

	やまもと てつや
氏 名	山本 哲矢
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 空間・周波数領域ブロック信号処理に関する研究
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、シングルキャリア(SC)ブロック伝送における最尤検出原理に基づく低演算量型空間・周波数領域ブロック信号検出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。移動無線チャネルは、遅延時間の異なるさまざまな伝搬路から構成される周波数選択性フェージングチャネルであるため、広帯域 SC 伝送では、厳しい符号間干渉(ISI)が発生し伝送特性が大幅に劣化してしまう。周波数選択性フェージングチャネルを克服するために、サイクリックプリフィックス(CP)を挿入した SC ブロック伝送を対象として低演算量型周波数領域等化(FDE)が検討されてきたが、その伝送特性改善効果には限界があった。特に、高速伝送を実現する上で必要不可欠な高多値変調およびマルチ送受信アンテナ(MIMO)空間多重伝送を用いる場合にその劣化が大きい。一方、最尤検出は最も優れた伝送特性を実現できるものの演算量が膨大であるという問題があった。そこで、低演算量でありながら最尤検出に近い伝送特性を実現できる信号検出技術が求められていた。本章では、従来の FDE を用いる SC 伝送に関する先行研究について概説し、その問題点を指摘するとともに、本研究の目的を述べている。

第2章では、QR 分解と M アルゴリズムを用いる最尤検出に基づく演算量削減型周波数領域ブロック信号検出(QRM-MLBD)を提案している。QRM-MLBD では、チャネル行列の QR 分解を利用して最尤検出を木構造探索問題に変換し、木構造の各ステージにおいてある一定の候補のみを残し、他はその先の探索を行わない M アルゴリズムを用いることで演算量を削減する。しかし、従来の CP 挿入 SC ブロック伝送では、QRM-MLBD の演算量削減効果が小さい。この原因が M アルゴリズムの初期ステージにおいて正しいパスを誤って削除する確率が高いことにあることを指摘し、CP の代わりに既知のトレーニング系列(TS)を挿入した SC ブロック伝送を用いれば、TS を初期ステージに対応させることができるため、正しいパスの誤削除確率を大幅に低減できることを示している。さらに提案法を SC-MIMO 空間多重へ適用し、空間・周波数領域ブロック信号検出へと拡張している。拡張送信シンボルベクトルの下部に TS が集まるようなオーダリングを適用することで初期ステージにおける誤削除確率を大幅に低減できることを示している。また、提案法の伝送特性および演算量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16QAMデータ変調を用いたときのTSを利用したQRM-MLBDを用いるSC伝送の平均ビット誤り率(BER)特性を示す。横軸は平均受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、チャンネルは $L=16$ で等電力遅延プロファイルを有する周波数選択性ブロックレイリーフェージングとしている。また、理想チャンネル推定を仮定している。比較のため、従来のCP挿入SC伝送の場合のQRM-MLBDのBER特性、最小平均二乗誤差(MMSE)規範に基づくFDEのBER特性およびBERの理論的下界である整合フィルタ限界(MF bound)も併せて示す。図より、Mアルゴリズムの生き残りパス数 $M=16$ の提案法はMMSE-FDEに比べて $BER=10^{-3}$ を達成する所要 $E_b/N_0$ を約7dB低減し、MF boundに近い特性を達成できていることが分かる。また、提案法は $M=16$ 程度で $M=1024$ とした従来のCP挿入SC伝送の場合のQRM-MLBDとほぼ同等のBER特性を実現でき、その結果演算量を従来の約12%まで削減できる。図2では、送受信アンテナ2本のMIMO空間多重伝送に提案QRM-MLBDを拡張したときの平均BER特性を示している。比較のため、従来のCP挿入SC伝送の場合のQRM-MLBDのBER特性およびMMSE規範に基づく線形検出のBER特性も併せて示す。図より、提案法は $M=4$ 程度で $M=1024$ とした従来のCP挿入SC伝送の場合のQRM-MLBDとほぼ同等のBER特性を実現できることがわかる。この時、演算量を従来の約22%まで削減できる。また、MMSE線形検出とQRM-MLBDとの特性差は、MIMO空間多重伝送の方が大きくなることも分かる。

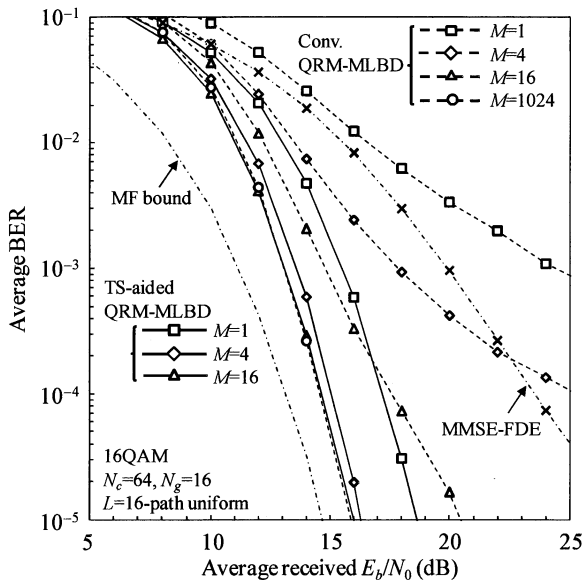


図1 TSを利用したQRM-MLBDの平均BER特性

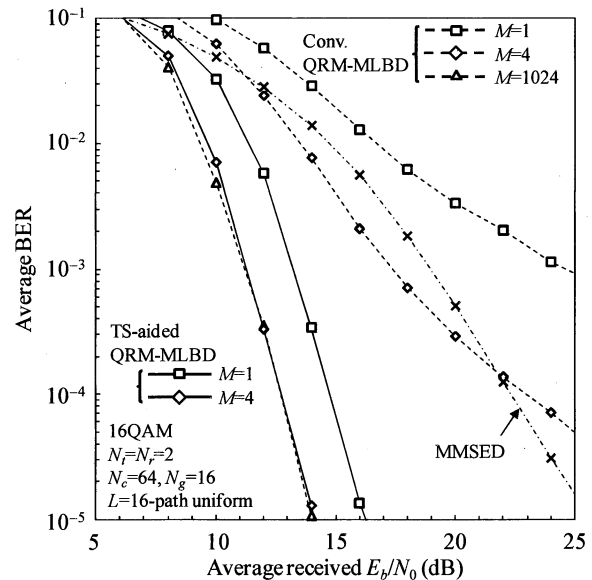


図2 SC-MIMO空間多重におけるTSを利用したQRM-MLBDの平均BER特性

第3章では、QRM-MLBDをSCハイブリッド自動再送要求(HARQ)パケット伝送へと拡張し、QRM-MLBDに適した再送パケット合成を提案している。HARQでは、同一パケットの再送があった場合、受信側で再送パケットを合成することにより、時間ダイバーシチ利得を得ることができる。従来よく用いられている簡易なパケット合成であるビット対数尤度比(LLR)合成法は準最適なパケット合成法であり、QRM-MLBDではダイバーシチ利得が十分に得られない。一方、最適なパケット合成である拡大QR合成法では、再送により得られたすべての再送パケットをまとめた拡大受信信号に対し直接QRM-MLBDを適用するため、すべての再送パケットおよびそれ

らに対応するチャネル情報を保持しておく必要があり、受信機のメモリサイズが増加する。また、再送回数が増えるたびに拡大受信信号ベクトルのサイズが拡大するために演算量も増加する。そこで、再送を考慮した拡大受信信号表現の再帰式表現を導出し、メモリサイズおよび演算量の増加を伴わず最適なパケット合成効果を得ることのできる再帰型 QR 合成を提案している。再帰型 QR 合成は、メモリサイズおよび演算量の増加を回避しつつ従来のビット LLR 合成法と比べて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、符号化率  $R=3/4$  のターボ符号を適用し、再帰型 QR 合成を導入した QRM-MLBD を用いる SC-HARQ のスループット特性を示す。横軸は平均受信シンボルエネルギー対雑音電力スペクトル密度比( $E_s/N_0$ )である。理想チャネル推定を仮定している。比較のため、従来のビット LLR 合成法のスループット特性も併せて示す。なお、拡大 QR 合成については、再帰型 QR 合成と同じ特性となるため、省略している。図より、特に再送が起りやすい低  $E_s/N_0$  領域において、再帰型 QR 合成がビット LLR 合成より優れたスループット特性を実現できていることが分かる、例えば、 $E_s/N_0=10\text{dB}$  において、再帰型 QR 合成はビット LLR 合成に比べて約 1.5 倍のスループットを達成できている。

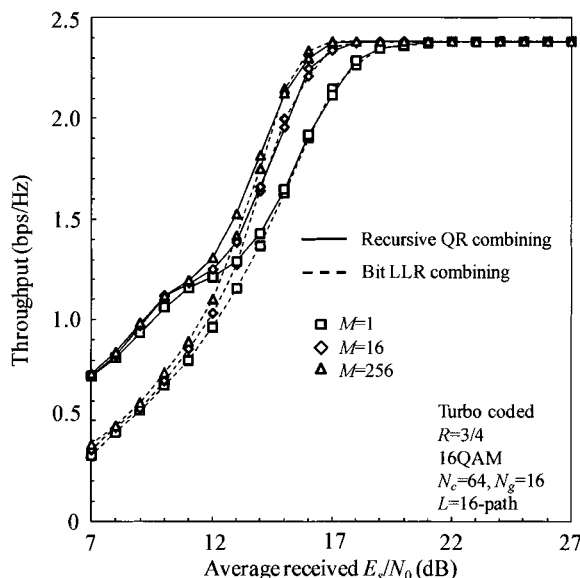


図 3 HARQ スループット特性

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、実際には受信側においてチャネル推定値が必要となる。TS 挿入 SC 伝送では、CP の代わりにブロック毎に挿入されている TS を利用してチャネル推定を行うことで、CP 挿入 SC 伝送のようにパイロットブロックを送信する必要がない。そのため、周波数利用効率に優れた伝送を実現可能である。これまでの TS 挿入 SC 伝送を対象としたチャネル推定法では、伝搬路の最大遅延時間の 2 倍以上の長さの TS を用い、データブロックからの干渉を生じさせることなくチャネル推定を行っていた。しかしながら、伝搬路の最大遅延時間の 2 倍以上の長さの TS の挿入は伝送効率の低下を招いてしまう。そこで、第 4 章では、伝搬路の最大遅延時間長の TS のみの挿入による周波数領域チャネル推定法を提案している。提案チャネル推定法は 2 ステップから構成され、第 1 ステップでは、まず受信 TS の巡回性を確保した上で周波数領域チャネル推定を行い、瞬時チャネル推定値を求める。この時、複数ブロックにわたってチャネル推定値を時間的に平均化することでデータブロックからの干渉を抑圧している。第 2 ステップでは、仮判定データシンボル系列および TS を用いた最尤チャネル推定を繰り返して行き、推定精度をさらに高めている。図 4 に提案チャネル推定法を導入した QRM-MLBD の平均 BER 特性を示す。16QAM を用い、チャネル推定に用いるブロック数  $N_B=32$  ブロックとした。また、正規化最大ドップラー周波数  $f_D T \rightarrow 0$  の準静的フェージング環境を仮定している。ここで、 $T$  は TS を含む 1 ブロック長である。図より、提案チャネル推定法は十分な繰り返しを行うことで理想チャネル推

定に近い BER 特性を達成できることが分かる。図 5 に正規化最大ドップラー周波数  $f_D T$  の影響を示す。図 5 より  $N_B=32$ , 繰り返し回数  $I=4$  の場合,  $f_D T \leq 4 \times 10^{-4}$  まではほぼ同等の BER を達成できていることが分かる。例えば搬送波周波数 2GHz で帯域幅が 50MHz の場合,  $f_D T=4 \times 10^{-4}$  は約 135km/h の高速移動に相当し, 実際の移動通信環境は  $f_D T=4 \times 10^{-4}$  となる場合がほとんどであると考えられる。したがって, 提案チャンネル推定法は, 実際の移動通信環境において理想チャンネル推定に近い優れた伝送特性を実現できるといえる。

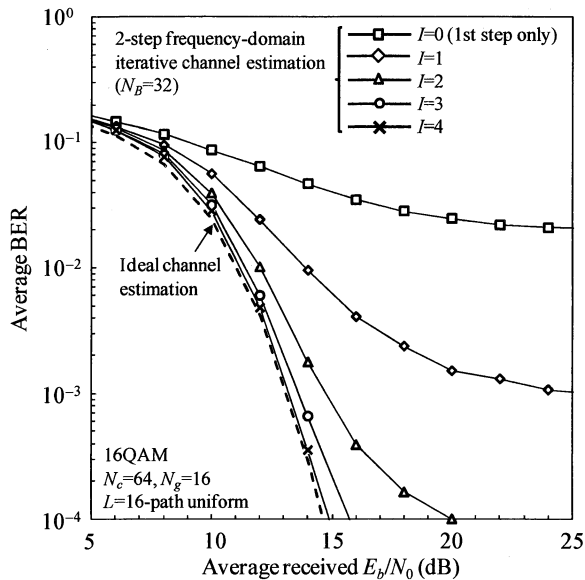


図 4 提案チャンネル推定を用いる QRM-MLBD の平均 BER 特性

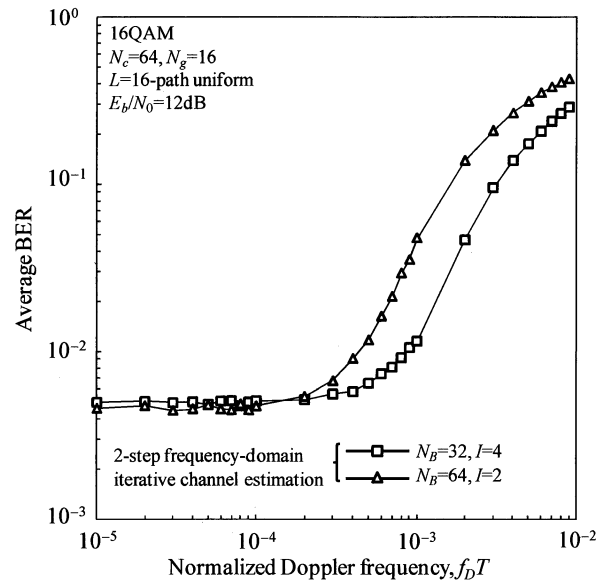


図 5 フェージング変動の影響

第 5 章では, 本論文の結論を述べている。本論文では, SC ブロック伝送における最尤検出原理に基づく低演算量型空間・周波数領域ブロック信号検出に関する一連の研究成果を述べた。はじめに QR 分解と M アルゴリズムを用いて SC 最尤ブロック信号検出の演算量を削減する QRM-MLBD を提案し, さらに従来の CP の代わりに TS を挿入した SC ブロック伝送による演算量削減法を提案した。TS 挿入 SC ブロック伝送を用いれば QRM-MLBD の演算量を CP 挿入ブロック伝送に比べて大幅に削減しつつ, MF bound に近い優れた伝送特性を実現できることを明らかにした。次いで, QRM-MLBD を次世代広帯域移動無線システムにおいて主流となるパケット伝送へと拡張するため, QRM-MLBD に適した再送パケット合成である再帰型 QR 合成を提案した。再帰型 QR 合成は, メモリサイズおよび演算量の増加を伴わず最適なパケット合成効果を得ることのできることを明らかにした。以上の結果が実用無線通信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, TS 挿入 SC 伝送における 2 ステップ周波数領域繰り返しチャンネル推定を提案し, 提案チャンネル推定法は実際の移動通信環境において理想チャンネル推定に近い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

周波数選択性フェージングチャネルを克服するために、サイクリックプレフィックス(CP)を挿入したシングルキャリア(SC)ブロック伝送を対象として低演算量型周波数領域等化(FDE)が検討されてきたが、その伝送特性改善効果には限界があった。特に、高速伝送を実現する上で必要不可欠な高多値変調およびマルチ送受信アンテナ(MIMO)空間多重伝送を用いる場合にその劣化が大きい。一方、最尤検出は最も優れた伝送特性を実現できるものの演算量が膨大であるという問題があった。そこで、低演算量でありながら最尤検出に近い伝送特性を実現できる信号検出技術が求められていた。本論文は、SC ブロック伝送における最尤検出原理に基づく低演算量型空間・周波数領域ブロック信号検出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、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、QR 分解と M アルゴリズムを用いる最尤検出に基づく周波数領域ブロック信号検出(QRM-MLBD)を提案し、ビット誤り率(BER)特性改善効果および演算量削減効果について検討している。CP 挿入 SC ブロック伝送では、QRM-MLBD の演算量削減効果が小さい。この原因が M アルゴリズムの初期ステージにおいて正しいパスを誤って削除する確率が高いことにあることを指摘し、CP の代わりに既知のトレーニング系列(TS)を用いれば正しいパスの誤削除確率を大幅に低減できることを指摘している。16QAM データ変調を用いる TS 挿入 SC ブロック伝送では、QRM-MLBD の演算量を CP 挿入ブロック伝送のその約 12%まで削減できること、FDE に比べて  $BER=10^{-3}$  を達成する所要受信信号対雑音電力比を約 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。さらに、TS 挿入 SC ブロック伝送を用いる MIMO 空間多重に QRM-MLBD を適用したとき、演算量を CP 挿入ブロック伝送のその約 22%まで削減できることを明らかにしている。これらは周波数利用効率に優れた広帯域移動無線システムの実現に向けた大きな成果である。

第3章では、QRM-MLBD を用いる SC ハイブリッド自動再送要求における再帰型 QR 合成を提案している。再帰型 QR 合成は、メモリサイズおよび演算量を削減しつつ従来のビット対数尤度比(LLR)合成法の約 1.5~2.0 倍のスループットを達成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、パケットデータ伝送が主流になる次世代広帯域移動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、TS 挿入 SC ブロック伝送における 2 ステップ周波数領域繰り返しチャネル推定を提案している。ブロックごとに挿入されている既知系列を用いることで、高速フェージング環境下でも理想チャネル推定に近い高精度チャネル推定を可能としている。これは、低速から高速移動の様々な移動速度のユーザが通信する環境下においても QRM-MLBD や再帰型 QR 合成が適用できることを示した実用的に優れた成果である。

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低演算量型空間・周波数領域ブロック信号検出を提案し、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。