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

竹田隼基[†1,a)]　吉廣卓哉[†2,b)]

近年，有線ネットワークに比べて低コストで広範囲のネットワーク接続性を提供できる無線メッシュ網が注目されている．データリンク層に IEEE802.11 を用いる無線メッシュ網においては，隠れ端末問題が発生することで通信性能が大幅に低下する問題がある．複数の周波数チャンネルを用いることで隠れ端末問題を含めた干渉を解決しようとする多チャンネル無線メッシュ網の試みもあるが，IEEE802.11 を用いる限りは，利用できるチャンネル数が少なく，隠れ端末問題は未だに深刻な問題を含んでいる．本研究では，単一チャンネル或いは多チャンネル無線メッシュ網において，利用できるチャンネル数が少ない状況でも，隠れ端末問題の影響を低減し通信性能を向上する新たな手法を提案する．提案手法では，各ノードが常に 2 ホップの距離にあるノードの送信待ちデータの量を把握し，送信待ちデータ量が多いノードを優先して自分の送信チャンネルを選択，或いは送信タイミングを制御する．この方法により隠れ端末問題による送信データの衝突を低減し，効率的なデータ送信を実現する．

1. はじめに

無線メッシュ網は，固定基地局間を無線通信により接続し構成されたネットワークであり，広い範囲に安価にネットワーク接続を提供できる技術として注目されている．無線メッシュ網では，限られた周波数領域の中で多数の基地局間通信を実現する必要があるため，通信性能を向上するためには，基地局間の干渉をいかに減少させるかが鍵となる．

近年は，TDMA (Time Division Multiple Access)を無線メッシュ網に適用したデータリンク層モデルである STDMA (Spatial TDMA)[1]に基づいた研究が盛んである．STDMA では，各通信リンクを複数の時間スロットに分割し，送信データが互いに衝突しないように，各通信リンクに対して送信可能な時間スロットを割り当てる．効率的な通信を実現する種々のスケジューリングアルゴリズムが提案されている[2]．しかし，STDMA を実現するためにはネットワーク上の全ての基地局間で正確な時刻同期が必要であり，高価な装置が必要である．スケーラビリティの問題も報告されている[3]．また，典型的には，スケジューリングアルゴリズムにはネットワーク内の通信要求を行列等の形式で与え，最適なスケジューリングを導出する．このため，トラフィックパターンが時間とともに大きく変化するようなネットワークにおいては，固定的なスケジューリングがトラフィックパターンの変化に十分に追従できないという問題も含んでいる．

一方で，データリンク層プロトコルとして現時点で広く普及している IEEE802.11 を用いた無線メッシュ網の研究も進められている[4]．IEEE802.11 は，データリンク層モデルとして CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)を用いるため，トラフィックパターンや周囲の電波状況の変化に柔軟に対応できるだけでなく，インタフェースが既に普及しており安価に入手できる．IEEE802.11 を用いて安価かつ手軽に信頼性のある無線メッシュ網が実現できれば，幅広い分野への無線メッシュ網の応用への道が開かれる．しかし，IEEE802.11 で利用できる独立したチャンネル数は限られており，このため，隠れ端末の影響で通信性能が大幅に低下する問題が発生する．

IEEE802.11 を用いた無線メッシュ網の通信性能を向上する研究として，メトリックを用いる方法がある．Couto らは，無線リンクにおける平均再送回数をリンクメトリック ETX として計算する手法を提案した[5]．ETX は，無線リンクに一定時間毎に probe パケットを送信し，その受信成功割合に基づいて計算できる．メトリックに基づいた最短経路計算により，宛先までの最も品質の良い経路を選択することができる．リンク間の干渉を低減するために，複数の周波数チャンネルを用いて無線メッシュ網を構成する試みもなされており，多チャンネル無線メッシュ網向けのメトリックも多数提案されている[6][7].

CSMA/CAを用いた多チャンネル無線メッシュ網の試みは他にもある．限られたチャンネル数の範囲内で，できるだけ干渉を低減するために，干渉が最小化されるような各リンクへのチャンネル割り当てを行う研究がある．この問題は，STDMAのスケジューリング問題において，時間スロットを周波数チャンネルに置き換えた問題と考えられ，スケジューリング問題との類似性が高い[2]．この問題を，グラフ上の枝彩色問題として解く方法等が提案されている．しかし，これらの提案にもかかわらず，IEEE802.11を用いる限りは利用できる周波数チャンネルの数は少なく，隠れ端末問題による性能劣化は依然として深刻な問題である．

我々は，IEEE802.11を用いた多チャンネル無線メッシュ網において，利用できるチャンネル数が少ない状況でも，

†1 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of System Engineering, Wakayama University
†2 和歌山大学システム工学部
Faculty of System Engineering, Wakayama University
a) s141036@center.wakayama-u.ac.jp
b)tac@sys.wakayama-u.ac.jp

© 2013 Information Processing Society of Japan

隠れ端末問題の影響を低減し通信性能を向上する新たな手法を提案した[8]．この手法では，各ノードが複数のチャンネルを利用できる多チャンネル無線メッシュ網において，各ノードが常に2ホップの距離にある（つまり，隠れ端末の関係にある）ノードの送信待ちパケット数を把握する．そして，送信待ちパケット数が多いノードを優先して自分の送信チャンネルを選択することにより，時刻同期をすることなく，効率的なデータ送信を実現した．しかし，この手法は送信待ちパケット数を通信フローの下流のみに伝達しており，隠れ端末問題が発生し得る全てのノードに伝達できていなかった．このため，さらに通信性能を向上する余地が残されていると考えられる．

本論文では，ノードの送信待ちパケットの量を周囲のノードに伝えるアルゴリズムを変更し，隠れ端末の関係にある，2ホップの距離にある全てのノードに伝えることを可能にする．この情報に基づいて，各ノードが送信チャンネル及び送信タイミングを制御することで，従来よりも効率的な通信を実現し，通信性能を向上する．

本論文の構成は以下の通りである．2 章では提案手法を理解するために重要となる隠れ端末問題について述べる．3 章では提案手法を詳細に説明する．4 章ではシミュレーション評価について述べ，5 章でまとめる．

2. 無線メッシュ網における問題点

2.1 CSMA/CA

無線通信では伝送媒体である空気を共有するため，互いに電波が届く範囲にある複数の端末が同時に電波を送信すると，電波の衝突により正常に通信ができない．これを防ぐための，無線通信における代表的なデータリンク層モデルとして，CSMA/CAが挙げられる．CSMA/CAでは，まずフレームを送信するノードが近隣に通信中のノードがあるかを検知（キャリアセンス）する．通信中のノードがあれば通信が終了するまで待機し，なければランダムな時間待機した後にフレームを送信する．この仕組みにより，ネットワーク上の隣接ノード間で送信フレームが衝突することを防ぎ，効率的に通信できる．

2.2 隠れ端末問題

CSMA/CA が動作する無線メッシュ網では，隣接ノード間のフレームの衝突を防ぐことができる．しかし，2 ホップ離れたノード間では互いの電波を検知できないため，フレームの衝突を防ぐことができない．また，このような状況では，高確率でフレームの衝突が発生し，通信性能を著しく低下させる．この問題は隠れ端末問題と呼ばれ，実用的な無線メッシュ網を実現するためには解決しなければならない問題である．

隠れ端末問題を例を用いて説明する．図1では無線メッシュ網にノードAからDへの 1 本の通信フローが発生している．隣接ノード同士では，CSMA/CAによりフレームの衝突は起こらない．しかし，AとCは互いの通信範囲外に位置しており，互いの電波を検知できない．このため，AがBにフレームを送信している時に，CがDにフレームを送信すると，Bにおいて電波が衝突し，Bは正しくフレームを受信できない．

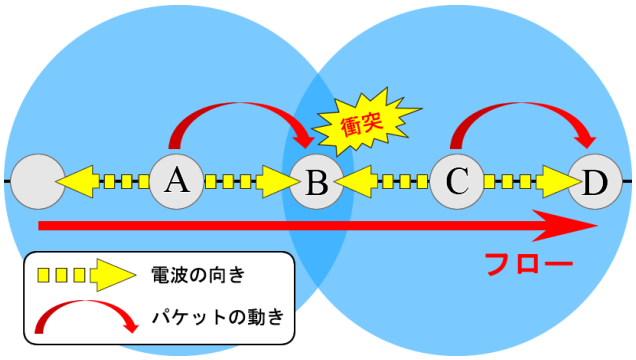

図 1 マルチホップ通信における隠れ端末問題

電波が衝突した場合には，送信ノードはランダムに決まるバックオフ時間だけ待った後にフレームを再送する．バックオフ時間はコンテンションウィンドウ（CW）の範囲内でランダムに決まるが，同一フレームの再送回数が増える度にCWは2倍になり，バックオフ時間が増加する．この仕組みによって再送時にフレームが再び衝突する確率を低減しているが，フレームの衝突が頻繁に発生する状態では，通信性能の大幅な悪化は避けられない．

3. 協調的チャンネル選択手法

3.1 想定する無線メッシュ網

提案手法は単一チャンネル，または多チャンネルの無線メッシュ網の上で動作することを想定する．このネットワークでは，各ノードが CSMA/CA に準拠したネットワークインタフェースを備えることを想定する．複数のチャンネルが利用可能な場合には，どの隣接ノード間でも，これら全てのチャンネルを用いて通信が可能とする．つまり，ノードは全てのチャンネルで並行して CSMA/CA に基づいたデータの送受信が可能であり，例えばあるチャンネルでデータフレームの送信中に異なるチャンネルで Ack フレームを送信し，また別のチャンネルはデータフレームを受信することもある．このようなネットワークは，例えば，(i)各ノードがチャンネルの数だけのネットワークインタフェースを備え，独立したチャンネルを設定する，或いは(ii)緩やかな時分割により時間をスロットに分け，各スロット内で CSMA/CA に基づいた通信を行う，等の方法により実現できる．また，ノードが利用できるチャンネル数は比較的少なく，リンク間で隠れ端末問題を起こさないようなチャンネル割り当てを行うには十分でないことを想定する．

本ネットワークの無線リンクでは無指向性アンテナが

© 2013 Information Processing Society of Japan

用いられており，従って 2 ホップ離れたノードが同じチャンネルを用いてデータを送信すると受信ノードにおいて衝突する可能性がある．経路制御プロトコルに関する制約はないが，現在一般的に用いられるプロアクティブ型もしくはリアクティブ型の最短路ルーティングプロトコルが想定される．提案手法はこのように幅広い方式の無線メッシュ網に適用可能である．

3.2 提案手法の設計

提案手法では，各ノードは全てのチャンネルで並行して，CSMA/CAに基づいたフレーム送受信を行う．但し，データフレームの送信を行うチャンネルは一つに限定し（以後，これを**送信チャンネル**と呼ぶ），一定時間t毎に変更される．

送信チャンネルの選択は，各ノードにおいて自律的に，できるだけ隠れ端末問題が発生しないように行われる．2.2節で述べたように，隠れ端末問題は，通信性能を著しく損なう要因であり，主に2ホップ離れたノードが同じチャンネルでフレームを送信することにより発生する．そこで提案手法では，各ノードが，2ホップ離れた全てのノード（以後，**2ホップノード**と呼ぶ）に自分の送信チャンネルを通知する．つまり，各ノードは，全ての2ホップノードの送信チャンネルを知ることができる．この情報を基に，各ノードは，隠れ端末問題ができるだけ発生しないように自分の送信チャンネルを選択する．一定時間tの間隔で送信チャンネルが選択されることで，そのときの通信状況に応じて動的なチャンネル選択が可能になる．

次に，各ノードがどのようにチャンネルを選択するかについて説明する．提案手法では，最も送信待ちパケット数が多く，輻輳しているノードを優先して送信チャンネルを選択する．このために，各ノードは，送信チャンネルと同時に，そのノードの送信待ちパケット数も広告し，全ての2ホップノードに伝える．そのうえで，2ホップノードのうち，送信待ちパケット数が多いノードと送信チャンネルが競合しないように，自分の送信チャンネルを選択する．なお，チャンネル選択は，そのときのネットワークの状態を敏感に反映する必要があるため，2ホップノードへの送信チャンネルや送信待ちパケット数の伝達は，ネットワークを流れるパケットのヘッダ上にフィールドを追加して記録することで行われる．

図2に提案手法の動作原理を例を用いて説明する．このネットワークでは複数の通信フローが発生しており，ある時刻にノードAの送信待ちパケット数が増加したと仮定する．ノードAはチャンネル1を選択している．その情報はパケットを通じて，全ての2ホップノードに伝達される．その結果，それらのノードは送信待ちパケット数が多いノードAの送信チャンネルであるチャンネル1を避けて，チャンネル2や3を選択する．こうすると，ノードAは周囲に隠れ端末問題を発生するノードがいないため，短時間で自分の送信待ちパケットを送信しきることができる．ノードAの送信待ちパケット数が減少すると，その情報はパケットによってすぐに2ホップノードに伝達される．今度は，次に送信待ちパケット数が多いノードが優先されて，送信待ちパケットを短時間で送信することになる．このように，送信待ちパケット数が多いノードが順番に優先されて，溜まっているパケットがポンプのように掃き出されることを繰り返すことで，隠れ端末問題の影響を抑えた効率的な通信を行う．

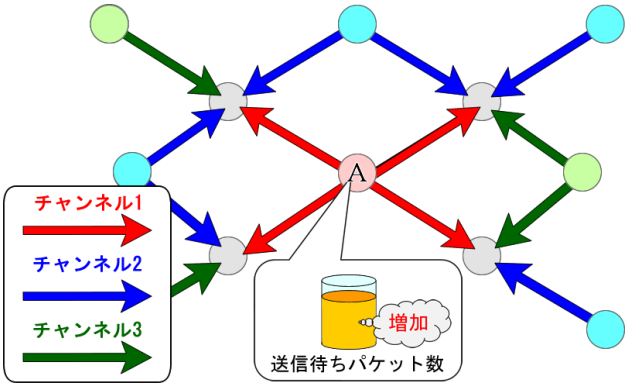

図 2 提案手法の概要

ところで，あるノードが送信チャンネルを選択する場合に，全てのチャンネルにおいて，自分よりも送信待ちパケットが多い2ホップノードが存在する場合には，そのノードは，パケットを送信すべきではない．自分よりも送信待ちパケットが多いそれらのノードを優先すべきである．よって，提案手法では，その場合にはパケットの送信を停止し，時間tだけ待ってから，再度チャンネル選択を試みる．このような送信タイミングの制御によって，一層の隠れ端末問題の抑制を行う．また，単一チャンネルの場合にも本手法を適用できるようになる．

上記のように，提案手法は，送信待ちパケット数が多いノードを優先して，一定時間毎に送信チャンネルを変更する，或いは送信を止めることにより，利用できるチャンネル数が少ない場合でも，隠れ端末問題の影響を低減した効率的な通信を実現する．

3.3 使用チャンネルと送信待ちパケット数の伝達

提案手法が正しく動作するためには，ネットワーク上で転送されるパケットのヘッダを用いて，全ての 2 ホップノードに，自分のノード ID，送信チャンネル ID，及び送信待ちパケット数（以後，これら 3 つのデータの組を，**チャンネル選択情報**と呼ぶ）を伝達することが望ましい．しかし，ネットワーク上で流れている通信フローの経路によっては，全ての 2 ホップノードに伝達しなくても十分である．

このことを図 3 を用いて説明する．図 3(a)は，格子状のネットワークに 1 本の通信フローのみが流れている状況の例である．各ノードは，上下左右の隣接ノードとは通信で

© 2013 Information Processing Society of Japan

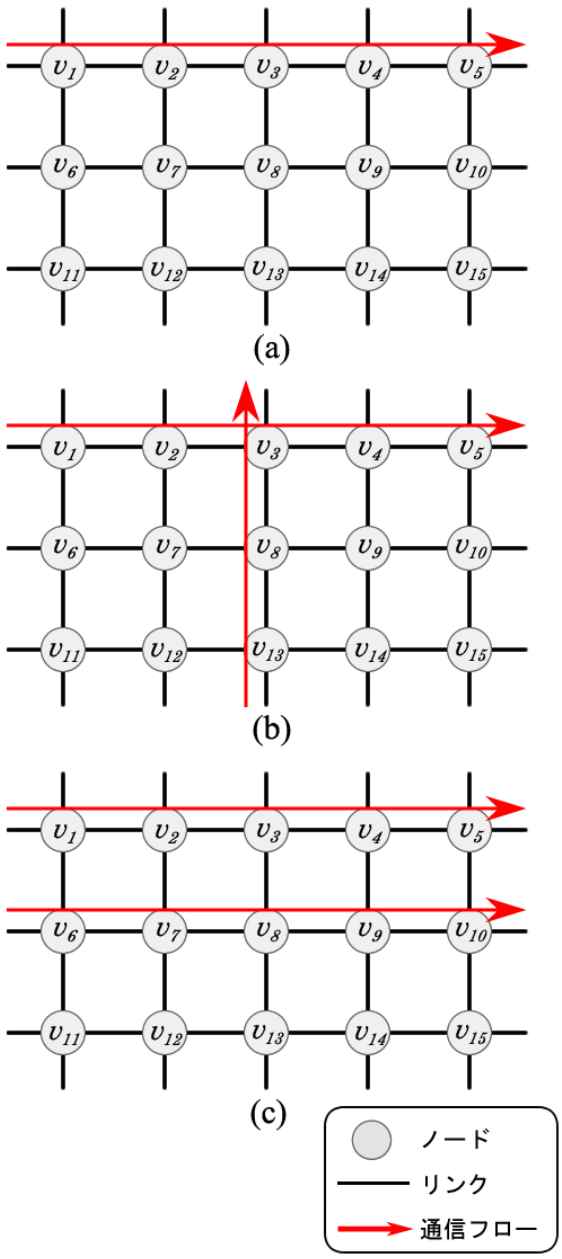

図 3 チャンネル選択情報の伝達例

きるが，斜めには通信できないように配置する．この場合には，ノードv_3は，ノードv_{13}に情報を伝達できない．しかし，ノードv_3は，v_1とv_5に情報を伝達できれば良く，v_{13}には伝達する必要がない．なぜなら，v_{13}はパケットを送信せず，隠れ端末問題の原因にならないからである．図 3(b)は，2 本の通信フローが存在している場合である．この場合には，ノードv_3は，v_1とv_5に加えて，追加された通信フロー沿った 2 ホップノードであるv_{13}にも情報を伝達する必要がある．さらに，特殊な場合として，図 3(c)のような直接交差しない 2 本の通信フローが存在する場合を考える．この場合には，v_3は，v_1とv_5に加えて，v_7及びv_9にも情報を伝える必要がある．なぜなら，直接的にフローの流れで接続されていなくても，例えばv_3とv_7が同時にパケットを送信すると，v_8において隠れ端末問題が発生するからである．つまり，ネットワーク上に存在する通信フローに沿って上流と下流の 2 ホップノードに加えて，隣接ノードに通信フローが流れている場合には，その 1 ホップ上流と下流のノードにも，情報を伝達する必要がある．逆に，これらの 2 ホップノードに情報を伝達できれば十分である．

2 ホップノードに情報を伝達する方法を述べる．まず，通信フローの下流に情報を伝達するのは簡単である．パケットヘッダ上に，1 ホップ前のチャンネル選択情報を入れる「1 ホップ前情報」フィールドと， 2 ホップ前のチャンネル選択情報を入れる「2 ホップ前情報」フィールドを用意すれば良い．具体的には，パケットがルータに到着したときに，「1 ホップ前情報」を「2 ホップ前情報」にコピーし，「1 ホップ前情報」に自分の値を格納する．これにより，自分の情報は下流の 2 ホップノードに届く．また，隣接ノードが自分でない他のノードに対して送信するパケットからも情報を収集（オーバヒアすることにより情報を読み取る）することで，フローが通過しない下流方向の 2 ホップノードに対しても情報を伝達することができる．

それ以外の 2 ホップノードに情報を伝達するために，提案手法では，チャンネル毎に情報を集計してパケットに格納する．つまり，利用できるチャンネルの集合をCとすると，$c \in C$である全てのチャンネルcに対して，チャンネルcのチャンネル選択情報を格納する「チャンネルc情報」フィールドをパケットヘッダ上に用意する．

チャンネル毎の情報の集計は次のように行う．各ノードは，そのノードに届くパケット，及び隣接ノードが送信するパケットの全てに対して，その「1 ホップ前情報」を読み取り，ノード ID 毎に集計して「隣接ノード情報リスト」を作成しておく．そのうえで，そのノードが送信する全てのパケットに対して，次の処理を行う．全てのチャンネル$c \in C$に対して，「隣接ノード情報リスト」内で最も送信待ちパケット数が大きいチャンネル選択情報を，「チャンネルc情報」フィールドに格納する．ただし，それが，そのパケットの次ホップノードの情報であれば，次に送信待ちパケット数が大きいものを代わりに用いる．この方法により，例えば図 3(a)ではv_3の情報をv_1に伝え，図 3(c)ではv_3の情報をv_7やv_9に伝えることができる．その結果，各ノードは，2 ホップノードの中で，各チャンネルにおいて最も送信待ちパケット数が多いノードを知ることができる．

図 4 は，パケットヘッダ上に追加するフィールドを図示している．「1 ホップ前情報」「2 ホップ前情報」の 2 つのチャンネル選択情報に加えて，用いるチャンネル数$|C|$だけのチャンネル選択情報フィールドが必要である．チャンネル選択情報のフィールドフォーマットは本研究の対象外とするが，一つのチャンネル選択情報に対して概ね 16 ビット程度の大きさで実装できることを想定する．例えば，本論文の評価実験では，「ノード ID」，「送信チャンネル ID」，「送信待ちパケット数」のそれぞれに対して， 8bit，3bit，5bit の大きさを割り当てた．ノード ID は，予め各ノードに

© 2013 Information Processing Society of Japan

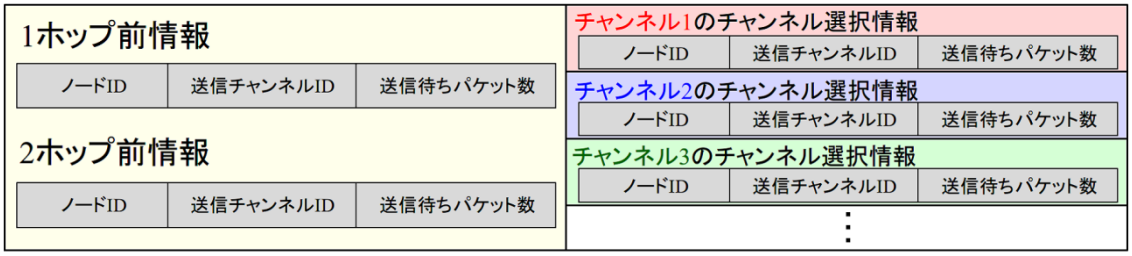

図 4　パケットヘッダ上に追加するフィールド

割り当てる必要がある．2 ホップの範囲で一意の ID が決まれば良いので，ノード数が多い場合には，3 ホップ以上離れた場所であれば，ID が重複しても構わない．

3.4 送信チャンネルの選択

各ノードは，自分宛に届いたパケット及び隣接ノードが送信しオーバヒアできたパケットの全てから，含まれるチャンネル選択情報を抽出し，これらを用いて一定時間t毎に送信チャンネルを選択する．具体的には，次のような手続きによって行われる．

まず，抽出したチャンネル選択情報を，ノード ID 毎にリストとして管理しておく．ただし，その中に隣接ノードがあれば，それは除いておく．次に，一定時間t毎に，送信チャンネルを選択する．これは，リストから，各チャンネルに対して，そのチャンネルを使っている最も送信待ちパケット数が多いノードを抽出したうえで，その送信待ちパケット数が最も小さいチャンネルを選択する．ただし，その最も小さい送信待ちパケット数が，自分の送信待ちパケット数よりも大きければ，パケットの送信を停止する．

上記の動作により，一定時間毎に，隠れ端末問題を抑制するようなチャンネル選択を行うことができる．

4. 評価

4.1 実験シナリオ

提案手法をネットワークシミュレータ Scenargie ver.1.6 に実装し，シミュレーションを通じて提案手法の性能を評価する．

まず評価実験において用いるネットワークトポロジについて説明する．一般的に，無線メッシュ網ではノードの通信可能域が何重にも重ならないようにノードが計画的に配置されるため，ノードの密度が極度に密や粗になることはないと考えられる．そこで評価実験では，ノードを粗密のないグリッド状に配置することによって，一般的な無線メッシュ網におけるトポロジを模している．本実験ではノードを 1 辺 7 個の正方形に配置した 7×7 トポロジと，1 辺 5 個の正方形に配置した 5×5 トポロジの 2 種類のトポロジを用意する．これらのトポロジでは，縦横方向のリンクは確立されるが，斜め方向のリンクが確立されないように，共に隣接ノード間の距離を 300m に設定する．

発生させる通信フローは全て UDP パケットを用いた CBR(Constant Bit Rate)通信である．7×7 トポロジにおいては，図 5 のように対辺に対して 20 本の通信フローを発生させ，5×5 トポロジでは，図 6 のように対角に対して 4 本のフローを発生させる．

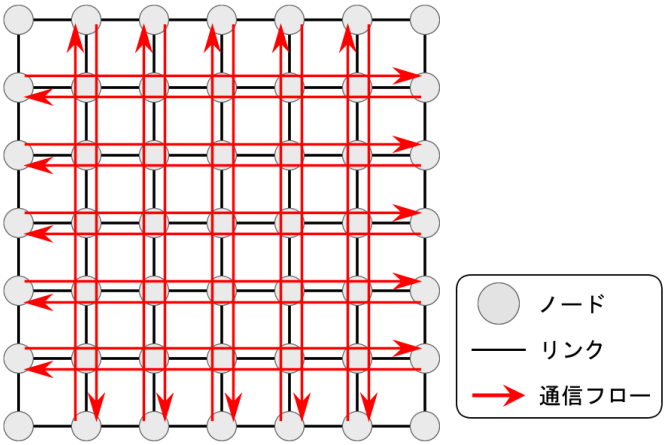

図 5　7×7 トポロジ

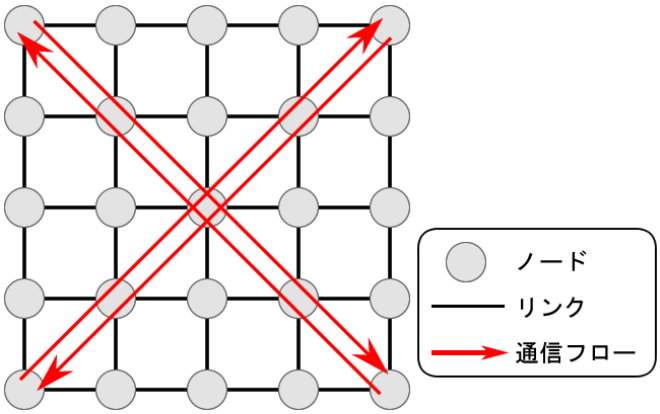

図 6　5×5 トポロジ

ノード間を接続するリンクの帯域幅は 6Mbps とする．各ノードには 3 本のネットワークインタフェースを装着しており，それぞれに 2412MHz，2437MHz，2462MHz の周波数を用いて通信するように設定した．各チャンネルは周波数が十分に離れているため，ほとんど干渉しない．RTS/CTS は使用しない．経路制御には，プロアクティブ型ルーティングプロトコル OLSRv2 を用いた．実験時間は 6 分間とし，経路が安定した実験開始後 1 分の時点から一斉に複数の通信フローを発生させる．

提案手法の性能を評価するために，比較手法として，チャンネルをあらかじめ静的に割り当てた多チャンネル無線メッシュ網を用いる．チャンネル割り当ては，文献[2]に書かれている，conflict graph を用いた最適化を行った．ネッ

© 2013 Information Processing Society of Japan

トワークの隣接関係から conflict graph を構築した．conflict graph とは，ネットワークの各リンクを頂点とし，2 つのリンクが（干渉するため）同時に通信できない場合には頂点間に辺が存在するようなグラフである．そのうえで，頂点にチャンネルを一つずつ割り当て，隣接頂点と同じチャンネルが割り当てられた場合にはコストが 1 だけかかるとする．コストが最小になるように最適化を行った．最適化には遺伝的アルゴリズムを用い，最適解に近い解を求めた．遺伝的アルゴリズムの世代数は 5 万世代とし，結果は十分に収束したものを用いた．

性能比較対象として，上記の静的チャンネル割当法と，提案手法に加えて，著者らの先行手法[8]も加えた．

本実験では単一チャンネルのみで構成された無線メッシュ網でも実験を行う．単一チャンネルのみで構成された無線メッシュ網では，チャンネルの切り替えを行うことはできないので，提案手法における送信タイミングの制御による通信性能への影響を確認する．つまり，周囲のノードの送信待ちパケット数によって，そのノードの送信を止めることにより，隠れ端末問題の発生を抑える．提案手法を適用した単一チャンネル無線メッシュ網と，通常の Wi-fi を用いた単一チャンネル無線メッシュ網の性能を比較した．

各実験において，通信フローの送信レートを変化させて提案手法と比較手法の通信性能を比較した．なお，複数の通信フローを発生させる場合には，全てのフローの送信レートは同一にした．提案手法は，一定時間t毎にノードが送信チャンネルを変更する．この時間間隔t（チャンネル更新時間と呼ぶ）は，より高性能が出るようにあらかじめパラメータの調整を行い，提案手法では 0.05 秒，先行手法[8]では 0.07 秒に設定した．評価指標としてネットワークの総スループットとパケット到達率を用いる．

4.2 実験結果

7×7 トポロジ，3 チャンネルの場合の実験結果を図 7 と図 8 に示す．スループットとパケット到達率のいずれについても，低送信レートでは 3 手法とも同程度の性能であるが，既存手法（静的チャンネル割当法）は総送信レートが 1.28Mbps を超えると急激に性能が低下する．パケット到達率に着目すると，送信レートの上昇とともに既存手法は急激に到達率が低下するのに対し，先行手法と提案手法は比較的穏やかに到達率が低下する．また，先行手法はスループットが 1.7Mbps あたりで頭打ちしているが，提案手法では 2Mbps を超えるまで上昇し，スループット性能の向上が見られた．これは，既存手法では比較的低い送信レートでも隠れ端末問題が深刻化するのに対して，提案手法ではある程度負荷が高くなっても隠れ端末問題の緩和を行えるためである．トラフィック量がより多い場合に，提案手法が効果を発揮することを示している．

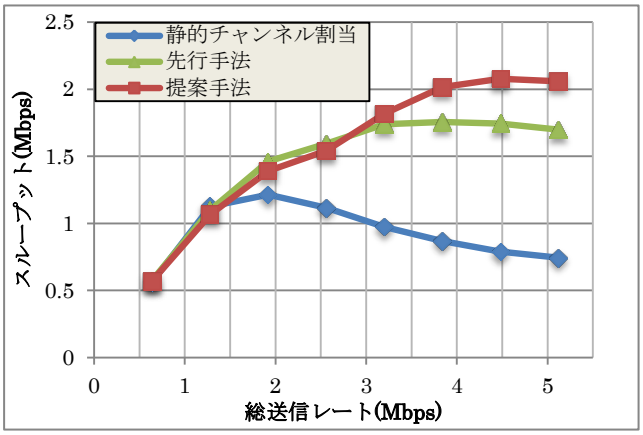

図 7　7×7 トポロジ（3ch）　スループット

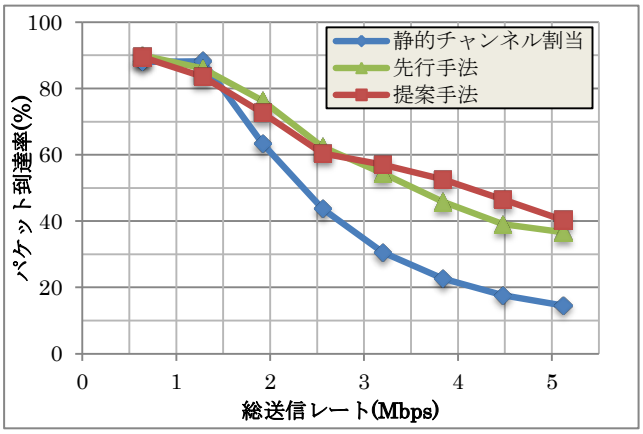

図 8　7×7 トポロジ（3ch）　パケット到達率

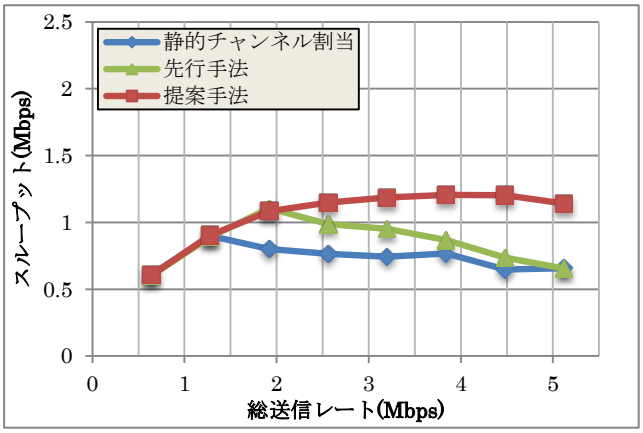

図 9　5×5 トポロジ（3ch）　スループット

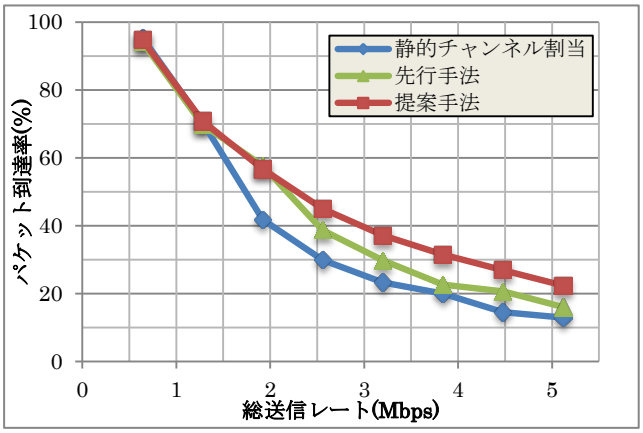

図 10　5×5 トポロジ（3ch）　パケット到達率

© 2013 Information Processing Society of Japan

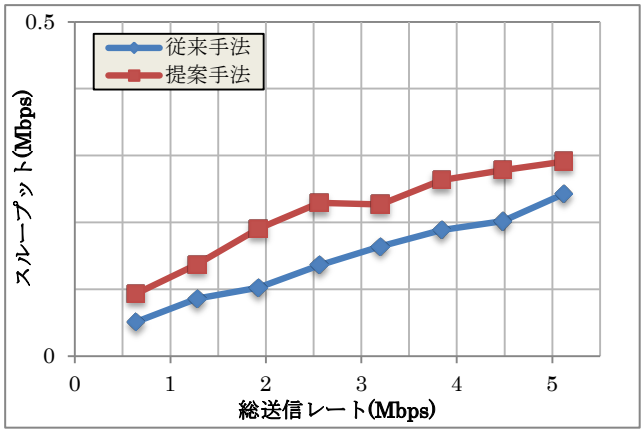

図 11　7×7 トポロジ（1ch）スループット

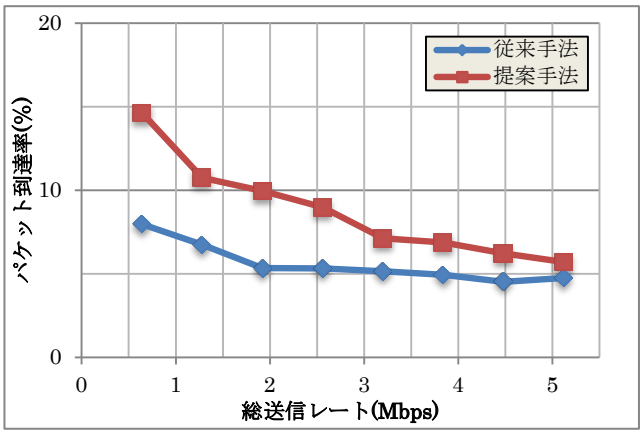

図 12　7×7 トポロジ（1ch）　パケット到達率

次に，5×5 トポロジー，3 チャンネルの場合の実験結果を図 9 と図 10 に示す．こちらも，総送信レート 1.28Mbps までは 3 手法とも同程度の性能であるが，既存手法はスループットが 0.9Mbps から性能が低下を始める．先行手法はスループットが 1.1Mbps まで上昇するがその後下降する．7×7 の場合と比較すると，先行手法の性能低下が比較的低い送信レートから始まっている．これは，先行手法では全ての 2 ホップノードに対して送信待ちパケット数が伝達されないためであると考えられる．7×7 の場合と異なり，通信フローの経路が対称でないため，下流のみに情報を伝達する先行手法では十分ではない．これは，上流ノードが下流ノードの送信待ちパケット数を知ることができず，従って，パケットを送信するが衝突により送信できないことを繰り返すためである．その結果，隠れ端末問題がより頻繁に発生し，ある程度低い送信レートでも通信性能が低下している．これに対して，提案手法は通信フローの上流にも情報を伝達することにより，通信性能を向上することができた．また，パケット到達率の推移に関しても，スループット性能と対応した動きが見られる．

最後に 7×7 トポロジ，単一チャンネルの実験結果を図 11 と図 12 に示す．実験を行った全ての送信レートにおいて，スループットとパケット到達率が向上していることが確認できる．これは送信タイミングの制御だけでも，隠れ端末問題の抑制効果があることを示している．

5. おわりに

本研究では，IEEE802. 11 を用いた多チャンネル無線メッシュ網あるいは単一チャンネルの無線メッシュ網において，ノードが協調的にチャンネル選択を行い，送信タイミングを制御することによって，隠れ端末問題の影響を低減し通信性能を向上する手法を提案した．また，ネットワークシミュレータを用いて提案手法の性能を評価した．評価実験の結果，提案手法は，静的にチャンネルを割り当てる既存手法よりも高い通信性能を示すことを確認した．また，過去に著者らが発表した先行手法よりも，主に高負荷な通信時，或いは通信フローが対称でない場合に，より高い性能を示すことを確認した．さらに，提案手法は単一チャンネルで構築された無線メッシュ網にも適用でき，通信性能を向上することができることを確認した．

今後の課題として，スループットが向上しているとはいえ，パケット到達率が依然として高い水準にないことの原因を追求したい．送信キューが溢れたわけではなく，干渉によってパケットが損失していることが確認されており，隠れ端末問題も完全に解決されたわけではないと考えられる．性能改善の余地は十分にあると思われるので，現象をより詳細に分析し，その原因を把握することを次の一歩に向けての課題としたい．

参考文献

1) R. Nelson and L. Kleinrock, “Spatial TDMA: A Collision Free Multihop Channel Access Protocol,” IEEE Trans. Commun., vol.33, No.9, pp.934-944, 1985.

2) A.D. Gore and A. Karandikar, “Link Scheduling Algorithms for Wireless Mesh Networks,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No.2, 2011.

3) L. Huang and T. Lai, “On the Scalability of IEEE 802.11 Ad Hoc Networks,” In Proc. of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc), pp.173-182, 2002.

4) I.F. Akyildiz and X. Wang, “Wireless Mesh Networks,” John Wiley & Sons, Ltd, Publication, 2009.

5) D.S.J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, “A High -throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing,” In Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking (Mobicom), pp.134-146, 2003.

6) R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, “Routing in Multi-radio, Multi-hop Wireless Mesh Networks,” in Proc. of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pp. 114-128, 2004.

7) Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets, “Interference-aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks,” In Tech. Rep. UIUCDCS-R-2005-2526, Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.

8) 竹田 隼基，吉廣 卓哉“多チャンネル無線メッシュ網における協調的チャンネル選択手法，”情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル DICOMO2013 シンポジウム，pp. 7G-1, 2013.

© 2013 Information Processing Society of Japan