

マルチホップ無線全二重通信における 指向性アンテナを用いた衝突回避手法の提案と評価

杉山 佑介^{1,a)} 玉置 健太^{2,b)} 猿渡 俊介^{2,c)} 渡辺 尚^{2,d)}

概要: 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。本稿では、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 Antenna Full Duplex Media Access Control) について述べる。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送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る end-to-end のスループットの評価により、提案手法 DAFD-MAC は、既存手法である CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), FD-MAC (Full Duplex MAC), MFD-MAC (Multi-hop Full Duplex MAC) と比較してスループットが高いことを示す。

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

Design and Evaluation of Collision Avoidance with Directional Antenna for Wireless Multi Hop and Full Duplex Communication

Abstract:

Wireless multi-hop full duplex networks make efficient use of time to increase the opportunity to transmit data frames simultaneously. However, the throughput will decrease due to the network secondary transmission collision problem which increases interference on primary and secondary node to overlap the transmission area between them. This paper proposes DAFD-MAC (Directional Antenna Full Duplex Media Access Control). To avoid the interference on primary and secondary node, DAFD-MAC receives the data frames while sending NAV (Network Allocation Vector) frames using the directional antenna at the same time. The evaluation using computer simulation shows that proposed DAFD-MAC achieves more throughput than CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance), FD-MAC (Full Duplex MAC) and MFD-MAC (Multi-hop Full Duplex MAC) by avoiding secondary transmission collision problem under high transmission flow.

Keywords: Full Duplex, Directional Antenna, Multi-hop, Ad-hoc Network

1. はじめに

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

¹ 静岡大学情報学部情報科学
Graduate School of Informatics, Shizuoka University, Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 3-5-1, Japan
² 静岡大学大学院情報学研究科
Faculty of Informatics, Shizuoka University, Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 3-5-1, Japan
a) sugiyama@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp
b) tamaki@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp
c) saru@inf.shizuoka.ac.jp
d) watanabe@inf.shizuoka.ac.jp

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リレーするため、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、1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。

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通信をセカンダリ送信と呼び区別する [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範囲が重なることで、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、本稿では、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 プロトコルである「DAFD-MAC (Directional Antenna 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、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は、通信を検知することができないがゆえにデフネス問題が発生する [13]。そこで 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。このような NAV の通知方法を用いることで、セカンダリ送信衝突問題を抑制することができる。シミュレーションによる評価の結果、DAFD-MAC は既存手法より衝突率が減り、高いスループットを発揮することがわかった。

本稿の構成は以下のとおりである。2節では、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、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により、セカンダリ送信衝突問題が発生することを示す。3節では、セカンダリ送信衝突問題を解決するための提案手法である DAFD-MAC について述べる。4節では、計算機シミュレーションにより、既存手法である CSMA/CA, FD-MAC [6], MFD-MAC [11] と提案手法である DAFD-MAC を比較する。最後に5節でまとめる。

2. 関連研究

無線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、時間軸と空間軸で無線通信資源を有効利用す

ることができると考えられる。

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を可能な通信である。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。自己干渉除去技術の発達により、全二重通信が可能となりつつある [2-8,14,15]。例えば、WARP V2 プラットフォーム [16] の 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、アクセスポイントとノード間で無線全二重通信する FD-MAC (Full Duplex Media Access Control) プロトコルも開発されている [5,6]。

単一ノードが大電力でカバーするエリアを、マルチホップネットワークは中継ノードを利用することで小電力でカバーできる。そのため、空間利用効率のよい無線通信が実現できる [9,10]。各ノードが自律分散的に動作するため、高度道路交通システム (Intelligent Transport System) [17,18] や、アドホックネットワーク [19-21] に適用した場合の効果も期待されている。最近では、自律分散的な処理が災害時に強い性質から災害時での効果も期待されている [22]。一方で、自律分散的な動きをするためにフレームの衝突が発生しやすく、MAC プロトコルによる制御が重要である [20,21]。データ中継のオーバーヘッドによるデータ配信の遅延の発生など時間利用効率が低下する問題もある。

マルチホップネットワークにおける時間利用効率が低いという問題を解決するために、無線全二重無線通信をマルチホップネットワークに適用する試みがなされている [11]。文献 [11] では、無線全二重通信をマルチホップ環境に適用させた MAC プロトコルとして、MFD-MAC (Multi-hop Full Duplex MAC) が提案されている。FD-MAC が、2つのノード間での無線全二重通信しか実現できないのに対し、MFD-MAC によれば、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。

2.2 セカンダリ送信衝突問題

マルチホップネットワークに全二重無線通信を適用させた場合、セカンダリ送信による衝突が発生し、性能が低下するセカンダリ送信衝突問題が発生する。図 1 に、セカンダリ送信衝突問題の3つのケースを示す。1つ目は、図 1 (a) のように、自ペアのプライマリ送信とセカンダリ送信の範囲が重なっている位置に受信ノードが存在するケースである。2つ目は、図 1 (b) のように、セカンダリ送信と他ペアのプライマリ送信の範囲が重なっている位置に受信ノードが存在するケースである。3つ目は、図 1 (c) のよ

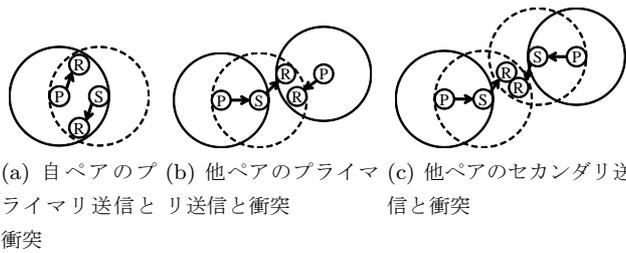


図 1 セカンダリ送信衝突問題の 3 つのケース

Fig. 1 Three cases of Secondary Transmission Collision Problem

うに、セカンダリ送信と他ペアのセカンダリ送信の範囲が重なっている位置に受信ノードが存在するケースである。

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 [23] 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。

本来実行されるべきセカンダリ送信が延期されてしまう問題は、プライマリ CTS フレームを送信するプライマリ送信の宛先ノードの通信範囲にセカンダリ送信の宛先がいる場合に発生する。本来実行されるべきセカンダリ送信が延期されてしまう問題を解決するために、タイマを使った制御が考えられる。プライマリ CTS フレームを受信したノードは、セカンダリ CTS フレームの送信終了時間をタイマとし設定する。タイマを設定したノードが、一定時間内にタイマを設定したノードを宛先としたセカンダリ RTS フレームを受信した場合、セカンダリ CTS フレームを送信する。反対に、タイマを設定したノードが、一定時間内にタイマを設定したノードを宛先としたセカンダリ RTS フレームを受信しなかった場合、プライマリ送信とセカンダリ送信が終了するまで NAV を設定する。このようにタイマを使った制御をすることにより、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問題を解決できる。しかしながら、プライマリ送信の送信元ノード、セカンダリ送信の送信元ノード、セカンダリ送信の宛先ノードの送信範囲が重なっている場合には、RTS/CTS フレームを用いることで衝突を防ぐことができたとしても、全二重通信する機会は増えないため、時間の有効利用はできない。

衝突を回避する方法として、指向性通信を利用する方法

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, 24–26, 32]。そのため、送信範囲が重複する可能性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, 27, 28] の代表例として DMAC (Directional MAC) [13, 27] 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が送信タイミングを検出できず、送信元ノードに対して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 [29] が挙げられる。しかしながら、文献 [29] では、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り、デフネス問題にも対応していない。

3. DAFD-MAC (Directional Antenna Full Duplex MAC)

2 節での議論を基に、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 Antenna Full Duplex MAC)」を設計した。

3.1 DAFD-MAC の概要

DAFD-MAC では、まず、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ることでセカンダリ送信衝突問題を抑制する。また、セカンダリ送信の宛先ノードによる通信中のノードと反対方向に NAV (Network Allocation Vector) を通知する 5-way ハンドシェイクを提供することで、指向性アンテナを用いた場合に発生するデフネス問題を解決する。なお、5-way ハンドシェイクで用いる RTS (Request To Send) フレーム、RCTS (Request and Clear To Send) フレーム、SNAV (Set Network Allocation Vector) フレーム、DSNAV (Directional Set Network Allocation Vector) フレーム、ACK フレームに関しては 3.2 節で詳細に述べる。

図 2 を例に、DAFD-MAC によってセカンダリ送信衝突問題が解決していることを示す。送信を実線矢印で表し、フローを破線矢印で表す。図 2 (a) は、既存の MFD-MAC [11] において、衝突が発生している例である。プライマリ送信の送信元ノード P と、セカンダリ送信の送信元ノード S と、セカンダリ送信の宛先ノード D が同じ通信範囲に存在するため衝突が発生し、セカンダリ送信の宛先

ノード D はデータを受信することができない。また、図 2 (a) は、ノード D において、ノード O_D からのフレームによる衝突も発生する。

それに対して、DAFD-MAC では、図 2 (b) のように、ノード P からノード S へのプライマリ送信と、ノード S からノード D 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衝突を回避する。また、ノード D は指向性アンテナを用いて自ノードが受信している以外の方向に対して DSNNAV フレームを送信することで、ノード O_D に対して NAV を設定し、ノード O_D によるフレームの送信を延期する。

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持つノードは CSMA/CA に基づき動作し、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、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。
- (3) RCTS フレームの宛先は 2 つあり、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。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、DSNAV フレームをプライマリ送信とセカンダリ送信と同じタイミングで送信するために、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するまで待機する。
- (4) プライマリ送信の送信元ノードは、SNAV フレームの送信が終了したらプライマリ送信を開始する。SNAV フレームを受信したセカンダリ送信の送信元ノードはプライマリ送信と同じタイミングでセカンダリ送信を開始する。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し、プライマリ送信とセカンダリ送信による送信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 SNAV フレーム

の送信が終了したら、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。DSNAV 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 240° で送信する。ビーム幅の詳細に関しては 3.3 節で述べる。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。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する [25, 30]。

- (5) プライマリ送信とセカンダリ送信が共に終了すると、ACK を指向性アンテナを用いて指向性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 節に示したように、DAFD-MAC では 5-way ハンドシェイクによりセカンダリ送信衝突問題を抑制しつつ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 5 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。RTS フレームを受け取った近隣ノードは、NAV を設定して送信を延期する。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 フレームが応答されない場合に近隣ノードに設定する NAV 期間を最小にするために、RTS フレームに含める NAV 期間は、SNAV フレームを送信終了するまでの時間とする。

RCTS フレームは、プライマリ送信の RTS フレームに応答するための CTS フレームと、セカンダリ送信の宛先ノードへの RTS フレームの 2 つの役割を持つフレームである。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の終了時間を比較し、遅い終了時間を NAV 期間に設定して RCTS フレームに含めて送信する。

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に対して NAV を設定して送信を延期させる役割を持つフレームである。全二重通信に参加するノードは、近隣ノードに対して、適切な NAV を設定する。そのために、プライマリ送信とセカンダリ送信の終了時間を比べる必要がある。しかしながら、セカンダリ送信の送信元ノードのフレーム送信が終了する時間が、RCTS フレーム送信時点ではわからないため、RCTS フレーム送信後に、送信終了時間を比較して、再通知する必要がある。そこでプライマリ送信の送信元ノードは RCTS フレーム受信後、再通知のために SNAV フレームを送信する。SNAV フレームを受け取った近隣ノードは、NAV を更新して送信を延期する。DSNAV フレームは、セカンダリ送信の宛先ノードの近

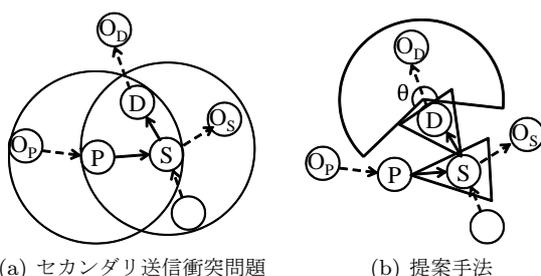


図 2 指向性アンテナを用いたデータ送信による衝突回避

Fig. 2 Collision Avoidance with Directional Antenna Data Transmission

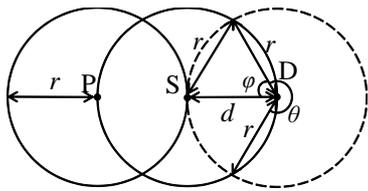


図 3 指向性アンテナによる NAV 設定時のビーム幅

Fig. 3 The Beam width using directional antenna to set NAV

隣ノードの NAV を設定して通信を延期させる役割を持つフレームである。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、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 DSNNAV 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がデータを受信できた場合に、応答として送信される。

3.3 指向性アンテナによる DSNNAV フレーム送信時のビーム幅

セカンダリ送信の宛先ノードが、DSNNAV フレームを送る時のビーム幅は 240° である。ビーム幅を 240° にすれば、プライマリ通信ペアとセカンダリ通信ペアの通信範囲に存在する近隣ノードすべてに NAV を設定することができる。

図 3 に、ビーム幅を 240° で NAV を通知していない範囲に DSNNAV フレームを送信できることを示す。図 3 において、点 P はプライマリ送信の送信元ノード、点 S はセカンダリ送信の送信元ノード、点 D はセカンダリ送信の宛先ノードとする。各ノードの通信距離は r とし、セカンダリ送信の送信元ノード S とセカンダリ送信の宛先ノード D との距離は d ($0 \leq d \leq r$) とする。 d を底辺とし、二辺の長さを r とした二等辺三角形の角度 ϕ は次の式で表わされる。

$$\phi = 90^\circ - \left(\sin\left(\frac{d}{2r}\right) \frac{180}{\pi} \right)^\circ$$

ϕ の取りうる範囲は、 $0 \leq d \leq r$ より、 $60^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ となる。 $d = r$ の時に $\phi = 60^\circ$ と最も小さい角度となる。ビーム幅 θ は $\theta = 360^\circ - 2\phi$ より、 $\phi = 60^\circ$ の時に $\theta = 240^\circ$ となって最大になる。セカンダ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距離が r の場合に、最も広いビーム幅で DSNNAV フレームを送信する必要がある。すなわち、 $\theta = 240^\circ$ とすればセカンダリ送信の宛先の通信範囲に存在するノードに NAV を設定できる。

3.4 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 P、セカンダリ送信の送信元ノードをノード S、セカンダリ送信の宛先ノードをノード D、

ノード P と通信可能なノードをノード O_P 、ノード S と通信可能なノードをノード O_S 、ノード D と通信可能なノードを O_D とする。

(1) RTS フレームの送信

プライマリ送信の送信元ノード P は RTS フレームを無指向性で送信し、近隣ノードの送信を延期する。RTS フレーム受信ノードであるノード O_P とノード D は、図 4 の SNAV フレーム送信終了時間まで NAV を設定する。

(2) RCTS フレームの送信

RTS フレームの宛先に指定されたノード S 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 は、SIFS (Short Interframe Space) [31] 時間後に RCTS フレームを送信する。このとき、RCTS フレームは NAV 期間を含んでいる。RCTS フレームを受信した近隣ノード O_S は、プライマリ送信とセカンダリ送信で終了時間の遅い方を基準として NAV 期間を決定する。図 4 では、プライマリ送信の送信元ノード P の DATA サイズよりも、セカンダリ送信の送信元ノード S の DATA サイズの方が大きい。よって、NAV 期間は、セカンダリ送信の期間となる。

(3) SNAV フレームの送信

RCTS フレームを受信したプライマリ送信の送信元ノード P は、SIFS 時間後に近隣ノード O_P に SNAV フレームを送信する。ノード P は、プライマリ送信とセカンダリ送信で終了時間の遅い方を基準として NAV 期間を決定し、SNAV フレームに設定する。

(4) プライマリ送信、セカンダリ送信と DSNNAV フレームの送信

ノード P は SNAV フレームを送信してから SIFS 時間後、ノード S は、SNAV フレームを受信してから SFIS 時間後、それぞれの宛先に対して指向性を向けて DATA フレームをセカンダリ送信、プライマリ送信する。このとき、セカンダリ送信の宛先ノード D 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 O_D に対して指向性を向け、NAV 期間を通知するためのフレームである DSNNAV フレームを送信する。

(5) ACK フレーム交換

DATA フレームを受信したノード S とノード D 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両方が終了してから SIFS 時間後、宛先に対して指向性を向けて同時に ACK フレームを送信する。

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

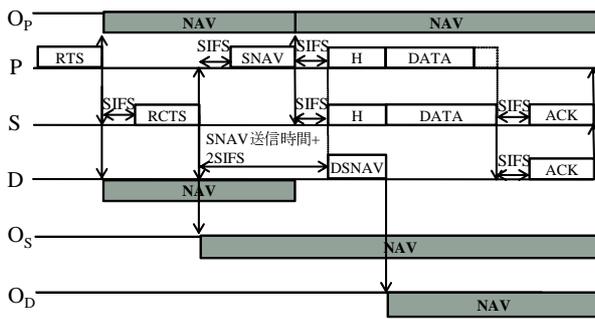


図 4 DAFD-MAC タイムチャート
Fig. 4 DAFD-MAC time chart

レーションにより単位時間当たりのデータ到達量である end-to-end のスループットの計測，データ送信時に衝突した割合である衝突率を測定した．DAFD-MAC の性能を相対的に評価するために次の 4 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手法である．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，通信ペアの近隣ノードによる衝突が発生しにくい．そのため，衝突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して利用する．

(2) FD-MAC

FD-MAC [6] は，プライマリ送信の送信元ノードとプライマリ送信の送信元ノードがお互いを宛先に指定した場合に全二重通信する手法である．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が互いを宛先にするフローの発生が少いため，全二重通信する機会が限定されてスループットが低くなると予想される．

(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，プライマリ送信する手法である．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 節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との比較対象である．

(4) DAFD-MAC

DAFD-MAC は，3 節で述べた提案手法である．セカンダリ送信衝突問題を指向性アンテナと隠れ端末制御フレームを用いて抑制するため，衝突率は低くなり，スループットが向上すると予想される．データと ACK の送受信で利用するビーム幅は 30° の固定ビ-

ーム幅とした．ここでのビーム幅 30° 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．ビーム幅は干渉を与える影響を考慮して決定すべきであり [32]，今後の課題である．

表 1 に，共通のシミュレーションパラメータを示す．物理層の送信レートは 2 [Mbps]，通信距離は 250 [m]，フレームサイズは 1,500 [bytes]，ノード数は 100，シミュレーション時間は 300 [sec] とした．全ての評価で 10 個のランダムネットワークを作成し，10 回の平均を計測値とした．

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation Parameter

| | |
|-----------------|-------------|
| Physical Rate | 2 Mbps |
| Radio Range | 250 m |
| Packet Size | 1,500 bytes |
| Number of Nodes | 100 |
| Simulation Time | 300 sec |

4.2 送信レートを変えた場合のスループットの評価

DAFD-MAC において 2.2 節で述べたセカンダリ送信衝突問題が抑制されて，スループットが向上しているかどうかを確認するために，送信レートを変えた場合の end-to-end のスループットを評価した．図 5 に，フロー数は 5 フロー，エリアサイズは $1,500 \times 1,500$ [m]，送信レートを 0~2.4 [Mbps] に変えた場合の end-to-end のスループットを示す．横軸は送信レート [Mbps]，縦軸は end-to-end のスループット [Mbps] である．図 5 から次の 3 つのことがわかる．

- (1) 提案手法 DAFD-MAC は 4 つの MAC プロトコルの中で最もスループットが高い．DAFD-MAC は CSMA/CA と比較すると全二重通信する機会がある．FD-MAC と比較すると全二重通信する機会が発生しやすい．MFD-MAC と比較すると 2.2 節で述べたセカンダリ送信による衝突が発生しないからであると考えられる．
- (2) MFD-MAC では，送信レートがある一定以上になるとスループットが低下する．MFD-MAC は，ネットワークが高負荷時に，2.2 節で述べたセカンダリ送信衝突問題が発生しやすくなるからだと考えられる．
- (3) CSMA/CA は，4 つの MAC プロトコルの中で最もスループットが低い．CSMA/CA は全二重通信しないからだと考えられる．

4.3 送信レート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が抑制できているかどうかを検証するために，送信レートを変えた場合のデータ送信における衝突率を評価した．図 6 に，フ

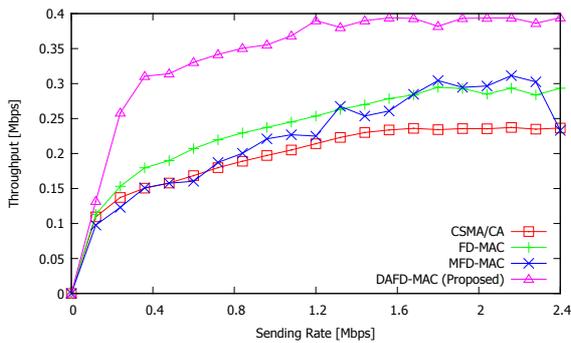


図 5 End-to-end のスループット (エリアサイズ : 1,500 × 1,500 [m], 送信フロー数 : 5)

Fig. 5 End-to-end Throughput (area size: 1,500 × 1,500 [m], # of flows: 5)

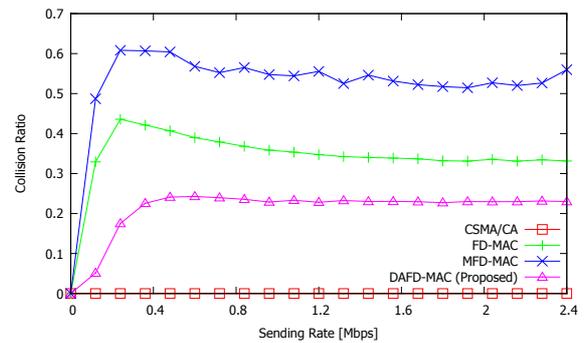


図 6 衝突率 (エリアサイズ : 1,500 × 1,500 [m], 送信フロー数 : 5)

Fig. 6 Collision Ratio (area size: 1,500 × 1,500 [m], # of flows: 5)

ロー数は 5 フロー, エリアサイズは 1,500 × 1,500 [m], 送信レートを 0~2.4 [Mbps] に変えた場合の衝突率を示す。横軸は送信レート [Mbps], 縦軸は衝突率である。図 6 から次の 4 つのことがわかる。

- (1) 提案手法 DAFD-MAC は FD-MAC, MFD-MAC と比較して衝突率が低い。DAFD-MAC は, 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し, 5-way ハンドシェイクにより近隣ノードの通信を延期する。そのため, 2.2 節で述べたセカンダリ送信衝突問題に対して有効であると考えられる。
- (2) CSMA/CA は 4 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。
- (3) MFD-MAC は 4 つの MAC プロトコルの中で, 衝突率が最も高い。MFD-MAC は, 2.2 節で述べたセカンダリ送信衝突問題を考慮して設計されていないからだと考えられる。
- (4) FD-MAC は MFD-MAC と比較して衝突率が低い。FD-MAC 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でお互いを宛先にする場合のみ全二重通信が発生する。しかしながら, セカンダリ送信の送信元ノードが, プライマリ送信の送信元ノードを宛先にしたフレームを持っていない場合はセカンダリ送信は発生しない。そのため, 2.2 節で述べた全二重通信衝突問題が発生しにくいと考えられる。

5. おわりに

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, 既存手法 MFD-MAC よりフレームの衝突率が

低くなることがわかった。また, マルチホップ環境において, 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わかった。

参考文献

- [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。
- [2] Quellan Inc.: QHX220 Active Isolation Enhancer and Interference Canceller. <http://www.intersil.com/products/deviceinfo.asp?pn=QHX220>.
- [3] Radunovic, B., Gunawardena, D., Key, P. and Proutiere, A.: Rethinking Indoor Wireless Mesh Design: Low Power, Low Frequency, Full-duplex, *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh'10)*, pp. 1-6 (2010).
- [4] Choi, J. I., Jainy, M., Srinivasany, K., Levis, P. and Katti, S.: Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication, *Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'10)*, pp. 1-12 (2010).
- [5] Sahai, A., Patel, G. and Sabharwal, A.: Pushing the Limits of Full-duplex: Design and Real-time Implementation, Technical Report, Rice University TREE1104 (2011).
- [6] Jainy, M., Choi, J. I., Kim, T. M., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S. and Sinha, P.: Practical, Real-time, Full Duplex Wireless, *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'11)*, pp. 301-312 (2011).
- [7] Everett, E., Duarte, M., Dick, C. and Sabharwal, A.: Empowering Full-duplex Wireless Communication by Exploiting Directional Diversity, *Proceedings of 45th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (ACSSC'11)*, pp. 2002-2006 (2011).
- [8] Duarte, M. and Sabharwal, A.: Full-duplex Wireless Communications Using Off-the-shelf Radios: Feasibility and First Results, *Proceedings of 44th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Components (ACSSC'10)*, pp. 1558-1562 (2010).
- [9] Perkins, C. and Bhagwat, P.: Routing Over Multi-Hop Wireless Network of Mobile Computers, *Mobile Computing*, Vol. 353, Springer US, Chapter 3, pp. 183-205 (1996).
- [10] Ramanathan, R. and Rosales Hain, R.: Topology Con-

- trol of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment, *Proceedings of 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00)*, pp. 404–413 (2010).
- [11] Raptino, A., Tamaki, K., Sugiyama, Y., Bandai, M., Saruwatari, S., Watanabe, T.: Full Duplex Media Access Control by Monitoring Traffic on Adjacent Nodes for Wireless Multi-hop Networks, *IEICE Society Conference* (2012).
- [12] 玉置健太, Rapino, A., 杉山佑介, 萬代雅希, 猿渡俊介, 渡辺 尚: マルチホップ無線全二重通信における衝突回避手法, 電子情報通信学会ソサイエティ大会'12.
- [13] Choudhury, R. R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N. H.: Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks, *Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'02)*, pp. 23–28 (2002).
- [14] Gollakota, S. and Katabi, D.: ZigZag Decoding: Combating Hidden Terminals in Wireless Networks, *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication 2008 Conference on Data Communication (SIGCOMM'08)*, pp. 159–170 (2008).
- [15] Cheng, W., Zhang, X. and Zhan, H.: Imperfect Full Duplex Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks, *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Cognitive Radio Networks (CoRoNet'11)*, pp. 1–6 (2011).
- [16] Rice University WARP Project: <http://warp.rice.edu>.
- [17] Zhu, J. and Roy, S.: MAC for Dedicated Short Range Communications in Intelligent Transport System, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 41, No. 12, pp. 60–67 (2003).
- [18] Sun, W., Yamaguchi, H. and Kusumoto, S.: GVGrid: A QoS Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks, *Proceedings of IEEE International Workshop Quality of Service (IWQoS'06)*, pp. 130–139 (2006).
- [19] Broch, J., Maltz, D. A., Johnson, D. B., Hu, Y. C. and Jetcheva, J.: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols, *Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98)*, pp. 85–97 (1998).
- [20] Xu, S. and Saadawi, T.: Does the IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multi-hop Wireless Adhoc Networks?, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 39, No. 6, pp. 130–137 (2001).
- [21] Li, J., Blake, C., Couto, D. S. J. D., Lee, H. I. and Morris, R.: Capacity of Ad Hoc Wireless Networks, *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01)*, pp. 61–69 (2001).
- [22] Oliveira, A., Sun, Z., Boutry, P., Gimenez, D., Pietrabissa, A. and Juros, K.: Internetworking and Wireless Ad Hoc Networks for Emergency and Disaster Relief Services, *International Journal of Satellite Communications Policy and Management*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–14 (2011).
- [23] Ho, T. S. and Chen, K. C.: Performance Analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA Medium Access Control Protocol, *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'96)*, pp. 407–411 (1996).
- [24] Ramanathan, R.: On the Performance of Ad Hoc Network with Beamforming Antennas, *Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'01)*, pp. 95–105 (2001).
- [25] Ko, Y. B., Shankarkumar, V. and Vaidya, N. H.: Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks, *Proceedings of 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00)*, pp. 13–21 (2000).
- [26] Korakis, T., Jakllari, G. and Tassiulas, L.: A MAC Protocol for Full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks, *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'03)*, pp. 98–107 (2003).
- [27] Choudhury, R. R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N. H.: On Designing MAC Protocols for Wireless Networks Using Directional Antennas, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 5, No. 5, pp. 477–491 (2006).
- [28] Dai, H., Ng, K. W. and Wu, M. Y.: An Overview of MAC Protocols with Directional Antennas in Wireless Ad Hoc Networks, *Proceedings of the International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology (ICCGI'06)*, pp. 477–491 (2006).
- [29] Miura, K. and Bandai, M.: MAC Protocol for Full Duplex Wireless and Directional Antennas, *Multimedia, Distributed, Cooperative, and Mobile Symposium (DICOMO'12)*, pp. 1787–1794 (2012).
- [30] Niculescu, D. and Nath, B.: Ad Hoc Positioning System (APS) Using AOA, *Proceedings of 22th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications (INFOCOM'03)*, pp. 1734–1743 (2003).
- [31] Crow, B. P., Widjaja, I., Kim, J. G. and Sakai, P. T.: IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No. 9, pp. 116–126 (1997).
- [32] Spyropoulos, A.: Capacity Bounds For Ad-Hoc Networks Using Directional Antennas, *Proceedings of IEEE International Communications Conference (ICC'03)*, pp. 348–352 (2003).