

マルチチャネル無線LANにおけるスループット向上を 目的とした送信チャネル推薦アルゴリズム

長嶺 淳子¹ 松田 莉奈¹ 重安 哲也¹

概要:近年、単一送受信機で複数チャネルを切り換えながら通信を行うマルチチャネル無線LANシステムが数多く提案されている。これらの既存システムでは、マルチチャネル隠れ端末問題等の発生により、通信時に空きチャネルを正しく選択することができず、チャネル利用効率が低下することが知られている。この欠点を軽減するため、任意の端末間で新たな送信が開始される際に間違った送信チャネル選択をしないように、隣接する端末がチャネル使用禁止を通知するCAM-MAC方式が、さらに冗長なチャネル使用禁止の通知を避けるために仮想トポロジ把握に基づいたVT方式がそれぞれ提案されている。しかしながら、これらの手法は使用不可のチャネルの使用を回避させることのみを目的としており、送信端末に対してより良いチャネルの利用を促すことでシステムのチャネル利用効率を向上させることは行っていない。そこで、本稿では、チャネル利用効率の向上を目的として、新規送受信開始時に隣接端末により良い送信チャネルの使用を推薦する手法を提案し、計算機シミュレーションにより同手法の有効性を評価した結果を報告する。

1. はじめに

MAC (Medium Access Control) 層において、単一送受信機で複数チャネルを切り換えながら通信するマルチチャネル無線LAN (Local Area Network) システムが数多く提案されている [1][2][3]。マルチチャネル無線LAN用のMACプロトコルでは、各DATA送信チャネルを複数の送受信ペア間に互いに干渉しないように適切に割り当てることが求められるが、この手法は大きく、同期型と非同期型の2つに分類できる。

M-MAC (Multi-channel MAC) [4] に代表される同期型では、チャネル交渉期間と、実際のDATA送信期間を全ての端末間で同期して実施することで、チャネル割り当ての性能を向上させるが、アドホックネットワーク等の自律分散型ネットワークでは、端末間の時刻同期は難しい課題となっている。

一方、端末間の同期が不要な方式としてランデブー方式も提案されている。同方式では、システムが利用可能な通信帯域を1つの制御チャネルとその他のDATA送信チャネルに分割する。新規の送信要求が発生した場合、まず、端末は、制御チャネルを通じて宛先端末に送信要求の発生とDATA送信に使用するチャネルを通知する。宛先端末

は受信可能状態であれば、この新規送信開始の受諾を知らせる制御パケットを返信することで送信端末ならびに、自端末の周辺端末に以降の新規送信の開始と、同送信に使用するチャネルの交渉が成立したことを通知する。同チャネル交渉を傍受した端末はこの新たな送信開始を知るため、この送信が終了する予定時刻まで同チャネルの使用を控えることでパケット衝突は回避される。しかしながら、既に他のチャネルを用いた他の送信を実施中の端末は当然のことながらこのチャネル交渉の内容を知ることはできない。そのため、現在の自身の送信が終了した直後に、新たな送信を上述した他端末と同一のチャネルを使用して開始してしまう可能性がある。その場合、同一のチャネルで送信されたDATAは互いに衝突する。これはマルチチャネル隠れ端末問題と呼ばれ、マルチチャネル無線LANシステムのスループットを大きく低下させる [5]。

CAM-MAC (Cooperative Asynchronous Multi-Channel MAC) は同問題を解決する手法として提案された。同手法では、マルチチャネル隠れ端末に対して、不適切なチャネル使用を周辺端末によって禁止を通告することでパケット衝突を回避する。CAM-MACでは、全ての端末は、自身がDATA送受信をしていない間は、制御チャネルを監視し、同チャネル上でやりとりされる制御パケットを傍受することで、どのDATAチャネルがいつまで使用されるかを学習する。ここでもし、新規のチャネル交渉において、既

¹ 県立広島大学 経営情報学部
Faculty of Management and Information Systems, Prefectural University of Hiroshima

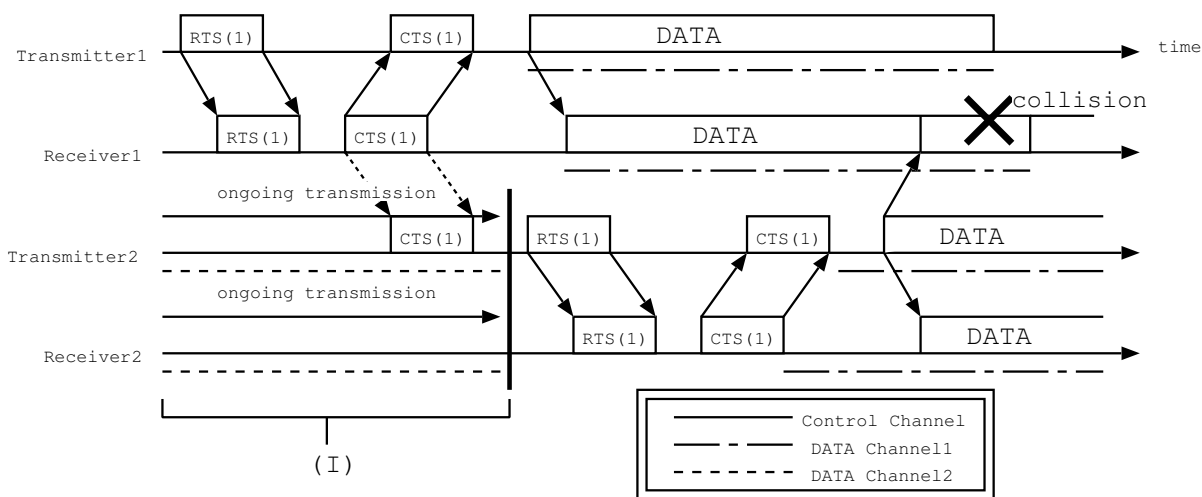


図 1 マルチチャンネル隠れ端末問題

に使用中の DATA チャンネルの使用が宣言された場合、これを検知した隣接端末が INV (INValid) パケットにより、同チャンネルの使用禁止を通告することで、マルチチャンネル隠れ端末によるパケット衝突が軽減される。

しかしながら、この方式では、単純に DATA チャンネルの番号とその使用終了時刻の情報のみで使用可否を判定しているだけである。そのため、実際の端末間の接続状況をふまえると、本来同一のチャンネルを使用して DATA を送信したとしても、互いのパケットは衝突を起こさない位置関係にある新規送信端末に対しても、新たなチャンネルの利用が不要に禁止されることで本来利用可能なチャンネルの利用が不要に妨げられるという RCB (Redundant Channel Blocking) 問題が発生することが報告されている [1]。

RCB の発生は、空きチャンネルの正しい選択を妨げ、チャンネル使用効率を低下させる。そこで、これを解消する手法として、ネットワークトポロジを考慮した正しい空きチャンネル判定を行うことで不必要な INV の送信を制限する仮想トポロジ (VT: Virtual Topology) 方式が提案されている [6]。

さて、同手法はパケット衝突を回避するために使用不可のチャンネルを正しく判定することのみを目的としており、CAM-MAC と比べて不適切な INV によるチャンネル利用効率の低下を軽減することはできるが、チャンネル利用効率を向上させるようなより良いチャンネル選択を促しているわけではない。

そこで、本稿では、マルチチャンネル無線 LAN システムのさらなるチャンネル利用効率の向上を目的とし、現在実施中の DATA 送受信ペアに干渉を与えない範囲内で、新規送受信ペアに対して、積極的にチャンネルの繰り返し使用を促すチャンネル推薦アルゴリズムを提案する。また、提案手法の有効性を計算機シミュレーションによって評価し、既存の VT 方式に比べて高いスループットを獲得できることを明らかにする。

2. 関連研究

MAC 層において、適切な DATA 送信チャンネルを選択するため制御チャンネルにて交渉期間を設ける AMCP (Asynchronous Multi-channel Coordination Protocol), CAM-MAC, VT 方式などが提案されている。以下ではそれらについて詳述する。

2.1 AMCP

AMCP 方式は、各端末が制御チャンネルでの交渉を通じて、通信範囲内の端末によって利用されているチャンネル情報を取得し、それを元に DATA 送信チャンネルを決定する方式である。新規送信端末は周囲で他の端末が利用中のチャンネルを知ることができるため、自端末はそのチャンネルの使用を回避することでパケット衝突を防ぐ。しかし、DATA チャンネルで通信中の端末はその通信中に制御チャンネルで交換された情報に気づくことができないため、正確なチャン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隣接端末と同一のチャンネルを用いてしまう可能性がある。これをマルチチャンネル隠れ端末問題という。同問題を図 1 を用いて詳述する。

図 1 では、送信機 2 の DATA が受信機 1 上で衝突してしまう状況を示している。同図の (I) の期間、送受信機 2 は、Ch2 を用いて通信を行っていたため、当然のことながら送受信機 1 のチャンネル交渉を知ることはできない。そのため、これらの端末は新たな送信の開始時に通信範囲内で、同チャンネルを用いた送受信を行う可能性があり、そのような場合はどちらの送信 DATA も衝突により失われてしまう。

2.2 CAM-MAC

マルチチャンネル隠れ端末問題を解消するために提案されたプロトコルが CAM-MAC 方式である [1]。

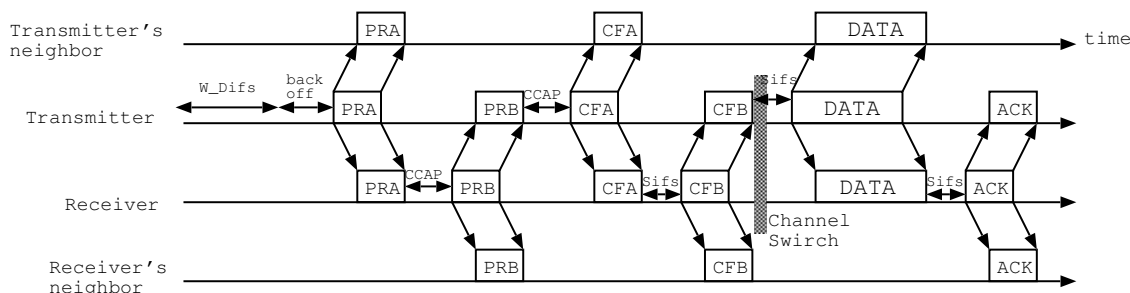


図 2 CAM-MAC の動作

CAM-MACでは、図2に示すように、まず、送信端末が制御チャネル上で、送信要求をPRA (PRobe-A)を用いて通知する。このときPRAのヘッダには希望するDATA送信チャネルの番号を記載しておく。そして、宛先端末は周囲で同チャネルを用いて通信中の端末が存在しなければ、PRB (PRobe-B)を返信する。PRBによって送信要求が受諾されたことを確認すると、送信端末は、PRA/PRB交換と同様に、確認のためにCFA/CFB (ConFirm-A/ConFirm-B)交換を行う。その後、実際にDATAチャネルを用いてDATAを送信する。

このように、CAM-MACでは制御チャネル上の送受信端末の交渉を隣接端末が漏れ聞くことができるため、現在他端末によって利用されているチャネル情報を常に最新のものに更新することができる。同方式を用いることで、同一チャネルを用いた同時複数送信が禁止され、衝突を防ぐことが可能となる。また、不適切なDATAチャネルの使用を希望している場合はPRA/PRBを傍受した隣接端末が、そのチャネルの使用をINVを送信しチャネルの使用禁止を通知することで、マルチチャネル隠れ端末問題 [7] の発生も軽減できる。

しかしながら、このINVが逆に、RCB問題を発生してしまうという欠点もCAM-MACは抱えている。同問題は、通信範囲内では使われていない、本来は使用できるはずのチャネルまで不必要に利用が妨げられるというものである。

例えば、図3のようなネットワークモデルの場合を考える。同図の上は、端末3→4、端末1→2の2つの送受信が行われていることを示している、同図の下はその後、端末1→2の通信が終了した直後の様子を示す。ここで、図中の四角で囲まれた数値は各端末のチャネルテーブルに記載されている（自身の通信範囲内で使用中の）チャネル番号である。

さて、同図の上から下へ状況が変化した後、端末6は端末2へCh3を用いた通信の開始を交渉する。しかしながら、これを傍受した隣接端末5は、周囲でCh3を用いて通信中の端末が存在することを認識しているため、端末6に対し、同端末が希望したチャネルは使用不可であると判断しINVを送信することで、Ch3の使用を禁止する。しかし、現在Ch3を用いて通信中の端末3、4はこれからCh3

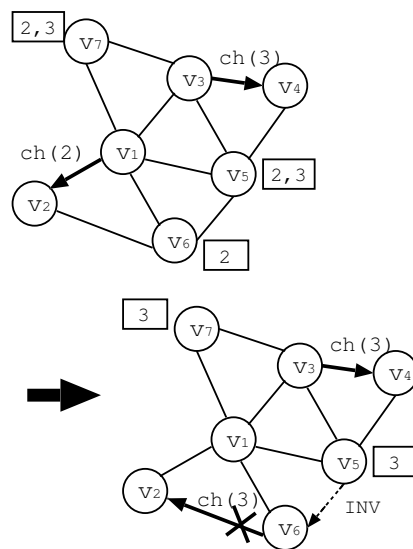


図 3 RCB 問題

を用いて通信しようとしている端末6、2の通信範囲外であるため、本来ならば同一チャネルを用いて送受信を行ったとしても、互いに干渉を与えることはない。にも関わらず、このように、不適切なINVを送信してしまうことで使用できるはずのチャネルの使用を妨げてしまうことをRCB問題と呼ぶ。

2.3 VT方式

RCB問題の解消を目的としてVT方式が提案されている [6]。同方式では、全ての端末は自端末から2hop以内の端末同士の接続状況を把握することで不適切なINVの送信を回避する。以下に図4を用いてVT方式の動作を説明する。

表1は、端末5の仮想トポロジテーブルである。同表のLevel1は端末5の隣接端末を、Level2はその隣接端末（つまり端末5から2hopの端末）をそれぞれ示している。表2は、チャネルテーブルであり、現在実施中の送受信ペアの送信元アドレス (Source)、宛先アドレス (Destination)、利用チャネル (Channel) の情報をそれぞれ保持する。これらの表をもとに、VT方式では、新たな使用チャネルの交渉の際のINVの送信の実施を判断する。

さて、図4のネットワークにおいて、新たに端末6→

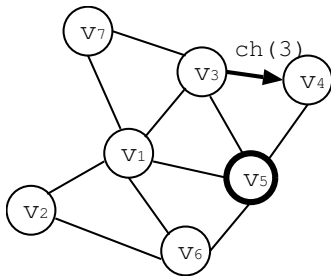


図 4 ネットワークモデル

表 1 端末 5 の仮想トポロジテーブル

Level 1	Level 2
$v_1 (v_3, v_6)$	v_2, v_7
$v_3 (v_1, v_4)$	v_7
$v_4 (v_3)$	
$v_6 (v_1)$	v_2

表 2 端末 5 のチャンネルテーブル

Source	Destination	Channel
v_3	v_4	3

2 が Ch3 を用いた通信を開始する場合について考える。CAM-MAC では前述のように INV が送信されるため、端末 5 によってこの通信の開始は不必要に却下されるが、VT 方式では、端末 6、2 はそれぞれ端末 3、4 の通信範囲外であると把握した仮想トポロジから判断できるため、新規使用チャンネルが現在実施中の送信と同じであっても INV は送信されず、結果としてこの送信要求が不必要に却下されることはない。従って、RCB 問題は VT 方式によって回避できることになる。しかしながら、VT 方式は、チャンネル使用不可の判断精度を向上しているのみで、チャンネルの繰り返し利用の促進によるチャンネル利用効率の向上を行っているわけではないことに注意されたい。

3. チャンネル利用効率の向上を目的とした送信チャンネル推薦手法

VT 方式を応用し、チャンネル利用効率の向上を目的とした送信チャンネル推薦手法を提案する。本提案方式では、新規送受信を開始する際に、隣接する端末が実施中の送信に対し、干渉を与えない範囲で同一チャンネルを繰り返し利用させることで、チャンネル利用効率を向上させることを目的とする。この目的のため、新規送信端末は隣接端末に対し、DATA 送信チャンネルの推薦を依頼する。

具体的には、提案方式は VT 方式をベースとし、同方式に 2 つの制御パケットを追加する。1 つは、送信要求の発生した端末が、隣接端末に新規送信要求発生の通知のために送信する DCL (DeCLaration) である。もう一つは、DCL を受け取った隣接端末が、周囲の状況に応じて利用すべきチャンネルを推薦する RCM (ReCoMmendation) である。この 2 つの制御パケットを用いた提案方式の具体的

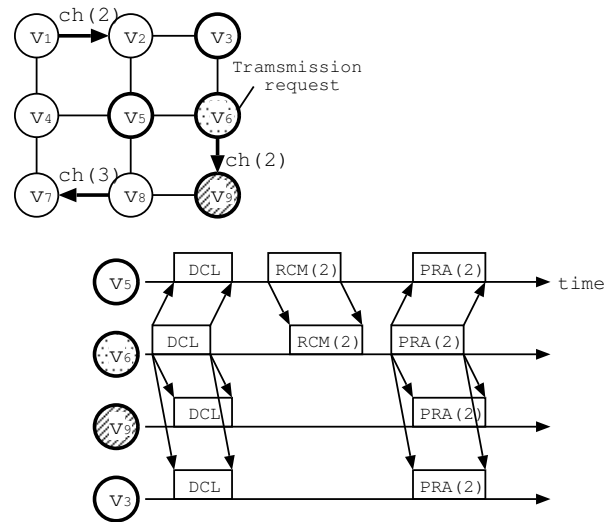


図 5 送信チャンネル推薦手法

な動作を図 5 を用いて説明する。

まず、新規送信端末 6 は送信要求を DCL を用いて隣接端末の中から後述する 1 つの端末について通知する。DCL のフレームフォーマットを図 6 に示す。

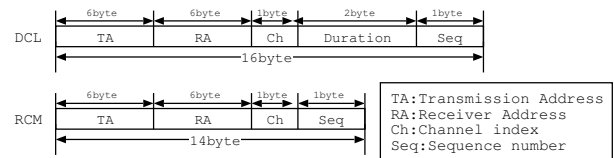


図 6 DCL フレームフォーマット

図 6 における Ch は、既に現在端末 6 の周辺で使われているチャンネルの情報を含んでいる。この情報を載せることで、同パケットを傍受した隣接端末は、送信端末の周りで使用されているチャンネルを知ることができ、それら以外のチャンネルを推薦するという選択肢を得ることができる。DCL を受け取ったチャンネル推薦端末 5 は、表 3、表 4 を元に決定した推薦チャンネル情報をヘッダに載せた RCM を返信する。推薦チャンネルの決定において優先すべき事項は、送受信端末と 2 ホップ先の端末が利用しているチャンネルという点である。なぜなら、2 ホップ先の端末が利用しているチャンネルを用いることで、周辺端末の利用チャンネルの選択肢が増加するからである。ここで、もし仮に、2 ホップ先の端末が利用しているチャンネルが複数存在する場合は、新規送信される DATA 長から、チャンネルの利用期間が最も長く重複するものを推薦する。そして、RCM を受け取った送信端末は、推薦チャンネルを DATA チャンネルとして交渉し、通信を開始する。

ここで、チャンネルを推薦する端末は新規送信端末の隣接端末のうち、最も CFA/CFB 交換を行った回数が少ないものとする。この理由は、そのような端末は他の端末に比べて制御チャンネルを監視している期間が長く、より精度の高

表 3 端末 5 の仮想トポロジテーブル

Level 1	Level 2
v_2	v_1, v_3
v_4	v_1, v_7
v_6	v_3, v_9
v_8	v_7, v_9

表 4 端末 5 のチャンネルテーブル

Source	Destination	Channel
v_3	v_4	3
v_1	v_2	2

い情報を得ていると考えられるからである。

さて図 5 において、RCM を受信した端末 6 は、CAM-MAC と同様に、PRA/PRB、CFA/CFB 交換を経た後に推薦チャンネルを用いて DATA を送信する。また、一度推薦チャンネルを受け取った端末は、送信オーバーヘッドの削減のため、以降は他端末によって INV でそのチャンネルの使用を禁止されるまで常にそのチャンネルを利用し続ける。そして、交渉の際にその推薦チャンネルが使用不可となった場合のみ、再び DCL を送信し、新たな推薦チャンネルを受け取ることをとする。そのため、推薦 DATA チャンネル使用可が続く場合、VT 方式と同じオーバーヘッドとなる。

4. 提案方式によるチャンネル利用効率向上例

1 つの制御チャンネル (Ch1) と、2 つのデータチャンネル (Ch2, Ch3) を用いた通信を考える。ここでは、1) 端末 1 → 2 と端末 5 → 6 が隣接端末の推薦により同一のチャンネルを用いる提案方式 (proposed)、2) 同端末が異なるチャンネルを用いてしまう場合 (worst)、3) 同端末がランダムにチャンネルを用いる場合 (random) の 3 つをそれぞれ考える。

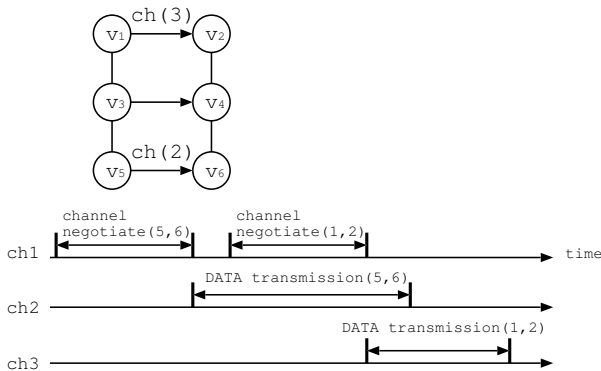


図 7 端末 3 を中心としたチャンネル利用状況 (従来方式)

図 7 は、2) の場合を図示したものである。まず、端末 5 → 6 が Ch1 で交渉を行った後に Ch2 を用いて通信を開始し、その後、端末 1 → 2 が同様に Ch1 にて交渉を行った後に、Ch3 を用いて通信を開始したとする。このようなチャンネル利用が発生してしまうと、どちらの送信ペアにも隣接

する端末 3 → 4 は Ch1 で交渉を開始するも、空きチャンネルがないために、通信を行うことができなくなってしまう。結果として、この場合は、同時に 2 つの送信しか行うことはできないことがわかる。

これに対し、1) の端末 5 → 6 と端末 1 → 2 が同じチャンネルを用いて通信を行った場合を図 8 に示す。

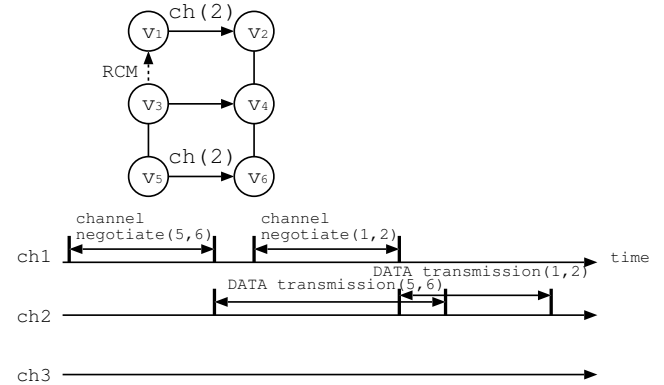


図 8 端末 3 を中心としたチャンネル利用状況 (提案方式)

同図に示すように端末 3 の RCM により、端末 1 → 2 の通信では Ch2 が使用される。このような場合であれば、端末 3 → 4 は残りの Ch3 を自身の送信に使用できるため、結果として、同時に 3 つの送信が行われることになる。これらを踏まえ、1), 2), 3) のパケット衝突が発生しないと仮定した状況におけるスループットの上限を DATA 長を変化させながら計算によって算出した値を結果を図 9 に示す。

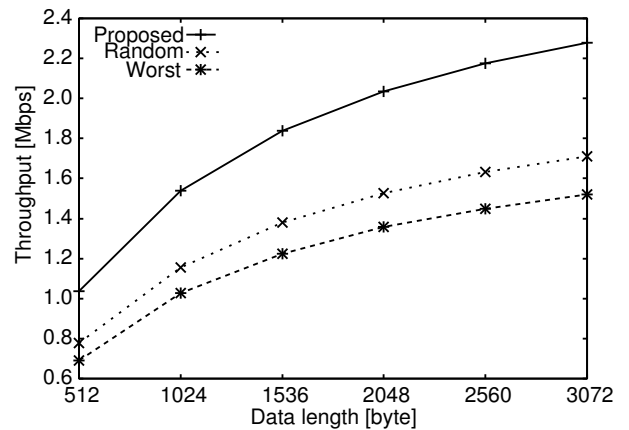


図 9 スループット比較

5. 計算機シミュレーション評価

図 7 に示すトポロジと同様に、Pairwise 型のネットワークにおいて提案方式を既存の VT 方式とスループット比較を行った結果を報告する。評価に用いた諸元を表 5 に示す。

計算機シミュレーションによって算出した結果を図 10 に示す。評価に用いたモデルでは DATA チャンネルが 2 つであり、送信レートは 1Mbps であることから、理想的なス

表 5 シミュレーション諸元

Parameter	Value
Data Rate	1Mbps
Communication Range	100m
SIFS	10 μ sec
DIFS	50 μ sec
Slot	20 μ sec
Contention Window Size	Min:31, Max:1023
MAC Header	PRA/PRB:14, CFA/CFB:3, DCL:16, RCM:14, ACK:10 (Bytes)
Frame Check Sequence	4 Bytes
PLCP Header and Preamble	192 μ sec
Payload	3072Bytes
Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Terminals	6

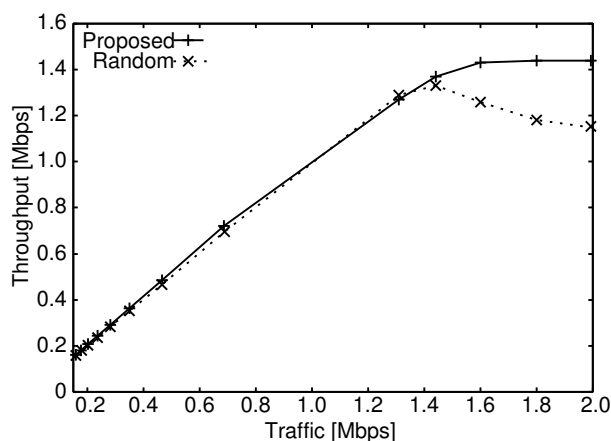


図 10 送信チャンネル推薦

スループットの上限は 2Mbps 程度となることがわかる。そこで計算機シミュレーションにおいても、ポアソン分布に従って発生させるトラフィックが 2Mbps 程度以下の範囲について図 10 に示している。同図に示す結果からも、4 節で述べたように、提案方式によってスループットが向上していることが確認できる。また、スループットの向上幅も、高トラフィック環境下において、4 節の議論とほぼ同等の約 1.4 倍程度となることが併せて確認できる。以上の評価結果から、複数の送受信ペアに対して、使用する DATA 送信チャンネルをそれぞれが干渉を及ぼさない範囲で、繰り返し割り当てる本稿の提案方式の導入によってスループットが効果的に向上することが確認できる。

6. おわりに

本稿では、単一の送受信機を有する端末が複数の DATA チャンネルを切り換えて送受信を実施することで高いスループットを達成するマルチチャンネル無線 LAN システムにおいて、新規の送信要求の発生時に、隣接端末が送信端末に対して、効率的なチャンネル利用となるチャンネルを推薦する

方式として、送信チャンネル推薦手法を提案した。

提案方式の有効性を評価した計算機シミュレーション結果から、送受信ペアが固定された Pairwise 型ネットワークにおいて、提案方式のベース方式である、VT 方式と比較して、約 1.4 倍のスループット性能を達成できることを明らかとした。

今回は、Pairwise 型ネットワークにおけるスループット評価を行ったが、今後は、さまざまなネットワーク環境下におけるチャンネル推薦方式の有効性を評価するつもりである。また、チャンネル推薦端末を CFA/CFB 交換の回数により決定した。しかしながら、多くの端末と接続している端末は多くの状況を知っていると考えられるため、今後は、接続数によるチャンネル推薦端末の決定も検討していく。

参考文献

- [1] T. Luo, M. Motani, V. Srinivasan: CAM-MAC: A Cooperative Asynchronous Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks, Proc. Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS), 3rd International Conference on, pp.1-10 (2006).
- [2] J. Shi, T. Salonidis, E. W. Knightly: Starvation mitigation through multi-channel coordination in CSMA multi-hop wireless networks, Proc. of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, pp.214-225 (2006).
- [3] T. Kuang, C. Williamson: A Bidirectional Multi-Channel MAC Protocol for improving TCP performance on Multi-hop Wireless Ad Hoc Networks, Proc. of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, pp.301-310 (2004).
- [4] J. Mo, H. W. So, and J. Walrand: Comparison of multichannel MAC protocols, Mobile Computing, IEEE Transactions, pp. 50-65 (2008).
- [5] 三笥輝, 萬代雅希, 渡辺尚: 単一送受信機を利用するアドホックネットワークにおけるマルチチャンネル MAC プロトコルの基礎検討, 電子情報通信学会技術研究報告, pp19-23 (2008).
- [6] S. Ivanov, D. Botvich, S. Balasubramaniam, N. Popova: Avoiding redundant channel blocking in cooperative multi-channel MAC protocols through virtual topology inferencing, Proc. Communications Workshops, IEEE International Conference on, pp.1-5 (2009).
- [7] J. So, N. Vaidya: Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver, Proc. of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, pp. 222-233 (2004).