

キャリアセンスと時分割による無線 LAN アクセス方式の提案と評価

劉 雄^{†1} 妹尾 慎也^{†2}
重安 哲也^{†3} 松野 浩嗣^{†1}

本稿では、キャリアセンスと時分割の組み合わせによって隠れ端末問題を解消する方法を提案する。すなわち、ネットワークを隠れ端末が存在しない単位に分割し、その単位を 1 スロットとする時分割フレーム構成方法を示す。シミュレーションを行い、本方式は、高トラフィック時においてスループット性能の低下を防ぐことができることを確かめた。さらに、端末数とスロット長がスループットに及ぼす影響についても考察した。

Proposal and Evaluation of an Access Method for Wireless LAN by Time Division and Carrier Sense

LIU XIONG,^{†1} SENOO SHINYA,^{†2} TETSUYA SHIGEYASU^{†3}
and HIROSHI MATSUNO^{†1}

This paper proposes a method to cope with hidden terminal problem by a combination of carrier sense and time division. A graph representing the topology of a wireless network is divided into subgraphs in which no hidden terminal exists. A time slot is designed so as to involve all terminals in a subgraph but no terminal in other subgraphs. Computer simulations confirmed that the proposed method improves the throughput performance especially in a high traffic situation. Furthermore, effects of the number of terminals and the length of slots on the throughput performance are examined.

^{†1} 山口大学大学院理工学研究科, 山口市 (Faculty of Science and engineering, Yamaguchi University, Yamaguchi-shi)。

^{†2} 株式会社 NTT ネオメイト, 広島市 (Corporation NTT-Neomeit, Hiroshima-shi)。

^{†3} 広島国際大学工学部, 呉市 (Faculty of engineering, Hiroshima International University, Kure-shi)。

1. はじめに

近年、情報通信技術の急速な発展に伴い、携帯電話やインターネットなどの通信手段は、我々のごく身近なものとなるまで普及してきている。それに伴い、無線通信ネットワークに関する研究は盛んに行われている。

無線 LAN では、パケット単位でデータの通信が行われ、制御情報を格納したヘッダーとデータ部で構成されるパケットという任意の長さのデータで伝送される。このパケット無線 LAN では、複数の端末が同一の無線チャネルを共同で使用しているため、それぞれの端末が自分勝手にデータの送信を行ってしまうと、パケットの衝突が発生し、互いのデータを損傷してしまう恐れがあり、正確なデータの送信ができなくなってしまう。そのため、パケットの衝突を回避し正確な送信が行えるよう、どのように無線チャネルを使用していくかを定めるメディアアクセス制御 (MAC) プロトコルは、とても重要な役割を担っている。MAC プロトコルの代表的なものとして CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 方式ではデータを送信しようとする端末は、そのデータの送信前にチャネルの使用状況を検知し、他の端末がデータを送信中か否かを確認する。この動作をキャリア・センスという。伝送路のモニタにより他パケット伝送中ならば送信待機をするために、すでに伝送中であるパケットを破壊することが防がれ、パケット衝突が軽減される。

しかし、CSMA 方式には隠れ端末問題という重要な問題が存在する [1]。この隠れ端末問題とは、送信を行う端末同士が互いの通信範囲外に存在し、互いから通信可能な第三の端末が存在する場合、送信を行う端末同士は相手の送信状況をキャリア・センスすることができず、一方が送信中であるにもかかわらずデータを送信してしまい、第三の端末でパケットが衝突してしまうという問題である。

これまでにいろいろな隠れ端末問題を回避するための方法が提案されている。RTS/CTS による解決方法 [2] では短い制御用パケット RTS/CTS を用いることによって、送信端末の信号をキャリア・センスできない環境の端末が存在しても、受信局が送信する CTS を受信できれば送信局の存在を知ることができるため、隠れ端末問題を解決する手段となっている。周波数割り当てによる解決方法 [3] では固定された端末で構成されるネットワークにおいて、隠れ端末問題を生じないように各端末に周波数を割り当てることで、パケットの衝突を回避することに成功している。しかし、周波数を割り当てるにあたり、周波数という資源の効率的な利用を考えなければならなくなり、このことは、使用できる周波数には限りがあるという観点において、重要な問題となる。

そこで、本論文では、周波数割り当て方式の問題点を考慮しつつ、固定された端末で構成されるネットワークにおいて、端末の送信機会時分割により、隠れ端末問題の生じないネットワークの構築方法を提案する。その後、送信機会割り当てを行うための手続きについて説明し、提案方式の問題点を検討する。最後に、提案方式の有効性を確認するために、計算機シミュレーションを行い、その結果を解析することで提案の有効性を示す。

2. 時分割による提案

本提案では、隠れ端末問題を解決するために、与えられたネットワークをグラフとして捉え、そのグラフに対し、下に述べるように1点で共有クリーク分割 [3] を施す。あるグラフ G のノード (端末) 集合 S において、どのノードをとってもノード集合 S 中の全てのノードと接続しているとす。このようなノード集合 S からなるグラフを完全グラフといい、完全グラフになる誘導部分グラフのことをクリークという。その後、分割された各クリークに対して、隣接するクリーク同士が干渉し合わないよう、異なった送信タイミングを持つように送信タイミングを割り当てていく。このとき、干渉し合わないクリーク同士には同じ送信タイミングを与えることができる。このようにして構成されたネットワーク内では、どのクリークも完全グラフとなっているため隠れ端末は存在せず、他のクリーク内のノードに対しても、送信タイミングが違うので干渉しあうことはない。すなわち、隠れ端末の関係にある端末同士をそれぞれグループと見なし、グループに異なったタイミングでの送信機会を与え、干渉が起らないでパケットの衝突を回避できる。

2.1 1点共有クリーク分割 [3]

無線 LAN において、端末をノードとすると、2つの端末間で通信が可能であるため、ノード間にリンクを形成する。このようにして構成されるグラフに対し、

- (1) 各ノードは、少なくとも1つのクリークに属する。
- (2) どの2つのクリークも、たかだか1つの共有ノードをもつ。
- (3) クリークを形成するノードは定数個である。
- (4) あるクリークに属するノードに対し、このノードから他のクリークに属するノードへの経路はただ一つである。

以上の4つ条件を満たして分割すると、これを1点共有クリーク分割と呼ぶ。一般に、あるグラフに対する1点共有クリーク分割は複数存在する。

2.2 隠れ端末問題の解消

文献 [3] では、ネットワークを1点共有クリーク分割し、隣り合うクリークに異なる周波

数を割りあてることで、隠れ端末問題を解消している。本稿では周波数分割を時分割に置き換えた方式を提案する。

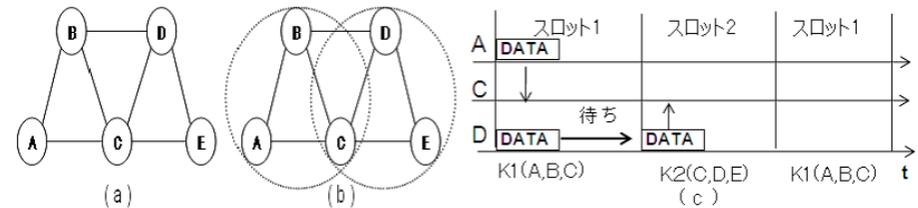


図1 1点共有クリーク分割

図1(a)のネットワークのグラフに端末Aが端末Cに対して送信を行っているとする。この状況下で、端末Dが端末Cに対して送信を行おうとしているとすると、端末Dは送信開始前にキャリア・センスを行うのだが、端末Aは通信範囲外に位置しているため、端末Aの送信を検知することができない。そのため、端末Dは送信を開始してしまい、端末C上でパケットが衝突し、どちらの送信も失敗する。このようなとき、端末Dと端末Aは隠れ端末の関係にあるという。

1点共有クリーク分割によって作られたクリーク数と同じスロット数をもつ時分割フレームを考える。ネットワークのグラフ図1(a)に対し、図1(b)のように1点共有クリーク分割されたとする。この場合は図1(c)のような2個のスロットからなるフレームとなる。分割されたクリーク $K1(A,B,C)$ と $K2(C,D,E)$ にそれぞれ異なったタイミングでの送信機会を与えると、このような状況下で、ノードAがノードCに送信を行う場合、ノードDはノードAと異なったクリークに属しているため、次の送信タイミングまで待機しなければならず、(a)のネットワークで発生したようなパケット衝突は起らない。つまり、ノードAとノードDは互いに干渉することなく送信を行うことができる。

また、クリーク間での送信はクリーク間の共有ノードを経由して行われる。ノードBからノードDへ送信する場合は、いったんノードCを経由してからノードDへ送られる。これは、共有点であるノードCが両方のクリークに属し、双方に割り当てられた送信タイミングを使用できるために可能となっている。

2.3 グループ化の手続き

任意のグラフに対してある1点共有クリーク分割が与えられたとする。このとき、各々

のクリークに対し送信スロットを割り当てることをグループ化と呼ぶ。当然、最も効率の良いグループ化とは、使用する送信タイミングの個数が最小となるようなグループ化である。クリーク抽出による効率的な送信タイミング割り当ては NP 完全問題であり [3]、現実的な時間で厳密解を求めることは困難である。そのため、文献 [3] には近似解を求める手続き DIVIDECLQ、CLQNODE、ASGNFREQ が与えられている。以下にこれらのアルゴリズムについて簡単に述べる。ただし、ASGNFREQ はその時分割版である ASGNTIME に変更してあるが、本質的には同じアルゴリズムである。

2.3.1 DIVIDECLQ

DIVIDECLQ は与えられたグラフの 1 点共有クリーク分割を求める手続きである。例として図 2(a) のようなネットワークのグラフ G を用い、4 つの処理段階に分けて進めている。

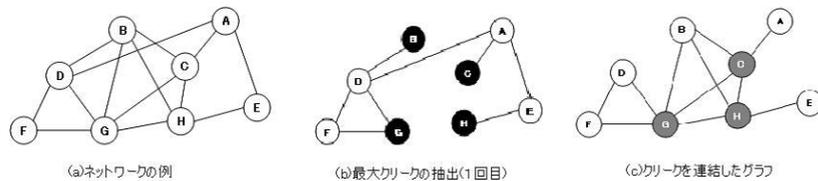


図 2 DIVIDECLQ 手続き例示

- まず、グラフ G から最大クリークを抽出し、これを K_m として G のノード集合 CLQ に入れる。(ここで $CLQ=CLQ_1, CLQ_2, \dots, CLQ_n(n-1)$ であり、各要素はクリークである。)
- 次に抽出したクリークのノードを黒に着色し、黒のノード同士のリンクを消去する。このとき、孤立点が生じたら、そのノードを消去する (1 回目したの結果を図 2 (b) に示す)。
- 処理後のグラフから、黒のノードを 1 つ含むように最大クリークを抽出し、 K_{m+1} として CLQ に入れる。さらに、このクリークのノードも黒に着色し、黒のノード同士のリンクを消去し、孤立点が生じたらそのノードも消去する。
- 以上の処理をノードがなくなるまで繰り返し、最後に図 3 で示すような CLQ を出力する。(灰色のノードはクリーク間の共有点となる。)

DIVIDECLQ によって生成された 1 点共有クリーク分割を、共有点で連結したグラフを図 2 (c) に示す。このグラフの全てのクリークに異なる送信タイミングを割り当ててグループ化したとすると、異なるクリークに属するノード同士は送信タイミングが違うので干渉が

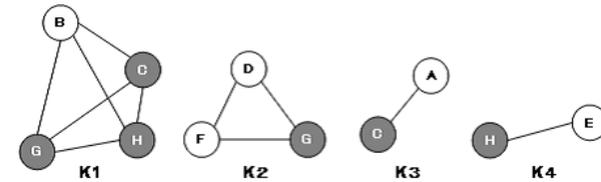


図 3 DIVIDECLQ 出力集合 CLQ

起こらないことがわかる。

この DIVIDECLQ の手続きでは、1 点共有クリーク分割の構成条件 1 から 3 を全て満たしていることは明らかであり、条件 4 に反するような、閉路を作るクリークが抽出されることがないことを保証している。

2.3.2 CLQNODE

CLQNODE の手続きでは、DIVIDECLQ の手続きによって求めた 1 点共有クリーク分割の 2 つのクリーク内に含まれるノード間に干渉が起こらないため、得られた CLQ を用い、次のように処理し、各クリークをノードとするようなグラフを出力させる。

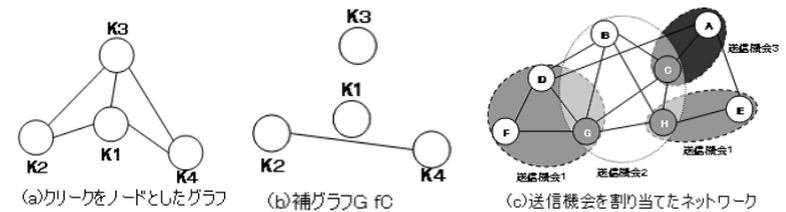


図 4 割り当て過程

- 得られた CLQ の各クリークをノードとし、クリーク K_i とクリーク K_j が 1 点共有しているならば、 K_i と K_j の間にリンクを張る。
- 次に、クリーク K_i に含まれるノード u とクリーク K_j に含まれるノード w の間に元のグラフ G でリンクがあれば、 K_i と K_j の間にリンクを張る。
- 最後に、各クリークをノードとする図 4(a) ようなグラフ G_f を出力する。 G_f により、どのクリーク間で干渉を及ぼし合うかを容易に知ることができる。

2.3.3 ASGNTIME

ASGNTIME では、CLQNODE に引き続き、干渉の起こらないネットワークを構築するために、隣接するクリーク同士に異なった送信タイミングの割り当てを行う。処理は次のようになる。

- CLQNODE によって得られたグラフ G_f の補グラフ G_{fC} (図 4(b)) を作る。
- グラフ G_{fC} から最大クリークを抽出し、このクリークに含まれる全てのノードに変数 $time$ の値を割り当てる。(変数 $time$ は割り当てられる送信機会数を表し、初期値は 1 となる。)
- 次に、 $time=time+1$ とし、抽出したクリークのノードとリンクを消去する。
- 以上の操作をグラフ G_{fC} のノードがなくなるまで繰り返す。

本例では送信機会 1 をクリーク K_2, K_4 に、送信機会 2 をクリーク K_1 に、送信機会 3 をクリーク K_3 に割り当てた。

三つの手続きにより、送信機会を割り当てたネットワークを図 4(c) に示す。この場合は 3 スロットからなる時分割フレームを用意すればよいことになる。クリーク内については、送信タイミングが同じでもキャリア・センスによりパケットの衝突が回避でき、クリーク間では、送信タイミングが異なるためパケットの衝突を回避することができる。このように、送信機会の時分割によって隠れ端末問題の生じないネットワークを構築することが可能である。

3. 時分割によるグループ化の問題点

時分割によって、前の例の場合は図 5 のように 3 つのスロットに分割して、利用される。時分割によるグループ化では、使用できるスロット数に制限はないため、大きなネットワークであっても、グループ化することが可能である。しかし、次のような二つの問題がある。



図 5 時分割したチャネル使用状況

- 待ち時間の発生
送信機会をあらかじめ定めているため、送信要求が発生しても送信可能な時間ではない場

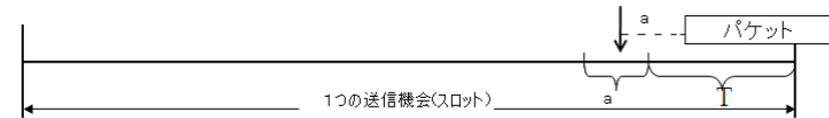


図 6 1 スロットの送信できない部分

合次の送信機会まで待機しなければならず、待ち時間の発生をもたらす。すなわち、図 5 のように、送信機会 2 でクリーク K_2 に属している端末 D は赤い矢印で示した時刻に送信しようとするが、自分の送信機会ではないから送信を行わず、次の送信機会 1 までの待ち時間が発生してしまう。つまり、大きなネットワークであった場合、確かに時分割では送信機会を割り当てることはできるが、割り当てる送信機会が多くなればなるほど次の送信機会までの待ち時間が長くなってしまふ。

- 無駄な時間の発生

図 6 のような 1 つの送信機会に注目し、送信機会の最後の $a+T$ 間で送信要求が発生すると、送信機会の限界を超えるため、伝送に成功しない。ここで、 a は正規化伝播遅延時間、 T はパケット長である。すなわち、この時間間隔は無駄な時間になってしまう。

以上の議論から、スロット長さはスループットに影響を与える重要な要因であることがわかる。大きい場合は大量な待ち時間が発生しまい、小さい場合は無駄な時間がしきりに発生してしまう。次の章でこの問題について考察する。

4. シミュレーション結果と評価

提案した時分割による手法を行えば、隠れ端末問題を解消することができる。そのことがネットワークの性能にどのような変化をもたらすか計算機シミュレーションを行い、その結果を解析することで有効性を評価する。

本シミュレーションでは、C++言語を用いて、CSMA シミュレータを開発し、隠れ端末の存在するネットワークに対し、提案方式を使用した場合と、使用しない場合とのスループット特性の比較を行って提案方式の有効性を確認した。更に端末数の変化、スロット長さの変化につれてスループット特性にどのような影響を及ぼすかを確認した。シミュレーションの流れは次のようになる。

- (1) 無線ネットワークのトポロジーを決定する。(500x500m 内に端末をランダムに配置し、通信範囲内に存在する端末間リンクする。

- (2) 得られたネットワークに対し、DIVIDECLQ、CLQNODE、ASGNTIME の3つの手続きを施すことで、各端末に送信機会を割り当てる。
- (3) 無線ネットワーク中の端末のパケットの生成確率を変化させながら、以下の手順を繰り返し行う。
- (4) ネットワーク中の全ての端末はパケットの送信要求に応じて送信動作に入る。
- (5) ある一定のシミュレーション時間が経過したところで、送受信の成功数、送信要求数、シミュレーション時間をもとにスループット、トラフィックを求めめる。
- (6) また、各端末の送信要求が起こる平均時間がパケット長を下回る場合、シミュレーションを終了する(全ての端末に常に送信要求が生じているため)。そうでない場合、パケットの生成確率を変化させてシミュレーションを継続する。

4.1 時分割を行わない場合との比較

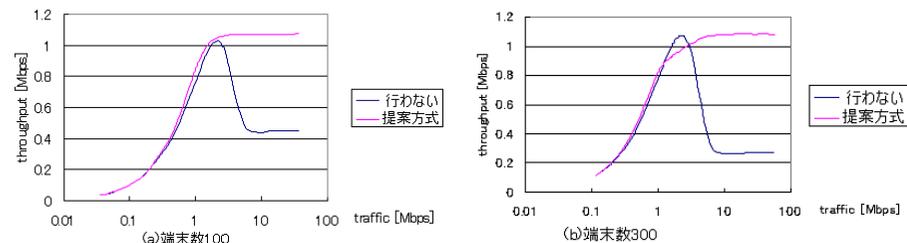


図7 時分割なしとありの比較

端末数 100 と 300 のネットワークについて、CSMA シミュレータによって得られた結果を図 7 に示す。同図において、青線は時分割を行わない場合のシミュレーションのスループット特性を示し、赤線は時分割を行う場合のシミュレーションのスループット特性を示している。結果によると、低トラフィック域においては2つの方式に大きな差はないが、高トラフィック域においてはスループットの値に大きな差が生じている。これによりスループットが極端に低下してしまっていると考えられる。これに対し、時分割を行った場合は、たとえ高トラフィック時における送信過多状態でも、隠れ端末によるパケットの衝突は回避することができるため、スループットの低下は見られなかったと考えられる。

4.2 端末数に関する比較

図 8(a) は端末数変化につれて時分割を行わない場合でスループット変化を示し、図 8(b) は提案方式の場合でスループット変化を示す。結果により、端末数を 50 としても、端末数

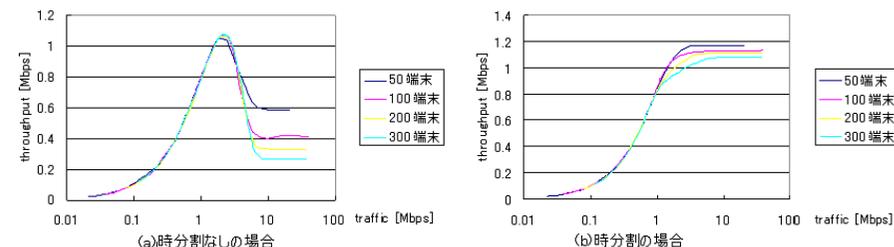


図8 端末数がスループットに与える影響

100 のときと同様の結果が得られ、トラフィックの値に関係なく常に時分割を行ったほうが、高いスループットを得ることができ、高トラフィック時における、急激なスループットの低下も回避可能となった。

次に、図 8(b) より端末数を 300 とした場合は端末数 100 の場合と少し異なった結果となっている。時分割を行うことで高トラフィック時におけるスループットの極端な低下を防いでいるところは同じだが、時分割を行わない場合でスループットの値が最大となっている時、時分割のスループットの値はこれより低くなっている。つまり、時分割より行わない場合の方がスループットの値が高くなることもある。これは、同じトラフィック値で比べた場合、端末数が多くなるとつれ1端末あたりに発生しているパケット数が少なくなっているためと考えられる。時分割を行わない場合においては、どの端末もいつでも送信に移れるため、パケットの発生していない端末が存在しても影響はないが、提案方式の場合、パケットの発生していない端末にも送信機会が割り振られるため、送信するパケットが発生していなければその時間が無駄になってしまう。そのため、提案方式では、スループットが最大になるには、全ての端末に常にパケットのストックがあるくらいの高トラフィックが必要と考えられる。

4.3 スロット長さに関する比較

前述したように、スロット長さがスループット性能に影響する。スロット長の変化に対する提案方式スループット変化を図 9 に示す。基準時間は1パケットの送信が終わるのに必要な時間とし、以下のように与える。

$$\text{基準時間} = \text{DIFS} + \text{CW}_{\text{max}} \times \text{スロット} \cdot \text{タイム} + \text{DATA}$$

ここで、DATA は一つのパケットの送信に掛かる時間、DIFS は分散制御用 frame 間隔、スロット・タイムは一定時間、CWmax は CW(Contention Window) の最大値である。

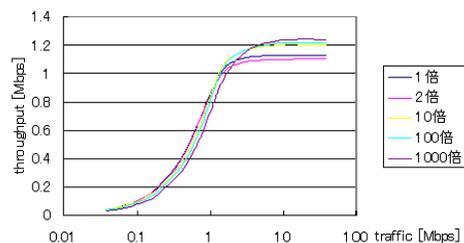


図9 スロット長がスループットに与える影響

結果により、低トラフィック時においては、間隔を 100 倍、1000 倍のように長くしたときよりも 1 倍、2 倍のように短くしたときのほうが高いスループットの値を得られている。これは低トラフィック時においては送信要求のある端末が少ないため、間隔が長い場合には、送信可能であっても送信するパケットがないという無駄な時間が生じてしまうためと考えられる。逆に高トラフィック時においては、間隔を 100 倍、1000 倍のように長くしたほうが高いスループットを維持することができているが、これは高トラフィック時には、たくさんのパケットが生じているため、連続して送信を行っていったほうが効率がよいためと考えられる。

5. まとめ

本稿では、周波数割り当て方式の周波数の効率的な利用問題を考慮しつつ隠れ端末問題を解決する手段として、送信機会を時分割する方式を提案した。

シミュレーション結果より、提案方式を用いれば、高トラフィック時におけるスループットの低下を防ぐことができることがわかった。このことより、提案方式は隠れ端末によるパケットの衝突を軽減し、提案方式が有効であると実証できた。また、端末数が多くなるにつれスループットの最大値が低下していくことがわかった。これは、端末数の増加によりクレーク数も増加していくため分割数が増え、その分割数の増加によって生じてしまう待ち時間が影響しているためと考えられる。また、時分割の間隔においては、間隔が短い場合と長い場合でそれぞれの特徴が出る形となっていた。そのため、時分割の間隔はトラフィックの値により最適な間隔が変化していくという結果となった。

今後は、本提案方式のスループット性能式を解析的に導出し、式より結果とシミュレーション結果の比較を行って、前の特徴を別の角度から確認したい。また、スループットと待

ち時間を最適化するために、最適の送信機会間隔についても検討したい。

参考文献

- 1) 松江英明・守倉正博、“IEEE802.11 高速無線 LAN 教科書 ”、IDE ジャパン、2003
- 2) P.Karn, “MACA - A new channel access protocol for packet radio ”, ARRLS/CRRL Amateur Radio Ninth Computer Network Conf., 1990
- 3) 有信明彦、“パケット無線ネットワークにおける資源割り当て問題に関する理論的考察 ”、山口大学大学院工学研究科、平成 12 年度修士論文、2000