

| | |
|------|-------------|
| 報告番号 | 甲 第 12052 号 |
|------|-------------|

主論文の要旨

論文題目 マルチキャリア変調を用いた空間多重無線システムのための伝搬路トラッキング技術
(Channel tracking techniques for spatial multiplexing wireless systems using multicarrier modulation)

氏 名 浅井 裕介

論文内容の要旨

著者は、本論文においてマルチキャリア信号を用いた空間多重無線システムにおける伝搬路変動に起因する伝送特性の劣化を抑制する伝搬路トラッキング技術を提案した。また、計算機シミュレーションおよび実験装置を用いた評価を通じて、提案技術の特性改善効果ならびにハードウェア実装に対するフィージビリティの高さを示した。

第 1 章では、本論文の背景および解決すべき課題について整理を行った。代表的なマルチキャリア信号を用いた空間多重無線システムとして、IEEE 802.11 標準に準拠した無線 LAN システムが挙げられる。スマートフォンやタブレットに代表されるモバイルデバイスは、処理能力の急速な進化および高いユーザビリティに伴い 2010 年代に利用者数が急増した。加えて、高精細映像のストリーミング配信やソーシャルネットワークサービスのコンテンツの送受信といったアプリケーションの利用拡大に伴い、モバイルトラフィックは今後も増加傾向が継続する見通しである。無線 LAN は、モバイルトラフィックを収容する低コストで運用可能な高速無線回線として重要な位置づけを占めている。通信キャリアは、ネットワーク運用コストを低減するために、セルラシステムから無線 LAN へモバイルトラフィックをオフローディングさせている。このオフローディングの利用ケースとして、公衆環境における利用（公衆無線 LAN と呼ばれる）の需要が急増しており、収容力の向上が課題となっている。無線 LAN が利用する周波数帯が免許不要であり他のシステムと共用されること、また、周波数帯域は限りがあり今後も抜本的に無線 LAN 向けの割当が増加する見通しが無いことから、チャンネル幅を拡大することなく伝送速度を高める空間多重伝送が

公衆無線 LAN の容量拡大には必須となる。その一方で、公衆無線 LAN では、接続される端末はユーザが持ち運ぶモバイルデバイスが主流であるため、ユーザの移動に伴う伝搬路の変動が誤り率特性の劣化要因となることが想定される。そこで、伝搬路の変動による特性劣化の影響の確認、この問題を解決する技術が満足すべき要求条件の整理、さらにこれらの検討を踏まえた上で特性劣化を抑制するための伝搬路トラッキング技術の提案、以上を本論文の目標と設定した。

第 2 章では、公衆環境において無線 LAN を利用した場合の伝搬路変動に起因する特性劣化の確認、解決技術に対する要求条件、要求性能の設定について議論を行った。はじめに、IEEE 802.11 無線 LAN 規格の MAC (Medium Access Control, 媒体アクセス制御) 層および物理層の技術について概説を行った。MAC 層では、免許不要周波数帯の運用に適した CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with collision avoidance) に基づく自律分散型アクセスが用いられており、ベストエフォート型のサービスを提供する。物理層の高速化技術として、変調方式の多値化、チャネル幅の拡大、空間多重伝送が用いられる。また、MAC 層の高効率化技術として、複数のデータサブフレームを連結して単一の無線フレームで送信するサブフレーム集約が用いられる。これらの高速化技術・高機能化技術を公衆環境で利用する場合を想定したシステムパラメータを用いた計算機シミュレーションを実施し、無線フレームの後方のデータサブフレームにおいて誤り率特性の劣化が生じることを確認した。無線 LAN における伝搬路推定は無線フレーム先頭のプリアンプルを用いて行われる。サブフレーム集約の適用により無線フレームの時間長が長くなること、ならびに、空間多重伝送により高い CNR が必要となることから、時間経過に伴う伝搬路推定誤差の拡大が特性劣化の要因となる。この課題を解決するために伝搬路変動に追従するトラッキング技術が必要であることを示した。そして、無線 LAN システムにおける伝搬路トラッキング技術の要求条件について考察を行い、「IEEE 802.11 規格との適合性を持つ」「伝搬路の統計的性質を用いない」「受信機の処理遅延を増加させない」「演算量が少ない」「歩行速度の移動環境をサポートする」という 5 種類となることを整理した。併せて、既存の伝搬路トラッキング技術は上記 5 種類の要求条件を全て満足しないため、新たな技術が必要であることを確認した。最後に、本論文の第 3 章における提案技術である「判定帰還型伝搬路トラッキング技術」の詳細な説明に先立ち、要求条件を達成するための基本方針を説明した。

第 3 章では、本論文の一つ目の提案技術である「判定帰還型伝搬路トラッキング技術」の詳細な説明ならびに特性評価を行った。提案技術では、受信機において送信信号レプリカ行列を再生し、これを用いて伝搬路仮推定を行うことで無線フレーム内のパイロット信号の挿入を不要とし、IEEE 802.11 規格との適合性を持たせている。また、送信信号レプリカから導出した伝搬路仮推定値の推定精度が低い問題を、複数の異なる時刻に導出された仮推定値を近似的な最大比合成に基づく重み付けを行うことで推定精度を高め、さらに既定の推定精度を上回る合成結果のみを伝搬路推定値として用いることで解決している点

が特長である。さらに、送信信号レプリカの誤りに起因する信頼性の低い伝搬路仮推定値を除外する伝搬路仮推定フィルタを導入している。このフィルタを適用することで、サブフレーム誤り率 (Sub-Frame Error Rate, SFER) のフロアの解消を実現する。送信信号レプリカを用いた伝搬路仮推定、仮推定値の重み付け合成、伝搬路仮推定フィルタの処理については、サブキャリア毎の処理とすることで少ない演算量で実現可能としている。さらに、提案技術は伝搬路推定処理と受信信号に対する復調・復号処理を並列に処理することで、処理遅延を増加させずに実装可能である点も特長である。以上の特長から、提案した判定帰還形伝搬路トラッキング技術は、第 2 章において設定した信号処理面の要求条件を全て満足している。提案技術について、計算機シミュレーションにより特性評価を行った。提案技術の適用により、受信機が歩行速度、すなわち時速 4km/h で移動する環境において、 $SFER=1e-2$ を達成する所要 CNR の劣化量を 0.1dB 以下に抑制し、静止環境とほぼ同等の特性を実現することから、性能面の要求条件も満足することを確認した。以上の評価結果ならびに考察から、提案した伝搬路トラッキング技術は、本論文の第 2 章において設定した目標をすべて達成すると結論づけた。

第 4 章では、第 3 章で提案した判定帰還形伝搬路トラッキング技術における伝搬路の仮推定値の重み付け合成処理における課題について考察を行い、これを基に本論文における二つ目の提案技術である「逐次合成判定帰還型トラッキング技術」について、詳細な説明および特性評価を行った。第 4 章の提案技術では、推定された伝搬路仮推定値と直前に用いた伝搬路推定値とを重み付け合成し、これを現在のブロックに伝搬路推定値として用いることで伝搬路推定値の更新頻度を高めている。この重み付け合成演算において、再帰的な重み付け合成演算が含まれることから、直前のブロックの伝搬路推定値に対する重み係数が直接的に導出できない問題に対して考察を行った。解決手段として、重み係数が満足すべき要求条件を設定し、追加の仮定を適用することで重み係数を演繹的に導出する手法を提案し、重み付け合成演算を可能とした。提案技術について計算機シミュレーションによる SFER 特性改善効果を行い、第 3 章の提案技術「判定帰還形伝搬路トラッキング技術」と比較して所要 CNR 特性を 1.0dB 改善する効果を生むことを明らかにした。この所要 CNR の改善効果から、IEEE 802.11n/ac 標準化において用いられた伝搬距離に対する減衰モデルおよび回線設計パラメータを用いることでカバレッジエリアを計算し、高速伝送エリア (物理層における伝送速度 162Mbit/s を達成するエリア) を 10% 拡大することが可能であることを明らかにした。

第 5 章では、第 3 章の判定帰還形伝搬路トラッキング技術を FPGA (Field Programmable Gate Array) 回路に実装した実験装置の概要ならびにフェージングシミュレータを用いた伝送特性評価結果を示した。静止環境と比較した所要 CNR 劣化量が小さい領域、すなわち伝搬路トラッキング技術がその効果を発揮する領域において、実験結果と計算機シミュレーション結果が概ね符合した良好な特性が得られることを明らかにした。これにより、ハードウェア実装における特性劣化の影響が少ないことを確認した。さらに、FPGA に実装

された送受信回路の規模を、ゲート数を指標として定量評価を行った。送受信信号処理のゲート数に対して、提案する判定帰還形伝搬路トラッキング回路を追加するために必要となる回路規模は全体の約 35%となった。一方、既存技術であるカルマンフィルタを用いた伝搬路トラッキング技術はその 100 倍 (3500%) もの回路規模が必要となる。このことから、提案する判定帰還型伝搬路トラッキング技術が、現実的な回路規模で実装可能であることを示した。また、第 4 章において提案した逐次合成判定帰還形伝搬路トラッキング技術についても、追加の回路規模が 40%程度であることを第 3 章の評価結果を踏まえて導出した。以上の回路規模評価結果より、第 3 章の提案技術と第 4 章の提案技術の双方が実装のフィージビリティが高いこと結論づけた。

最後に、第 6 章において本論文を総括した。「判定帰還形伝搬路トラッキング技術」および「逐次合成判定帰還形伝搬路トラッキング技術」を活用することで、モバイルデバイスを保有するユーザが移動する公衆環境において、無線 LAN を用いて安定した高速通信が実現可能となり、公衆無線 LAN ユーザの体感品質 (QoE: Quality of Experience) の改善およびセルラトラフィックのオフローディングによるネットワーク運用コスト (OPEX: Operation EXpense) の削減が実現可能となることを示した。また、本論文で提案された伝搬路トラッキング技術は、サブキャリア毎の演算処理を行うことから、無線 LAN に限らずマルチキャリア変調において空間多重伝送を用いるシステム全般に対して適用可能であり、汎用性が高いことが特長である。たとえば、下りリンクあるいは上りリンク OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 伝送において、複数のユーザに割り当てられた周波数ブロック毎に本技術を適用することが可能である。さらに、上りリンクマルチユーザ MIMO (Multiple Input, Multiple Output) 伝送において、複数ユーザから送信され空間多重され基地局により受信される信号に対しても適用可能である。その一方で、本技術の適用領域を明らかにするためのこれらの多様な伝送形態に対する特性評価やパラメータ最適化はまだ十分に行われておらず、今後の検討課題となっている。