

近似的メッセージ伝搬法に基づく通信路とデータの同時推定

藤塚 拓実

2016 年 11 月 29 日

目次

第 1 章	はじめに	2
1.1	研究背景	2
1.2	大規模 MIMO(Massive MIMO)	2
1.3	研究目的	2
1.4	研究内容	3
1.5	論文構成	4
第 2 章	提案手法	5
2.1	問題設定	5
2.2	APM アルゴリズムの導出	7
参考文献		8

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

2020 年東京オリンピック・パラリンピック大会に向けて、日本国内の情報通信基盤 (ICT) を飛躍的に向上させる戦略が、総務省を中心として活発になっている。その戦略の一つとして、第 5 世代移動通信システム (以下「5G」) の実現がある。[1]

近年スマートフォンのような高機能端末が一般層へ広く普及したことを起爆剤として、M2M や IoT が拡大していくことが予想されている。そのため、現行の 4G/LTE よりもさらに、超高速・大容量のモバイル通信ネットワークとして、5G の実現が求められる [2]。

1.2 大規模 MIMO(Massive MIMO)

5G の中心的役割を担う技術が、大規模 MIMO(massive MIMO) である。MIMO(Multiple Input Multiple Output) とは、送受信側が複数のアンテナを持ち合わせ持つことにより、データレート増加、ダイバーシチによる特性改善を図ることができるものである [3]。4G/LTE で既に使用されている MIMO では、基地局 (受信側) のアンテナは 2,4,8 本程度しか持ち合わせていないが、大規模 MIMO は、基地局のアンテナを 100 本以上まで増やし、同じ基地局を利用するユーザも 100 人規模までいることを仮定することで、多入力、多出力のシステムを想定している。図 1.1 に概念図を示す。

本研究では、大規模 MIMO システムの実用化に向けて、基地局側において、ユーザから送信された信号、また、その通信路について推定する。

1.3 研究目的

大規模 MIMO では、100 本以上の基地局のアンテナの受信情報を効率的に演算し、送信信号を復調する必要がある。実際の大規模 MIMO システムでは、基地局間干渉が発生するため、受信側の基地局では、別の基地局のユーザからの干渉を受けることになる。本研究では、基地局間干渉を考慮したうえで、基地局側が信号を復調する際、別の基地局の信号と自身の基地局の信号を分離できるような計算方法を確立することを目的とする。

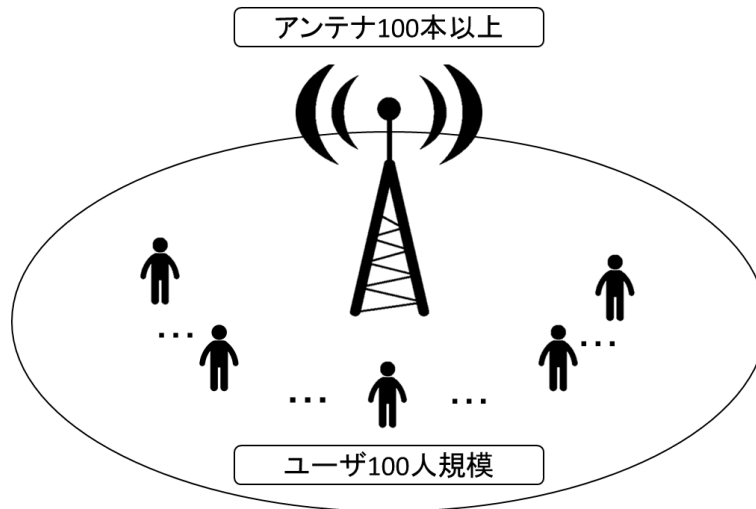


図 1.1 大規模 MIMO の概念図

1.4 研究内容

大規模 MIMO の復調の計算方法として、近似的メッセージ伝搬法 (Approximate Message Passing 以下「AMP」) を用いる。AMP は、人口知能分野で提案された確率伝播法 (Belief Propagation BP) を基礎として発展した統計学的手法であり、もともとは、圧縮センシングの分野で提案された手法である [4]。

AMP アルゴリズムを用いて、二つの行列の積の情報より、元の二つの行列を推定する体系的な理論は、参考文献 [5] の著者である樺島祥介氏らによって考案された。参考文献 [5] では、あくまで、体系的な理論を説明し、広い範囲において適応できるシミュレーションにとどまっているが、本研究では大規模 MIMO の基地局間干渉がある事象に的を絞った。具体的には、図 1.2 に示すように、推定する二つの行列を通信路と送信データとして、二つの行列の積の結果に白色雑音を足したものを大規模 MIMO のアンテナが受け取る受信信号として、受信信号より通信路と送信データを推定する。

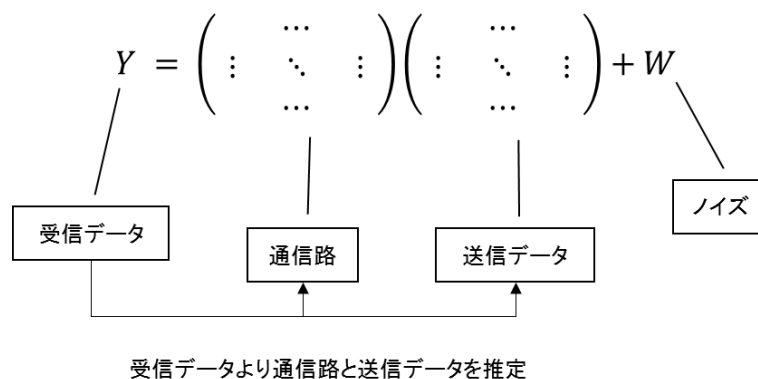


図 1.2 想定しているシステムの行列

1.5 論文構成

第 2 章

提案手法

2.1 問題設定

2.1.1 アップリンクマルチユーザ MIMO

本研究は、複数ユーザが基地局に情報を送るアップリンクを想定して研究を行った。ユーザ数を K 、受信アンテナ数を N とし、ユーザは単一の送信アンテナを持つことを想定する。また、簡単のため、フェージング係数が観測時間 T の間一定であるブロックフェージング通信路を仮定する。受信信号 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N \times T}$ は式 (2.1) にて与えられる。

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{H} \mathbf{X} + \mathbf{W}. \quad (2.1)$$

$\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{K \times T}$ は全ユーザの送信信号であり、 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times K}$ はすべてのユーザとアンテナ間のフェージング係数である。ここで、 \mathbf{H} に関して、すべての行列成分は、互いに独立で同一の分布 (independent and identically distribution : i.i.d) のレイリーフェージングに従うと仮定する。具体的には、それぞれが独立した円対称複素ガウス雑音 (circularly symmetric complex Gaussian : CSCG) であり、分散は 1 とした。また、 $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N \times T}$ は受信時に生じる雑音のことであり、それぞれが独立した円対称複素ガウス雑音で、分散は N_0 とした。

ここで、基地局間干渉のため、ユーザーを二つのグループに分ける。一方のグループは自分の基地局のエリアに存在するユーザで、 $K/2$ 人で構成され、残る $K/2$ 人のユーザは別の基地局のエリアのユーザであり、自分の基地局の信号に干渉してくる。これを踏まえ、 \mathbf{X} を式 (2.2) のように定義する。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P} & \mathbf{X}_{21} & \mathbf{X}_{22} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

\mathbf{P} は $K/2 \times T_p$ のパイロット行列であり、基地局側にとってこの信号は既知である。 \mathbf{X} の行方向は観測時間 T であるので、 \mathbf{P} の送信時間の違いによって、行列 (2.2) は上半分と下半分で基地局を分けている。また、 \mathbf{X} 信号はそれぞれ、式 (2.3) のような電力 1 の QPSK 信号である。電力 1 というのは、ユーザの長期的な平均電力とする。

$$x_{kt} = \{u + jv : u, v = \pm \sqrt{1/2}\}. \quad (2.3)$$

2.1.2 通信路推定とデータ推定

受信側で推定するデータを $\hat{\mathbf{X}}$ として、ここでは、推定するデータは事後平均推定

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbb{E}[\mathbf{X} | \mathbf{Y}, \mathbf{P}] \quad (2.4)$$

を目標とする．しかし，大規模 MIMO システムでは，式 (2.4) を現実的な時間で解くことは，不可能である．そこで，AMP アルゴリズムを用いる．詳しい式の導出は，2.2 にて説明する．AMP アルゴリズムを使う条件として， N, K, T, T_p が無限大に近く， $\alpha = K/N$ ， $\beta = T/N$ ， $\tau = T_p/T$ が一定で保たれる必要がある．AMP アルゴリズムでは，表 2.1 で示される 8 つのメッセージをそれぞれ交換することで推定を行っていく．初期値として，パイロット信号が入っている $(k, t) \in \{1, \dots, K/2\} \times \{T - T_p + 1, \dots, T\}$ もしくは $(k, t) \in \{K/2 + 1, \dots, K\} \times \{1, \dots, T_p\}$ のとき， $\hat{x}_{kt} = x_{kt}$ ， $\xi_{kt} = 0$ となり，パイロット信号が入っていない，それ以外の成分は $\hat{x}_{kt} = 0$ ， $\xi_{kt} = 1$ とした．また， (n, t) の要素は， $\hat{h}_{nt} = 0$ ， $\eta_{nt} = 1$ とした．

表 2.1 AMP アルゴリズムで使用されるメッセージ

\hat{x}_{kt}	x_{kt} の事後平均
ξ_{kt}	x_{kt} の事後分散
\bar{x}_{kt}	x_{kt} の外部平均
$\bar{\xi}_{kt}$	x_{kt} の外部分散
\hat{h}_{nk}	h_{nk} の事後平均
η_{nk}	h_{nk} の事後分散
\bar{I}_{nt}	y_{nt} の干渉の平均
ζ_{nt}	y_{nt} の干渉の分散

ここで，各メッセージを計算するための定義式を記す．まず，干渉を差し引いた出力 $z \in \mathbb{C}$ は

$$z_{nt} = \frac{y_{nt} - \bar{I}_{nt}}{N_0 + \zeta_{nt}} \quad (2.5)$$

と定義する．さらに， $\Re[x_{kt}]$ の軟判定関数として，以下のような関数を定義する．

$$f_k(u; v) = \frac{e^{2u/v} - e^{-2u/v}}{e^{2u/v} + e^{-2u/v}}. \quad (2.6)$$

さらに，複素関数 $A_{kt}(z)$ として，以下のような関数を定義する．

$$A_{kt}(z) = \Re[z] \frac{\partial f_k}{\partial u}(\Re[\bar{x}_{kt}]; \bar{\xi}_{kt}) + j \Im[z] \frac{\partial f_k}{\partial u}(\Im[\bar{x}_{kt}]; \bar{\xi}_{kt}). \quad (2.7)$$

次に，データ推定に関わるメッセージの式を以下に示す．

$$\hat{x}_{kt} = f_k(\Re[\bar{x}_{kt}], \bar{\xi}_{kt}) + j f_k(\Im[\bar{x}_{kt}], \bar{\xi}_{kt}), \quad (2.8)$$

$$\xi = 1 - |\hat{x}_{kt}|^2, \quad (2.9)$$

$$\bar{x}_{kt} = \frac{\bar{\xi}_{kt}}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \hat{h}_{nk}^* z_{nt} + \left(1 - \frac{\bar{\xi}_{kt}}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \eta_{nk} |z_{nt}|^2\right) \hat{x}_{kt}, \quad (2.10)$$

$$\bar{\xi}_{kt} = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|\hat{h}_{nk}|^2}{N_0 + \zeta_{nt}} \right)^{-1}. \quad (2.11)$$

次に，通信路推定に関するメッセージの式を示す．

$$\hat{h}_{nk} = \frac{\eta_{nk}}{\sqrt{N}} \sum_{t=1}^T \hat{x}_{kt}^* z_{nt} + (1 - \eta_{nk}) \hat{h}_{nk} - \frac{\eta_{nk}}{N} \sum_{t=1}^T \bar{\xi}_{kt} A_{kt}^* \left(\hat{h}_{nk}^* z_{nt} \right) z_{nt}, \quad (2.12)$$

$$\left(1 + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \frac{|\hat{x}_{kt}|^2}{N_0 + \zeta_{nt}}\right)^{-1}. \quad (2.13)$$

最後に，干渉に関するメッセージの式を示す．

$$\bar{I}_{nt} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^K \hat{h}_{nk} \hat{x}_{kt} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \bar{\xi}_{kt} A_{kt} \left(\hat{h}_{nk}^* z_{nt} \right) \hat{h}_{nk} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \eta_{nk} |\hat{x}_{kt}|^2 z_{nt}, \quad (2.14)$$

$$\zeta_{nt} = \sum_{k=1}^K \left(\eta_{nk} \xi_{kt} + \eta_{nk} |\hat{x}_{kt}|^2 + |\hat{h}_{nk}|^2 \xi_{kt} \right) \quad (2.15)$$

AMP アルゴリズムでは，式 (2.8)-(2.15) を解くことで，通信路とデータを同時推定する．

2.2 APM アルゴリズムの導出

2.2.1 近似的確率伝搬法 (Belief Propagation BP)

2.2.2 近似的メッセージ伝播法 (Approximate Message Passing AMP)

参考文献

- [1] 鈴木 茂樹, “2020 年に向けた情報通信基盤整備の戦略,” 2014, 2016 年 11 月 22 日閲覧
<https://www.nic.ad.jp/ja/materials/iw/2014/proceedings/d2/d2-suzuki.pdf>
- [2] 須山 聡, シン キュン, 小原 辰徳, 角 誠, 中島 光雅, 奥村 幸彦, “高周波数帯を用いた超高速 MassiveMIMO 伝送の基本特性”, 信学技報, 2014 年 3 月.
- [3] Abdera Goldsmith, “Wireless Communication”, Cambridge University Press, 2005, (訳) 小林 岳彦・岩切 直彦・大坐畠 智・幸谷 智・高橋 賢・森 香津夫・山崎 彰一郎, “ゴールドスミス ワイヤレス通信工学 基礎理論から MIMO, OFDM, アドホックネットワークまで”, 丸善株式会社, , p.297, 2007
- [4] D. L. Donoho, A. Maleki, and A. Montanari, “ Message-passing algorithms for compressed sensing, ” Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 2009.
- [5] Yoshiyuki Kabashima, Florent Krzakala, Marc Mzard, Ayaka Sakata, and Lenka Zdeborov, “Phase Transitions and Sample Complexity in Bayes-Optimal Matrix Factorization ” , IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL. 62, NO. 7, 2016