

お ば ら た つ の り	
氏 名	小 原 辰 徳
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成24年9月25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	広帯域シングルキャリア移動無線通信における周波数領域線形信号処理とその応用に関する研究
指 導 教 員	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 川又 政征

論 文 内 容 要 旨

広帯域シングルキャリア(SC)伝送では、周波数選択性フェージングにより符号間干渉(ISI)が発生し、伝送特性が著しく劣化する。このようなスペクトル歪みを補償し、優れた伝送特性を達成できる等化技術として、最小平均二乗誤差規範に基づく1タップ周波数領域等化(MMSE-FDE)が知られている。MMSE-FDEを用いるSC伝送は、サイクリックプレフィックス(CP)挿入を用いるブロック伝送である。実伝送システムでは送信帯域制限を行うため送信フィルタが用いられるが、受信タイミングオフセットが発生すると伝送特性が劣化してしまうという問題があった。また、ブロック間干渉(IBI)を避けるためのCP挿入は伝送効率を低下させてしまうという問題があった。本論文は、受信タイミングオフセットが存在するときの伝送特性の向上および伝送効率の向上を可能とする周波数領域線形信号処理に関する一連の研究をまとめたもので、全編4章からなる。

第1章は緒論であり、移動無線通信技術の発展と現状、広帯域無線信号伝送における周波数選択性フェージングチャンネルの問題とその克服技術について述べ、FDE技術の重要性、およびその実現のための克服すべき課題を挙げ、本論文の目的を述べている。

第2章では、広帯域SC伝送におけるサンプリングタイミングオフセットの影響の抑圧を目的としてジョイントMMSE-FDE・スペクトル合成を提案し、その適用効果を計算機シミュレーションにより明らかにしている。ナイキスト伝送系において、シンボルレートでのサンプリングを行う際、サンプリングタイミングオフセットが存在すると、位相回転を起こした信号スペクトルの重なりによって発生するスペクトル歪みが発生する。そのスペクトル歪みにより伝送特性の劣化が生じることをまず明らかにしている。その議論を踏まえ、受信信号をオーバーサンプリングしてスペクトルの重なりを防ぎ、FDEとスペクトル合成を行うことで、チャンネルの周波数選択性による歪みとタイミングオフセットによる位相回転を補償しつつ、ナイキストの第1条件を満たしたISIのないスペクトルを再生できることを示唆し、FDEとスペクトル合成をMMSE規範で同時に行うための最適MMSE-FDE重みを導出している。図1に提案ジョイントMMSE-FDE・スペクトル合成を用いたときの平均ビ

ット誤り率(BER)特性を示している。従来のシンボルレートサンプリング MMSE-FDE を用いると、タイミングオフセットが発生した時、ロールオフファクタが大きくなるにつれ BER 特性が劣化してしまう。一方、提案ジョイント MMSE-FDE・スペクトル合成を用いれば、タイミングオフセットによる特性劣化を引き起こすことなく、ロールオフファクタの増加に伴い増大する周波数ダイバーシチ効果により、優れた BER 特性を達成できる。また、ジョイント MMSE-FDE・スペクトル合成のためのチャンネル推定法として、判定帰還を用いる最尤チャンネル推定(MLCE)について検討を行っている。オーバーサンプリングされた受信パイロット信号を用いることで、チャンネルの伝達関数とタイミングオフセットによる位相回転係数の積を新たな等価チャンネル伝達関数として一括推定できることを示している。図2に MLCE を用いたときの平均 BER 特性を示している。MLCE を用いることにより、パイロットのみを用いる MMSE-PACE に比べ、理想チャンネル推定時からの特性劣化を低減できる。

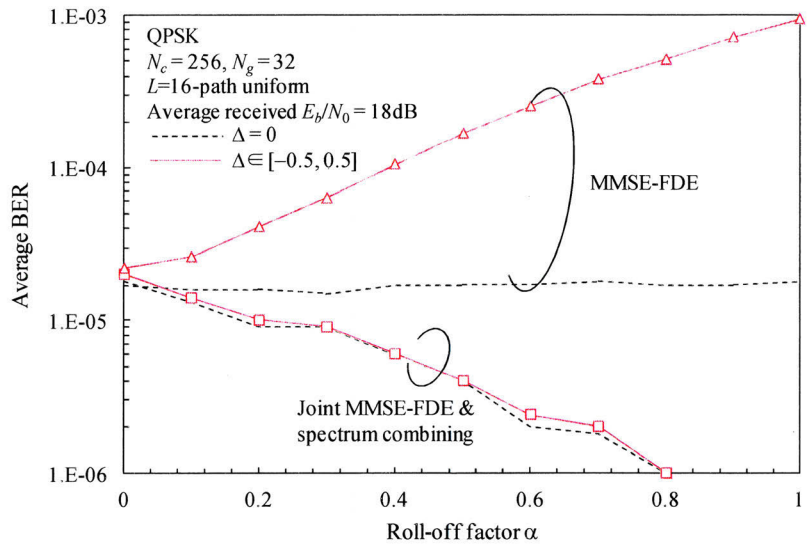


図1 ジョイント MMSE-FDE・スペクトル合成の平均 BER 特性

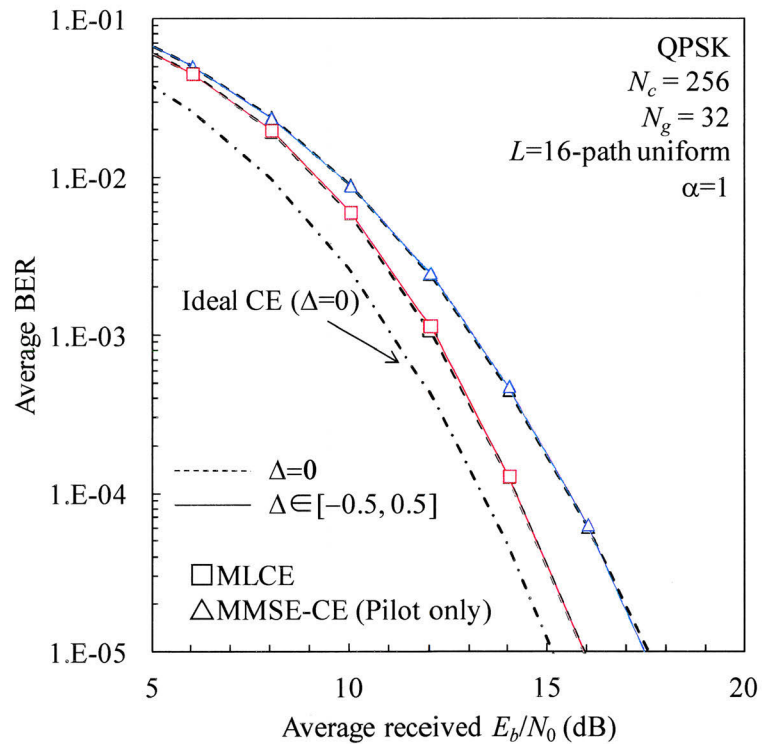


図2 チャンネル推定時の提案法の平均 BER 特性

第3章では、CP 挿入を必要としないオーバーラップ FDE を用いる SC 伝送に関する理論解析を行っている。MMSE-FDE 後の残留 IBI は、等化出力ブロックの両端付近に大きな電力が集中し、ブロック中央部分では IBI の影響が非常に小さい。オーバーラップ FDE はこの現象を利用し、FDE 後の出力ブロックから残留 IBI の影響の小さい中央部分のみを取り出す操作を繰り返していくことで、複雑な処理を必要とせず残留 IBI を効果的に抑

圧できる。CP 挿入を行わないことによる残留 IBI 電力の等化出力ブロック内分布の理論式、および BER の理論値を導出し、数値計算および計算機シミュレーションにより、オーバーラップ FDE の有効性を示している。また、導出した残留 IBI 電力の理論式を用いて抽出シンボル数 M の最適値を示した。 M の値は特性改善効果の獲得と演算量の増加のトレードオフの関係にあり、特性改善効果が最大限得られる最大の M を設定する必要がある。図 3 にオーバーラップ FDE の平均 BER 特性の理論値、およびシミュレーション

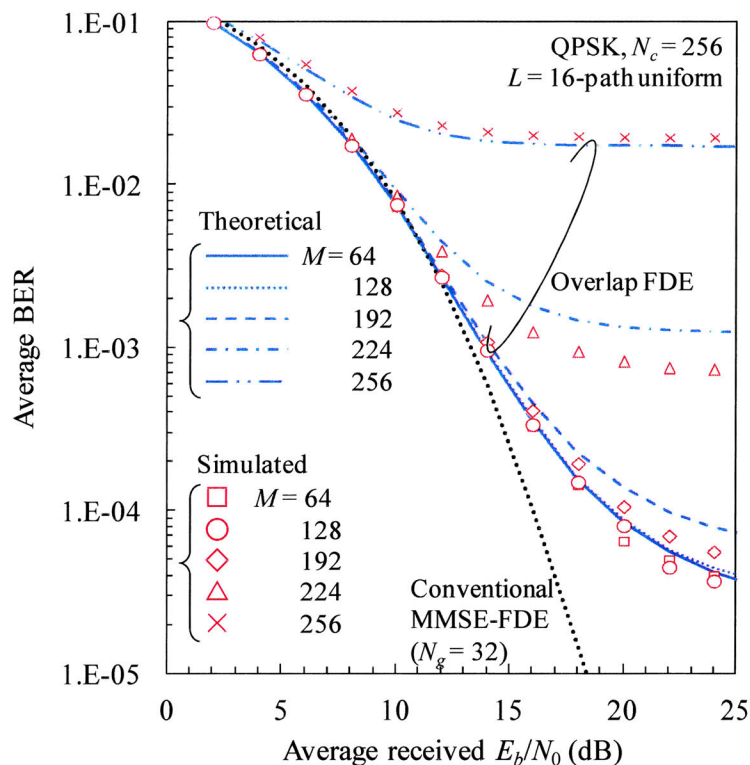
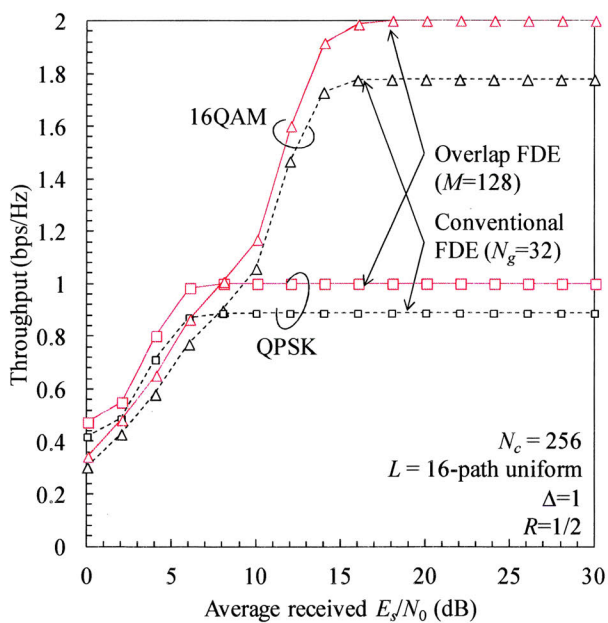
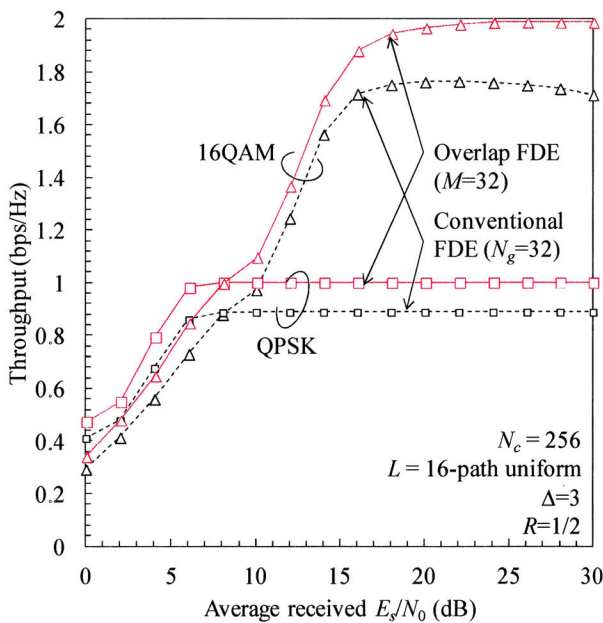


図 3 オーバーラップ FDE の平均 BER 特性



(a) CP 長以内の最大遅延時間



(b) CP 長の 1.5 倍の最大遅延時間

図 4 オーバーラップ FDE のスループット特性

値を示している。 M の値を小さくするほど BER 特性は改善し、従来の CP 挿入を行う MMSE-FDE の特性に近づけることができるが、特性改善効果に限界があることが分かる。また、理論値とシミュレーション値がほぼ一

致していることから、理論解析の妥当性が示されている。図 4 にスループット特性を示している。従来の MMSE-FDE では、CP 挿入によるピークスループットの低下が見られる一方、オーバーラップ FDE では CP 挿入を必要としないため、従来法に比べて高いスループットを達成できる。また、図 4(b)に示すように、CP 長を超える遅延時間を有する伝搬環境においては、従来 MMSE-FDE は IBI の影響によりスループットが更に低下してしまう。一方、オーバーラップ FDE は M の値を適応的に変えるだけで、長遅延時間の存在にも柔軟な対応ができ、スループットの低下を回避することができる。

第 4 章は結論であり、本論文のまとめおよび今後の検討課題について言及している。

論文審査結果の要旨

広帯域シングルキャリア(SC)伝送では、周波数選択性フェージングにより符号間干渉(ISI)が発生し、伝送特性が著しく劣化する。このようなスペクトル歪みを補償し、優れた伝送特性を達成できる等化技術として、最小平均二乗誤差規範に基づく1タップ周波数領域等化(MMSE-FDE)が知られている。MMSE-FDEを用いるSC伝送は、サイクリックプレフィックス(CP)挿入を用いるブロック伝送である。実伝送システムでは送信帯域制限を行うため送信フィルタが用いられるが、受信タイミングオフセットが発生すると伝送特性が劣化してしまうという問題があった。また、ブロック間干渉(IBI)を避けるためのCP挿入は伝送効率を低下させてしまうという問題があった。本論文は、受信タイミングオフセットが存在するときの伝送特性の向上および伝送効率の向上を可能とする周波数領域線形信号処理に関する一連の研究成果をまとめたもので、全編4章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、受信信号をオーバーサンプリングして周波数領域信号に変換した後に、1タップFDEとスペクトル合成を同時に行ってISIを抑圧するジョイントMMSE-FDE・スペクトル合成を提案し、スペクトル合成後の直交周波数毎の平均二乗誤差を最小とするMMSE-FDE重みを導出している。このMMSE-FDE重みを用いれば、タイミングオフセットによる伝送特性の劣化を低減しつつ周波数ダイバーシチ効果を得ることができる。ロールオフファクタが1の自乗余弦送信フィルタを用いるとき、ビット誤り率(BER)= 10^{-3} を達成するための所要信号対雑音電力比を従来のMMSE-FDEより約7dB低減できることを計算機シミュレーションにより明らかにしている。これは、受信タイミングオフセットが存在する実伝送環境下において、広帯域SCブロック伝送を実現できることを示した重要な成果である。

第3章では、CP挿入を必要としないオーバーラップMMSE-FDEに関する理論検討を行っている。CP挿入しないSCブロック伝送に従来のMMSE-FDEを適用すると、FDE後にIBIが残留し、これがBER特性を劣化させてしまう。オーバーラップMMSE-FDEは、FDE出力ブロックの両端付近にのみ残留IBIが集中していることを利用し、残留IBIの小さいブロック中央部分のみ抽出する。演算量の観点から抽出シンボル数をできるだけ大きくすることが望ましいが、抽出シンボル数を大きくし過ぎると残留IBIが残留ISIよりも大きくなってしまい、BER特性が劣化してしまう。そこで、残留IBIのガウス近似を用いたBERの理論検討により、残留IBI電力を残留ISI電力以下にできる抽出シンボル数の許容最大値を数値計算により求めている。計算機シミュレーションにより、オーバーラップMMSE-FDEはCP挿入を必要とする従来のMMSE-FDEより約11%高いスループットを実現できることを明らかにしている。次に、CP挿入を必要とするMMSE-FDEでは、伝搬路の遅延時間がCP長を超えるとIBIが発生してスループットが大幅に低下してしまうことを指摘している。一方、オーバーラップMMSE-FDEでは、抽出シンボル数を遅延時間の変動に合わせて変更することで常に優れたスループット特性を実現できることを述べている。これらは、遅延時間が変動する実伝搬環境下における伝送効率に優れたSCブロック伝送の実現に寄与する実用的に優れた成果である。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、広帯域移動無線通信システムの実現に向けて受信タイミングオフセットが存在するときの伝送特性の向上および伝送効率の向上を可能とする周波数領域線形等化技術を提案し、その有効性を明らかにしたものであり、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。