

# 無線メッシュ網のためのCSMAの仮想多チャネル化

ネンホアンマラー ティッパワン<sup>1</sup> 吉廣 卓哉<sup>2,a)</sup>

受付日 2015年5月13日, 採録日 2015年11月5日

**概要:** 無線メッシュ網は, 固定基地局を無線通信により接続したネットワークである. 無線メッシュ網のMACプロトコルとして, IEEE802.11等のCSMAに基づいた規格が用いられることが多いが, 隠れ端末の影響により, 十分な通信性能が達成できないという問題がある. 一方, 単一の周波数チャネルを時分割することで送信フレームの衝突を防ぐTDMAに基づいた無線メッシュ網も議論されているが, ノード間の正確なタイミング同期が必要であり, 実用化は容易ではない. そこで本論文では, 単一周波数チャネルを時分割することで仮想的に多チャネル化し, 各仮想チャネル内でIEEE802.11を動作させる新たなハイブリッドMACプロトコルを提案する. 提案手法を適切な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無線メッシュ網を実現できる. 提案手法は相応の誤差を含んだタイミング同期でも動作するため現実的であり, また, IEEE802.11を時分割して用いるため, 既存のIEEE802.11との親和性が高く, 2.4GHz帯や5GHz帯を用いた無線メッシュ網を実現できる.

**キーワード:** 無線メッシュ網, IEEE802.11, CSMA, 隠れ端末問題, RTS/CTS

## A Virtual Multi-channelled CSMA for Wireless Mesh Networks

THIPPAVANH NENHUANGMALA<sup>1</sup> TAKUYA YOSHIHIRO<sup>2,a)</sup>

Received: May 13, 2015, Accepted: November 5, 2015

**Abstract:** WMNs (Wireless Mesh Networks) have been deeply studied as a wireless network infrastructure. Although many studies adopt CSMA-based MAC protocols such as IEEE802.11, they have not achieved sufficient communication performance for practical use because of the hidden terminal problem. TDMA, which divide a single frequency channel into small slots, also has been studied as a tool toward collision-less high-speed WMNs, but they have a practical difficulty; they require accurate time synchronization. In this paper, we propose a new MAC protocol in which we divide a single frequency channel of IEEE802.11 into several virtual channels via coarse time division. With a suitable scheduling algorithm that is designed for our protocol, our MAC protocol works without collisions due to the hidden terminal problem. Our method is practical because it works under loose synchronization that involves considerable time drifts, and because it can coexist with the popular IEEE802.11 devices on the 2.4GHz or 5GHz band.

**Keywords:** wireless mesh networks, IEEE802.11, CSMA, hidden terminal problem, RTS/CTS

### 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さかんに研究されている. 無線メッシュ網では, 基地局間の電波干渉を低減させ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用いられる代表的な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

<sup>1</sup> 和歌山大学大学院システム工学研究科  
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

<sup>2</sup> 和歌山大学システム工学部  
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

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

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という利点があるが, 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 との親和性が悪く, どれも利用できる 2.4 GHz 帯, 5 GHz 帯での利用は難しい.

一方, IEEE802.11 に採用され, 広く普及している CSMA を MAC プロトコルに用いた無線メッシュ網もさかんに研究されている [3]. CSMA 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という欠点がある. 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という問題 [14] や, 電波の減衰の影響で RTS/CTS が働かないという問題等があり [15], フレームの衝突を完全に防ぐに至らないばかりでなく, スループット等の通信性能の改善効果も限定的である.

CSMA に基づいた無線メッシュ網でスループットを向上させる方法として, 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させ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 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ネルを切り替えるマルチチャネル 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 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 [7], [9], [10], [11]. しかし, 異なる周波数であってもアンテナどうしが近距離にあると干渉するという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.

本論文では, IEEE802.11 が広く用いられている 2.4 GHz 帯や 5 GHz 帯で動作する高速な無線メッシュ網を実現するために, CSMA に基づいて動作する IEEE802.11 との親和性が高く, 隠れ端末問題を解決できる新たな MAC プロトコル時分割 CSMA を提案する. 提案プロトコルは, TDMA と CSMA の優れた部分をあわせ持つハイブリッドプロトコルである. 提案プロトコルは, IEEE802.11 の単

一の周波数チャネルを時分割によりスロットに分割し, 仮想的に多チャネル化する. 各スロットの長さを比較的長くとり, スロット内部で IEEE802.11 (つまり CSMA) を動作させる. このようにすると, 送信フレームどうしが衝突しないようにスケジューリングを行い, 各ノードにフレームを送信してよい仮想チャネル (つまりスロット) を割り当てることで, 衝突のない高速な無線メッシュ網を実現できる. 同時に, スロット内部で CSMA を用いることで, 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るだけでなく, 緩い時刻同期を用いた場合, つまりスロット切替えに用いる時刻の同期に誤差がある場合でも, 通信性能への影響を最小限に抑えられる. さらに, 提案手法の IEEE802.11 への拡張は小さいため, 現在市販されている IEEE802.11 に準拠したハードウェアを用いて動作可能である. 提案プロトコルにより, 2.4 GHz 帯や 5 GHz 帯で動作でき, 安価に実装できる, 高速通信可能な無線メッシュ網の実現が期待できる.

なお, 本論文は, MAC プロトコルのみを扱い, 本プロトコルのためのスケジューリング法については取り扱わない. スケジューリングアルゴリズムに関しては, 文献 [16] を参照されたい.

本論文の構成を以下に示す. まず, 2 章では関連研究について述べ, 本論文の貢献を明らかにする. 3 章では従来の CSMA に基づいた無線メッシュ網において通信スループットを著しく損なう主な原因の 1 つである, 隠れ端末問題について述べる. 4 章では提案 MAC プロトコルを説明する. 5 章ではシミュレーション評価を行い, 提案プロトコルの有用性を評価したうえで, 最後に 6 章で本論文をまとめる.

## 2. 関連研究

TDMA と CSMA のハイブリッド MAC プロトコルは, 無線センサ網を対象として多数提案されている. しかし, センサ網とメッシュ網では通信に対する要求が異なるため, センサ網を対象とした MAC プロトコルをメッシュ網に適用すると不都合を生じる可能性がある. 本論文の貢献は, 無線メッシュ網を対象とした MAC プロトコルの仕組みとして, スロット切替え時に RTS/CTS を適用することを提案したことと, 性能をメッシュ網の観点から評価した点にある.

代表的な無線センサ網向けのハイブリッド MAC プロトコルとして, IEEE802.15.4 が標準化されている [18]. IEEE802.15.4 では, 時分割により CSMA を用いる区間 (スロット) と TDMA を用いる区間を区別することで, ノードが高密度に配置されたセンサ網でも, 衝突を低減させ効率的な通信を実現する. このように, 区間により CSMA と TDMA を切り替えるハイブリッド MAC プロトコルは多数提案されている [18], [19]. しかし, この種の

MAC プロトコルを、高速性を要する無線メッシュ網に適用すると、TDMA 区間のために高精度なタイミング同期が必要であり、TDMA と同じ同期誤差の問題が生じる。また、これらを CSMA と同じ周波数帯で動作させると、プロトコルの不整合から深刻な共存性問題が生じることが知られている [20]。このため、この種のハイブリッドプロトコルを、すでに IEEE802.11 が広く利用されている 2.4 GHz 帯や 5 GHz 帯で利用することは現実的ではない。

一方、文献 [21], [22] は、本論文と同様に、比較的大きな時分割スロットの内部で CSMA を動作させる方式を提案している。しかし、これらは無線センサ網を対象として設計されており、そのまま無線メッシュ網に適用すると通信性能が十分に発揮されない可能性がある。一般にメッシュ網では、センサ網とは異なり、(1) 高い通信スループット、(2) 低い伝送遅延、(3) 大きいパケットサイズ、等の実用上の要求がある。高いスループットを実現するためには、スロット切替え時のフレーム衝突を低く抑える必要がある。また、低い伝送遅延を実現するためにはスロット長が短い必要があるが、その場合には、スロット切替え回数が多くなり、その結果、衝突が増大する。さらに、ノード間のタイミング同期誤差や大きいパケットサイズの影響で、さらに通信性能が低下する可能性がある。そこで提案手法では、スロット切替え時に RTS/CTS を用いる仕組みを新規に導入し、スロット切替え時の衝突を低減させることで、性能低下を抑える。

### 3. 隠れ端末問題

#### 3.1 CSMA

IEEE802.11 は周波数が異なる複数の通信チャンネルを持つが、複数の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。そこで、同一の通信チャンネルを複数ノードで共有し、かつ、送信フレームの衝突を避けるために、CSMA と呼ばれるアクセス制御方式が用いられる。CSMA では、ノードがフレーム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、IEEE802.11 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。

#### 3.2 隠れ端末問題

CSMA を用いることで、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フレームの送信を開始し、受信ノードに複数のフレームが同時に到達すると、干渉によって、正しくフレームを受信できない。この問題は隠れ端末問題と呼ばれ、古くから

CSMA の通信性能を低下させる問題として知られている。隠れ端末問題により、CSMA が動作する無線メッシュ網では高い確率でフレームの衝突が発生し、その結果として通信性能が著しく低下する。これを防ぐことが、高速な無線メッシュ網を実現するための鍵の 1 つである。

### 4. CSMA の時分割による仮想多チャンネル化

#### 4.1 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すべてのノードが直交するチャンネルでフレームを送信すれば、衝突は起こらない。しかし、このアプローチでは、一定以上の規模のネットワークでは、衝突を防ぐために非常に多くのチャンネルが必要になり、非現実的である。実際に IEEE802.11g の 2.4 GHz 帯では、直交したチャンネルは最大でも 3 つしか確保できない。そこで本論文では、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、十分な数の直交チャンネルを確保する。隠れ端末関係がある 2 つの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、一定時間ごとに順番に  $k$  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、フレームを送信してよい仮想チャンネルを各ノードに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 とスケジューリングの組合せにより、原則としてフレームの衝突を防ぐことを意図する。

CSMA が動作すると、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、CSMA では防げない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、たとえば、文献 [16] を参照されたい。文献 [16] 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 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  $k$  としてあらかじめ設定しておく。なお、無線メッシュ網ではあらかじめ設計されたトポロジが用いられるため、事前のスケジューリング計算により、干渉が十分に少なくなる適切な仮想チャンネル数  $k$  を決定すればよい。仮想チャンネル数やスケジューリングは事前に管理者によって各ノードに設定される。

提案手法を、図 1 を用いて説明する。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



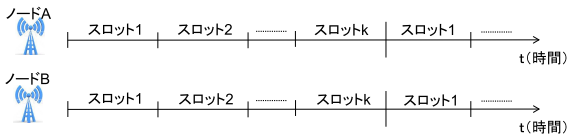


図 1 時分割による仮想多チャネル化

Fig. 1 Virtual multi-channeling with time division.

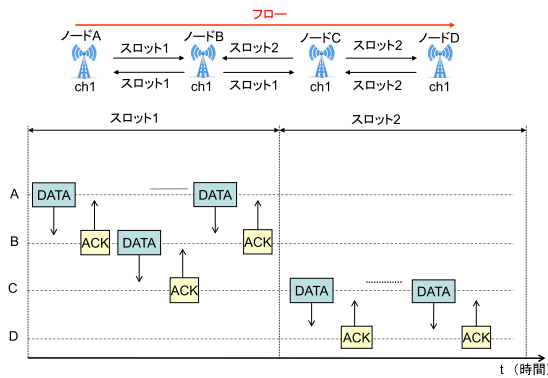


図 2 提案手法の動作例

Fig. 2 Example of proposed method.

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 を用いてデータフレームを送信し, 送信不可能スロットでは待機する. データフレーム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 フレームはすべてのスロットで送信できる.

図 2 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, すべてのノードが同じ周波数チャンネルに設定されている. 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 がフレームを送信する. ノード A と B が CSMA によりフレームを送信することで, フレームはノード C の方向に転送される. このとき, ノード A のデータフレームに対しては B が ACK を返し, B のデータフレームには C が ACK を返す. 次に, スロット 2 に切り替わると, 同様に, ノード C と D がデータフレームを送信する. その結果, 隠れ端末問題によるフレームの衝突が発生せず, データはノード D に到達できる.

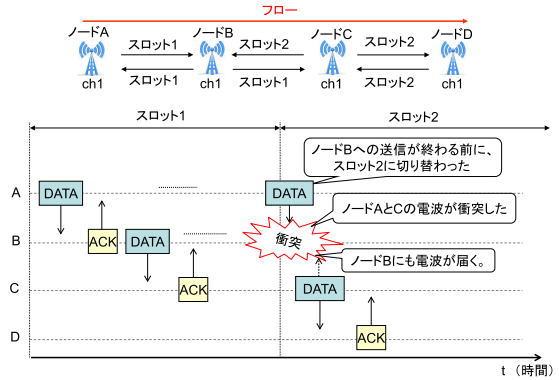


図 3 スロット切替え時のオーバーヘッド

Fig. 3 Overhead at boundary of slots.

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速度の  $k$  分の 1 程度の通信速度を期待できる.

#### 4.2 RTS/CTS によるスロット切替え時の衝突回避

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, 切り替わる前のスロットと後のスロットでそれぞれデータフレームを送信する場合である. 具体例を図 3 に示す. スロット 1 で, ノード A が B にフレームを送信し, 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 のフレームを検知 (キャリアセンス) できないため, D にフレームを送信する. 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 のフレームを正しく受信できない.

この問題 (スロット切替え時のフレーム衝突) 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, ノード間でスロット切替えのタイミングに誤差がある場合にも, この問題は発生する. この問題を解消するために, 提案手法では, スロット切替え時付近のみで RTS/CTS を適用する.

図 4 に RTS/CTS を適用した例を示す. この例は図 3 と同様の場合を表しているが, スロット切替えが近づくと, 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, スロット切替え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, 次のスロット切替えまでの時間  $t^{slotEnd}$  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

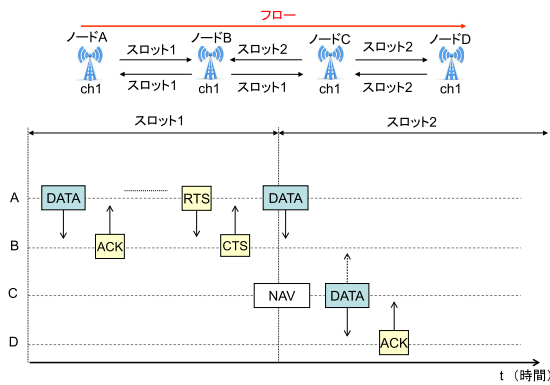


図 4 RTS/CTS によるスロット切替時の衝突回避  
Fig. 4 Avoiding collision using RTS/CTS.

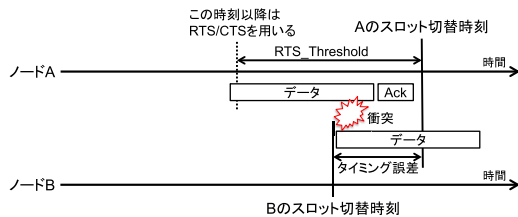


図 5 タイミング誤差によるフレーム衝突  
Fig. 5 Frame collision due to drift of synchronization.

を使わずにデータを送信する。

RTS 閾値 ( $RTS\_Threshold$ ) の値としては、ノードがデータフレームを送信してから、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、データフレームを送信して 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、データフレーム送信時間と SIFS, ACK フレーム送信時間の各時間の和となる。ここで、データフレーム送信時間, SIFS, ACK フレーム送信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誤差がある場合には、上記の  $RTS\_Threshold$  の値では、フレームが衝突する恐れがある。図 5 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例を示す。この場合には、ノード A の  $t^{slotEnd}$  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  $RTS\_Threshold$  に加算する (図 6)。つまり、 $RTS\_Threshold$  は、データフレーム送信時間, SIFS, ACK フレーム送信時間, およ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、一定範囲の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。

### 4.3 スロット切替のタイミング同期

スロット切替タイミングの同期には、IEEE802.11 の

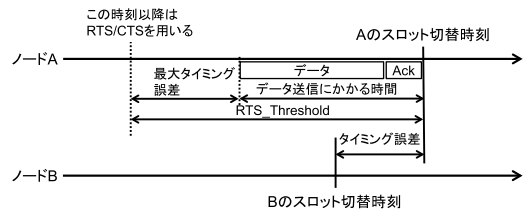


図 6 RTS/CTS を用いる閾値の設定  
Fig. 6 Threshold value to apply RTS/CTS.

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 [17]。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、時刻同期の精度が確保できないという問題が指摘されており、たとえば Chiang らは、精度を向上させる手法を提案したうえで、実機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  $300 \mu$  秒程度の同期誤差を観測したと報告されている。

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。しかし、提案手法では厳密なタイミング同期は必要なく、TSF やその改良手法の同期精度で十分に動作できるため、これらを用いることを想定する。

### 4.4 想定する運用環境

提案手法は、すでに IEEE802.11 が動作する 2.4 GHz 帯および 5 GHz 帯で動作させることを想定する。提案手法では、時分割されたスロットの内部で IEEE802.11 を動作させることを想定するため、先述の、IEEE802.15.4 と IEEE802.11 の間に発生するような深刻な共存問題 [20] は生じず、提案手法が共存問題により周囲に悪影響を与えることはない。しかし、IEEE802.11 に準拠した無線端末が提案手法の動作範囲内で頻繁にデータ通信をすると、隠れ端末問題の影響で提案手法の性能が大きく損なわれると考えられる。つまり、提案手法は、競合する周波数チャンネルで IEEE802.11 による通信がある程度抑制された状況で運用されることが求められる。これは、管理者によって、競合周波数チャンネルを用いる IEEE802.11 基地局の設置を制限することで実現可能であり、本提案はそのような環境を想定する。

## 5. 評価

### 5.1 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、従来の

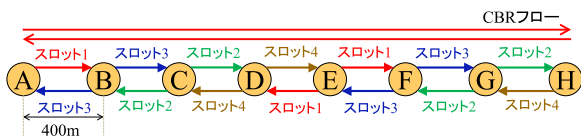


図 7 シミュレーショントポロジ (線形トポロジ)

Fig. 7 Simulation topology (Line topology).

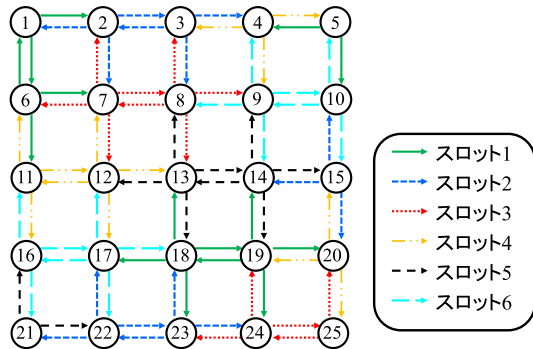


図 8 シミュレーショントポロジ (格子トポロジ)

Fig. 8 Simulation topology (Grid topology).

IEEE802.11 を用いた場合と、提案手法により仮想多チャ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うるのかを、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、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させることができるかである。4.2 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り、衝突にともなうフレームの再送処理等のオーバーヘッドが生じる。提案手法は、一定量の周波数資源を、複数の仮想チャネルに分割して利用する。このため、理想的には、 $k$  個のチャネルに分割した場合には、1 チャ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、スロット切替え時付近のみで 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、タイミング誤差への耐性である。提案手法は、ノード間でスロット切替えのタイミングに差がある場合でも、通信性能への影響が小さいことを評価する。

## 5.2 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。評価は、2 種類のトポロジを用いて行う。基本性能の評価として、図 7 に示す線形トポロジを用いる。次に、実環境に近いトポロジとして、図 8 に示す格子トポロジを用いて評価する。無線メッシュ網は計画的に設計されるため、ノード間の距離が一定以上離れた規則的なトポロジを用いる。評価は、提案手法と既

存手法を比較することで行った。既存手法の 1 つとして、仮想多チャネル化しない IEEE802.11g (CSMA と表記する) を用いた。また、提案手法からスロット切替え時の RTS/CTS を省いた方式は、本質的に Z-MAC [21] 等の既存のハイブリッド MAC の性能を表すと考えられるため、この方式 (「時分割 CSMA-RTS/CTS なし」と表記する) との比較も行った。これらに対して、提案手法は「時分割 CSMA-RTS/CTS あり」とも表記する。

線形トポロジでは、8 つの固定ノードを 400 [m] 間隔で一列に並べた。また、ノード A から H、およびノード H から A に、2 本の CBR (Constant Bit Rate) 通信を発生させた。スロット数を  $k = 4$  とし、図 7 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。この場合には、各スロットでは隠れ端末の関係にあるノードペアが存在せず、基本的にはフレームは衝突しない。しかし、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 (たとえばスロット 2 に対しては、1 と 3 が隣接する) に割り当てられており、スロットの切替え時にフレームが衝突し、オーバーヘッドができるだけ大きくなるのが意図されたスケジュールである。ルーティングプロトコルとしては、Scenargie に含まれている 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 を用い、時分割 CSMA の隠れ端末問題の回避能力とオーバーヘッドを評価するために、リンク速度は 6 [Mbps] とした (つまり、提案手法は、IEEE802.11g を仮想多チャネル化したものである)。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、すべ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、隠れ端末の影響を測るために比較的大きな 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。

一方、格子トポロジでは、 $5 \times 5$  の格子状に 25 ノードを配置し、線形トポロジと同様にノード間の間隔を 400 [m] とした。つまり、縦横に隣接したノードとは通信できるが、斜め方向にあるノードとは通信できない。用いたスケジュールを図 8 に示す。これは、文献 [16] のアルゴリズムを用いて生成したスケジュールであり、6 チャネルを用い、各スロット内では隠れ端末の関係にあるノードペアは存在しない。スロットの時間間隔は、実用的な到達遅延を達成するために 10 [ms] とした。格子トポロジでは、縦横に双方向の通信フローを合計 12 本発生させた。つまり、ノード 2 と 22、3 と 23、4 と 24、6 と 10、11 と 15、および 16 と 20 の間に双方向の CBR 通信を発生させた。シミュレー



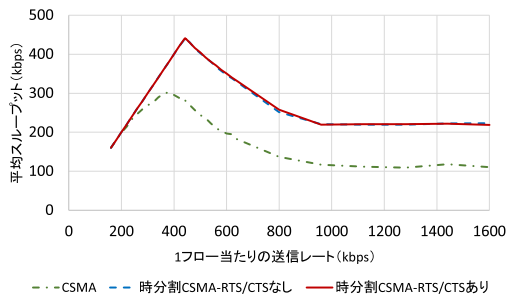


図 9 スループット (線形トポロジ)  
Fig. 9 Throughput (Line topology).

ション時間は 360 秒とし、通信フローは 60~300 秒の間だけ発生させた。格子シナリオでは、ルーティングプロトコルは用いず、経路表には静的に最短経路を設定した。

### 5.3 実験結果：スループット

図 9 に、CSMA, 時分割 CSMA-RTS/CTS なし, および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 445 [kbps] までは送信レートとスループットがほぼ一致し, ほぼすべての送信フレームが宛先に到達したことが分かる。これは, CSMA 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, 時分割 CSMA 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, 時分割 CSMA 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 を用いて通信したとき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,  $3.56/8 = 0.445$  [Mbps] = 445 [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分かる。

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 9 において, 各フローの送信レートが, 許容帯域である  $Max \approx 445$  [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, 最終的にはあふれる。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, スロット切替え時に RTS/CTS を

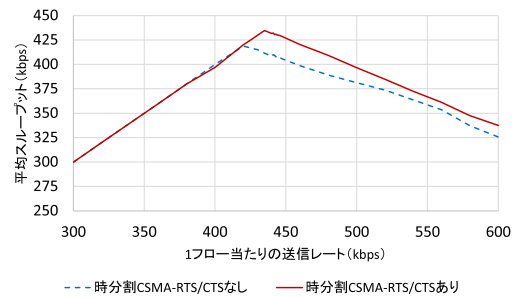


図 10 スロット時間間隔 10 [ms] の場合のスループット  
Fig. 10 Throughput under slot interval 10 [ms].

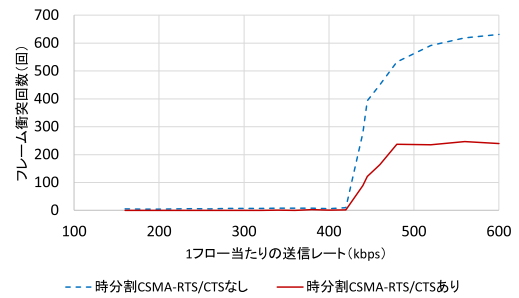


図 11 フレーム衝突回数 (線形トポロジ)  
Fig. 11 Number of frame collision (Line topology).

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, スロット切替え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] に設定したときの, RTS/CTS を用いる場合と用いない場合の平均スループットを示す。  $t^{slot}$  が短くなると, スロット切替え回数が増えてその分のオーバーヘッドが増加するため, RTS/CTS を用いない場合ではスループットが低下する。なお, スロット時間間隔 10 [ms] の場合には, 1 スロットあたり最大 4~5 フレームが送信されていた。

### 5.4 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, 時分割 CSMA 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分かる。これは, ネットワークが飽和に近づくまでは, スロット切替え時のフレーム衝突が発生しないため, 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, スロット切替え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。スロット切替え直前に RTS/CTS を用いることより, スロット切替え時のフレーム衝突を低減させることができる。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が 2 分の 1 未満に低減すること

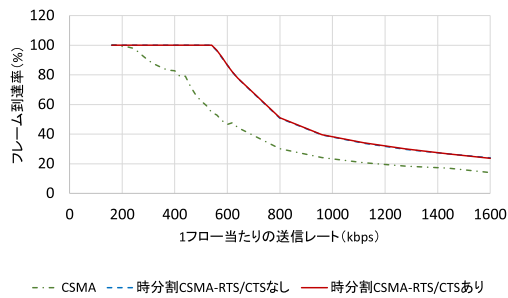


図 12 フレーム到達率 (線形トポロジ)  
Fig. 12 Delivery ratio (Line topology).

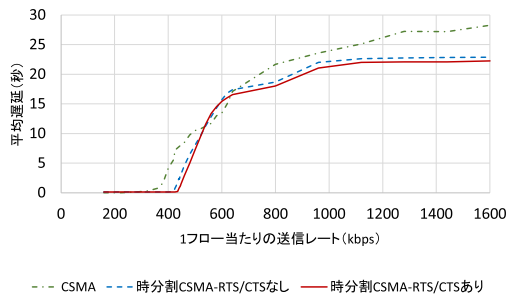


図 13 フレーム到達遅延 (線形トポロジ)  
Fig. 13 Delivery delay (Line topology).

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 7 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 において、スロット 4 に切り替わる直前に、ノード B が A に RTS を送信したとする。ノード A が RTS を受信後、CTS をノード B に送信する。このとき、ノード D は RTS と CTS を受信できない。よって、ノード B は A からの CTS を受信すると A にデータフレームの送信を始めるが、ノード B の送信がまだ終わらない状態でスロット 4 に切り替わると、ノード D が C にデータフレームを送信し始める。ノード C には B からのフレームも届くため、D から送信したデータと衝突する。つまり、ノード A は 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。この種の衝突は、ある種の隠れ端末問題であるが、同一スロット内の衝突のみを考慮するだけでは、解消することが難しい。

図 12 と図 13 に、送信レートを変動させたときの、フレーム到達率と遅延を示す。まず、CSMA では早期に到達率が下がるのに対して、時分割 CSMA では、ネットワークの飽和付近まで到達率が 100% 近くに保たれることが分かる。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分かる。これは、飽和によって送信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しばらく 100% 近くを保っているが、これは、CBR フローの送信が

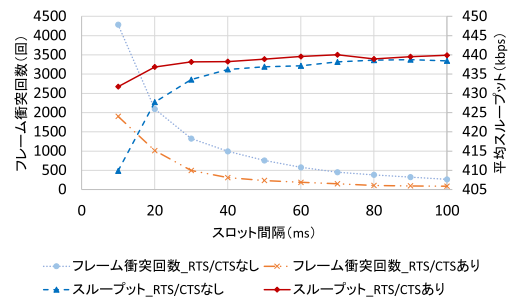


図 14 フレーム衝突回数とスループット (線形トポロジ)  
Fig. 14 Collision and throughput (Line topology).

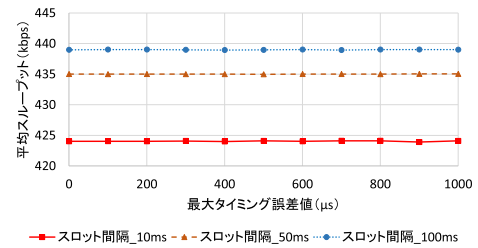


図 15 タイミング誤差に対する耐性 (線形トポロジ)  
Fig. 15 Robustness against synchronization (Line topology).

終了する 90 [秒] の時点ではキューがあふれず、最終的にすべてのフレームが宛先に到達できたからである。

さらに、図 14 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 を用いない場合に比べて、用いる場合にはフレーム衝突回数が低減し、スループットも向上している。RTS/CTS の利用はスロット切替え時のオーバーヘッドを低減させ、特にスロット時間間隔が短い場合に効果が大きいことが分かる。また、スロットの時間間隔を短くすると、特に 10 [ms] 付近で急激にフレーム衝突回数が増加し、スループットが低下している。スロット切替え時のオーバーヘッドが、スロット時間間隔が短くなるほど増大することが分かる。さらにこれは、スロット時間間隔を短くすることで、ネットワークが飽和するスループットが低くなることも示しているが、RTS/CTS を用いる場合には、その悪影響が低く抑えられている。

### 5.5 評価結果：同期誤差に対する頑強性

図 15 は、スロット切替えタイミングの誤差の影響を調べた結果である。スロット切替え時間に一定範囲の誤差を加え、その範囲に合わせた最大タイミング誤差値を設定した場合の、提案手法のスループット性能を示している。具体的には、毎回のスロット切替え時刻を、誤差のない正しい切替え時刻にランダム値を加えた時刻とした。加えるランダム値が  $\pm 0$ ,  $\pm 50$ ,  $\pm 100$ , ...,  $\pm 500 \mu$  秒の範囲になるようにした。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, 100,



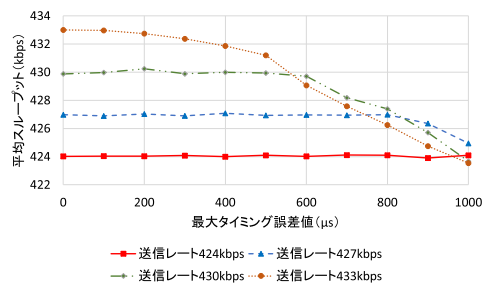


図 16 スロット時間 10 [ms] の場合のタイミング誤差耐性

Fig. 16 Robustness against synchronization drift under slot interval 10 [ms].

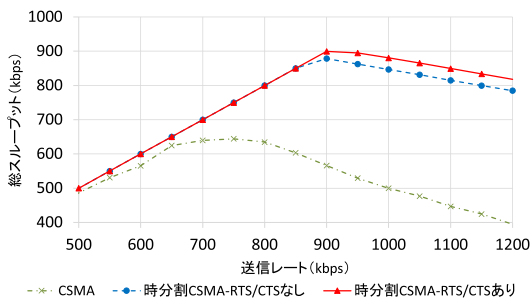


図 17 スループット (格子トポロジ)

Fig. 17 Throughput (Grid topology).

200, ..., 1,000  $\mu$  秒に設定した。送信レートは、スロット時間間隔 10 [ms], 50 [ms], 100 [ms] のそれぞれに対して、424 [kbps], 435 [kbps], 439 [kbps] の値を用いた。これらは、ネットワークが飽和するよりも少し低い送信レートである。図 15 の結果から、ネットワークが飽和していない場合には、最大タイミング誤差値を適切に設定すれば、スロット切替えタイミング誤差の影響はないことが分かる。

図 16 は、スロット時間間隔を 10 [ms] として、送信レートを変動させた場合の提案手法のスループットを示す。送信レートが 424 [kbps] を超えると、最大タイミング誤差値が 0 であれば飽和せず送信レートとスループットが一致するが、最大タイミング誤差値を増大させると飽和してスループットが低下する。これは、最大タイミング誤差値を大きく設定することでオーバーヘッドが大きくなり、より低い送信レートでネットワークが飽和したことを示す。図 16 から、最大タイミング誤差値と飽和する送信レートの関係が見てとれる。

### 5.6 評価結果：格子トポロジ

先述のとおり、線形トポロジでは、ネットワークが飽和しなければ、時分割 CSMA はほぼ 100% の優れたフレーム到達率を達成できることが示された。また、スロット切替え時の RTS/CTS が効果的であること、および、提案手法がスロット切替えタイミングの誤差に頑強であることを示した。本節では、これらの性質が、より一般的な無線メッシュ網のトポロジでも成立することを確認する。

図 17 は、格子トポロジにおける、時分割 CSMA と

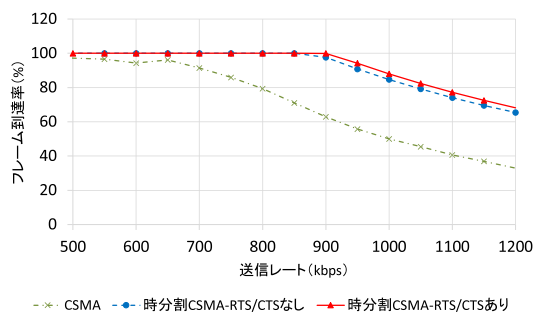


図 18 フレーム到達率 (格子トポロジ)

Fig. 18 Delivery ratio (Grid topology).

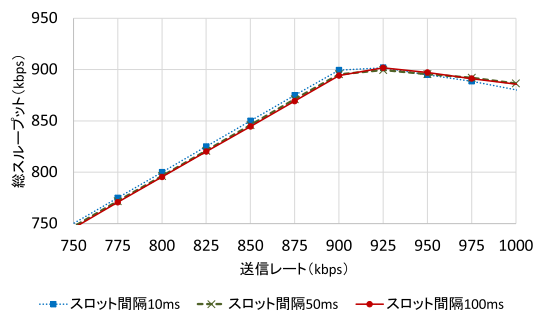


図 19 スロット時間間隔の影響 (格子トポロジ)

Fig. 19 Effect of slot interval (Grid topology).

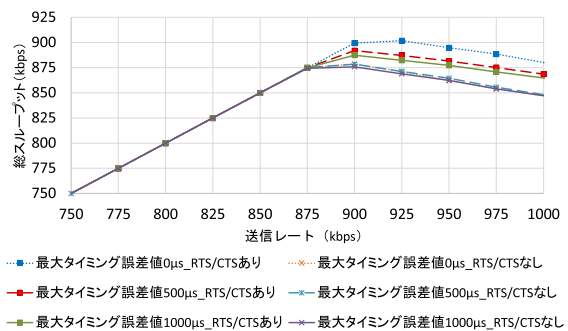


図 20 タイミング誤差の影響 (格子トポロジ)

Fig. 20 Effect of synchronization drift (Grid topology).

CSMA のスループットを示す。線形トポロジの場合と同様に、時分割 CSMA の性能が CSMA を大幅に上回っており、最大スループットは約 1.5 倍の値である。この値は、線形トポロジの結果とほぼ一致する。また、スロット切替え時に RTS/CTS を利用することで、スループットが 20~30 [kbps] 程度向上しており、既存のハイブリッド MAC に対する提案手法の優位性も示された。図 18 にパケット到達率を示す。提案手法では送信レート 900 [kbps] までは送信レートとスループットが一致し、ほぼ 100% のフレーム到達率を達成している。

図 19 は、スロット時間間隔を変動させた場合の提案手法のスループットを示す。スロット時間間隔を変化させるとわずかにスループットに差が見られるが、いずれの場合もおおむね同等のスループット性能を示している。図 20 は、スロット切替え時間に一定範囲のランダム誤差を加え、

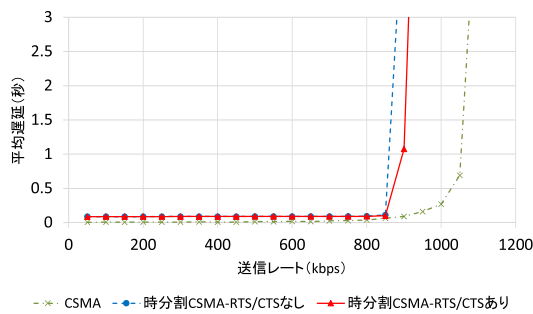


図 21 到達遅延 (格子トポロジ)

Fig. 21 Delivery delay (Grid topology).

その範囲に合わせた最大タイミング誤差値を設定した場合のスループットを示す。スロット切替えタイミングに誤差がない場合と比べて、誤差を加えた場合には、ネットワークが飽和する送信レートが低くなっている。このように、格子トポロジにおいてスロット時間間隔とタイミング誤差を加えた場合の性能は、線形トポロジにおいて見られたのと同様の傾向を示しており、飽和する送信レートにわずかに影響する程度である。また、図 20 によると、RTS/CTS を用いない場合には、タイミング誤差による影響は小さくなるものの、スループットが少し低くなる事が分かる。

図 21 に、フレームの到達遅延の比較を示す。CSMA では到達率が低下しても遅延は低く保たれるのに対し、提案手法ではネットワークが飽和すると急激に遅延が増大することが分かる。これは、時分割 CSMA が、飽和するまでの間は到達率を 100% に保つ能力を持つ結果であり、通信リンクにおける損失がほとんど見られない有線ネットワークと同様の性質である。また、不飽和状態での遅延は、送信レート 800 [kbps] の場合に、CSMA が 38 [ms]、提案手法が 92 [ms]、RTS/CTS を用いない場合が 94 [ms] であり、時分割 CSMA 遅延が大きい。本評価ではスロット時間間隔を 10 [ms] であり、スロットの順番待ちのために遅延が発生するが、この値は実用の範囲内であると考えられる。

遅延性能を改善する方法は、スロット時間間隔をさらに短くすることである。また、リンクの通信速度を向上させれば、スロット時間間隔をより短くできる。リンク速度を向上させると、通信可能距離に対して電波干渉が大きくなるため、より精密なスケジューリングが必要である。スケジューリング法も含めてリンク速度を検討し、実用上十分な遅延性能を達成できるかを評価することが、今後の課題の 1 つである。

最後に、通信フローとして、UDP ではなく、TCP を用いた場合のスループットを図 22 に示す。ネットワークシミュレータ上で FTP 通信を発生させ、11 秒間の幅で移動平均をとった結果を示している。TCP を用いた場合にも、CSMA よりも、時分割 CSMA の方が高いスループット性能を持つことが分かる。また、RTS/CTS を用いない場合よりも、RTS/CTS を用いた場合の方が少し高い性能

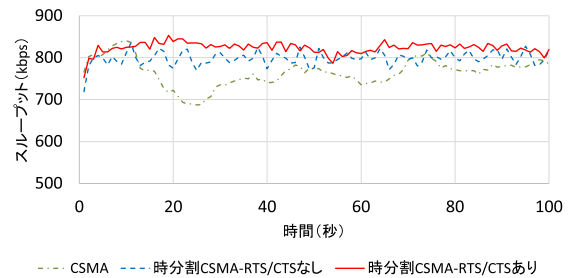


図 22 TCP を用いた場合のスループット (格子トポロジ)

Fig. 22 TCP throughput (Grid topology).

を持つことも分かる。これは、RTS/CTS を用いることでスロット切替え時のパケット損失が低減されたことが主な要因である。

## 6. おわりに

本論文では、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ネル化手法を提案した。時分割されたスロット内部で CSMA を動作させ、適切なスケジューリング手法と併用することで、隠れ端末の影響を大幅に低減させることができる。また、スロット切替え時に RTS/CTS を用いることで、オーバーヘッドの小さい効率的なメッシュ網を実現できる。

また、ネットワークシミュレータ Scenargie を用いて、無線メッシュ網に適用することを前提として、提案手法の性能評価を行った。評価の結果、隠れ端末問題が発生しないようにスケジューリングすることで、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おおむね 100% のフレーム到達率を達成できることを確認した。また、単一の周波数チャネルを仮想多チャ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わずかであることが分かった。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、通信性能への影響が小さいことを確認した。スロット切替え時に RTS/CTS を用いることにより、通信性能が向上することを確認した。

実用化に向けての今後の課題の 1 つは、より幅広いトポロジや通信速度における評価を実施することである。また、実機実装による評価も重要である。

謝辞 本研究の実施にあたっては、電気通信普及財団の研究助成を得た。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Nelson, R. and Kleinrock, L.: Spatial TDMA: A Collision Free Multihop Channel Access Protocol, *IEEE Trans. Communications*, Vol.33, No.9, pp.934-944 (1985).
- [2] Gore, A.D. and Karandikar, A.: Link Scheduling Algorithms for Wireless Mesh Networks, *IEEE Communica-*

- tion Surveys & Tutorials, Vol.13, No.2 (2011).
- [3] Akyildiz, I. and Wang, X.: *Wireless Mesh Networks*, John Wiley & Sons, Ltd., Publication (2009).
  - [4] Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), IETF RFC3626 (2003).
  - [5] Perkins, C. et al.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, IETF RFC3561 (2003).
  - [6] De Couto, D. et al.: A High-Throughput Path Metric for Multihop Wireless Sensor Networks, *Proc. 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM2003)* (2003).
  - [7] Draves, R. et al.: Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks, *Proc. 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM2004)*, pp.114-128 (2004).
  - [8] Mo, J. et al.: Comparison of Multichannel MAC Protocols, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.7, No.1 (2008).
  - [9] Marina, M.K. et al.: A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks, *Computer Networks*, Vol.54, pp.241-256 (2010).
  - [10] Kanaoka, H. and Yoshihiro, T.: Combining Local Channel Selection with Routing Metrics in Multi-channel Wireless Mesh Networks, *The 7th 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] Chiang, J.H. and Chiueh, T.: Accurate clock synchronization for IEEE 802.11-based multi-hop wireless networks, *Proc. 17th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP2009)*, pp.11-20 (2009).
  - [13] Bharghavan, B. et al.: MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs, *Proc. ACM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM1994)* (1994).
  - [14] Sobrinho, J.L. et al.: Why RTS-CTS is not your ideal wireless LAN multiple access protocol, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2005)* (2005).
  - [15] Xu, K. et al.: Effectiveness of RTS/CTS Handshake in IEEE 802.11 Based Ad Hoc Networks, *Ad Hoc Networks*, Vol.1, No.1, pp.107-123 (2003).
  - [16] 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).
  - [17] IEEE, IEEE 802.11-2012 Standard (2012).
  - [18] IEEE802.15.4b standard, Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specification for Low Rate Wireless Personal Area Networks (2006).
  - [19] Lee, W.L. et al.: FlexiTP: A Flexible-Schedule-Based TDMA Protocol for Fault-Tolerant and Energy-Efficient Wireless Sensor Networks, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.19, No.6 (2008).
  - [20] Yang, D. et al.: Wireless Coexistence between IEEE 802.11 and IEEE 802.15.4 Based Networks: A Survey, *International Journal of Distributed Sensor Networks* (2011).
  - [21] Rhee, I. et al.: Z-MAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.16, No.3, pp.511-524 (2008).
  - [22] Liu, Q. et al.: Real-Time Data Aggregation for Con-

attention Based Sensor Networks in Cyber-Physical Systems, *Proc. 7th International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications (WASA2012)* (2012).



ネンホンマラー ティッパワン  
(学生会員)

1990年生。2014年和歌山大学システム工学部卒業。2016年2月現在、和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程在学中。



吉廣 卓哉 (正会員)

1975年生。1998年京都大学工学部卒業。2000年同大学情報学研究科博士前期課程修了。2003年同研究科博士後期課程修了。博士(情報学)。2003年和歌山大学システム工学部助教。2009年同学部講師, 2012年准教授。グラフ理論, インターネットルーティング, 無線アドホックネットワーク, バイオインフォマティクス, データベースシステム等の研究に従事。本会シニア会員。電子情報通信学会, 日本データベース学会, IEEE各会員。