

氏名 (本籍地)	くまがい ともあき 熊谷 智明
学位の種類	博士 (情報科学)
学位記番号	情 第 48 号
学位授与年月日	平成 20 年 4 月 10 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
最終学歴	平成 4 年 3 月 東北大学大学院工研究科電気及通信工学専攻 博士課程前期 2 年の課程修了
論文題目	Demodulation and Diversity Algorithms for Wireless Communication Systems (無線通信システムにおける復調およびダイバーシチアルゴリズムに関する研究)
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 西関 隆夫 東北大学教授 堀口 進 東北大学教授 安達 文幸 (工学研究科) 東北大学准教授 周 暁

論文内容の要旨

第 1 章 序論

1897 年のマルコーニによる無線通信実験の成功以来、新しい無線通信技術や無線通信サービスについての研究が精力的になされてきており、世界の至る所で実用に供されている。2006 年時点での日本における携帯電話の世帯普及率は 85% を超えるほどにまでなっているが、有線通信サービスと比較して伝送速度や伝送品質が劣っている無線通信サービスがこれほどまでに急速に普及を遂げた最も大きな要因は、無線だからこそ実現可能な移動無線通信サービスが本質的に有する利便性の高さにあると考えられる。従って、無線中継などの他の無線通信サービスと比較して移動無線通信サービスは無線通信サービスの将来の発展に向けてとりわけ重要である。移動無線通信サービスは、携帯電話に代表される移動電話サービスと、無線 LAN に代表されるモバイルコンピューティングサービスの 2 つに大きく分けられる。前者は、1979 年に日本でサービス提供された NTT 方式の世界初のアナログ自動車・携帯電話に始まる第一世代のアナログ携帯電話の時代を経て、1990 年代に第二世代のデジタル携帯電話に引き継がれて端末の軽量化や低価格化が進んだ結果、1990 年代末頃に爆発的に普及した。その後、高速インターネットアクセスが可能な第三世代の携帯電話が 2001 年に商用化されて以来、更なる高速化に向けた研究開発が続けられている。一方、後者は、1997 年に最初の無線 LAN 標準である IEEE 802.11 規格が標準化された後、54 Mbit/s および 11 Mbit/s の IEEE 802.11a 規格および IEEE 802.11b 規格が 1999 年にそれぞれ標準化され、世界中に広く普及した。今日では、100 Mbit/s 以上のスループットを有する更に高速な無線 LAN の標準化作業が行われている。

以上の流れを鑑みると、移動無線通信における技術開発の方向性としては、モビリティを保ちつつ伝送速度を更に高速化する方向に向かっているとと言える。従って、伝送速度の高速化に伴って生じる回路規模・消費電力の増大、信号伝送品質の劣化、周波数資源の浪費、という大きな 3 つの問題を解

決するため、移動無線通信においては「システムの経済的な実現」「高品質伝送の実現」「周波数資源の有効利用」という3つの目標の達成に向けた技術開発が非常に重要となる。よって、本論文においては、これら3つの目標の達成に向けたキー技術となり得る復調アルゴリズムおよびダイバーシチアルゴリズムを提案し、その有用性を明らかにする。

第2章 準備

無線通信に関する技術のうち、既知の主要な技術について述べた。具体的には、波形整形技術、デジタル変復調技術、多重アクセス技術、ダイバーシチ技術、自動再送制御技術、誤り訂正技術、直交周波数分割多重技術、チャープ変換技術について述べた。また、これらに加え、移動無線通信システムにおいて大きな伝送品質劣化を引き起こす要因となるフェージング現象についても述べた。

第3章 チャープ変換を用いた一括復調器

多数の端末から送信された複数の変調信号を一括して復調処理するための回路を、小さな回路規模・消費電力で経済的に実現することができる復調アルゴリズムを提案した。複数の周波数チャンネルで伝送されている帯域制限されたシンボル非同期信号を時間方向に複数シンボル分一括してチャープ変換することにより、従来のチャープ変換型一括復調アルゴリズムを適用した場合に生じる隣接チャンネル干渉や同一チャンネル干渉などの影響を大幅に低減するとともに、チャープ変換後の信号に対して複数の識別点についてサンプリング処理を行い、複数シンボル分の情報を抽出することにより、2並列構成の小さな回路規模の一括復調回路を実現できる一括復調アルゴリズムを考案した。また、プリアンブル信号をチャープ変換した後の特定信号の位相情報に基づいて、複数の識別点についてサンプリング処理を行う際に必要となる各周波数チャンネルのシンボルタイミングを検出するアルゴリズムも併せて考案した。計算機シミュレーションによる評価の結果、扱うチャンネル数が多い場合に従来のアルゴリズムによるものよりも小さな消費電力の一括復調回路を実現できることを明らかにした。

第4章 最大比合成型ダイバーシチ受信機

複数あるダイバーシチ合成法の中で最も高い利得が得られる最大比合成ダイバーシチを、小さな回路規模・消費電力で経済的に実現する信号処理アルゴリズムを提案した。多くの無線通信システムにおいて用いられている差動符号化された位相変調信号に対し、従来の手法のように各ダイバーシチブランチの受信信号を最大比合成したベクトル信号を算出した後に位相を検出するのではなく、最大比合成後のベクトル信号の位相のみを直接的に算出する手法を用いることに加え、広いダイナミックレンジを有する受信信号を一定の信号振幅にするために各ダイバーシチブランチに設けられるリミッタアンプが出力する受信電界強度を表す信号が対数出力となっていることを活用することにより、回路規模の大きな直交検波回路や乗算回路を用いることなく小さな回路規模で最大比合成ダイバーシチ受信回路を構成できるダイバーシチ合成処理アルゴリズムを考案した。なお、このアルゴリズムは、2ブランチおよび4ブランチの最大比合成ダイバーシチへの適用が可能である。計算機シミュレーションによる評価の結果、従来のアルゴリズムによるものよりも小さな回路規模・消費電力で高い利得が得られるダイバーシチ合成回路を実現できることを明らかにした。

第5章 ビットの重要度の違いを活用した周波数ダイバーシチ

伝送する情報ワードを構成する各ビットを重要度に応じて伝送品質の異なる周波数チャンネルに適

応的に割り当てて送信することにより、周波数資源を有効利用しつつ伝送情報品質の向上を実現する周波数ダイバーシチアルゴリズムを提案した。マルチパス伝搬環境下では周波数選択性フェージングの影響により各周波数チャネルの伝送品質に差が生じることを積極的に利用し、伝送する情報ワードを構成する各ビットについて、重要度の高いビットを伝送品質が良い周波数チャネルを用いて伝送し、重要度の低いビットを伝送品質が良くない周波数チャネルを用いて伝送することにより、周波数利用効率を劣化させることなく伝送情報品質を実効的に向上させるダイバーシチアルゴリズムを考案した。なお、このアルゴリズムには、周波数利用効率を劣化させずに全体としてのビット誤り率特性の改善に依ることなく実効的に伝送情報品質の向上を図るという特徴がある。計算機シミュレーションによる評価では、PHSなどで用いられている4ビット適応差分PCM音声符号伝送に提案アルゴリズムを適用した場合の特性評価を行い、提案アルゴリズムによって高い音声品質向上効果を得ることができることを明らかにした。

第6章 周波数ダイバーシチと組み合わせた自動再送制御

周波数ダイバーシチ効果により自動再送回数を大幅に低減し、周波数資源を有効利用するため、直交周波数分割多重（OFDM）システムに適したパケット合成型のダイバーシチアルゴリズムを提案した。OFDM方式を用いてマルチパス伝搬環境下で高速伝送を行う場合に周波数選択性フェージングの影響によりOFDM信号の各サブキャリアの伝送品質に差が生じる点に着目し、パケット再送時に各サブキャリアへの信号の割り当てパターンを再送回数に応じて規則的に変更して送信し、受信側にて既に受信済みの信号とダイバーシチ合成を行うアルゴリズムを考案した。なお、複雑な適応制御を行うことなく簡易な制御によりOFDMの各サブキャリアの品質の違いを利用して周波数ダイバーシチ効果を得るのが提案アルゴリズムの特徴である。計算機シミュレーションによる特性評価の結果、提案したアルゴリズムを適用した場合に、従来のアルゴリズムと比較して自動再送制御における再送回数が大幅に低減され周波数利用効率が向上することを明らかにした。

第7章 結論

本論文では、無線通信サービスの更なる発展のためのキーとなる「システムの経済的な実現」「高品質伝送の実現」「周波数資源の有効利用」の達成に向けた復調アルゴリズムおよびダイバーシチアルゴリズムを提案した。具体的には、多数の端末から送信された複数の変調信号を一括して復調処理するための回路を小さな回路規模・消費電力で経済的に実現することができる復調アルゴリズム、複数あるダイバーシチ合成法の中で最も高い利得が得られる最大比合成ダイバーシチを小さな回路規模・消費電力で経済的に実現する信号処理アルゴリズム、伝送する情報ワードを構成する各ビットを重要度に応じて伝送品質の異なる周波数チャネルに適応的に割り当てて送信することにより周波数資源を有効利用しつつ伝送情報品質の向上を実現する周波数ダイバーシチアルゴリズム、周波数ダイバーシチ効果により自動再送回数を大幅に低減して周波数資源を有効利用するOFDMシステムに適したパケット合成型のダイバーシチアルゴリズムを提案し、その有用性を明らかにした。

また、移動無線通信の特長であるモビリティを活かした高いサービス性を有するサービスアプリケーションの実現が今後の無線通信サービスの発展にとって重要となるため、無線通信技術、有線通信技術およびインターネット技術をうまく組み合わせたサービス性の高い魅力あるサービスアプリケーションの開発、および、異なる技術分野の複数の技術を組み合わせることで相乗効果を発揮することのできる効率的な信号処理技術の確立、の2つを無線通信の今後の発展に向けた課題として提言した。

論文審査結果の要旨

無線 LAN や携帯電話などの無線通信システムにおいては、伝送速度の高速化とともに、システムの経済的な実現、周波数資源の有効利用および高品質伝送が強く望まれている。著者は、多数の変調信号を小さな回路規模・消費電力で一括復調処理するアルゴリズム、周波数チャネル間の伝送品質差を活用して伝送情報品質を向上させるダイバーシチアルゴリズムなどを考案し、その有用性を明らかにした。本論文はその成果を取りまとめたものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、無線通信に関する主要な技術について概観している。

第3章では、多数の変調信号を一括して復調処理する回路を小さな回路規模・消費電力で経済的に実現するための復調アルゴリズムを提案している。複数の周波数チャネルで伝送されている非同期の帯域制限信号を、時間方向に複数シンボル分一括してチャープ変換することにより、隣接チャネル干渉や同一チャネル干渉などが大幅に低減することを示した。また、チャープ変換後の信号に対して複数識別点サンプリング処理を行い、複数シンボル分の情報を抽出することにより、2並列構成の小さい復調回路が実現できることを示した。計算機シミュレーションにより評価を行い、扱うチャネル数が多い場合に従来のアルゴリズムよりも消費電力の小さい一括復調回路が実現できることを明らかにしている。これは、実用上有用な成果である。

第4章では、最大比合成ダイバーシチを小さな回路規模・消費電力で実現するための信号処理アルゴリズムを提案している。従来のように各ダイバーシチブランチの受信信号から最大比合成したベクトル信号を算出した後に位相を検出するのではなく、最大比合成後のベクトル信号の位相のみを直接的に算出している。更に、各ダイバーシチブランチに設けられているリミッタアンプの受信電界強度信号が対数出力であることを利用して、最大比合成ダイバーシチ受信回路を小さな回路規模で構成している。計算機シミュレーションにより評価を行い、従来のアルゴリズムによる回路よりも小さな回路規模・消費電力で高いダイバーシチ利得が得られることを明らかにしている。これは、実用上有用な成果である。

第5章では、マルチパス伝搬環境下において各周波数チャネルの伝送品質に差が生じることを利用し、重要度の高いビットを伝送品質が良い周波数チャネルで伝送し、重要度の低いビットを伝送品質が良くない周波数チャネルで伝送することにより、周波数利用効率を劣化させることなく伝送情報品質を実効的に向上させるダイバーシチアルゴリズムを提案している。提案アルゴリズムを4ビット適応差分PCM音声符号伝送に適用した場合の評価を計算機シミュレーションにより行い、音声品質が大きく向上することを明らかにしている。このアルゴリズムは、周波数利用効率を劣化させずに伝送情報品質を向上させることができ、重要な成果である。

第6章では、自動再送回数を大幅に低減するために、直交周波数分割多重（OFDM）方式に適したパケット合成型のダイバーシチアルゴリズムを提案している。マルチパス伝搬環境下で高速伝送を行う場合にOFDM信号の各サブキャリアの伝送品質に差が生じることに着目し、パケット再送時に各サブキャリアへの信号の割り当てパターンを再送回数に応じて規則的に変更して送信し、受信側にて既に受信済みの信号とダイバーシチ合成を行う。計算機シミュレーションによる評価を行い、提案アルゴリズムを適用した場合に、再送回数が大幅に低減され、周波数利用効率が向上することを明らかにしている。このアルゴリズムは、複雑な適応制御によらず簡易な制御により周波数ダイバーシチ効果を得ており、無線 LAN などに有効である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は、無線通信システムの経済的な実現、周波数資源の有効利用および高品質伝送を達成するために、新しい復調アルゴリズムおよびダイバーシチアルゴリズムを提案し、その有用性を明らかにしたものであり、システム情報科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（情報科学）の学位論文として合格と認める。