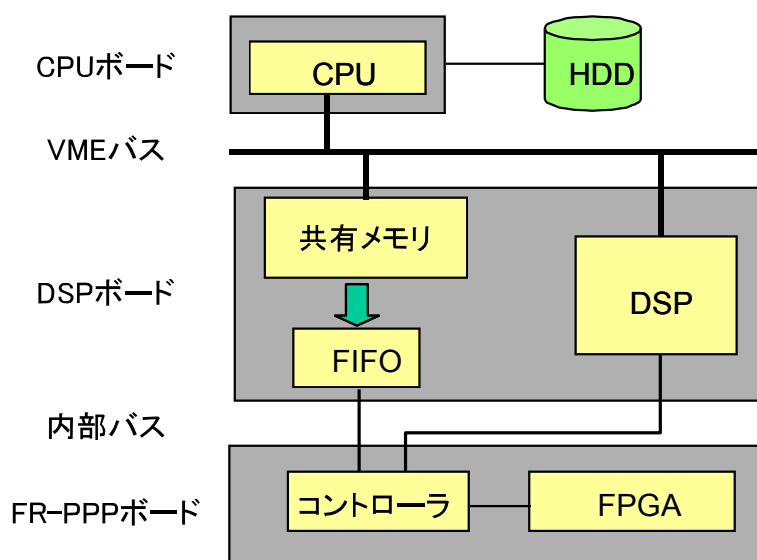


図 3-18 プラットフォームの再構築

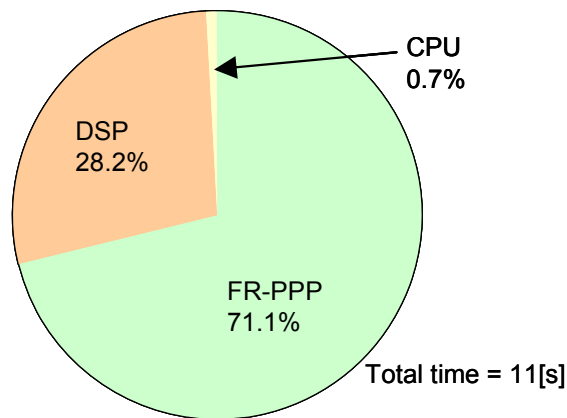


図 3-19 再構築時間の内訳

試作機のPHSモードへの変更が完了した後、端末局は基地局を経由した対向する電話機との通話が可能となる。図3-20は通話時のTDMAスロット毎のDSP処理負荷の実測結果である。DSP処理負荷はTDMAスロット毎の信号処理時間をTDMAスロット時間で正規化を行った。したがって、DSP処理負荷が1を超えた場合は、信号処理が間に合わず処理落ちとなる。評価結果より、試作機は設計通り規定時間内に信号処理が完了していることが分かる。

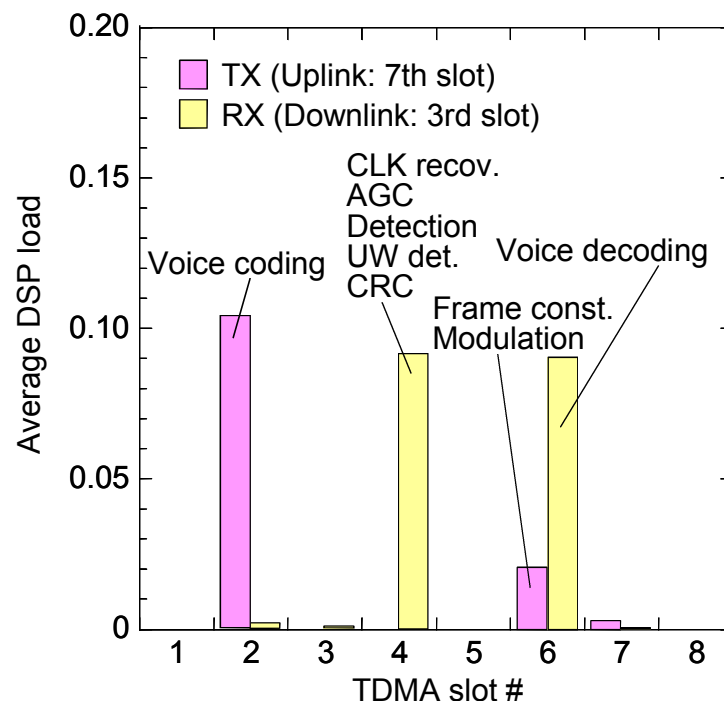


図 3-20 PHSモードにおける各TDMAスロットにおけるDSP処理負荷

3. 5. まとめ

本研究では、プロセッサの特徴を活かしたマルチプロセッサアーキテクチャをソフトウェア無線機のアーキテクチャとして用い、CPU, DSP, FPGAの特性を考慮した機能配分を行うことで低速な無線通信システムであるPHS方式と高速な無線通信システムである無線LAN方式が動作するソフトウェア無線機を実現した。低速から高速な無線通信システムに柔軟に対応するためには、フィルタリング等の高速な信号処理を柔軟に実行する必要がある。そこで、DDSとFPGAからなるフレキシブルプリポストプロセッサを提案し、20MHz以上の広帯域な無線通信システムである無線LANシステムへの対応を可能とした。

提案したソフトウェア無線機の性能評価として、試作機上で動作するPHSと無線LAN用のソフトウェアを試作し、実機上で性能評価を行った。PHSモードにおいて、TDMAスロット毎のDSPの平均処理負荷を評価した。評価結果より設計通りプログラムが動作し、PHS方式による全2重のリアルタイム通信が実現していることを確認した。さらに、無線LANモードにおいて、スループット特性と信号処理負荷について実機を用いて性能評価を行った。その結果、試作機が設計通り動作していることを確認した。さらに、ソフトウェア無線機の機能変更について評価を行うためにTCP/IP上で動作する汎用的な無線ダウンロードプロトコルを新たに設計し、実装を行った。無線ダウンロード機能を用いた無線機能の再構築時間について実機上で評価を行い、再構築に約11秒かかることが明らかになった。

これらの結果から、本試作機はPHS方式のような低速な無線通信システムからIEEE802.11無線LANのような高速かつ広帯域な無線通信システムまで柔軟に対応できることを確認した。これにより、適応型高効率無線通信システムの実現に向け、多様化し、多数の無線通信システムが混在する環境下において、環境に応じた無線機の機能変更による無線通信システムの柔軟な利用が可能となる。

参考文献

- [3-1] J. Mitola, "The software radio architecture," IEEE Commun. Mag., vol. 33, no. 5, pp. 26-38, May 1995.
- [3-2] J. Mitola, "Software Radio Architecture: A Mathematical Perspective," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 17, no. 4, pp. 514-538, April 1999.
- [3-3] P. W. Fox, "Software Defined Radios - Motorola's Wireless Information Transfer System(WITS)," EUROCOMM, pp. 43-46, 2000.
- [3-4] C. Zhang, C. Luo, X. Su, Y. Yao, "Data Timing Schemes for Software Radio Systems," VTC2001 fall, pp. 2229-2233, 2001.
- [3-5] H. Tsurumi, H. Yoshida, S. Otaka, H. Tanimoto and Y. Suzuki, "Broadband and Flexible Receiver Architecture for Software Defined Radio Terminal Using Direct Conversion and Low-IF Principle," IEICE Trans. Commun., vol. E83-B, no. 6, pp. 1246-1253, June 2000.

- [3-6] N. Nakajima, R. Kohno, and S. Kubota, "Research and Developments of Software-Defined Radio Technologies in Japan," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 146-155, August 2001.
- [3-7] B. Welch, S. Shemrman, "Teaching Software defined radio using the USRP and LabVIEW," *IEEE conference on ICASSP2012*, pp. 2789-2792, 2012.
- [3-8] J. Fang, Z. Tan, K. Tan, "Soft MIMO: A software radio implementation of 802.11n based on Sora platform," *IEEE conference on ICWMMN2011*, pp.165-168, 2011.
- [3-9] Federal Communication Commission Document 08-260: "First report and order: In the Matter of Authorization and Use of Software Defined Radios," Sept. 14, 2001.
- [3-10] H. Harada, Y. Kamio, and M. Fujise, "Multimode software radio system by parameter controlled and telecommunication component block embedded digital signal processing hardware," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E83-B, no. 6, pp. 1217-1228, June 2000.
- [3-11] T. Shono, K. Uehara, and S. Kubota, "Proposal for system diversity on software defined radio," *IEICE Trans. Fund.* vol.E84-A, no.9, pp.2346-2358, Sep. 2001.
- [3-12] intersil, "HSP50214B Data sheet," May 2000.
- [3-13] intersil, "HSP50215 Data sheet," January 1999.
- [3-14] TEXAS INSTRUMENTS, "GC4016 Data sheet," August 2001.
- [3-15] TEXAS INSTRUMENTS, "GC4116 Data sheet," April 2001.
- [3-16] RCR Standard, "Personal Handy Phone System," ARIB STD-28, ver. 1, rev. 1, 1995.
- [3-17] ISO/IEC 8802-11, ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications."

4. コグニティブ無線における信頼度に基づいた協調センシング方法に関する研究

4. 1. はじめに

LTE等の携帯電話システムを始め、無線LANシステムや衛星通信システム、センサーネットワーク、さらに放送など多種多様な無線通信システムが現在運用されている。これらの無線通信システムを利用した無線サービスの普及に伴いトラヒックが急増しており、無線通信システムにおいては周波数の逼迫が大きな問題となっている[4-1]。この問題を解決する技術として、コグニティブ無線技術が注目され、多くの研究が報告されている[4-2][4-3]。コグニティブ無線技術は、無線機周辺の電波環境を認識し、認識結果に基づき使用していない周波数や混雑していない無線通信システムを選択し、利用することで、周波数の有効利用を実現する技術である。コグニティブ無線技術を用いることで、周波数を適応型高効率無線通信システムのリソース制御対象として検討することが可能となる。コグニティブ無線に関する標準化も活発に行われており、IEEE 802.22, IEEE SCC41, 無線LANのTVホワイトスペース利用を想定したIEEE 802.11af等の多数のコグニティブ無線技術に関する規格の標準化が進められている[4-4]-[4-6]。

コグニティブ無線において、電波環境を正確に認識するために、無線機周辺の電波状況を正しく把握する周波数センシング技術が重要な要素技術となる。周波数センシング技術は電波の受信電力を検出するEnergy detectionと信号の特徴を利用し、周波数利用の有無を判断するCyclostationary detection等の方法に大別することができ、これらに関する多数の報告が行われている[4-7][4-8]。さらに、周波数センシングの検出精度を向上させる技術として、複数の無線機で実施された検出結果を利用し、周波数の検出を行う協調センシング方法も検討されている[4-9][4-10]。文献[4-9]における提案手法は、協調センシングで利用する無線機が一台でも優先的に周波数を利用する一次利用者の無線信号(プライマリ信号)を検出したと判定すれば、総合判定結果も同様の結果とするため、プライマリ信号の誤検出率を低減することができる。しかし、その一方で、プライマリ信号が存在しない場合も存在すると判定する誤警報率が増加するといった問題がある。文献[4-10]では、軟判定を用いた協調センシング方法が提案されている。軟判定とすることで硬判定を用いた協調センシング方法に比べ検出性能が向上可能であることを報告している。

上記のように協調センシング方法は複数のセンシング端末の結果を基に総合判定が行われるため、センシング情報や総合判定を行う際の判定式がプライマリ信号の検出性能に影響する。しかしながら、無線機で実施する検出方法は単一ではなく、センシング端末の能力等に応じて様々な検出方式が利用されており、検出方法毎にプライマリ信号の検出性能は異なる。この時、無線機がプライマリ信号を検出するために利用する無線機の装置性能もプライマリ信号の検出結果に影響を与える。さらに、無線機の場所やセンシング時刻毎に無線チャンネルはフェージングやシ

ャドウイングの影響により変化するため、センシング端末の場所やセンシング時刻はプライマリ信号の検出結果に影響を与える。これら問題を解決し、高精度な協調センシングを実現するために、各センシング端末が実施したセンシング情報の正確さを表す信頼度を新たに導入し、各センサで取得したセンシング結果毎にセンシング情報の信頼度に応じた重み付けを行う協調センシング方法の提案を行う。

4. 2. センシング情報の信頼度に基づいた協調センシング方法

複数のセンシング端末で取得したセンシング情報に対して、センシング情報の信頼度に基づきセンシング情報の重み付けを行う協調センシング方法を提案する。提案方式において、まず、総合判定局がセンシング端末のセンシング方法、センシング端末のハードウェア性能や位置情報等を予め取得する。総合判定局は、各センシング端末で取得したセンシング結果を基にプライマリ信号の有無について総合判定を行う。総合判定局はネットワークに配置されたサーバ、或いは基地局での実施等が考えられる。総合判定局はセンシング端末から収集したセンシング端末の位置情報やハードウェア性能、センシング方法等からセンシング端末が実施するセンシング方法で得られるセンシング情報毎の信頼度の設定を行う。それぞれの情報は表 1 に示す総合判定局が所持する端末管理テーブルに格納される。信頼度の設定は実際の周波数の利用状況とセンシング結果を比較し、フィードバックする方法等も考えられる。周波数を 2 次利用するセカンダリシステムが運用されている際に、センシング端末から周波数を優先的に利用するプライマリシステムの検出に関する通知を総合判定局が受信した場合、総合判定局はセンシング端末が周波数センシングを行うことを指示する。センシング端末はプライマリシステムの信号のセンシングを行い、取得した情報を総合判定局に送信する。総合判定局は、センシング端末から送信されたセンシング情報を表 4-1 に示すセンシング端末のセンシング方法毎に設定された信頼度で重みづけを行う式 (4-1) を計算することで総合判定結果 S を求める。総合判定局は総合判定結果 S と判定閾値から、プライマリシステムの信号の有無について判定を行う。これにより、取得したセンシング情報にセンシング情報の信頼度による重み付けを行う協調センシングが実施される。

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_i^j * I_i^j \quad (4-1)$$

I_i^j は端末 i で行う周波数センシング方法 j で得られるセンシング情報を示している。 R_i^j はその時のセンシング情報の信頼度である。

表 4-1 総合判定局の端末管理テーブルの一例

| | センシング端末位置 情報 | センシング方 法 | 性能 | 信頼性 |
|-----------|-----------------|------------------------|---------------------------|---------|
| センシング端末1 | X1,Y1 | Energy 検出 | 観測期間, 観測間隔, 周波数解像度等 | R_1^1 |
| センシング端末 2 | X2,Y2 | Energy 検出 | 観測期間, 観測間隔, 周波数解像度等 | R_2^1 |
| | | Cyclostationa ry 検出 | 観測期間, 観測間隔, 周波数解像度等 | R_2^2 |

4. 3. 性能評価

提案方式の有効性を示すために、計算機シミュレーションを用いて誤検出率と誤警報率について評価を行う。図 4-1 にシミュレーションモデルを、シミュレーション条件を表 4-2 に、それぞれ示す。図 4-1 において、プライマリシステムとセカンダリシステムのサービスエリアの半径を、それぞれ r_1 , r_2 とし、プライマリシステムとセカンダリシステムの基地局間の距離 D とする。誤検出は、プライマリシステムの信号が有るにも関わらず、無いと判定した場合である。つまり、プライマリシステムとセカンダリシステムのサービスエリアが重なる場合 ($r_1+r_2 \geq D$)、オーバーラップした領域でプライマリシステムの信号が検出されるが、この領域でセカンダリシステムがプライマリシステムの信号を無いと判定した事象である。一方、誤警報はプライマリシステムの信号が存在しないにも関わらず存在すると判定した場合である。つまり、プライマリシステムとセカンダリシステムのサービスエリアが重ならない場合において ($r_1+r_2 < D$)、セカンダリシステムが、プライマリシステムの信号を検出と判定した事象である。誤検出が大きくなると、プライマリシステムの運用に支障がでるため、誤検出率は一定の値以下に抑える必要がある。一方、誤警報率が大きくなると周波数の 2 次利用機会を失うことになるため、周波数利用効率を向上させるためには、誤警報率を小さくする必要がある。

提案方式の評価を行う前に、センシング情報の信頼度 R の設定を行う。本評価では、セカンダリシステムのセンシング端末は全て同一のハードウェア性能を持ち、Energy detection によりプライマリシステムの信号検出を行うものとする。計算機シミュレーションにおいて、センシング端末はセカンダリシステム内で一様に分布するため、センシング端末の位置に応じて、センシング結果のばらつきが発生する。そこで、距離に応じて受信レベルは減衰するため、プライマリシステムの基地局からの距離に応じた信頼度の設定を行う。センシング情報の信頼度を $R=(1/d)^n$

とし、本モデルにおける信頼度 R の最適化を行う。ここで、 d はセンシング端末とプライマリシステムの基地局間の距離を示している。セカンダリシステムとプライマリシステムが隣接した状態とし ($D=r_1+r_2$)、信頼度 R のパラメータ n を変更した際の誤警報率に関する評価結果を図 4-2 に示す。図 4-2 で、 n が大きくなるにつれ、距離の増加に対する信頼度の減少の割合が大きくなる。図 4-2 より、 n が 5 の時に、誤警報率を最小にすることができることから、本モデルにおいて、信頼度 R を $R=(1/d)^5$ とし、提案方式の評価を行う。

表 4-2 シミュレーション条件

| | |
|-------------------|--|
| 周波数 | 5 GHz |
| 変調方式 | OFDM, QPSK |
| 送信電力 | 100mW |
| チャンネルモデル | 16 波レイリーフェージング ($\tau_{rms}=80ns$) |
| システムエリア半径 | プライマリシステム: $r_1=30m$ セカンダリシステム: $r_2=15m$ |
| セカンダリシステムのユーザ端末台数 | 100 台, 一様分布 |
| 観測時間 | $476 \mu s$ |
| 各ユーザ端末のセンシング方法 | Energy detection |

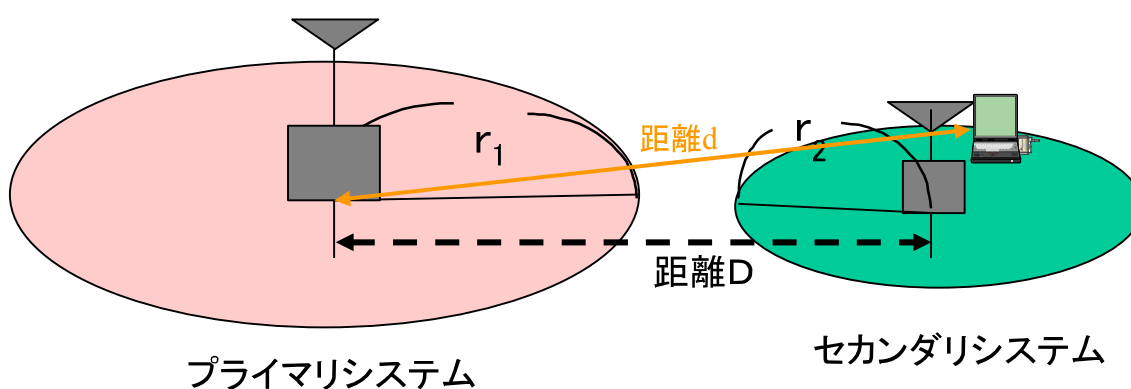


図 4-1 シミュレーションモデル

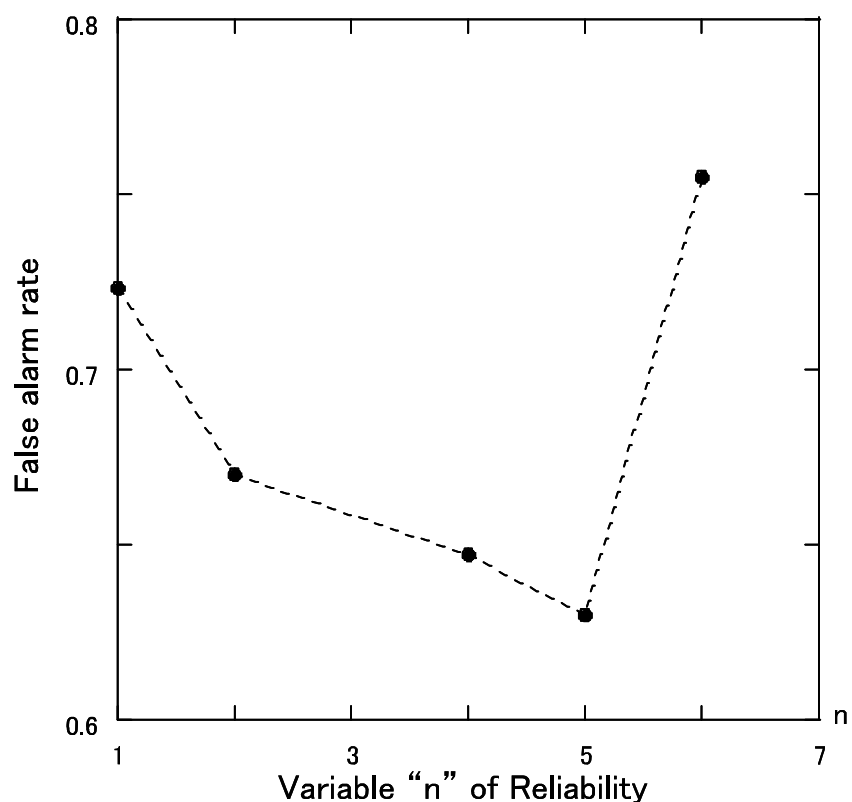


図 4-2 信頼度 R の変数 n と誤警報率の関係

図 4-3 に、プライマリシステムとセカンダリシステム間の距離を変更した際の誤検出率と誤警報率の関係を示す。図 4-3 で、横軸は正規化システム間距離 D' ($D/(r_1+r_2)$) を示している。 $D' < 1$ でプライマリシステムとセカンダリシステムのサービスエリアが重複し、 $D' = 1$ で両システムのサービスエリアは隣接となる。図 4-3 で、プライマリシステムへの干渉に影響を抑えるために、 $D' > 1$ の領域において、提案方式と従来方式は、誤検出率が 10%以下となるようにプライマリシステム検出に関する判定閾値を設定する。ここで、従来方式はセンシング情報の信頼度による重み付けを行わない協調センシング方法とする。提案方式を用いることで、従来方式に比べ、誤警報率を最大 12%低減することができる。つまり、提案方式を用いることで、セカンダリシステムの通信機会が増加するため、周波数の利用効率を向上させることができる。

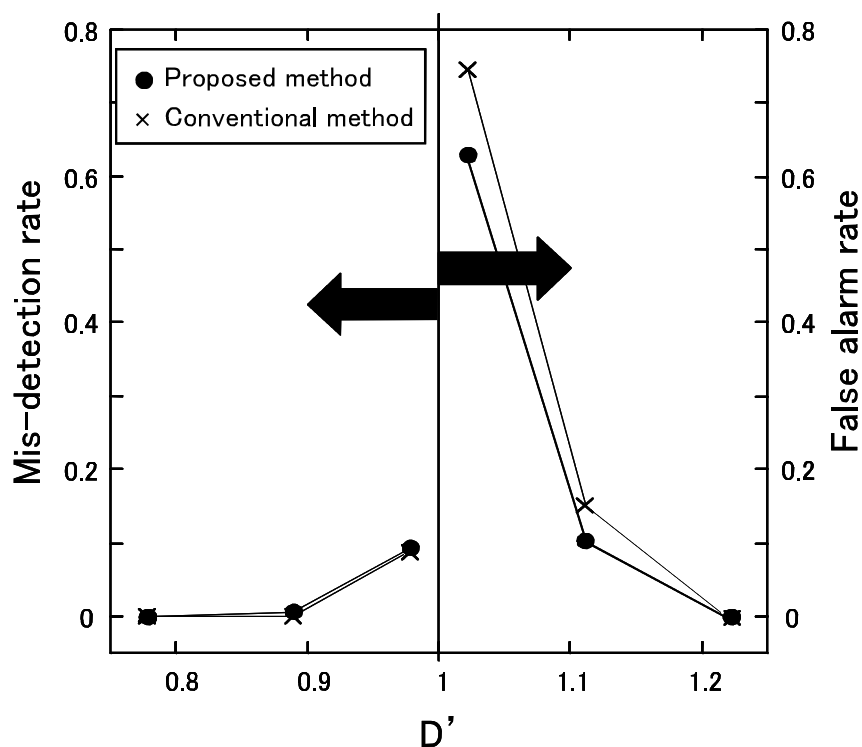


図 4-3 正規化システム間距離 D' と誤警報率の関係

次に、実機を用いた際の提案方式の有効性を確認するために、評価実験を行った。実験系と実験パラメータを図 4-4 と表 4-3 にそれぞれ示す。実験において、総合判定局であるチャネルセンシングサーバは、センシング端末から集めたセンシング情報と距離により設定された信頼度を基に協調センシングを行う。センシング端末は一様に分布すると想定し、センシング端末の位置に基づきアッテネータの減衰量 (SS_ATT_i) を 0dB から 50 dB に設定する。したがって、センシング端末で受信するプライマリシステムの受信信号電力 Pr_i は式 (4-2) となる。

$$Pr_i = Pt - ATT - SS_ATT_i - Loss \quad (4-2)$$

式(4-2)において、 Pt はプライマリシステムの送信電力、 ATT はプライマリシステムとセカンダリシステム間の距離に応じて設定されるアッテネータの減衰量、 SS_ATT_i はセカンダリシステムの各端末の位置に基づき設定されるアッテネータの減衰量、 $Loss$ は実験系における、ケーブル等の損出を表しており、損失量は 32dB である。

センシング端末はプライマリシステム信号を Energy detection を用いセンシングを行い、センシング結果を総合判定局に通知する。総合判定局は、式(4-1)を利用し、プライマリシステム信号の有無について判定する。

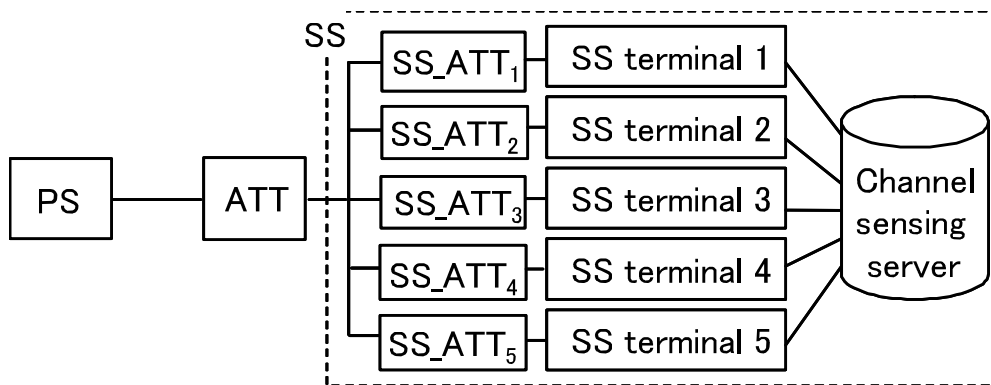


図 4-4 実験系

表 4-3 実験パラメータ

| | |
|-----------------------|--|
| プライマリシステムの送信電力 | 15 dBm |
| セカンダリシステムのセンシング端末台数 | 5, 一様分布 (SS_ATT_1 - SS_ATT_5 :0-50 dB) |
| 各ユーザ端末のセンシング方法 | Energy detection |
| 協調センシングで利用するセンシング端末台数 | 5 |
| 信頼度 | $(1/d)^5$ |

図 4-5 にプライマリシステムとセカンダリシステム間に設置したアッテネータの減衰量(ATT)と誤検出率の関係を示す。アッテネータの減衰量が大きくなる程、図 4-5 においてプライマリシステムとセカンダリシステムの基地局間の距離は大きくなり、2つの無線通信システムは離れる。図 4-5 より、従来方式に比べ提案方式は、誤検出率を小さく抑えることができることが分かる。実機においても計算機シミュレーションによる評価と同様に、提案方式の効果が確認された。提案方式において、実測値とシミュレーション結果の乖離が大きくなっている部分があるが、これは端末の発生場所の偏りに起因するものである。測定回数を多くすることで、シミュレーション結果と測定結果は一致すると思われる。

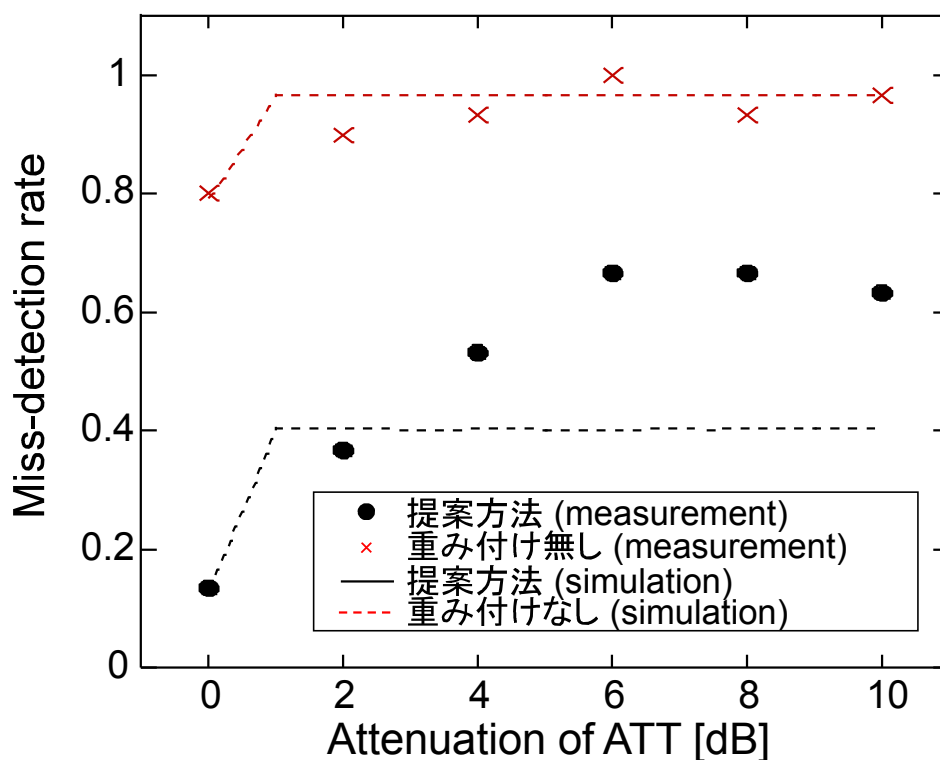


図 4-5 セカンダリシステムとプライマリシステム間の ATT の減衰量と誤検出率の関係

4. 4. まとめ

センシング端末が取得するセンシング情報の正確さは、センシング端末の性能やセンシング方法、センシング環境に応じて様々である。センシング性能を向上させるために、センシング情報の信頼度を新たに定義し、信頼度に基づきセンシング情報の重み付けを行う協調センシング方法を提案した。提案方式の有効性を評価するために、計算機シミュレーションによる性能評価を行った。評価結果より、提案方式は従来方式に比べ誤警報率を改善できることを示した。つまり、提案方式を用いることで、セカンダリシステムにおける周波数利用の機会が増加するため、周波数利用効率を向上することができる。さらに、実機を用いた評価を行い、提案方式は実機上でも従来方式に比べ、プライマリシステム信号の検出特性を改善できることを明らかにした。これらの結果から、適応型高効率無線通信システムにおいて正確な電波環境の認識が可能となり、電波の利用状況に応じた周波数リソースの適応的な利用が可能となる。

参考文献

- [4-1] Cisco Visual Networking Global Mobile Data Traffic Forecast for 2010 to 2015, 2011.

- [4-2] J. A. Hoffmeyer, “Regulatory and Standardization Aspects of DSA Technologies—Global Requirements and Perspectives,” IEEE DySPAN 2005, Baltimore, USA, pp. 700-705, 2005.
- [4-3] J. Mitla III and G. Q. Maguire Jr., “Cognitive radio: making software radios more personal,” IEEE Personal Communication, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, August 1999.
- [4-4] <http://www.ieee802.org/22/>
- [4-5] <http://www.scc41.org/>
- [4-6] http://www.ieee802.org/11/Reports/tgaf_update.htm
- [4-7] Cabric, S. M. Mishra, R. W. Brodersen, “Implementation Issue in Spectrum Sensing for Cognitive Radios,” The Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol. 1, pp. 772-776, November 2004.
- [4-8] P. D. Sutton, K. E. Nolan, and L. E. Doyle, “Cyclostationary Signatures for Rendezvous in OFDM-based Dynamic Spectrum Access Networks,” IEEE DySPAN 2007, Dublin, Ireland, pp. 220-231, 2007.
- [4-9] Ghasemi and E. S. Sousa, “Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environments,” IEEE DySPAN 2005, Baltimore, USA, pp. 131-136, 2005.
- [4-10] Uchiyama, K. Umebayashi, T. Fujii, F. Ono, K. Sakaguchi, Y. Kamiya and Y. Suzuki, “Study on Soft Decision Based Cooperative Sensing for Cognitive Radio Networks,” IEICE Trans. Commun., vol. E91-B, no. 1, January 2008.

5. 無線ネットワークリソース制御方法に関する研究

5. 1. はじめに

無線ネットワークの高効率な利用を目指し、電波環境の認識による周波数リソースの適応利用だけでなく、さらに、無線ネットワークリソースの柔軟かつ高効率な利用を目指し、ユーザが利用するサービスやトラフィック量、ユーザの行動特徴等といった認識対象を拡張し、それらに基づいた無線ネットワークリソース制御方法の提案を本章では行う。回線交換型の無線通信システムにおいて、使用されているトラフィック量を認識することで、常時接続サービスと帯域保証サービスを両立させる無線リソース制御方法について 5.2 で述べる。さらに、5.3 ではセルラシステムにおいてユーザの行動特徴を考慮することで、ユーザ間の公平性を保ちつつ負荷分散を実現するセル再選択方法の提案を行い、その有効性を示す。

5. 2. 回線交換型無線リソース制御方法

5. 2. 1. 研究背景

ウェブブラウジング (WWW) や電子メール (E-mail)、音楽データや動画データの配信、観光地における観光情報のホットスポット的な配信サービス等、様々な形態のデータ通信が実施されている。様々なサービスを迅速且つ効率的に提供するためには、回線交換型ネットワークやパケット交換型ネットワークといったネットワークの形態を考慮して通信インフラを適切に利用する必要がある。有線ネットワークにおいては、回線交換とパケット交換を効率的に利用し、ネットワークの常時接続を可能とする Always On/Dynamic ISDN (AO/DI) システムがある [5-1], [5-2]。AO/DI システムは ISDN ベースのシステムであり、通信時のトラフィック量や通信時間等に基づきパケット交換型データ通信と回線交換型データ通信を切り替えることで、効率的なデータ伝送を実現する。

無線ネットワークにおいても、携帯端末の普及に伴い無線を用いた様々なサービスやデータ通信が増加し、利用されている。無線ネットワークにおいても、有線ネットワークと同様に多様なサービスを効率的に提供するための柔軟な無線ネットワークインフラの利用が必要となる。回線交換型ベースのデータ通信を用いた場合は帯域保証を行い、且つ高速のデータ通信を実現することができるが、無線通信は有線通信と異なり、周波数資源が有限であるという物理的な制約があるため、常時接続型のサービスを多数のユーザに対し同時に提供することは難しい。そこで、AO/DI の概念を回線交換型の無線通信システムに取り入れることで、周波数利用効率を高く保ちつつ、疑似的に常時接続サービスを実現し、多種多様なサービスを提供することが可能となる [5-4]-[5-6]。そこで、本設では、ワイヤレス AO/DI システムの実現に向け、システム設計を行い、さらに、その有効性を示すために計算機シミュレーションによる評価を行う。

5. 2. 2. A0/DI 技術

A0/DI は ISDN の Dch パケット交換と Bch 回線交換とを通信時のトラフィック量に応じて、Bandwidth Allocation Control Protocol (BACP) [5-3]を用いて切り替える技術である。BACP は、コネクションを張ったままの状態では通信時のトラフィック量に応じて、Terminal Adapter (TA) が自動的に別のコネクションを追加したり切断したりするためのプロトコルである。従って、Dch パケット交換を用いることで常時接続が簡易に実現可能となる。また、Bch 回線交換を用いることで高速通信が実現できる。

図 5-1 に A0/DI の概念図を示す。図 5-1 は、ユーザがウェブブラウジング (WWW) を行った際に想定される A0/DI システムの回線交換とパケット交換の状態遷移の様子を示したものである。ユーザがホームページを閲覧し、トラフィックが発生しない場合や、URL のリクエストのような少量のトラフィックが発生する場合を図 5-1 (a) に示す。トラフィックが発生していない、或いは少ない場合は、Dch パケット交換を用いた常時接続で通信が行われる。この時、Dch パケット交換の伝送速度は最大 9.6kbps である。Dch で通信される X.25 コネクションを通常のダイヤルアップコネクションと同様に扱うために、Point to Point Protocol (PPP) フレームが High Level Data Link Control Procedure (HDLC) ヘッダーを含んだ形式で X.25 パケットに格納される。

次に、サーバから送信されたコンテンツ情報を受信し、トラフィック量が増加した場合、状態遷移が発生し、BACP により伝送路が Dch パケット交換から Bch の回線交換へと切り替わる。図 5-1 (b) にトラフィック量が多い場合を示す。Dch パケット交換から Bch 回線交換へと切り替わり、64kbps で帯域保証型のデータ通信が行われる。更に通信時のトラフィック量が増加した場合は状態遷移が発生し、図 5-1 (c) のトラフィック量が非常に多い場合となる。図 5-1 (c) で BACP は、Bch を 1 本追加し、Multilink Protocol (MP) を利用した 128kbps のマルチリンク通信を行う。コンテンツの受信が終了し通信時のデータ量が減少した場合、状態遷移が発生する。BACP は、Bch のコネクションを切断し、図 5-1 (b) の状態となり、回線交換で 64kbps の帯域保証通信を行なう。更に通信時のトラフィック量が減少し、一定時間データが受信されない場合は、Bch を用いた回線交換型通信から Dch を用いたパケット交換型通信へと状態が遷移する。

以上のように A0/DI は、通信時のトラフィック量に応じてデータ伝送に使用する伝送路を切り替えることで、ネットワークインフラの効率的な利用を実現している。

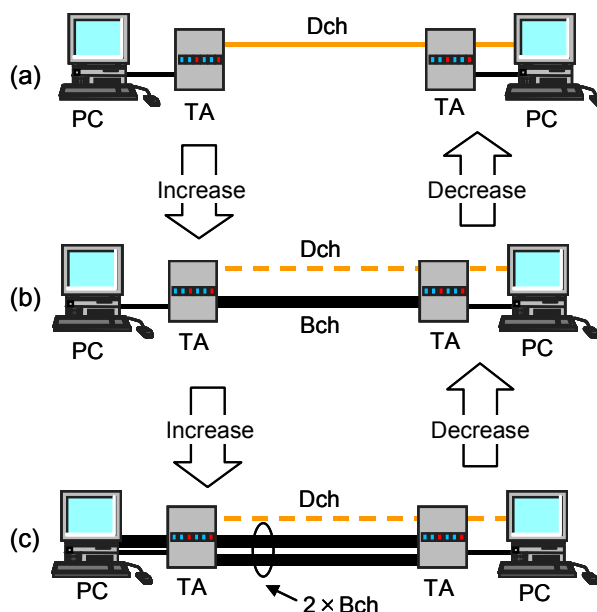


図5-1 A0/DI概念

5. 2. 3. ワイヤレス A0/DI システム

回線交換型の無線通信システムである PHS を利用し、5. 1. 2 で述べた A0/DI の概念を無線通信システムに適用したワイヤレス A0/DI システムについて提案する。新たに A0/DI 対応ワイヤレス TA (W-TA)、クライアント側 PC で動作するワイヤレス A0/DI 対応ミドルウェアと PPP を拡張した Wireless Link Point to Point Protocol (WLPPP) を提案し、パケット交換と回線交換を 1 無線回線交換チャンネルに多重することで、ワイヤレス A0/DI システムを実現する。これにより有限である周波数リソースの適応的、且つ高効率な利用を実現する。本システムでは、簡易化のため、無線部において PHS の回線交換方式を擬似的にパケット交換方式として利用する。

クライアント端末で実行されるワイヤレス A0/DI 対応ミドルウェアは以下の処理を行う。

- ① 通信量の測定と測定結果に基づき帯域の拡張と縮小を行う BACP 処理
- ② 仮想リンク制御
- ③ WLPPP 制御

仮想リンク制御は、通信するデータが存在しない場合は論理リンクを保持したまま無線回線を切断し、解放する処理であり、これにより、無線リソースの有効利用と消費電力の低下をはかることができる。

WLPPP 制御では PPP フレームをベースとした WLPPP フレームを用いた制御を行う。図 5-2 に WLPPP のフレーム構成を示す。WLPPP フレームは、PPP フレームのアドレスフィールド領域に表 5-1 に示す WLPPP 情報の記述を行う。W-TA は WLPPP フレームのアドレスフィールドを WLPPP の情報から PPP フレームで設定されている 0xff に置換し、WLPPP フレームから PPP フレームへ変換を行う。

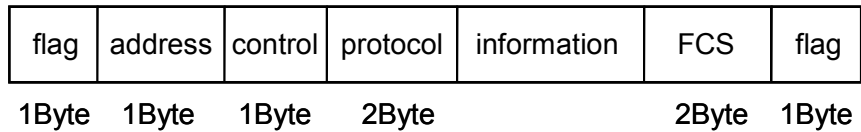


図 5-2 WLPPP フレーム構成

表 5-1 WLPPP 情報

| | |
|------------------|----------|
| Control command | 00010000 |
| AT command (Dch) | 00000000 |
| Dch data | 00100xxx |
| AT command (Bch) | 00001000 |
| Bch data | 00101xxx |

5. 2. 4. システム構成

図 5-3 にワイヤレス A0/DI システムの構成を示す。図 5-3 に示すように、Data Terminal Equipment (DTE) と A0/DI 対応 W-TA 間（以後、無線区間とする）は PHS を用いた無線通信である。無線区間は PHS のデータリンクプロトコルである PIAFS で接続され、高品質なデータ伝送が行われる。1 無線回線上のデータを ISDN 回線の Dch 及び Bch へ振り分けるために、WLPPP によるデータフレームの制御を行う。一方、A0/DI 対応 W-TA から Dial-up Router 間（以後、有線区間とする）は ISDN 回線を用いた有線通信となる。ユーザが利用する DTE では、ワイヤレス A0/DI 対応のミドルウェアが実行され、本ミドルウェアがワイヤレス A0/DI の制御を行う。

図 5-3 において、通信時のデータが無い時、無線区間は仮想リンク状態であり、無線回線は切断されている。一方、有線区間は Dch パケット交換により論理リンクが保持された状態である。次に少量のトラヒックが発生した時、有線区間は Dch パケット交換でデータ通信を行う。この時、無線区間は、PHS を利用したデータ通信を行う。通信時のトラヒック量が多い時は、無線区間は通信時のトラヒック量が少ない時と同様に PHS を利用したデータ通信を行う。有線区間は Bch 回線交換を用いた 64kbps でデータ通信を行う。そして、通信時のトラヒック量が非常に多い場合、無線区間は 64k 対応の PHS 端末(PS)を 2 台利用し、高速なデータ通信を行う。有線区間は 2 本の Bch 回線交換を束ねることでマルチリンク伝送を行う。図 5-4 は、仮想リンク状態から Dch のパケット通信に状態遷移する際の接続手順である。図 5-4 において、ミドルウェアは、データの発生を検知すると無線回線を確認するための発呼を行う。次に、無線区間において PIAFS を用いたデータリンク上で WLPPP を用いた無線区間の通信路が設定され、Dch のパケット交換を利用した通信が実施される。図 5-5 は、トラヒックの増加により、新たに 64kbps の PHS 端末が一台追加される場合の接続手順である。図 5-5 でミドルウェアは、トラヒックの増加を検知した後、新たな回線の追加を要求する。ミドルウェアは、回線設定要求に対する応答を得た後、2 台目の PHS 端末を利用してダイヤルアップルータへ接続を行う。その際に、有線系で 2 本目の Bch を利

用した回線が確立される。その後、無線系でPIAFSを用いたデータリンクが設定され、WLPPPを用いた2本目の無線区間の通信路が確立される。これにより、Bchを2回線利用したマルチリンク通信が行われる。

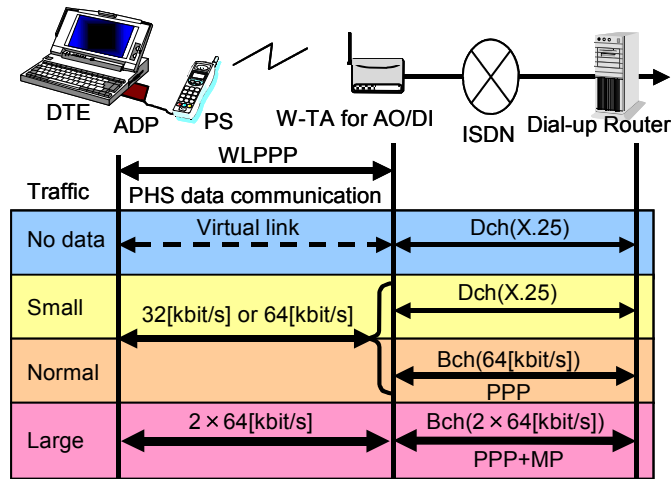


図 5-3 ワイヤレス AO/DI システム構成

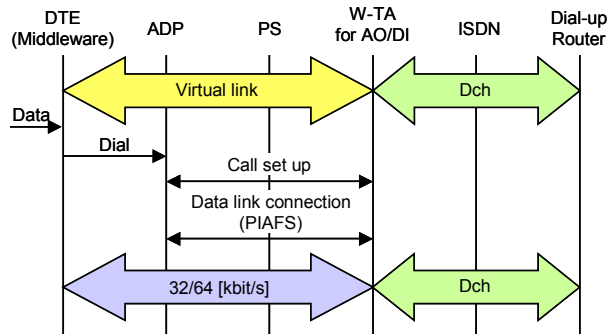


図 5-4 仮想リンク状態から無線回線確立の接続手順

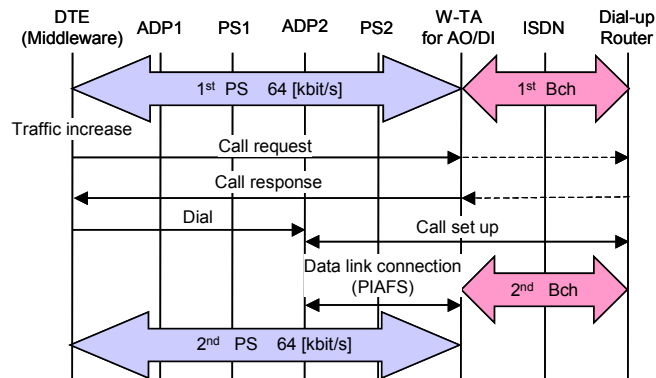


図 5-5 マルチリンク確立の接続手順

5. 2. 5. 性能評価

シミュレーションモデルを図 5-6 に示す。図 5-6 において、端末局はワイヤレス A0/DI 対応の基地局と PHS で通信を行う。端末局は、音声端末とデータ通信を行うデータ端末の 2 種類が存在するものとする。本モデルにおいてデータ端末は以下のパラメータ設定でワイヤレス A0/DI の切り替え量に基づき回線の切り替えを行う。トラヒック量が増加した場合に発生する Dch のパケット交換から Bch の回線交換への切り替えは、Dch の伝送速度の 80%以上のトラヒック量が連続 10 回観測された時に実施される。一方、トラヒックが減少した場合の状態遷移である Bch の回線交換から Dch のパケット交換への切り替えは、Bch の伝送速度の 30 %未満の値が連続 10 回観測された時に実施される。Dch のパケット交換と Bch の回線交換との状態遷移が頻繁に生じることを防ぐために、連続 10 回観測された場合のみ切り替えが実施されるものとした。データ通信端末の利用アプリケーションとして、ウェブブラウジングである WWW と E-mail を想定し、それぞれのトラヒックのモデル化を行う。本評価では、端末局の移動は考慮しないものとし、全ての端末はエラーフリーとし、29.2kbps のデータ通信ができるものとする。尚、通信リンク確立に要する時間は考慮しないものとする。

・ 音声

呼の生起・終了はポアソン過程に従うものとする。平均保留時間は 120 秒、平均待ち時間は 10 分とする。

・ WWW

トラヒックモデルとして ON/OFF モデルを適用する。また、WWW のトラヒック特性は自己相性を示すことが報告されているため[5-7]～[5-11]，WWW でアクセスするドキュメントサイズは対数正規分布に従うものとする。また、OFF 区間長は Pareto 分布に従うものとし[5-7]，ドキュメントサイズの平均値は[5-9]，[5-10]より，11.2KByte とする。

対数生起分布 $F(x)$ ，Pareto 分布 $G(x)$ の分布関数は、それぞれ式(5-1)，式(5-2)となる。式(5-1)において、 σ は確率変数 y の対数をとった値の標準偏差、 μ は確率変数 y の対数をとった値の平均値をそれぞれ表している。式(5-2)において、 k は確率密度関数のピーク値を決定し、 α は分布の広がりを決定する。

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma y} \exp\left[-\frac{(\log y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dy \quad (5-1)$$

$$G(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha, \quad x \geq k \quad (5-2)$$

・ E-mail

E-mailはトランザクション処理形のアプリケーションである。データ端末のE-mailアプリケーションは、一定時間毎にメールサーバにアクセスし、メールの送受信を行うことからトラヒックモデルをON/OFFモデルとし、OFF区間の時間は一定時間とする。

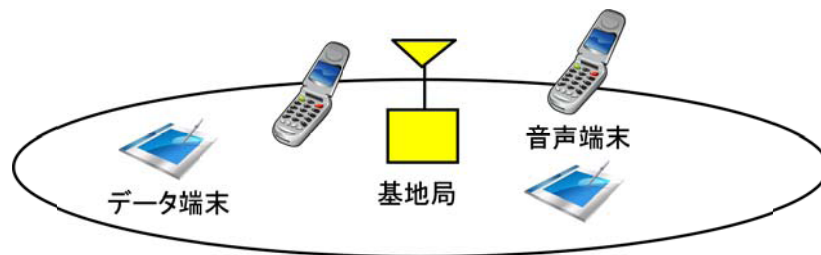


図 5-6 シミュレーションモデル

WWWを利用した際の無線回線占有率の特性を図5-7に示す。図5-7において、縦軸は無線回線占有率、横軸はPareto分布の k ファクタを示している。無線回線占有率は観測時間内で無線チャネルが占有される時間の割合を示している。一方、横軸において k ファクタ値が大きくなる程OFF区間の時間が長くなる。図中における仮想リンク状態監視タイマ値は、データの伝送が無くなった際に、仮想リンク状態へ遷移するまでの時間である。評価結果より、ワイヤレスA0/DIを適用することで無線回線占有率を60%以上低減できることがわかる。特に、データの発生間隔が疎となる程、無線回線声優率の低減効果が大きくなる。これは、ワイヤレスA0/DIを適用することで、通信時のデータ量に基づき無線回線の追加と解放が適応的、且つ適切に行われたためである。

図5-8にE-mailを利用した際の無線回線占有率特性を示す。図5-8で、横軸はOFF区間の長さとし、縦軸は無線回線占有率である。E-mailを利用している場合もWWWアプリケーションと同様に無線回線占有率を大幅に低減できることがわかる。しかしながら、OFF間隔が短い60秒の場合、全ての仮想リンク監視タイマ値において無線回線占有率が1となっている。これは、仮想リンク監視タイマの設定がデータの発生間隔に比べ、長く設定されているためである。つまり、提案方式を用いた効率的な周波数利用を行うためには、トラヒックモデル毎の適切な仮想リンク監視タイマの設定が必要となる。

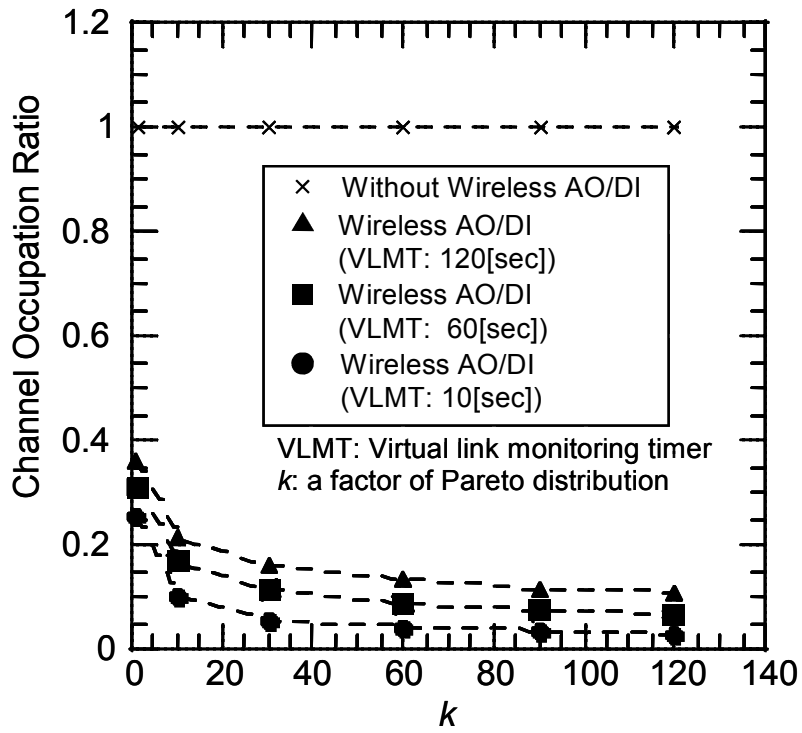


図 5-7 WWW 利用時の無線回線占有率特性

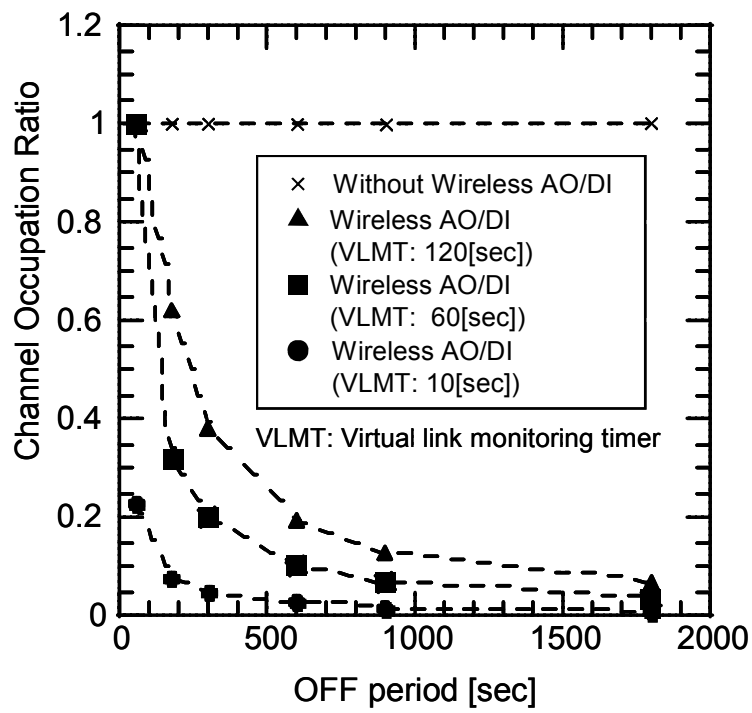


図 5-8 E-mail 利用時の無線回線占有率特性

図 5-7 と図 5-8 の結果から、無線回線占有率 α とデータ発生間隔 Tb 、通信時間 Td 、仮想リンク監視タイマ Tv は以下の関係が成り立つ。

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (Td + Tv \geq Tb) \\ (Td + Tv) / Tb & (Td + Tv < Tb) \end{cases} \quad (5-3)$$

式 5-3 を用い、トラフィックモデルに応じたワイヤレス A0/DI システムのパラメータ設定を行うことで無線回線占有率を低減することができる。

図 5-9 に複数のユーザが WWW を利用しているモデルにおける呼損率特性を示す。全ユーザの無線端末は 4 つの無線チャネルを共用するものとする。同図において、縦軸は呼損率、横軸はユーザ数をそれぞれ示す。呼損率の定義を式(5-4)に示す。

$$\text{呼損率} = \text{総呼損数} / \text{総呼発生数} \quad (5-4)$$

図 5-9 において、無線チャネルは 4 チャネル存在するため、ワイヤレス A0/DI を適用しない場合は 4 人のユーザが同時に通信することができる。図 5-9 より、仮想リンク状態監視タイマ値が 120 秒、60 秒の時の呼損率 3% におけるユーザ数は、それぞれ 11 人、15 人であることが分かる。さらに、仮想リンク状態監視タイマ値を 0 とした場合、呼損率 3% における収容ユーザ数は約 40 人であることが分かる。これらの結果から、1 ユーザによる無線回線の独占を防ぐことで、周波数あたりの収容ユーザ数の向上を図っていることがわかる。つまり、ワイヤレス A0/DI を適用することで、システムの収容ユーザ数を増加することができる。

図 5-10 に音声端末とデータ端末混在時のユーザ数と呼損率の関係を示す。横軸はユーザ数、縦軸は呼損率である。図 5-10 において、音声端末とデータ端末の存在比を 4:1 と 3:2 として評価を行った。音声端末とデータ端末の存在比が 4:1 の場合に比べ 3:2 の時に、ワイヤレス A0/DI を適用時の呼損率が劣化しているが、これは音声呼の発生間隔がデータ呼に比べて短いためである。この結果より、データと音声端末が混在する場合もワイヤレス A0/DI は収容ユーザ数の増加に有効であることがわかる。

図 5-9 と同一のモデルで再発呼を考慮した呼損率とブロック率の関係を図 5-11 に示す。さらに、同一モデルで呼損率と平均遅延時間の関係を評価した結果を図 5-12 に示す。この時、仮想リンク状態監視タイマ値は 60 秒に設定した。図 5-11 において、ブロック率は、再発呼のリトライ回数内に成功しなかった呼の総和を再発呼数は除外した呼の総和で割った値と定義する。また、図 5-12 において、平均遅延時間は、呼が成功になるまでに要した時間の総和を成功した呼の総和で割った値と定義する。再発呼の最大繰り返し回数をリトライ回数、再発呼を行うまでの時間をリトライタイマとしてパラメータ設定を行い、リトライ回数が 1 回、2 回、3 回、リトライタイマが 15 秒、30 秒と設定した場合について評価を行った。図 5-9、図 5-10 は再発呼を考慮して

いないので、図 5-11, 図 5-12 におけるリトライ回数が 0 回の時の評価結果と同等となる。図 5-11, より、呼損率が 3% の際もブロック率は最大約 1% (リトライ回数 1 回, リトライタイマ 15 秒) 程度であることが分かる。さらに、図 5-12 より、平均遅延時間は最大約 1 秒 (リトライ回数 3 回, リトライタイマ 30 秒) 程度であることがわかる。ブロック率を低減させると平均遅延時間は大きくなるトレードオフの関係にあるため、再発呼を用いることで呼が成功となるまでの所要時間は長くなってしまいが、発生した呼が強制終了となる確率を低減することができる。

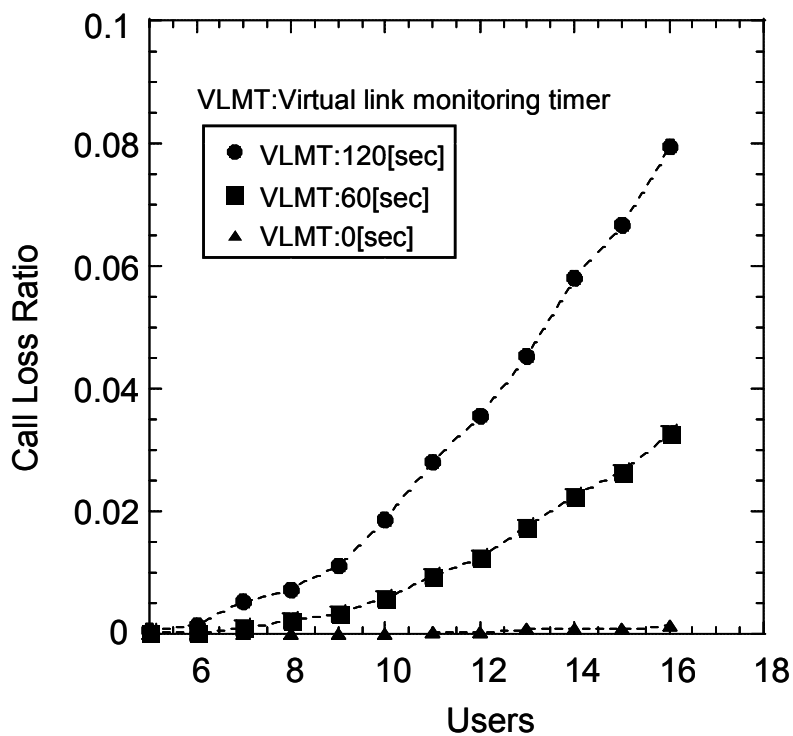


図 5-9 ユーザ数と呼損率の関係

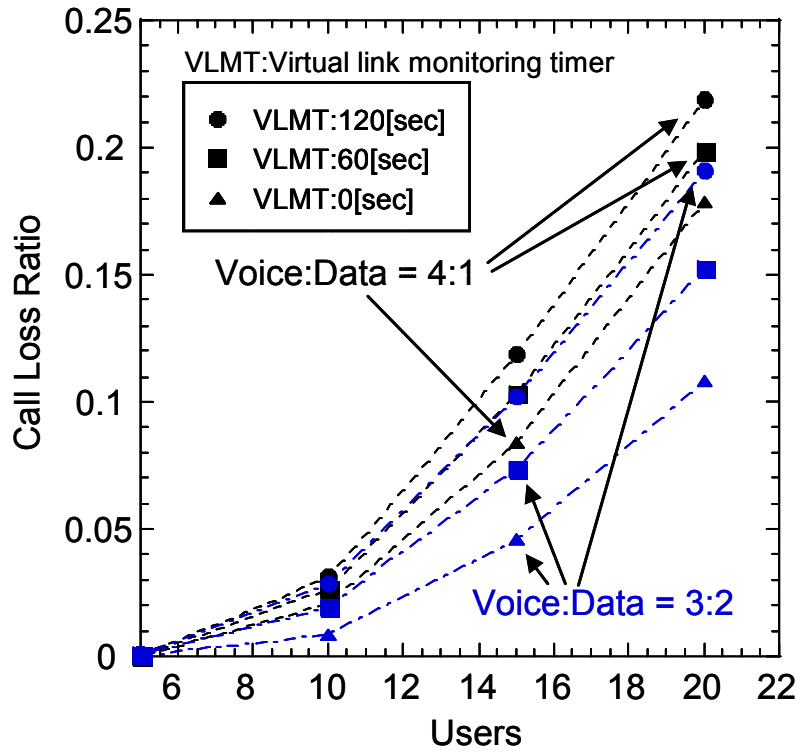


図 5-10 音声端末とデータ端末混在時のユーザ数と呼損率の関係

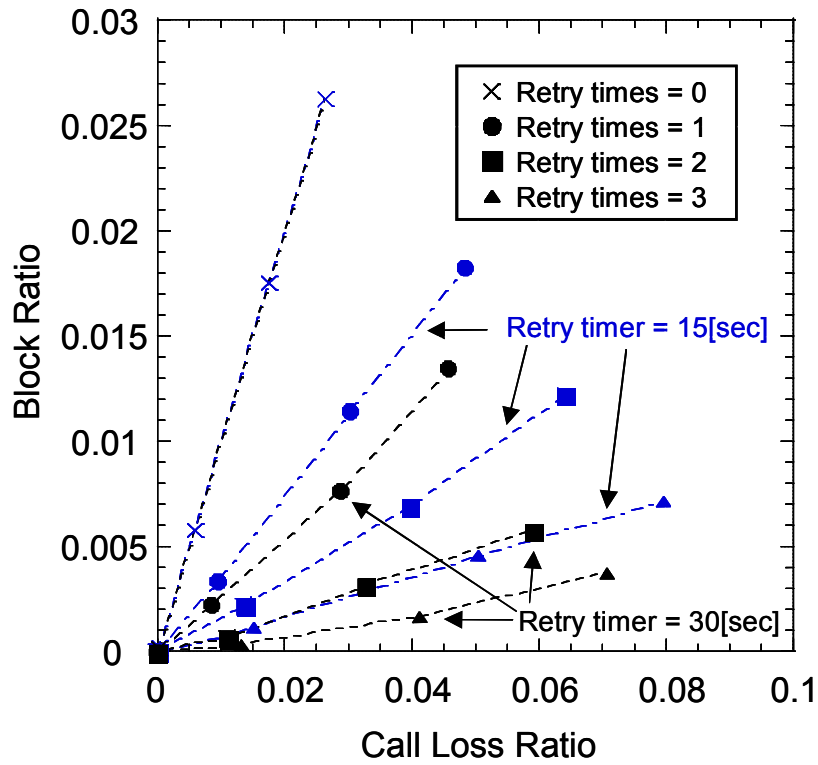


図 5-11 呼損率とブロック率の関係

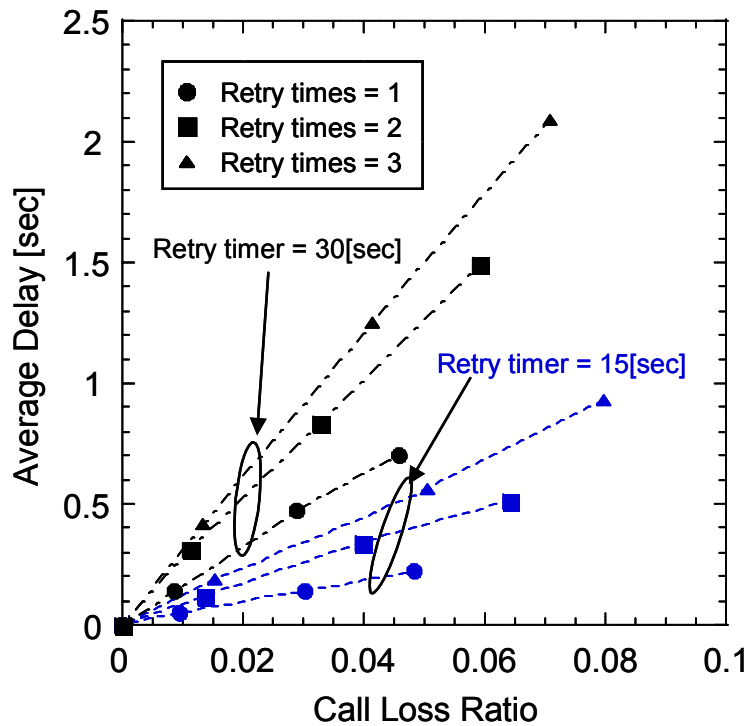


図 5-12 呼損率と平均遅延時間の関係

5. 2. 6. 結び

既存の PHS の機器を利用し、無線回線を含んだシステムに関して A0/DI の概念を実現するワイヤレス A0/DI システムを提案し、シミュレーションによる性能評価を行った。計算機シミュレーションにより、無線回線占有率と呼損率に対する本方式の特性評価を行った。その結果、従来方式である回線交換型データ通信に比べ無線回線占有率を大幅に低減できることを明らかにした。つまり、ワイヤレス A0/DI システムを利用することで、回線交換に比べ、周波数あたりの収容ユーザ数の増加が可能であり、回線交換型の無線通信システムにおいても使用されているトラヒック量を認識することで、常時接続サービスと帯域保証サービスを両立させる無線リソース制御を行うことが可能となる。また、無線リソースを効率的に利用するためには、トラヒックモデルに応じたワイヤレス A0/DI のパラメータ設定が必要であることも併せて明らかにした。

5. 3. ユーザ行動特徴に基づいたセル再選択方法

5. 3. 1. 研究背景

スマートフォンの普及に伴い、アプリケーションやコンテンツのリッチ化によるモバイルトラフィックが急増しており、今後10年で100倍から1000倍になると予想されている[5-12]。急増するトラフィックを収容するために、周波数利用効率を向上させる技術としてMU-MIMO(Multiuser-Multi Input Multi Output)技術の研究が進められている[5-13][5-14]。セルラシステムにおいては、MU-MIMO技術を用いたLTE(Long time evolution)の商用サービスが行われており、さらなる高速化に向け、1Gbit/sの伝送速度を実現するLTE advanced技術の標準化が3GPPで行われている[5-15]-[5-19]。

システム自体の大容量化や高速化はMIMO技術等の空間多重技術や多値変調方式における多値数増加等で取り組まれているが、爆発的な増加が予想されるトラフィックを収容するためには更なる周波数利用効率の向上が必要となる。更なる周波数利用効率の向上に向け、3GPPでは、マクロセル、スモールセルとピコセル等を組み合わせたHetNet(Heterogeneous Network)技術やSON(Self organizing network)技術等が検討されている[5-16][5-20][5-21]。

SON技術の1つである基地局間負荷分散技術は、ユーザの利用状況によって特定のセルに集中するモバイルトラフィックを周辺セルに分散させることで、周波数を効率的に利用する技術である。各セルにおけるモバイルトラフィック負荷の状況に応じてユーザ端末の接続先、或いは待受け先を変更する方法として、ハンドオーバーを行う方法とセル再選択を行う方法の2つが検討されている。ハンドオーバー方法を用いることで基地局間負荷分散を実現する方法として、[5-22]-[5-25]が報告されている。モバイルトラフィックの負荷分散を目的に、基地局(セル)間におけるハンドオーバー方法のパラメータ設計を行った場合、安定した通信を継続させるといったハンドオーバー技術の本来の趣旨と矛盾が生じる場合がある。その場合、PingPong現象が発生する等の通信品質の劣化が生じる。そこで、基地局間のハンドオーバー方法だけではなく、[5-26]-[5-29]では、ユーザ端末が待受け時に、混雑状況に応じて待受け先の基地局を変更するセル再選択方法について検討を行っている。

モバイルセルラネットワークのネットワークリソースを効率的に利用する上で、ユーザ行動を考慮することは重要である。特に、ハンドオーバー技術においては、通信を安定して継続させるためにユーザの行動に関する情報を利用することが検討されているだけではなく、基地局間負荷分散を目的としてこれらの情報の利用が検討されている[5-30][5-31]。しかしながら、セル再選択方法におけるユーザ行動特徴を利用した検討はこれまで行われていない。セル再選択はユーザ端末の待受け状態中に行われるため、例えば、ユーザ端末の静止状態が継続する、或いは、ユーザ端末の移動状態が継続する等のユーザ端末の行動特徴を利用することで、ユーザの状況に応じて適切な基地局を再選択することが可能となる。これにより、ユーザ端末単位での詳細な制御が可能となるため、基地局間負荷分散による周波数の有効利用が実現されるだけでなく、ユーザ間の公平性の向上が期待できる。本節では、無線ネットワークリソースの柔軟かつ高効率な利用を目指し、トラフィック量やユーザの行動特徴等といった認識対象を拡張する。これらに基づいた無

線ネットワークリソース制御としてユーザ行動特徴に基づいたセル再選択方法を提案し、その有効性を示す。

5. 3. 2. 基地局間負荷分散

LTEにおける通信状態と待受け状態の状態遷移図を図5-13に示す。図5-13で、新規トラフィックが発生すると、ユーザ端末は通信状態に遷移し、上りリンクの同期処理が基地局と行われる。基地局と同期処理が終わると、基地局のスケジューリングに従って通信が開始される。ユーザ端末は通信が完了すると基地局との上りリンクの同期を解除し、再び待受け状態となる。状態遷移の不要な発生を防止するために、待受け状態への遷移は、送信バッファが空き状態となった後にカウントされる Dormant タイマが満了後に行われる。この時、Dormant タイマが満了する前に新たなトラフィックが発生した場合、待受け状態への状態遷移は発生せず、ユーザ端末は通信状態のままである。ユーザ端末が通信状態の時に通信の安定的な継続、或いは基地局間の負荷分散を目的に、基地局（或いはセル）の切り替えを行う場合はハンドオーバーとなり、ユーザ端末が待受け状態の時に基地局（或いはセル）の切り替えを行う場合はセル再選択となる。

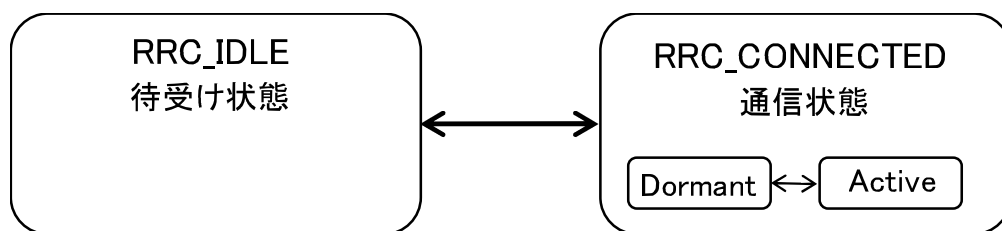


図 5-13 ユーザ端末の状態遷移

・ハンドオーバー方法

ハンドオーバー処理は次に示す手順で実施される。ユーザ端末は、各セルの下りリンクの参照信号強度（Reference Signal Received Power: RSRP）を定期的に測定し、式(5-5)の判定を行う。式(5-5)の条件が、一定期間（Time to Trigger:TTT）以上継続して満たされた場合、ユーザ端末は、Measurement Report (MR)を接続している基地局に送信し、ハンドオーバー処理を開始する。

$$M_j + HO_Offset_{i,j} > M_i \quad (5-5)$$

式(5-5)で M_i はサービングセル（Cell #i）の受信電力強度、 M_j は隣接セル（Cell #j）の受信電力強度、 $HO_Offset_{i,j}$ は Cell #i と Cell #j 間に固有に設定されるオフセット値（Cell Individual Offset : CIO）をそれぞれ表している。

上記ハンドオーバー処理はユーザ端末の安定した通信を継続するために通常行われるが、ハンドオーバー閾値を変更することで、基地局間のモバイルトラフィック負荷を分散させ、周波数の効率的な利用が可能となる。図5-14にハンドオーバーを用いた負荷分散例を示す。図5-14はある特定の

セル Cell 1 に多くのユーザ端末が集中し、周辺のセル Cell 2 のモバイルトラフィック負荷が低い場合、式(5-5)の $H0_Offset_{1,2}$ を大きく設定し、Cell 1 から Cell 2 へのハンドオーバー契機を早める。一方、 $H0_Offset_{2,1}$ の値は小さく設定し、Cell 2 から Cell 1 へのハンドオーバー契機を遅くすることで、Cell 2 から Cell 1 へのユーザ端末の流入を防ぐ。これにより、基地局間負荷分散が実現される。しかしながら、ハンドオーバーを利用した基地局間の負荷分散は、安定した通信を継続的に行っているユーザ端末が負荷分散のためにハンドオーバー対象となる場合もあり、ハンドオーバー失敗や PingPong 現象による通信品質劣化を引き起こす可能性がある。

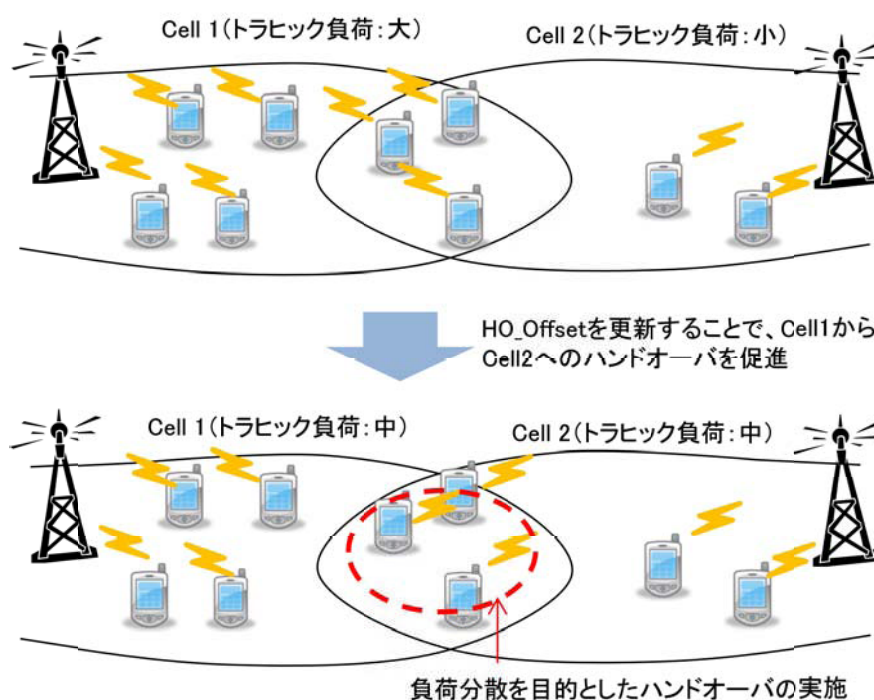


図 5-14 ハンドオーバー方法による負荷分散

・セル再選択方法

ある特定のセル Cell #i にユーザ端末が集中し、周辺セルのモバイルトラフィック負荷が低い場合、セル Cell #i で待受け中であるユーザ端末を以下の手順でセル再選択させることで基地局間負荷分散を実現する[5-26]-[5-29]。セル Cell #i を待受セルとするユーザ端末が、待受状態で 1 秒以上滞在する、かつ、以下の式(5-6)が一定期間 (Treselction_RAT) 継続する場合、ユーザ端末はセル Cell #j を再選択し、待受けセルの変更を行う。

$$M_j + CR_Offset_{i,j} > M_i \quad (5-6)$$

式(5-6)において、 $CR_Offset_{i,j}$ はセル Cell #i とセル Cell #j 間で設定される固有のオフセット値である。通常の通信の安定的な継続を重視した無線通信システムの運用においては、ハンド

オーバ処理の契機とセル再選択処理の契機の条件を揃えることが一般的であるため、 $H0_Offset_{i,j}$ 値と $CR_Offset_{i,j}$ 値は等しい値に設定される。しかし、基地局間負荷分散を行う場合、 $CR_Offset_{i,j}$ 値を $H0_Offset_{i,j}$ 値より大きく設定することで、ハンドオーバによる基地局(セル)の切り替えを発生させることなく、ユーザ端末が通信状態から待受状態に遷移した際に、Cell #i から Cell #j へのセル再選択が行われ、基地局間負荷分散が実現される。図 5-15 はセル再選択によるトラヒックの負荷分散例である。図 5-15 は、 $CR_Offset_{i,j}$ を設定することで、トラヒック負荷の高い Cell 1 を待受セルとするユーザ端末がトラヒック負荷の低い Cell 2 を再選択する様子を示している。

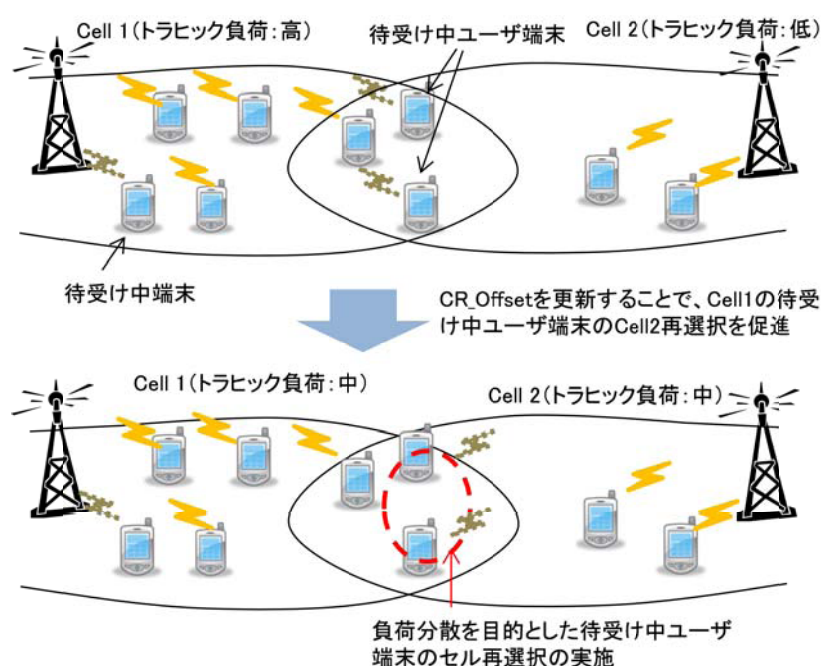


図 5-15 セル再選択方法による負荷分散

5. 3. 3. ユーザ行動特徴を考慮したセル再選択方法

5.3.2 で示した従来のセル再選択法は各セルの混雑状況に基づきセル再選択を行う。筆者らは、更なる周波数の有効利用を目指すと共にユーザ間の公平性を向上させることを目的として、ユーザの行動特徴も考慮したセル再選択方法を提案する。図 5-16 は、あるユーザの一日の行動の一例を示したものである。図 5-16 において、ユーザは朝起床し、電車で学校に移動し、学校で授業を受講する。その後、スーパーマーケットでアルバイトを行い、夜帰宅する。帰宅途中においては、カフェで夕食をとりながらネットサーフィン等を行う。このようにユーザの行動は、ある程度の規則性を持って日々繰り返されるため、行動に関する情報を取得し、ライフログ化することでユーザの行動特徴を予測することが可能となる。ユーザの行動予測として、[5-30]では、ユーザの移動した軌跡を位置情報のログデータとして蓄積することで、ユーザの行動特徴の推定を

試みると共に、自動車、電車、徒歩等の移動手段の判定や移動中、或いは滞在中といったユーザ状態の判定についても検討が行われている。さらに、[5-31][5-32]では、ユーザの行動予測を考慮したハンドオーバーアルゴリズムの提案が行われている。本方式では、図 5-17 に示す、ユーザの位置情報、移動情報や通信履歴情報等からなるユーザの行動情報をユーザ管理サーバで管理し、ユーザ行動特徴として利用する。

ユーザの行動特徴を考慮したセル再選択方法として、セル再選択時に、ユーザの行動特徴から、移動ユーザ端末と静止ユーザ端末を区別した制御を行う。移動ユーザ端末は移動することで、混雑セル以外のセルで待受け状態となることが可能であり、使用可能な無線リソースの増加が期待できる。一方、静止ユーザ端末はトラヒック負荷の大きいセルで静止し続けるため、無線リソースの利用はあまり期待できない。つまり、移動ユーザ端末の潜在的な通信路容量は静止ユーザ端末に比べて高いと仮定できる。そこで、静止ユーザ端末と移動ユーザ端末の公平性を保ちつつ、負荷分散による周波数有効利用を図るために、移動ユーザ端末がセル再選択を行う際の行動特徴オフセット値として $CR_offsetForMovingUE$ を式(5-6)に新たに追加する。これにより、移動ユーザ端末の行動特徴とセルの混雑状況に基づいたセル再選択を行う。従来のセル再選択方法と同様に、Cell #i を待受けセルとするユーザ端末が、待受け状態で1秒以上滞在し、かつ、以下の式(5-7)～(5-9)が一定時間 (Treselction_RAT) 継続する場合、ユーザ端末はセル Cell #j を再選択し、待受けセルを変更する。

i) トラヒック負荷が大きいセル (Cell #i) からトラヒック負荷が小さいセル(Cell #j)へユーザ端末が移動する場合

$$M_j + CR_Offset_{i_j} + CR_offsetForMovingUE > M_i \quad (5-7)$$

ii) トラヒック負荷が小さいセル(Cell #j)からトラヒック負荷が大きいセル(Cell #i)へユーザ端末が移動する場合

$$M_i + CR_Offset_{j_i} - CR_offsetForMovingUE > M_j \quad (5-8)$$

iii) トラヒック負荷の等しいセル間(Cell#j, Cell#k)でユーザ端末が移動する場合

$$M_j + CR_Offset_{k_j} > M_k \quad (5-9)$$

式(5-7)から(5-9)における $CR_Offset_{i_j}$, $CR_Offset_{j_i}$, $CR_Offset_{k_j}$ は式(5-6)と同様に各セル間の固有のオフセット値である。

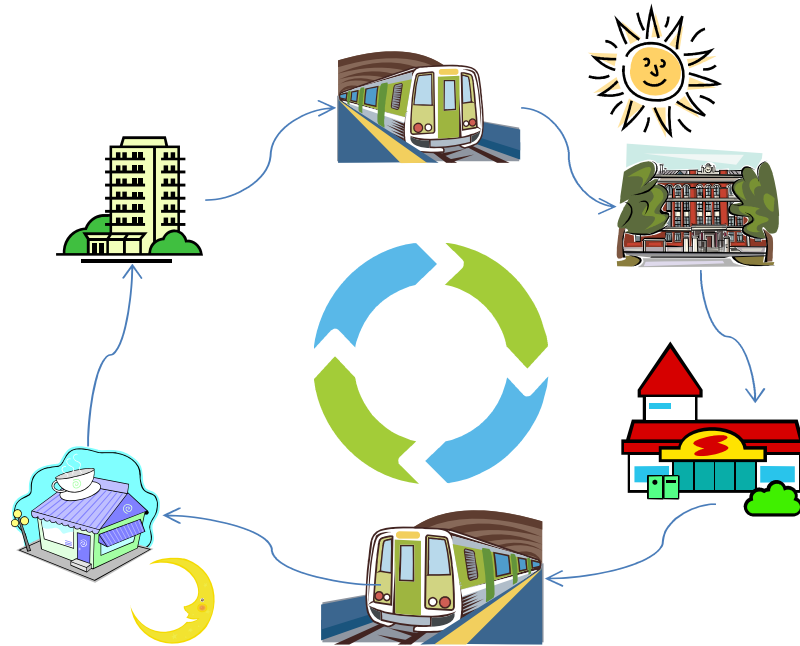


図 5-16 ユーザの行動パターンの一例

| 時刻 | 緯度 | 経度 | 移動速度 | 通信確率 |
|-----------|-----------|------------|-------|------|
| 16時20分10秒 | 35.691638 | 139.704616 | 4km/h | 0.01 |
| 16時20分20秒 | 35.690000 | 139.703511 | 4km/h | 0.01 |
| 16時20分30秒 | 35.685000 | 139.703400 | 0km/h | 0.5 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

図 5-17 ユーザの行動情報の一例

5. 3. 3. 性能評価

ユーザの行動特徴を考慮したセル再選択方法による基地局間負荷分散の効果を明らかにするために、各セルにおける待受け中のユーザ端末数、リソース要求率と総通信路容量について評価を行う。さらに、ユーザ間の公平性に関する提案方式の効果を明らかにするために、下位 5%, 25%番目ユーザの通信路容量の評価を行う。さらに、混雑セルにおける静止ユーザと移動ユーザの総通信路容量の評価を行う。本シミュレーション評価における通信路容量はシャノンの定理に基づき算出した。

図 5-18 において、セルの形状を正六角形とし、7セル配置モデルで基地局間負荷分散について評価を行う。隣接セルとの間隔は 500m とし、各セルは異なる周波数を利用するものとする。表 5-2 にシミュレーション条件を示す。ユーザ端末の受信レベルはパスロス、シャドウイング、及びフェージングで変動し、それぞれは表 5-2 に基づくものとする。ユーザ端末は GPS を所持し、

ユーザの位置情報を測位する。ユーザ端末は、測位結果をユーザ管理サーバに通知し、ユーザ管理サーバは取得したユーザの位置情報と時刻からユーザの移動情報を生成するものとする。基地局負荷監視サーバは各セルの負荷状況を把握すると共に、本シミュレーションでは、ユーザ管理サーバから各ユーザの移動、或いは静止情報を1秒毎に取得し、その情報に基づき各ユーザのセル再選択パラメータの設定を行う。本評価では、中心セル(Cell 1)を高負荷セルとし、周辺の6セルは低負荷セルとする。中心セルには、行動特徴として静止していると判定された静止ユーザ端末が80局、移動ユーザ端末が20局一様に分布するものとする。本評価では、ユーザの移動速度が0km/hであるものを静止ユーザ端末とし、それ以外を移動ユーザ端末とした。周辺の低負荷セルには、静止ユーザ端末は存在せず、移動ユーザ端末がそれぞれ20局一様に分布しているものとする。静止ユーザ端末は式(5-6)、移動ユーザ端末は式(5-7)から(5-9)の条件式に基づきそれぞれセル再選択を行う。

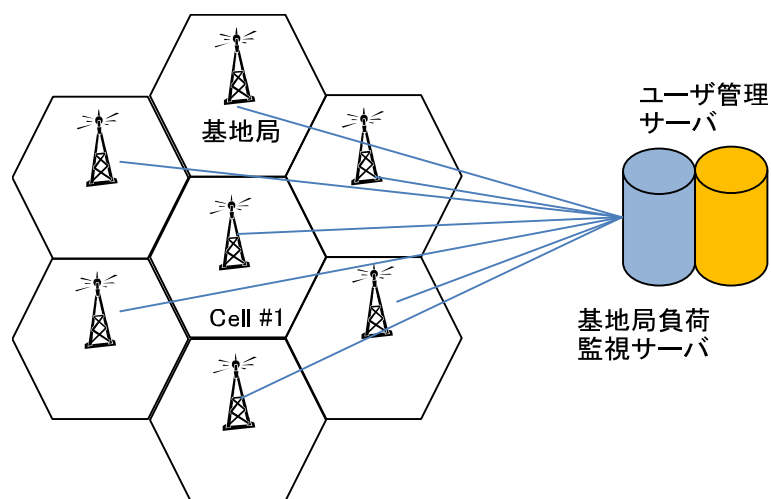


図 5-18 評価モデル

表 5-2 シミュレーション条件

| | |
|------------|---|
| セル配置モデル | Regular Hexagon, 7 Cell, ISD(Inter-Site Distance)=500m |
| 静止ユーザ端末 | 80 in Center Cell(Cell#1), Uniform Distribution |
| 移動ユーザ端末 | 20UE/cell, Uniform Distribution |
| 周波数 | 900MHz (System Bandwidth:10MHz) |
| 基地局の送信電力 | 43dBm(20W) |
| パスロス | $I+37.6\log_{10}(d/1000)$ [dB] ※ $I=120.9$ when 900MHz |
| シャドウイング | Log Normal Shadowing, Standard Deviation:8[dB] |
| フェージング | Typical Urban 6 Path |
| 移動ユーザ端末の移動 | Random Walk, 3[km/h] |
| セル再選択 | $CR_Offset_{x,y} = 0$ [dB] |
| | $CR_Offset_{x,y} = 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18$ [dB] |
| | $CR_Offset_{x,l} = 0, -3, -6, -9, -12, -15, -18$ [dB] |
| | $CRoffsetForMovingUE = 4, 8, 12$ [dB] |
| | Treselection_RAT (Dormant Timer)=0 [s] |

図 5-19 に各セルにおける待受けユーザ端末数と中心セルから周辺セルへセル再選択を行う際のオフセット値 ($CR_Offset_{x,y}$) の関係を示す。図 5-19 の周辺セルにおける待受けユーザ端末数は、周辺セル 6 セルに存在する待受けユーザ端末数の平均値である。図 5-19 で、 $CR_offsetForMovingUE$ を大きくすることで、移動ユーザ端末の混雑セルから低負荷セルへのセル再選択が多く実行されるため、中心セルにおける待受けユーザ端末数が減少する。また、 $CR_Offset_{x,y}$ を大きくすると、周辺セルを待受けセルとして再選択するユーザ端末が増加するため、提案方式は従来方式に比べ、中心セルのモバイルトラフィック負荷を軽減することができる。

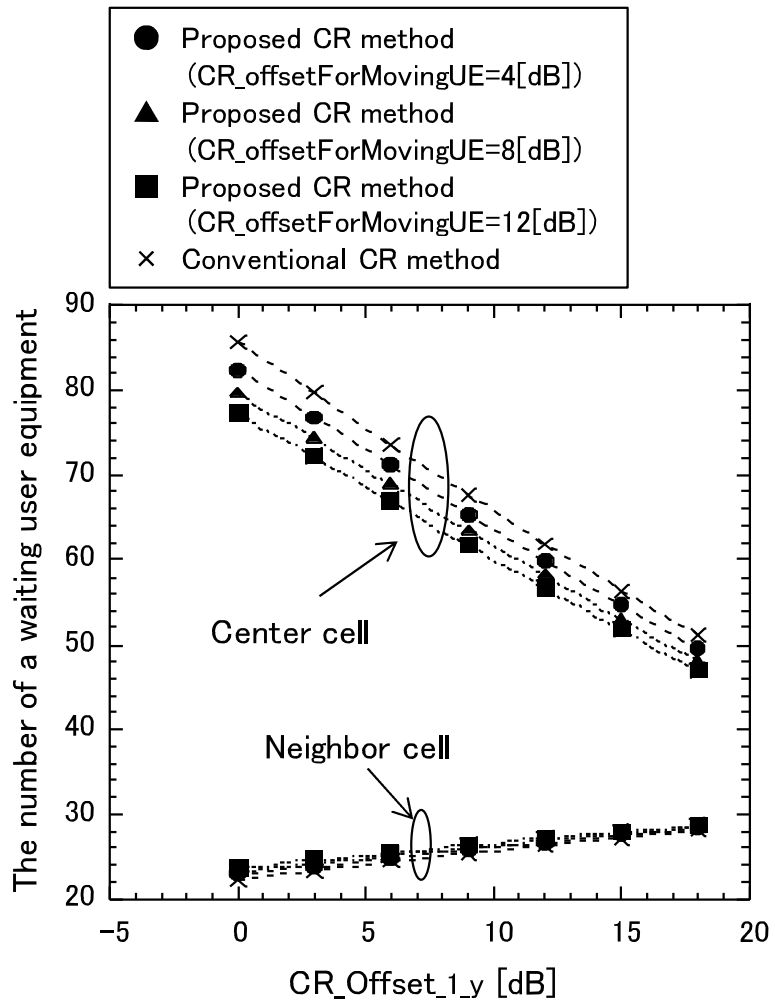


図 5-19 CR_Offset_1_y vs. 待受けユーザ端末数

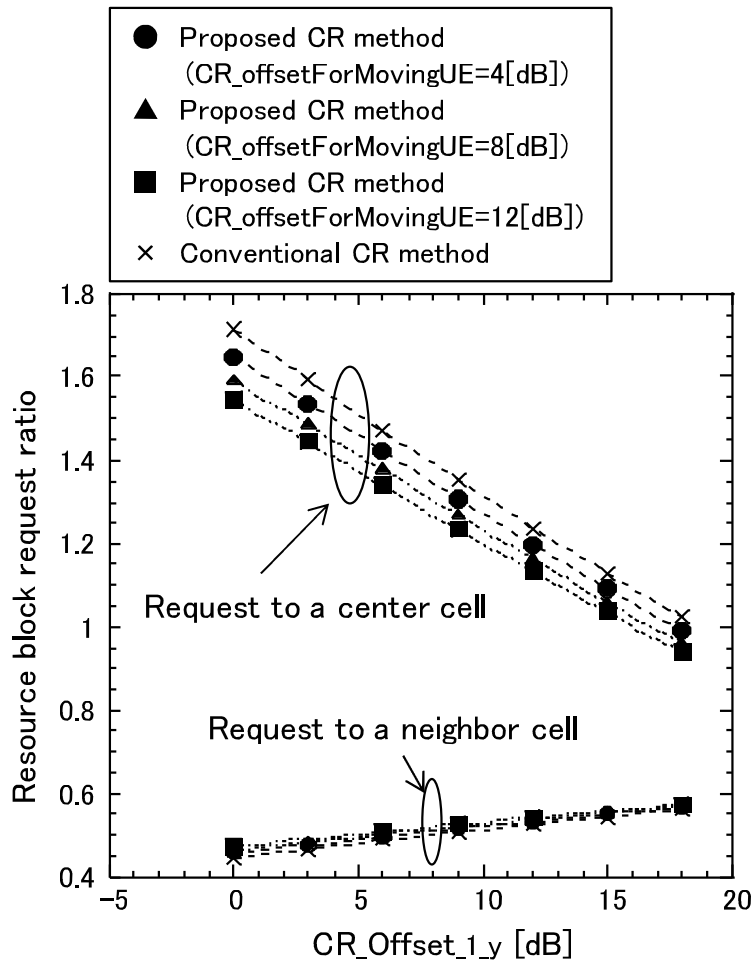


図 5-20 CR_Offset_1_y vs. リソースブロック要求率

図 5-20 にユーザ端末のリソースブロック要求率と CR_Offset_1_y の関係を示す。周辺セルにおけるユーザ端末のリソースブロック要求率は、周辺セル 6 セルに存在するユーザ端末のリソースブロック要求の平均値を示している。リソースブロック要求率が 1 より大きくなると、そのセルにモバイルトラフィック負荷が集中していることになる。図 5-20 において、CR_offsetForMovingUE を大きくすることで、移動ユーザ端末は混雑セルである中心セルから低負荷セルである周辺セルへ待受けセル再選択が多発するため、中心セルのリソースブロック要求率が小さくなる。また、CR_Offset_1_y が大きくなる程、周辺セルを待受けセルとして再選択するユーザが多くなるため、中心セルでのリソースブロック要求率が小さくなっている。図 5-19, 5-20 の結果より、提案方式は従来方式に比べ、中心セルのモバイルトラフィック負荷を低減できていることが分かる。

図 5-21 に総通信路容量と CR_Offset_1_y の関係を示す。図 5-21 において、CR_Offset_1_y=0, CR_offsetForMovingUE=12 の時、提案方式は従来方式に比べ、総通信路容量を 5%向上できることが分かる。CR_Offset_1_y を大きくすると総通信路容量は増加しなくなるが、これは、CR_Offset_1_y

を大きくすることで、受信電力強度が低いセルもモバイルトラフィック負荷分散のために選択される可能性が高くなるためである。

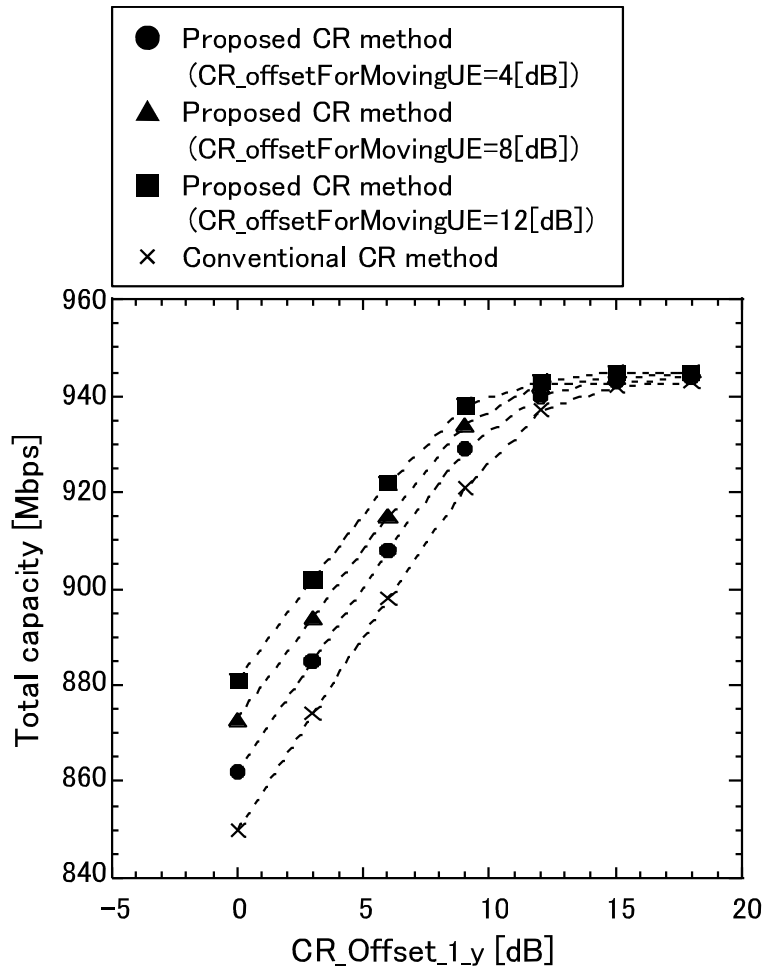


図 5-21 CRoffset_{1-y} vs. 総通信路容量

図 5-22 に下位 5% 番目ユーザの通信路容量と CR_Offset_{1-y} の関係を、図 5-23 に下位 25% 番目ユーザの通信路容量と CR_Offset_{1-y} の関係をそれぞれ示す。図 5-22 より、提案方式を用いることで、従来方式に比べ下位 5% 番目ユーザの通信路容量を CR_Offset_{1-y}=6, CR_offsetForMovingUE=12 の時、約 10 倍改善できることが分かる。これは、提案方式が、移動ユーザをユーザの行動特徴に基づき待受けセルを周辺セルに早急に再選択させるため、中心セルの負荷分散が行われたためである。一方、下位 25% 番目ユーザの通信路容量は、CR_Offset_{1-y}=0, CR_offsetForMovingUE=12 の時、従来方式に比べ改善率が最大となり約 3% となっている。つまり、提案方式を用いることで、下位 25% 番目ユーザまでの通信路容改善が期待できる。図 5-22, 図 5-23 の結果より、提案方式は従来方式に比べユーザ間の公平性を改善することができると言える。

図 5-24 に中心セルにおける移動ユーザ端末と静止ユーザ端末の総通信路容量と $CR_Offset_{1,y}$ の関係を示す。図 5-24 より、提案方式は、従来方式に比べ、移動ユーザ端末の総通信路容量は小さくなっているが、静止ユーザの総通信路容量は逆に大きくなっていることが分かる。中心セルを待受セルとする静止ユーザ端末の通信路容量の増加を促すことが、周辺の低負荷セルを待受セルとする際の通信路容量の増加が大きく見込める移動ユーザ端末との総通信路容量差を小さくすることとなるため、本結果より、移動ユーザ端末と静止ユーザ端末間の公平性が改善されると考察される。

これらの結果より、提案方式であるユーザの行動特徴を考慮したセル再選択方法を用いることで基地局間負荷分散が効率的に実施され、通信路容量を拡大することができる。さらに、ユーザ間の公平性も合わせて改善することができる。

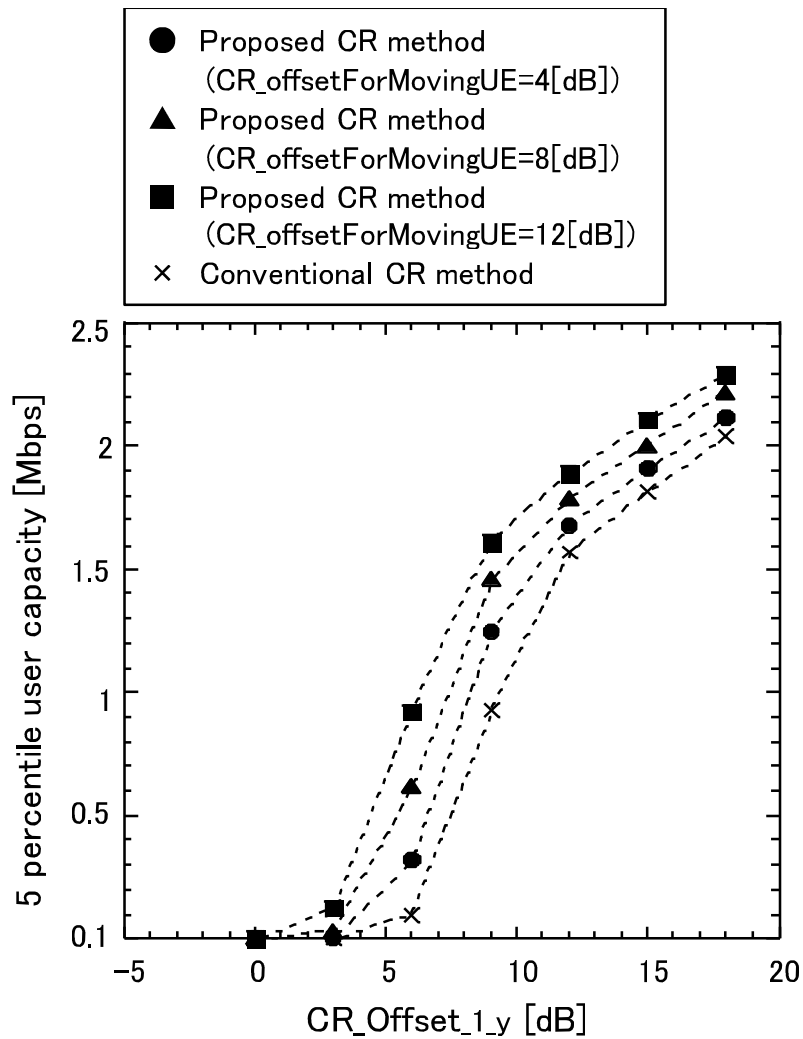


図 5-22 $CR_Offset_{1,y}$ vs. 下位 5% 番目のユーザ通信路容量

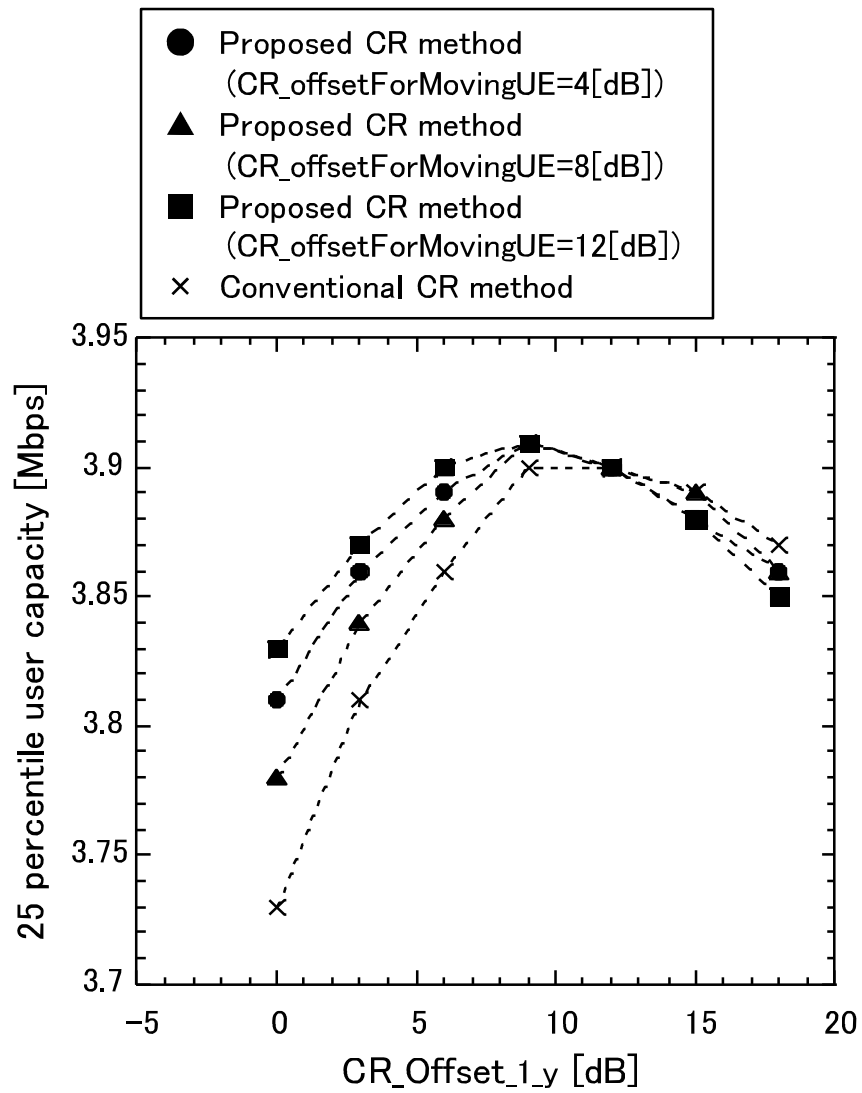


図 5-23 CRoffset_{1,y} vs. 下位 25% 番目のユーザ通信路容量

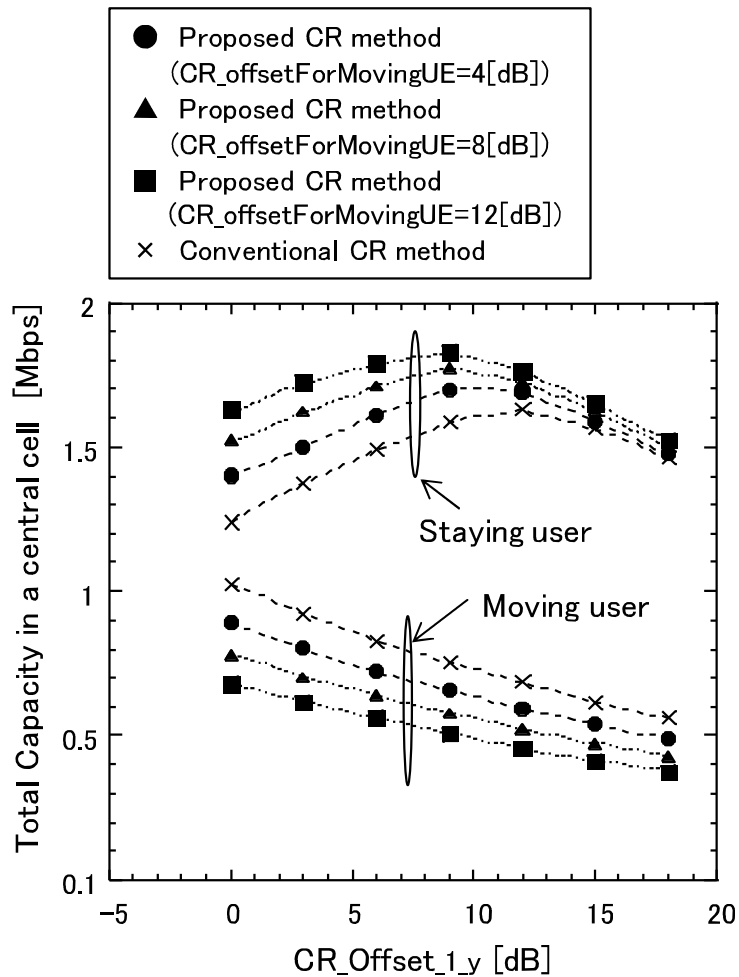


図 5-24 CRoffset_{1y} vs. 中心セルの静止ユーザと移動ユーザの総通信路容量

5. 3. 4. 結び

スマートフォンの普及に伴い、アプリケーションやリッチコンテンツの利用によるモバイルトラフィックの急増が問題となっている。モバイルトラフィックはユーザの利用状況によって特定のセルに集中する場合があります。周波数を有効に利用するためには、モバイルトラフィックを周辺基地局へ分散させる基地局間負荷分散が重要となる。

基地局間の負荷分散を行う方法としてハンドオーバーを利用する場合とセル再選択を利用する場合があります。ハンドオーバーを利用する場合、継続的な通信を実現するための制御と矛盾する場合があります。そのため、セル再選択方法に注目し、待受け中のユーザ端末の行動特徴とセルの混雑度状況を

基に基地局間負荷分散を実現するユーザ行動特徴を考慮したセル再選択方法を提案した。計算機シミュレーションにより、提案方式の性能評価を行い、各セルにおける待受け中のユーザ端末数、リソース要求率、総通信路容量について評価を行った。その結果、提案方式は従来方式に比べ、基地局間の負荷を効率的に分散することができ、システム全体の総通信路容量を増加できることを示した。さらに、ユーザ間の公平性に関する提案方式の有効性を明らかにするために、下位 5%、25%番目のそれぞれのユーザ端末の通信路容量、さらに、混雑セルとして設定した中心セルにおける静止ユーザ端末と移動ユーザ端末のそれぞれの総通信路容量について評価を行った。その結果、提案方式は下位 25%番目のユーザ端末までの通信路容量の改善が期待できると共に、静止ユーザ端末と移動ユーザ端末間の通信路容量差を小さくすることができることが分かった。つまり、提案方式を用いることで、ユーザ間の公平性を従来方式に比べ改善できるといえる。これらの結果より、提案方式は、ユーザ端末間の公正性を保ちつつ、基地局間のモバイルトラフィック負荷分散に有効であることを明らかにした。

5. 4. まとめ

無線ネットワークリソースの柔軟かつ高効率な利用を目指し、ユーザが利用するサービスやトラフィック量、ユーザの行動特徴等といった認識対象を拡張し、それらに基づいた無線ネットワークリソース制御方法として、回線交換ベースの無線通信システムにおいて、回線交換型の帯域保障サービスを実現しつつ、パケット交換型の常時接続を疑似的に実現することで、効率的な周波数利用を実現するワイヤレス A0/DI システムとセルラシステムにおける負荷分散を行い、ユーザ間の公平性を改善するセル再選択方法について検討を行った。

ワイヤレス A0/DI システムの検討では、既存の PHS の機器を利用し、無線回線を含んだシステムに関して A0/DI の概念を実現するワイヤレス A0/DI システムを提案し、計算機シミュレーションによる性能評価を行った。その結果、従来方式である回線交換型データ通信に比べ、ワイヤレス A0/DI を利用することで無線回線占有率を大幅に低減できることを明らかにした。つまり、ワイヤレス A0/DI システムを利用することで回線交換型無線通信システムに比べ、周波数あたりの収容ユーザ数を増加することが可能となる。

セル再選択方法に関する検討では、待受け中のユーザ端末の行動特徴とセルの混雑度状況を基に基地局間負荷分散を実現するユーザ行動特徴を考慮したセル再選択方法を提案した。計算機シミュレーションにより、提案方式の性能評価を行い、各セルにおける待受け中のユーザ端末数、リソース要求率、総通信路容量について評価を行った。その結果、提案方式は従来方式に比べ、基地局間のモバイルトラフィック負荷を効率的に分散することができ、システム全体の総通信路容量を増加できることを示した。さらに、ユーザ間の公平性に関する提案方式の有効性を明らかにするために、下位 5%、25%番目のそれぞれのユーザ端末の通信路容量、さらに、混雑セルとして設定した中心セルにおける静止ユーザ端末と移動ユーザ端末のそれぞれの総通信路容量について評価を行った。その結果、提案方式は下位 25%番目のユーザ端末までの通信路容量の改善が期待できると共に、静止ユーザ端末と移動ユーザ端末間の通信路容量差を小さくすることができる

ことが分かった。つまり、提案方式を用いることで、ユーザ間の公平性を従来方式に比べ改善できるといえる。これらの結果より、提案方式を用いたリソース制御を行うことで、ユーザ端末間の公正性を保ちつつ、基地局間のモバイルトラフィック負荷分散に有効であることを明らかにした。

参考文献

- [5-1] A. Kuzma, "Always On/Dynamic ISDN," VIA Technical Committee, Oct. 1997.
- [5-2] D. Stoop, D. Ackermann, and L. Walt, "Is A0/DI the Answer to Small-scale Internet Users," IEEE Africon, Vol. 1, pp. 565-568, 1999.
- [5-3] C. Richards and K. Smith, "The PPP Bandwidth Allocation Control Protocol," RFC2125, March, 1997.
- [5-4] T. Oono and T. Tanaka, "The proposal of Wireless Multimedia Communication System with Integration of Packet-switched and Circuit-switched Channels," IEEE Proc. of GCOM' 98, Vol. 1, pp. 120-125, 1998.
- [5-5] H. Ohtsuka, T. Oono, Y. Kondo, O. Nakamura, and T. Tanaka, "Potential Wireless Technologies in Mobile Communications," IEEE Proc. of ICC' 99, Vol. 2, pp. 1121-1125, 1999.
- [5-6] 大野, 大塚, 田中, "A0/DI 対応ワイヤレス・ターミナルアダプタ", 1999, 信学総大 B-5 - 204.
- [5-7] S. DENG, "Empirical Model of WWW Document Arrivals at Access Link," IEEE Int. Conf. Commun., Vol. 3, pp. 1797-1802, 1996.
- [5-8] 北澤, 四方, 原, "セルラシステムにおけるマルチメディアサービスのモデル化とそのシステム特性評価への応用," 信学技報, SST99-101, pp. 33-40, 1999.
- [5-9] 名部, 馬場, 村田, 宮原, "World-Wide-Web におけるユーザトラフィックの分析," 信学技報, SSE96-90, pp. 91-96, 1996.
- [5-10] 名部, 村田, 宮原, "キャッシングを考慮した WWW トラフィック特性の分析とモデル化," 信学論, Vol. J81-B-I, No. 5, pp. 325-334, 1998.
- [5-11] V. Paxson, "Empirically Derived Analytic Models of Wide-Area TCP connections," IEEE/ACM Transaction on Networking, vol. 2, no. 4, pp. 316-336, 1994.
- [5-12] Cisco Visual Networking Global Mobile Data Traffic Forecast for 2010 to 2015, 2011.
- [5-13] H. Inanoglu, "Multiple-Input Multiple-Output System Capacity: Antenna and Propagation Aspects," IEEE Antennas and Propagation Mag., pp. 253-273, vol. 55, Issue:1, March 2013.
- [5-14] Y. Kim, H. Ji, H. Lee, J. Lee, B. Loong, J. Zhang "Evolution beyond LTE-advanced with Full dimension MIMO," IEEE Conference on ICCW2013, pp. 111-115, 2013.
- [5-15] "E-UTRA and E-UTRAN Overall description," TS 36.300, 3GPP.

- [5-16] “Telecommunication management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements,” TS 32.500, 3GPP.
- [5-17] “E-UTRA Radio Resource Control (RRC) Protocol specification,” TS 36.331, 3GPP.
- [5-18] “User Equipment (UE) procedures in idle mode,” 3GPP, TS 36.304, Sep. 2013.
- [5-19] Dimou K, M. Wang, Y. Yang, Kazmi. M, “Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance,” IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC2009-Fall), Sept. 2009.
- [5-20] H. Zhang, “A User Mobility Analysis Assistive MRO Algorithm for Handover Parameters Optimization in LTE SON System,” Wireless Advanced, 2012, pp. 143-148.
- [5-21] W. Lei, W. Hai, Y. Yinghui and Z. Fei, “Heterogeneous network in LTE-advanced system,” IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS) 2010, pp. 156-160, Nov. 2010.
- [5-22] 青山, 武, “ヘテロジニアスネットワークにおける基地局負荷分散方式,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-6-5, Sept. 2011.
- [5-23] 青山, 堀, 大賀, 木下, 富沢, 武, “無線品質情報を用いた基地局連携負荷分散制御方式の検討,” 信学技法, RCS2011-201, pp. 73-77, 2011.
- [5-24] H. Wang, L. Ding, P. Wu, Z. Pan, N. Liu and X. You, “Dynamic load balancing and throughput optimization in 3GPP LTE networks,” IWCMC '10 Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 939-943, 2010.
- [5-25] Kwan R., M. Wang, Arnott R., Paterson R., Trivisonno, R. and Kubota M., “On Mobility Load Balancing for LTE Systems,” IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC2010-Fall), Sept. 2010.
- [5-26] T. Yamamoto, T. Komine and S. Konishi, “Mobility Load Balancing Scheme based on Cell Reselection,” in the Eighth International Conference on Wireless and Mobile Communications, June 2012, pp. 381-387.
- [5-27] 山本, 小西, “セル再選択を用いた LTE 基地局間負荷分散手法の検討,” 信学技法, RCS2012-81, pp. 37-42, July 2012.
- [5-28] 山本, 小峰, 小西, “ハンドオーバーおよびセル再選択による基地局間負荷分散の定量評価,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-41, March 2012.
- [5-29] 山本, 小西, “様々なトラヒック環境における LTE 基地局間負荷分散手法の検討,” 信学技法, RCS2012-190, pp. 41-46, Dec. 2012.
- [5-30] 青木, 瀬古, 西野, 山田, 武藤, 阿部, “ライフログのための位置情報ログデータからの移動モード判定の検討,” 情報処理学会研究報告, 2008-DD-67, pp. 7-12, July 2008.
- [5-31] T. Liu, P. Bahl, and I. Chlamtac, “Mobility modeling, location tracking, and trajectory prediction in wireless atm networks,” IEEE J. Select. Areas Commun.,

vol. 16, pp. 922 - 936, Aug. 1998.

- [5-32] Y. Lin, C. Huang-Fu and N. Alrajeh, "Predicting Human Movement Based on Telecom's Handoff in Mobile Networks," IEEE trans.on mobile computing, vol.12, No.6, pp.1236-1241, June 2013.
- [5-32] 青木、瀬古、西野、山田、武藤、阿部, "ライフログのための位置情報ログデータからの移動モード判定の検討," 情報処理学会研究報告, 2008-DD-67, pp. 7-12, July 2008.

6. まとめ

スマートフォンの普及に伴い、アプリケーションやリッチコンテンツの利用によるモバイルトラフィックの急増が問題となっている。モバイルトラフィックは年率2倍で増加し、今後10年で100から1000倍になると予想されている。急増するトラフィックに対し、無線通信システムの高速度・大容量化を目指し、MU-MIMO (Multiuser-Multi Input Multi Output) 技術等の空間多重技術や多値変調方式の多値数の増加等することで周波数利用効率向上に関する検討が行われているが、さらなる周波数利用効率の向上が期待されている。

そこで、有限の資源である周波数をはじめ、ネットワークリソースや基地局のハードウェアリソースを適応的に利用し、高効率な無線通信を実現する適応型無線通信システムの実現を目指した。まず、適応型無線通信システムを実現するための要素技術となるソフトウェア無線について検討を行った。次に、ソフトウェア無線技術の特徴を活かし、電波環境を高精度にセンシングし、電波環境の認識を行うことで、柔軟な周波数利用を実現するコグニティブ無線について検討を行い、空き周波数の効率的な利用について言及した。そして、さらなる無線通信システムの高度利用を目指した無線ネットワークリソース制御方法について検討を行った。

3章のソフトウェア無線の検討では、ソフトウェア無線を実現するためのハードウェアとソフトウェアの構成方法について検討を行い、試作を行った。ソフトウェア無線機の構成方法としてマルチプロセッサアーキテクチャを提案した。さらに、フレキシブルプリポストプロセッサを新たに提案することで、広帯域な無線通信システムである無線LANをサポート可能なソフトウェア無線機を実現した。試作機上で動作するPHSと無線LAN用のソフトウェアを試作し、実機上で性能評価を行った。実測結果より、PHSモードにおいて、全2重のリアルタイム通信が実現していることを確認した。一方、無線LANモードにおいては、スループット特性と信号処理負荷を実機上で評価し、試作機が設計通り動作していることを確認した。ソフトウェア無線の特徴であるソフトウェアの入れ替えによる機能変更を検証するために、TCP/IP上で動作する無線ダウンロードプロトコルを試作機に実装し、無線機能の再構築を実行し、正しく無線機の機能を変更できることを確認した。

4章のコグニティブ無線技術に関する研究では、コグニティブ無線において環境認識を行う際に重要な技術となるセンシング技術について検討を行った。センシング端末が取得するセンシング情報の正しさは、センシング端末のハードウェア性能やセンシング方法、センシング環境に影響を受ける。センシング結果の正しさを向上させるために、センシング情報の信頼度を新たに定義し、信頼度の設定手順をまず示した。次に、この信頼度を用いセンシング情報の重み付けを行う協調センシング方法の提案を行った。

提案方式の有効性を評価するために、計算機シミュレーションによる性能評価を行った。その結果、提案方式は、周波数を一次利用するプライマリシステムと周波数を二次利用するセカンダリシステムのサービスエリアが重複しないエリアにおいて、従来方式に比べ、誤検出率が10%の時に誤警報率を最大12%低減することができた。つまり、提案方式を用いることで、セカン

ダリシステムにおける周波数利用の機会が増加するため、周波数利用効率を向上することができる。さらに、実機を用いた性能評価を行い、提案方式は実機上でも従来方式に比べ、プライマリシステム信号の検出特性を改善できることを明らかにした。これらの結果から、適応型高効率無線通信システムにおいて正確な電波環境の認識が可能となり、電波の利用状況に応じた周波数リソースの適応的な利用が可能となる。

5章の無線ネットワークリソース制御に関する検討では、回線交換ベースの無線通信システムにおいて、トラヒック量に基づき無線リソースを制御することで、有線ネットワークにおける回線交換型の帯域保障サービスとパケット交換型の常時接続サービスを効率的に収容することが可能なワイヤレス A0/DI システムとセルラシステムにおける基地局間の負荷分散をユーザ間の公平性を保ちつつ実現するセル再選択方法について検討を行った。

ワイヤレス A0/DI システムの検討では、既存の PHS の機器を利用し、無線回線を含んだシステムに関して Always On Dynamic ISDN(A0/DI) の概念を実現するワイヤレス A0/DI システムを提案する。新たに A0/DI 対応ワイヤレスターミナルアダプタ、クライアント側 PC で動作するワイヤレス A0/DI 対応ミドルウェアと Point to Point Protocol (PPP) を拡張した Wireless Link Point to Point Protocol (WLPPP) を提案し、パケット交換と回線交換を 1 無線回線交換チャンネルに多重することで、ワイヤレス A0/DI システムを実現する。これにより有限である周波数リソースの適応的、且つ高効率な利用を実現する。提案方式の有効性を明らかにするために、計算機シミュレーションで、無線回線占有率と呼損率に関する性能評価を行った。性能評価を行う際のトラヒックモデルとして、トラヒックの特徴が異なる E-mail, ウェブブラウジングである WWW, 電話サービスを用いた。その結果、ワイヤレス A0/DI システムは、E-mail, WWW, 及び電話サービスの混在環境において、従来方式である回線交換型データ通信に比べ、無線回線占有率を大幅に低減できることを明らかにした。さらに、ワイヤレス A0/DI システムを利用することで、従来の回線交換型無線通信システムに比べ、呼損率 3% の時に周波数あたりの収容ユーザ数を 3 から 10 倍程度改善することができることを示した。また、無線リソースを効率的に利用するためには、トラヒックモデルに応じたワイヤレス A0/DI のパラメータ設定が必要であることも併せて明らかにした。

セル再選択方法に関する検討では、待受け中のユーザ端末の行動特徴とセルの混雑度状況を基に基地局間負荷分散を実現するユーザ行動特徴を考慮したセル再選択方法を提案した。計算機シミュレーションにより、提案方式の性能評価を行い、各セルにおける待受け中のユーザ端末数、リソース要求率、総通信路容量について評価を行った。その結果、提案方式は従来方式に比べ、基地局間のトラヒック負荷を効率的に分散することができ、システム全体の総通信路容量を増加できることを示した。さらに、ユーザ間の公平性に関する提案方式の有効性を明らかにするために、下位 5%, 25% 番目のそれぞれのユーザ端末の通信路容量、さらに、混雑セルとして設定した中心セルにおける静止ユーザ端末と移動ユーザ端末のそれぞれの総通信路容量について評価を行った。その結果、提案方式は下位 25% 番目のユーザ端末までの通信路容量の改善が期待できると共に、静止ユーザ端末と移動ユーザ端末間の通信路容量差を小さくすることができることが分

かった。つまり、提案方式を用いることで、ユーザ間の公平性を従来方式に比べ改善できるといえる。これらの結果より、提案方式を用いたリソース制御を行うことで、ユーザ端末間の公正性を保ちつつ、基地局間のトラヒック負荷分散が図れることを明らかにした。

以上の研究結果から、ソフトウェア無線技術を利用した多種多様な無線通信システムへの柔軟な対応の実現、電波環境や無線ネットワークの利用状況等の高精度、且つ正確な認識の実現、及びその認識結果に基づき周波数リソースや無線ネットワークリソース等の制御の実現ができ、その結果、無線通信システムの周波数リソースや無線ネットワークリソース等を適応的に無駄なく利用できることが明らかになった。つまり、これらの技術を用いることで周波数利用効率のさらに向上に貢献することができる。

業績リスト

査読付き論文

- [1] 芝宏礼, 水溜智士, 嶋本薫, “基地局間負荷分散のためのユーザ行動に基づいたセル再選択方法に関する一検討”, GITS/GITI 紀要, 2014(掲載予定)
- [2] 芝宏礼, 上原一浩, 久保田周治, “PHS を用いたワイヤレス A0/DI システムの提案と性能評価”, 電子情報通信学会, Vol. J87-B No. 5, pp. 629-637, 2004
- [3] Hiroyuki Shiba, Takashi Shono, Ichihiko Toyoda, Kazuhiro Uehara and Masahiro Umehira, “Software Defined Radio Prototype for PHS and IEEE 802.11 Wireless LAN”, IEICE Trans Commun, Vol. E85-B, No. 12, pp. 2694-2703, 2002

国際会議 (査読あり)

- [4] Hiroyuki Shiba, Kazunori Akabane, Munehiro Matsui and Kazuhiro Uehara, “Performance Evaluation of a Cooperative Sensing Method for Cognitive Radio”, 2008 SDR Technical Conference, SDR Forum, 2008
- [5] Hiroyuki Shiba, Takashi Shono, Kazuhiro Uehara and Masahiro Umehira, “System re-configuration and over-the-air download functions of the software radio prototype supporting PHS and wireless LAN”, IEEE VTC 2002-Fall. Vol. 3, pp. 1627-pp. 1631, Sept. 2002

国内研究会

- [6] 芝宏礼, 赤羽和徳, 松井宗大, 上原一浩, “センシング情報の信頼度に基づいた協調センシング方法の検討”, 信学技法, ソフトウェア無線研究会 SR2009-10, 2009年5月
- [7] 芝宏礼, 上原一浩, 久保田周治, “ワイヤレス A0/DI システムの性能評価”, 信学技法, ソフトウェア無線研究会 RCS2000-42, 2000年6月