

	たけだ かずき
氏 名	武田 一樹
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成22年9月8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	広帯域移動無線通信における周波数領域送受信協調等化技術に関する研究
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

本論文はチャンネル情報を送受信機で共有し、送信機と受信機でそれぞれ1タップ周波数領域等化 (FDE) を同時に用いる送受信協調型等化技術に関する一連の研究成果をまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は緒論である。無線チャンネルは遅延時間の異なる多数のパスにより構成されるマルチパスフェージングチャンネルであり、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発生する受信信号スペクトル歪のために伝送特性が著しく劣化する。したがって、このようなスペクトルの歪を補正するチャンネル等化技術が必要不可欠である。最近では、簡易な構成ながら優れた伝送特性を実現できる1タップ受信周波数領域等化 (FDE) が盛んに検討されるようになった。特に最小平均二乗誤差 (MMSE) 規範に基づく FDE 重みを用いれば、チャンネルの周波数選択性を積極活用して周波数ダイバーシチ効果が得られるので、優れた伝送特性を実現できることが知られている。本章では以上のような FDE を用いる SC 伝送に関する先行研究について概説し、これまで提案されてきた様々な FDE やその適用効果について述べている。

第2章では、1タップ FDE を送受信機で用いる送受信協調 FDE を提案している。提案法において、送受信間チャンネル情報が与えられたときの送信および受信 FDE 重みを MMSE 規範に基づき理論的に導出している。最小化すべき目的関数は平均二乗誤差 (MSE) であるが、最適な送信および受信 FDE 重みを同時に導出するのは困難であることを述べ、2段階に分けて FDE 重みを求める方法を示している。まず、送信 FDE とチャンネルを連結した等価チャンネルに対して MSE を最小とする受信 FDE 重みを求める。次に、求めた受信 FDE 重みの下で MSE を最小とする送信 FDE 重みを求める。このようにして2つの FDE 重みを一意に求めることができる。さらに提案法をハイブリッド自動再送要求 (ARQ) に適用し、再送パケット合成を用いる送受信協調 FDE へと拡張している。ハイブリッド ARQ では、受信側で復号を行ったパケットに誤りが検出されなくなるまで同一パケットの再送と合成を繰り返す。提案技術では、再送毎に送信 FDE を行い、受信側では FDE によりパケット合成を行う。このような提案技術において、再送毎の送信 FDE 重みとパケット合成に用いる受信 FDE 重みを MMSE 規範に基づき理論的に導出している。また、その伝送特性改善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。

図1に、QPSKを用いたときの送受信協調FDEを用いるSC伝送の平均ビット誤り率（BER）特性を示す。横軸は送信ビットエネルギー対雑音電力スペクトル密度比（ E_b/N_0 ）である。ここで、伝搬路は $L=16$ の独立なパスを有する周波数選択性ブロックレイリーフェージングチャネルであり、 α dBの指数減衰電力遅延プロファイルを有するものとしている。理想チャネル推定を仮定している。比較のため、受信FDEのみを単独で用いた場合（従来技術）のBER特性を併せて示す。図より $\alpha=0$ dB（一様電力遅延プロファイル）のとき、提案技術は $BER=10^{-4}$ を達成する所要 E_b/N_0 を受信FDEのみの従来技術より約1.8dB低減し、優れたBER特性を実現できることが分かる。図2では、符号化率 $R=1/2$ のターボ符号を適用し、再送パケット合成を用いる送受信協調FDEへと拡張した時の平均パケット誤り率（PER）特性を示している。横軸は送信シンボルエネルギー対雑音電力スペクトル密度比（ E_s/N_0 ）であり、パラメータ M は、再送により合成されるパケットの最大個数（初回含む）を表わしている。図より、受信側のみでFDEを適用しパケット合成を行う従来技術と提案技術との特性差は、 M の値が増すごとに大きくなることが分かる。例えば、 $M=1$ のとき提案法は $PER=10^{-1}$ を確保するための所要送信 E_s/N_0 を従来法よりも約0.3dBしか低減できないが、 $M=4$ のときには約2dB低減できる。これは送受信協調FDEにより高いパケット合成効果が達成されていることを表わしている。以上の成果は、送受信協調処理の有効性を示したもので、無線技術の今後の方向を示唆する優れた成果である。

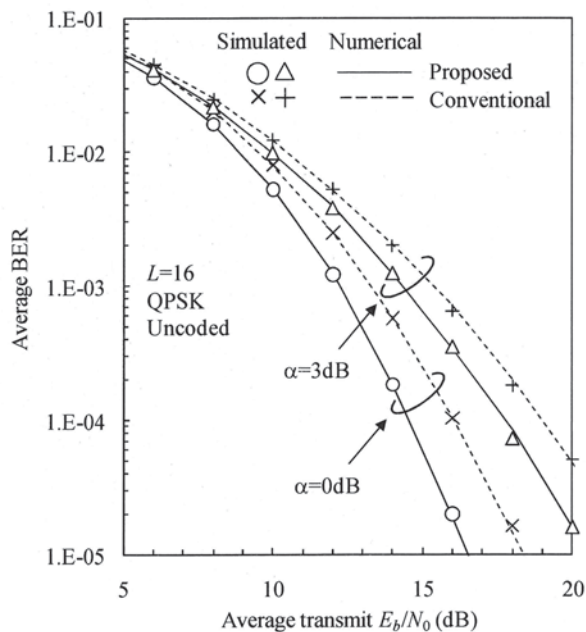


図1 送受信協調FDEの平均BER特性

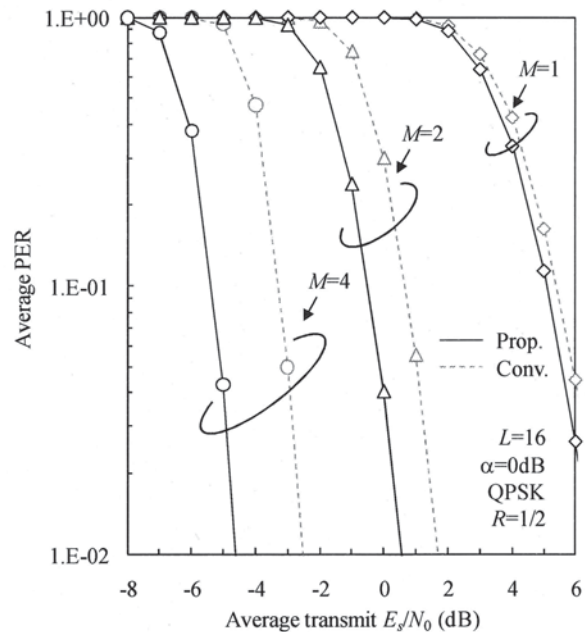


図2 再送パケット合成を用いる送受信協調FDEの平均PER特性

第3章では、さらに優れた伝送特性を実現することを目的とし、送受信協調FDEの受信側に繰り返しFDEを導入する送受信協調繰り返しFDEを提案している。送受信協調FDEの伝送特性改善効果に限界を与えている主要因は、等化を行っても補正しきれないスペクトルの歪が生み出す残留符号間干渉（ISI）である。送受信協調繰り返しFDEではこの問題を解決するため、受信側にて等化後に得られる軟判定値系列を元に残留ISIレプリカを求め、フィードバックして受信信号に対しISIキャンセルを行う。再び等化を行い、新たに得られた軟判定値系

列を元に残留 ISI レプリカを更新し、再びフィードバックを行って ISI をキャンセルする。これを十分な回数繰り返すことにより、残留 ISI を大幅に抑圧できる。一方、送信側では 1 タップ FDE を適用して信号を送信する。このとき送信側では、受信 FDE と ISI キャンセルとを繰り返した後の残留 ISI の大きさを予測し、送信 FDE を行う。このような提案技術において、送信 FDE 重みと受信 FDE 重みを MMSE 規範に基づき理論的に導出している。また、ハイブリッド ARQ において再送パケット合成を用いる送受信協調繰り返し FDE へと拡張している。再送要求があるたびに、受信 FDE を用いるパケット合成と ISI キャンセルとを繰り返した後の残留 ISI の大きさを送信側で予測し、送信 FDE 重みを更新する。提案技術では、送信 E_b/N_0 や誤り訂正符号の符号化率等に応じて適切な予測を行うことで、優れた伝送特性が実現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。図 3 に、送受信協調繰り返し FDE を用いる QPSK 伝送のハイブリッド ARQ スループット特性を示す。横軸は送信 E_b/N_0 である。理想チャネル推定を仮定している。比較のため、受信 FDE のみを用いる場合、受信繰り返し FDE のみを用いる場合、そして送受信協調 FDE を用いる場合のスループット特性も併せて示す。図より、提案技術は最も高いスループットを達成できており、特に送受信協調 FDE と比較すると約 10~27%向上できることがわかる。これは広帯域無線システムの実現に寄与する重要な成果である。

第 2 章および第 3 章では理想チャネル推定を仮定しているが、現実にはチャネル推定値には誤差が存在する。特に提案法では送受信機双方でチャネル情報が必要なるため、推定誤差が伝送特性に及ぼす影響を評価することは重要である。そこで第 4 章では、送受信機におけるチャネル情報の推定誤差を複素ガウス近似し、提案技術を用いたときの伝送特性にチャネル推定誤差が及ぼす影響を計算機シミュレーションにより評価している。図 4 に、チャネル推定誤差が存在する場合に送受信協調繰り返し FDE を用いたときの BER を示す。ここでは 16QAM を用い、符号化率 $R=1/2$ のターボ符号を適用している。送受信機双方におけるチャネル推定誤差は独立であるが、正規化分散は同じであるとしている。横軸は受信機におけるチャネル推定誤差の正規化分散である。比較のため、受信側のみでチャネル推定と繰り返し FDE を行う従来技術の BER も併せて示す。図より、提案技術は送信 $E_b/N_0=15\text{dB}$ のときに $\text{BER}=10^{-4}$ を確保するためのチャネル推定誤差の許容正規化分散を、従来の繰り返し受信 FDE の 2.5 倍程度まで拡大でき、提案技術が不完全チャネル推定にロバストであることがわかる。この結果は、チャネル推定が不完全な実用無線システムにおいても送受信協調型の周波数領域等化技術が適用可能であることを示した重要な成果である。

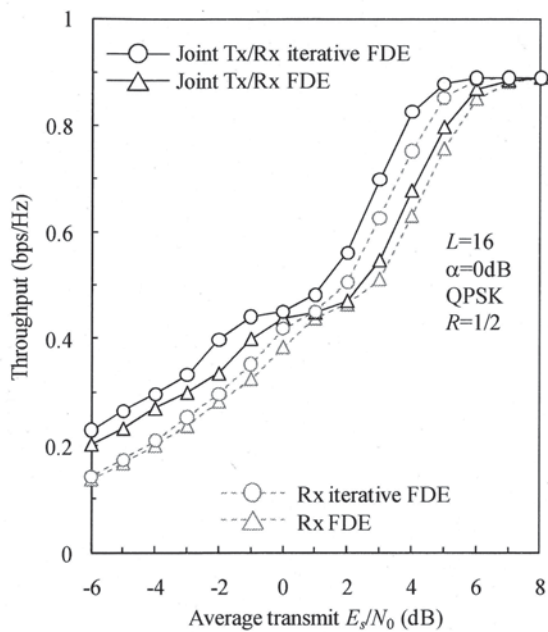


図3 HARQ スループット特性

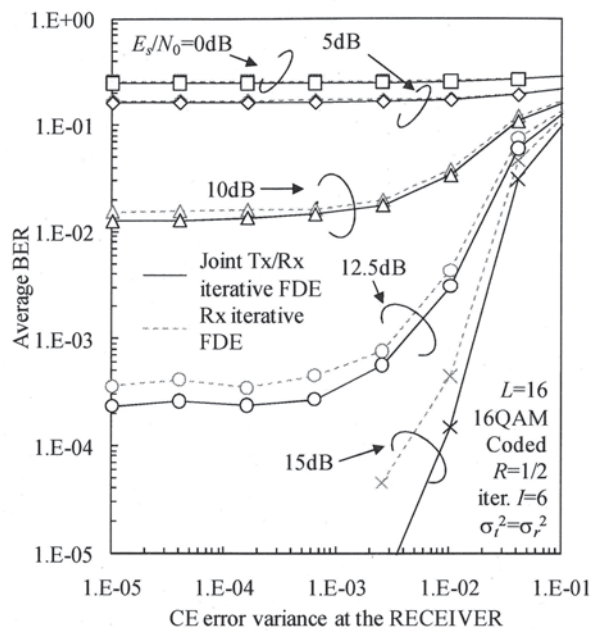


図2 チャンネル推定誤差環境下における送受信協調繰り返しFDEのBER

第5章では、本論文の結論を述べている。本論文では、チャンネル情報を送受信機で共有し、送信機と受信機が協調して行う送受信協調型等化技術に関する一連の研究成果を述べた。はじめに MMSE 規範に基づく送受信協調 FDE を提案し、簡易な 1 タップ FDE を用いる送受信機の協調処理が伝送特性の改善に有効であることを明らかにした。次いで更なる改善を実現するため、MMSE 規範に基づく送受信協調繰り返し FDE を提案した。送信側では、受信側において繰り返しを行った後の残留 ISI を予測して送信 FDE を行い、受信側では繰り返し FDE により逐次的に残留 ISI を抑圧することで優れた更なる伝送特性改善が可能であることを明らかにした。以上の結果が実用無線システムにおいても妥当であることを明らかにするため、チャンネル推定誤差を複素ガウス変数近似し、推定誤差の影響を調べた。その結果、提案技術は不完全なチャンネル推定にロバストであり、送受信機で推定誤差が存在する場合でも優れた伝送特性を実現できることを明らかにした。

論文審査結果の要旨

広帯域シングルキャリア伝送では、周波数選択性フェージングにより発生する受信信号スペクトル歪のために伝送特性が著しく劣化する。1 タップ周波数領域等化 (FDE) は簡易な構成でありながら優れた伝送特性を実現する等化技術として知られているが、伝送特性改善には限界があった。本論文は送信 FDE と受信 FDE を同時に用いる送受信協調型の周波数領域等化技術に関する一連の研究成果をまとめたもので、全編 5 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、最小平均自乗誤差 (MMSE) 規範に基づく送受信協調 FDE を提案し、ハイブリッド自動再送要求における再送パケット合成を用いる送受信協調 FDE へと拡張して、ビット誤り率 (BER) 特性の改善効果について検討している。送受信間チャンネル情報が与えられたときの送信および受信 FDE 重みを理論的に導出している。提案技術は、 $BER=10^{-4}$ を達成する所要送信信号対雑音電力比 (SNR) を、受信 FDE を単独に用いる従来技術より約 3dB 低減できること、スループットを約 8~23%向上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。これは送受信協調処理の有効性を示したもので、無線技術の今後の方向を示唆する優れた成果である。

第 3 章では、受信 FDE と符号間干渉 (ISI) キャンセルとを繰り返した後の残留 ISI の大きさを送信側で予測し、パケット再送毎に送信 FDE 重みを更新する送受信協調繰り返し FDE を提案して、スループット特性の改善効果について検討している。残留 ISI の予測値が得られたときの MMSE 規範に基づく送信 FDE 重みを理論的に導出している。提案技術はスループットを送受信協調 FDE より約 10~27%向上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。これは広帯域無線システムの実現に寄与する重要な成果である。

第 4 章では、チャンネル推定誤差をガウス近似し、提案技術に及ぼすその影響について検討している。送信 SNR=15dB のときに $BER=10^{-4}$ を確保するためのチャンネル推定誤差の許容正規化分散を、従来の繰り返し受信 FDE の 2.5 倍程度まで拡大でき、提案技術が不完全チャンネル推定にロバストであ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、チャンネル推定が不完全な実用無線システムにおいても送受信協調 FDE が適用可能であることを示した重要な成果である。

第 5 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送受信協調型の周波数領域等化技術を提案し、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。