

## マルチホップ無線全二重通信における指向性メディアアクセス制御方式

杉山 佑介<sup>†a)</sup> 玉置 健太<sup>††b)</sup> 猿渡 俊介<sup>††c)</sup> 渡辺 尚<sup>†††d)</sup>Directional Asynchronous Medium Access Control for  
Wireless Full-Duplex Multi-Hop NetworksYusuke SUGIYAMA<sup>†a)</sup>, Kenta TAMAKI<sup>††b)</sup>, Shunsuke SARUWATARI<sup>††c)</sup>,  
and Takashi WATANABE<sup>†††d)</sup>

あらまし マルチホップネットワークに無線全二重通信を適用した場合、セカンダリ送信衝突問題という無線全二重通信方式特有の問題が発生する。本論文では、セカンダリ送信衝突問題を解決するために指向性アンテナを利用した DAFD-MAC (Directional Asynchronous Full Duplex Medium Access Control) を提案し、有効性を論じる。DAFD-MAC では、セカンダリ送信の宛先ノードがデータフレームを受信しながら、指向性アンテナと無線全二重通信を用いて通信中のノードと反対方向に NAV (Network Allocation Vector) を通知して近隣ノードの通信を延期することで衝突を抑制する。計算機シミュレーションにより end-to-end スループットを評価した結果、提案方式 DAFD-MAC は、既存方式である CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) と比較して最大約 72%、FD-MAC+ (Full Duplex MAC+) と比較して最大約 106%、MFD-MAC (Multi-hop Full Duplex MAC) と比較して最大約 110%のスループットが向上することを示す。

キーワード 全二重通信, 指向性アンテナ, マルチホップ, アドホックネットワーク

## 1. ま え が き

スマートフォンの急速な普及により、無線通信によるデータトラフィックが急増している。総務省が発行している 2012 年度の情報通信白書によれば、増大するデータトラフィックを背景に、携帯電話網の通信障害が頻発している [1]。こうした無線端末数の増加や、データトラフィックの増加に対応するため、無線通信資源を時間・空間・周波数の観点から有効利用するための技

術が求められる。

本研究の目的は、無線全二重通信 [2]~[8] とマルチホップネットワーク [9], [10] を組み合わせて無線通信資源を有効利用することである。データを長距離配送する際に、電波の送信電力を増加すると電波の占有空間が大きくなるのに対し、マルチホップネットワークでは小さい送信電力でデータを中継するため、無線通信資源の空間利用効率が向上する。マルチホップネットワークに対して、一つの周波数帯で双方向かつ同時に通信できる無線全二重通信を適用することで、時間軸と空間軸で無線通信資源を有効利用できると考えられる。

無線全二重通信では、送信元ノードによるフレームの送信に対して宛先ノードもフレームの送信を開始する [6], [11]。送信元ノードの送信をプライマリ送信、プライマリ送信に対応するもう一方の送信をセカンダリ送信と呼ぶ [6], [11]。無線全二重通信をマルチホップネットワークに適用した場合、プライマリ送信とセカンダリ送信の範囲が重なることや、セカンダリ送信と他のペアの無線全二重通信の送信電波の到達範囲が重

<sup>†</sup> 静岡大学情報学部情報科学科, 浜松市

Faculty of Informatics, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku,  
Hamamatsu-shi, 432-8011 Japan

<sup>††</sup> 静岡大学大学院情報科学研究科, 浜松市

Graduate School of Informatics, Shizuoka University, 3-5-1  
Johoku, Hamamatsu-shi, 432-8011 Japan

<sup>†††</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科, 吹田市

Graduate School of Information Science and Technology,  
Osaka University, 1-1, Yamadaoka, Suita-shi, 565-0871  
Japan

a) E-mail: sugiyama@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

b) E-mail: tamaki@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

c) E-mail: saru@inf.shizuoka.ac.jp

d) E-mail: watanabe@ist.osaka-u.ac.jp

なることで、衝突が発生して性能が低下するセカンダリ送信衝突問題が発生する [12].

このような観点から、本論文では、無線全二重通信をマルチホップネットワークに適用した場合に生じるセカンダリ送信衝突問題を抑制するために指向性通信を利用した MAC プロトコル DAFD-MAC (Directional Asynchronous Full Duplex MAC) を提案する。DAFD-MAC では、プライマリ送信とセカンダリ送信に指向性通信を用いることで、近隣ノードへの干渉を制御してセカンダリ送信衝突問題を抑制する。一方で、指向性通信の利用はデフネス問題を引き起こす [13]。デフネス問題を抑制するために DAFD-MAC では、セカンダリ送信の宛先ノードがデータフレームを受信しながら、指向性通信と無線全二重通信を用いて通信中のノードと反対方向に NAV (Network Allocation Vector) を通知する。シミュレーションによる評価の結果、DAFD-MAC は、全二重通信を用いない場合と比較して最大 106%、指向性通信を用いない場合と比較して最大 110%のスループットが向上することが分かった。

本論文の構成は以下のとおりである。2. では、無線全二重通信とマルチホップネットワークに関する最近の研究動向を概観して、本研究の位置付けを明らかにする。また、全二重通信とマルチホップネットワークを組み合わせることで、セカンダリ送信衝突問題が発生することを示す。3. では、セカンダリ送信衝突問題を解決するための提案方式である DAFD-MAC について述べる。4. では、計算機シミュレーションにより、既存方式である CSMA/CA, FD-MAC [6] を拡張した FD-MAC+, MFD-MAC [11] と提案方式である DAFD-MAC を比較する。5. では、提案方式 DAFD-MAC を実際の環境に適用した場合に関して議論する。最後に 6. でまとめとする。

## 2. 関連研究

### 2.1 無線全二重通信とマルチホップネットワーク

無線全二重通信とは、同じ無線の周波数帯で同時に送信しながら受信することが可能な通信である [5], [6]。同時通信の特性から、時間軸での無線通信資源の有効利用が実現される。従来の無線通信は、送信電力に対して受信機の受信電力が小さすぎるために自身の送信電波により受信電波が打ち消され、半二重通信しかできなかった。しかしながら、干渉除去技術の発達により [2], [14], 全二重通信が可能となりつつある [3]~

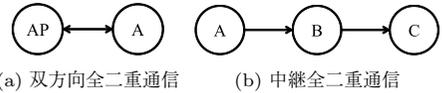


図 1 シングルホップ環境とマルチホップ環境の比較  
Fig. 1 Single-hop and multi-hop comparison.

[8], [15]. 例えば, WARP V2 プラットホーム [16] では FPGA を利用して干渉を除去している [4]~[7].

また, 全二重通信機を利用して, AP (Access Point) とノード間で無線全二重通信する FD-MAC (Full Duplex Medium Access Control) プロトコルも提案されている [5], [6]. FD-MAC では, シングルホップ環境で無線全二重通信を行い, 全二重通信は AP とノードの間で発生することを前提としている. FD-MAC のようなシングルホップ環境での全二重通信を, 本論文では双方向全二重通信と呼ぶこととする. 図 1 (a) に双方向全二重通信の例を示す. 図 1 (a) では, 無線全二重通信を行うリンクは AP とノード A の間である.

FD-MAC は同期型 [5], 非同期型 [6] に分けられる. 同期型では, GPS や時刻同期プロトコルなどで同期がとられていることを前提としている. マルチホップ環境では, ネットワーク全体で同期をとることが困難なため, 本研究では非同期型に着目する.

非同期型の全二重通信では, プライマリ送信の送信元ノードと, セカンダリ送信の送信元ノードが同時にフレームを送信する. 本論文では, プライマリ送信の送信元ノードとセカンダリ送信の送信元ノードの組を全二重通信するペアと呼ぶこととする. プライマリ送信の送信元ノードとは, CSMA/CA と同様のキャリアセンスとバックオフによってフレームの送信権を獲得したノードである. セカンダリ送信の送信元ノードとは, プライマリ送信の送信元ノードから送信許可であるセカンダリ送信権を与えられたノードである.

無線全二重通信をマルチホップ環境に適用した場合, FD-MAC と異なり, マルチホップネットワークにおいて通信効率を向上するために全二重通信するペアとなるノードを適切に決定する必要がある. 全二重通信するペアとなるノードを決定することとは, マルチホップネットワークにおいて多数存在するノードの中から, どのノードがプライマリ送信して, どのノードがセカンダリ送信するかを決定することを意味している.

全二重通信するペアとなるノードを決定することで, 双方向全二重通信だけでなく, マルチホップネットワークの中継ノードにおいてフレームを受信しながら

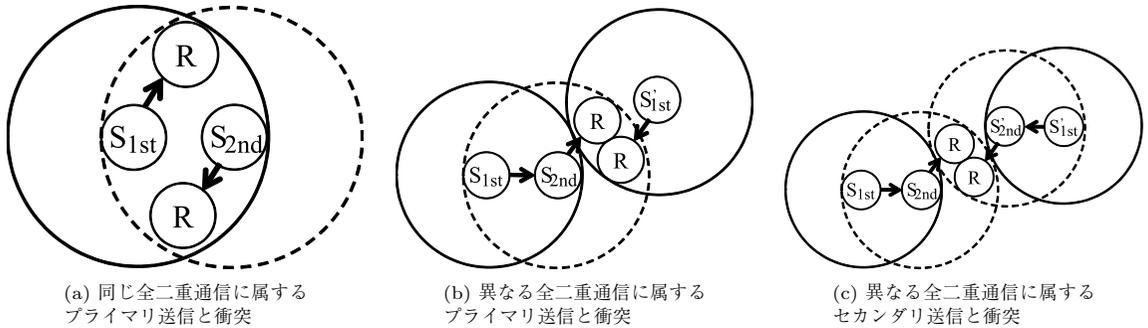


図 2 セカンダリ送信衝突問題の三つの条件  
Fig. 2 Three cases of secondary transmission collision problem.

ら次のホップにフレームを送信する際にも無線全二重通信を利用できる．中継ノードを利用した全二重通信を以下では中継全二重通信と呼ぶこととする．図 1 (b) に中継全二重通信の例を示す．図 1 (b) では、ノード B が中継ノードとなり、ノード B はノード A からのフレームを受信しながらノード C へフレームを送信する．

既存方式の FD-MAC では、プライマリ送信の宛先ノードが常にセカンダリ送信の送信元ノードとなるため、全二重通信するペアとなるノードを決定する必要はない．例えば、図 1 (a) では、プライマリ送信の送信元ノードを AP、プライマリ送信の宛先ノードをノード A とした場合に、セカンダリ送信の送信元ノードは常にノード A となる．

一方で、マルチホップ環境に全二重通信を適用した場合、プライマリ送信の宛先ノードが常にセカンダリ送信の送信元ノードになるとは限らない．例えば、図 1 (b) において、プライマリ送信の送信元ノードをノード B とすると、セカンダリ送信の送信元ノードとしてノード A とノード C の二つの候補が存在する．全二重通信するペアとなるノードとして、次に送るべきフレームをバッファ内に保持しているノードをセカンダリ送信の送信元ノードに選択すれば、全二重通信が発生する．例えば、図 1 (b) において、次に送るべきフレームをバッファ内に保持しているノードをノード A とノード B、次に送るべきフレームをバッファ内に保持していないノードをノード C とする．プライマリ送信の送信元ノードがノード B である場合、セカンダリ送信の送信元ノードとしてノード A を選択すると中継全二重通信が発生するが、ノード C を選択すると中継全二重通信は発生しない．

## 2.2 セカンダリ送信衝突問題

中継全二重通信が可能なマルチホップネットワークでは、セカンダリ送信による衝突が発生して性能が低下するセカンダリ送信衝突問題が発生する．

図 2 にセカンダリ送信衝突問題の条件を示す． $S_{1st}$  と  $S'_{1st}$  はプライマリ送信の送信元ノード、 $S_{2nd}$  と  $S'_{2nd}$  はセカンダリ送信の送信元ノード、 $R$  はプライマリ送信若しくはセカンダリ送信の宛先ノードとする． $S_{1st}$  と  $S_{2nd}$ 、 $S'_{1st}$  と  $S'_{2nd}$  がそれぞれペアとなって全二重通信している．実線の円はプライマリ送信の電波の到達範囲、点線の円はセカンダリ送信の電波の到達範囲、実線の矢印は矢印の始点から終点へ向けて発生しているフレームの送信とする．

セカンダリ送信衝突問題が発生する条件の一つ目は、図 2 (a) のように、ノード  $S_{1st}$  によるプライマリ送信の電波の到達範囲と、ノード  $S_{1st}$  と同じ全二重通信に属するノード  $S_{2nd}$  によるセカンダリ送信の電波の到達範囲が重なっている位置に宛先ノード  $R$  が存在する場合である．二つ目は、図 2 (b) のように、ノード  $S_{2nd}$  によるセカンダリ送信の電波の到達範囲と、ノード  $S_{2nd}$  と異なる全二重通信に属するノード  $S'_{1st}$  によるプライマリ送信の電波の到達範囲が重なっている位置に宛先ノード  $R$  が存在する場合である．三つ目は、図 2 (c) のように、ノード  $S_{2nd}$  によるセカンダリ送信の電波の到達範囲と、ノード  $S_{2nd}$  と異なる全二重通信に属するノード  $S'_{2nd}$  によるセカンダリ送信の電波の到達範囲が重なっている位置に宛先ノード  $R$  が存在する場合である．三つの条件のいずれの場合も宛先ノード  $R$  において衝突が発生する．

マルチホップネットワークで衝突を回避する手法としては、RTS/CTS (Request To Send/Clear To

Send) フレーム [17] を用いる方法が一般的である. 無線全二重通信のプライマリ送信とセカンダリ送信の両方で RTS/CTS フレームを送ることで, 近隣ノードに NAV を設定して通信を延期することができる. しかしながら, プライマリ送信とセカンダリ送信の両方で RTS/CTS フレームが送信された場合, 本来は通信を延期する必要のないノードにも NAV が設定されて通信が延期されてしまうという問題が発生する. 例えば, セカンダリ送信の宛先ノードがプライマリ送信の CTS フレームを受信した場合に NAV が設定されてしまうため, セカンダリ送信の CTS フレームを発行することができなくなり, 結果として本来は実行されるべきセカンダリ送信が延期されてしまう.

衝突を回避する方法として, 指向性アンテナを用いて指向性通信する方法も考えられる. 指向性アンテナは, 特定方向に利得を向けることで周囲のノードへの干渉を避けつつ通信できる性質がある [13], [18]~[21]. そのため, セカンダリ送信衝突問題の原因となる送信電波の到達範囲の重複を減らすことが可能である. 指向性アンテナをマルチホップ環境に適用させた MAC プロトコル [13], [22], [23] の代表例として DMAC (Directional MAC) [13], [22] が挙げられる. DMAC では, 全ての通信を指向性アンテナを用いて制御するため, 近隣ノードへの干渉を避けながら通信することができる. しかしながら, DMAC は指向性アンテナを用いているがゆえに新たにデフネス問題 [13] が発生する. デフネス問題とは, 指向性アンテナを用いて通信が行われるため, 指向性範囲外の近隣ノードは宛先ノードが通信中であることを検出できず, フレームを送信してしまうという問題である.

無線全二重通信をマルチホップネットワークに適用した MAC プロトコルとして, MFD-MAC (Multi-hop Full-Duplex MAC) が挙げられる [11]. MFD-MAC では, 全二重通信が発生する可能性を高めることを目的として, 次に送るべきフレームをバッファ内に保持している確率が高いノードがセカンダリ送信の送信元ノードとして選択される工夫がなされている. しかしながら, MFD-MAC はセカンダリ送信衝突問題を考慮していない. 無線全二重通信を用いたマルチホップネットワークに指向性アンテナを用いた研究として, 文献 [24] が挙げられる. しかしながら, 文献 [24] は TDMA (Time Division Multiple Access) を前提として設計されているため, ネットワーク全体で同期を取らなければならないという課題がある.

### 3. DAFD-MAC (Directional Asynchronous Full Duplex MAC)

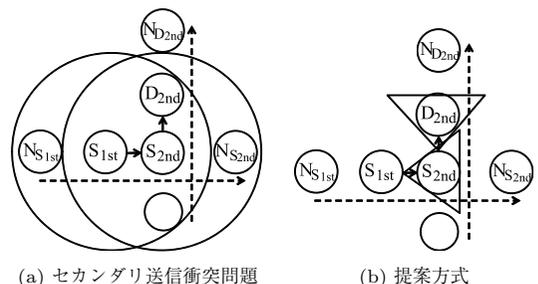
2.での議論をもとに, マルチホップ環境での無線全二重通信におけるセカンダリ送信衝突問題を指向性アンテナを用いて抑制する MAC プロトコル「DAFD-MAC (Directional Asynchronous Full Duplex MAC)」を設計した.

#### 3.1 DAFD-MAC の概要

DAFD-MAC は指向性アンテナを用いた衝突抑制と, 近隣ノードに適切に NAV を通知してデフネス問題を抑制する二つの仕組みをもつ.

一つ目の仕組みはプライマリ送信とセカンダリ送信に指向性アンテナを用いて, 衝突を抑制することである. 図 3 に無指向性アンテナを用いた全二重通信と, 指向性アンテナを用いた全二重通信の例を表す.

$S_{1st}$  はプライマリ送信の送信元ノード,  $S_{2nd}$  はセカンダリ送信の送信元ノード,  $D_{2nd}$  はセカンダリ送信の宛先ノード,  $NS_{1st}$ ,  $NS_{2nd}$ ,  $ND_{2nd}$  はそれぞれノード  $S_{1st}$ , ノード  $S_{2nd}$ , ノード  $D_{2nd}$  の近隣ノードとする. 円は無指向性アンテナを利用した場合の送信電波の到達範囲, 三角形は指向性アンテナを利用した場合の送信電波の到達範囲とする. 実線の矢印は矢印の始点から終点に向けて発生している MAC 層におけるフレームの送信を, 点線の矢印は矢印の始点から終点へ向けて発生しているネットワーク層の通信フローをそれぞれ意味している. ノード  $S_{2nd}$  はノード  $S_{1st}$  からデータを受信しながらノード  $D_{2nd}$  へとデータを送信している. 図 3 (a) は無指向性アンテナを用いてデータ送信をした場合に, セカンダリ送信衝突問題が発生する例である. ノード  $S_{1st}$  とノード  $S_{2nd}$  は無指向性アンテナを用いてプライマリ送信とセカンダリ送信



(a) セカンダリ送信衝突問題

(b) 提案方式

図 3 指向性アンテナを用いたデータ送信による衝突回避  
Fig. 3 Collision avoidance with directional antennas.

をしている。セカンダリ送信の受信ノード  $D_{2nd}$  はプライマリ送信とセカンダリ送信の両方の干渉範囲に存在するのでデータを受信できない。それに対して、DAFD-MACでは、図3(b)のように、ノード  $S_{1st}$  からノード  $S_{2nd}$  へのプライマリ送信と、ノード  $S_{2nd}$  からノード  $D_{2nd}$  へのセカンダリ送信に、それぞれ指向性アンテナを用いることで干渉を回避する。ノード  $D_{2nd}$  はプライマリ送信からの干渉を避けることでセカンダリ送信のフレームを受信できる。

二つ目の仕組みは、プライマリ送信の送信元ノードとセカンダリ送信の送信元ノードの近隣ノードにNAVを通知して、指向性アンテナを用いた場合に生じるデフネス問題[13]を抑制することである。図3では近隣ノードの例として、 $N_{S_{1st}}$ ,  $N_{S_{2nd}}$ ,  $N_{D_{2nd}}$  が存在する。NAVを通知してデフネス問題を抑制するメカニズムを本論文では5-wayハンドシェイクと呼ぶ。5-wayハンドシェイクではRTS (Request To Send), RCTS (Request and Clear To Send), SNAV (Set Network Allocation Vector), DSNNAV (Directional Set NAV), ACKの五つの制御フレームを利用する。五つ制御フレームの詳細については3.2で説明する。

DAFD-MACは次の手順によって実現される。

(1) 送信するフレームをもつノードはCSMA/CAに基づいて動作する。送信権を獲得したノードがプライマリ送信の送信元ノードとなってRTSフレームを送信する。

(2) RTSフレームの宛先に指定されたノードはセカンダリ送信権を獲得して、RCTSフレームを送信する。セカンダリ送信権を獲得したノードはセカンダリ送信の送信元ノードとなる。RCTSフレームはプライマリ送信の送信元ノードとセカンダリ送信の宛先ノードの二つを宛先として含む。

(3) RCTSフレームを受信したプライマリ送信の送信元ノードは、SNAVフレームを送信する。RCTSフレームを受信したセカンダリ送信の宛先ノードは、SNAVフレームの送信が終了するまで待機して、送信終了後にDSNNAVフレームを送信する。SNAVフレームの送信が終了まで待機することで、DSNNAVフレームの送信を、プライマリ送信、セカンダリ送信と同時に開始することが可能である。

(4) SNAVフレームの送信が終了したときに、プライマリ送信とセカンダリ送信が同時に開始される。プライマリ送信の送信元ノードとセカンダリ送信の送信元ノードは、指向性アンテナを用いて指向性で送

受信することで、プライマリ送信とセカンダリ送信による送信電波の到達範囲の重なりを抑制する。また、セカンダリ送信の宛先ノードはプライマリ送信の送信元ノードによるSNAVフレームの送信が終了した後、プライマリ送信、セカンダリ送信と同じタイミングでDSNNAVフレームを送信する。DSNNAVフレームを送信する際のビーム幅は、セカンダリ送信の送信元ノードと干渉を避けるため、指向性アンテナを用いて、SNAVフレーム受信側と反対方向にビーム幅  $\frac{4\pi}{3}$  [rad] で送信する。ビーム幅の詳細に関して付録を参照されたい。ビームの送信方向は、ノードの位置情報を用いて決定する。DAFD-MACでは、全てのノードは近隣ノードの位置情報をGPS (Global Positioning System) やAOA (Angle Of Arrival) を用いた位置測定により把握していることを前提としている[19], [25]。

(5) プライマリ通信とセカンダリ通信の通信ペアは、プライマリ送信とセカンダリ送信の両方が終了した時点で、指向性アンテナを用いて、ACKフレームを全二重通信で同時に交換する。

### 3.2 5-wayハンドシェイクの制御フレーム

3.1に示したように、DAFD-MACでは5-wayハンドシェイクによりデフネス問題を解決する。5-wayハンドシェイクは、RTS, RCTS, SNAV, DSNNAV, ACKの五つの制御フレームから構成される。

RTSフレームは、プライマリ送信の送信元ノードによって送信される。プライマリ送信の宛先とプライマリ送信終了時間を含む。RTSフレームの宛先に指定されたノードは、セカンダリ送信する権利を得る。プライマリ送信終了時間はNAV期間として計算される。RTSフレームを受け取った近隣ノードは、NAVを設定して通信を延期する。プライマリ送信の送信元ノードは、RTSフレームへの応答であるRCTSフレームを受信できなかった場合は、プライマリ送信しない。

RCTSフレームは、セカンダリ送信の送信元ノードによって送信される。二つの宛先と全二重通信終了時間を含む。宛先の一方はプライマリ送信の送信元ノードであり、もう一方はセカンダリ送信の宛先ノードである。セカンダリ送信の送信元ノードは、プライマリ送信とセカンダリ送信終了時間を比較して、遅い方を終了時間として選択する。選択した終了時間は全二重通信終了時間としてRCTSフレームに含まれる。RCTSフレームは三つの役割をもつ。一つ目の役割は、プライマリ送信の送信元ノードからのRTSフレーム

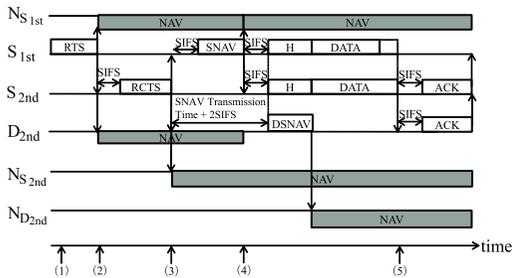


図4 DAFD-MAC タイムチャート  
Fig. 4 DAFD-MAC time chart.

への応答である。二つ目の役割は、セカンダリ送信の宛先ノードに選択されたことをセカンダリ送信の宛先となるノードに通知することである。三つ目の役割は、セカンダリ送信の送信元ノードの近隣ノードの通信を延期する役割である。

SNAV フレームは、プライマリ送信の送信元ノードによって送信される。全二重通信終了時間を含む。全二重通信終了時間は、受信した RCTS フレームに含まれる全二重通信終了時間と同じ時間を用いる。SNAV フレームは、プライマリ送信の送信元ノードの近隣ノードの通信を延期させるために、近隣ノードに全二重通信終了時間を通知する役割がある。

DSNAV フレームは、RCTS フレームの宛先に指定されたセカンダリ送信の宛先ノードによって送信される。全二重通信終了時間を含む。全二重通信終了時間は、受信した RCTS フレームに含まれる全二重通信終了時間と同じ時間を用いる。DSNAV フレームは、セカンダリ送信の宛先ノードの近隣ノードの通信を延期させる役割をもつ。プライマリ送信とセカンダリ送信との衝突を避けるために、セカンダリ送信の宛先ノードは、セカンダリ送信の送信元ノードと反対方向に指向性を向けて DSNAV フレームを送信する。

ACK フレームは、プライマリ送信の宛先ノードとセカンダリ送信の宛先ノードによって送信される。ACK フレームはデータフレームの受信に成功したことを通知する役割をもつ。

### 3.3 動作例

図4に、DAFD-MACの動作例を示す。プライマリ送信の送信元ノードをノード  $S_{1st}$ 、セカンダリ送信の送信元ノードをノード  $S_{2nd}$ 、セカンダリ送信の宛先ノードをノード  $D_{2nd}$ 、ノード  $S_{1st}$  と通信可能なノードをノード  $N_{S_{1st}}$ 、ノード  $S_{2nd}$  と通信可能なノードをノード  $N_{S_{2nd}}$ 、ノード  $D_{2nd}$  と通信可能なノードを

$N_{D_{2nd}}$  とする。図4のHはデータのヘッダの送信期間を意味する。

(1) プライマリ送信の送信元ノード  $S_{1st}$  は RTS フレームを無指向性で送信して、近隣ノードの通信を延期する。RTS フレーム受信ノードであるノード  $N_{S_{1st}}$  とノード  $D_{2nd}$  は、図4のSNAV フレーム送信終了時間まで NAV を設定する。

(2) RTS フレームの宛先に指定されたノード  $S_{2nd}$  は、セカンダリ送信権を獲得する。セカンダリ送信権を獲得したノード  $S_{2nd}$  は、SIFS (Short Interframe Space) [26] 時間後に RCTS フレームを無指向性で送信する。RCTS フレームを受信した近隣ノード  $N_{S_{2nd}}$  は、RCTS フレームに含まれる全二重通信終了時間まで NAV を設定する。図4では、プライマリ送信の送信元ノード  $S_{1st}$  の DATA サイズよりも、セカンダリ送信の送信元ノード  $S_{2nd}$  の DATA サイズの方が大きい。すなわち、NAV 期間は、セカンダリ送信が終了してから ACK フレームの送信が終了するまでの期間となる。

(3) RCTS フレームを受信したプライマリ送信の送信元ノード  $S_{1st}$  は、SIFS 時間後に SNAV フレームを近隣ノード  $N_{S_{1st}}$  に無指向性で送信する。SNAV フレームを受信した近隣ノード  $N_{S_{1st}}$  は SNAV フレームに含まれる全二重通信終了時間まで NAV を設定する。

(4) ノード  $S_{1st}$ 、 $S_{2nd}$ 、 $D_{2nd}$  は同時に送信を開始する。ノード  $S_{1st}$  は SNAV フレームを送信してから SIFS 時間後、ノード  $S_{2nd}$  は、SNAV フレームを受信してから SIFS 時間後に、それぞれの宛先に対して指向性を向けて、データフレームをプライマリ送信、セカンダリ送信する。このとき、セカンダリ送信の宛先ノード  $D_{2nd}$  は RCTS を受信してから SNAV フレーム送信時間 + 2SIFS 時間後、ノード  $N_{D_{2nd}}$  に対して  $\frac{4\pi}{3}$  [rad] の指向性を向けて、NAV 期間を通知するためのフレームである DSNAV フレームを送信する。

(5) データフレームを受信したノード  $S_{2nd}$  とノード  $D_{2nd}$  は、プライマリ送信とセカンダリ送信の両方が終了してから SIFS 時間後、データフレームの宛先に対して指向性を向けて ACK フレームを同時に送信する。

## 4. シミュレーション評価

### 4.1 評価環境

DAFD-MACの有効性を確認するために、計算機シ

ミュレーションと解析によって単位時間当りのデータ到達量である end-to-end スループット、フレーム送信時に衝突した割合である衝突率、送信要求が発生してから end-to-end の宛先が受信するまでの時間である遅延、制御フレームのオーバーヘッドを測定・算出した。DAFD-MAC の性能を相対的に評価するために、次の四つの MAC プロトコルを比較した。

#### (1) CSMA/CA (4-way ハンドシェイク)

CSMA/CA は、データ送信する前に通信ペア間で RTS/CTS フレームを交換する方式である。RTS/CTS フレームを交換して隠れ端末問題を抑制できるため、衝突率は最も低くなると考えられる。また、CSMA/CA は全二重通信しないため、DAFD-MAC において全二重通信によって得られた性能を示す尺度となる。

#### (2) FD-MAC+

FD-MAC+ は、アクセスポイントとノード間の通信に限定されていた FD-MAC [6] をノードとノード間でフレームを中継できるように拡張した MAC プロトコルである。FD-MAC+ は双方向全二重通信は可能であるものの、中継全二重通信しないため、中継全二重通信によって得られた性能を示す尺度となる。

#### (3) MFD-MAC

MFD-MAC [11] は、パケットを保持している可能性が高いノードをセカンダリ送信の送信元ノードとして選択して、プライマリ送信する方式である。MFD-MAC はセカンダリ送信衝突問題を考慮していないため、2.2 で述べたセカンダリ送信による衝突が発生して衝突率が高くなると予想される。セカンダリ送信衝突問題を抑制しない場合の尺度となる。

#### (4) DAFD-MAC

DAFD-MAC は、3. で述べた提案方式である。DAFD-MAC は、セカンダリ送信衝突問題とデフネス問題を指向性アンテナと 5-way ハンドシェイクを用いて抑制する。データと ACK の送受信で利用するビーム幅は  $30^\circ$  の固定ビーム幅とした。ここでのビーム幅  $30^\circ$  はあくまで参考値であり、最適な値とは限らないことに注意されたい。ビーム幅は干渉が与える影響を考慮して決定すべきであり [21]、今後の課題である。

共通の評価パラメータを以下に示す。通信距離は 250 [m]、ノード数は 100、シミュレーション時間は 300 [s] とした。また、ネットワーク層プロトコルとして DSR (Dynamic Source Routing) を利用した [27]。シミュレーションによる評価では 10 個のランダムネッ

表 1 物理層と MAC 層のパラメータ  
Table 1 IEEE 802.11 parameters.

データフレームサイズ	12000 [bit]
ACK フレームサイズ	112 [bit]
MAC ヘッダサイズ	224 [bit]
プリアンブルサイズ	144 [bit]
PLCP ヘッダサイズ	48 [bit]
スロット時間	20 [ $\mu$ s]
SIFS 時間	10 [ $\mu$ s]
DIFS 時間	50 [ $\mu$ s]
伝搬遅延	1 [ $\mu$ s]
最小コンテンツンションウィンドウサイズ	31
最大コンテンツンションウィンドウサイズ	1023
伝送レート	1, 2, 5.5, 11 [Mbit/s]

表 2 CSMA/CA における制御フレームのサイズ  
Table 2 Control frame size in CSMA/CA.

フレーム	フレームサイズ
RTS	160 [bit]
CTS	112 [bit]

表 3 DAFD-MAC における制御フレームのサイズ  
Table 3 Control frame size in DAFD-MAC.

フレーム	フレームサイズ
RTS	160 [bit]
RCTS	208 [bit]
SNAV	112 [bit]
DSNAV	64 [bit]

トワークを作成して、10 回の平均を計測値とした。ランダムネットワークとは、ノードの配置をエリアサイズの範囲でランダムに決定して、ネットワーク層の通信フローの始点と終点を全てのノードの中からランダムに選出するモデルである。

表 1 に、物理層と MAC 層のパラメータを示す。各パラメータは IEEE 802.11b に基づいている。データフレームサイズは 12000 [bit]、ACK フレームサイズは 112 [bit]、MAC ヘッダサイズは 224 [bit]、プリアンブルサイズは 144 [bit]、PLCP ヘッダサイズは 48 [bit]、スロット時間は 20 [ $\mu$ s]、SIFS 時間は 10 [ $\mu$ s]、DIFS 時間は 50 [ $\mu$ s]、伝搬遅延は 1 [ $\mu$ s]、最小コンテンツンションウィンドウサイズは 31、最大コンテンツンションウィンドウサイズは 1023、伝送レートは 1, 2, 5.5, 11 [Mbit/s] である。

表 2 に、評価で用いた CSMA/CA における制御フレームのサイズを示す。RTS, CTS フレームのサイズは、IEEE 802.11 をもとにして、それぞれ 160 [bit]、112 [bit] である。

表 3 に、評価で用いた DAFD-MAC における制御フレームのサイズを示す。RTS フレームのサイズは IEEE 802.11 と同じ 160 [bit] とした。RCTS フレー

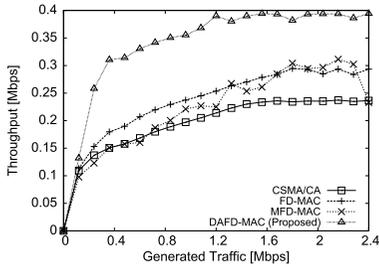


図5 発生トラフィックに対する end-to-end のスループット  
Fig. 5 End-to-end throughput vs. generated traffic.

ムでは、二つの受信先 MAC アドレスが必要なため、フレームサイズは RTS フレームに一つ分の MAC アドレスのサイズ 48 [bit] を追加した 208 [bit] とした。SNAV フレームでは、受信先 MAC アドレスが不要なため、フレームサイズは RTS フレームから一つ分の MAC アドレスのサイズ 48 [bit] を減算した 112 [bit] とした。DSNAV フレームでは、送信元及び受信先 MAC アドレスが不要なため、フレームサイズは RTS フレームから二つ分の MAC アドレスのサイズ 96 [bit] を減算した 64 [bit] とした。

#### 4.2 発生トラフィックを変えた場合のスループットの評価

DAFD-MAC の基本性能を評価するために、発生トラフィックを変えた場合の end-to-end スループットを評価した。図 5 に、物理層の伝送レートが 2 [Mbit/s]、フロー数が 5 フロー、エリアサイズが 1,500 [m]×1,500 [m]、1 フロー当りの発生トラフィックを 0~2.4 [Mbit/s] に変えた場合の end-to-end スループットを示す。横軸は 1 フロー当りの発生トラフィック [Mbit/s]、縦軸は end-to-end スループット [Mbit/s] である。図 5 より、提案方式 DAFD-MAC は四つの MAC プロトコルの中で最もスループットが高いことが分かる。DAFD-MAC を CSMA/CA と比較すると、トラフィックが 0.36 [Mbit/s] の場合にスループットの差が最大となり、約 72% 向上している。DAFD-MAC を FD-MAC と比較すると、トラフィックが 0.36 [Mbit/s] の場合にスループットの差が最大となり、約 106% 向上している。DAFD-MAC を MFD-MAC と比較すると、トラフィックが 0.24 [Mbit/s] の場合にスループットの差が最大となり、約 110% 向上している。

#### 4.3 発生トラフィックを変えた場合の衝突率の評価

DAFD-MAC においてセカンダリ送信衝突問題を抑制できているかどうかを検証するために、発生トラ

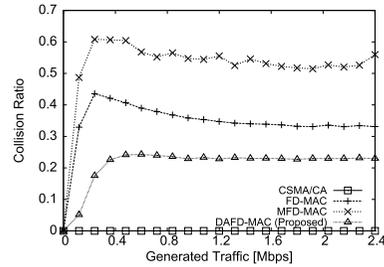


図6 発生トラフィックに対する衝突率  
Fig. 6 Collision ratio vs. generated traffic.

ックを変えた場合の衝突率を評価した。図 6 に、物理層の伝送レートが 2 [Mbit/s]、フロー数が 5 フロー、エリアサイズが 1,500 [m]×1,500 [m]、1 フロー当りの発生トラフィックを 0~2.4 [Mbit/s] に変えた場合の衝突率を示す。横軸は 1 フロー当りの発生トラフィック [Mbit/s]、縦軸は衝突率である。

図 6 より、提案方式 DAFD-MAC は FD-MAC、MFD-MAC と比較して衝突率が低いことが分かる。DAFD-MAC が、2.2 で述べたセカンダリ送信衝突問題を抑制できているからだと考えられる。また、CSMA/CA は四つの MAC プロトコルの中で、衝突率が最も低い。CSMA/CA は、通信ノードペアが RTS/CTS フレームを交換するため、衝突の発生を抑制できるからだと考えられる。

CSMA/CA と同様に DAFD-MAC でも制御フレームを交換するが、DAFD-MAC は CSMA/CA よりも衝突率が高い。CSMA/CA では、制御フレームの衝突が発生して近隣ノードが NAV を設定できない場合に、データフレームも衝突する。具体的には、下記の三つの条件を同時に満たした場合にデータフレームの衝突が発生する。一つ目は、二つのノードが制御フレームを同時に送信することである。二つ目は、二つのノードが同時に送信した制御フレームを二つとも受信可能な位置にノードが存在することである。三つ目は、二つの制御フレームを受信可能な位置にいるノードが送信要求をもっていることである。しかしながら、制御フレームの送信時間は短いため、制御フレームの衝突はほとんど発生しない。

一方で、DAFD-MAC でも、制御フレームの衝突によって近隣ノードが NAV を設定できないことでデータフレームの衝突が発生する。DAFD-MAC と CSMA/CA を比較した場合、次の二つの理由によって DAFD-MAC の方が衝突率が高くなる。一つ目は、

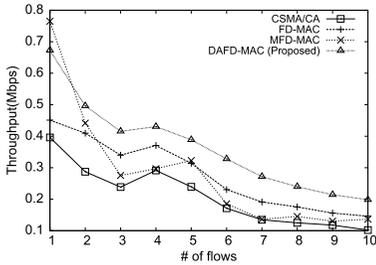


図7 フロー数に対する end-to-end のスループット  
Fig. 7 End-to-end throughput vs. # of flows.

プライマリ送信とセカンダリ送信の二つの送信が存在することにより、DAFD-MACにおける近隣ノードの数の方がCSMA/CAよりも多いことである。二つ目は、CSMA/CAが4-wayハンドシェイクによってNAVを設定するタイミングが2回であるのに対し、DAFD-MACでは5-wayハンドシェイクによってNAVを設定するタイミングが4回存在するため、制御フレームが衝突する機会が多いからである。

#### 4.4 フロー数を変えた場合のスループットの評価

4.2と4.3でフロー数が5の場合を評価した。しかしながら、データフロー数によってフレームの衝突率が変わると考えられる。例えばフロー数が少ない場合は衝突は少なく、フロー数の増加に伴って衝突は多くなると予想される。このような観点から、フロー数を変えた場合のend-to-endスループットを評価した。図7に、物理層の伝送レートが2[Mbit/s]、1フロー当りの発生トラフィックが2[Mbit/s]、エリアサイズが1,200[m]×1,200[m]、フロー数を1~10に変えた場合のend-to-endスループットを示す。横軸はフロー数、縦軸はend-to-endスループット[Mbit/s]である。図7より、フロー数が多い場合、DAFD-MACのスループットが最も高いことが分かる。一方で、フロー数が1の場合、MFD-MACのスループットが最も高い。フロー数が少ない場合、2.2で述べたセカンダリ送信衝突問題が発生しにくいからだと考えられる。

#### 4.5 発生トラフィックを変えた場合の遅延の評価

DAFD-MACでは全二重通信することで時間を有効利用できるため、パケットが送信されてから受信されるまでの時間の短縮がされることが予想される。このような観点から、1フロー当りの発生トラフィックを変えた場合のend-to-endの遅延を評価した。図8に、物理層の伝送レートが2[Mbit/s]、フロー数が5フロー、エリアサイズが1,500[m]×1,500[m]、1フロー当りの

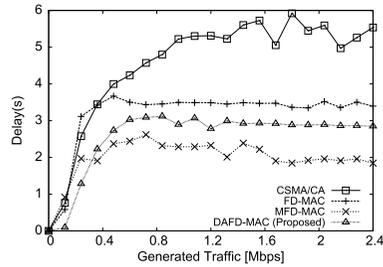


図8 発生トラフィックに対する end-to-end の遅延  
Fig. 8 End-to-end delay vs. generated traffic.

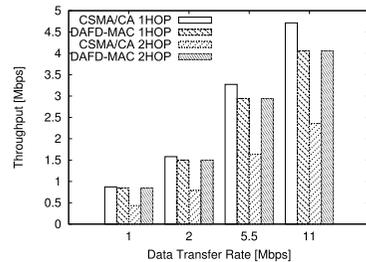


図9 伝送レートに対する end-to-end のスループット  
Fig. 9 End-to-end throughput vs. data transfer rate.

発生トラフィックを0~2.4[Mbit/s]に変えた場合の遅延の評価を示す。横軸は1フロー当りの発生トラフィック[Mbit/s]、縦軸はend-to-endの遅延[s]である。

図8より、MFD-MACは、四つのMACプロトコルの中で最も遅延が小さいことが分かる。MFD-MACをDAFD-MACと比較すると、MFD-MACは5-wayハンドシェイクによるオーバーヘッドがないからだと考えられる。またDAFD-MACは、FD-MACよりも遅延が小さい。DAFD-MACは、2.2で述べたセカンダリ送信衝突問題を抑制できるため、全二重通信する機会が多いことに起因していると考えられる。

#### 4.6 制御フレームのオーバーヘッドの評価

ここまでの評価では、制御フレームとデータフレームの伝送レートを2[Mbit/s]に固定して評価をしていた。しかしながら、現在のIEEE 802.11では、RTS/CTSは最低の伝送レートで送信され、データフレームの伝送レートの方が制御フレームの伝送レートよりも高いことが一般的であるため、制御フレームのオーバーヘッドが大きくなると予想される。特にDAFD-MACでは、5-wayハンドシェイクを用いているため、制御フレームのオーバーヘッドがCSMA/CAの4-wayハンドシェイクよりも大きいと考えられる。このような観点から、制御フレームのオーバーヘッドを算出した。

図9に、1ホップで通信した場合と2ホップで通信

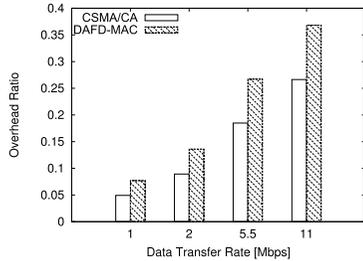


図 10 伝送レートに対するオーバーヘッドの割合  
Fig. 10 Overhead ratio vs. data transfer rate.

した場合の半二重通信である CSMA/CA と全二重通信である DAFD-MAC のスループットを示す。横軸は伝送レート、縦軸は end-to-end スループットである。図 9 から以下の二つのことが分かる。一つ目は、1 ホップでは DAFD-MAC は CSMA/CA より低いスループットであることである。CSMA/CA と比較すると DAFD-MAC は制御フレームのオーバーヘッドが大きいからだと考えられる。二つ目は、2 ホップでは、DAFD-MAC は制御フレームのオーバーヘッドがあるにもかかわらず、伝送レートによらず CSMA/CA より高いスループットを得ていることである。CSMA/CA では中継全二重通信ができないためにスループットが 1 ホップの半分しか得られないのに対し、DAFD-MAC は中継全二重通信によって 1 ホップと同等のスループットが得られるからだと考えられる。

図 10 に、CSMA/CA と DAFD-MAC における制御フレームがオーバーヘッドとなる割合を示す。横軸は伝送レート、縦軸はオーバーヘッドの割合である。図 10 から、次の二つのことが分かる。一つ目は、DAFD-MAC は CSMA/CA よりオーバーヘッドが大きいことである。例えば、伝送レートが 11 [Mbit/s] のときに、CSMA/CA のオーバーヘッドが約 26.6% であるのに対し、DAFD-MAC のオーバーヘッドは約 36.8% である。DAFD-MAC で利用する制御フレームが CSMA/CA で利用する制御フレームよりも数が多いことに起因していると考えられる。二つ目は、伝送レートが高くなるに従ってオーバーヘッドが大きくなることである。制御フレームの伝送レートを 1 [Mbit/s] に固定していることに起因していると考えられる。今後も無線 LAN の伝送レートは高くなり続けることが予想されるため、制御フレーム自体を減らす工夫や、周波数軸を用いたバックオフ [28] を用いるなどしてフレーム送信以外のオーバーヘッドを削減する仕組みが必要であると考

いる。

## 5. 議 論

### 5.1 実際のアンテナを適用した場合の影響に関する議論

4. のシミュレーションによる評価では、送信角度やビーム幅などを理想的に制御可能な指向性アンテナを用いた場合を想定していた。しかしながら、DAFD-MAC を実環境で利用する場合には、アンテナの特性の影響を受けると考えられる。

文献 [29] では、給電素子が中央に 1 本、給電素子の周りに 6 本の無給電素子が円周上に等間隔で配置されている 7 素子タイプの ESPAR (Electrically Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナを試作している。文献 [29] によると、ESPAR アンテナのオムニパターン形成における利得は最大 0.4 [dBi]、セクタパターン形成における利得は 5.4 [dBi]、半値角は 93.7° である。無線 LAN の標準規格である IEEE 802.11b を基準として、波長が 0.125 [m]、最小受信感度が -82 [dBm]、送信電力が 0 [dBm] とした場合、フリスの伝達公式より、無指向性通信での最大到達距離は約 137.3 [m]、指向性通信での最大到達距離は約 434.2 [m] となる。

文献 [30] では、8 素子タイプのフェイズドアレーアンテナである Fidelity Comtech 社の Phocus Array アンテナを利用している [31]。Phocus Array アンテナは、オムニパターン形成では、水平面 360° 全周にビームを形成可能であり、セクタパターン形成では、水平面 45° から 45° 刻みで 360° の 8 方位でビームを形成する。文献 [30] によると、利得は 15 [dBi]、半値角は 45° である。

ESPAR アンテナや、スイッチドビームアンテナを提案方式 DAFD-MAC に利用した場合、NAV を設定する必要のないノードに NAV を設定してしまう可能性がある。例えば、特定方向に送信される DSNV フレームは指向性の利得により、特定方向の電波の到達範囲が広い。ESPAR アンテナを用いた場合を考えると、指向性通信と無指向性通信の電波の最大到達距離は約 300 [m] の差があるため、本来は通信可能なノードの通信が抑制されると予想される。送信電力を制御するなどの電波の到達範囲を制御する方法等を考える必要がある。

また、NAV を設定する必要のあるノードに NAV を設定できない可能性もある。本論文では DSNV フレーム送信時のビーム幅を 240° としているが、実

際のアンテナでは正確な  $240^\circ$  のビームを形成できるとは限らない。例えば、文献 [30] で用いられている Phocus Array アンテナでは  $45^\circ$  刻みでしかビーム幅を制御できないため、 $240^\circ$  に近いビーム幅では  $225^\circ$  か  $270^\circ$  しか選択できない。  $240^\circ$  よりもビーム幅が小さい場合には NAV が設定できないことで衝突が発生すると予想される。

## 5.2 ノードが移動する環境に適用した場合の影響に関する議論

4. のシミュレーションによる評価では、ノードが固定されていることを前提としていた。しかしながら、DAFD-MAC はノードが移動する環境にも適用できる可能性がある。

文献 [32] によると、指向性アンテナを用いた場合、ノードが移動する環境ではノードが移動しない環境に比べて通信が失敗する確率が高くなってスループットが低下する。提案方式 DAFD-MAC をノードが移動する環境に適用した場合でも、プライマリ送信及びセカンダリ送信が失敗してスループットが低下すると予想される。例えば、プライマリ送信とセカンダリ送信が行われているときに、セカンダリ送信の送信元ノードがプライマリ送信の電波の到達範囲外となった場合はプライマリ送信が失敗する。送信が失敗する確率はノードの移動速度及び指向性アンテナのビーム幅によって変わるため、指向性アンテナのビーム幅や送信電力を制御する [32] 等の対策が必要であると考えている。

また、ノードが移動することにより、NAV を設定する範囲の不一致が起こる可能性もある。例えば、制御フレームによって NAV を設定されたノードが NAV の設定範囲外に移動した場合は、本来は通信可能な通信が抑制されてしまう。更に、NAV が設定されている範囲に NAV が設定されていないノードが移動してきた場合は、移動してきたノードの送信によって衝突が発生する可能性も考えられる。ノードの移動に合わせた NAV の設定などの対策が必要であると考えている。

## 5.3 制御フレームの損失に関する議論

DAFD-MAC では、他の通信システムからの干渉がある環境や、伝搬損が大きい環境では、制御フレームが損失する場合が考えられる。DAFD-MAC における制御フレームは衝突を回避するために用いているため、制御フレームが損失しやすい環境では衝突が多発し、性能が低下することが予想される。

RTS フレームが損失した場合、一般的な IEEE

802.11 の CSMA/CA と同様に RTS フレームを再送するため、損失による影響は小さい。RTS フレームを送信したノードがキャリアセンスをして、キャリアが存在しない場合はランダムバックオフした後、RTS フレームを再送する。

一方で、RCTS フレームが損失した場合、再送しないので衝突率が増加すると考えられる。RCTS フレームが損失すると、セカンダリ送信の宛先ノードがセカンダリ送信の宛先に選択されたことを認識できないため、DSNAV フレームを送信しない。DSNAV フレームはセカンダリ送信の宛先ノードの近隣ノードに対して NAV を設定する役割を担っているため、DSNAV フレームが送信されないことで衝突が発生する可能性がある。また、RCTS フレームは近隣ノードに NAV を設定する役割も担っているため、セカンダリ送信の送信元ノードの近隣ノードに NAV が設定されないことによる衝突も発生する可能性がある。

SNAV フレームと DSNAV フレームが損失した場合にも再送しない。SNAV フレームと DSNAV フレームが損失すると、SNAV フレームと DSNAV フレームを送信したそれぞれのノードの近隣ノードに NAV が設定されないため、データフレームの衝突が発生する可能性がある。

## 6. む す び

本論文では、マルチホップ環境に全二重通信を適用した場合に生じるセカンダリ送信衝突問題を、指向性アンテナを利用して抑制する DAFD-MAC を提案した。DAFD-MAC を計算機シミュレーションで評価した結果、ランダムにノードを配置したマルチホップ環境で、セカンダリ送信衝突問題の抑制により、既存の CSMA/CA, FD-MAC+, MFD-MAC と比較してスループットが向上することが分かった。

謝辞 5.1 の議論において貴重な助言を頂いた通菱テクニカ株式会社・木崎一廣氏、三菱電機株式会社先端技術総合研究所・渡辺正浩氏に感謝致します。

## 文 献

- [1] 総務省, 平成 24 年版 情報通信白書 第 2 章「スマート革命」が促す ICT 産業・社会の変革, ぎょうせい, 2012.
- [2] Quellan Inc. <http://www.intersil.com/products/deviceinfo.asp?pn=QH220>.
- [3] B. Radunovic, D. Gunawardena, P. Key, and A. Proutiere, "Rethinking indoor wireless mesh design: Low power, low frequency, full-duplex," Proc. 4th IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks

- (WiMesh'10), pp.1–6, 2010.
- [4] J.I. Choi, M. Jainy, K. Srinivasany, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," Proc. 16th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'10), pp.1–12, 2010.
- [5] A. Sahai, G. Patel, and A. Sabharwal, "Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation," Technical Report, Rice University TREE1104, Aug. 2011.
- [6] M. Jainy, 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. 17th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11), pp.301–312, 2011.
- [7] E. Everett, M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Empowering full-duplex wireless communication by exploiting directional diversity," Proc. 45th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (ACSSC'11), pp.2002–2006, 2011.
- [8] M. Duarte and A. Sabharwal, "Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results," Proc. 44th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Components (ACSSC'10), pp.1558–1562, 2010.
- [9] C. Perkins and P. Bhagwat, "Routing over multi-hop wireless network of mobile computers," Mobile Computing, vol.353, chapter 3, pp.183–205, 1996.
- [10] R. Ramanathan and R.R. Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," Proc. 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00), pp.404–413, 2010.
- [11] K. Tamaki, A. Raptino, Y. Sugiyama, M. Bandai, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Fundamental evaluation of full-duplex communication in multi-hop networks," Proc. 11th International Conference on Global Research and Education (iA'12), pp.395–404, 2012.
- [12] 玉置健太, A. Rapino, 杉山佑介, 萬代雅希, 猿渡俊介, 渡辺 尚, "マルチホップ無線線二重通信における衝突回避手法," 2012 信学ソ大 (通信), B-20-5, Sept. 2012.
- [13] R.R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N.H. Vaidya, "Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks," Proc. 8th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'02), pp.23–28, 2002.
- [14] S. Gollakota and D. Katabi, "ZigZag decoding: Combating hidden terminals in wireless networks," Proc. Conference on ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'08), pp.159–170, 2008.
- [15] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhan, "Imperfect full duplex spectrum sensing in cognitive radio networks," Proc. 3rd ACM Workshop on Cognitive Radio Networks (CoRoNet'11), pp.1–6, 2011.
- [16] Rice University WARP Project. <http://warp.rice.edu>.
- [17] T.S. Ho and K.C. Chen, "Performance analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA medium access control protocol," Proc. 7th IEEE International Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'96), pp.407–411, 1996.
- [18] R. Ramanathan, "On the performance of ad hoc network with beamforming antennas," Proc. 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'01), pp.95–105, 2001.
- [19] Y.B. Ko, V. Shankarkumar, and N.H. Vaidya, "Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks," Proc. 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00), pp.13–21, 2000.
- [20] T. Korakis, G. Jakllari, and L. Tassiulas, "A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks," Proc. 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'03), pp.98–107, 2003.
- [21] A. Spyropoulos, "Capacity bounds for ad-hoc networks using directional antennas," Proc. IEEE International Communications Conference (ICC'03), pp.348–352, 2003.
- [22] R.R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N.H. Vaidya, "On designing MAC protocols for wireless networks using directional antennas," IEEE Trans. Mobile Computing, vol.5, no.5, pp.477–491, 2006.
- [23] H. Dai, K.W. Ng, and M.Y. Wu, "An overview of MAC protocols with directional antennas in wireless ad hoc networks," Proc. International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology (ICCGI'06), pp.477–491, 2006.
- [24] K. Miura and M. Bandai, "Node architecture and MAC protocol for full duplex wireless and directional antennas," Proc. 23th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'12), pp.385–390, 2012.
- [25] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," Proc. 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'03), pp.1734–1743, 2003.
- [26] B.P. Crow, I. Widjaja, J.G. Kim, and P.T. Sakai, "IEEE 802.11 wireless local area networks," IEEE Commun. Mag., vol.35, no.9, pp.116–126, 1997.
- [27] D.B. Johnson and D.A. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," Mobile Computing, pp.153–181, 1996.
- [28] S. Sen, R.R. Choudhury, and S. Nelakuditi, "No time to countdown: Migrating backoff to the frequency domain," Proc. 17th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11), pp.241–252, 2011.

- [29] 橋口正哉, 俊 程, 飯草恭一, T. Eddy, 平田明史, 大平孝, “無線アドホックネットワーク用エスパアンテナの設計と試作,” 信学論 (B), vol.J85-B, no.12, pp.2245-2256, Dec. 2002.
- [30] M. Blanco, R. Kokku, K. Ramachandran, S. Rangarajan, and K. Sundaresan, On the Effectiveness of Switched Beam Antennas in Indoor Environments, vol.4979, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [31] Phocus Array Antenna by Fidelity Comtech. <http://www.fidelity-comtech.com/>
- [32] 青木勇太, 萬代雅希, 渡辺 尚, “アドホックネットワークにおけるスマートアンテナの適応制御方式について,” 信学技報, AN2011-56, 2012.

## 付 録

### 指向性アンテナによる DSNNAV フレーム送信時のビーム幅

3.1 で述べたように、セカンダリ送信の宛先ノードが DSNNAV フレームを送るときのビーム幅は  $\frac{4\pi}{3}$  [rad] である。ビーム幅を  $\frac{4\pi}{3}$  [rad] にすれば、セカンダリ送信の送信元ノードの送信電波の到達範囲を除いた、セカンダリ送信の宛先ノードの送信電波の到達範囲に存在する全てのノードに DSNNAV フレームを通知して、通信を延期することができる。

図 A.1 に、DSNNAV フレーム送信時のビーム幅を示す。セカンダリ送信の送信元ノード  $S_{2nd}$  の近隣ノードは、SNAV フレームによって既に NAV が設定されている。しかしながら、セカンダリ送信の送信元ノード  $S_{2nd}$  の通信範囲外かつセカンダリ送信の宛先ノード  $D_{2nd}$  の近隣ノードには NAV が設定されていないため通信を開始する可能性があり、ノード  $D_{2nd}$  はノード  $S_{2nd}$  の送信とノード  $D_{2nd}$  の近隣ノードの送信の干渉によりフレームを受信できない可能性がある。干渉を避けるために、ノード  $D_{2nd}$  の近隣ノードの通信を抑制する必要がある。セカンダリ送信の送信元ノード  $S_{2nd}$  とセカンダリ送信の宛先ノード  $D_{2nd}$  の

距離が最も離れている場合に、ノード  $D_{2nd}$  の NAV が設定されていない近隣ノードの数が最大となるため、ノード  $S_{2nd}$  とノード  $D_{2nd}$  の間の距離が最も離れている場合を基準として、ノード  $D_{2nd}$  が DSNNAV フレームを通知する際のビーム幅を求める。ノード  $S_{2nd}$  が NAV を設定できない範囲に存在するノード  $D_{2nd}$  の全ての近隣ノードに NAV を通知可能なビーム幅  $\theta$  [rad] は次式で表される。

$$\theta = 2\pi - 2\phi \tag{A.1}$$

ここで、角度  $\phi$  [rad] は図 A.1 に示す一辺の長さが  $d$ 、等しい二辺の長さが  $r$  である二等辺三角形の角度である。セカンダリ送信の送信元ノード  $S_{2nd}$  とセカンダリ送信の宛先ノード  $D_{2nd}$  の距離の値域は次式で表される。

$$0 \leq d \leq r \tag{A.2}$$

$r$  は各ノードの通信距離、 $d$  はセカンダリ送信の送信元ノード  $S_{2nd}$  とセカンダリ送信の宛先ノード  $D_{2nd}$  との距離である。図 A.1 に示す、一辺の長さが  $d$ 、等しい二辺の長さが  $r$  である二等辺三角形の角度  $\phi$  [rad] は三角形の内角の和より次式で表される。

$$\phi = \pi - \frac{\pi}{2} - \alpha \tag{A.3}$$

$$= \frac{\pi}{2} - \alpha \tag{A.4}$$

二等辺三角形の底辺  $d$  の中点から垂直に補助線を引いてきた二等辺三角形の角度  $\alpha$  [rad] は次式で表される。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\frac{d}{2}}{r}\right) \tag{A.5}$$

$$= \arcsin\left(\frac{d}{2r}\right) \tag{A.6}$$

式 (A.6) を式 (A.3) に代入すると、

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{d}{2r}\right) \tag{A.7}$$

となる。式 (A.2) と式 (A.7) から、角度  $\phi$  [rad] について次の値域が得られる。

$$\frac{\pi}{3} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}.$$

ここで、 $d = r$  のときに、

$$\phi = \frac{\pi}{3} \tag{A.8}$$

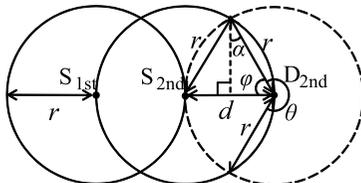


図 A.1 DSNNAV フレーム送信時のビーム幅  
Fig.A.1 Beam angle when transmitting a DSNNAV frame.

となり，角度 $\phi$  [rad] は最小となる．式 (A-8) を式 (A-1) に代入すると，

$$\theta = \frac{4\pi}{3}$$

となり，ビーム幅 $\theta$  [rad] が最大となる．

(平成 24 年 10 月 30 日受付，25 年 2 月 20 日再受付)



杉山 佑介

現在，静岡大学情報学部所属．ワイヤレスネットワークについての研究に従事．2012 情報処理学会 MBL 研究会奨励発表賞．情報処理学会会員．



玉置 健太

2011 静岡大・情報卒．現在，同大大学院情報学研究科所属．ワイヤレスネットワークについての研究に従事．情報処理学会会員．



猿渡 俊介 (正員)

2007 東京大学大学院博士課程了．2003～2004 IPA 未踏ソフトウェア創造事業，2006～2008 日本学術振興会学振特別研究員，2007～2008 イリノイ大学客員研究員，2008～2012 東京大学先端科学技術研究センター助教，現在，静岡大学情報学部助教．専門はワイヤレスネットワーク，センサネットワーク，システムソフトウェア等．2009 本会論文賞，2010 情報処理学会山下記念研究賞．情報処理学会，IEEE，ACM 各会員．



渡辺 尚 (正員)

1982 阪大・工・通信卒．1989 同大大学院博士前期課程了．1987 同大学院博士後期課程了．工博．同年徳島大学工学部情報工学科助手．1990 静岡大学工学部情報知識工学科助教授．1996 同大情報学部情報科学科教授．2006 同大創造科学技術大学院教授．2013 大阪大学情報科学研究科教授．1995 文部省在外研究員(カリフォルニア大学アーバイン校)．計算機ネットワーク，分散システムに関する研究に従事．2013 より本会知的環境とセンサネットワーク研究会副委員長，2011 より情報処理学会理事．訳書「計算機設計技法」，「802.11 無線ネットワーク管理」など．IEEE 会員．