

無線メッシュ網のための 無線 LAN の緩い時分割による仮想多チャンネル化

Nenhuangmala Thippavanh^{†,a)} 吉廣 卓哉^{‡,b)}

無線メッシュ網は、固定された無線基地局間を無線通信により接続したネットワークであり、活発に研究が進められている。無線メッシュ網では、単一の周波数チャンネルを時分割することで送信フレームの衝突を防ぐ STDMA を用いた研究が多数見られるが、ノード間の正確な同期が必要になり、スケラビリティの問題が生じる。一方で、広く普及した IEEE802.11 を用いた無線メッシュ網は、隠れ端末問題のため十分なスループットを発揮することができない問題がある。本研究では、IEEE802.11 を対象として、緩く時分割をすることにより、単一周波数を仮想的に多チャンネル化する手法を提案する。提案手法を何らかのスケジューリング法と併用することにより、隠れ端末問題を生じない効率的な通信を実現できる。また、提案手法は緩く（ルーズに）同期すれば良いため、IEEE802.11 の TSF 機能による同期でも動作でき、実現性があること、IEEE802.11 を時分割して用いるため、既存の IEEE802.11 通信との親和性が高く、2.4GHz 帯を用いた高効率な無線メッシュ網を実現できること、などの利点がある。

1. はじめに

無線メッシュ網は、固定された無線基地局間を無線通信により接続したネットワークであり、ネットワークインフラストラクチャを低コストに構築する技術として活発に研究されている。無線メッシュ網では、基地局間の電波干渉を低減して高速通信を実現することが重要であり、そのために様々な MAC プロトコルが用いられる。

現在、無線メッシュ網を実現するためによく研究されている代表的な MAC プロトコルとして TDMA (Time Division Multiple Access) がある。TDMA では、単一の周波数チャンネルを時分割することにより小さなスロットに細分化し、そのうえで、各ノードやリンクに利用できるスロットを割り当てるスケジューリングを行うことにより、衝突のない効率的な通信を実現する[1][2]。TDMA は衝突のない通信を実現できるため通信速度が高い利点があるが、正確なスロットの同期が必要であるため、スケラビリティの問題を生じる。また、CSMA/CA との親和性が悪く、誰もが利用できる 2.4GHz 帯、5GHz 帯の利用は難しい。

一方、IEEE802.11 に採用され、非常に良く普及している CSMA/CA を MAC プロトコルに用いた無線メッシュ網も活発に研究されている[3]。CSMA/CA は、電波状況に応じて柔軟な通信が可能であるが、隠れ端末問題の影響が大きく、スループット性能が低い欠点がある。隠れ端末問題を解決するために、RTS/CTS[13]が提案されているが、晒し端末問題により通信効率が悪くなる問題[14]や、電波の減衰の影響で RTS/CTS が働かない問題などがあり[15]、その効果は限定的である。また、スループットを向上するために、OLSR[4]や AODV[5]等の経路制御プロトコルにリンクメトリックを導入することが提案されている[3]。リンクメトリックとは、観測に基づいて数値化されるリンクの通信品質であり、リンクメトリックを用いて最短経路を計算す

ることで、できるだけリンク品質の良い経路を用いた通信が可能になる。代表的なメトリックとしては、ETX (Expected Transmission Count) [6]や ETT (Expected Transmission Time) [7]が知られており、様々な状況で通信性能を向上することが知られている。しかし、リンクメトリックでは隠れ端末問題を十分に解決することができず、スループットは依然として低い水準である。

CSMA/CA を用いて高スループットのネットワークを実現するために、複数の周波数チャンネルを用いることも提案されている。単一のネットワークインタフェースを用いて複数の周波数チャンネルを切り替えるマルチチャンネル MAC プロトコルが多数提案されている[8]。しかし、貴重な周波数資源（周波数チャンネル）を多く必要とする点だけでなく、隠れ端末問題を解消できていない点、CSMA/CA との親和性が悪い点が課題として残る。また、複数の IEEE802.11 インタフェースを用いた無線メッシュ網も提案されているが[7][9][10][11]、異なる周波数であってもアンテナ同士が近距離にあると干渉する問題があるだけでなく、隠れ端末の問題も解消されておらず、スループット性能は依然として低い水準にとどまっている。

我々は、文献[16]で、IEEE802.11 を対象として、単一の周波数チャンネルを時分割することにより、仮想的に多チャンネル化する手法を提案した。本手法と、衝突が発生しない何らかのスケジューリング法を組み合わせることで、少ない周波数資源を用いて衝突の少ない無線メッシュ網を実現することができる。しかし、文献[16]では、時分割により仮想チャンネルを切り替える時にフレームが衝突する問題があり、タイミング同期が緩い（精度が低い）場合には対応できていない問題があった。

これに対して本研究では、仮想チャンネル切替時に RTS/CTS を用いることで、切替時の衝突を削減する手法を組み込むことを提案する。これにより、仮想チャンネルの切替時のフレーム衝突を抑制でき、緩やかなタイミング同期でも動作できる。提案手法では、TDMA とは異なり、ノード間の同期は緩くても良いため（つまり、同期の精度が

† 和歌山大学大学院システム工学研究科

‡ 和歌山大学システム工学部

a) s151060@sys.wakayama-u.ac.jp

b) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

それほど高くなくても良いため), スケーラビリティの問題が解消される. さらに, 提案手法は IEEE802.11 に基づいて動作するため, IEEE802.11 を用いた他の通信システムとの通信資源の共有が可能であり, 一般利用可能な 2.4GHz 帯や 5GHz 帯での無線メッシュ網の利用が可能になる利点もある. 本論文では, 緩い時分割による仮想多チャンネル化手法を提案したうえで, そのスループット性能, オーバーヘッド, 及びタイミング誤差への耐性を評価する. なお, スケジューリング法は本論文の対象外とする. スケジューリング法については, 文献[17], [18]を参照されたい.

本論文は, 次のように構成される. まず, 第2章では通信スループットを著しく損なう原因の一つである, 隠れ端末問題について述べる. 第3章では提案手法を説明する. 第4章ではシミュレーション評価について述べる. 最後に, 第5章で本論文をまとめる.

2. 隠れ端末問題

2.1 CSMA/CA

IEEE802.11 無線 LAN は周波数が異なる複数の通信チャンネルを持つが, 異なるノードから同じチャンネルで同時に電波を受信すると, 電波が干渉して正しくデータを受信できない. 無線 LAN では, 同一の無線チャンネルを複数ノードで共有し, このような電波の衝突を解決するために, CSMA/CA という仕組みが用いられている. CSMA/CA では, ノードが電波の送信を開始する前に, 自分の通信可能域内に通信中のノードがないかを検知する (キャリアセンス). 通信中のノードがない場合には, ランダムな時間 (バックオフ時間) だけ待機してからデータを送信する. この仕組みにより, 無線 LAN では, キャリアセンスできる範囲内のフレームの衝突を防ぐことができる.

2.2 隠れ端末問題

無線 LAN では, キャリアセンスできる範囲内では送信フレームの衝突を防ぐことができる. しかし, 互いにキャリアセンスできない位置にある2つのノードが同時にデータの送信を開始すると, 受信ノードに複数の電波が同時に到達することがあり, 干渉によって, 正しくデータを受信できなくなる隠れ端末問題がある. この問題により, CSMA/CA が動作する無線メッシュ網では高い確率で衝突が発生し, その結果, 通信性能が著しく低下する.

図1の例を用いて隠れ端末問題を説明する. この図では, ノードAとノードCは2ホップ離れており, 互いにキャリアセンスできない. ノードAからノードDへの通信フローが発生したとき, 隣接ノードはキャリアセンスできる範囲内であるため, CSMA/CA によりフレーム衝突を防ぐことができるが, ノードAとノードCは互いにキャリアセンスできない位置にあるため, CSMA/CA が上手く動作できず, ノードAとノードCが同時にデータを送信する可能性が高い. 例えば, ノードAがノードBにデータを送信すると同

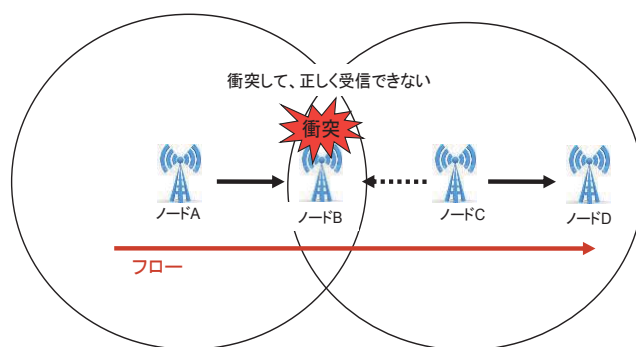


図1: 隠れ端末問題

時にノードCがノードDにデータを送信すると, ノードBにおいて電波が衝突して, ノードBは正しくデータを受信できなくなる. この問題は一般に, 隠れ端末問題と呼ばれる.

3. 無線 LAN の時分割による仮想多チャンネル化手法

3.1 提案手法の動作

無線メッシュ網において, 隠れ端末関係がある全てのノードを異なるチャンネルで送信すれば, フレーム衝突のような問題が起こらない. しかし, このアプローチでは, ネットワークが大きくなると, 衝突をなくすためには, チャンネル数が多く必要になる. IEEE802.11 無線 LAN では独立したチャンネルを十分に確保するのは難しい. そこで本研究では, 単一の周波数チャンネルを時分割することにより, 仮想的に多チャンネル化を実現し, 隠れ端末関係がある2つノードが異なる仮想チャンネルで送信を行うことで, フレームの衝突を防ぐ. 提案手法では, k 個の仮想チャンネルを実現する場合には, 一定時間毎に順番に k 個の仮想チャンネル (本手法ではスロットと呼ぶ) を切り替える. チャンネルの切り替えタイミングを緩く同期させることで, 各チャンネルがほぼ独立に通信できる. 本仮想チャンネル化手法に, ノードやリンクにフレームを送信して良い仮想チャンネルを割り当てる何らかのスケジューリング法を組み合わせることで, フレーム衝突による通信性能の低下を抑えた効率的な無線メッシュ網が実現できる. なお, 本手法では, CSMA/CA とスケジューリングの組み合わせにより, 原則としてフレームの衝突を防ぐことを意図する. CSMA/CA が動作することで, 隣接ノードが同じスロットに割り当てられても, フレームの衝突を防ぐことができる. 一方で, 適切なスケジューリングにより, 隠れ端末による衝突を防ぐことができる. スケジューリング法については, 例えば, 文献[18]を参照されたい. 文献[18]では, あるネットワークに対して, できるだけ必要なチャンネル数が少なくなるように, CSMA/CA の性質を利用したスケジューリングを行う. その結果, 少ないチャンネル数で, 隠れ端末による衝突を防ぐスケジューリングが得られる. 提案手法

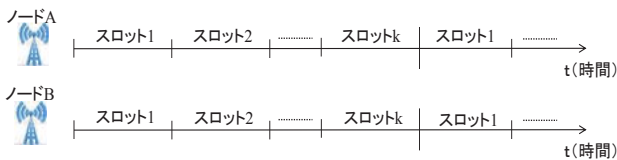


図 2：時分割による仮想多チャンネル化

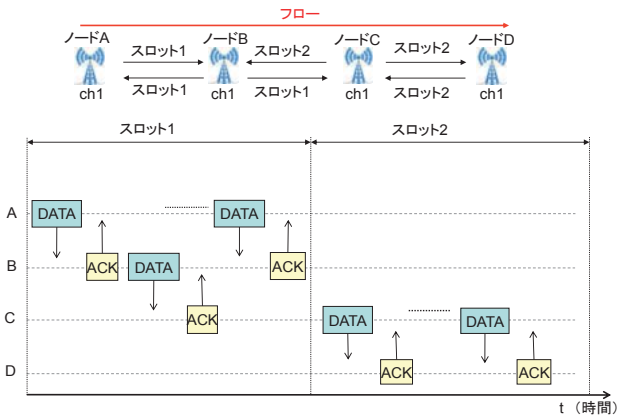


図 3：提案手法の動作例

では、スケジューリング法に依存して必要なチャンネル数を仮想チャンネル数 k として予め設定しておく。

図 2 を用いて提案手法を説明する。ノード A と B があり、共通の仮想チャンネル数 k が設定されている。スロット 1, 2, ..., k が一定時間 t^{slot} ごとに切り替わり、 kt^{slot} ごとに同じスロットになる。 t^{slot} としては、10~100[ms]程度の比較的長い時間を想定する。各ノードには時計が内蔵されており、自分の時計により、自分が送信可能な(送信するように割り当てられた)スロットであるかを判断する。送信可能スロットでは、CSMA/CA を用いてデータを送信し、送信不可能スロットでは待機する。データを受信したノードは、すぐに ACK フレームを返す。つまり、データフレームや RTS フレームは送信可能スロットのみで送信するが、ACK フレームと CTS フレームは全てのスロットで送信できる。

図 3 に提案手法の動作例を示す。4 つのノードから構成されるネットワークにおいて、全てのノードが同じ周波数チャンネル 1 に設定されている。つまり、ノード A と C、ノード B と D が、それぞれ隠れ端末の関係になる。そこで、スロット数 k を 2 とし、ノード A と B にはスロット 1 を、ノード C と D にはスロット 2 を割り当てるスケジューリングを行う。その結果、隠れ端末の関係にある 2 ノードは異なる仮想チャンネル(スロット)でフレームを送信するため、隠れ端末問題を回避できる。ノード A が D 宛にデータを送信する場合を考える。まず、スロット 1 では、ノード A と B がデータを送信する。ノード A と B が CSMA/CA によりデータを送信することで、パケットはノード C の方向に転送される。このとき、ノード A のデータに対しては B が ACK を返し、ノード B のデータには C が ACK を返す。

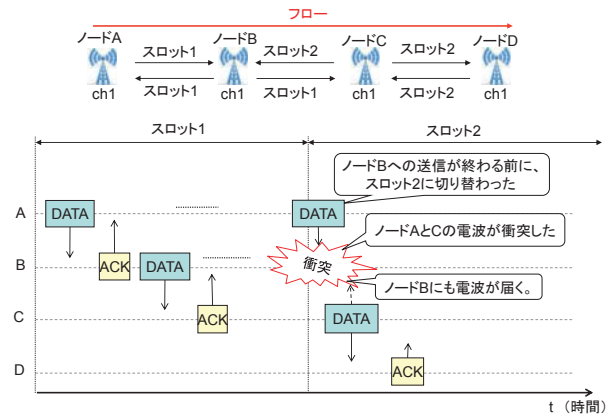


図 4：スロット切替時のオーバーヘッド

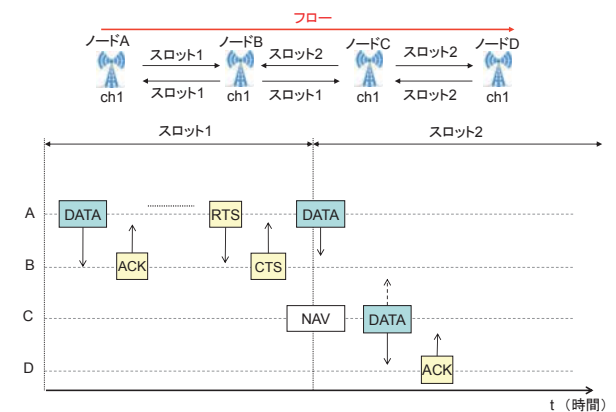


図 5：RTS/CTS によるスロット切替時の衝突回避

次に、スロット 2 に切り替わると、同様に、ノード C と D がデータを送信する。その結果、隠れ端末問題によるフレームの衝突を発生させずに、データはノード D に到達できる。

提案手法では、単一の周波数チャンネルを k 個の仮想チャンネルに分割することで、その周波数チャンネルの通信のスループットの k 分の 1 程度の通信速度を期待できる。

3.2 RTS/CTS によるスロット切替時の衝突回避

提案手法では、スロットの切替え時に、一時的にはあるが、隠れ端末問題によるフレームの衝突が発生する可能性がある。隠れ端末の関係にある 2 つのノードが、切替わる前のスロットと後のスロットでそれぞれデータを送信する場合である。具体例を図 4 に示す。スロット 1 で、ノード A が B にデータを送信し、送信がまだ終わらない状態で、スロット 2 に切替わったとする。このとき、スロット 2 では、ノード C は、隠れ端末の位置にある A のデータを検知(キャリアセンス)できないため、D にデータを送信する。その結果、ノード A と C のフレームが衝突し、ノード B は A のデータを正しく受信できない。

この問題(スロット切替時のフレーム衝突)は、スロットが切り替わるタイミングのみで発生し、ネットワークの通信効率を低下させる。また、スロット切替のタイミングがずれる場合にも、この問題は発生する。この問題を解消

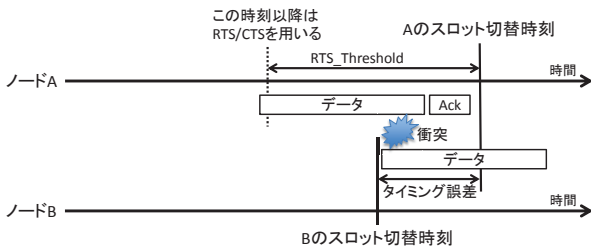


図 6 : タイミング誤差によるフレーム衝突

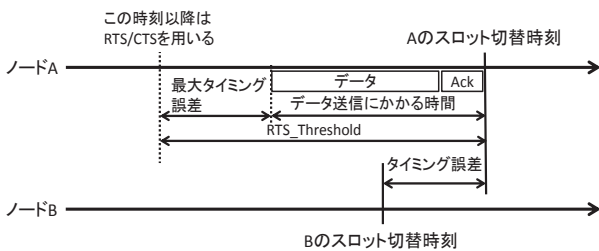


図 7 : RTS/CTS を用いる閾値の設定

するために、提案手法では、スロット切替時付近のみで RTS/CTS を適用する。

図 5 に RTS/CTS を適用した例を示す。この例は図 4 と同様の場合を表しているが、スロット切替が近づくと、データ送信時に RTS/CTS を発行する。ノード A が RTS/CTS を発行することで、ノード C は A のデータ送信が完了するのを待ち、その後、データを送信する。その結果、スロット切替時のフレーム衝突が起こらず、通信が効率化される。

RTS/CTS を適用した場合のノードの動作を、具体的に説明する。各ノードは、データを送信する際に、自分の時計を確認し、次のスロット切替までの時間 $t^{slotEnd}$ を計算する。これが RTS 閾値より小さい ($t^{slotEnd} < RTS_Threshold$) 場合には RTS を送信し、そうでない場合には RTS/CTS を使わずにデータを送信する。

RTS 閾値 $RTS_Threshold$ として、ノードがデータを送信し、ACK が受信されるまでの時間を設定する。つまり、現在のスロットに、データを送信し ACK を受信するために必要な時間が残っていない場合に、RTS/CTS を用いる。具体的には、 $RTS_Threshold$ は、データ送信時間、SIFS、ACK 送信時間の各時間の和となる。ここで、データ送信時間、SIFS、ACK の時間は通信速度と通信規格に依存して決まる。

ここで、ノード間でスロット切替タイミングにずれがある場合には、上記の $RTS_Threshold$ の値では、フレームが衝突する恐れがある。例えば、図 6 に、ノード B のスロット切替タイミングがノード A よりも早いために、フレームが衝突する場合を示す。 $t^{slotEnd}$ が $RTS_Threshold$ よりも大きいにもかかわらず、A と B のフレームが衝突する。このような衝突を避けるために、想定されるノード間のタイミング誤差の最大値をパラメータとして設定しておく (最大タイミング誤差値と呼ぶ)、これを $RTS_Threshold$ に加算す

表 1 : シミュレーションパラメータ

シミュレーション時間	120秒
送信フロー	CBR通信 (30秒から90秒)
CBRペイロードサイズ	512byte
送信レート	160~1600kbps
リンク帯域	6Mbps
MACプロトコル	IEEE802.11g
スロット間隔 (t^{slot})	100ms
仮想チャンネル数 (k)	4
ルーティングプロトコル	OLSRv2
LINK_HOLD_TIME	30秒

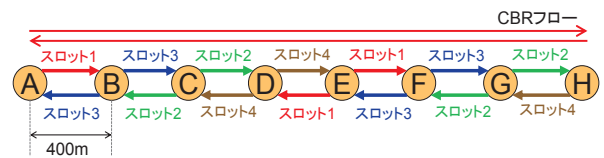


図 8 : シミュレーショントポロジ

る (図 7)。つまり、 $RTS_Threshold$ は、フレーム送信時間、SIFS、ACK 送信時間、及び最大タイミング誤差値を合計した値となる。こうすることで、タイミング誤差があっても、フレームの衝突を防ぐことができる。

3.3 スロット切替えのタイミング同期

スロット切替タイミングの同期には、IEEE802.11 の仕組みを利用する。IEEE802.11 には、ビーコンフレームに時刻を格納するフィールドがあり、ビーコンフレームを介してノード間のタイミング同期を行う TSF (Timing Synchronization Function) と呼ばれる仕組みが存在する。提案手法では、この機能によって同期されたタイミングを用いて、スロット切替タイミングの同期が可能であると考えている。TSF を用いた場合には、ネットワーク全体が同期されず、異なる時刻で同期された複数の島 (ノード集合) に分かれる問題が指摘されており、これを解決する手法が複数提案されている。Chiang らは、この問題の効率的な解決法を提案したうえで、実機環境を模擬した環境を用いてタイミング同期の誤差を測定した [12]。その結果、10 ホップのネットワークにおいて、最大 300 μ 秒程度の同期誤差を観測したと報告している。

このように、TSF によるタイミング同期ではある程度の同期誤差を含むが、提案手法では厳密なタイミング同期は必要なく、緩やかなタイミング同期で良いため、TSF による同期の精度で十分に動作すると考えられる。

4. 評価

4.1 評価目的

本評価では、3つの観点からの評価を行う。1つ目の観点は、提案手法によりスループットがどの程度向上するかである。同じ1つの周波数チャンネルを用いていても、従来

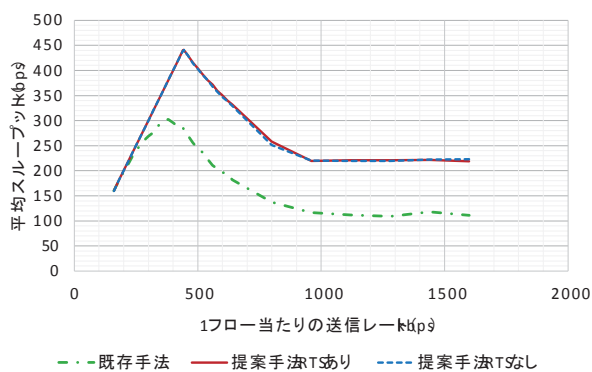


図9：提案手法と既存手法のスループットの比較
(スロット間隔 100[ms])

の IEEE802.11 を用いた場合と、提案手法により仮想多チャンネル化をした場合では、通信性能が異なる。本評価では、仮想多チャンネル化を導入することで、通信スループットがどの程度向上し得るのかを、簡単な通信シナリオを用いて確認する。2つ目の評価の観点は、RTS/CTSを適用することにより、どの程度オーバーヘッドを低減できるかである。3.2 節に述べたように、スロットの切替え時にフレームの衝突が発生する可能性がある。提案手法は、一定量の周波数資源を、複数の仮想チャンネルに分割して利用する。このため、理想的には、 k 個のチャンネルに分割した場合には、1チャンネルあたりではリンク容量の $1/k$ のスループット性能を発揮できるはずである。しかし、実際には、オーバーヘッドにより、スループット性能は少し低下する。本評価では、スロット切替時付近のみで RTS/CTS を適用することにより、どの程度のオーバーヘッドがあるかを、RTS/CTS を適用しない場合と比較して評価する。3つ目の評価の観点は、タイミング誤差への耐性である。提案手法は、スロット切替のタイミングがずれる場合でも、通信性能に影響を与えないことを評価する。

4.2 評価シナリオ

提案手法の性能をネットワークシミュレータ Scenargie ver.1.6 を用いて評価する。評価に用いたネットワークトポロジを図8に示す。8つの固定ノードを400[m]間隔で一列に並べた。そのうえで、ノードAからH、及びノードHからAに、2本の CBR (Constant Bit Rate) 通信を発生させ、既存手法と提案手法の通信性能を比較した。なお、既存手法は仮想多チャンネル化をしない標準の IEEE802.11g である。

ルーティングプロトコルとしては、Scenargie に付属している OLSRv2 を用いる。ただし、従来手法においてリンクの切断を防ぐために、LINK_HOLD_TIME を30秒に設定した。MACプロトコルとしては IEEE 802.11g を使い、リンク速度は6[Mbps]とした。シミュレーション時間は120秒であるが、OLSRの経路の収束を待つため、CBR通信はシミュレーション開始後30秒~90秒の間だけ行った。送信

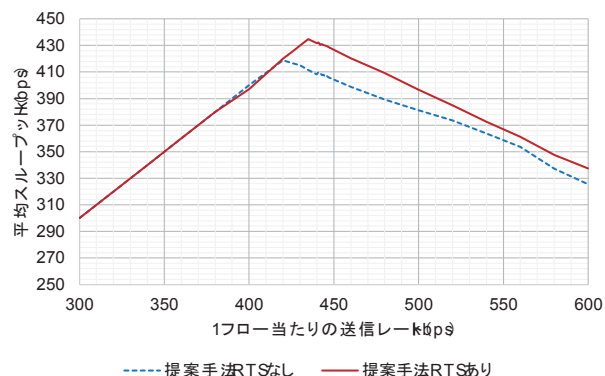


図10:提案手法のスループット(スロット間隔 10[ms])

したフレームは、シミュレーションが終了する120秒後には、全てが宛先に到達するか損失した。CBRのペイロードサイズは512[Bytes]とし、1フローあたりの送信レートを160[kbps]から1600[kbps]の間で変動させた。RTS/CTSを利用する。上記のシミュレーション設定のまとめを表1に示す。

提案手法では、1スロットあたりの時間間隔 t^{slot} を100[ms]に設定した。本シミュレーションでは、ノード間のスロット切替タイミングは完全に同期されていると仮定した。また、各スロットにおいて隠れ端末問題が発生しないように、スロット数を $k=4$ とし、図8のようにスケジュールした。すなわち、ノードAとEはスロット1、BとFは3、CとGは2、DとHは4にデータを送信できる。なお、このスケジュールでは、2ホップ離れたノードができるだけ時間的に隣接したスロット(例えばスロット2に対しては、1と3が隣接する)に割り当てられるようにした。これは、スロットの切替時にできるだけフレームが衝突し、オーバーヘッドをできるだけ大きく見積もるようになる意図がある。

タイミング誤差への耐性についてのシミュレーション実験は、シミュレーション設定を変更して実施した。シミュレーション時間を1200秒に設定し、CBR通信はシミュレーション開始後30秒~1170秒の間に行った。ノードの各スロット切替において、切替時刻にランダム値を加えることで、ノード間の最大タイミング誤差が0, 120, 240, 360, 480, 600 μ 秒になるようにした。各場合において、 $RTS_Threshold$ を求めるために必要な「最大タイミング誤差値」を0, 120, 240, 360, 480, 600 μ 秒に設定した。送信レートを440[kbps]に固定し、各最大タイミング誤差値によってスループットを測定する。

4.3 実験結果：スループット

図9に、既存手法、RTS/CTSを用いる場合、及び用いない場合の提案手法の平均スループットを示す。横軸はCBRフロー1本あたりの送信レート、縦軸は1フローあたりの平均スループットである。既存手法は300[kbps]あたりからスループットが低下するのに対して、提案手法では

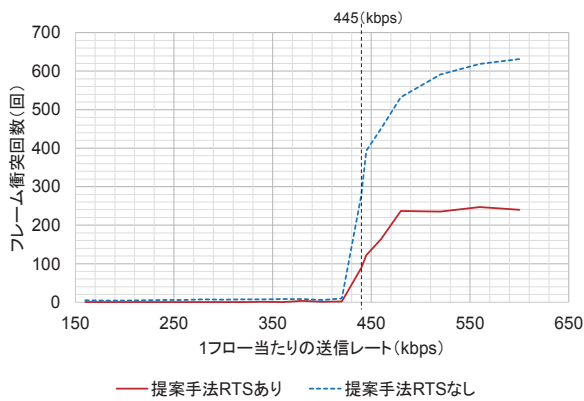


図 11：提案手法のオーバーヘッド

445[kbps]までは送信レートとスループットがほぼ一致し、ほぼ全ての送信フレームが宛先に到達したことがわかる。これは、既存手法では隠れ端末問題により通信性能が劣化したのに対して、提案手法ではネットワークが飽和するまでは隠れ端末の影響がなかったことを示す。

一方、提案手法では、送信レートが 445[kbps]を超えると、スループットが低下していく。これは、送信レートがネットワークの許容帯域を超え、飽和したことを示す。ちなみに、2 ノードのみのシナリオで、通信速度 6[Mbps]の IEEE802.11g を用いて通信した時の最大スループットは 3.56[Mbps]であった。この許容帯域を 4 スロット、2 フローで割るため、図 9 における平均スループットの上限は、 $3.56/8=0.445[\text{Mbps}]=445[\text{Kbps}]$ である。つまり、提案手法は、許容帯域の上限値に近いスループットを達成したことがわかる。

送信レート 445[kbps]以降では、ネットワークが飽和し、スループットが低下する。これは、送信キューによる影響である。図 8 において、各フローの送信レートが、許容帯域である $Max \approx 445[\text{kbps}]$ を超えると、ノード A から B には $2 \times Max$ までの速度でデータを送信できるのに対して、ノード B は、隣接ノード A と C に、合計して Max までの速度でしかデータを送信できない。このため、ノード B の送信キューは溜まり続け、最終的には溢れる。ノード G も同様である。このような不安定な状態になるため、ネットワークが飽和すると、十分なスループットが出ない結果となる。

ところで、図 9 では、スロット切替時に RTS/CTS を用いる場合と用いない場合で、スループットはほぼ同じである。これは、スロット切替時のオーバーヘッドが非常に小さいことを示している。しかし、1 スロットあたりの時間間隔を短くすると、オーバーヘッドが大きくなり、差が見えてくる。図 10 に、1 スロットあたりの時間間隔 t^{slot} を 10[ms] に設定したとき、RTS/CTS を用いる場合の提案手法と RTS/CTS を用いない場合の提案手法の平均スループットを示す。 t^{slot} が短くなると、スロット切替回数が増えて、

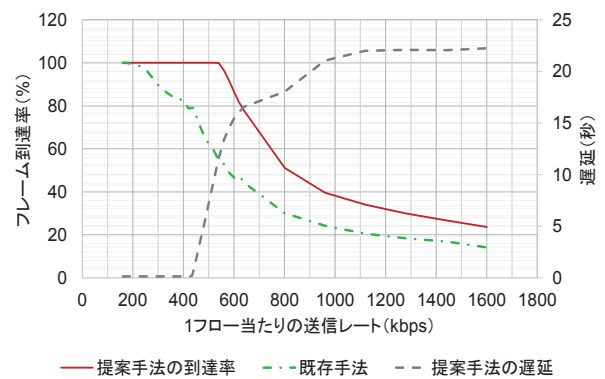


図 12：フレーム到達率の比較

その分でオーバーヘッドが増えるため、RTS/CTS を用いない場合ではスループットが低下する。

4.4 評価結果：オーバーヘッド

次に、提案手法のオーバーヘッドを評価する。図 11 に、送信レートを変動させたときの、提案手法のフレーム衝突回数を示す。また、図中には、ネットワークが飽和した 445[kbps]の時点点を点線で示した。図より、ネットワークが飽和する直前の 420[kbps]前後から、フレームの衝突回数が増加したことがわかる。これは、ネットワークが飽和に近づくまでは、スロット切替時のフレーム衝突が発生がしないため、提案手法によるオーバーヘッドが発生しないことを示す。ネットワークが飽和すると、スロット切替時のフレーム衝突の発生が増え、オーバーヘッドが増大する。スロット切替直前に、RTS/CTS を用いることよりスロット切替時のフレーム衝突を低減することができる。図 11 より、RTS/CTS を用いる場合には、用いない場合よりフレーム衝突回数を概ね 2 分の 1 程度に低減することが分かる。

RTS/CTS を用いることよりフレーム衝突を完全に回避できない理由を、図 8 を用いて説明する。ノード B はスロット 3、ノード D はスロット 4 を用いて送信する。スロット 3 が切替直前に、ノード B が A に RTS を送信する。ノード A が RTS を受信後、CTS をノード B に送信する。そのとき、ノード D は RTS と CTS を受信しない状態になる。ノード B は A からの CTS を受信したら A へのデータ送信を始める。ノード B の送信がまだ終わらない状態で、スロット 4 に切り替わって、ノード D が C にデータを送信始める。ノード C は、B からのデータも受信するため、D から送信したデータと衝突することになる。この場合、ノード A が B からのデータを受信できるが、ノード C は D からのデータを受信できない。このような衝突は、2 ホップ離れたノードが隣接したスロットを利用する場合のみ発生する。これは、ある種の隠れ端末問題であり、スケジューリングにより解消されることが望ましい。

図 12 に、送信レートを変動させたときの、フレーム到達率と到達遅延を示す。まず、既存手法では早期に到達率が下がるのに対して、提案手法では、ネットワークの飽和付

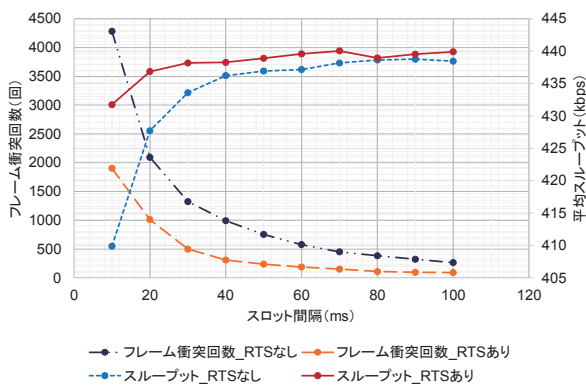


図 13：スロットあたりの時間間隔の変化

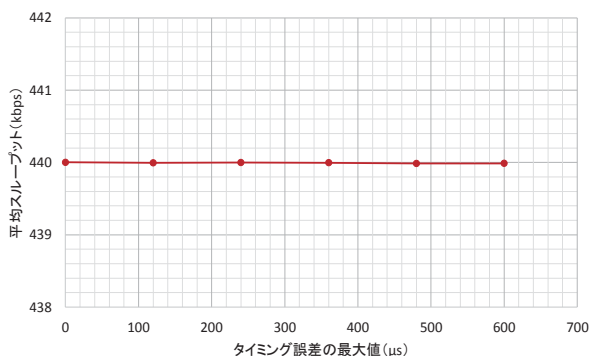


図 14：タイミング誤差がある場合のスループット

近までは、到達率を 100% 近くに保つことがわかる。一方、ネットワークが飽和する 445[kbps] を超えると、宛先までの到達遅延が急激に増加することがわかる。これは、飽和によってキュー長が伸びるためである。なお、飽和時点を超えても、提案手法の到達率は暫く 100% 近くを保っているが、これは、CBR フローの送信が終了する 90[秒] の時点ではキューが溢れず、最終的に全てのフレームが宛先に到達できたためである。

さらに、図 13 に、送信レートを 440[kbps] に固定し、1 スロットあたりの時間間隔 t^{slot} を変化させた場合の、RTS/CTS を用いる場合と RTS/CTS を用いない場合のスループットとフレーム衝突回数を示す。RTS/CTS を用いない場合では、時間間隔 100[ms] では、フレームの衝突回数も僅かであり、平均スループットも送信レートに近い値であったが、スロットの時間間隔が短くなると、特に 10[ms] 近くでは、急激にフレーム衝突回数が増加することがわかる。図 13 より、RTS/CTS を用いる場合には、RTS/CTS を用いない場合よりも、フレーム衝突回数が少なく、スループットが大きくなることが分かる。

本実験ではリンク速度を 6[Mbps] としたが、リンク速度が向上すれば、スロットの時間間隔が同じであっても、これらの衝突頻度やスループットは改善するであろうことは、容易に推測できる。また、提案手法のオーバーヘッドは、ネットワークが飽和に近い場合のみに発生するため、その影響は限定的である。しかし、図 13 に示される特性を把握

したうえで、適切にスロットの時間間隔を設定することは、性能のチューニングにおいて重要であろう。

4.5 評価結果：同期誤差に対する頑強性

図 14 に、ノード間のスロット切替タイミングに誤差を発生させ、最大タイミング誤差値を変更させた場合の、RTS/CTS を適用したときのスループットを示す。横軸は最大タイミング誤差値、縦軸は 1 フローあたりの平均スループットである。図 14 より、スロット切替タイミングに誤差があっても、最大タイミング誤差値を適切に設定すれば、スループットには影響を与えないことが分かる。実験結果から、提案手法では、緩いタイミング同期でも動作できることが示された。

5. おわりに

本研究では、無線メッシュ網のための無線 LAN の時分割による仮想多チャンネル化手法を提案した。提案手法を適切なスケジューリング手法（チャンネル割当手法）と併用することにより、隠れ端末問題の影響を排除した効率的な無線メッシュ網を実現する。

また、ネットワークシミュレータ Scenargie を用いて提案手法の性能評価を行った。評価の結果、隠れ端末問題による衝突をほぼ発生させず、ネットワークが飽和するまでは概ね 100% のフレーム到達率を達成できることを確認した。また、単一の周波数チャンネルを仮想多チャンネル化するための提案手法のオーバーヘッドは、ネットワークが飽和に近づくまではほとんどなく、ネットワーク飽和時にも僅かであることがわかった。ただし、スロットの間隔を短くすると、オーバーヘッドは無視できない程度に増加することも示された。さらに、ノード間のタイミング誤差がある場合にも、設定した最大タイミング誤差値の範囲内であれば、通信性能に影響を与えないことを確認した。

参考文献

- 1) R. Nelson and L. Kleinrock, "Spatial TDMA: A Collision Free Multi-hop Channel Access Protocol," Communications, IEEE Transactions, vol.33, No.9, pp.934-944, 1985.
- 2) A. D. Gore and A. Karandikar, "Link Scheduling Algorithms for Wire-less Mesh Networks," IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol.13, No.2, 2011.
- 3) I. F. Akyildiz and X. Wang, "Wireless Mesh Networks," John Wiley & Sons, Ltd, Publication, 2009.
- 4) T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," IETF RFC3626, 2003.
- 5) C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF RFC3561, 2003
- 6) D. De. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Sensor Networks," In MOBICOM (2003).
- 7) Draves, R., Padhye, J. and Zill, B., "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks, Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking (MOBICOM2004)," pp.114-128, 2004.

- 8) J. Mo, H.S So, and J. Walrand, "Comparison of Multichannel MAC Protocols," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.7 Issue.1, 2008.
- 9) M.K. Marina, S.R. Das, A.P. Subramanian, "A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks," Computer Networks, Vol.54, pp.241-256, 2010.
- 10) H. Kanaoka and T. Yoshihiro, "Combining Local Channel Selection with Routing Metrics in Multi-channel Wireless Mesh Networks," The seventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2014), 2014.
- 11) 竹田 隼基, 吉廣 卓哉, "無線メッシュ網における協調的なチャンネル選択と送信タイミング制御による通信の高速化," 第 21 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2013), 2013.
- 12) J.H. Chiang and T. Chiueh, "Accurate clock synchronization for IEEE 802.11-based multi-hop wireless networks," 17th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP2009), pp.11-20, 2009.
- 13) B. Bharghavan et al., "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs," In Proc. ACM SIGCOMM'94, 1994.
- 14) J.L. Sobrinho, R.d. Haan, J.M. Brazio, "Why RTS-CTS is not your ideal wireless LAN multiple access protocol," In Proc. WCNC'05, 2005.
- 15) K. Xu, M. Gerla, and S. Bae, "Effectiveness of RTS/CTS Handshake in IEEE 802.11 Based Ad Hoc Networks," Ad Hoc Networks, Vol.1, Issue.1, pp.107-123, 2003.
- 16) Nenhuanmala Thippavanh, 吉廣卓哉, "無線メッシュ網のための時分割による仮想多チャンネル化," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル DICOMO2014 シンポジウム, pp.345-350, 2014.
- 17) 西前太揮, 青木謙尚, 吉廣卓哉, "多チャンネル無線メッシュ網におけるリンク間干渉を最小化する経路制御法," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル DICOMO2014 シンポジウム, pp.339-344, 2014.
- 18) 西前太揮, 吉廣卓哉, "IEEE802.11 を用いた隠れ端末問題のない無線メッシュ網~ネットワークアーキテクチャとスケジューリング~, " 第 22 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2014) ,2014. (投稿中)