

# 広帯域移動通信における高度信号処理に関する研究

## 学位論文内容の要旨

携帯電話における加入数の増大とサービスの多様化を受け、携帯電話に求められる無線通信の能力も必然的に高度なものになっている。具体的には、beyond IMT-2000 として要求される方式に対しては、ITU-R 勧告における VAN ダイアグラムに示されるように、低速移動(歩行程度)時に 20M~1Gbps の最大通信レートを、高速移動時(自動車~高速鉄道)にも 10~100Mbps の最大通信レートを実現する必要がある。これにより現行技術に対して大幅な技術革新が必要であると考えられる。さらには、現在と同様あるいはそれ以上の普及率を確保するためには通信コストの増大は許容されず、高速化が望まれる一方でコストダウンの必要を生じ、通信コストのビット単価すなわちビットコストの低減が必須である。本論文では、こうした背景に応えるため無線伝搬環境の性質と適用可能な信号処理との観点から検討を行い、広帯域移動通信システムの実現にむけた技術提案を試みている。

広帯域移動通信システムの実現にむけ、第1章の序論で述べているように、無線伝搬環境の性質と適用可能な信号処理との観点から検討を行い、具体的にどういった技術提案ができるかを検証した。その技術提案のための検討課題として、モビリティ向上に向けた適応アルゴリズムの追従性改善、回線容量増大に向けた基地局へのアダプティブアレーアンテナ適用検討、そして通信容量増大のための時空間符号化の検討に目標を定めた。

モビリティの向上について、携帯端末の物理的な移動速度はほとんど変わらないが、伝送速度の向上に伴う広帯域化の要望に応えるため、通信に用いる搬送波周波数が高くなることが想定される。それに伴って相対的に最大ドップラー周波数が大きくなるため、適応信号処理により高品質伝送を実現しようとした場合に、従来以上に変動への追従性能が要求されることになる。この点に着目し、適応信号処理の変動追従性向上を検討課題のひとつとする。

回線容量増大に関して、雑音耐性を改善しリンクバジェットを確保すべく信号強度を高くする方法と、ユーザ間の干渉を軽減する方法とが必要になる。これらリンクバジェットの軽減とユーザ間干渉軽減の双方に効果のある、基地局へのアダプティブアレーアンテナ搭載を2つ目の検討課題とする。

通信容量増大については、前述のアダプティブアレーアンテナと同様に複数のアンテナを備えた場合の信号処理として注目の集まっている、Multiple-Input Multiple-Output すなわち MIMO システムが重要である。MIMO システムにおける空間ダイバーシチと符号化利得に着目し、通信容量の増大とリンクバジェットの拡大との両方で効果を追求することを、3番目の検討課題とする。

第2章では、序論で述べた3つの検討課題に対する、これまでの検討について概要をまとめた。従来の検討状況として、はじめに移動通信の伝搬環境と適応等化技術について述べ、続いてアダプティブアレーアンテナの技術について説明した。最後に MIMO の技術についてまとめた。

適応等化技術について、基礎理論として Wiener フィルタを紹介したうえでチャンネル等化への応用例を紹介した。さらに非線形等化器への拡張について説明し、適応アルゴリズムの概略をまとめた。アダプティブアレーアンテナの技術に関し、ビームフォーミング手法を説明した後に各種の到来方向推定手法を紹介した。つづいて、適応アルゴリズムを用いたマルチアレーン手法の概略をまとめた。MIMO の技術について、MIMO チャネルの表現とその特徴を紹介し、MIMO 情報理論として、情報理論および符号化の観点から説明を加えた。最後に、MIMO の技術に関し適応信号処理の観点で概略をまとめた。

第 3 章では、一つ目の検討課題であるモビリティ向上に向けた適応アルゴリズムの追従性改善をとりあげ、適応等化器に向けた簡易かつ変動耐性に優れたアルゴリズムの開発を試みた。具体的には、伝搬路変動に追従するため、適応アルゴリズムの更新式に 1 次のテイラー展開近似に基づく差分量の補正項を追加した。これにより実際に最適解の差分量を近似する傾向を確認できた。さらに、平均誤り率の評価から、動的な周波数選択性フェージング環境におけるフロア誤りの低減を確かめた。誤り率のフロアは、受信ダイバーシチなしの構成では、正規化最大ドップラー周波数  $1.0 \times 10^{-3}$  および  $5.0 \times 10^{-4}$  の環境で、受信ダイバーシチありの構成では、正規化最大ドップラー周波数  $2.0 \times 10^{-3}$  および  $1.0 \times 10^{-3}$  の環境で、それぞれほぼ半減できていることを確認した。

第 4 章では、2 番目の検討課題である回線容量増大に向けた基地局へのアダプティブアレーアンテナ適用に着目し、マクロセル環境を想定したビームフォーミング適用による容量増大効果を確認して、アダプティブアレーアンテナの有効性を検証した。具体的には、W-CDMA のマクロセル環境を想定した場合に実現できる指向性制御方法を設計し、その効果をシステムレベルシミュレーションを用いて定量的に把握した。評価結果より、基地局にセクタあたり 4 アンテナを備え方向誤差 5 度の場合に、6 セクタでビームフォーミングなしのシステムにくらべ 180% のスループットを実現できることを明らかにした。

第 5 章では、3 つ目の検討課題に対し通信容量増大のための時空間符号化について取り組んだ。時空間符号を用いることで、通信容量の増大とリンクバジェットの拡大との両方に効果的な手法の開発を試みた。具体的には、OFDM システムで送信側におけるアンテナ選択手法の応用として時空 Turbo 符号の送信をサブキャリア単位で制御し、受信電力の最も良いアンテナにシステムチックビットを割り当て、2 番目に良いアンテナにパルクチャされたパリティビットを割り当て、さらに最も品質の悪いアンテナからはデータ送信しない、とする方法を提案した。これにより、提案手法は復調に用いるチャンネル推定精度が確保できる効果も期待できる。平均誤り率特性を観測することにより、所要  $T_x E_b / N_0$  を従来手法とくらべ 2.2 dB 低減可能であることが確認できた。さらに、送信電力の累積確率密度分布を観測した結果より、提案手法は従来手法とくらべ平均送信電力を約 4 dB 低減できることを明らかにした。

最後に第 6 章で結論を述べている。ここまでの第 3 章から第 5 章にて示したように、適応アルゴリズムの追従性改善、基地局へのアダプティブアレーアンテナ適用検討、そして時空間符号化の検討を試みた。検討結果より、適応アルゴリズムの追従性改善によるモビリティ向上が可能であること、基地局へのアダプティブアレーアンテナ適用による回線容量増大効果、そして時空間符号化による通信容量増大を実現できることを確認した。これらの検討にもとづく技術提案により、広帯域移動通信システムを実現する目処を立てることができた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 川 恭 孝  
副 査 教 授 宮 永 喜 一  
副 査 教 授 野 島 俊 雄  
副 査 教 授 小 柴 正 則

## 学位論文題名

### 広帯域移動通信における高度信号処理に関する研究

近年の移動通信における加入数増大およびサービス多様化のため、無線通信技術に要求される能力は極めて高度なものとなっている。具体的な要求条件を第3世代以降の移動通信を例に示すと、歩行程度の低速移動時には20M~1Gbpsの通信レートを、自動車および高速鉄道といった高速移動時にも10~100Mbpsの通信レートを実現する必要がある。このことから、現在用いられている技術と比較して大幅な技術革新が必要とされる。さらに、現在と同等またはそれ以上の普及率を確保するためには、通信コストの増大を許容することができず、高速化の要求の一方でコストダウンも必要になり、通信コストのビット当たりの単価すなわちビットコスト低減が必要となる。本論文では、このような要求に応えるため、高速・広帯域移動通信システムの実現に資する高度信号処理技術の提案を行っている。

本論文の第1章では、具体的な技術提案の指針を検討している。ITU-R 勧告におけるVANダイアグラムを基に、今後の移動通信に求められるモビリティと伝送レートを考察し、本論文における検討課題として、(1) モビリティ向上に向けた適応アルゴリズムの追従性改善、(2) 回線容量増大に向けた基地局へのアダプティブアレーアンテナの適用、(3) 通信容量増大のために、送受信側に複数のアンテナを設置したMIMO (Multiple Input Multiple Output) システムによる時空間符号化を挙げている。

続く第2章では、序論で示した検討課題に対する従来の研究の概要を述べている。始めに移動通信の伝搬環境と適応等化技術について論じ、その後でアダプティブアレーアンテナの技術を概説している。最後にMIMO技術についてまとめている。

第3章では、第一の検討課題であるモビリティ向上のための適応アルゴリズム追従性改善に着目し、適応等化器用の変動耐性に優れたアルゴリズムを簡易に実

現する方法を検討している。具体的には、伝搬路変動に追従するように、適応アルゴリズムの更新式に1次のテイラー展開近似に基づく差分量の補正項を追加することを提案している。シミュレーションの結果から、動的な周波数選択性フェージング環境におけるフロア誤りの低減を確認している。

第4章では、第二の検討課題である回線容量増大に向けた、基地局へのアダプティブアレーアンテナ適用について述べている。その有効性を検証するため、W-CDMAのマクロセル環境を想定したときのシステムレベルシミュレーションにより、その効果を定量的に把握している。評価結果から、セクタ当たり4アンテナの基地局で信号の到来方向推定誤差を5度以内にできたとき、6セクタでビームフォーミングなしのシステムと比較して180%のスループットを達成できることを明らかにしている。

第5章では、第三の検討課題である、通信容量増大のためのMIMO技術を用いた時空間符号化について得られた結果を明らかにしている。具体的には、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) システムにおいて、送信側でアンテナ選択する手法の応用として時空Turbo符号の送信を制御し、「最も受信品質の良いアンテナにシステムティックビットを、2番目に良いアンテナにパルクチャされたパリティビットをそれぞれ割り当て、最も悪いアンテナからは信号を送信しない」とする方法を提案している。この手法は復調に用いるチャネル推定精度を確保できる効果も期待できる。誤り率特性を検証することによって、所要送信Eb/N0を従来手法と比べ2.2dB低減可能であることを明らかにしている。さらに、送信電力の累積確率密度分布の結果から、提案手法は従来手法と比較して平均送信電力を約4dB低減できることを確認している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

これを要するに、著者は移動通信におけるモビリティの向上と通信回線の容量を増大するため、適応アルゴリズムの高速化と複数のアンテナを用いた信号処理技術につき、新たな知見を得たものであり、無線通信工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。