

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

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

申請者

芝

宏礼

国際情報通信学専攻  
無線・衛星通信研究Ⅱ

2014年 3月

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 倍から 1000 倍になると予想されている。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通信方式に周波数が割り当てられ、稠密に利用されている。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、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、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通信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、無線通信サービスにおいては、スマートフォン等の端末の高機能化に伴い、電話やメールといった従来の無線通信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。

本論文の章構成を以下に述べる。まず、適応型高効率無線通信システムを実現するため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技術について 3 章で述べる。次に、4 章では、無線通信特有の課題でもある有限な周波数リソース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技術による電波環境認識について言及する。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技術として回線交換型無線通信システムにおける無線リソース制御方法と新たな負荷分散方法としてユーザ行動を認識し、そのユーザ行動特徴に基づいたセル再選択方法について 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であ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的な内容について示し、研究動向、及び標準化動向についても述べる。最後に、6 章で本論文のまとめを行う。

3 章のソフトウェア無線に関する研究では、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、Direct Digital Synthesizer (DDS) と FPGA からなるフレキ

シング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。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。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秒かかることを明らかにした。

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明らかにした。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、多種多様な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。

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、ユーザが利用するサービスやトラヒック量、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技術に関する研究を行った。無線ネットワークリソース制御技術として、回線交換型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、効率的な周波数リソース利用を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いて、ユーザ間の公平性を保ちつつ負荷分散を行うセル再選択方法に関する検討を行った。

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Always On Dynamic ISDN(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。新たにAO/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AO/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AO/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AO/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 AO/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 AO/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ヒック負荷分散に有効であ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。