

	たけだ かず あき
氏 名	武田 和 晃
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成19年3月27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等化とマルチアクセスに関する研究
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 東北大学助教授 工藤 栄亮

論 文 内 容 要 旨

超高速伝送が要求される次世代移動通信では、移動無線チャネルが周波数選択性フェージングとなるため、等化器が必要である。本論文は、周波数領域等化 (FDE) を用いる信号伝送系を対象に、周波数領域信号処理およびマルチアクセス方式の研究結果をまとめたもので全編6章からなる。

第1章は緒論である。現在、1Gbpsのような超高速伝送の実現に向け、世界中で様々な研究が活発に行われている。しかし、そのような超広帯域移動通信において、移動無線チャネルは遅延時間の異なる多数のパスから構成される周波数選択性チャネルとなり伝送特性が大幅に劣化してしまう。第3世代通信システムでは、Rake 受信器というチャネル整合フィルタを用いる直接拡散符号分割多重(DS-CDMA)が採用されているが、帯域幅が 100MHz であるような高速伝送においては、大きなパス間干渉 (IPI) により伝送特性が大幅に劣化してしまう。従って、従来の Rake 合成に代わる等化器の適用が必要不可欠である。これまで、最小平均二乗誤差 (MMSE) 規範に基づく周波数領域等化 (FDE) を DS-CDMA に適用すれば、周波数ダイバーシチ効果を得つつ IPI を抑圧できるので、ビット誤り率 (BER) 特性を大幅に改善できることが報告されている。そこで、本論文では、主に DS-CDMA を対象として、MMSE 周波数領域等化技術を用いるときの伝送特性を改善することを目的に、周波数領域信号処理およびマルチアクセス方式の研究を行っている。

第2章では、DS-CDMA におけるチップ間干渉(ICI)を抑圧する周波数領域適応 ICI キャンセラを提案している。MMSE-FDE では、残留 ICI が生じ、それが BER 特性改善に限界を与える。そこで、残留 ICI を考慮した MMSE 重みを導出し、理論的下界に近い BER 特性が得られることを計算機シミュレーションで明らかにしている。また、周波数領域 ICI キャンセラでは、残留 ICI レプリカの生成が必要である。判定誤りによる誤り伝搬を軽減するために、対数尤度比(LLR)より求めた軟判定レプリカを用いている。周波数領域 ICI キャンセラでは、まず、 N_c ポイント高速フーリエ変換(FFT)により得られた N_c 個からなる受信信号の周波数成分に MMSE 規範に基づく FDE および ICI キャンセルを行う。次いで、 N_c ポイント逆 FFT (IFFT)を適用して時間領域信号に変換し、逆拡散を行い、軟判定値系列を得る。これをフィードバックし、MMSE-FDE 重みおよび ICI レプリカを更新して、FDE, ICI キャンセルおよ

び逆拡散を行って、データ復調する。図1に $SF=1$ の場合について、繰り返し回数 $i(i=0\sim 3)$ をパラメータとしてプロットした周波数領域適応ICIキャンセラを用いるときの平均BER特性を示す。横軸は1ビット当たりの受信信号エネルギー対雑音電力スペクトル密度 E_b/N_0 である。QPSKデータ変調を用い、FFTブロックサイズを $N_c=256$ チップ、ガードインターバル長を $N_g=32$ チップとした。フェージングチャンネルは、一様電力遅延プロファイルを有する $L=16$ 個の独立なパスから構成される周波数選択性のブロックレイリーフェージングチャンネルであるものとした。また、比較のため、繰り返し毎に最適なFDE重みを計算機シミュレーションにより求めている従来方法によるBER特性と理論的下界も示す。周波数領域適応ICIキャンセラを用いることにより、平均BER特性が大幅に改善していることが分かる。3回の繰り返しで、 $BER=10^{-4}$ を満たす所要平均受信 E_b/N_0 を、キャンセラを用いないMMSE-FDE($i=0$)と比較して、およそ4.9dB程度低減できることが分かる。また、 $BER=10^{-4}$ を満たす所要平均受信 E_b/N_0 の理論的下界からの劣化を1.9dB程度までに減らすことができる(このうち、0.5dBはガード挿入損である)。以上の周波数領域ICIキャンセラは、DS-CDMAが次世代方式の有力なアクセス技術になり得ることを示す重要な成果である。

第3章では、周波数領域インターリーブを用いるアクセス方式について述べている。CDMA上りリンクでは、各ユーザでフェージングチャンネルが異なるため大きなマルチユーザ干渉(MUI)が生じ、BERフロアが発生してしまう。そこで、上りリンクで生じるマルチユーザ干渉を抑圧する周波数インターリーブを用いるシングルキャリア(SC)および(MC)スペクトラム拡散マルチアクセス(SSMA)方式を提案している。まず、拡散率 SF_i の時間領域拡散を行って N_c 個のチップ系列を得る。次いで、 N_c ポイントFFTにより N_c 個の周波数成分を得た後、他ユーザと直交するインターリーブパターンを用いて、それらを SF_j 倍の周波数帯域幅へマッピングする。図2に周波数領域インターリーブとMMSE-FDEを用いるときの平均BER特性を示す。FFTブロックサイズを $N_c \times SF_j = 1024$ サンプル、トータル拡散率 SF を $SF=16$ とし、 $(SF_i, SF_j) = (1, 16), (4, 4), (16, 1)$ のときのBER特性をプロットしている。 $U=16$ のとき、 $(SF_i, SF_j) = (1, 16)$ として周波数領域インターリーブを用いれば、各ユーザの周波数成分は完全に直交し、MUIが発生しないので、最も優れたBER特性が得られる。一方、 $(SF_i, SF_j) = (16, 1)$ または $(4, 4)$ では、MUIにより大きな誤りBERフロアが発生している。以上より、トータル拡散率が $SF (= SF_i \times SF_j)$ でユーザ数が U のとき、BERを最小とする拡散率の組み合わせが $(SF_i, SF_j) = (SF/U, U)$ となることが分かる。提案方式は次世代アクセス技術の候補の1つに挙げられており、実用的に優れた成果である。

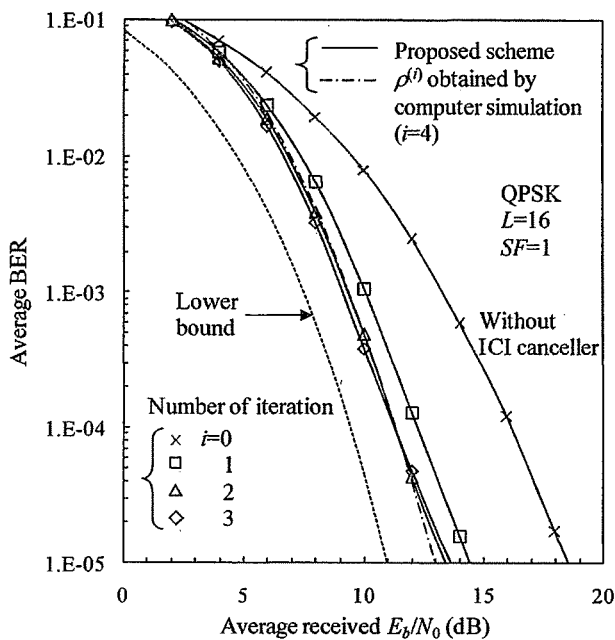


図1 周波数領域ICIキャンセラを用いるときの平均BER特性

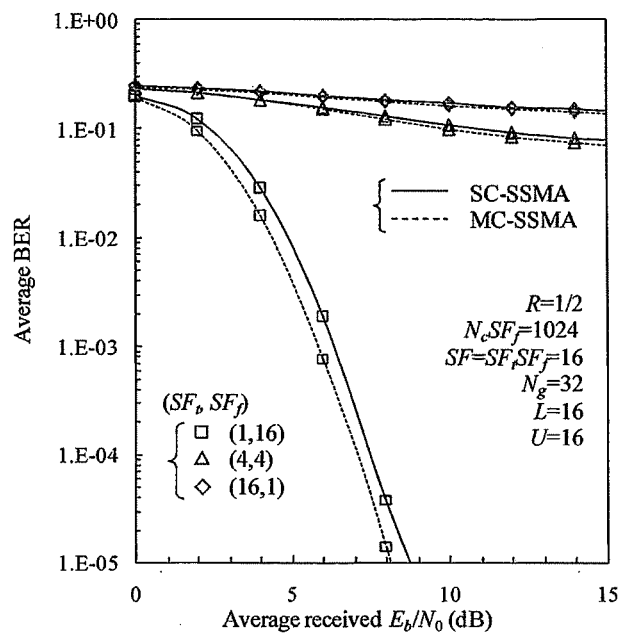


図2 周波数領域インターリーブを用いるときの平均BER特性

第4章では、MMSE周波数領域チャネル推定を提案している。従来のチャネル推定法ではパイロット系列の周波数スペクトルが一定でないためチャネル推定精度が劣化してしまう。そこで、受信パイロット系列の各周波数成分に1タップ重みを乗算して得られるチャネル推定値と実際のチャネル利得との平均二乗誤差を最小とするMMSE周波数領域チャネル推定を提案し、その重みを理論的に導出している。提案チャネル推定では、まず、 N_c ポイントFFTを適用して得られた受信パイロット系列の周波数応答に対して、導出したMMSE重みを乗算することでチャネル推定値を求める。ついで、雑音の影響を低減しチャネル推定精度を高めるために、遅延時間領域窓関数および判定帰還チャネル推定を行っている。MMSEチャネル推定を用いるときの平均BER特性を図3に示す。また、比較のために、従来方式であるゼロフォーシングチャネル推定(ZF-CE)を用いるときの平均BER特性も示す。パイロットチップ系列として、周期が255および4095のPN系列を用いた。周期が4095のPN系列をパイロット系列として用いるとき、ZFチャネル推定では大きな誤りフロアが見られる。4095周期のPN系列では、パイロットブロック中(256チップ)の1と0の割合が大きく異なるときパイロットの周波数成分が大きく変動するから、ZFでは雑音強調が発生する。一方、MMSEチャネル推定では、雑音強調を抑圧しつつチャネル推定値の平均値の誤差を抑えることができるため、このような誤りフロアは見られず、最も優れたBER特性が得られている。周期が255のPN系列をパイロット系列として用いるときも同様に、MMSEチャネル推定で最も優れたBER特性が得られている。MMSEチャネル推定を用いるとき、理想チャネル推定からのBER特性の劣化は0.9dB程度である(ただし、0.28dBのパイロット挿入損含む)。以上より、提案法のチャネル推定精度がパイロット系列に依存しないこと、理想チャネル推定からのBER特性の劣化を1dB以下にできることが分かる。これは超高速DS-CDMA実用化に向けた大きな成果である。

第5章では、ガードインターバル(GI)を用いないFDE(オーバーラップFDE)について述べている。従来のFDEではブロック間干渉(IBI)を防ぐためにGIを挿入しているが伝送効率が低下してしま

う。そこで、MMSE-FDE フィルタのインパルス応答が FFT 区間全域に広がらないことに着目し、オーバーラップ FDE を提案している。オーバーラップ FDE では、 N_c ポイントの FFT 範囲をオーバーラップさせ、MMSE-FDE 後、FFT 区間の中央 M チップのみを復調することで IBI を抑圧しつつ周波数ダイバーシチ効果を得ている。図4に、オーバーラップ FDE の平均 BER 特性を示す。 $N_c=256$ および $SF=U=16$ とした。また、比較のため、 $N_c=256$ チップあたり $N_g=32$ チップの GI を挿入して MMSE-FDE を行ったときの平均 BER 特性も示す。FDE 後に取り出す区間のチップ数 M をパラメータとして BER 特性をプロットした。GI を用いると 0.5dB の電力損が生ずる。このような電力損がない分だけ、オーバーラップ FDE の BER 特性が優れるはずであるが、実際には残留 IBI が存在するから BER 特性が劣化してしまう。しかし、 $M \leq 128$ とすれば残留 IBI を最小化でき、 $BER=10^{-3}$ を得る所要 E_b/N_0 劣化を 1 dB 程度に抑えることができる。これは現在の DS-CDMA システムにも FDE を適用可能であることを示した重要な成果である。

第6章は結論である。本論文では、FDE を用いる信号伝送系を対象に、周波数領域信号処理およびマルチアクセス方式の研究を行った結果を述べた。まず、MMSE-FDE 後に生じる残留 ICI を抑圧することを目的に、残留 ICI を考慮した MMSE 重みを導出し、それを用いる周波数領域適応 ICI キャンセラを提案し、BER 特性を大幅に改善できることを明らかにした。次いで、MUI を抑圧することを目的に、周波数領域インターリーブを用いるマルチアクセス方式を提案した。その結果、ユーザ数が U のとき、BER を最小とする拡散率の組み合わせが $(SF_t, SF_r) = (SF/U, U)$ となることを計算機シミュレーションにより明らかにした。また、FDE では、高精度なチャンネル推定が必要である。そこで、FDE に適した MMSE 規範に基づくチャンネルパイロットチャンネル推定の研究も行い、提案法のチャンネル推定精度がパイロット系列に依存しないことを計算機シミュレーションにより明らかにした。最後に、GI を用いないで IBI を最大限に抑圧することを目的に、オーバーラップ FDE を提案し、IBI を抑圧しつつ周波数ダイバーシチ効果を得ることができることを明らかにした。

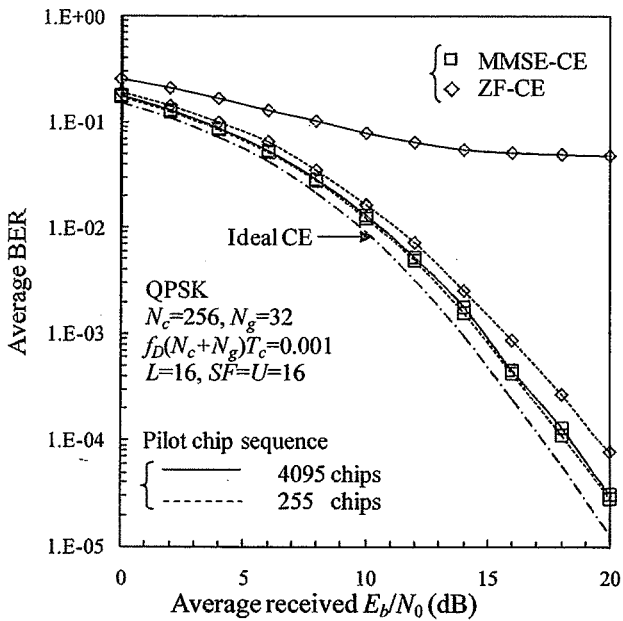


図3 MMSE チャンネル推定を用いるときの平均 BER 特性

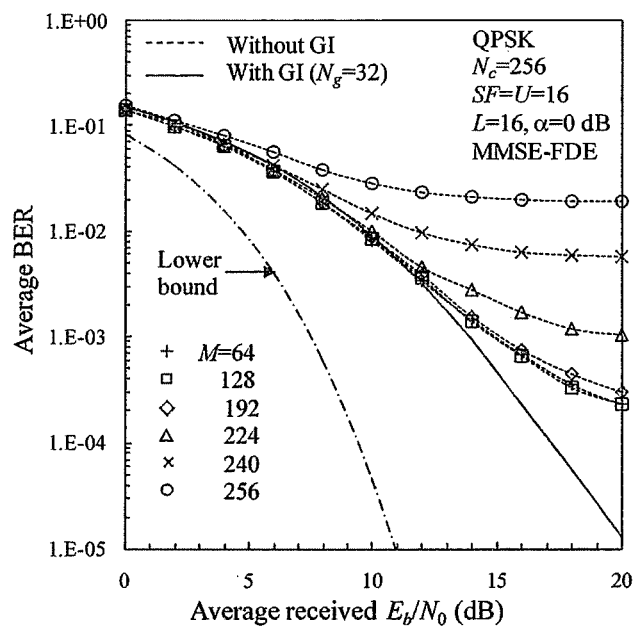


図4 オーバーラップ FDE を用いるときの平均 BER 特性

論文審査結果の要旨

超高速伝送が要求される次世代移動無線通信システムでは、無線チャネルが周波数選択性フェージングとなるため、等化器が必要である。本論文は、周波数領域等化 (FDE) を用いる信号伝送系を対象に、周波数領域信号処理およびマルチアクセス方式の研究成果をまとめたもので全編 6 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、直接拡散符号分割多重(DS-CDMA)におけるチップ間干渉(ICI)を抑圧する周波数領域適応 ICI キャンセラを提案している。最小平均二乗誤差(MMSE)を用いる FDE では、残留 ICI が生じ、それがビット誤り率 (BER) 特性改善に限界を与える。そこで、残留 ICI を考慮した MMSE 重みを導出し、理論的下界に近い BER 特性が得られることを計算機シミュレーションで明らかにしている。これは、周波数領域適応 ICI キャンセラを用いる DS-CDMA が次世代システムの有力なアクセス技術になり得ることを示す重要な成果である。

第 3 章では、上りリンクで生じるマルチユーザ干渉を抑圧する周波数領域インターリーブを用いるアクセス方式を提案している。まず、拡散率 SF_i の時間領域拡散を行って N_c チップの系列を得る。次いで、 N_c ポイント高速フーリエ変換 (FFT) により N_c 個の直交周波数成分を得た後、他ユーザと直交するインターリーブパターンを用いて、それらを SF_i 倍の周波数帯域幅へマッピングする。トータル拡散率が $SF (=SF_i \times SF_j)$ でユーザ数が U のとき、 $SF_i = SF/U$ とすれば BER を最小にできることを示し、そのときの BER 特性を計算機シミュレーションで明らかにしている。提案方式は次世代アクセス技術の候補の 1 つに挙げられており、実用的に優れた成果である。

第 4 章では、MMSE 周波数領域チャネル推定を提案している。従来のチャネル推定法ではパイロット系列の周波数スペクトルが一定でないためチャネル推定精度が劣化してしまう。そこで、受信パイロット系列の各周波数成分に 1 タップ重みを乗算して得られるチャネル推定値と実際のチャネル利得との平均二乗誤差を最小とする MMSE 周波数領域チャネル推定を提案し、その重みを理論的に導出している。提案法のチャネル推定精度がパイロット系列に依存せず理想チャネル推定からの BER 特性の劣化を 1dB 以下にできることを計算機シミュレーションで明らかにしている。これは超高速 DS-CDMA 実用化に向けた大きな成果である。

第 5 章では、ガードインターバル (GI) を用いない FDE (オーバーラップ FDE) を提案している。従来の FDE ではブロック間干渉(IBI)を防ぐために GI を挿入しているが伝送効率が低下してしまう。オーバーラップ FDE では、MMSE-FDE フィルタのインパルス応答が FFT 区間全域に広がらないことに着目し、FFT 区間をオーバーラップさせ、MMSE-FDE 出力ブロックの中央のみを復調することで IBI を抑圧する。これにより、IBI を抑圧しつつ周波数ダイバーシチ効果を得ることができる。これは GI を用いていない現在の DS-CDMA 移動無線通信システムにも FDE が適用可能であることを示した重要な成果である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、次世代移動無線通信システムの実現に向けた周波数領域信号処理およびマルチアクセス方式を提案し、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。