

論文の内容の要旨

論文題目	Studies on Lattice Reduction Aided Detection and Its Applications in MIMO Systems (MIMO通信システムにおける格子基底縮小を用いた信号検出法及びその応用に関する研究)
学位申請者	侯 威

近年、高品質かつ大容量の無線通信システムへの需要が高まっていることに伴い、Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 技術が注目を集めている。MIMOとは無線通信システムのスループットや周波数利用効率の向上を目的として、複数の送受信アンテナを使用することにより同一周波数帯に複数の通信路を確立して通信を行う技術である。MIMOシステムでは同一周波数帯に複数の通信路が存在するため、複数の送信信号が相互に干渉して受信される。このため、良好なビット誤り率 (Bit Error Rate; BER) 特性を実現するためには、受信側において送信信号を適切に検出する信号検出法が必要である。

MIMOシステムにおいてBERを最小にするという意味での最適な信号検出法はMaximum Likelihood (ML) 法である。しかし、ML法は送受信アンテナ数が増加すると計算量が指数関数的に増大するため、実装が困難であるという問題を有する。比較的少ない計算量でML法と同等のBER特性を実現する検出法として、Sphere Detection (SD) やQR分解とMアルゴリズムを用いるML法 (ML Detection based on QR decomposition and M-algorithm; QRM-MLD) などが知られているが、計算量が十分に低いとは言い難い。計算量が低い検出法としてはZero-Forcing (ZF) 法やMinimum Mean Square Error (MMSE) 法があるが、これらのBER特性はML法より大きく劣る。このため、少ない計算量でML法に匹敵するBER特性を実現する信号検出法の確立はMIMOシステムにおける重要な課題の一つである。

近年注目を集めているMIMO信号検出法の一つに格子基底縮小 (Lattice-Reduction; LR) を用いる検出法がある。この検出法ではLRを用いて通信路行列を準直交化することにより、信号同士の干渉を低減する。これとMMSE法を組み合わせることにより、少ない計算量でML法に近いBER特性を実現可能であることが知られている。しかし、これにより実現されるBER特性はML法のBER特性に近いものの同等であるとは言い難い。

本論文では少ない演算量でML法と同等のBER特性を実現することを目的に、LRを用いた3つの検出法の改良を提案し、計算機シミュレーションにより用途に応じたそれぞれの優劣を明らかにする。

第一の提案は、Gram-Schmidtの直交化法とMアルゴリズムを用いるML法 (ML Detection based on Gram-Schmidt Orthogonalization and M-algorithm; GSM-MLD) の演算量削減手法である。GSM-MLDはLRを用いた信号検出法の一つで、QRM-MLDに対応する方式である。GSM-MLDでは直交振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation; QAM) の信号点数の平方根をK、木探索の各段階での生き残りパス数をMとすると、各段階においてKM回の枝メトリック計算を行う。従来は、この計算回数が固定であり、特に高Eb/NO領域においては正しいパスとそれ以外の生き残りパスとの間に大きな尤度差が生じるにもかかわらず機械的に計算を行っていた。提案方式は、木探索の各段階でのM個の生き残りパスの信頼性を評価する評価関数を導入し、評価結果に基づいて生き残りパスの数を適応的に削減しつつ木探索を行い、計算量の低減を図るものである。計算機シミュレーションによる性能評価の結果、提案方式はQRM-MLDと比較して4x4 MIMOでは高Eb/NO領域において計算量を大幅に削減しながら、ほぼ同一のBER特性を実現し得ることが明らかとなった。

第二の提案は、Gram-Schmidtの直交化法を導入したLR (Lattice-Reduction Gram-Schmidt; LR-GS) による信号検出法における信号点量子化の改良に関するものである。前述のように、LRでは通信路行列を準直交化して干渉を低減するが、LR-GSではGram-Schmidt直交化の導入により通信路行列を完全に直交化し、更なる干渉の低減を図る手法である。LR-GSでは推定信号点として非整数値が得られるため、量子化によりこれを整数化することが必要である。このとき、推定信号の値によっては量子化により誤りを生じる。提案方式は、推定信号点の量子化に繰り返し処理を施し、より信頼度の高い推定信号を得るものである。計算機シミュレーションにより提案方式のパラメータの最適化を行い、BER特性の評価を行った。その結果、提案方式はLR-GSと比較して計算量の増加をごく僅かにとどめながら、より良好なBER特性を実現し、特に4x4 MIMOではML法とほぼ同一のBER特性を示すことが明らかとなった。

第三の提案は、Ordering Successive Interference Cancellation を導入したLR (LR-OSIC) による信号検出法の改良に関するものである。Successive Interference Cancellationは名前のとおり連続的に干渉を除去する技術である。しかし、orderingにより最も信頼度の高い信号から推定を行っても誤り伝搬が発生する場合があります、これによりBER特性の劣化が生じていた。提案方式は、LR-OSICに複数の推定信号系列候補を考慮するConditional listを導入し、Ordering SICの特性を用いて候補を選択することにより、Conditional listに正しい信号が含まれる確率を高めるものである。計算機シミュレーションによる性能評価の結果、提案方式はLR-OSICと比較して計算量の増加をごく僅かにとどめながら、より良好なBER特性を実現し得ることが明らかとなった。

このように、上記三種の提案はいずれも少ない計算量で良好なBER特性を実現し得る方式であるが、最後に様々な状況におけるBER特性の比較を行い、計算量とBER特性の観点からMIMOサイズ (アンテナ数) や変調多値数に応じて最も適している方式を明らかにした。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 HOU WEI

審査委員主査 小島 年春

委員 川端 勉

委員 來住 直人

委員 大木 英司

委員 ※藤野 忠

平成26年2月14日に論文審査のための公聴会および最終試験を、5名の審査委員出席のもとで実施した。当日は学位申請者から論文内容の発表を60分行ってもらい、その後40分間の質疑応答を行うことで、研究内容に対する学術面及び実用面双方からの視点で質疑応答を行った。今回審査を行った学位論文は、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムにおいてビット誤り率 (Bit Error Rate; BER) を最小にするという意味で最適ではあるが計算量が莫大で実現困難なML (Maximum-Likelihood) 法に匹敵するBER特性を少ない計算量で実現する信号検出法の研究を行っている。

各章の内容は以下のとおりである。

第一章では、本論文で取り扱うMIMOシステムにおける信号検出法について、その課題を述べ、研究テーマの着想に至る経緯を記述している。また、本論文で着目しているLattice-Reduction (LR) を用いた信号検出法 (LR aided detection; LRAD) の有効性を述べ、本論文の研究の位置づけを明確にしている。

第二章では、本論文で取り扱うMIMOシステムと、その代表的な信号検出法の紹介を行っている。まず、MIMOシステムの構成を述べ、従来の代表的な信号検出法であるML法、ZF (Zero-Forcing) 法、MMSE (Minimum Mean Square Error) 法を紹介している。また、本論文で比較の対象としているQR分解とMアルゴリズムを用いるML法 (ML Detection based on QR decomposition and M-algorithm; QRM-MLD) について、その信号処理を述べ、具体的な計算量を示している。

第三章では、本論で着目しているLRADについて、従来提案されている方式の紹介を行っている。まず、LRの代表的なアルゴリズムであるLLLアルゴリズムを紹介し、LRADの基本的な信号処理を記述している。また、本論文で改良を提案する、Gram-Schmidtの直交化法を導入したLR (Lattice-Reduction Gram-Schmidt; LR-GS) による信号検出法や、Ordering Successive Interference Cancellationを導入したLR (LR-OSIC) による信号検出法を紹介し、計算機シミュレーションによるBER特性を示して、その課題を明らかにしている。

第四章では、Gram-Schmidtの直交化法とMアルゴリズムを用いるML法 (ML Detection based on Gram-Schmidt Orthogonalization and M-algorithm; GSM-MLD) の演算量削減手法を提案している。GSM-MLDはLRを用いた信号検出法の一つで、QRM-MLDに対応する方式である。GSM-MLDでは直交振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation; QAM) の信号点数の平方根を K 、木探索の各段階での生き残りパス数を M とすると、各段階において KM 回の枝メトリック計算を行う。従来は、この計算回数が固定であり、特に高 E_b/N_0 領域においては正しいパスとそれ以外の生き残りパスとの間に大きな尤度差が生じるにもかかわらず機械的に計算を行っていた。この課題に対し、木探索の各段階での M 個の生き残りパスの信頼性を評価する評価関数を導入し、評価結果に基づいて生き残りパスの数を適応的に削減しつつ木探索を行い、計算量の低減を図る方式を提案している。また、計算機シミュレーションにより性能評価を行い、提案方式はQRM-MLDと比較して 4×4 MIMOでは高 E_b/N_0 領域において計算量を大幅に削減しながら、ほぼ同一のBER特性を実現し得ることを明らかにしている。

第五章では、LR-GSによる信号検出法における信号点量子化の改良手法を提案している。LRでは通信路行列を準直交化して干渉を低減するが、LR-GSではGram-Schmidt直交化の導入により通信路行列を完全に直交化し、更なる干渉の低減を図る手法である。LR-GSでは推定信号点として非整数値が得られるため、量子化によりこれを整数化することが必要である。このとき、推定信号の値によっては量子化により誤りを生じる。この課題に対し、推定信号点の量子化に繰り返し処理を施し、より信頼度の高い推定信号を得る方式を提案している。また、計算機シミュレーションにより提案方式のパラメータの最適化を行い、BER特性の評価を行っている。その結果、提案方式はLR-GSと比較して計算量の増加をごく僅かにとどめながら、より良好なBER特性を実現し、特に 4×4 MIMOではML法とほぼ同一のBER特性を示すことを明らかにした。

第六章では、LR-OSICによる信号検出法の改良手法を提案している。Successive Interference Cancellationは名前のおり連続的に干渉を除去する技術である。しかし、orderingにより最も信頼度の高い信号から推定を行っても誤り伝搬が発生する場合があります。これによりBER特性の劣化が生じていた。この課題に対し、LR-OSICに複数の推定信号系列候補を考慮するConditional listを導入し、Ordering SIC の特性を用いて候補を選択することにより、Conditional listに正しい信号が含まれる確率を高める方式を提案している。また、計算機シミュレーションによる性能評価を行い、提案方式はLR-OSICと比較して計算量の増加をごく僅かにとどめながら、より良好なBER特性を実現し得ることを明らかにしている。

最後に、第七章では、第四章ないし第六章の提案方式の比較検討を行い、計算量とBER特性の観点からMIMOサイズ (アンテナ数) や変調多値数に応じて最も適している方式を明らかにすることにより本論文をまとめている。また、本分野における将来研究の方向性を提示している。

上記の論文の内容と公聴会当日の質疑応答の結果、これらの研究活動は本学術分野の発展に大きく寄与するものであり、本学位申請者 侯威 は博士 (工学) の学位を授与されるに相応しい人物であると評価し、論文審査を合格と判定した。