

アナログ・デジタル融合型 Massive MIMO におけるキャリブレーション技術の研究開発

研究代表者	西森 健太郎	新潟大学 工学部	准教授
共同研究者	堀 俊和	福井大学 工学部	教授
共同研究者	平栗 健史	日本工業大学	教授

1 研究背景

スマートフォンなどの普及により、小型端末を用いて高速データ通信が行えるようになった。限られた周波数帯域で伝送速度を向上させるキー技術として、送受信アンテナに複数のアンテナを用い高速伝送を実現する Multiple Input Multiple Output (MIMO) 伝送技術が導入されている。また、将来の無線通信の規格である LTE-Advanced や IEEE802.11ac では、MIMO 技術を複数のユーザに適用可能なマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) が採用されている。

近年のトラフィック量は年間 2 倍ずつ増大することが想定されており、LTE-Advanced 以降の将来のセルラシステムでは、さらなる周波数利用効率向上を目指したスモールセルの導入が進められている。その中で多数の端末が増大する環境で、基地局のアンテナ数を多素子化することで、サービスエリアの改善と干渉問題を解決する手法として、Massive MIMO と呼ばれるコンセプトが提案されている [1]。

MU-MIMO では、他ユーザに形成する指向性のヌル形成による高度な信号処理により高速通信を実現する。しかしながら、IEEE802.11ac や LTE Advanced に導入される予定である MU-MIMO では、サポートする基地局の素子数は 8 までである。このような状況では、ユーザのトータルのアンテナ数が基地局のアンテナ数と同等となると、急激にユーザあたりの伝送速度が低下することが知られている。一方、Massive MIMO では、基地局のアンテナ数がユーザの合計のアンテナ数よりも十分に多いことを想定しているため、ユーザ数増加が増加しても伝送速度はさほど低下しない利点を有する。

Massive MIMO のもう一つの利点としては、簡易な信号処理を用いることができることが挙げられる。著者らは所望信号の合成のみを行う Maximum Ratio Combining (MRC) でも、複数の干渉信号が存在する環境において、逆行列の計算を必要とする Zero Forcing (ZF) と同等の性能を得ることができることを明らかにしている。

ここで、Massive MIMO を含め、MIMO および MU-MIMO の検討では、これまで主に送信側の指向性制御および受信側の復号技術がフォーカスされてきた。すなわち、物理層 (Physical Layer : PHY) における検討が多く行われてきた。しかしながら、Single User (SU)/MU-MIMO では、送受の間の伝搬特性を表す伝搬チャネル行列を利用することが大前提となるため、この情報取得のための効率を考慮することが実際には必要となる [2]。すなわち、PHY レベルだけではなく、Medium Access Control (MAC) 層まで考慮した評価が必要不可欠である [2]。本検討では、無線 LAN の最新規格である IEEE802.11ac を例にとり、Massive MIMO を想定した多素子アレーによる下り回線における通信効率をできるだけ厳密に評価することで、Massive MIMO 実現に向けた多素子アレーの総合性能を定量評価することを目的とする。

本検討では、Massive MIMO の原理とその利点について述べる。次に、Massive MIMO 実現のために必要な伝搬チャネル(Channel State Information : CSI) を取得するための方法について述べる。特に、送信指向性制御を用いる場合、端末から基地局に CSI をフィードバックすることが一般的には必要とされ、それによる通信効率が著しく低下することを示す。また、この改善手法として、CSI フィードバックを不要にする手法 (Implicit Beamforming : IBF) を紹介する。さらに、IBF を実現するためには、基地局送受信装置の振幅と位相差を補正するキャリブレーションが必要であることを示す。最後に、CSI のフィードバックのあり/なしにおける MAC 効率を考慮した Massive MIMO のスループットを比較し、IBF の有効性を明らかにする。

2 キャリブレーション回路の原理と効果

2-1 Massive MIMO の概要と CSI フィードバック

以下に Massive MIMO のコンセプトを示す。Massive MIMO では、ユーザ数に対し、非常に多数の基地

局アンテナを用いることで、通信の信頼性や通信速度の向上を実現する。下り回線に適用する場合は送信電力の低減を可能とし、上り回線に適用する場合は端末の消費電力を低減できる。さらに、Massive MIMOでは指向性が非常に狭くなるため、対象とするユーザ以外の干渉を自動的に回避できる効果を有する。

図 1(a)に CSI フィードバックを考慮した MU-MIMO のフレーム構成の例を示す。基地局アンテナ数と端末局アンテナ数をそれぞれ NT , NU とする。簡単化のために、端末毎のアンテナ数(NR)は 1 とする。まず、MU-MIMO では通信を開始する前に、通信端末を確定させるための制御信号を送信する (時間 A)。基地局が CSI を取得するために、基地局のアンテナ 1~ NT から、時分割で 1~ NU 番目の端末に制御信号を送信する (時間 B)。各端末はこの情報を用いて CSI を推定し、CSI を基地局にフィードバックする (時間 C)。MU-MIMO において基地局アンテナ数を増加させる場合やユーザスケジューリングのために、ユーザ数が増加すると、CSI のフィードバック量は膨大となる。文献[3]の結果によれば、基地局アンテナ数を 64 とするとき、IEEE802.11ac 規格におけるオーバーヘッド量を算出すると、その値は数十 ms になることが報告されている。無線 LAN の 1 回のパケット伝送が数 ms 内で収めることを鑑みると、これは伝送速度向上のための大きな足かせになるだけでなく、制御信号の長さとしてはもはや現実的とはいえない。

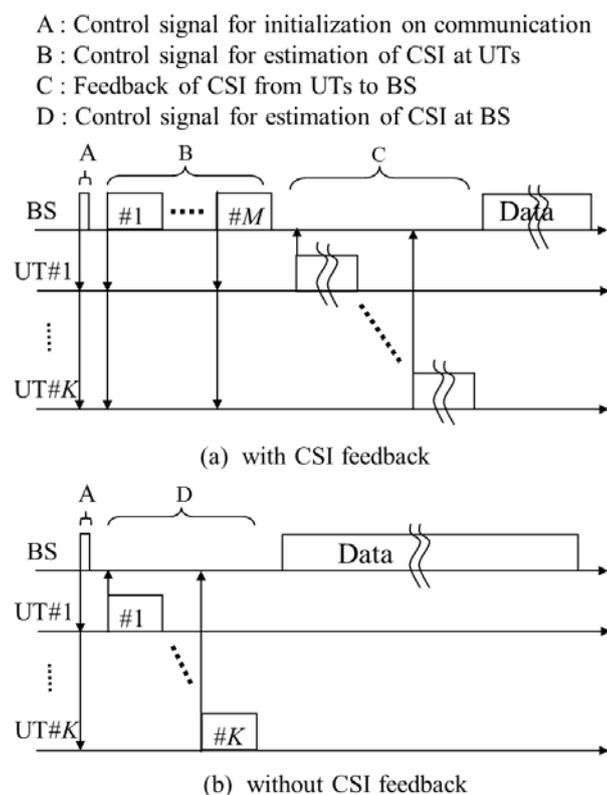


図 1: CSI フィードバックあり/なしにおける制御フレーム構成

2-2 キャリブレーションの原理

伝送効率改善手法として、端末側からの制御信号を基地局が受信し、その情報で CSI を推定する手法が提案されており、この手法は Implicit beamforming (IBF) と呼ばれる。図 1(b)に制御フレームを示す。この考えは、送信と受信の周波数が同じとなる Time Division Duplex (TDD) システムで有効であり、送受の伝搬チャネル応答の可逆性を利用するものである。具体的には、基地局の装置内の送受信機の伝達関数の差を補正するキャリブレーション技術で解決できる。この方法のもっとも重要な特徴は、CSI フィードバックに要する時間 C を完全に無くすることができる。これにより、Massive MIMO において大幅に伝送効率を向上できることが報告されている[3]。また、この手法はユーザスケジューリングを適用する環境でも有益となる。ただし、IBF を実現するためには、基地局の送受信機の個体差 (振幅と位相) を補正するキャリブレーション技術が必要となる。

図 2 にキャリブレーション回路の構成を示す。送信機と受信機の振幅と位相誤差特性を明らかにするこ

とを主な目的とし、送信機を 16、受信機を 16 として、 $4 \times 16 = 64$ 通りの送信機および受信機の伝達関数の誤差を得る構成となっている。送信機と受信機はダイレクトコンバージョン方式を採用している。ベースバンド IQ 信号と RF 信号を Local Oscillator (LO) で設定した周波数に変換でき、その範囲は 400MHz から 6GHz となる。送信機のための電力増幅器 (HPA) と受信機のための低雑音増幅器 (LNA) を配置する関係から、現在の使用周波数帯域は 2.4~2.6GHz となっている。なお、HPA と LNA を交換すれば、400MHz から 6GHz の任意の周波数での運用が可能となる。ベースバンドの帯域は最大 50MHz で動作する。送信側には 8 個の D/A 変換機が、受信側には 32 個の A/D 変換機が配置される。

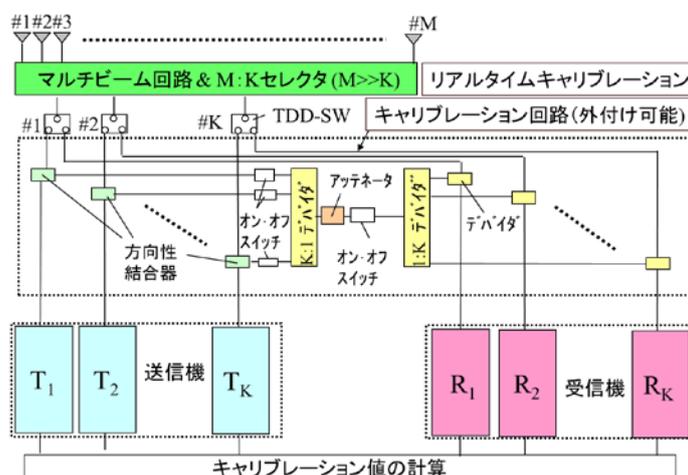


図 2: 提案するキャリブレーション回路の構成

2-2 効果

図 3 に、図 1 の受信回路における位相誤差を測定した結果(a)を示す。測定周波数は 2.55GHz とした。また、MSK 変調信号を校正用信号として使用した。また、得られた位相誤差を用いて、キャリブレーションを行った後の結果(b)を示す。本測定において、キャリブレーション回路 (方向性結合器、デバイダ) で発生する位相誤差はあらかじめ測定し、その影響を除いている。また、図 3 には、Rx1 に対する R_k ($k=1 \sim 16$) の位相誤差を求めている。図より、キャリブレーションを行わない場合は受信機ごとに位相差が異なることがわかり、その範囲は約 60~150 度となる。一方、キャリブレーションを適用すると、位相誤差はほぼなくなり、誤差は 1.5 度以内になることが確認できた。

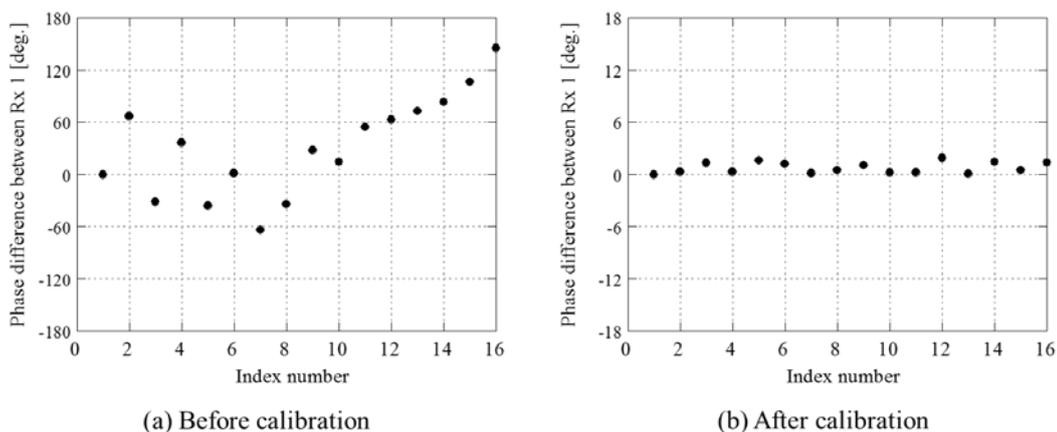


図 3: 提案キャリブレーションによる位相誤差低減効果

次に、実際に装置で得られた位相誤差特性を用いて評価を行う。図 4 に、図 3 で得られた受信回路の位相誤差特性を用いた 16 素子半波長間隔リニアアレーのアレーファクタを計算した結果を示す。この計算では、ブロードサイド方向(図 4(a))と 45 度方向 (図 4(b))が最大利得となるように指向性合成している。こ

の計算では素子間相互結合は考慮していない。まず、図4の点線は、受信回路における位相回路を考慮したアレーファクタであるが、理想的なアレーファクタと大きく異なることがわかる。例えば、所望信号の方向が0度で、0干渉信号の方向が50度となる場合は、本来であれば-25 dB程度のサイドローブが得られるが、その値が-13 dB程度まで上昇する。一方、キャリブレーションを適用すると、理想的なアレーファクタとほぼ一致することがわかる。以上の結果より、上り回線の信号を利用して送信制御を実現するIBFでは、キャリブレーション技術が必須であることがこの結果からも明らかとなった。

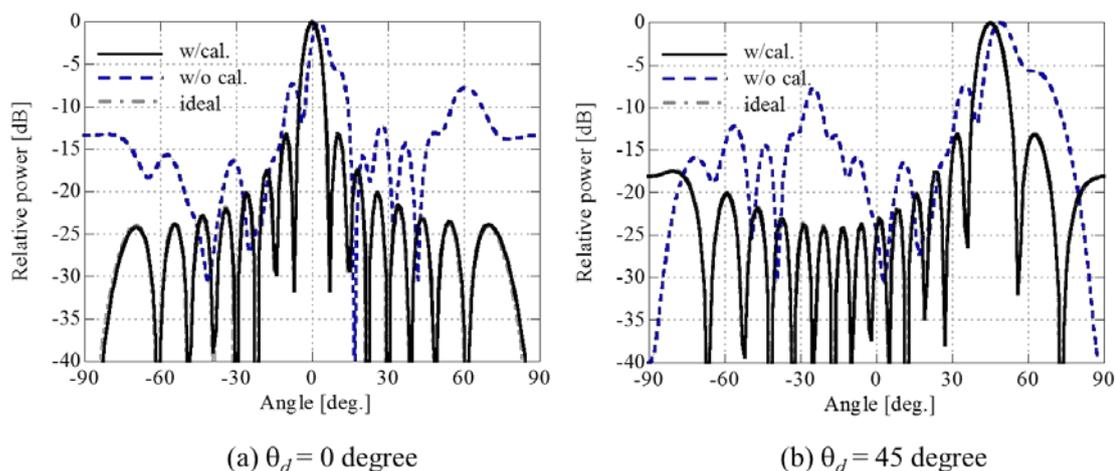


図4: 図3の位相誤差特性を考慮したアンテナパターン

最後に、キャリブレーション誤差を考慮したIBFによるMU-MIMOのスループット特性を定量的に評価する。IEEE802.11acの信号に準拠した方法で評価を行った。

送信アンテナ数 N_T は16とした。また、受信素子数 N_R は1、ユーザ数 N_U は4とした。すなわち、ユーザあたりの送信データ数は1となる。MU-MIMOにおいて送信アンテナ数が受信アンテナ数×ユーザ数よりも多くなると、ビームフォーミングゲインによりPHYにおける伝送速度が大きく向上し、サービスエリアを増大することができる。しかし、アンテナ数の増大はCSI取得数の増大にもつながる。特にCSIフィードバックを適用する場合は、通信効率の低下につながる事が予想される。本検討では、IEEE802.11acで規定されるパラメータを用いて、MACレベルでのスループットを評価した。パラメータの詳細は文献[3]で引用できる。

本検討ではCSI取得などの制御信号を考慮した通信効率を厳密に行うことを目的とし、伝搬環境としてはMU-MIMO通信にとって理想的な環境であるi.i.d.レイリーフェージング環境を採用した。一方、送信指向性制御はサービスエリア端でその効果が向上することから、屋内モデルとして提案されているITU-Rの伝搬損失モデルを採用した。周波数は5.2GHzとし、送受信距離に対する伝搬損失係数は3.1とした。サービスエリアは1~50mまでを考慮した。MU-MIMOの指向性制御にはBD法を用いた。

図5に、基地局と端末の送受信距離に対するPHYレベルでの伝送レート特性を示す。図から明らかのように、送信アンテナ数 N_T を増加させることにより、同一の送受信距離では伝送レートが、同一の伝送レートではより長い送受信距離で通信が実現できることが確認できる。この計算では、トータルのデータ数が4であるため、 N_T を4から8に増加させる効果は大きいですが、それ以上増加させると効果は徐々に少なくなることも確認できる。例えば、送受信距離が15mの場合、 N_T を4から8、16に増加させることで伝送レートをそれぞれ2, 2.5倍にすることができる。サービスエリアを増大させる効果としては、 $N_T=4$ の場合送受信距離が35mまでしか通信できないのに対し、 N_T を増加すれば50mでも十分に通信でき、これに関しては、素子数増加すればするほど効果が大きくなる事が確認できる。先の結果により、MU-MIMOにおける送信指向性制御の効果が示された。

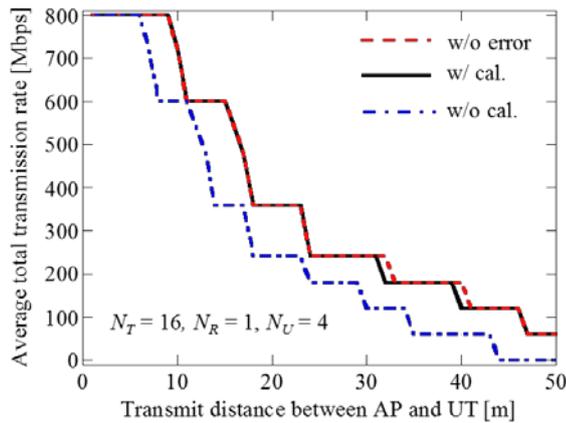


図 5：送受信距離に対する伝送レート (PHY)

送信アンテナ数の違いによる CSI の影響を考慮したスループット特性を図 6 に示す。データサイズは 37500byte としている。ここでは、CSI フィードバックを考慮した場合と考慮しない場合の特性を比較している。CSI フィードバックを考慮すると、 N_T を増加させてもスループット特性が大きく向上しないことがわかる。一方、CSI フィードバックを用いないインプリシットビームフォーミングを適用すると、スループットはアンテナ数が多くなると大幅に向上することが確認できる。 N_T が 4, 16 の場合、送受信距離を 15m とした場合、それぞれ 11, 62Mbps のスループット改善効果が得られることが確認できた。

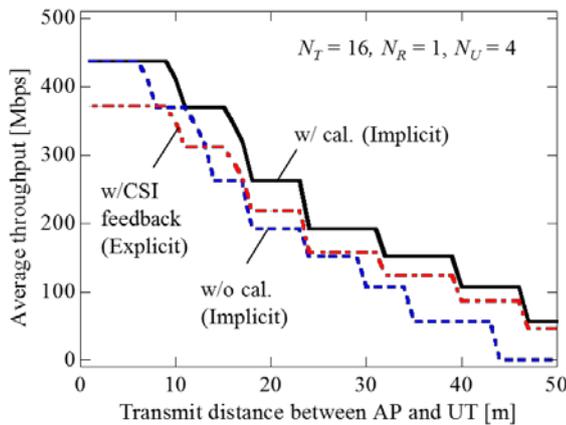


図 6：送受信距離に対するスループット

最後にデータサイズを変化させた場合のインプリシットビームフォーミングによりスループット改善効果を図 7 に示す。まず、送受信距離 d が 20m の場合を見ると、 $N_T=4$ の場合は、データサイズが小さくても CSI フィードバックをなくす効果は小さく、その改善は 1.2 倍程度にとどまっている。一方、 $N_T=16$ の場合は、データサイズが 5000byte では 1.5 倍のスループット改善効果を得る。さらに、 $N_T=16$ の場合は、送受信距離 $d = 40$ m の場合に最大で 2 倍以上のスループット改善効果を得ることができる。これらの結果から、データサイズが小さく、かつ送信アンテナ数が多い環境でインプリシットビームフォーミングの効果が大きくなることを明らかにした。

以上より、提案するキャリブレーション技術がアンテナハードウェア、通信効率改善の観点から非常に優れた技術であることを明らかにした。

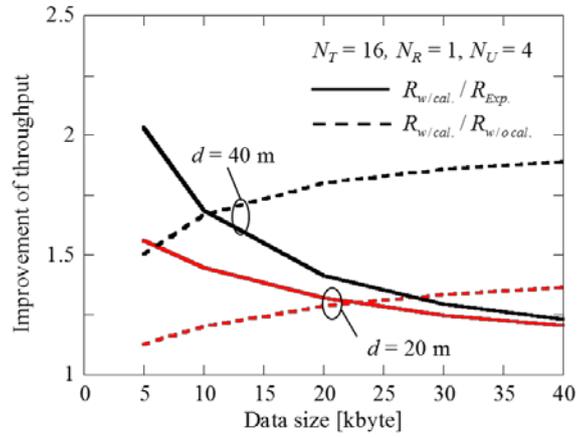


図 7: データサイズとスループット改善の関係

【参考文献】

- [1] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling Up MIMO -- Opportunities and challenges with very large MIMO--," IEEE Signal Processing Magazine, pp.40-60, Jan. 2013.
- [2] T. Murakami, H. Fukuzono, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, "Multiuser MIMO with implicit channel feedback in massive antenna systems," IEICE Communications Express, Vol.2 No.8 pp.336--342, Aug. 2013.
- [3] T. Hiraguri and K. Nishimori, "Survey of transmission methods and efficiency using MIMO technologies for wireless LAN systems (Invited Survey Paper)," IEICE Trans. Commun. Vol.E98-B, No.7, pp.1250-1267, July 2015.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
任意送信信号を用いた MIMO システム用キャリブレーション法	電子情報通信学会論文誌	2016 年 9 月