

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	工藤 理一
論文題目	Efficient Spatial Resource Management for Broadband MIMO Systems （広帯域MIMOシステムにおける空間リソース制御法の研究）		
（論文内容の要旨） 無線通信の普及および高速化の要求から、Multiple input multiple output (MIMO) 技術による空間リソースを用いた周波数利用効率の向上が研究されている。また、無線LANの国際標準規格IEEE 802.11nにMIMO技術が導入され、実用化も始まっている。MIMO技術は送受アンテナの小さい方の数に比例して周波数利用効率を高めることが可能であるが、ユーザ端末に用いることのできるアンテナ素子数は、装置回路規模、消費電力、小型化の要求から制限される。ユーザ端末におけるアンテナ素子数が小さい場合においても、周波数利用効率を増大することが可能な空間リソース制御技術が必要である。本論文では、将来の無線および有線通信で想定される様々なチャネル構成において、演算負荷の軽減および周波数利用効率の増大を実現する空間リソース制御技術について提案し、理論検討と伝搬実験の両面からその特性を明らかにしている。 第1章では、空間リソース制御法の導入が始まっている無線LANに注目し、その発展の歴史と技術的な課題を示し、本論文における空間リソース制御法で注目する研究課題について述べている。 第2章では、送信素子数が受信素子数より多い非対称MIMOチャネルについて取り上げ、アンテナ素子数に対する伝送容量の解析結果と非対称MIMOチャネルにおける簡易指向性制御法の効果を示し、OFDMシステムにおける相関行列指向性制御法と時空間ブロック符号(STBC)の組み合わせによる送信方法の提案を行っている。またレイリー及びライスフェージング環境における特性を明らかにし、演算負荷を大きく低減しながら、アレー利得を得られることを示している。 第3章では、マルチユーザMIMO構成における伝送容量について評価し、マルチユーザMIMO用の電力分配方法とユーザ選択方法を提案している。電力分配法によりチャネル誤差が大きい通信相手におけるスループットの低下を防ぐことが可能となり、またユーザ選択方法では、シングルユーザMIMOとマルチユーザMIMOの伝送容量の関係から、固有値減衰係数がマルチユーザMIMOの効果を示す指標となることを明らかにしている。この固有値減衰係数を用いることで、演算負荷を軽減しつつ、高い伝送容量を持つユーザ組み合わせを選択可能であることを示している。 第4章では、実伝搬環境における空間リソース制御技術の効果を検証するために開発したMIMO伝送装置と得られた実験結果について示している。空間リソース制御技術は伝搬チャネルによって特性が大きく影響されるため、実伝搬環境における実験が実用化に向けて大きな意味を持つ。送信素子16素子を用い、マルチユーザMIMOの効果をスループットにより評価し、シングルユーザMIMOに対し高い伝送容量を得られることを示している。また、連続測定を行ったチャネル情報を用いることで、時間変動より生じるチャネル情報誤差の伝送特性への影響を評価し、100 msの遅延時間に対しても高い伝送容量が得られることを明らかにしている。			

第5章では、更なるシステムスループットの改善のため、複数のアクセスポイントが協調する協調MIMOチャネルに注目し、集中制御シナリオと分散制御シナリオにおいて、それぞれゼロフォーシングにより指向性制御を行う空間リソース制御方法を提案している。計算機シミュレーションと実伝搬環境で測定したチャネルから各シナリオにおけるゼロフォーシング送信の適用領域とその効果を明らかにしている。

第6章では、MIMO技術の光通信への応用を示している。まず長距離伝送用の受信構成について、オーバーラップ周波数領域等化を用いた波長分散補償と時間領域等化の組み合わせを提案している。25 Gbit/sのシングルキャリア光伝送実験についてシングルモードファイバを用いて行い、4320 kmの伝送でもビット誤り率が 10^{-4} 以下となる高信頼度伝送特性が得られることを示している。また、2キャリアOFDM方式において、受信側のAD変換器のクロックレートを低減する等化方法を提案し、AD変換器のクロックレートを3/4に低減しつつ、ペナルティを0.1 dBに抑える高い特性が得られることを明らかにしている。

第7章はまとめであり、本研究で得られた主要な成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、無線通信および光通信において、伝搬チャネルにおける空間リソースを活用することで、システムスループットを増加させるための空間リソース制御法に関する研究成果をまとめたものであり、得られた主な研究成果は次のとおりである。

(1) 送信アンテナ数が受信アンテナ数より多い非対称MIMO通信において、簡易指向性制御法の効果を示し、OFDMシステムにおいて相関行列指向性制御法と時空間ブロック符号(STBC)を組み合わせる送信方法(CB-STBC)を提案している。CB-STBC法は、必要なチャネル情報量をサブキャリア数分の1に削減しつつ、アレー利得を得ることができ、ライスフェージング環境で固有ベクトル送信方法に特性が近づくことを計算機シミュレーションにより示している。

(2) 高い周波数利用効率を得られるマルチユーザMIMO通信において、電力分配法およびユーザ選択法を提案している。電力分配法は、チャネル情報誤差が大きい場合には、シングルユーザMIMO通信、誤差が小さい場合にはマルチユーザMIMO通信になる適応的な制御を可能にし、チャネル推定誤差が大きいユーザの伝送容量の低下を防いでいる。ユーザ選択法では、シングルユーザMIMOとマルチユーザMIMOの伝送容量を比較することで、マルチユーザMIMO通信における伝送容量の増大が固有値減衰係数により表せることを明らかにしている。固有値減衰係数を用いたユーザ選択法は、演算負荷を低減しつつ、伝送容量やチャネルノルムを用いた方法より高い伝送容量を得られることを示している。

(3) 実伝搬環境における空間リソース制御法の効果を評価するため、開発した最大16素子のアンテナを有するMIMO伝送装置について述べている。MIMO伝送装置を用い、マルチユーザMIMOのスループットを屋内環境で評価し、4素子のアンテナを有する4ユーザの場合で33.6 bit/s/Hzの周波数利用効率を得ることを明らかにしている。またチャネルの時間変動の影響をオフライン処理により評価し、100 msの遅延で、各ユーザの周波数利用効率の低下が1.2 bit/s/Hzという結果を示し、マルチユーザMIMO技術の実システムでの有用性を明らかにしている。

(4) 更なる周波数利用効率の増大を得るため、複数のアクセスポイントが連携する協調MIMO通信について、集中制御シナリオと分散制御シナリオの2つを示し、それぞれゼロフォーシングを用いた指向性制御法を提案している。MIMO伝送装置を用いて測定した屋内環境のチャネル情報によりその効果を評価し、集中制御シナリオではセル端に存在するユーザのスループットを改善し、分散制御シナリオではオーバーラップ通信セルとの距離が小さいほど改善効果が大きいことを示している。

(5) デジタル信号処理を用いた空間リソース制御を光通信に発展させ、超高速光伝送システムにおける受信方法のデザインについて、周波数領域等化と時間領域等化を組み合わせる受信構成と2キャリアOFDM用の低サンプリングAD変換器復号法を提案している。それぞれ、4320 kmとback-to-backの構成で伝送実験を行いその効果を明らかにしている。

以上、本論文は伝送メディアのスループット向上の観点に立ち、物理レイヤにおいて空間リソース制御によるシステムスループットの改善方法を提案し、理論検討および実伝搬実験の両面から有効性を示し、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成22年8月13日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。