

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630177

研究課題名(和文) Massive MIMOによる伝搬路制御型ビームフォーミング

研究課題名(英文) Massive MIMO Beamforming for Propagation Channel Control

研究代表者

村田 英一 (MURATA, Hidekazu)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：60252475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年の無線通信システムではチャネル状態に合わせた伝送が行われるが、フィードバック遅延等が避けられないため、瞬時伝搬路状態に適応した伝送技術は伝搬路変化に脆弱である。本研究では、伝搬経路を把握し移動体の受信アンテナへの入射方向を制約する基地局送信ビームフォーミングを行うことにより、アンテナに入射する信号のドップラー周波数の広がりを抑え伝搬路変化を緩やかとし、移動時であっても高精度な伝送制御を可能とすることに取り組んだ。

研究の結果、伝搬構造を把握しドップラー広がりを低減すれば伝送特性改善に結びつくことを3DレイラUNCHングによる伝搬路計算を用いた計算機シミュレーションによって明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To support the high capacity demands of wireless communication systems, high frequency band will be utilized in the near future. In this high frequency band, the effect of Doppler spread will become more significant and need to be carefully tackled. In this research, a beamforming technique is employed to reduce the Doppler spread which occurs at the mobile station. To give a more realistic channel model, the channel impulse responses are generated through a 3D ray launching method. The performance of this scenario is then evaluated through computer simulations.

研究分野：情報通信工学

キーワード：通信方式 ビームフォーミング 伝搬経路制御 ドップラー広がり ドップラースプレッド フィードバック遅延

## 1. 研究開始当初の背景

携帯電話やスマートフォンに代表される移動体通信では今後10年で1000倍のトラフィックが予想されている。これに対応するために基地局アンテナ数を数十から数百に増加させることが考えられている。これにより、減衰の大きな高周波数帯の利用を可能とし、また、空間多重伝送による周波数利用効率の向上を図る。しかし、このアンテナ数を活かす現実的な伝送方式はまだ十分に解明されているとはいえず、単にアレイ利得を得るための研究が主となっている。

最新の携帯電話や無線 LAN (Local Area Network) の伝送方式では瞬時の伝搬路に適応して変調方式や符号化率等が最適化される。OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ではサブキャリア割当てが、MIMO (Multi-Input Multi-Output) を併用する場合はさらに空間ストリーム数、マルチユーザ MIMO では送信側プリコーディングウェイトも同時に伝搬路に合わせて制御される。

このため伝搬路の変化に弱いことが知られている。伝搬路の誤差(移動による変化)を考慮した安全側の制御などが盛んに検討されているが、劣化を完全に防ぐことはできない。これらは、これまでの送信方法が基本的に SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) 等の最大化であったためである。

本研究では、多様な到来方向によって生じるドップラー周波数の広がりや予測不能な伝搬路変動を生じさせていることに着目し、SINR 最大化ではなくドップラー広がりを抑える送信方法を提案する。

ドップラー広がり狭くなれば受信機の AFC (自動周波数制御) などにより対策が可能である。提案する方式により、伝搬路変動が緩やかとなり、最近の伝搬路適応型伝送方式が本来の特性を発揮できる移動速度範囲を拡大できる。

## 2. 研究の目的

研究が活発化しつつある Massive MIMO (Large Scale MIMO) では、数十から数百の基地局アンテナによって自由度の高いビーム形成が可能となる。このことを活用して伝搬経路を制御することにより伝送特性を改善することに取り組む。

チャネル状態のフィードバック遅延等が避けられないため、近年の瞬時伝搬路状態に適応した伝送技術は伝搬路変化に脆弱である。これまでは単純な電力比である SNR (Signal to Noise Ratio)、SINR、SLNR (Signal to Leakage and Noise Ratio) の最大化が行われてきたが、本研究では、伝搬構造とシステムの伝送特性を結びつけ効率的なビームフォーミング方式を明らかにする。

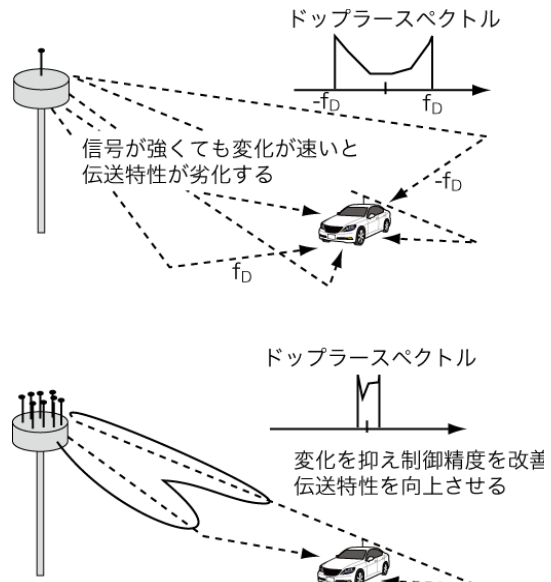


図1 入射角とドップラー広がり

本研究では、伝搬経路を把握し移動体の受信アンテナへの入射方向を制約する基地局送信ビームフォーミングを行うことにより、アンテナに入射する信号のドップラー周波数の広がりや伝搬路変化を緩やかとし、移動時であっても高精度な伝送制御を可能とすることに取り組む。

## 3. 研究の方法

本研究では、準備として仮想建物データに基づく 3D レイラウンチングを用いて伝搬構造を計算機上に生成する。このプログラムは過去に研究室内で開発済であるが、最新の OS (Operating System) 環境に合わせて改修し高速化・高精度化を行った。このプログラムによって生成した伝搬経路情報を伝送シミュレーションに利用することにより、伝搬構造を把握して送信ビームを形成することによるドップラー周波数広がり低減効果を確認する。また、移動端末から基地局への伝搬路情報フィードバック量や受信電力なども含めて総合的に評価する伝送シミュレーションを行い、提案するビームフォーミング手法の伝送特性改善効果を明らかにする。

図1は伝搬路制御型ビームフォーミングの効果を模式的に説明したものである。これまで、移動体の移動方向に対して多様な方向から入射するモデルが典型的な移動体通信の伝搬路モデルとして広く使われてきた。このモデルは Jakes モデル、Clark スペクトルなどと呼ばれるものである。このモデルに従うとドップラー広がりが大きくなるが、仮に移動体への入射方向を制約すればドップラー広がりや抑えられることがわかる。

## 4. 研究成果

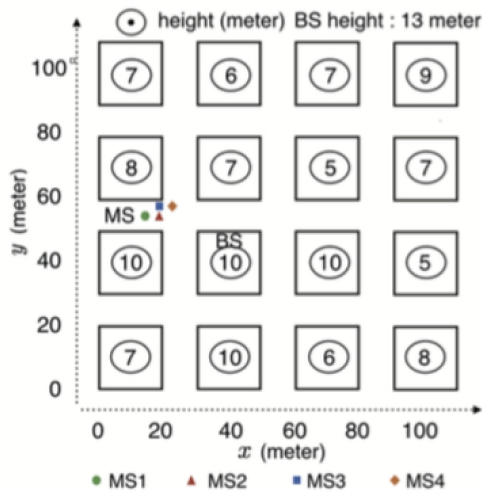


図 2 仮想建物データ

本研究では、準備として図 2 に示す仮想建物データに基づく 3D レイラウニングを用いて伝搬構造を計算機上に生成した。なお、伝送シミュレーションのためには波長よりも十分短い間隔での伝搬路係数（振幅・位相情報）が必要とされる。このように密な空間密度で 3D レイラウニングを行うことは計算時間の点で現実的ではない。このため、移動体への入射角と信号強度を 3D レイラウニングで求め、その角度スペクトルをもとに移動速度に応じたドップラー回転を与えることによって伝送シミュレーション用の伝搬路を生成した。

図中の MS (Mobile Station) が移動局を表しており、BS (Base Station) が基地局である。建物の上の数字は建物の高さを表している。この伝搬環境において 3D レイラウニ

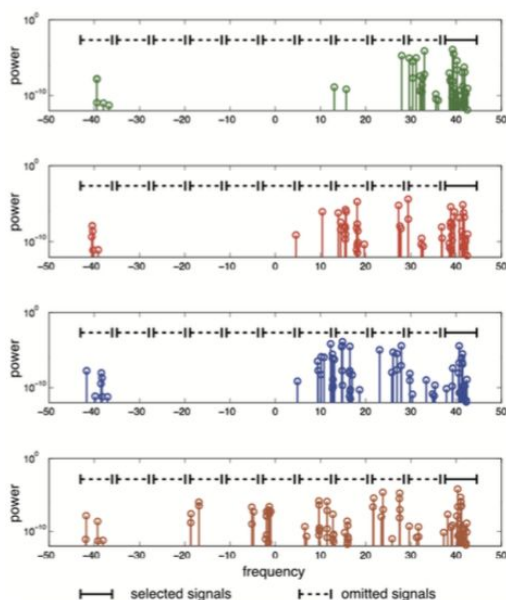


図 3 各移動局でのドップラースペクトルの例

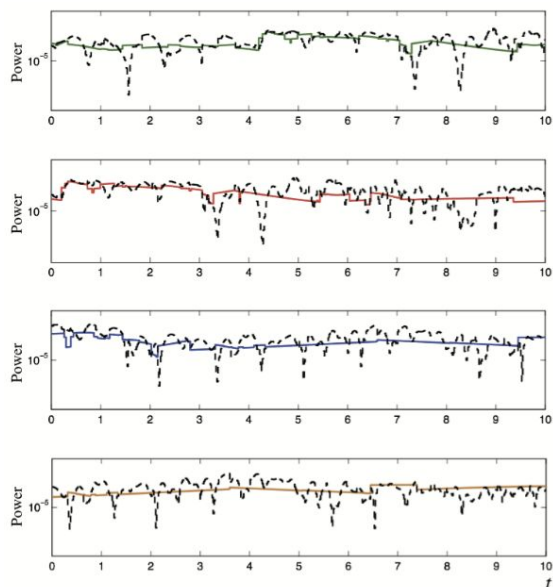


図 4 各移動端末での伝搬路変動

ングを行い、基地局におけるドップラー広がり計算した結果が図 3 である。

このように、移動局の位置に応じてドップラースペクトルは異なり、また、この計算例ではドップラー周波数の偏りがあることがわかる。

ここで、入射方向を制約することによるシステム伝送特性の改善効果を把握するために、4x4 ZF-MU-MIMO 伝送を行った。これは、4 アンテナ基地局と 4 台の単一アンテナ移動局を想定して、ゼロフォーシング (Zero Forcing: ZF) 規範によるマルチユーザ (Multi User: MU) MIMO プリコーディングを行うものである。一例として、シンボル周波数で正規化した最大ドップラー周波数を  $2 \times 10^{-5}$ 、チャンネル情報のフィードバック遅延を 1000 シンボル時間としている。

図 4 に、各移動端末での伝搬路変動を示す。点線がビームフォーミングを用いない場合、実線がビームフォーミングによる入射角制限を適用した場合である。この図より、伝搬路変動が大幅に緩やかになることがわかる。

実線に見られる階段状の変化は伝搬経路（パス）がビーム外に入ったり、外れたりした時に対応して生じるものであり、ビームの想定形状に依存したものである。ここでは、簡単のために理想的な矩形ビームを採用しているために生じた現象であり、より現実的なビーム形状を仮定すれば生じないものと考えられる。今後、アダプティブアレイアンテナの制御アルゴリズムの適用を検討する予定である。

図 5 は、ZF-MU-MIMO 伝送におけるビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) を示している。この図から、入射角を制約するビームフォーミングを適用することによる大幅な BER 特性改善効果が確認できる。なお、横軸である SNR は、入射角を制約する前の信号対雑音電力比

であり、入射角を制約することによる SNR 低下による BER 特性の劣化は反映されている。

本研究では、伝搬経路を積極的に選択することにより、これまで改善が困難であった移動に伴う伝搬路変動に起因する伝送特性劣化を大幅に改善できることを示した。この技術は基地局アンテナ数が増大し、ビーム形成自由度が増える Massive MIMO に対して適用性に優れ、ビーム形成に対する新たな視点を提示している。

最大の特徴は Massive MIMO 技術の自由度の一部を伝搬経路の制御に用いることであり、これにより、多様な伝搬路がもたらす MIMO 空間多重による容量拡大を保ちつつ、個々のビームは移動方向に応じて多様性を制御することによって、移動に対してロバストな送信ビーム制御方式を創造できる可能性があることが本研究によって示された。

今後、より詳細な伝搬構造のモデル化、3D レイラウンチングの改良、適応的なビーム形成方式のアルゴリズム具体化などを行い、本着想の有効性を示していく。また、強く伝搬環境に依存する研究であるため、伝送実験を視野に入れて研究を進める予定である。

九州大学（福岡県・福岡市西区）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村田 英一 (MURATA, Hidekazu)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

研究者番号： 60252475

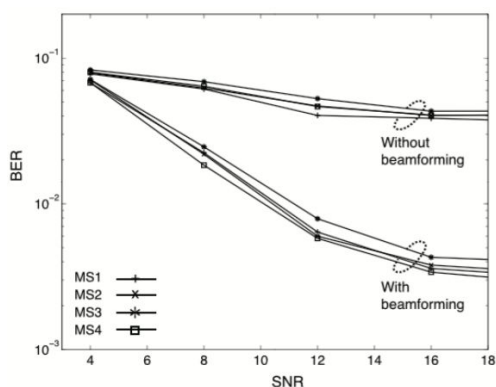


図 5 ビームフォーミングによるビット誤り率改善効果

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

Ilmiawan Shubhi, Hidekazu Murata,  
“3D ray launching evaluation of high frequency transmission with beamforming technique,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2016-16, pp.89--92, 2016年4月22日, 星と森のロマンピア(青森県・弘前市)

Ilmiawan Shubhi, Hidekazu Murata,  
“Performance evaluation of beamforming technique for MU-MIMO transmission using 3D ray launching,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-114, p.507, 2016年3月18日,