

スロット化CSMAを用いた無線メッシュ網構築方式における最適な通信速度の検討

森 康弘^{1,a)} 吉廣 卓哉^{2,b)}

概要: 近年、複数の端末を無線で接続することで、低コストにインフラを構築できる無線メッシュ網が研究されている。無線メッシュ網の研究では、MACプロトコルとしてCSMAを用いることが多い。しかし、CSMAを用いる場合、隠れ端末問題による通信効率の大幅な低下が問題である。我々の研究室では、隠れ端末問題を解決するための手法として、CATBSを提案している。CATBSでは、高速通信時に、干渉モデルが現実と合致しないことが原因で、電波干渉が多発し、通信性能が悪化する問題がある。本研究では、高速通信時の電波干渉を解決するために、干渉モデルとしてdouble disk modelを使用したスケジューリングを行い、その上で、高い通信性能を発揮するための通信速度とパラメータ値を検討する。

キーワード: 隠れ端末問題, スロット化CSMA, 干渉モデル, スケジューリング

YASUHIRO MORI^{1,a)} TAKUYA YOSHIHIRO^{2,b)}

1. はじめに

近年IEEE802.11 [1]をはじめとする無線LANインターフェースを搭載した端末が多く普及している。また、この無線LAN技術を応用し、複数の端末を無線通信により相互接続することで、低コストに通信インフラを構築する無線メッシュ網の研究も盛んに行われている [2]。無線メッシュ網のメリットとして、端末間は無線でやりとりを行うため、設置・撤去の容易さや管理・運用のコストの低さがあげられる。無線メッシュ網の研究では、MACプロトコルとしてCSMA/CAを用いる場合が多い。しかし、MACプロトコルとしてCSMA/CAを用いた場合、隠れ端末問題の影響により通信性能は大幅に低下してしまう。隠れ端末問題の影響を低減させるための手法としてRTS/CTS [3]が挙げられるが、RTSフレームの衝突などにより依然としてスループットは高水準に達していない [4][5]。

無線メッシュ網の研究として、複数の周波数チャンネルを用いた方式が数多く提案されている。[6][7]は複数のネットワークインターフェース (NIC) を備えた無線端末で構成される無線メッシュ網において、動的メトリックを

用いた電波干渉が小さくなる経路選択の案である。[8]では、周波数チャンネルを静的にNICに割り当てる最適化アルゴリズムを提案している。[9]は単一のネットワークインターフェースが複数のチャンネルを動的に切り替えるMulti-channel MACプロトコルを比較評価している。しかし、複数のチャンネルを用いるこれらの方式は、送受信端末のチャンネル同期が難しいことや、Wi-Fiにおいて直交する周波数チャンネル数が3つと少ないことなどから、実質的な効果を挙げる事ができていない。

上記の問題を解決し、効率的な無線メッシュ網の構築を行うための手法として、CATBSという方式が提案されている [10]。CATBSは、CSMAとTDMAのハイブリッドMACであるスロット化CSMAとスケジューリング法を組み合わせた、隠れ端末問題のない無線メッシュ網の通信方式である。動作としては、まず、単一の周波数チャンネルを時分割し、仮想的なチャンネルを複数作成する。その後、現実世界のネットワークをグラフとしてモデル化し、そのモデル上で隠れ端末問題が発生しないように通信リンクに仮想チャンネルを割り当てることで、隠れ端末問題を防いでいる。リンクに仮想チャンネルを割り当てる際、隠れ端末問題の関係にあるリンクを、single disk model [11]を用いて定義している。single disk modelでは、通信が成功する距離のことを通信可能距離と定義しており、通信可能距

¹ 和歌山大学大学院 システム工学研究科

² 和歌山大学 システム工学部

a) s181056@sys.wakayama-u.ac.jp

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

離を超えた電波による影響はないものとしている。

しかし、実際の無線通信の電波干渉とは、受信した電波の電波強度に対して、一定以上の電波強度のノイズを受信したときに発生するものであり、通信可能距離を超えても、他の通信に影響を与える。また、無線通信では高速通信時にノイズの影響を強く受けるという特徴がある。そのため、高速通信時には、通信可能距離が短くなり、通信可能距離と干渉距離の間に大きな差異が生じる。そのため、CATBS は、低速通信時には通信可能距離と干渉距離の間に差異は少なく、single disk model によるモデル化は現実との乖離が少ないが、高速通信時にはその差異により、電波干渉を防げないという問題が残されている。

本論文では、CATBS を高速通信に対応させるために double disk model を使用した上で、CATBS に最適な通信速度を検討する。具体的には、各通信速度における通信可能距離と干渉距離を事前シミュレーションにより決定し、それぞれの通信速度における CATBS の通信性能を比較する。結果から、どの通信速度であれば最も干渉を抑え、CATBS に適した通信速度なのかを考察する。

2. CATBS

2.1 概要

CATBS は、スロット化 CSMA とスケジューリング法を組み合わせた、隠れ端末問題のない無線メッシュ網の通信方式である。また、CATBS で用いているスロット化 CSMA は、従来のものと異なる、CATBS 独自の MAC プロトコルである。まず、単一の周波数を時分割し、複数の仮想チャンネルを作成する。そして、作成された仮想チャンネル一つ一つの内部で CSMA を動作させる。スケジューリング法では、作成した仮想チャンネルを、隠れ端末問題が発生しないように割り当てる。隣接するノード間は CSMA により衝突を回避できるので、CSMA を考慮したスケジューリングを行う。そのため、隠れ端末問題による電波干渉を考慮した干渉モデルを使用し、隠れ端末問題が最小化する最適化問題として定式化する。定式化した問題は NP 困難であるために、部分 MAX-SAT に帰着させることで高速に解を得る。

2.2 MAC プロトコル

CATBS で用いられている MAC プロトコルはスロット化 CSMA をベースにした、独自の MAC プロトコルである。通常のスロット化 CSMA とは、周波数チャンネルを一定時間ごとに分割し、TDMA と CSMA を併用して通信を行う方式である。スロット化 CSMA を無線メッシュ網のような高速通信を必要とする通信方式に利用するには、TDMA 区間のために高精度なタイミング同期が必要となる。しかし、無線メッシュ網は、正確なタイミング同期を行うことが難しいため、TDMA 区間で不具合が生じる。そ

こで、CATBS では、スロット化 CSMA をベースにした MAC プロトコルを独自に提案し、利用している。

CATBS で用いられているスロット化 CSMA では、まず、単一の周波数チャンネルを時分割し、仮想的なチャンネルを複数生成する。作成された仮想チャンネル一つ一つをスロットと呼ぶ。作成したスロット内部では CSMA が動作する。CSMA を動作させるために、1 スロットあたりの時間は TDMA と比べ、比較的大きく取る必要がある。各スロットはスロットを識別する番号が与えられ、 $1, 2, \dots, k, 1, 2, \dots$ のように順に切り替えられ繰り返される。また、時刻同期の誤差によるフレームの衝突を避けるために、RTS/CTS を利用している。データフレームを送信する際に、送信終了までに割り当てられたスロットの時間を超えると判断したときに、RTS を送信する。RTS を受信したノードは、隣接するノードへと CTS を送信する。CTS を受信したノードは、割り当てられたスロットの時間になっても、データフレームを送信することなく、NAV 期間だけ送信を待機する。NAV 期間が終了すると、データフレームの送信を開始する。

2.3 スケジューリング問題の定義

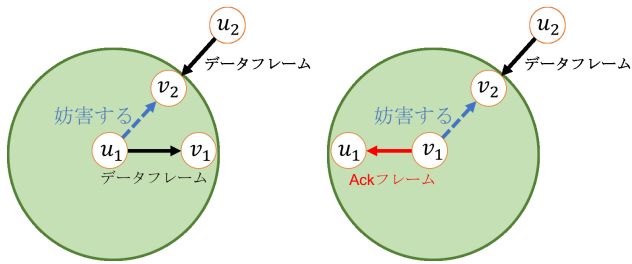
スケジューリング問題を定式化するために、定義から始める。ネットワークを有向グラフ $G = (V, E, C)$ で表す。 V はノード集合、 E はリンク集合、 C はチャンネル集合を表す。ノード $u \in V$ から $v \in V$ まで、チャンネル c を用いて通信するリンクを $e = (u, v, c)$ と定義する。2 本のリンク $e_1 = (u_1, v_1, c_1)$ と $e_2 = (u_2, v_2, c_2)$ があるとき、隠れ端末問題の条件を満たしていれば、 e_1 が e_2 を妨害すると呼び、このような 2 本のリンクを干渉リンクペアと呼ぶ。グラフ G 上でのノード u から v への最短経路長を $D_{(u,v)}^G$ と定義する。隠れ端末の関係にあるリンクペアの集合を S_G とし、 $|S_G|$ をグラフ G 上の衝突度と呼ぶ。グラフ G を利用し、 G 上のリンクの使用を制限することで、 S_G に含まれるリンクペアの数を最小化し、隠れ端末問題のないグラフ G' を出力する。

2.4 干渉モデル

CATBS では、電波干渉が発生する状況を単純化するために、干渉モデルとして single disk model を使用している。single disk model では、ノードが通信を行うとき、通信が成功する距離を r とし、 r を通信可能距離と呼ぶ。また、 r を半径として円を描いた内部を通信可能領域と呼ぶ。single disk model 上において、通信可能距離よりも遠方には電波の影響は存在しないものとする。

2.5 single disk model による干渉リンクペアの定義

リンクの妨害関係は、データフレームが妨害するパターンと Ack フレームが妨害するパターンの 2 つで定義され



(a) データフレームによる妨害 (b) Ack フレームによる妨害

図 1: 干渉リンクペアの条件

ている。2つのパターンの例を図1に示す。図1(a)は、 u_1 から v_1 へのデータフレームにより、 u_2 から v_2 への通信が妨害されるパターンであり、図1(b)は、 v_1 から送信されたAckフレームにより u_2 から v_2 への通信が妨害されるパターンである。2つのパターンを形式的に表すと以下のようになり、それぞれの条件を全て満たしたとき、干渉リンクペアであるとみなされる。

(1) データフレームが妨害する場合

- (a) $c_1 = c_2$
- (b) $(u_1, u_2, c_1) \notin E$
- (c) $(u_1, v_2, c_1) \in E$

(2) Ack フレームが妨害する場合

- (a) $c_1 = c_2$
- (b) $(u_1, u_2, c_1) \notin E$
- (c) $(v_1, v_2, c_1) \in E$

2.6 スケジューリング問題の定式化

スケジューリングを行う際に、チャンネル数が増え、各ノードが送信するタイミングが少なくなるにより、遅延が発生することが考えられる。遅延の増大を防ぐため、できるだけチャンネル数が少なくなるようなスケジューリングを目指す。そのため、必ずしも最短路の使用を保障せず、一定の通信路の増加を許す。定式化する際に、最短経路長の増加を k 以内にするという制約を設けることにより、経路長の増加を考慮した最適化問題とする。

目的関数として、リンク制限後のグラフ G' 上の衝突度 $|S_{G'}|$ を最小化することで、隠れ端末の関係にあるリンクペアの数を最小化している。この最適化問題を解くことで、隠れ端末問題のないスケジューリングを実現する。定式化した問題を形式的に表すと、以下のようになる。

- 入力：有向グラフ $G = (V, E, C)$ 、干渉リンクペア集合 S_G
- 出力： G の部分グラフ $G' = (V, E', C), (E' \subset E)$
- 制約： G' の最短経路長の増加が最大 k かつ、一つのノードに割り当てられるスロットが一つであること
- 目的関数： $|S'_{G'}|$

2.7 スケジューリング問題の解法

スケジューリング問題はNP困難であることが文献により証明されている。そのため、最適解を求めるためには膨大な時間が必要となる。そこで、CATBSでは近似的な解を高速に見つけるために、スケジューリング問題を部分MAX-SATに帰着して解くことで、効率よく近似解を求めている。部分MAX-SATとは伝統的なNP困難な最適化問題であり、近年でも高速に良い近似解を求めるソルバーのコンテストが開催されるなど、優れたソルバーが開発されており、CATBSではそれらを用いた高速計算を行っている。本節では、部分MAX-SATの説明をする。

論理変数 x_1, x_2, \dots, x_n は、真(1)または偽(0)の値をとる論理変数である。また、 \bar{x}_1 は x_1 の値を反転した論理変数とする。これらの論理変数をOR演算子(\vee)でつないだ論理式(例： $(x_1 \vee x_2)$)を節、節をAND演算子(\wedge)でつないだ論理式を和積形の論理式(例： $(x_1 \vee x_2) \wedge (\bar{x}_1 \vee x_3)$)と呼ぶ。この和積形論理式 $f = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ が真(1)を取るような、それぞれの論理変数 x_1, x_2, \dots, x_n への真または偽の割り当てが存在するかを出力する問題をSAT(SATisfiability Problem：充足性問題)と呼ぶ。また、節が真をとる数を最大にする問題をMAX-SAT(最大充足性問題)と呼ぶ。さらに、和積形論理式 $f = (x_1, x_2, \dots, x_n) = g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \vee g_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ に対して、 g_1 に含まれる節(ハード節と呼ぶ)をすべて充足し、 g_2 に含まれる節(ソフト節と呼ぶ)を、できる限り多く充足する、各論理変数への真または偽の割り当てを求める問題を部分MAX-SATと呼ぶ。形式的には以下のように表される。

• 部分MAX-SAT

- 入力：和積形の論理式 $f = (x_1, x_2, \dots, x_n)$
- 出力：論理変数への真(1)または偽(0)の割り当て
- 制約：ハード節内の節が最も多く1をとる各論理変数への割り当て
- 最適化条件：1となる節の数の最大化

この部分MAX-SATに、3.4節で説明したスケジューリング問題を帰着させる。前述のとおり、部分MAX-SATはハード節とソフト節に分けられる。CATBSでは、スケジューリング問題の制約である経路長の増加をこのハード節で、目的関数である衝突度の最小化をソフト節で行っている。有向グラフ $G = (V, E, C)$ があるとき、リンク集合 E に含まれるすべてのリンクに対して論理変数 $l_{u,v,c}$ を定義する。 $l_{u,v,c}$ は、 G' 上に存在する場合には真を、存在しない場合には偽をとる論理変数である。この論理変数 $l_{u,v,c}$ を用いて、出力であるグラフ G' 上の任意の2ノード間で、最短経路長の増加 k 以内、かつ一つのノードが使用可能なチャンネルが一つであるときに真である論理式を定義する。この論理式がハード節であり、ハード節が真であるときに、グラフ G' は最適化問題の制約を満たす。次に、ソフト節では、隠れ端末問題の関係にあるリンクペアの集合

S'_G に含まれるすべてのリンクペアに対して論理式 $(\bar{l}_1 \vee \bar{l}_2)$ をとり, AND 演算子でつなぐ. $(\bar{l}_i \vee \bar{l}_j)$ は, グラフ G' 上で隠れ端末問題の関係にあるリンクペアが共に制限されていなければ偽をとる. つまり, 偽をとる論理式の数とグラフ G' 上の衝突度が一致する. そして, ソフト節が出来る限り多く真を取る論理変数の割り当てを行うことで, 衝突度が最も小さいグラフ G' が出力される.

2.8 問題点

CATBS は, リンクの妨害関係を single disk model を用いてモデル化し, 隠れ端末問題が発生する状況を単純化している. しかし, 無線通信では, 高速通信時にノイズへの耐性が低くなることにより, 通信可能距離が短くなる. また, ノイズへの耐性が低くなることにより, 弱いノイズでも衝突が発生してしまう. つまり, 通信が可能となる距離と, 他の通信を妨害する距離に差異が生じる. その結果, single disk model では防ぐことのできない隠れ端末問題が多発するという問題が残っている.

3. 通信速度の検討方法

3.1 研究目的

本研究では, CATBS を高速通信に対応させた上で, CATBS を使用する場合に最適な通信速度を検討したい. CATBS を高速化すると, 使用している干渉モデルの影響で通信の衝突が多発する. それを解決するために, 干渉モデルとして double disk model を導入する. double disk model には, 通信可能距離の他に, 他の通信に影響を与える距離である干渉距離が定義されている. double disk model を使用することで, 高速通信に対応したスケジューリングが可能となる. その上で, CATBS を使用する最適な通信速度を検討する.

3.2 double disk model の導入

本研究では, 使用する干渉モデルとして double disk model を導入する. double disk model とは, あるノードが通信を行うとき, 通信が成功する距離を r , 他ノードの電波に干渉して通信を妨害する距離を r' とする. このとき, r を通信可能距離, r' を干渉距離と呼ぶ. また, double disk model の通信可能距離は, single disk model の通信可能距離と等しい. r を半径とした円の内部を通信可能領域, r' を半径とした円の内部を干渉領域と呼ぶ. 例を図2に示す. 高速通信時には, 復元できないほど減衰した電波であっても他ノードに影響を与えるので, $r < r'$ と定義する. 以上を定義したモデルが double disk model である.

スケジューリング問題を定式化するために, 各要素の定義を行う. CATBS と同様に, ネットワークを有向グラフ $G = (V, E, C)$ で表す. 2本のリンクを $e_1 = (u_1, v_1, c_1)$ と

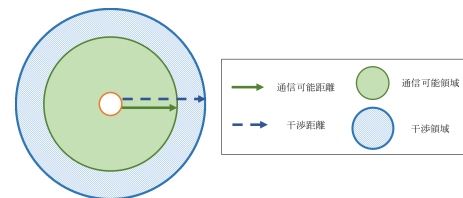


図 2: double disk model

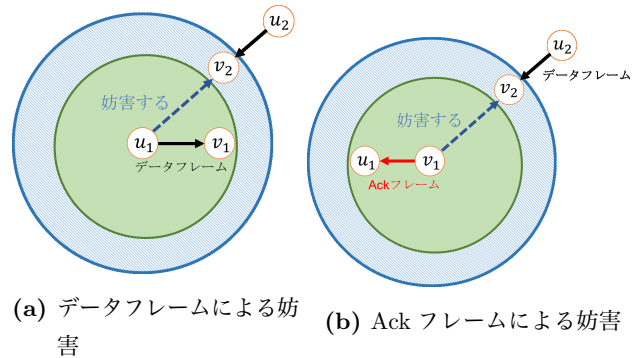


図 3: 干渉リンクペアの条件

$e_2 = (u_2, v_2, c_2)$ と定義し, 隠れ端末の関係にあるとき, e_1 が e_2 を妨害すると呼ぶ. また, u_1 の干渉領域内に存在するノード集合を N_{u_1} と定義する.

妨害関係にあるパターンは, CATBS と同様に, データフレームが妨害する可能性と, Ack フレームによって妨害される可能性の2つのパターンが考えられる. 図3に例を示す. 図3(a)の場合は, u_1 から v_1 へのデータフレームが u_2 から v_2 への通信を妨害している. 図3(b)の場合は, v_1 から u_1 への Ack フレームが u_2 から v_2 への通信を妨害している. このような妨害関係にあるリンクペアを形式的に表すと, 以下ようになる

(1) データフレームが妨害する場合

- (a) $c_1 = c_2$
- (b) $u_2 \notin N_{u_1}$
- (c) $v_2 \in N_{u_1}$

(2) Ack フレームが妨害する場合

- (a) $c_1 = c_2$
- (b) $u_2 \notin N_{u_1}$
- (c) $v_2 \in N_{v_1}$

3.3 各通信速度における各距離の測定方法

double disk model における通信可能距離と干渉距離は, 各通信速度によって異なる. 通信速度が上がれば, 通信可能距離は短くなり, 相対的に干渉距離は長くなる. 通信速度が下がれば, 通信可能距離は長くなり, 干渉距離は短くなる. そのため, 各通信速度に対する最適な通信可能距離と干渉距離を決定するために, 事前シミュレーションにより各速度に対する各距離を決定する. 事前シミュレーションとして, 通信可能距離を測るための一つの通信フローを

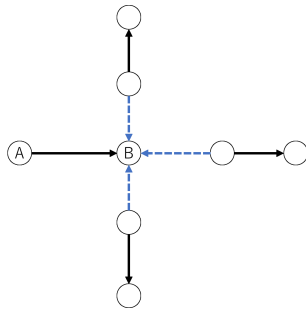


図 4: 事前シミュレーション設定

配置する。その後、それを妨害するように他の通信フローを配置し、それぞれのノード間の距離を変えて通信結果を測定する。実際に使用した設定の図を 4 に示す。図 4 では、実線が通信フローを表しており、破線が妨害関係を表している。つまり、実線が通信可能距離、破線が干渉距離である。

事前シミュレーションの手順を説明する。まず、AB 間の通信を妨害するような距離に、B 周辺のノードを配置する。その後、通信フローを発生させ、AB 間の距離を少しずつ変えて通信結果を確認する。結果から、到達確率が 80% 以上となる最大距離を通信可能距離とする。その後、ノード B と周辺ノードとの距離を少しずつ変更し、到達確率が 99% 以下となる最大距離を干渉距離とする。この手順を各通信速度に対して行うことで、各通信速度における通信可能距離と干渉距離を決定する。

上記の事前シミュレーションにより得た各通信速度に対する通信可能距離と干渉距離を以下に示す。

通信速度 (Mbps)	通信可能距離 (m)	干渉距離 (m)
24	240	440
36	200	470
48	180	580

この結果をもとに、各通信速度における通信可能距離と干渉距離を決定し、シミュレーションを行う。その後、シミュレーション結果から、各通信速度における通信性能を確認し、CATBS に最も適した通信速度を考察する。

4. 評価

4.1 評価方法

本研究では、CATBS に最も適した通信速度を明らかにしたい。そのために、各通信速度に応じたスケジューリングを行い、そのスケジュールによる通信性能を評価する。各通信速度に対する通信可能距離と干渉距離は 3.3 節で求めた距離を使用する。それぞれの距離の影響を最大限に評価するために、ランダムに配置したトポロジを用意し、そのトポロジ上で、各通信速度に応じたスケジューリングを行う。具体的なトポロジとして、1500m 四方のフィールドを用意し、そのフィールド内に 100 個のノードをラン

ダムに配置した。それぞれのノードは各通信速度に応じた通信可能距離内で通信ができるものとし、シミュレータ上に無線メッシュ網を構築した。5 パターンのトポロジで実験を行い、その平均を取ることで、結果を出した。通信速度は 24[Mbps], 36[Mbps], 48[Mbps], パケットサイズは 1500[Bytes], 送信電力は 20[dbm] である。スケジューリングには、越村氏が作成した、部分 MAX-SAT ソルバである q-maxsat[12] を使用した。比較対象としては、各通信速度の比較と、CSMA との比較の 2 点である。各通信速度の比較では、最適な通信速度の比較を行い、CSMA との比較では、CATBS が CSMA と比べてどれほどの性能の差が出ているのかを明らかにする。

4.2 シミュレーション結果

まず、各通信速度ごとのシミュレーション結果を図 5 に示す。過去の結果より、ノードを格子状に配置した場合には、通信速度 36[Mbps] までであれば、到達確率 90% 以上の高性能な無線メッシュ網を構築できていたが、ランダム配置にすることにより、いずれの通信速度においても、性能が低下することがわかった。このことから、今回の手法では、最適な通信速度を検討することができなかった。今回の結果から、CATBS では、格子状のトポロジであれば高性能な無線メッシュ網を構築することが可能であるが、ランダム配置のトポロジにすることにより、性能が低下することが確認できた。今後、追加で評価実験を行い、この原因を考察し、ランダム配置のトポロジであっても高性能な無線メッシュ網が構築できる方法を模索していきたい。

次に、図 6 に、CSMA との比較結果を示す。結果から提案手法は CSMA と比べ、到達確率、スループットはやや向上しているが、遅延時間が非常に悪化していることが確認できた。これも上述と同じく、格子状であれば、CSMA と比べ高性能を発揮していたが、ランダム配置にすることにより、到達確率、スループットはやや向上しているが、遅延時間が著しく悪化した。結果から、CSMA との比較においても、提案手法は性能が向上しないことが確認できた。遅延を抑えるために、経路の迂回を許容しない、スロット切り替えのみ衝突を抑える方法が考えられる。経路の迂回を許容しない場合、スロット数が増大し、スロット切り替えによる遅延が発生することが考えられるが、経路の迂回を許容することにより発生する遅延は抑えられる可能性がある。今後、追加で評価実験を行い、考察を行なっていく。

5. おわりに

本論文では、CATBS を高速通信に適応させ、その上で最適な通信速度を検討した。また、CATBS が CSMA と比べてどの程度の性能を示しているかを評価した。結果から、CATBS は、ランダム配置の場合には、性能を向上させることはできておらず、まだ向上の余地があると考えられる。

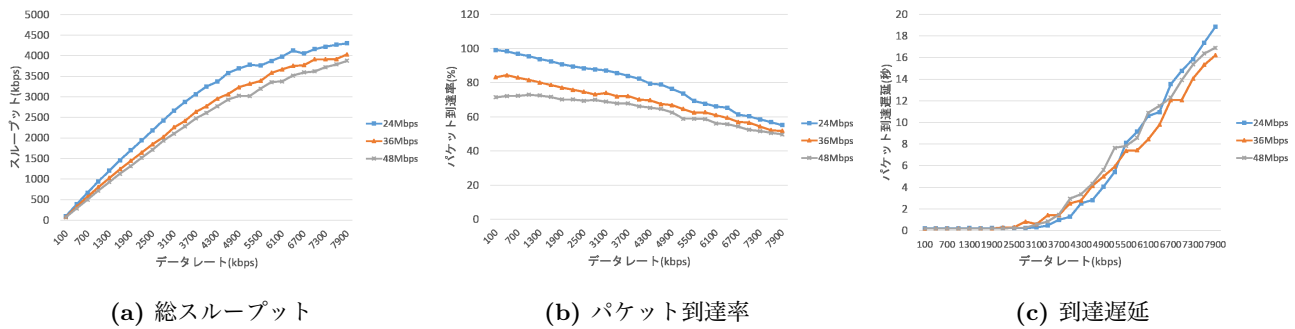


図 5: 各通信速度の比較

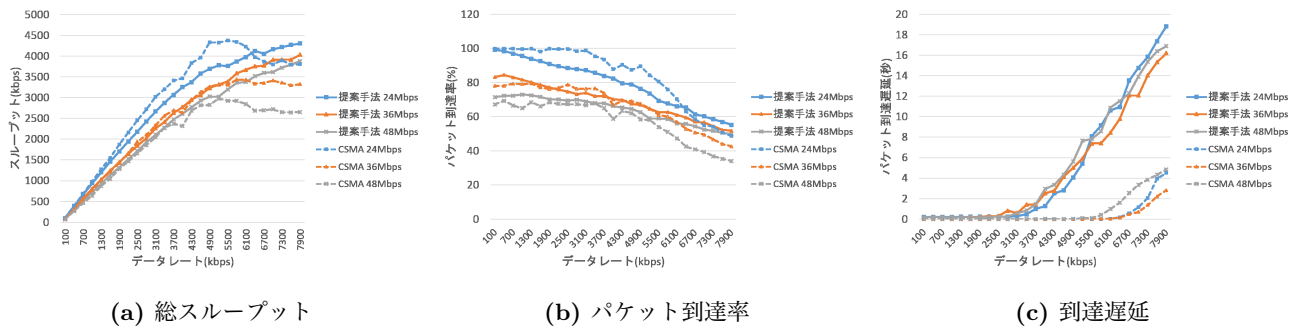


図 6: CSMA との比較

今後の課題として、CATBS の衝突の原因を考察することにより、CATBS で発生している衝突は低減可能かを模索する必要がある。また、今回、提案手法は経路の迂回を許容したスケジュールで無線メッシュ網を構築したため、CSMA との間に通信遅延の差が生じたが、経路の迂回を 0 にすることで、最短経路での通信が可能となる。その場合、スロットが多く必要になり、スロット切り替え時間の影響で遅延が発生する可能性があるが、その遅延時間の影響を確認する必要がある。それだけでなく、今回使用した距離で、格子状トポロジとの比較を行うことで、ランダム配置と格子状トポロジとの通信性能の差を確認し、計画的に配置することで通信性能を向上させることが可能かどうかを検討したい。数多く考察の余地が残っているため、今後も発展を行っていく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16K12422 の助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

[1] IEEE802.11 Wireless local Area Networks, <http://www.ieee802.org/11/> (referred in Feb 2017).
[2] Akyildiz, I. and Wang, X.: Wireless Mesh Networks, John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2009.
[3] B. Bharghavan et al., "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs," In Proc. ACM SIGCOMM'94, 1994.
[4] J.L. Sobrinho, R. de Haan, J.M. Brázio, "Why RTS-CTS Is Not Your Ideal Wireless LAN Multiple Access Proto-

col," In Proc WCNS'05, 2005.
[5] 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.
[6] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "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).
[7] Hiromichi Kanaoka and Takuya Yoshihiro, "Combining Local Channel Selection with Routing Metrics in Multi-channel Wireless Mesh Networks," IPSJ Journal of Information Processing (JIP), Vol.23, No.2, 2015.
[8] 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).
[9] J. Mo, H.S So, and J. Walrand, "Comparison of Multi-channel MAC Protocols," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.7 Issue.1 (2008).
[10] Takuya Yoshihiro and Taiki Nishimae, "Practical Fast Scheduling and Routing over Slotted CSMA for Wireless Mesh Networks," In Proc. of IEEE/ACM International Symposium on Quality of Service (IWQoS2016), 2016.
[11] P.Gupta and P.Kumar, "The capacity of wireless networks," Information Theory, IEEE Transactions on, vol. 46, no. 2, pp.388-404, Mar, 2000.
[12] M. Koshimura, T. Zhang, H. Fujita, R. Hasegawa, "QMaxSAT: A Partial Max-SAT Solver," Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation, Vol.8, pp.95-100,2012
[13] 岩間一雄, "アルゴリズム理論入門," ISBN-4-7856-3125-2, 昭晃堂, 2001.
[14] Network Simulator Scenargie, Space Time Engineering, available from <https://www.spacetime-eng.com/jp/> (referred in Jan 2017).