

称号及び氏名 博士（工学） 成枝 秀介

学位授与の日付 平成18年3月31日

論文名 「最尤基準に基づく時空間線形プリコーダの特性改善に関する研究」

論文審査委員  
主査 山下 勝己  
副査 勝山 豊  
副査 大橋 正治

#### 論文要旨

ケーブルによる配線を行わない無線 LAN(Local area network)の登場は、ノート PC 等に代表されるような使用形態の自由度の高い通信端末の発展を加速させた。その結果、無線通信システムにおいて、これまでにない高品質、大容量の情報伝送が求められている。このことを実現する技術の一つに、送受信側で複数のアンテナ素子を使用する多入力多出力 (Multi-input multi-output : MIMO)システムによる情報伝送方式が挙げられる。MIMO システム上で高い周波数利用効率性を実現するための信号設計技術は、総括して時空間符号化(Space-time coding : STC)と呼ばれ、その中でも、1999 年に E. Telatar によって提案された固有モード伝送は、送信機側で通信路の情報(Channel state information : CSI)を必要とするものの、特に高品質な通信環境を提供できる手法として知られている。

固有モード伝送は送受信側でリンクしたウエイト(時空間線形プリコーダ・デコーダ)制御を行うことで実現でき、これまでに高品質な通信環境を提供するための多くの時空間線形プリコーダ設計基準、すなわち最小二乗誤差基準、QoS(Quality of Service)制御を目的とした基準およびビット誤り率(Bit error rate : BER)を最小にするための基準が提案されている。その中でも、BER を最小にするための設計基準は他の設計基準と比較して良好な BER 特性を得られることが知られている。しかし、その多くは単位円上のみに信号配置が存在するような送信信号を対象としたものであるため、IEEE802.11n や HIPERLAN/2 等の無線 LAN システムへの応用が困難であると考えられる。2002 年に A. Scaglione らによって提案された最尤(Maximum likelihood : ML)基準に基づいて設計される時空間線形プリコーダ、デコーダ(以下、時空間線形 ML プリコーダ、デコーダ)は、先に示したような信号配置の制約がないため、如何なる送信信号、例えば多値 QAM(Quadratic amplitude modulation)等の変調方式に対しても BER 最小化を実現できるため、実用化が期待できる手法である。

しかしながら、時空間線形 ML プリコーダを先に述べたような無線 LAN システムへ適用する場合、いくつかの解決しなければならない問題が残されている。本研究では、それらの中の下記に示すような問題点について検討した。

- 時空間線形 ML プリコーダの構成する固有モード SNR の性能が通信路特性より直接的に決定されることから、通信路の状態によっては、情報伝送能力が劣化すること。
- 特性が時間的に変動する通信路に対して最適線形プリコーディングを行う場合、副チャンネルの帯域が広がることで周波数利用効率が低下すること。更に、全ての送信ブロックについて時空間線形 ML プリコーダを求めなければならず、その結果、最適線形プリコーディングに要する演算量が増加すること。

本研究では、時空間線形 ML プリコーダの高機能化を目的とし、上に示した課題を解決するためのいくつかの提案を行うとともに、計算機シミュレーションによりそれら提案手法の有効性を検証した。

第 1 章では、時空間線形 ML プリコーダの背景および課題について述べることで、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、時空間線形 ML プリコーダ・デコーダの設計手法およびその特性について述べた。

第 3 章では、時空間線形 ML プリコーダによる情報伝送を行う上で重要となる、固有モードの信号対雑音電力比(Signal-to-noise ratio : SNR)について検討した。固有モード SNR は MIMO 通信路行列の固有値により特徴付けられる。そのため、大きい固有値が得られたときには固有モード SNR の能力が向上し良好な BER 特性が得られるが、固有値が小さいときにはその特性が劣化することが考えられる。そこで、時空間線形 ML プリコーダの構成する、固有モード SNR 増加の可能性について検討した。時空間線形 ML プリコーダにより得られる信号、すなわちプリコーデッド信号ベクトルの長さが得られる固有モード SNR に与える影響について調査し、MIMO 通信路の状態に応じてプリコーデッド信号ベクトル長を変化させることで固有モード SNR を増加できることを示した。また、提案手法における送信機では、その構成より誤り伝搬が発生し、固有モード SNR が増加しても誤り伝搬の影響により BER 特性が劣化する可能性がある。そのため、誤り伝搬の平均長とプリコーデッド信号ベクトル長との関係を示し、このことから、プリコーデッド信号ベクトル長の探索範囲を限定することで誤り伝搬の影響を低減できることを示した。計算機シミュレーションの結果、固有モード SNR を増加したことによる BER 特性の改善を確認できた。

第 4 章では、通信端末が移動する、すなわち通信路の特性が時間的に変動する場合での最適な線形プリコーディングについて検討した。通信路の特性が時間的に変動する場合に送信側で最適な時空間線形プリコーダを求めるためには、定期的に受信側から送信側へ CSI を通知しなければならない。周波数分割複信(FDD : Frequency Division Duplex)では、受信側から送信側へ CSI を副チャンネルを通して通知する。CSI を通知する期間が短い場合、副チャンネルの帯域を広くとらなければならず、その結果周波数利用効率が低下するため、

副チャンネルの帯域は狭いほうが望ましい。そこで、CSI を通知する周期を長くするための一手法として、多項式表現による外挿法を用いた最適プリコーディング手法を検討した。本手法は、受信側で観測された通信路の特性を基に多項式表現を行い、多項式の係数を CSI として送信側へ通知し、それを用いて通信路変動の特性を予測する。予測可能である期間には CSI を通知する必要がないため、その分 CSI 通知周期を長くでき、周波数利用効率を増加できる。計算機シミュレーションの結果、外挿法を用いたことで CSI を通知する周期を長くでき、その結果周波数利用効率を増加できることを確認した。次に、時間的に通信路の特性が変動する場合の、最適線形プリコーディングに要する演算量について検討した。先に示した予測手法を用いることで、FDD における副チャンネルの帯域を広く取ることなく、送信側で CSI を使用して時空間線形 ML プリコード、デコードによる情報伝送を行える。しかしながら、全てのブロックに対して時空間線形プリコードを求める必要があり、その結果、通信路の特性が時間的に変動しない場合と比較して、最適線形プリコーディングに要する演算量が増加する。そこで、時間的に通信路の特性が変動する場合における、最適線形プリコーディングのための演算量低減手法を検討した。具体的には、各固有モード SNR 変動の上限および下限値(極値)を導出し、それを基に先に求めた時空間線形 ML プリコードが現在の通信路に対して許容可能 SER を満足しているかどうか確認することで時空間線形 ML プリコード更新の必要性を判断するアルゴリズムを構築する。提案手法により時空間線形 ML プリコード更新が必要無いと判断された場合、新たにその時点での CSI より時空間線形 ML プリコードを更新すること無く最適な情報伝送を行えるため、演算量を低減できる。計算機シミュレーションの結果、通信路の特性が時間的に変動しない場合と比較して、伝送レートおよび BER 特性を劣化させることなく、最適線形プリコーディングに要する演算量を低減できることを確認した。

第 5 章では、以上の成果を総括して本研究の結論をまとめた。

## 審査結果の要旨

本論文は、無線通信システムの送受信側に複数のアンテナ素子を設け、高品質、大容量の情報伝送を実現するための技術、すなわち、多入力多出力 (Multi-Input Multi-Output: MIMO) システムを対象とした、新たな時空間線形プリコード技術を提案したものである。得られた主な結果は、以下の項目に要約できる。

- (1) 最尤基準に基づく時空間線形プリコードの固有モードの信号電力対雑音比 (Signal-to-Noise Ratio: SNR) は、通信路行列の固有値により決定される。従って、通信路状態に応じ、時空間線形プリコードのサイズを適切に変化させることにより、固有モード SNR を増加させることが可能である。提案手法は、通信路の状態に応じ時空間線形プリコードのサイズを調整したものであり、同手法は従来手法に比べ固有モ

ード SNR が増加し、かつ良好なビット誤り率特性が得られる。

- (2) 時間的に変化する通信路を対象とした時空間線形プリコードの設計に際しては、未来予測した通信路に基づいて同プリコードを設計するのが有効である。提案手法では、多項式補外を用いて通信路特性を予測し、予測した通信路特性に基づき、時空間線形プリコードを設計している。提案手法は、通信路特性が時間的に変動する場合においても、良好な結果が得られていることを計算機シミュレーションにより検証している。
- (3) 時間的に変化する通信路を対象とした時空間線形プリコードの実現化を目指すには、同設計に要する演算量を低減化することが望まれる。提案手法では、時空間線形プリコード更新の有無を、固有モード SNR 変動極値から判定することにより、更新回数を減らし演算量の低減化を図っている。

以上の諸成果は、最尤基準に基づく時空間線形プリコードの実用化のための基礎的な知見や基盤を与えるものであり、この分野の技術の発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。