

CSI推定のオーバーヘッドを考慮した ネットワークMIMOに関する検討

小林 真^{1,a)} Bryan Ng² Winston Seah^{2,b)} 猿渡 俊介^{3,c)} 渡辺 尚^{1,d)}

概要：現状の1対1の通信はシャノン限界に迫りつつあり，モバイルコンピューティングの分野では，重畳符号化，逐次干渉除去などの空間分割多重を利用した多対多通信の研究が活発化している．本稿では，空間分割多重の中でも複数のアクセスポイントが協調することで通信容量を増やすことができるネットワークMIMOに着目する．ネットワークMIMOでは，多数のアクセスポイントと多数のクライアント間の伝搬路を推定するためのチャンネルサウンディングの通信オーバーヘッドが問題となる．また，どの伝搬路を用いてMIMO伝送を行うべきかを決定するための計算コストも問題となる．そこで本稿では，ネットワークMIMOのオーバーヘッドを削減するためにアクセスポイントをクラスタリングするThroughput-aware Random Clusteringを提案する．Throughput-aware Random Clusteringでは，データリンク層におけるスループットに応じて，物理層におけるMIMO伝送に参加するアクセスポイントを決定するクロスレイヤのアプローチを採用．MATLABを用いた計算機シミュレーションによる評価の結果として，アクセスポイントが50台の場合に，提案手法が，全てのアクセスポイントを用いる手法に比べて約2.5倍，固定クラスタを用いたものと比べて約1.4倍のスループットが得られることを示す．

1. はじめに

世界の2013年第1四半期～2014年第1四半期のモバイルデータトラフィック増加は65%であり，このペースで増加し続けると，10年後には今のトラフィックの100倍を超える見込みである[1]．さらにM2MやIoTのキーワードの下に，ネットワークに接続される端末の数・種類共に増加の一途を辿っており[2]，電波資源の有限性という厳しい制約条件下で通信容量の飛躍的な大容量化という難問を解決する必要がある．

これまでの無線通信は1つの空間に1つの通信を前提として，他の通信との衝突を回避するために，他の通信を検出した場合には送信を抑制することを前提としていた(図1)．本研究では，1つの空間とは，各通信が相互に電波干渉の影響を受ける空間を意味するものとする．衝突回避が前提の1対1の通信はシャノン限界に迫りつつあり，変調や

符号化の工夫だけでは大容量化に限界が見えてきている．

現状の1対1通信のパラダイムを超えるためには，1つの空間において多数のアクセスポイントが多数の通信を意図的に衝突させる空間多重を積極的に利用する必要がある(図2)．逐次干渉除去(図3)[3,4]や重畳符号化(図4)[5]などの空間多重を利用した手法の中でも，筆者らは，ネットワークMIMO[6-15]に着目している．ネットワークMIMOによれば，アクセスポイントを追加するだけで通信容量を増やすことが可能となる．

しかしながら，ネットワークMIMOでは，多数のアク

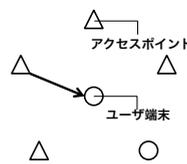


図1 これまでは1つの干渉範囲で1つ伝搬路のみを利用

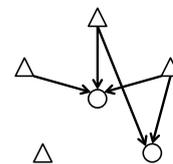


図2 多数のアクセスポイント連携による空間多重

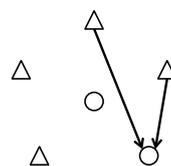


図3 逐次干渉除去の例

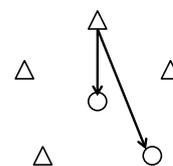


図4 重畳符号化の例

¹ 大阪大学
Osaka University
² ヴィクトリア大学ウェリントン
Victoria University of Wellington
³ 静岡大学
Shizuoka University
a) kobayashi.makoto@ist.osaka-u.ac.jp
b) Winston.Seah@ecs.vuw.ac.nz
c) saru@inf.shizuoka.ac.jp
d) watanabe@ist.osaka-u.ac.jp

セスポイントと多様なクライアント間の伝搬路を推定するためのチャンネルサウンディングのオーバーヘッドが膨大になるという問題が発生する。また、時々刻々と変化するトラフィックと他システムからの干渉に対して、その瞬間にどの伝搬路の組み合わせによって通信するかを決定するための計算コストも課題となる。

このような観点から本稿では、無線ネットワーク MIMO において、チャンネルサウンディングに伴う通信オーバーヘッドと計算オーバーヘッドを同時に解決する Throughput-aware Random Clustering を提案する。Throughput-aware Random Clustering では、スループットに応じてアクセスポイントを動的にクラスタリングする。MATLAB を用いた計算機シミュレーションの結果、全てのアクセスポイントを用いたネットワーク MIMO や、固定数のネットワーク MIMO に比べて高い性能が得られた。例えば、提案手法は、アクセスポイント数が 50 台の時に、全てのアクセスポイントを用いた場合に比べて約 2.5 倍、固定数のアクセスポイントを用いた場合に比べて約 1.4 倍のスループットを達成できた。

本稿の構成は以下の通りである。2 節では、ネットワーク MIMO について説明すると共に、ネットワーク MIMO においてチャンネルサウンディングに伴う問題点を明らかにする。3 節では、2 節で示した問題をクラスタリングによって解決する手法について述べ、4 節でシミュレーションによって性能を検証する。5 節において関連研究について述べ、最後に 6 節でまとめとする。

2. ネットワーク MIMO の課題

無線通信のさらなる大容量化に向けて、MIMO による空間多重 [16] が検討されている。MIMO では、伝送レートの向上を目的として、複数の送信アンテナを用いて複数のストリームを送信することで、各ストリームを空間的に多重化して複数ユーザにデータを届けることができる [17, 18]。この送信方式は、一般に MU-MIMO (Multi User MIMO) と呼ばれている。

本稿では、MU-MIMO の中でもネットワーク MIMO [6-15] に着目する。ネットワーク MIMO とは、複数のアクセスポイントが協調して MIMO 伝送を行う手法である。一般的に、MIMO はアンテナの距離が離れていればいるほど伝搬路同士の相関が低くなり、通信効率が向上する。現状の多数存在しているアクセスポイントは協調すること無く伝送しているため、チャンネル競合や干渉が発生している。アクセスポイント自体が協調して MIMO を実現することができれば、チャンネル競合や干渉を防ぐのみならず、MIMO による利得も得ることができる。

図 5 にネットワーク MIMO の全体像を示す。ネットワーク MIMO では、複数のアクセスポイントが Backhaul によってコントローラに接続・制御される。図 5 では、AP1 ~

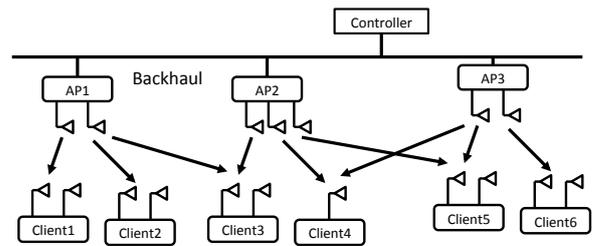


図 5 ネットワーク MIMO の一例

AP3 の 3 台のアクセスポイントが協調してクライアントに対してネットワーク MIMO でデータ伝送している。各アクセスポイントは各アクセスポイントとクライアントの伝搬路の CSI (Channel State Information) をチャンネルサウンディングによって取得する。それぞれのアクセスポイントは、取得した CSI を用いて他のアクセスポイントからの信号がクライアントで受信される時に分離できるようにプリコーディングする。信号を受け取ったクライアントは、複数のアクセスポイントからの信号を分離してデータを抽出する。

このようなネットワーク MIMO においては、チャンネルサウンディングの通信オーバーヘッドが問題になる。MIMO で必要となる CSI は、チャンネルサウンディングにおけるパイロット信号の送受信によって測定される。すなわち、アクセスポイントの台数が K 台、クライアントの台数を N 台とすると、合計で $K \times N$ 個の経路についてパイロット信号を送信する必要がある。

パイロット信号を同時に送信する方法として、各アクセスポイントが異なるパイロット系列を送信して分離する手法が検討されている。しかしながら、パイロット系列を用いた手法では、パイロット系列の衝突によって性能が劣化するパイロット汚染 [19] が発生する。本稿では、アクセスポイントが互いに協調可能であるという前提をおいているため、パイロット信号は時分割で送信できると仮定する。パイロット信号を時分割で送った場合ではパイロット汚染が発生しないものの、パイロット信号を送る時間がスループットを低下させる要因になりうる。

また、仮にチャンネルサウンディングによって瞬時に全ての伝搬路の CSI が獲得できたとしても、どの伝搬路を組み合わせるネットワーク MIMO を行うかを決定するための計算コストも問題となる。ネットワーク MIMO では、アクセスポイントが分散して設置されているため、全てのアクセスポイントを用いて MIMO 伝送したとしてもスループット向上に寄与するとは限らない。しかしながら、アクセスポイントの台数が K 台の場合、組み合わせの数は $K!$ となるため、総当たりでどの伝搬路を用いて MIMO 伝送を行うかを決定するのは現実的ではない。例えば、アクセスポイントが 10 台の場合には 300 万以上の組み合わせが発生する。

3. Throughput-aware Random Clustering

2 節で述べたネットワーク MIMO におけるチャネルサウンディングのオーバーヘッドの問題に対して、本稿では、Throughput-aware Random Clustering を提案する。Throughput-aware Random Clustering では、現状のワイヤレスネットワークにおいてビデオのダウンロードやウェブの閲覧など下りのトラフィックが多い点に着目する。具体的には、上位層のスループットに応じて MIMO 伝送に参加するアクセスポイントのクラスタサイズを制御するクロスレイヤのアプローチを採ることで、オーバーヘッドを削減しつつ高いスループットを達成する。

3.1 全体像

Throughput-aware Random Clustering では、コントローラが上流からパケットを受け取ると、コントローラに接続された全てのアクセスポイントの中から、ネットワーク MIMO に参加するアクセスポイントを複数選択する。本稿では、コントローラに選択されたアクセスポイント群をクラスタと呼ぶ。Throughput-aware Random Clustering では、コントローラが上流からパケットを受け取る度に、どのアクセスポイントを用いてクラスタを生成するかを制御する。

表 1 に Algorithm 1 ~ Algorithm 5 で用いる変数を示す。\$S\$ はコントローラに接続しているアクセスポイントの集合、クラスタ \$C\$ に参加しているアクセスポイントの集合である。\$M\$ は、あるクラスタを用いて送信を行う回数である。\$R_k\$ は、現在のクラスタでの \$k\$ 回目のデータ送信におけるスループット、\$\bar{R}\$ は現在のクラスタで \$M\$ 回送信した際のスループットの平均値、\$\bar{R}'\$ は 1 つ前のクラスタで \$M\$ 回送信した際のスループットの平均値をそれぞれ意味している。\$u\$ は \$M\$ 回の送信で \$\bar{R}' > R_k\$ となった回数を意味している。

Algorithm 1 にコントローラ上で動作する Throughput-aware Random Clustering のアルゴリズムの全体像を示す。まず、Throughput-aware Random Clustering では、クラスタに参加しているアクセスポイントの集合 \$C\$ を \$\emptyset\$ で初期化する。その後、コントローラが上流からパケットを受け取るたびに while 中の動作を繰り返す。アクセスポイント追加フェーズ (Access point addition phase) では、アクセスポイントの中からランダムに 1 つを選択してクラスタ \$C\$ に追加する。アクセスポイント追加フェーズの詳細は 3.2 節で述べる。

次に、アクセスポイントを追加したクラスタ \$C\$ を用いて \$M\$ 回、データ送信フェーズ (Data transmission phase) とスループット測定フェーズ (Throughput measurement phase) を繰り返す。ここで \$M\$ 回繰り返すのは、複数回の

Algorithm 1 Throughput-aware random clustering

```

1:  $C \leftarrow \emptyset$ 
2: while do
3:    $u \leftarrow 0$ 
4:   Access point addition phase
5:   for  $k = 1$  to  $M$  do
6:     Data transmission phase
7:     Throughput measurement phase
8:   end for
9:   Access point remove phase
10:   $\bar{R} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M R_k$ 
11:   $\bar{R}' \leftarrow \bar{R}$ 
12: end while
    
```

表 1 Algorithm 1 ~ Algorithm 5 で使用する変数

変数, 関数	説明
S	コントローラに接続しているアクセスポイントの集合
C	クラスタに参加しているアクセスポイントの集合
M	あるクラスタを用いて送信を行う回数
R_k	現在のクラスタでの k 回目のデータ送信におけるスループット
\bar{R}	現在のクラスタで M 回送信した際のスループットの平均値
\bar{R}'	1 つ前のクラスタで M 回送信した際のスループットの平均値
u	M 回の送信で $\bar{R}' > R_k$ となった回数
$RSSI(AP_i)$	アクセスポイント AP_i に対する RSSI を返す関数
AP_{min}	RSSI が最も小さいアクセスポイント

Algorithm 2 Access point addition phase

```

1: Select access point  $\{AP_i \mid AP_i \in S \setminus C\}$  randomly
2:  $C \leftarrow C + \{AP_i\}$ 
    
```

データ送信の平均を用いてクラスタの制御を行うからである。データ送信フェーズに関しては 3.3 節で、スループット測定フェーズに関しては 3.4 節で述べる。最後に、\$M\$ 回のスループットの測定に基づいて、アクセスポイント削除フェーズ (Access point remove phase) においてクラスタ \$C\$ から不要と思われるアクセスポイントを削除する。アクセスポイント削除フェーズに関しては 3.5 節で述べる。

3.2 アクセスポイント追加フェーズ

Algorithm 2 にアクセスポイント追加フェーズの動作を示す。アクセスポイント追加フェーズでは、コントローラがランダムにアクセスポイント AP_i を選択してクラスタに追加する。この時、 AP_i は、コントローラに接続されたアクセスポイントの集合 \$S\$ に含まれ、かつクラスタ \$C\$ に含まれていないものとする。

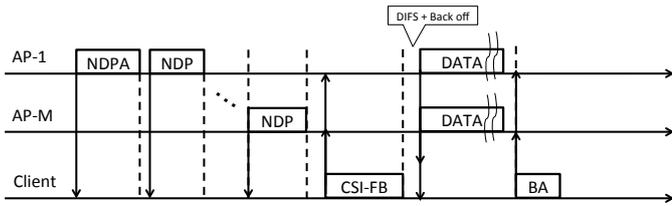


図 6 Frame sequence

Algorithm 3 Throughput measurement phase

- 1: $R_k \leftarrow \text{throughput}(C)$
- 2: **if** $R_k < \bar{R}'$ **then**
- 3: $u \leftarrow u + 1$
- 4: **end if**

3.3 データ送信フェーズ

データ送信フェーズでは、クライアントに対して、クラスター C に含まれるアクセスポイントを用いてネットワーク MIMO でデータを送信する。図 6 にフレームシーケンスを示す。ネットワーク MIMO に対応した標準はまだ存在しないため、IEEE 802.11ac のマルチユーザ MIMO を基にフレームシーケンス設計した。

まず、1 つのアクセスポイントから NDPA (Null Data Packet Announcement) および NDP (Null Data Packet) を送信する。NDPA はチャンネルサウンディングの開始を通知するパケットである。NDP はチャンネルを推定するためのフレームである。1 つ目のアクセスポイントに続いて、他のアクセスポイントからも NDP を送信する。クラスター C に含まれる全てのアクセスポイントから NDP が送信された後、クライアントから CSI-FB (Channel State Information Feedback) がコントローラに返信される。CSI-FB は、クライアントが受け取った NDP に基づいて測定したチャンネル情報 \mathbf{h} をコントローラにフィードバックするフレームである。チャンネル情報 \mathbf{h} は、スループット測定フェーズやアクセスポイント削除フェーズでも利用するため、コントローラに記録しておく。コントローラは CSI-FB によって取得したチャンネル情報 \mathbf{h} を元にプリコーディングを行ってデータ (DATA) を送信する [20–22]。データを受信したクライアントは BA (Block ACK) をアクセスポイントに返信する。

なお、NDPA、NDP、CSI-FB、DATA、BA のそれぞれのフレームは IEEE 802.11ac と同じものを用いる。複数のアクセスポイントが NDP を送っている点が、IEEE 802.11ac と提案手法で異なる。

3.4 スループット測定フェーズ

スループット測定フェーズでは、データリンク層でのスループットを測定する。Algorithm 3 にスループットの測定アルゴリズムを示す。Algorithm 3 の 1 行目では、

throughput 関数によって現在のスループット R_k を算出している。throughput(C) はクラスター C でデータを送信した際のスループットを算出する関数である。

throughput 関数では、まず、物理層の通信容量 R_{capacity} [bps] を

$$R_{\text{capacity}} = W \log \left(1 + \frac{P_t \|\mathbf{h}\|^2}{WN} \right)$$

で算出する。 W [Hz] は帯域幅、 P_t [mW] は送信電力、 N [mW/Hz] は雑音電力、 $\mathbf{h} = [h_1, \dots, h_K]^t$ はパスごとの伝搬損失を含めたチャンネル情報である。チャンネル情報 \mathbf{h} はデータ送信フェーズにおいて CSI-FB フレームによって取得したものを用いる。

次に、算出した通信容量 R_{capacity} と、データリンク層におけるフレームのオーバーヘッドからデータリンク層におけるスループットを算出する。データリンク層におけるスループット R_k [bps] は、実際にデータを送信する時間 T_{data} と物理層やデータリンク層でのヘッダなどを含めたデータの送信にかかるすべての時間 T_{total} を用いて、

$$R_k = \frac{T_{\text{data}} R_{\text{capacity}}}{T_{\text{total}}}$$

と表される。送信を行うアクセスポイント数 (アンテナ数) を K とすると、データ送信フェーズのフレームシーケンスより、 T_{total} は、

$$\begin{aligned} T_{\text{total}} = & T_{\text{DIFS}} + T_{\text{BO}} + T_{\text{NDPA}} + \\ & K(T_{\text{NDP}} + T_{\text{SIFS}}) + T_{\text{CSI}} + \\ & T_{\text{DIFS}} + T_{\text{BO}} + T_{\text{header}} + T_{\text{data}} + \\ & T_{\text{SIFS}} + T_{\text{BA}} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。 T_{DIFS} は DIFS の長さ、 T_{BO} は Back off の長さ、 T_{NDPA} は NDPA の長さ、 T_{NDP} は NDP の長さ、 T_{SIFS} は SIFS の長さ、 T_{CSI} は CSI-FB の長さ、 T_{header} はデータのヘッダの長さ、 T_{BA} は Block Ack の長さである。

このように算出した R_k を用いて、Algorithm 3 の 2 行目～4 行目において 1 つ前のクラスターで M 回送信した際の平均スループット \bar{R}' を下回った回数を変数 u に記録する。変数 u はアクセスポイント削除フェーズで用いる。

3.5 アクセスポイント削除フェーズ

アクセスポイント削除フェーズでは、チャンネルサウンディングによるオーバーヘッドを削減するためにクラスターに参加するアクセスポイントを削除する。Algorithm 4 にアクセスポイント削除フェーズのアルゴリズムを示す。まず、 u が 0 より大きいとき、すなわち、1 つ前のクラスターでのスループットよりも一度でも低いスループットであった場合には、remove_access_point 関数によってクラスターからアクセスポイントを 1 つ削除する。クラスターサイズが大

Algorithm 4 Access point remove phase

```

1: if  $u > 0$  then
2:   remove_access_point( $C$ )
3: end if
4: if  $u > M/2$  then
5:   remove_access_point( $C$ )
6: end if

```

Algorithm 5 remove_access_point 関数

```

1:  $AP_{min} \leftarrow \arg \min_{AP_i \in C} \text{RSSI}(AP_i)$ 
2: if  $C \neq \{AP_{min}\}$  then
3:    $C \leftarrow C \setminus \{AP_{min}\}$ 
4: end if

```

きくなってチャンネルサウンディングのオーバーヘッドによってスループットが低下する場合には、クラスタを小さくする必要があります。そこで、 u が $M/2$ よりも大きかった場合、さらにもう 1 つアクセスポイントを削除する。

Algorithm 5 に remove_access_point 関数の動作を示す。クラスタに含まれているアクセスポイント $AP_i \in C$ のうちから、クライアントにおける RSSI の最も低い信号を送信しているアクセスポイントを RSSI 関数を用いて 1 つ選択する。RSSI の算出にはデータ送信フェーズで取得したチャンネル情報 h を用いる。RSSI 関数では、 AP_i のチャンネル情報が h_i であった場合、RSSI を $|h_i|$ として算出する。クラスタに含まれているアクセスポイントの数が 1 つで無かった場合 $C \neq \{AP_i\}$ には、クラスタからそのアクセスポイントを削除する。

4. 性能評価

Throughput-aware Random Clustering の基本性能を確認するために、計算機シミュレーションによってスループットの評価を行った。

4.1 評価環境

図 7 に評価で用いたトポロジを示す。図 7 では、 K 個のアクセスポイントが d_{AP} の間隔で等間隔に直線上に、クライアントはアクセスポイントの並んだ線分の中心から d_{AP-C} 離れたところに設置した。アクセスポイントとクライアントのアンテナの本数は各 1 本ずつ、 d_{AP} が 10 m、 d_{AP-C} が 10 m とした。アクセスポイントは有線のバックホールで、コントローラと理想的に接続されている物とする。電波伝搬のモデルには遮蔽伝搬モデルを想定して、伝搬損失係数が 4、シャドウイングの標準偏差が 8、送信電力が 200 mW とした。

データリンク層の各フレームの長さは文献 [23, 24] を基に設定した。表 2 に各フレームの長さを示す。 T_{DIFS} が $34\mu s$ 、 T_{BO} が $67.5\mu s$ 、 T_{NDPA} が $64\mu s$ 、 T_{NDP} が $64\mu s$ 、 T_{SIFS} が $16\mu s$ 、 T_{CSI} が $1000\mu s$ 、 T_{header} が $44\mu s$ 、 T_{BA} が $44\mu s$ とした。

表 2 フレームとフレーム間時間の長さ

フレーム・スペース	時間
DIFS	34 μs
backoff	67.5 μs
NDPA(Null Data Packet Announcement)	64 μs
NDP (Null Data Packet)	64 μs
SIFS	16 μs
CSI-FB	1000 μs
BA (Block ACK)	44 μs
Header	44 μs
Data Frame	500 μs

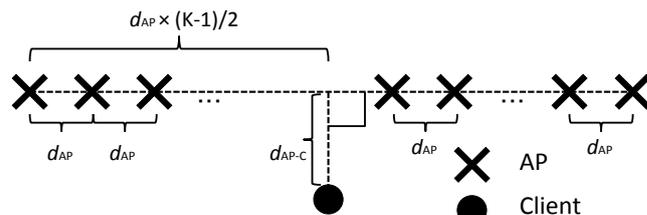


図 7 K アクセスポイント、1 クライアントの Topology

Throughput-aware Random Clustering の性能を相対的に評価するために、以下の 3 つのアプローチを比較した。

- (1) Giant MIMO (giant)

Giant MIMO は、全てのアクセスポイントが協調してクライアントに対して MIMO 伝送を行う方式である。Giant MIMO はクラスタリングを行わないために Throughput-aware Random Clustering においてクラスタリングを行うことで削減されるチャンネルサウンディング時間を示す尺度となる。
- (2) Static Clustering (static)

Static Clustering は、クラスタ形成を動的に行わず、予め定められたクラスタのまま MIMO 伝送を行う方式である。Static Clustering はクラスタを変更しない場合の性能を表す尺度となる。本稿のシミュレーションでは、固定クラスタに含まれるアクセスポイントをランダムに 10 個選択している。
- (3) Throughput-aware Random Clustering (proposed)

Throughput-aware Random Clustering は 3 節で述べた提案手法である。1 つのクラスタにおける送信回数 M は 10 とした。

4.2 アクセスポイント数に対するスループットの評価

まず、Throughput-aware Random Clustering の基本性能を評価するために、ネットワーク内のアクセスポイント数 K を変化させた場合のスループットを評価した。図 8 に、アクセスポイント数を 1 から 50 に変化させた場合のスループットを示す。各スループットは 50000 回の平均を取得した。なお Throughput-aware Random Clustering についてはクラスタリングが収束後のスループットを取得す

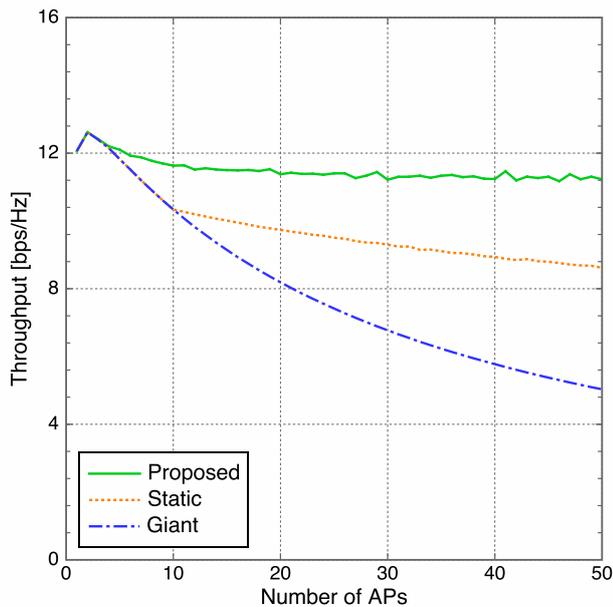


図 8 Number of Access Points vs. Throughput

るために、60000 回送信を行った場合の最後の 50000 回の送信の平均を取得した。横軸はアクセスポイント数、縦軸はスループット [bps/Hz] である。

図 8 より、提案手法 (proposed) が最も高いスループットを達成していることが分かる。提案手法では、アクセスポイント数が増加しても常に最も高いスループットを維持している。一方で、Giant MIMO では、アクセスポイント数が 3 以上の場合、アクセスポイント数が増加するに従って、スループットが低下している。Giant MIMO ではチャンネルサウンディングのオーバーヘッドが増加し続けるからだと考えられる。

4.3 クラスタリングの収束時間の評価

4.2 節の評価では、クラスタリングが収束した後のスループットを計測していた。しかしながら、提案手法ではデータリンク層のスループットに基づいてクラスタを再構成するため、収束するまではスループットが低くなると予想される。そこでクラスタリングが収束する時間を評価するために、送信開始からの時間とスループットの関係について評価した。図 9 にアクセスポイント数が 50 の場合の時間とスループットの関係を示す。横軸は時間 [ミリ秒]、縦軸はスループット [bps/Hz] である。

図 9 より、提案手法は約 150 ms でクラスタリングが収束していることが分かる。ファイルのダウンロードなど 150 ms を超えて継続して通信する機会が多いと想定されるため、収束時間は十分に短いと考えられる。

4.4 オーバヘッドに対するスループットの評価

4.2 節の評価では、ネットワーク MIMO のチャンネルサウンディングのオーバーヘッドを IEEE 802.11ac を基に表 2

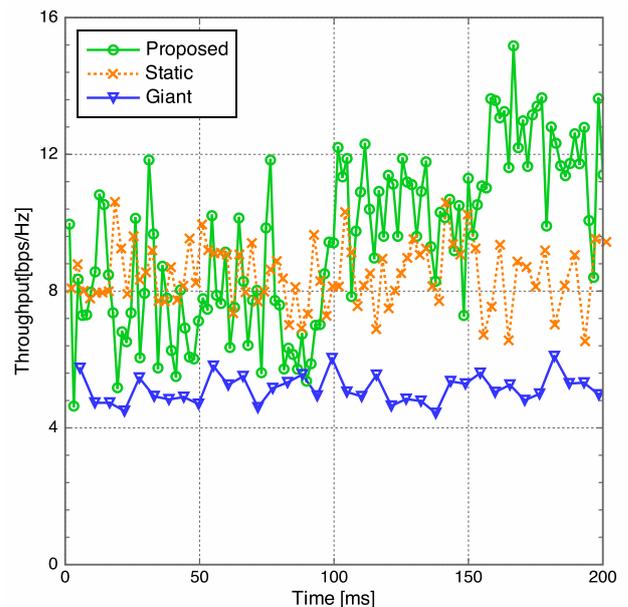


図 9 Time Evolution of Throughput

のように設定した。しかしながら、直行系列の信号を用いるなど今後技術が進歩することによって、将来的にはオーバーヘッドが小さくなることも考えられる。提案手法がチャンネルサウンディングのオーバーヘッドが低下した場合の性能を確認するために、オーバーヘッドとスループットの関係について評価した。オーバーヘッドの大きさを変更するために、式 (1) 中の $T_{NDP} + T_{SIFS}$ の長さを変えながら評価した。図 10 に、オーバーヘッドとスループットの関係について示す。横軸はオーバーヘッド [マイクロ秒]、縦軸はスループット [bps/Hz] である。

図 10 より、提案手法はオーバーヘッドが現状 (80 マイクロ秒) の 8 分の 1 程度になった場合でも有効な手段であることが分かる。

5. 関連研究

複数のアクセスポイントを協調させることで MIMO 伝送を行うネットワーク MIMO に関する取り組みが多くなされている [6-8]。文献 [25,26] では、シングルクラスタのネットワーク MIMO の容量が分散したアクセスポイントおよび送信アンテナの個数に応じて増加していくことが示されている。

文献 [20-22] では、マルチユーザ MIMO で用いられているプリコーディングおよびスケジューリング手法がネットワーク MIMO においても有効であることが示されている。特に文献 [21,22] は、複数のネットワーク MIMO 送信グループが存在する場合にもマルチユーザ MIMO での手法が有効であることを示している。

携帯電話網においても、CoMP (Coordinated Multi-Point) としてネットワーク MIMO が検討されている。CoMP は次世代の LTE-Advanced で用いられることが期

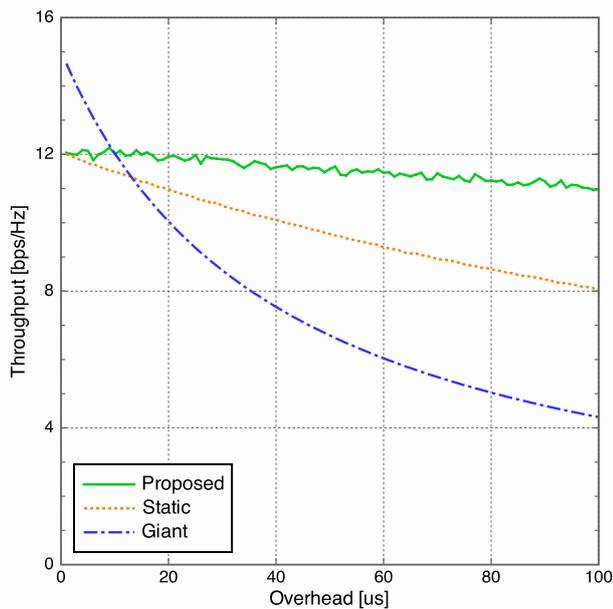


図 10 Overhead vs. Throughput

待されている [8–11] .

Wireless LAN におけるネットワーク MIMO は文献 [12–15] で検討されている . 文献 [12, 13] では , ネットワークに存在する全てアクセスポイントが協調して , 単一のクラスタでクライアントに対してデータを送信するモデルが検討されている .

これに対して , 複数のアクセスポイントのクラスタが存在するモデルが検討されている [14, 15] . 文献 [14] では送信アンテナと受信アンテナの割り当てをクラスタ間でやりとりすることで , クラスタ間の干渉を発生を防ぐ手法が検討されている . 文献 [15] で提案された , NEMO_x はダウンリンクにおける送信側アクセスポイントのクラスタリングをバックホールのネットワークポロジータに基づいて行っている . しかしながら , これらの手法においてアクセスポイントのクラスタをどのように形成するかについては検討されていない . それに対して , 本稿ではアクセスポイントのクラスタ形成手法を検討している .

MU-MIMO におけるアップリンクでは , クライアント側でのクラスタリング手法が検討されている [27, 28] . しかしながら , Throughput-aware Random Clustering はアクセスポイント側のクラスタリング手法であるため , アクセスポイント同士がバックホールで接続しているという点で前提条件が異なる .

6. おわりに

本稿では , ネットワーク MIMO におけるオーバーヘッド削減してユーザのスループットを向上するための手法として Throughput-aware Random Clustering を提案した . Throughput-aware Random Clustering では , データリンク層のスループットを用いてネットワーク MIMO の送信

に参加するアクセスポイントをクラスタリングすることで , オーバヘッドを削減する . 性能評価から , 提案手法の Throughput-aware Random Clustering が既存方式と比較して , オーバヘッドを削減してユーザのスループットを向上できることが分かった . 現在 , Throughput-aware Random Clustering の実証を進めている .

参考文献

- [1] Ericsson: Ericsson Mobility Report (2014).
- [2] 野村総合研究所 : IT ナビゲーター 2014 年版 , 東洋経済新報社 (2013).
- [3] Gollakota, S. and Katabi, D.: ZigZag decoding: Combating hidden terminals in wireless networks, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (ACM SIGCOMM'08)*, pp. 159–170 (2008).
- [4] Li, T., Han, M. K., Bhartia, A., Qiu, L., Rozner, E., Zhang, Y. and Zarikoff, B.: CRMA: Collision-resistant multiple access, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'11)*, pp. 61–72 (2011).
- [5] 青木勇太, 猿渡俊介, 渡辺 尚 : 重畳符号化を用いた無線通信における転送量に基づく電力割当方式, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとコピキタス通信研究会, MBL-64-22 (2012).
- [6] Yu, W., Kwon, T. and Shin, C.: Multicell coordination via joint scheduling, beamforming, and power spectrum adaptation, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 12, No. 7, pp. 1–14 (2013).
- [7] Manolakos, A., Noam, Y. and Goldsmith, A. J.: Null space learning in cooperative MIMO cellular networks using interference feedback, *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM'10)*, pp. 3983–3989 (2013).
- [8] Gesbert, D., Hanly, S., Huang, H., Shamai Shitz, S., Simeone, O. and Yu, W.: Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 28, No. 9, pp. 1380–1408 (2010).
- [9] Irmer, R., Droste, H., Marsch, P., Grieger, M., Fettweis, G., Brueck, S., Mayer, H. P., Thiele, L. and Jungnickel, V.: Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 2, pp. 102–111 (2011).
- [10] Sawahashi, M., Kishiyama, Y., Morimoto, A., Nishikawa, D. and Tanno, M.: Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 17, No. 3, pp. 26–34 (2010).
- [11] Lossow, M., Jaekel, S., Jungnickel, V. and Braun, V.: Efficient MAC protocol for JT CoMP in small cells, *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (IEEE ICC'13)*, pp. 1166–1171 (2013).
- [12] Rahul, H. S., Kumar, S. and Katabi, D.: JMB: Scaling wireless capacity with user demands, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (ACM SIGCOMM'12)*, pp. 235–246 (2012).
- [13] Balan, H. V., Rogalin, R., Michaloliakos, A., Psounis,

- K. and Caire, G.: Achieving high data rates in a distributed MIMO system, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'12)*, pp. 41–52 (2012).
- [14] Yu, H., Bejarano, O. and Zhong, L.: Combating inter-cell interference in 802.11ac-based multi-user MIMO networks, *Proceedings of the 20th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'14)*, pp. 141–152 (2014).
- [15] Zhang, X., Sundaresan, K., Khojastepour, M. A. A., Rangarajan, S. and Shin, K. G.: NEMOx: Scalable network MIMO for wireless networks, *Proceedings of the 19th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'13)*, pp. 453–464 (2013).
- [16] Yin, H. and Liu, H.: Performance of space-division multiple-access (SDMA) with scheduling, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, No. 4, pp. 611–618 (2002).
- [17] Foschini, G. J.: Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas, *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 41–59 (1996).
- [18] van Zelst, A. and Schenk, T. C.: Implementation of a MIMO OFDM-based wireless LAN system, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 52, No. 2, pp. 483–494 (2004).
- [19] Ashikhmin, A. and Marzetta, T.: Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems, *Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE ISIT'12)*, pp. 1137–1141 (2012).
- [20] Huh, H., Tulino, A. M. and Caire, G.: Network MIMO with linear zero-forcing beamforming: Large system analysis, impact of channel estimation, and reduced-complexity scheduling, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 58, No. 5, pp. 2911–2934 (2012).
- [21] Zhang, J., Chen, R., Andrews, J. G., Ghosh, A. and Heath Jr., R. W.: Networked MIMO with clustered linear precoding, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 4, pp. 1910–1921 (2009).
- [22] Kaviani, S. and Krzymien, W. A.: Multicell scheduling in network MIMO, *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM'10)*, pp. 1–5 (2010).
- [23] IEEE Standard Association: IEEE Standard 802.11ac-2013 (2013).
- [24] Murakami, T., Takatori, Y., Mizoguchi, M. and Maehara, F.: A cross-layer switching of OFDMA and MU-MIMO for future WLAN systems, *IEICE Communications Express*, Vol. 3, No. 9, pp. 263–268 (2014).
- [25] Heath Jr., R. W., Wu, T., Kwon, Y. H. and Soong, A. C. K.: Multiuser MIMO in distributed antenna systems with out-of-cell interference, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 59, No. 10, pp. 4885–4899 (2011).
- [26] Zhang, J. and Andrews, J.: Distributed antenna systems with randomness, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 7, No. 9, pp. 3636–3646 (2008).
- [27] Karimi, O. B., Toutouchian, M. A., Liu, J. and Wang, C.: Lightweight user grouping with flexible degrees of freedom in virtual MIMO, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 31, No. 10, pp. 2004–2012 (2013).
- [28] Xie, X. and Zhang, X.: Scalable user selection for MU-MIMO networks, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM'14)*, pp. 808–816 (2014).