

# 全二重 MIMO 通信を用いた無線 LAN のための メディアアクセス制御プロトコル

福本 めぐみ<sup>1</sup> 萬代 雅希<sup>2</sup>

概要: 本研究では, はじめに全二重 MIMO 通信のためのノードアーキテクチャを提案する. 提案ノードアーキテクチャは全二重  $n \times n$  MIMO 通信を  $n$  本のアンテナで実現する. 次に, 提案ノードアーキテクチャのための MAC(Medium Access Control) プロトコルを提案する. 提案 MAC プロトコルは wireless local area network(WLAN) 環境において全二重 MIMO 通信が適用される機会を増加させることを目的とする. 提案ノードアーキテクチャと提案 MAC プロトコルを理論解析および計算機シミュレーションで評価する. 評価により, WLAN 環境において上りスループットを低下させることなく, 下りスループットの向上を図ることを示す.

## Node Architecture and Medium Access Control Protocol for MIMO Full-Duplex WLANs

MEGUMI FUKUMOTO<sup>1</sup> MASAKI BANDAI<sup>2</sup>

### 1. 緒論

近年, 無線通信において同一周波数帯で同時にデータの送受信を行うことのできる全二重無線通信が注目されている [1], [2], [3]. 直観的に考えて, 既存の半二重無線通信と比較して, 全二重無線通信はスループットの向上を図ることができる. しかしながら, CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision avoidance) のような既存の MAC(Medium Access Control) プロトコルは半二重無線通信のために設計されている. そのため, 全二重無線通信に既存の MAC プロトコルを適用させると, 十分なスループットの向上を図ることができない. [3] では全二重無線通信のための MAC プロトコルが提案されている. この MAC プロトコルは全二重無線通信において同時に送受信ができる特徴を既存の CSMA/CA に導入したものである. しかしながら, この MAC プロトコルは, 送信側, 受信側が同時に互いへの送信データを持っているときに限り全二重無線通信が適用されるため, スループットの向上に限界

が生じる. 従って, 全二重無線通信となる機会をさらに増加させるための MAC プロトコルが必要である.

一方で, 全二重無線通信と MIMO(multiple-input and multiple-output) 通信を組み合わせた全二重 MIMO 通信を実現するためのノードアーキテクチャ MIDU(MIMO Full Duplex) が提案されている [5]. MIDU は [1] のノードアーキテクチャを基本としている. 実際, MIDU は全二重 MIMO 通信を実現することで無線通信においてスループットの向上を図ることができる. しかしながら, MIDU には次の二つの問題点があると考えられる. 最初の問題点は, MIDU が全二重  $n \times n$  MIMO 通信において,  $2n$  本の送信アンテナと  $2n$  本の受信アンテナを必要とする点である. 例えば, MIDU は全二重  $2 \times 2$  MIMO 通信において 8 本のアンテナを必要とする. アンテナ数の増加はモバイル装置への実装において障壁となるため, より少ないアンテナ本数での全二重 MIMO 通信の実現が望まれる. 二つ目の問題点は, 全二重 MIMO 通信のための MAC プロトコルが示されていないことである. 従って, 全二重 MIMO 通信の適用される機会を増加させる MAC プロトコルが必要である.

本研究では, はじめに全二重 MIMO 通信のためのノード

<sup>1</sup> 上智大学大学院理工学研究科  
102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

<sup>2</sup> 上智大学理工学部情報理工学科  
102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

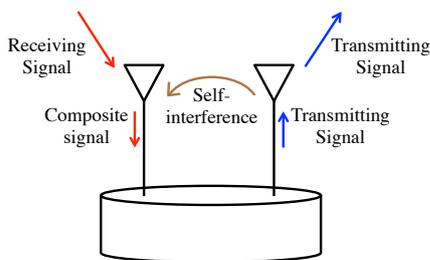


図 1 自己干渉が生じる様子

ドアーキテクチャを提案する。提案ノードアーキテクチャは  $n$  本のアンテナで全二重  $n \times n$  MIMO 通信を実現する。これにより、モバイル装置への実装を容易にする。次に、提案ノードアーキテクチャのための MAC プロトコルを提案する。提案 MAC プロトコルは WLAN(wireless local area network) 環境において全二重 MIMO 通信が適用される機会を増加させることを目的とする。提案ノードアーキテクチャと提案 MAC プロトコルを理論解析および計算機シミュレーションで評価する。評価により、WLAN 環境において上りスループットを低下させることなく、下りスループットの向上を図ることを示す。

## 2. 関連研究

既存の全二重無線通信のノードアーキテクチャと MAC プロトコル、MIMO 通信および MIDU について述べる。

### 2.1 全二重無線通信

全二重無線通信とは、同一周波数帯で、データの送受信を同時に行う技術である。全二重無線通信を実現するためには、自身の送信信号によって起こる自己干渉を、受信する信号から除去する必要がある。図 1 に自己干渉が生じる様子を示す。全二重無線通信では、送信アンテナから信号を送信する。また、同じクライアント上にある受信アンテナには他のクライアントから送信されてきた信号を受信する。受信アンテナでは自身の送信信号と他のクライアントからの送信信号が干渉を起こす。従って、受信アンテナにおいて自身の送信信号によって引き起こる干渉(自己干渉)を除去する必要がある。ここで、

- 送信信号：自身が送信する信号
- 受信信号：他のクライアントから送信されてきた信号
- 合成信号：送信信号と受信信号が受信アンテナで干渉することによって合成される信号

と定義する。受信アンテナは合成信号を受信し、自己干渉を除去することで受信信号を取り出す。

これまでに、アンテナを 2 本用いる構造の全二重無線通信、アンテナを 1 本用いる構造の全二重無線通信のための MAC プロトコルが考案されている。

#### 2.1.1 アンテナを 2 本用いる構造の全二重無線通信

アンテナを 2 本用いる構造の全二重無線通信 [1] につい

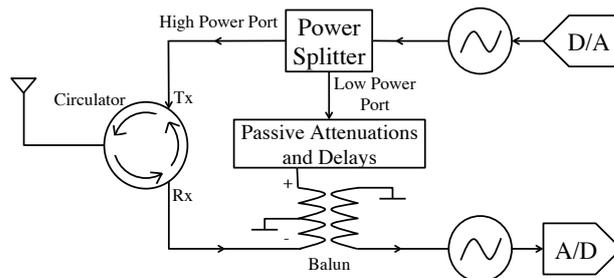


図 2 アンテナを 1 本用いる構造の全二重無線通信

て説明する。アンテナを 2 本用いる構造の全二重無線通信では、受信アンテナに合成信号が届く。合成信号から受信信号を復号するためには、自己干渉を約 95dB 除去する必要がある。アンテナを 2 本用いる構造の全二重無線通信では、アナログ領域とデジタル領域で自己干渉を除去する。はじめにアナログ領域で自己干渉を除去する。アナログ領域では送信アンテナから送信するアナログの送信信号を減衰器に分岐し、合成信号に逆位相の送信信号を合成することにより、自身の送信信号を除去する。結果として、アナログ領域では自己干渉を約 45dB 除去する。受信信号を復号するために必要な残りの自己干渉は、デジタル領域で除去する。

#### 2.1.2 アンテナを 1 本用いる構造の全二重無線通信

アンテナを 1 本用いて全二重無線通信を実現する構造 [2] について説明する。図 2 にアンテナを 1 本用いる全二重無線通信の構造を示す。アンテナを 1 本用いる構造の全二重無線通信は、送受信アンテナを 1 本、サーキュレータを 1 個用いる。サーキュレータは信号の流れを作り、サーキュレータ内の送信信号を送受信アンテナへ、合成信号を受信回路へと分離することで、約 15dB の自己干渉を除去する。さらにアナログ領域で減衰器を用いることで自己干渉を合計で約 45dB 除去する。また、デジタルキャンセラを用いることで残りの自己干渉を除去する。

#### 2.1.3 全二重無線通信のための MAC プロトコル

全二重無線通信のための MAC プロトコル [3] について説明する。[3] の MAC プロトコルは、1 台のアクセスポイント (AP) の周囲に複数のクライアントが存在する無線 LAN 環境で全二重無線通信を実現するものである。データ受信側は受信データのヘッダをデコードすることで送信元を特定し、データの送信元に対して送信データを持っている場合に限り、受信中に送信を開始することができる。AP とクライアントは CSMA/CA で送信権を獲得するため、この MAC プロトコルは AP が送信権を獲得する場合とクライアントが送信権を獲得する場合の二つの場合に分けられる。

##### (A) クライアントが送信権を獲得する場合

図 3 にクライアントが送信権を獲得する場合の動作例を示す。

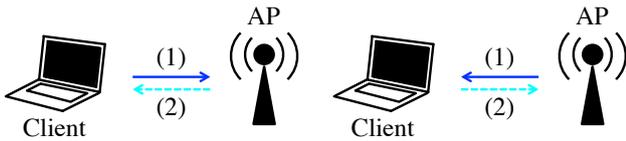


図 3 クライアントが送信権獲得

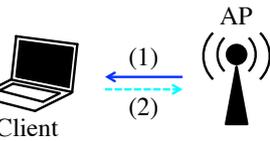


図 4 AP が送信権獲得

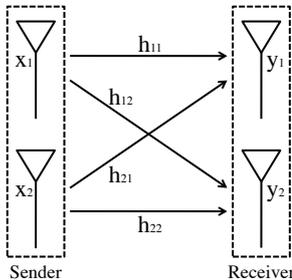


図 5 MIMO 通信

- (1) 送信権を獲得したクライアントは AP に対してデータを送信。AP は受信データのヘッダをデコードすることで送信元を特定
- (2) AP が送信元に対して送信するデータを持っている場合は、受信と同時に送信を開始

(B) AP が送信権を獲得する場合

- 図 4 に AP が送信権を獲得する場合の動作例を示す。
- (1) 送信権を獲得した AP はクライアントに対してデータを送信。クライアントは受信データのヘッダをデコードし、自分宛か確認
  - (2) クライアントは受信データが自分宛で、AP への送信データを持っている場合は、受信と同時に送信を開始

この MAC プロトコルは AP とクライアントが 1 対 1 の通信となる場合のみ全二重無線通信となる。従って既存の MAC プロトコルでは全二重無線通信となる機会が少ないことが問題点として挙げられる。

## 2.2 MIMO 通信

MIMO 通信 [6] は、送受信間のチャンネル情報を用いることで、同一周波数帯で複数のデータを同時に送信 (もしくは受信) することができる。

### 2.2.1 構造

$n \times n$  MIMO 通信は、 $n$  本のアンテナを用いて実現する。以下、 $2 \times 2$  MIMO 通信について説明する。 $2 \times 2$  MIMO 通信では 2 本のアンテナを使用する。MIMO 通信の構造を図 5 に示す。通信を開始するにあたって、AP がパイロット信号を送信し、送受信間のチャンネル情報を取得する。ここで、AP が取得したチャンネル情報を

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}$$

とおく。ここで、 $i$  は送信アンテナ、 $j$  は受信アンテナと

し、 $ij$  間のチャンネル情報を  $h_{ij}$  とする。また、送信データ  $X$  および受信データ  $Y$  をそれぞれ、

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

とおく。MIMO 通信は複数のアンテナから同時にデータを送信する。複数のデータを同時に送信すると、受信側は

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

を受信する。MIMO 通信では受信データを合成データから復号する必要がある。復号するための計算方法は、送信側が MIMO 計算する場合と受信側が MIMO 計算する場合の二つに分けられる

(A) 送信側が MIMO 計算する場合

送信側はチャンネル情報を用いてチャンネル情報の逆行列と送信データをかけた

$$H^{-1} \cdot X \quad (2)$$

を送信する。受信側は送信側が送信したデータに、チャンネル情報  $H$  がかけられた

$$Y = H \cdot H^{-1} \cdot X = X \quad (3)$$

を受信する。以上より、受信側は受信すべきデータ  $X$  を受信することができる。

(B) 受信側が MIMO 計算する場合

送信側は送信データ  $X$  をそのまま MIMO 送信する。受信側が受信するデータは送信側が送信したデータにチャンネル情報  $H$  がかけられた

$$Y = H \cdot X \quad (4)$$

を受信する。受信側はチャンネル情報  $H$  の逆行列を用いて、干渉していない受信データを得る。

$$H^{-1} \cdot Y = H^{-1} \cdot H \cdot X = X \quad (5)$$

また、MIMO 通信には分散 MIMO 通信もある。分散 MIMO とは、送信者が一つと受信者が二つ、送信者が二つと受信者が一つのように複数の相手と通信できる技術である。複数の相手と通信を行うことで MIMO 通信をより効率的に用いることができる。本研究では分散 MIMO 通信についても考慮する。

### 2.2.2 MIDU

MIDU[5] は、全二重無線通信と MIMO 通信を組み合わせた方法である。MIDU は図 6 に示すように、一つのクライアント内の受信キャンセラと送信キャンセラを組み合わせた 2 段階キャンセラを用いる。受信信号が、送信信号に干渉を与えないよう、受信アンテナ (RX1, RX'1) を送信アンテナ対称な位置に 2 本配置する。2 本の受信アンテナ

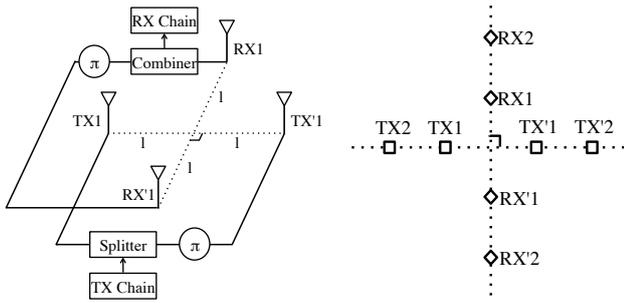


図 6 2 段階キャンセラ

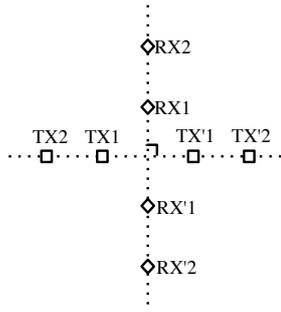


図 7 アンテナ配置

で受信した信号は、RX'1 の受信信号が  $\pi$  分だけ位相をずらされ、その後 RX1 の受信信号と合成される。片方の受信信号を  $\pi$  ずらしたことにより、2 本のアンテナで受信した信号は相殺される。従って、自己干渉をなくすることができる。送信アンテナ (TX1, TX'1) を受信アンテナ対称な位置に 2 本配置する。送信信号を TX1 から送信し、送信信号を  $\pi$  ずらしたものを TX'1 から送信する。送信信号を  $\pi$  ずらし、受信アンテナからお互い等距離にあるアンテナから送信された信号は、受信アンテナで位相が相殺され、打ち消される。送信アンテナと受信アンテナを直交に配置することで、送受信間で干渉を起こすことなく、全二重無線通信を行うことができる。

図 7 に全二重  $2 \times 2$  MIDU 通信を実現するための構造を示す。TX1, TX2 と  $\pi$  ずらした逆位相の信号を TX'1, TX'2 から送信し、RX'1, RX'2 で受信した信号を  $\pi$  ずらし、それぞれ RX1, RX2 の受信信号と合成する。MIMO 通信で受信信号を復号するためには回路内で計算することが必要である。MIDU は全二重  $n \times n$  MIMO 通信を実現するために、 $2n$  本の送信アンテナと  $2n$  本の受信アンテナを用いる。

### 3. 提案方式

#### 3.1 ノードアーキテクチャ

全二重  $n \times n$  MIMO 通信のためのノードアーキテクチャを提案する。提案ノードアーキテクチャは  $n$  が 2 以上の場合にも拡張できる。以下簡略化のために  $n = 2$  と仮定する。全二重  $2 \times 2$  MIMO 通信を実現するために、次の二つの干渉除去する必要がある。

ステップ 1) アンテナ内干渉除去：自身のアンテナによる干渉除去

ステップ 2) アンテナ間干渉除去：他のアンテナによる干渉除去

ここで、クライアント A とクライアント B が全二重  $2 \times 2$  MIMO 通信を行うときの動作について説明する。図 8 に、全二重  $2 \times 2$  MIMO 通信の提案ノードアーキテクチャを示す。図 8 はクライアント A 内のノードアーキテクチャでもある。各クライアントはアンテナ 1, 2 の 2 本の送受信

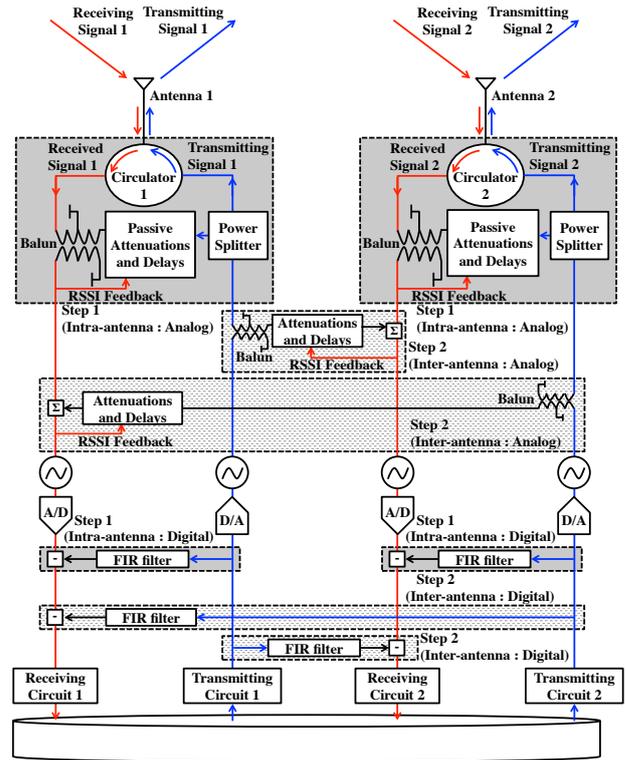


図 8 ノードアーキテクチャ

アンテナを使用する。各アンテナは送信、受信回路にそれぞれ接続されている。MIMO 通信では、アンテナ 1, 2 が同時に異なる信号を送信する。アンテナ 1 から送信した信号は、アンテナ 1 で受信する信号に干渉を与え (アンテナ内干渉)、またアンテナ 2 で受信する信号にも干渉を与える (アンテナ間干渉)。つまり、アンテナ 1 で受信した信号はアンテナ 1, 2 から干渉を受けたものである。クライアント A においてクライアント B からの信号を正しく受信するためには、両方のアンテナからの干渉を除去する必要がある。ステップ 1, 2 は共にアナログ領域での除去、デジタル領域での除去の二つの流れに分けられる。ステップ 1 として、自身のアンテナの送信信号によって引き起こるアンテナ内干渉の除去を行う。図 8 のステップ 1 の部分で、アンテナ内干渉の除去を行う。アンテナ 1 において、アンテナ 1 の送信信号と受信信号は自己干渉を除去するためにキャンセラが接続されている。ステップ 2 では、アンテナ間干渉を除去する。図 8 のステップ 2 に、アンテナ間干渉除去の構造を示す。アンテナ 1 において、アンテナ 2 の送信信号とアンテナ 1 の受信信号がキャンセラが接続されており、アンテナ間干渉を除去する。提案ノードアーキテクチャにおいて、サーキュレータ [4] を用いた干渉除去の技術はアンテナ内干渉除去に適用されている。更に、Balun [2] を用いた干渉除去技術はアンテナ間干渉除去に用いられている。提案ノードアーキテクチャは二つの全二重無線通信の技術を効果的に用いることで、全二重無線通信と MIMO 通信を同時に実現する。

### 3.2 MAC プロトコル

WLAN 環境において全二重 MIMO 通信が適用される機会を増加させるために、提案ノードアーキテクチャのための MAC プロトコルを提案する。提案 MAC プロトコルは通信環境取得フェーズおよびデータ送信フェーズの二つのフェーズで構成される。通信環境取得フェーズでは、AP がネットワーク環境について、隣接クライアントリストとチャネル情報を取得する。

通信環境取得フェーズでは各クライアントは定期的に Hello パケットを送信する。クライアントが送信する Hello パケットのタイミングは互いが衝突しないように制御される。各クライアントは隣接クライアントリストを保持する。クライアントが他のクライアントから Hello パケットを受信したとき、Hello パケットを送信したクライアントを隣接クライアントリストに追加する。各クライアントが Hello パケットを送信し終わったら、全てのクライアントが AP に対して自身の隣接クライアントリストを送信する。AP は隣接クライアントリストを用いることで、どのクライアント同士が隠れ端末となっているのかを把握する。クライアントは自身にとってどのクライアントが隠れ端末とされないのかを隣接クライアントリストによって把握する。更に、AP は全てのクライアントからの隣接クライアントリストの送信によって、受信電力強度 (RSSI) を測る。結果として、AP は、AP と各クライアント間のチャネル情報を取得する。隣接クライアントリストとチャネル情報は AP における MIMO 送信、受信で使用する。

データ送信フェーズでは、CSMA/CA が適用される。データは AP から各クライアントへ、またはその逆で送信される。AP と各クライアントは CSMA/CA で送信権を獲得する。まず始めに、クライアント (クライアント A) が送信権を獲得した場合について説明する。

#### (A) クライアント A はキューを確認

- キューの長さが 1 の場合、クライアント A は AP に対して送信を開始
- キューの長さが 2 以上の場合、クライアント A は AP に対して二つのデータの MIMO 送信を開始

#### (B) AP はデータを受信し、送信元クライアントを確認するために受信データのヘッダをデコード

#### (C) AP はキューを確認し、受信データの送信元を確認

- キューの長さが 1 の場合
  - AP のキューのデータの送信先がクライアント A の場合、AP はクライアント A に対してデータの送信を開始 (全二重無線通信)
  - AP のキューのデータの送信先がクライアント A から隠れ端末となるクライアント (クライアント B) の場合、AP はクライアント B に対してデータの送信を開始 (全二重無線通信)
  - その他の場合は AP はデータを送信しない

(AP はクライアント A からデータを受信。半二重無線通信)

#### — キューの長さが 2 以上の場合

- 先頭から二つのデータの送信先が共にクライアント A の場合、クライアント A に対して AP は二つのデータの MIMO 送信を開始 (全二重 MIMO 通信)
- 先頭から二つのデータの送信先がクライアント A とクライアント A から隠れ端末のクライアント (クライアント C) の場合、図 9a のようにクライアント A と C に対して AP は二つのデータの MIMO 送信を開始 (全二重 MIMO 通信)
- 先頭から二つのデータの送信先が共にクライアント A から隠れ端末のクライアント (クライアント C) の場合、図 9b のように AP はクライアント C に二つのデータの MIMO 送信を開始 (全二重 MIMO 通信)
- 先頭から二つのデータの送信先がそれぞれクライアント A から隠れ端末のクライアント (クライアント C と D) の場合、図 9c のように AP はクライアント C と D に二つのデータの MIMO 送信を開始 (全二重 MIMO 通信)
- その他の場合は AP はデータを送信しない (AP はクライアント A からデータを受信。半二重無線通信)

次に、AP が送信権を獲得した場合について説明する。

#### (A) AP はキューを確認

- キューの長さが 1 の場合、AP はクライアント (クライアント E) に対して送信を開始
- キューの長さが 2 以上の場合
  - 先頭から二つのデータの送信先が同じクライアント (クライアント E) の場合、クライアント E に対して AP は二つのデータの MIMO 送信を開始
  - 先頭から二つのデータの送信先が二つのクライアント (クライアント F と G) の場合、クライアント F と G に対して AP は MIMO 送信を開始

#### (B) データを受信したクライアントは受信データが自分宛か確認

- AP から一つ以上のデータを受信したクライアント (クライアント H) は、受信データの送信先を確認するためにデータのヘッダをデコード
  - 受信データの送信先がクライアント H のみの場合、クライアント H はキューを確認
    - クライアント H のキューの長さが 1 の場合、クライアント H は AP に対してデー

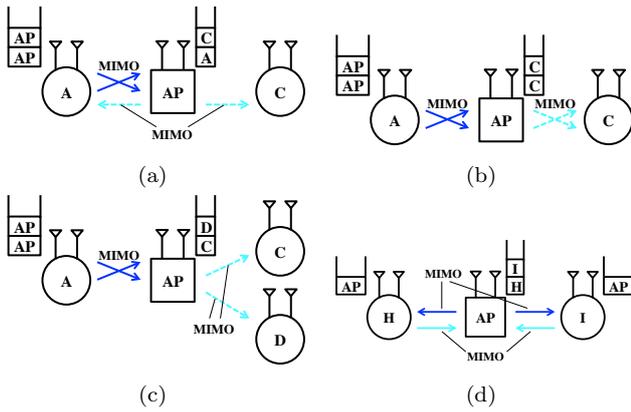


図 9 全二重 MIMO 通信のための MAC プロトコル

- データの送信を開始 (全二重無線通信)
- クライアント H のキューの長さが 2 以上の場合、クライアント H は AP に対して二つのデータの MIMO 送信を開始 (全二重 MIMO 通信)
  - その他の場合は、クライアント H はデータを送信しない (クライアント H は AP からデータを受信、半二重無線通信)
- クライアント (互いに隠れ端末であると把握しているクライアント H と I) が AP からのデータを受信した場合、それぞれのクライアントは送信先を確認するために受信データのヘッダをデコード
    - 送信先がクライアント H と I の場合、それぞれのクライアントは自身のキューを確認
      - それぞれのキューの長さが 1 以上の場合、図 9d のようにクライアント H と I は AP に対して MIMO 送信を開始 (全二重 MIMO 通信)
    - その他の場合は、クライアントはデータを送信しない (クライアントは AP からのデータを受信、半二重無線通信)

提案方式では、AP が受信データの送信元と異なるクライアントに対しても全二重無線通信で送信する。結果として、既存の全二重無線通信のための MAC プロトコルと比較して、提案方式では隠れ端末が存在するときに全二重通信となる機会が増加し、スループットの向上が見込まれる。

#### 4. 理論解析

提案する全二重 MIMO 通信のための MAC プロトコルのスループット特性を確率モデルを用いて理論的に解析する。ここで、クライアント数を  $n$  とし、それぞれのクライアントを半径  $r$  の円周上に均等に配置する。AP は円の中心に配置する。本研究において  $r$  は、クライアント数が偶数のとき、一つのクライアントに対して円周上対称な位置にあるクライアントのみが隠れ端末となるように設定す

る。クライアント数が偶数のときは、隠れ端末がそれぞれのクライアントに対して一つずつ存在する。クライアントと AP には、常に送信データが存在するネットワークの飽和状態とし、AP においてデータの宛先は各クライアントで等しいと仮定する。ここで

$Th$ : スループット

$P_w$ : 送信権を獲得する確率

$P_t$ : データを送信する確率

$R$ : 伝送レート

$P_p$ : 1 パケット中のデータの割合

と定義する。スループット  $Th$  は以下のように示される。

$$Th = P_w P_t R P_p \quad (6)$$

AP およびクライアントの送信権獲得の確率は CSMA/CA を用いるため、

$$P_w = 1/(n+1) \quad (7)$$

となる。

(A) クライアント数が偶数 ( $n = 2, 4, 6, 8$ ) の場合

それぞれのクライアントに対して一つずつ隠れ端末となるクライアントが存在する。

- 下りスループット

送信権を獲得した AP は  $P_t = 1$  の確率で MIMO 通信を行う。またデータを受信した AP は、受信データの送信元もしくは受信データの送信元から隠れ端末となるクライアントに対して AP が二つのデータを持つ  $P_t = 4/n^2$  の確率で MIMO 通信を行い、一つのデータを持つ  $P_t = 2(n-2)/n^2$  の確率でデータの一つを送信する。

- 上りスループット

送信権を獲得したクライアントは AP に対して  $P_t = 1$  の確率で MIMO 通信を行う。また、 $1/n^2$  の確率で自身宛のデータのみを受信するクライアントは、 $P_t = 1$  の確率で MIMO 通信を行う。複数のデータを受信し、それぞれのデータの送信先が自身と他のクライアントの場合は、他のクライアントが自身にとって隠れ端末となる  $P_t = 2/n^2$  の確率でデータの一つずつ送り、MIMO 通信を行う。他のクライアントが自身にとって隠れ端末でない場合は、データの送信を行わない ( $P_t = 0$ )。

(B) クライアント数が奇数 ( $n = 3, 5, 7$ ) の場合

クライアント同士で隠れ端末となるクライアントは存在しない。

- 下りスループット

送信権を獲得した AP は毎回  $P_t = 1$  の確率で MIMO 通信を行う。また、データを受信した AP は  $P_t = 1/n^2$  の確率で MIMO 通信を行い、 $P_t = (n-1)/n^2$  の確率でデータの一つを送信する。

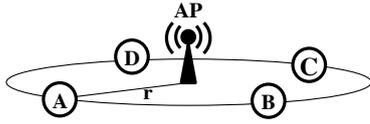


図 10  $n = 4$  のときの解析モデル

— 上りスループット

送信権を獲得したクライアントは  $P_t = 1$  の確率で MIMO 通信を行う。また、自身宛のデータのみを受信したクライアントは、 $P_t = 1$  の確率で MIMO 通信を行う。複数クライアント宛のデータを受信したクライアントは、送信を行わない ( $P_t = 0$ )。

例えば、 $n = 4$  のときは図 10 のように AP とクライアントを配置する。クライアント A と C，クライアント B と D はそれぞれ隠れ端末の関係にある。AP およびクライアントが送信権を獲得する確率は

$$P_w = 1/5$$

となる。下りスループットは

$$\begin{aligned} Th &= 1/5 \times \{1 \times 2 + (4/16 \times 2 + 2 \times 2/16 \times 1) \times 4\} RP_p \\ &= RP_p \end{aligned}$$

となる。上りスループットは

$$\begin{aligned} Th &= 1/5 \times \{(1 \times 2 + 1/16 \times 2 + 2/16 \times 1) \times 4\} RP_p \\ &= 1.8RP_p \end{aligned}$$

となる。

## 5. 性能評価

提案ノードアーキテクチャを用いて、提案 MAC プロトコルのスループット性能を評価する。

### 5.1 評価環境

ns-3 を用いてシミュレーションを行い、スループットの評価を行う。WLAN 環境と仮定し、半径 150m の円周上に均等にクライアントを配置し、円の中心に AP を配置する。送信距離およびキャリアセンス可能範囲は 292.48m である。従って、隠れ端末となるのはクライアント同士が 292.48m 以上離れているときである。AP はクライアントに対してデータを送信し、クライアントは AP に対してデータを送信する。AP とクライアントは、常に送信データが存在するネットワークの飽和状態と仮定する。比較対象の MAC プロトコルは全二重無線通信のための MAC プロトコル [3] である。物理層は IEEE 802.11a, 伝送レートは 6Mbps, フレームサイズは 1,500Byte, シミュレーション時間は 100 秒とする。データは 10 回のシミュレーションによる平均値である。

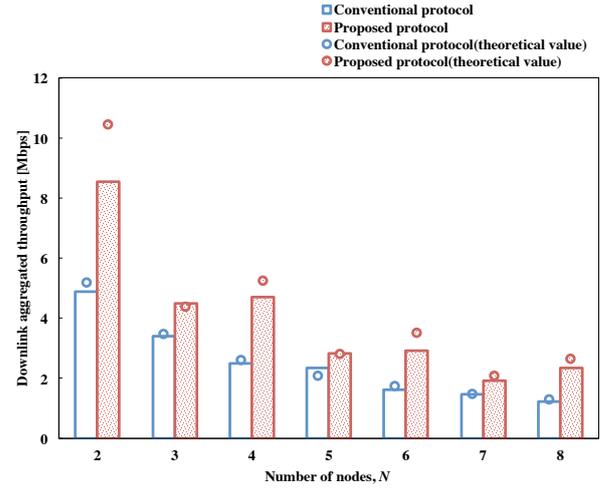


図 11 下りスループット

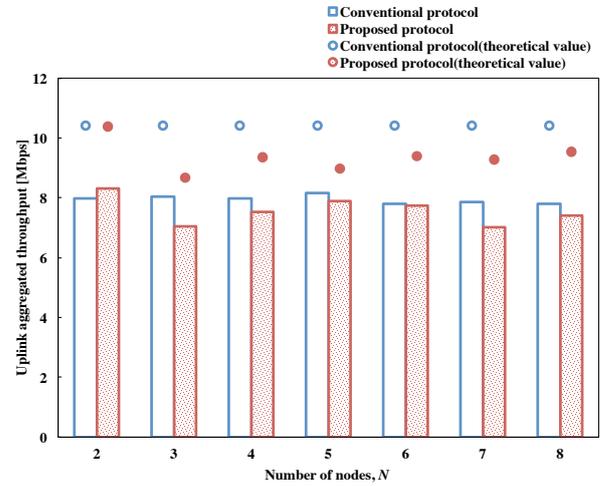


図 12 上りスループット

### 5.2 性能評価

図 11 に下りスループットのシミュレーションと、理論解析の結果を示す。理論解析とシミュレーション結果は傾向がほぼ一致している。また、全ての状況において、提案プロトコルの下りスループットは向上する。更にクライアントが奇数 ( $n = 3, 5, 7$ ) のときと比較して、クライアントが偶数 ( $n = 2, 4, 6, 8$ ) のときは特に性能が向上する。特にクライアント数 8 のとき、既存プロトコルと比較して提案プロトコルは 91% の下りスループットの向上を図れる。これはクライアントが偶数のときは隠れ端末が存在し、全二重 MIMO 通信が適用される機会が向上することによって下りスループットの大幅な向上を図れるためである。

図 12 に上りスループットのシミュレーションと、理論解析の結果を示す。理論解析とシミュレーション結果は傾向がほぼ一致している。クライアント数 2 のとき、提案プロトコルと既存プロトコルではほぼ一致している。この理由は、隠れ端末でないクライアントが存在しないことによると考えられる。既存プロトコルでは AP がデータをクラ

クライアントに送信するとき、クライアントはデータを受信しながら MIMO 通信で常にデータを送信する。一方で提案プロトコルでは、二つのクライアントはお互いに隠れ端末となるため、クライアントは AP からのデータを受信しながら自身のデータを毎回送信する。従って、各クライアントに対して他の全てのクライアントが隠れ端末であることより、提案プロトコルと既存プロトコルにおいて同等の結果が出たと考えられる。上りスループットにおいては、クライアント数 2 以外の場合では提案プロトコルと比較して既存プロトコルが良い結果となる。これは提案プロトコルにおいて AP が複数のクライアントに対して同時に MIMO 送信を行えることが原因である。AP が複数クライアントに対して MIMO 送信をした場合、送信先となるクライアント同士が隠れ端末でない場合は、クライアントはデータを受信しながら自身のデータを送信しない。従って、全二重無線通信を行わないため、上りスループットの低下が引き起こる。既存プロトコルは AP は複数クライアントに対して同時に MIMO 送信を行わず、一つのクライアントに対してのみ MIMO 送信を行うため、クライアントは毎回データを受信しながら自身のデータを送信する。しかし、提案プロトコルの上りスループットの低下は少ないため、全体として大きな影響はないと考えられる。

提案ノードアーキテクチャを用いたシミュレーション結果より、既存の全二重無線通信のための MAC プロトコルと比較して、提案の全二重 MIMO 通信のための MAC プロトコルはクライアント数に関わらず下りスループットを向上する。さらに、提案プロトコルでは隠れ端末が存在するときは下りスループットが顕著に向上する。これは全二重 MIMO 通信となる確率が隠れ端末が存在しないときと比べて増加するためである。上りスループットは、提案プロトコルと比べて既存プロトコルで向上する。これは、提案プロトコルにおいて隠れ端末でないクライアント同士に対して AP が MIMO 通信を行うことで、クライアントが全二重無線通信とならないことによる。既存プロトコルでは AP が複数のクライアントに対して同時にデータの送信を行わないため、隠れ端末の有無に関わらず AP からデータを受信したクライアントは毎回 MIMO 通信が行える。従って、既存プロトコルでは上りスループットが向上する。

## 6. 結論

本研究では、はじめに全二重 MIMO 通信のためのノードアーキテクチャを提案した。提案ノードアーキテクチャは  $n$  本のアンテナで全二重  $n \times n$  MIMO 通信を実現する。これにより、モバイル装置への実装を容易にする。次に、提案ノードアーキテクチャのための MAC プロトコルを提案した。提案 MAC プロトコルは WLAN 環境において全二重 MIMO 通信が適用される機会を増加させることを目的とする。提案ノードアーキテクチャと提案 MAC プロト

コルを理論解析および計算機シミュレーションで評価した。評価により、WLAN 環境において上りスループットを低下させることなく、下りスループットの向上することを示した。今後の課題は、MAC プロトコルの全二重  $n \times n$  MIMO 通信への拡張、ランダムトポロジや全二重  $n \times n$  MIMO 通信のときの評価、実機への実装である。

## 謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金（若手研究 (B) 24700074 および基盤研究 (A) 24240009）、電気通信普及財団の支援により実施された。

## 参考文献

- [1] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," Proc. of *ACM MobiCom'10*, pp. 1-12, Sept. 2010.
- [2] M. Jain, J. I. Choi, T. M. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, Real-time, Full Duplex Wireless," Proc. of *ACM MobiCom'11*, pp. 301-312, Sept. 2011.
- [3] S. Oashi and M. Bandai, "Performance of Medium Access Control Protocols for Full-Duplex Wireless LANs," Proc. of *APSITT'12*, pp. 1-4, Nov. 2012.
- [4] S. Hong, J. Mehlman, and S. Katti, "Picasso: Flexible RF and Spectrum Slicing," Proc. of *ACM SIGCOMM'12*, pp. 37-48, Aug. 2012.
- [5] E. Aryafar, M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan, and M. Chiang, "MIDU: Enabling MIMO Full Duplex," Proc. of *ACM MobiCom'12*, pp. 257-268, Aug. 2012.
- [6] H. Rahul, S. Kumar and D. Katabi, "JMB: Scaling Wireless Capacity with User Demands," Proc. of *ACM SIGCOMM'12*, pp. 235-246, Aug. 2012.