

アドホックネットワークにおける単一送受信機を利用した マルチチャネル MAC プロトコルについて

三觜 輝[†] 萬代 雅希[†] 渡辺 尚^{*}

[†] 静岡大学大学院情報学研究科 [‡] 静岡大学情報学部

* 静岡大学 創造科学技術大学院インフォマティクス部門 〒432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: [†] mitsuhashi@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp [‡] *{bandai, watanabe}@inf.shizuoka.co.jp

アドホックネットワークに利用されている IEEE 802.11 などの物理層では、互いに干渉することなく通信可能な直交チャネルが複数利用できることが知られている。複数の無線チャネルを同時に利用することにより、ネットワーク全体のスループットの向上を期待することができる。そのためには効率的に送受信機を制御するための Medium Access Control (MAC) プロトコルが不可欠である。しかし IEEE 802.11 などの MAC プロトコルではネットワーク全体で同一チャネルを利用することを想定しており、マルチチャネル MAC プロトコルにおける送受信制御に関する十分な知見が得られていない。

本稿では単一の送受信機を用いてチャネルを切り換えることによる問題点を明らかにし、マルチチャネル通信を効率的に行なうための MAC プロトコルを設計する。また、シミュレーションによる結果を紹介し、提案した方式の有効性を示す。

A Multi-channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using a Single Transceiver

Hikaru MITSUHASHI[†] Masaki BANDAI[†] and Takashi WATANABE^{*}

[†] Graduate School of Informatics, Shizuoka University

[‡] Faculty of Informatics, Shizuoka University

* Informatics Section, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University,

3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8011 Japan

E-mail: [†] mitsuhashi@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp, [‡] *{bandai, watanabe}@inf.shizuoka.ac.jp

Physical layer specifications for wireless LANs such as IEEE 802.11 provide multiple channels available for use. We can achieve a higher throughput than using single channel. However, the MAC protocol of IEEE 802.11 DCF is designed for a single channel between hosts. In this paper, a medium access control (MAC) Protocol for ad hoc networks using a single transceiver is proposed. The network we consider is an ad hoc network that does not rely on infrastructure, so proposed protocol operates asynchronously. We evaluate problems of multi-channel communication using single transceiver asynchronously. And the simulation results show that proposed protocol exploits multiple channels to achieve higher throughput because of reduction of problems which occur in multiple channels communication using single transceiver.

1. はじめに

IEEE 802.11[1]などの物理層では、互いに干渉することなく通信可能な直交チャネルが複数利用できる。た

例えば、IEEE 802.11b[1]では3つの独立したチャネルが存在する。複数ペアが異なる無線チャネルを同時に利用することにより、ネットワーク全体のスループットの向上を期待することができる。そのためには効率的

的に送受信機を制御するための MAC プロトコルが不可欠である。しかし IEEE 802.11DCF などの一般的なアドホックネットワークの Medium Access Control (MAC) プロトコルではネットワーク全体で同一チャネルを利用することを想定しており、マルチチャネル MAC プロトコルにおける送受信制御に関する十分な知見が得られていない。

本稿では単一の送受信機を用いてチャネルを切り換えることによる問題点を明らかにし、マルチチャネル通信を効率的に行なうための MAC プロトコルを提案する。また、シミュレーションより、提案した方式が単一送受信機を用いたマルチチャネル通信において発生する問題を抑制し、高いスループットを実現すること示す。

2. 関連研究

複数の送受信機を用いて送受信機ごとに異なるチャネルを割り当てることにより同時通信を実現する方式として、チャネルごとに送受信機を利用する方式[2]や DCA (Dynamic Channel Assignment)[3]が提案されている。DCA では 2 台の送受信機を、それぞれ制御チャネルとデータチャネルに利用する。端末は制御チャネルでハンドシェイクを行い利用するデータチャネルを決定し、決定したチャネルにてデータ通信を行う。

また、単一の送受信機をもつ端末がアクセスポイント (AP) などを用いて同期をとり、動的にチャネルを切り換えて通信する方式として、MMAC (Multi-Channel MAC)[4]が提案されている。MMAC では全端末が同期し、同じタイミングでチャネル獲得期間と通信期間の切り換えを行う。チャネル獲得期間では全端末は同一のチャネルにて待機し、近隣端末と利用するチャネルを決定する。通信期間では、チャネル獲得期間に決定したチャネルに遷移し、通信を行う。

DCA では複数の送受信機を利用するため、コストや回路規模の増大、複雑化という問題がある。また、MMAC では同期を行うために AP や GPS などのインフラを用いる必要がある。そのためインフラ利用することができない環境ではネットワークを構成することができない。

本研究では単一の送受信機を用いて非同期に通信を行うマルチチャネル MAC を対象にする。

3. 単一送受信機を用いるマルチチャネル MAC プロトコル

単一送受信機を用いた非同期マルチチャネル MAC では、通信中に制御チャネルを聞くことができず、近隣のチャネル予約を聞き逃す場合がある。このような場合、聞き逃した端末はマルチチャネル隠れ端末、またはマルチチャネル deaf 端末となり、近隣の通信に影響を及ぼす可能性がある。このような単一送受信機を用いたマルチチャネル MAC における問題が性能に及ぼす影響を確認するにあたり、まず単純な非同期マルチチャネル MAC プロトコルを定義する。また、単一送受信機を用いるマルチチャネル MAC で発生する問題について述べる。

3.1. Simple Scheme

単一送受信機を用いた非同期マルチチャネル通信における問題を評価するにあたり、単純な非同期マルチチャネル MAC プロトコル Simple Scheme を定義する。

Simple Scheme は単一の送受信機を用いるため、制御チャネルでハンドシェイクを行った後、送受信機をデータチャネルに切り換えて通信する。フレームの構成は CSMA/CA 4way に RES(Reservation)フレームを追加したものである。RES フレームは送信元が近隣に利用チャネルを通知するために利用され、RTS-CTS ハンドシェイクが完了した後に送信元から送出される。

各端末はチャネルの利用状況を Channel Usage List (CUL)に保持し、ハンドシェイク時に空きチャネルリストである Free Channel List(FCL)の交換を行うことにより、利用するチャネルを決定する。チャネル選択は宛先端末が互いの FCL をもとに共通に空きチャネルから選択する。なお、制御フレームをオーバーヒアした近隣端末は、制御チャネル、データチャネルに別々の NAV を設定する。本稿では、CTS、または RES によりデータチャネルに設定される NAV を Multichannel-NAV(M-NAV)と呼ぶ。M-NAV の期間は CTS や RES を受信してから

Simple Scheme 動作を図 1 に示す。送信元 S は自分の FCL を RTS で宛先 D に通知する。D は S から受け取った FCL と自身の FCL から共通の空きチャネルを選択し、チャネル 1 を利用することを CTS で S に通知する。S は RES により近隣端末に利用するチャネルを知らせる。その後、S と D はデータチャネルに切り換えて DATA、ACK フレームの交換を行う。S と D のデータ通信中に Y が X から送信要求を受信した場合、Y は S からの RES フレームにてチャネル 1 が利用されていることを知っているため、チャネル 1 以外のチャネルを選択する。

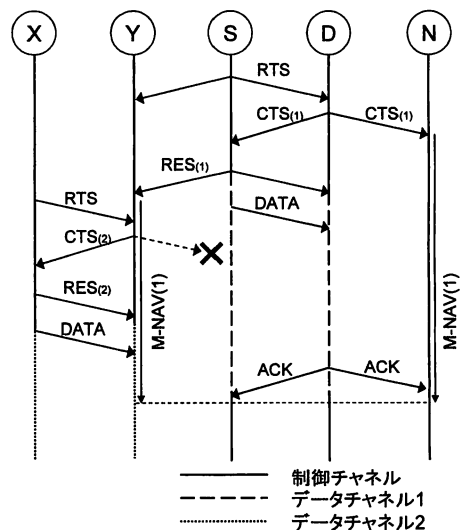


図 1 Simple Scheme のシーケンス図

3.2. マルチチャネル隠れ端末問題

マルチチャネル隠れ端末問題とは、データチャネルで通信中の端末が制御チャネルで交換されるフレームを聞くことが出来ないため、チャネルの空き状況を知ることができず、次の通信を行う際に近隣端末の通信とデータチャネルにおいて干渉するという問題である。図2を用いて説明する。

まず、SはDと通信中であるとする。このとき、XとYは制御チャネルでハンドシェイクを行い、チャンネル1でデータ通信を開始する。しかし、SはYのCTSによるチャネル予約を聞くことができず、XとYがチャンネル1で通信を開始したことを知ることができない。そのため、データ通信を終えたSがD宛にデータを送信する際、チャンネル1を空きと判断して送信を開始する。そのときXのビームとSのビームがYにおいて衝突が発生する。

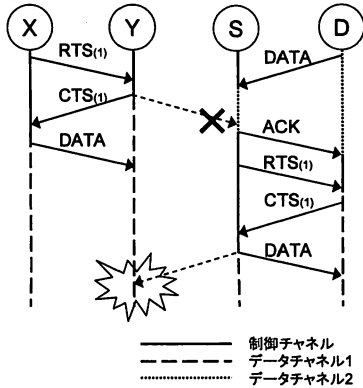


図2 マルチチャネル隠れ端末問題

3.3. マルチチャネル deafness 問題

マルチチャネル deafness 問題とは、送信元が RTS を送信したとき、宛先が別のチャネルで通信を行っているため CTS が返信されず、RTS の再送により不要なバックオフタイムが増加し、性能低下を引き起こすという問題である。マルチチャネル deafness 問題が発生するメカニズムを図3を用いて説明する。

まず、SとDがデータチャネルにて通信中のとき、XとYが通信を開始したとする。SはYのCTSによるチャネル予約を聞くことができない。Sがデータ通信終了後にY宛にデータを送信するとき、SはYが通信中であることを知らないため、RTSの再送を繰り返すことにより、バックオフ時間が延長される。これにより、通信遅延の増大を引き起こし、ネットワークの性能を低下させる。

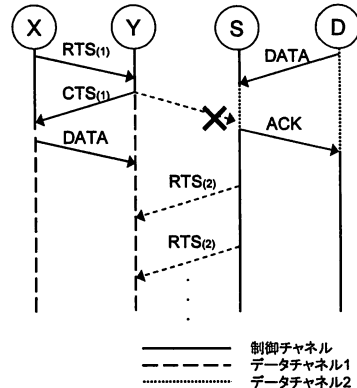


図3 マルチチャネル deafness 問題

4. Active Recovery (AR)方式

単一送受信機をもちいるマルチチャネル MAC において発生する問題に対処するため、自身の通信終了後に第三者(Notifier)が近隣の通信状況を知り、方式(AR方式)の提案を行なう。フレームの構成は、Simple SchemeにRCR(Recovery)フレームを追加したものである。RCRフレームにはチャンネルごとに通信中の端末と通信の終了時刻が保持され、Notifierに選ばれた端末から送信元と宛て先端末に対してデータチャネルで送出される。DATA-ACK 交換を終えた端末は、RCRフレームを受信し、近隣端末の通信状況を得る。

図4を用いて動作例を説明する。まず、SはDと通信を行うため、自分の空きチャンネルリスト(FCL)をRTSでDに通知する。DはSのFCLと自分のFCLを元に利用するチャンネルを決定し、CTSでSに通知。Sは近隣からNotifierを選択し、利用するチャンネルとともにRESで近隣に通知する。Notifierに選ばれた端末(M)はSとDがデータ通信中、データチャネルを聞き続け、SとDの通信終了後にRCRフレームにてSとDが聞き逃したチャンネル予約(XとYの通信)を通知する。これにより、SとDはマルチチャネル隠れ端末やマルチチャネル deaf 端末になることなく、次の通信を行うことができる。

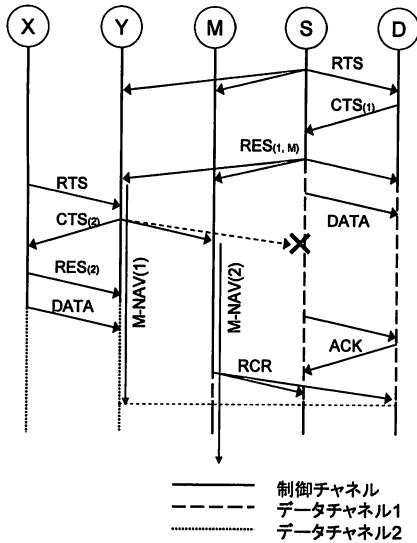


図4 AR方式

5. 性能評価

提案方式であるAR方式のスループット特性をシミュレーションで評価する。

5.1. マルチチャンネル隠れ端末問題

まず、マルチチャンネル隠れ端末問題の発生するモデルにおける性能評価を行う。

シミュレーションパラメータを表1に示す。評価モデルを図5に示す。マルチチャンネルMACプロトコルは制御チャンネル1チャンネル、データチャンネル2チャンネルの合計3チャンネルを利用するものとする。格子状配置された端末の中に、送信元eと宛先f、送信元gと宛先hの2つの通信ペアが存在するものとする。評価対象は、マルチチャンネルMACであるSimple Scheme, DCA, シングルチャンネルのIEEE 802.11である。提案方式はAR(3ch)とAR(3ch, IDEAL)である。AR(3ch, IDEAL)ではチャンネル情報の回復のために理想的なNotifierが選択されるものとする。理想的なNotifierとは、通信中の端末が本来聞くことのできた近隣端末の通信を聞くことのできる範囲にいる端末のことである。具体的には端末gの場合は端末b, c, j, kである。

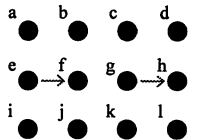


図5 評価モデル

表1 シミュレーションパラメータ

ノード間隔	150m
通信距離	250m
データサイズ	1460byte
データ発生間隔	平均λのポアソン分布
最大再送回数	7回
無線帯域	2Mbps

図6はデータ発生レートを変化させたときのネットワーク全体のスループット特性である。DCAは送受信機を2つ持つため、マルチチャンネル隠れ端末問題が発生せず、シングルチャンネルのIEEE 802.11の約2倍のスループットを得ることができる。Simple SchemeはDCAのスループットの約2/3であり、マルチチャンネル隠れ端末問題がスループット及ぼす影響が大きいことがわかる。

一方、提案方式はフレームを追加したオーバーヘッドにより、DCAには及ばないが、シングルチャンネルのIEEE802.11の約2倍のスループットを実現している。また、理想的なNotifierが選択されなかった場合においても、比較対象であるSimple SchemeやIEEE 802.11に比べ、高いスループット特性を示している。これは提案方式がNotifierを用いることにより、マルチチャンネル隠れ端末問題の発生を抑制するためである。

理想的なNotifierが選択されるAR(3ch, IDEAL)よりAR(3ch)の方がスループット性能の点で劣る理由としては、AR(3ch, IDEAL)では送信端末が他の通信を聞くことができない端末をNotifierとして選択する可能性がないためである。一方AR(3ch, IDEAL)では、他の通信を聞くことができない端末をNotifierとして選択する場合がある。このとき、チャンネル状況の回復がなされず、送信端末がマルチチャンネル隠れ端末やマルチチャンネル deaf 端末となり、ネットワークの性能劣化につながる。

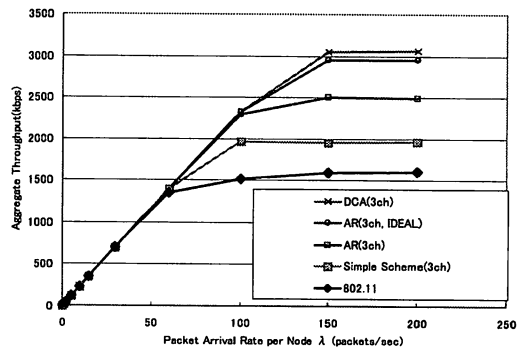


図6 スループット特性

5.2. ランダムトポロジにおける評価

端末の配置をランダムトポロジにして評価する。シミュレーションパラメータを表2に示す。端末をランダムに配置し、データが発生する端末はランダムに選択する。宛先端末についても、データ発生の際に近隣

1hop 内からランダムに選択する。評価を行うプロトコルは、マルチチャネル MAC プロトコルの DCA, Simple Scheme, 提案方式である AR, シングルチャネル MAC プロトコルの IEEE802.11 である。マルチチャネル MAC プロトコルは制御チャネル 1 チャネル, データチャネル 2 チャネルの合計 3チャネルを利用するものとする。

表 2 シミュレーションパラメータ

シミュレーション空間	1500×1500m
端末数	100
セッション数	30
トポロジ	ランダム配置
パケットサイズ	1460byte
パケット発生	平均λのポアソン分布
通信距離	250m
最大再送回数	7回
無線帯域	2Mbps

図 7 にネットワーク全体のスループット特性を示す。シミュレーションは同条件で 10 回のシミュレーションを実施した平均値である。

一番高いスループット特性を示すのは送受信機を 2 つ用いる DCA である。これは、シングルチャネル MAC プロトコルである 802.11 の約 1.6 倍のスループットであり、複数のチャネルを利用することによる同時通信が実現できていることがわかる。単一送受信機をもちいる Simple Scheme は 2 番目に高いスループットを示し、提案方式である AR 方式は 3 番目に高いスループット特性を示す。ランダムトポロジによる評価において、提案方式のスループットが Simple Scheme より改善しなかった原因は、マルチチャネル隠れ端末問題やマルチチャネル deafness 問題が発生しているにもかかわらず、局所的に発生しているためにネットワーク全体のスループット特性にはそれほど影響を及ぼしていないと考えられる。また、AR 方式では通信の際に第三者を Notifier に選任すると、その端末がさらし端末となる問題や RCR フレーム追加によるオーバヘッドの問題により、AR 方式のスループット向上を妨げているということが言える。

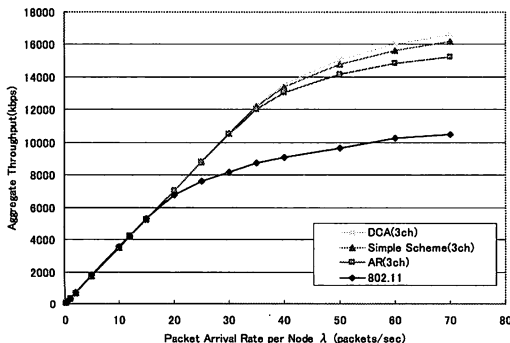


図 7 スループット特性

5.3. Notifier の選択に関して

今回、Notifier は送信元の端末がアイドル中の近隣端末からランダムに選択した。図 8 のような場合では、S に選ばれた Notifier(M)が受信できる端末と S の受信できる端末に違いがあるため、本来ならば S が聞くことができた B の通信を M は聞くことができない。そのため、Notifier により確実に近隣の通信の状況を把握することができない。

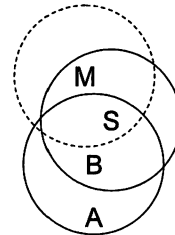


図 8 送信端末と Notifier の位置関係

Notifier は通信中に制御チャネルを開けない端末の代理となるため、送信元が本来聞くことができる端末の通信を受信できることが望ましい。従って、Notifier は S から距離的に近い端末が選ばれるべきである。そのための方法として、近隣の位置情報をもとにできるだけ自分に近い端末を優先的に Notifier に選択する方法や、受信信号強度をもとに Notifier を選択する方法などが考えられる。

また、Notifier の選択には、宛先端末が Notifier を選任する方法や、両方の端末がそれぞれ Notifier を選任する方法などが考えられる。前者では、宛先端末がマルチチャネル隠れ端末やマルチチャネル deaf 端末になる問題に対処することができる。後者では、送信元と宛先、両方の端末がマルチチャネル隠れ端末やマルチチャネル deaf 端末になることを抑制することができる。しかし、一度の通信に 2 つの Notifier を利用するため、近隣の端末の通信を抑制することが問題となる。そのため、ネットワークに十分に端末が存在しない状況では性能の改善が期待できない。

Notifier の選択方法に関しては今後の重要な課題である。

6. まとめ

本稿では、単一送受信機を用いた場合に発生するマルチチャネル隠れ端末問題やマルチチャネル deafness 問題に起因する性能劣化への対処として、第三者にチャネルの利用状況を通知させる AR 方式の提案を行った。シミュレーションにより、マルチチャネル隠れ端末問題やマルチチャネル deafness 問題が発生するモデルにおいて、シングルチャネルの IEEE 802.11 や単一送受信機を用いるマルチチャネル MAC プロトコルである Simple Scheme と比較を行い、提案方式が問題の発生を抑制し、スループット性能を改善することを示した。

文 献

- [1] IEEE 802.11 Working Group, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications," 1997
- [2] A. Nasipuri, J. Zhuang, and S. Das, "A Multichannel CSMA MAC protocol for Multihop Wireless Networks," in Proc. IEEE WCNC'99, 1999.
- [3] Wu et al "Multi-channel MAC protocol for Ad Hoc Networks" I-SPAN 2000, 2000
- [4] So et al "Multi-channel MAC protocol for ad hoc networks Handling Multi-channel hidden terminal problem Using a Single Transceiver," Mobihoc2004, 2004