

氏名	樋口 健一		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成14年9月11日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	広帯域 DS-CDMA 方式を用いたデジタル移動通信における 高能率信号伝送の研究		
指導教官	東北大学教授 安達 文幸		
論文審査委員	主査	東北大学教授 安達 文幸	東北大学教授 澤谷 邦男
		東北大学教授 坪内 和夫	東北大学助教授 工藤 栄亮

論文内容要旨

第3世代デジタル移動通信システムである IMT-2000 では、周波数利用効率が高く、最大 2 Mbps までのマルチメディア伝送に適した無線アクセス方式が要求され、広帯域直接拡散符号分割多元接続 (DS-SS) 方式が有力な候補とされてきた。さらに、第3世代移動通信システムの拡張システム (第 3.5 世代システム) として、IMT-2000 の要求条件を満たした上で、将来的なさらなるリンク容量の増大の実現、および 2 Mbps を超える高速データ通信の実現を目指した広帯域 DS-SS 方式の研究開発が開始されている。本論文は、この広帯域 DS-SS 方式における高能率信号伝送の実現を目的とした一連の研究をまとめたものであり、以下に示すように全編 6 章から構成されている。

第1章は緒論であり、研究の背景と本論文の概要について述べている。

第2章では、第3世代移動通信システムにおける課題に対する研究として、セル間非同期システムを実現するためのセルサーチ技術について述べている。具体的には、通信開始時の初期セルサーチ法と通信待ち受け時のセルサーチ法について提案を行っている。

まず、通信開始時に行うセルサーチについて、下りリンクでセルの識別のために用いられるシンボル周期に比較して非常に長周期な拡散符号であるスクランブル符号を一定周期でマスクする事を特徴とする3段階高速セルサーチ法を提案している。本方法は、スクランブル符号マスクシンボルにおける全セルで共通のシンボル周期の拡散符号であるチャネライゼーション符号を用いて、スクランブル符号のタイミング検出をスクランブル符号の同定と分離して行うことで高速なセルサーチを実現する。さらに、スクランブル符号をグループ化し、スクランブル符号マスク区間でスクランブル符号グループを示す識別チャネライゼーション符号を送信することにより、スクランブル符号同定に要する時間を低減している。計算機シミュレーション結果より、マルチセル環境下で、セルサーチの対象となる下りリンク共通

制御チャネルの送信電力を基地局の総送信電力の 13%としたときに、セル内の場所率 90%におけるセルサーチ時間を 500 msec 以下にできることを示している。さらに、屋外実験結果から、実際のマルチパス環境においても提案セルサーチ法が計算機シミュレーション結果から予想される高速セルサーチを実現できることを実証している。また、マスクシンボルが通信チャネルに与える干渉の影響を平均ビット誤り率特性で評価し、この影響が無視できる程小さいことを確認している。

次に、通信待ち受け時のセルサーチについて、スクランブル符号の受信タイミング差を用いる高速セルサーチ法を提案し、計算機シミュレーションにより、セルサーチ時間を約 5 msec に低減でき、セルサーチ周期が 720 msec の場合、3 段階高速セルサーチ法ではセルサーチに要する間欠受信時間率がおおよそ 14%となるのに対して、スクランブル符号の受信タイミング差を用いる高速セルサーチ法では間欠受信時間率をセル間同期システムとほぼ同等の 0.7%程度に低減できることを示している。

第 3 章では、第 3 世代システムにおける課題に対する研究として、高能率受信に必須となる適応高速送信電力制御 (TPC) について、特に広帯域 DS-CDMA 方式の必須技術であるコヒーレント Rake 受信、チャネル符号化との複合効果について実験的に検証している。

まず、コヒーレント Rake 受信と適応高速 TPC の複合効果を実験的に実証している。室内伝送実験を基に、適応高速 TPC とパイロットシンボルを用いたマルチスロット重み付き平均化チャネル推定を行うパイロットシンボルを用いたコヒーレント Rake 受信を併用した DS-CDMA システムの総合的な伝送特性の明確化、適応高速 TPC のインナーループの制御パラメータである信号電力対干渉電力比 (SIR) 測定区間と TPC 遅延の最適化を示し、屋外伝送実験で実伝搬環境でも本システムが有効に動作することを実証している。

次に、適応高速 TPC におけるアウトーループについて、数値解析により、制御パラメータであるフレーム誤り率平均化区間と目標 SIR のステップサイズの最適設定法を理論的に示し、さらに、室内伝送実験により、マルチパス環境下でのアウトーループを用いる適応高速 TPC が瞬時レイリーフェージングの最大ドップラ周波数 f_D が 10 Hz から 320 Hz (2 GHz 帯において移動局の移動速度が時速 5 km から時速 170 km に相当) の広範囲にわたって受信フレーム誤り率を一定の目標値に保持できることを実証している。

さらに、ターボ符号化と適応高速 TPC、およびアンテナ、Rake ダイバーシチとの複合効果について評価を行い、室内実験で畳み込み符号化に対するターボ符号化の有効性 (平均ビット誤り率 = 10^{-6} 点で約 1.4 dB の利得) を示した上で、屋外実験を通して、適応高速 TPC や Rake ダイバーシチを併用し非常に

受信電力が小さい環境で受信機が動作する場合は、パスサーチ誤差の影響が大きくターボ符号化の畳み込み符号化に対する特性改善を低減させるため、ターボ符号化の利得を十分に得るためにはパスサーチの高精度化が必要であることを明らかにしている。

第4章では、第3.5世代移動通信システムにおける課題に対する研究として、上りリンク大容量化を目的としたマルチステージ逐次干渉キャンセラの実証実験について述べている。具体的には、DS-CDMA上りリンクの大容量化技術の有力候補である、筆者らがこれまでに提案したコヒーレントマルチステージ干渉キャンセラ (COMSIC) について、実験装置を用いて実際のマルチパスフェージング環境下でのビット誤り率特性を室内・屋外実験を通して定量的に評価し、コヒーレント Rake、適応高速 TPC、チャネル符号化、パスサーチを実際に行った場合の特性を明確化している。また、COMSIC に適した処理遅延の小さい適応高速 TPC 法を提案し、提案法の特性も合わせて定量的に評価している。実験結果から、提案する COMSIC が、同時接続ユーザ数が拡散率に等しいような非常にユーザ数が大きい場合においても、他ユーザ干渉を除去しビット誤り率を改善できることを確認し、また提案 TPC により、処理遅延を増大することなく、平均ビット誤り率 = 10^{-3} を得るのに必要な移動局の送信電力を従来のマッチトフィルタベースの Rake 受信に比較して同時接続ユーザ数が拡散率の 50% に相当する場合 2 dB 程度低減できることを明らかにしている。また、屋外実験による実際の伝搬環境における COMSIC 受信の検証では、特に大電力の高速送信ユーザ存在時の特性を評価し、アンテナダイバーシチを用いたとき、受信 SIR が 9 dB 大きい他の通信ユーザが存在する場合において、平均ビット誤り率 = 10^{-3} を満たすのに必要な所要の目標 SIR および移動局の送信電力を COMSIC 受信によりマッチトフィルタベースの Rake 受信に比較して 1.2 dB, 2.0 dB 程度低減できることを実証している。干渉キャンセラを実装し、実伝搬環境下においてその効果を実証したのは世界で初めての成果であり、これらは、上りリンクの容量増大に貢献する重要な成果である。

第5章では、第3.5世代システムにおける課題に対する研究として、W-CDMA 無線インターフェースに基づいて最大 2 Mbps 以上のスループットを実現する下りリンク高速パケット伝送 (HSDPA) について、マルチパスフェージングチャネルにおいて高効率な直交振幅変調 (QAM) をデータ変調に適用した場合のマルチパス干渉の影響を低減するマルチパス干渉キャンセラ (MPIC) を提案している。提案する MPIC は上りリンクにおける COMSIC をベースに下りリンクの直交マルチコード伝送に適した構成を有し、チップ等化器型構成に比較して、チャネル推定誤差による特性劣化が小さく、処理量がマルチパスの遅延時間に依存しないという利点がある。リンクレベルシミュレーションによる孤立セルでの評価で、

2~3パスフェージング環境のとき、MPICを用いることでMPICを用いない従来のマッチトフィルタベースのRake受信の場合に比較して最大スループットを約2倍に増大でき、64QAMデータ変調の適用により5MHzの帯域幅で8.0Mbpsの高速パケット伝送が可能であることを明らかにしている。また、マルチセル環境での他セル干渉を考慮したシステムレベルシミュレーションにより、1パス環境では、マッチトフィルタベースのRake受信により平均スループット = 10 Mbps もしくは 5 Mbps を約15%もしくは50%の確率で実現できる一方、2パス環境では5Mbpsの平均スループットを実現する確率は15%にまで低減することを示している。これに対し、MPICを用いることで、5Mbpsの平均スループットを実現する確率を30%にまで増大できる。以上の結果は、MPICがマルチパス環境下で16QAMや64QAMを効率的に用いてシステムの最大および平均スループットを増大するのに必須の技術であることを示している。

第6章では、第2章から第5章を総括して結論を述べている。

以上述べたように、本論文では、移動通信において高速かつ広帯域なモバイル・マルチメディアサービスの提供を実現するための技術、特に無線アクセス方式として広帯域DS-CDMA方式を用いる高効率無線伝送技術についての研究成果をまとめた。

本論文の対象とした広帯域DS-CDMA方式は、IMT-2000における無線アクセス方式としてW-CDMAの呼称で採用され、2001年5月には日本において世界に先駆けてW-CDMAの商用システムが導入された。これまでに、3GPP (3rd Generation Partnership Project) においてW-CDMA無線インターフェースの標準化が進められてきた中で、第2章で示した通信開始時の高速な初期セルサーチを実現するスクランブル符号マスクを行う3段階高速セルサーチ法、待ち受け時の高速セルサーチ法は、W-CDMAの標準に採用されている。また、第3章における適応高速TPCの評価結果は、W-CDMAのシステム設計を行う際の指針を与えるものになると期待される。今後は、第3章や第4章で示した、第3.5世代技術に位置付けられる大容量化技術、およびHSDPAとして3GPPで検討が行われている下りリンク高速パケットアクセス技術によりW-CDMAを拡張することで、より多くのユーザが利便性の高い高速かつ広帯域なモバイル・マルチメディアサービスを楽しむことができる時代になるとと思われる。

論文審査結果の要旨

第3世代移動通信システムでは広帯域直接拡散符号分割多元接続(W-CDMA)が技術標準のひとつとして採用され、最近では、更なる高速・大容量化を実現する第3.5世代システムの研究開発が進められている。本論文は、W-CDMAセル間非同期システムにおける高速セルサーチと高速の送信電力制御(TPC)について検討すると共に、高速・大容量化を実現する干渉キャンセラを提案したものであり、全編6章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、基地局間非同期システムを実現するためのセルサーチ技術について述べている。まず、スクランブル符号群をグループ分けし、タイミング同定、グループ同定、スクランブル符号同定の順にサーチを行う通信開始時3段階セルサーチ技術を提案し、同期システムとほぼ同等な500ms以下のセルサーチ時間を達成できることを実証している。また、約0.7%の低い間欠受信時間率を達成する待ち受け時セルサーチ技術も提案している。これらの技術はW-CDMA技術標準に採用されている。

第3章では、高速TPCの制御パラメータの最適設定法を明らかにし、2GHz帯において5km/hから170km/hという移動速度にわたり受信品質を所要値に保持できることを実証している。また、高速TPCおよびコヒーレントRake受信を用いるときの畳み込み符号化に対するターボ符号化の優位性を示すとともに、実伝搬環境下では高精度なパスサーチが重要であることを示している。これらは、W-CDMAシステムの設計指針を与える実用上重要な成果である。

第4章では、上りリンク大容量化を目的としたマルチステージ逐次干渉キャンセラの実証実験について述べている。干渉キャンセラを用いれば、伝送特性の大幅な改善が可能であること、拡散率の50%に相当するユーザ数の場合には平均BER=10⁻³を得るための移動局送信電力を2dB程度低減できることを明らかにしている。実伝搬環境下においても安定動作する干渉キャンセラを実装し、その効果を実証したのは世界で初めての成果である。これらは、上りリンクの容量増大および移動局バッテリーの寿命長期化に貢献する極めて重要な成果である。

第5章では、下りリンク高速パケット伝送におけるマルチパス干渉キャンセラを提案している。この干渉キャンセラは、チップ等化型の構成に比較してチャネル推定誤差による特性劣化が小さく、演算処理量がマルチパス遅延時間に依存しないという利点がある。また、周波数選択性伝搬環境のもとで、従来のRake受信に比較して最大スループットを約2倍に向上できること、64QAMを適用すれば5MHz帯域幅で8Mbpsという高速パケット伝送を達成できることを示している。これは、周波数利用効率に優れた超高速マルチメディア伝送を実現する上で重要な技術成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、第3世代および第3.5世代移動通信システムの実現に向けて、W-CDMA技術標準に採用された高速セルサーチ技術を開発し、高速TPC制御パラメータの最適設定法を明らかにすると共に、高速・大容量化を実現する干渉キャンセラを提案し、その有効性を示したものであり、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。