

アドホックネットワークにおけるマルチチャネルMACプロトコルの検討

劉 文姫[†] 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[‡]

1 はじめに

アドホックネットワークを効率的に利用する手法として複数ユーザの同時通信を可能にするマルチチャネルMACプロトコルが提案されている[1]-[5]。マルチチャネルMACプロトコルでは、ノードが同時に異なるチャネルをキャリアセンスすることができない場合、衝突回避のためのチャネル割り当てが問題になる。この問題に対し、主に2つの解決法が提案されている[1][3]。一つは事前にノードにチャネルを割り当てる方法である[1]。この方法は、送信者に割り当てる方式、受信者に割り当てる方式、送受信者に割り当てる方式に分けられる。もう一つは、送信タイミングによりチャネルを割り当てる方法である[3]。この方式では、チャネルを割り当てた後は、データが衝突することはないが、1サイクル時間（一つのチャネルが使えるタイミングから次の使えるタイミングまでの時間）は最大データサイズと同じである必要があるため、チャネル数は最大データサイズと同じでなければならない。これらの方式の共通の問題はノード数とデータサイズの変化に対応できないことである。

本稿ではノード数とデータサイズの変化に柔軟に対応するために動的チャネルを割り当てるマルチチャネルMACプロトコルを提案し、その性能を解析により評価する。

2 提案方式

2.1 チャネルキャリアセンス

提案方式では、ノードは各チャネルを周期的にキャリアセンスする。これをチャネルホッピングと呼ぶ。チャネルはフレームに分割され、各フレームはチャネル数と同じ数のタイムスロットに分割される。全ノードは同期して動作し、同じタイムスロットで同じチャネルをキャリアセンスする。

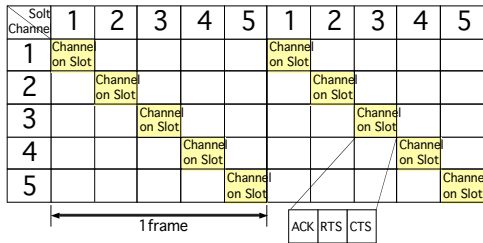


図1：チャネルホッピング

図1に提案方式のチャネルホッピング方法を示す。ここではチャネル数M=5の場合を示す。図1に網かけしたように、全ノードは各フレームの1番スロットで1番チャネルを、M番スロットでM番チャネルをキャリアセンスする。この手順を共通シーケンスと呼ぶ。

各チャネルにおいて、全ノードにキャリアセンスされるスロットをチャネルオンスロットと呼び、1番チャネルのチャネルオンスロットは1番スロット、M番チャネルのチャネルオンスロットはM番スロットである。チャネルオンスロットは制御チャネルとして用いられる。チャネルオンスロットはまた、ACKミニスロット、RTSミニスロット、CTSミニスロットの三つに分割される。チャネルオンスロットの長さは制御フレーム（ACK-RTS-CTS）の伝送時間と同じである。これによりRTSとCTSそれぞれの送信タイミングを決めるので、衝突はRTS同士のように同じ種類の制御フレーム同士の間だけで起こる。

2.2 チャネルアクセス及びデータ送信手順

Multi-Channel MAC Protocol for Ad-hoc Networks
[†]Wenji Liu · Graduate School of Information Shizuoka University
[‡]Masaki Bandai ‡Takashi Watanabe · Faculty of Information, Shizuoka University

図2にチャネルアクセスとデータ伝送の例を示す。

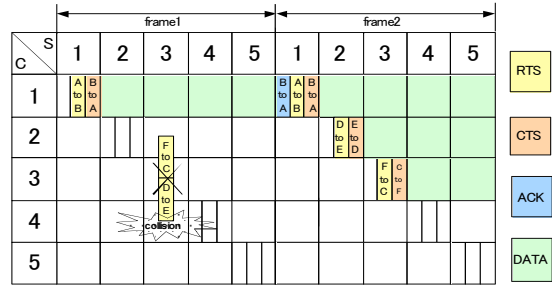


図2：チャネルアクセスとデータ伝送

チャネルアクセス

- (1) 全てのIdleノードは共通シーケンスに従って、順番に各チャネルをキャリアセンスする。
- (2) データを持つノードはチャネルのチャネルオンスロットのRTS ミニスロットでRTSを送信する。宛先ノードは同じチャネルで同じスロットのCTSミニスロットにCTSを返す。
- (3) 複数のノードが同じスロットでRTSを送信した場合、RTS同士の衝突が起こる。また、宛先ノードの都合によりCTSを返さない場合もある。いずれの場合のRTS送信も失敗とする。
- (4) 他のノードはCTSを正しく受信した場合のみ、RTS送信が成功したものと判断する。
- (5) RTS/CTSの送受信に成功したら、同じチャネルでノードはデータ送受信を開始する。通信終了まで、送信者と受信者はこのチャネルを用いる。

データ送信

- (1) RTSとCTSの送受信に成功したノードはデータ送信を開始。
- (2) ACKは各フレームのACKミニスロットで送信される。ACKミニスロットに続くRTSとCTSミニスロットでは、送信ノードと受信ノードは最初と同じように、RTSとCTSを交換する。これによって、新しいIdleノードにチャネルの使用状況を知らせる。
- (3) 失敗したノードは次フレームでまたある確率でRTSを送出。

2.3 隠れ端末とさらし端末の軽減

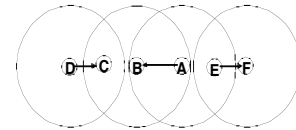


図3：隠れ端末とさらし端末の例

図3に示すように、AからBにデータを送る場合を考える。Aにとって、ノードCのようにAの送信範囲外かつBの送信範囲内のノードは隠れ端末となり得る。隠れ端末問題が発生しないように、CはAとBの通信中に同じチャネルでのデータ送信はできないが、受信することはできる。したがって、CはABが通信するチャネルでNAVをセットしなければならない。

一般に、ノードEのようにAの送信範囲内かつBの送信範囲外の端末は、さらし端末になり得る。しかし、提案方式では、Aがデータを送信している時、Eはデータを受信できなくなるが、データを送信できるため、さらし端末にはならない。したがって、EはRTSを聞いて、CTSを聞かなかった場合、NAVをセットする必要はない。以上より、ノードは次のように動作する。

- > RTSを聞いた場合、NAVをセットしない
- > CTSを聞いた場合、そのチャネルのNAVをセットする

3 理論解析

3.1 スループット

スループットは単位時間で使用している平均チャンネル数の全チャンネルに対する比率と定義される。ここでは任意の2ノードが通信可能な完全結合ネットワークを仮定する。

あるチャンネルオンスロットの直前にIdleノード数 n である時、それらのIdleノードは送信許可率 q を $1/n$ にすれば、成功率は最大値になる。ノードはチャンネルホッピングにより他ノードの通信状況が分かるので、 $q=1/n$ と調整することが可能である。ただし、パケット発生率 p とすると $q < p$ を満たすものとする。

ここで、データサイズ $L=1$ の場合を例にとり、全ノード数を N 、全チャンネル数を M とした場合の空チャンネルオンスロットでRTSの平均成功率 $P_i(L)$ について場合分けして考える。

➤ 場合1 ($N \geq 2M$)

同じフレームで最大 M ペア ($2M$ 個) のノードが通信できるしたがって、一つの空チャンネルオンスロットでのRTS成功率は M 通りある。それぞれ $A_1, \dots, A_k, \dots, A_M$ とすると下記のように示される。

$$A_k = \left(1 - \frac{1}{N - 2k}\right)^{N - 2k - 1}$$

また、空チャンネルオンスロットで A_1 から A_M のどれが発生するかは他チャンネルの通信状況により決まるので、 $L=1$ の場合チャンネルオンスロットのRTS成功率 $P_i(1)$ は次式で求まる。

$$P_i(1) = \sum_{k=1}^M C_{M-1}^{k-1} P_i(1)^{k-1} (1 - P_i(1))^{M-k} A_k$$

➤ 場合2 ($N \leq 2M$)

同じフレームで最大 $N/2$ ペア (M 個) のノードが通信可能であるため $P_i(1)$ は同様に導くことができる。

上記より、データパケットサイズ $L=1$ の場合のスループット $S(1)$ は $P_i(1)$ となる。これを拡張してスループット $S(L)$ は以下で与えられる。

$$S(L) = \frac{LP_i(L)}{1 + (L-1)P_i(L)}$$

3.2 遅延

遅延は、送信ノードでデータが発生してから、受信ノードで受信完了までの時間で定義される。遅延は次式より求めることができる。

$$D = \left[\sum_{k=0}^L C_k S(L)^k (1 - S(L))^{M-k} (N - 2k) * p \right] + (L - 1)$$

$$(N > 2M : A = M, N \leq 2M : A = N/2)$$

4 性能評価

提案方式のスループットおよび遅延特性を理論解析と計算機シミュレーションで評価する。

4.1 完全結合ネットワークの場合

完全結合ネットワークを仮定した場合の性能に関して、理論解析およびシミュレーションにより評価する。

図4にスループットおよび遅延特性を示す。ここではデータ発生率 p 、データサイズ L を変化させる。また、図中の調整ありとは、送信許可率 q を調整する場合を示す。図4より、線で示した理論解析とプロットで示したシミュレーション結果がほぼ一致することがわかる。

まずスループットを評価する。図4より q を調整した場合のほうがスループットおよび遅延の両方性能が優れることが分かる。これは、 q を調節することで、パケット同士の衝突が低減されるためであると考えられる。特に、データ発生率 p が大きな領域において、改善が大きいことが分かる。これは、 p が小さい領域においては、 $q=p$ となるためである。また、データサイズ L が大きくなるとスループットが大きくなることが分かる。これは L が大きくなると同時に通信数も大きくなるためである。

次に、遅延について評価する。 q を調整しない場合、指数分布に従って、 $p > 0.4$ にて遅延が発散する。一方、 q を調整する場合、 p の変化に対して、遅延の増大は小さくなる事が分かる。これは、スループットの場合と同様に、パケット同士の衝突が低減するためである。

4.2 一般ネットワークの場合

一般ネットワークを仮定した場合の性能に関して、シミュレ

ーションにより評価する。ここで、一般ネットワークとは、任意の2ノードが必ずしも通信可能なではないネットワークと定義する。

図5に一般ネットワークのスループット特性を示す。ここで、ノードは等密度分布で、各ノードの通信範囲には平均4ノードが存在する。スループットの定義は単位時間で同時に通信しているノードのペア数である。この場合、各ノードがキャリアセンスできる範囲は違うので、宛先範囲のチャンネル利用状況、通信メンバー数などの情報は完全に把握できないので完全結合ネットワークのように送信許可率 q を調整できない。この状況では、ノードは発信履歴データにより q を調整するために、ノードは学習機能が持つて、過去の q を用いて最適な送信許可率を探す。図5より、完全結合ネットワークの場合と同様に、 q の調整を行うモデルの性能がデータ発生率 p の大きな領域で高いスループットを得られることが確認できる。

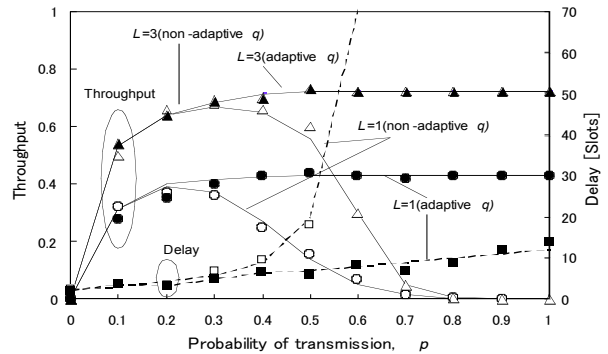


図4 スループットと遅延 ($N=6, M=3$)

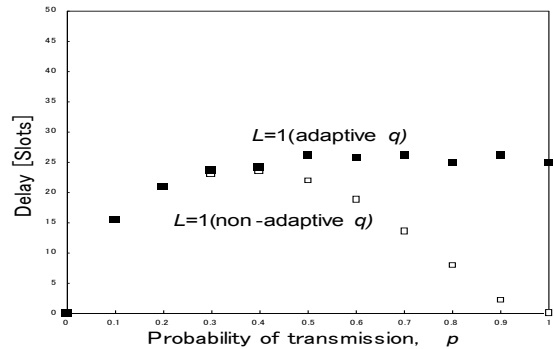


図5 : スループット ($N=100, M=3$)

5 おわりに

本論文ではノード数、データパケットサイズの変化に柔軟に対応できる、チャンネルホッピングを用いたマルチチャンネルMACプロトコルを提案し、性能評価を行った。また、隠れ端末問題とさらし端末問題の軽減方法を提供した。提案方式ではノードが通信しようとする時に動的にチャンネルを割り当てるので、無線通信の帯域幅資源を有効利用できる。今後はスループットと遅延を最適化するチャンネル数について検討する。

参考文献

- [1] E.S. Sousa and J.A. Silvester, "Spreading code protocols for distributed spread-spectrum packet radio networks," IEEE Trans. Commun., vol. 36, pp. 272-281, March 1988.
- [2] M. Joa-Ng and I-Tai Lu, "Spread-spectrum medium access protocol with collision avoidance in mobile ad hoc wireless network," Proc. IEEE INFOCOM 1999, vol. 2, pp. 776-783, 1999.
- [3] A. Tzamaloukas and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-hopping multiple access," Proc. IEEE ICC2000, vol. 1, pp. 415-419, 2000.
- [4] A. Tzamaloukas and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "A receiver-initiated collision-avoidance protocol for multi-channel networks," Proc. IEEE INFOCOM2001, vol. 1, pp.189-198, 2001.
- [5] Amit Butala, Lang Tong, "Dynamic Channel Allocation and Optimal Detection for MAC in CDMA Ad hoc Networks," 36th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov. 2002.