

高密度無線 LAN 環境におけるスループット改善に関する研究

河崎 鷹大[†] 高木 由美^{††} 鎌田十三郎^{††} 太田 能[†]

[†] 神戸大学 大学院科学技術イノベーション研究科

^{††} 神戸大学 大学院システム情報学研究科

〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

E-mail: [†]{kawasaki,yumi,kamada,ohta}@fine.cs.kobe-u.ac.jp

あらまし 近年、スマートフォンの普及に伴いデータ通信量は著しく増加しており、そのオフロードのために IEEE 802.11 規格の無線 LAN アクセスポイントが数多く展開されるようになってきた。しかしながら、IEEE 802.11 は基本メディアアクセス制御として CSMA/CA を採用しており、隠れ端末に起因するフレーム衝突や、さらし端末に起因する通信機会損失により、端末の相対位置関係によってはスループットが著しく低下するデッドスポットが生じるという問題がある。そこで本稿では、端末のキャリアセンスしきい値を各端末が自律的に変更する適応キャリアセンスしきい値制御と CTS-self によりアクセスポイントに近い端末の通信機会を抑制し、遠い位置にある端末の通信機会を相対的に増やす通信機会制御を組み合わせることで、デッドスポットにある端末通信のスループットの改善を試みる方法を提案する。また、適応キャリアセンスしきい値制御のみの方式と通信機会制御のみの方式、これらを複合させた提案方式とのシミュレーションによる比較実験の結果を示す。シミュレーション結果においては、提案方式によって複数ある端末のうち最も低いスループットが改善されており、提案方式の有効性が確認されている。

キーワード IEEE 802.11, デッドスポット, 最低スループット, キャリアセンスしきい値制御, CTS-self

A Study for Improvement of Throguhput in High Dense Wireless LAN Access Networks

Takahiro KAWASAKI[†], Yumi TAKAKI^{††}, Tomio KAMADA^{††}, and Chikara OHTA[†]

[†] Graduate School of Science, Technology and Innovation, Kobe University

^{††} Graduate School of System Informatics, Kobe University

Rokkodai-cho 1-1, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

E-mail: [†]{kawasaki,yumi,kamada,ohta}@fine.cs.kobe-u.ac.jp

Abstract In recent years, wireless access points (APs) based on IEEE 802.11 standard are widely deployed for off-loading as widespread use of smart-phone leads to more data traffic. However, since IEEE 802.11 employs CSMA/CA as a basic medium access control, there could be dead spots where terminals suffer from much lower throughput than the others depending on the relative terminal positions owing to frame collisions by hidden terminals and loss of transmission opportunities by exposed terminals. To cope with this problem, in this paper, we propose a novel scheme with combination of a carrier sense threshold control (CSTC) in which each terminal autonomously adjusts its CST and a transmission opportunity control in which each AP gives outer terminals more transmission opportunities than vicinal terminals by using CTS-self. Simulation experiments are conducted in order to compare the proposal scheme to a scheme employing only the CSTC and a scheme employing the transmission opportunity control using CTS-self. Simulation results show that the proposal scheme provides more the lowest throughput than the others so that the effectiveness of the proposal scheme is confirmed.

Key words IEEE 802.11, dead-spot, lowest throughput, carrier sense threshold control, CTS-self

1. ま え が き

近年、スマートフォンなどの無線端末を搭載した端末が急激に普及しており、音楽や動画といった大容量コンテンツの利用増加も相まって、データ通信量が增大している。それに伴い、多くの無線 LAN AP (Access Point) が、今後も広く普及することが予想される。

しかし、無線 LAN に割り当てられる周波数帯域は限られており、2.4 GHz 帯であれば使用帯域が重複しないチャネルは 4 つしか取れない。したがって、今後、増加する無線端末が、近隣で同一チャネルを使用するケースが考えられる。そのような場合、同一チャネルを使用する AP や端末の通信による干渉が発生し、スループットの低下を引き起こすことがある。

本稿では、無線通信方式として、現在無線 LAN AP で広く利用されている IEEE 802.11 [1] に着目する。IEEE 802.11 の基本メディアアクセス制御方式として、各端末が自律的に送信タイミングを決定する DCF (Distributed Coordination Function) を採用している。DCF では、フレーム衝突を回避するために CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) が用いられている。しかし、CSMA/CA 方式では、さらに端末問題 [5]、隠れ端末問題 [4] と呼ばれる問題が発生し、多端末・AP が高密度に配置された環境下において端末スループットに偏りが生じうる。特に同チャネルを使用している端末と AP が多数存在している場合、端末の配置によって極度に通信が行えないデッドスポットが発生しうる。デッドスポットでは、極端なスループットの低下が発生すると考えられるため、全ての端末の最低通信量を保証する仕組みが求められる。2019 年に標準化完了予定の IEEE 802.11ax [2] では、AP あたりのスループットだけでなく端末ごとのスループットに着目している。このように、今後、増加すると予測される無線端末の最低スループットを向上する QoS を保証する仕組みが重要となる。本稿では、これらの背景をふまえ、多数の AP、端末が高密度に配置された環境下において、端末の最低スループットに着目し、デッドスポットを解消することを目的とする。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、2. で先行研究であるスループット改善に関わる論文について述べる。それらの研究を元にした提案方式を 3. で述べ、4. で多数の AP、端末環境において商用ネットワークシミュレータ Scenargie [3] を用いたシミュレーションを行う。最後に、5. で本稿をまとめる。

2. 関 連 事 項

本章では、基本的な無線 LAN におけるチャネルアクセス制御、および、それに関連する先行研究について述べる。

2.1 無線 LAN におけるチャネルアクセス制御

DCF では、基本的な通信方式として CSMA/CA 方式が採用されており、各端末はデータフレーム送信時にチャネルがビジーかアイドルかを CS (Carrier Sense) し、チャネルがアイドルであればデータフレームを送信し、チャネルがビジーであればデータフレームの送信を待機する。しかし、CSMA/CA 方式では、さらに端末問題、隠れ端末問題が発生する。

さらに端末問題では、異なる AP に接続された 2 つの端末において、AP ではそれぞれ十分に SINR を得られるにも関わらず、一方の端末がもう一方の端末通信を CS することによって、チャネルビジーと判断し自身の通信を行わない。その結果、通信機会を損失し、スループットを低下させる原因となる。

一方、隠れ端末問題では、同じ AP に接続された異なる 2 つの端末がお互いの通信を CS できないために同時通信を行い、AP でフレーム衝突が発生する。同様にフレーム衝突の影響からスループットを低下させる原因となる。隠れ端末問題を解決する手法としては RTS (Request To Send) /CTS (Clear To Send) がある。RTS/CTS とは、端末が AP にデータフレームの送信を行う際に端末と AP 間で RTS と CTS を交換することで、隠れ端末問題を解消する。RTS と CTS の送信元以外の端末が、RTS か CTS を受信した場合は、フレームに記載されている期間だけ NAV (Network Allocation Vector) 状態となり、フレームを送信できない。RTS/CTS によって、衝突可能性のある端末は NAV 状態になるためデータ衝突を防ぐことができるが、データフレーム長が短い場合、RTS/CTS の交換によるオーバーヘッドの影響が大きいため RTS/CTS は有効ではない。

2.2 スループットの改善手法

これらの問題を解決するために端末のスループットを改善する様々な手法が提案されている。[6], [9] では、送信電力制御によるスループット改善を考えている。さらに端末に対しては、送信電力を小さくし CS できる端末を減少させることで通信機会の増加が期待できる。一方で、隠れ端末問題に対しては、送信電力を大きくし同じ AP に接続された隠れ端末に自身の通信を CS させることによってフレーム衝突を防ぐことが期待できる。[11] は適切なチャネル割当によるスループット改善方式を提案している。[17] では、AP に頻繁に送信を行う端末数によって、パケット送信後の CWmin (Contention Window minimum) を変更する手法を提案している。

本稿では、これらの手法を踏まえた上で、IEEE 802.11ax の仕組みにある CS しきい値制御、および CS しきい値と相乗効果が期待できる CTS-self を利用した手法を考える。

2.3 CS しきい値制御

さらに端末問題、隠れ端末問題を解決する方法として CS しきい値によってスループットを改善する手法が提案されている [7], [8], [10]。隠れ端末が存在する場合、CS しきい値を小さくすることで、より遠くに存在する端末の通信を CS することができる。また、さらに端末問題が存在する場合、CS しきい値を大きくすることで、近くに存在する端末の通信のみを CS する。IEEE 802.11ax にも、DSC (Dynamic Sensitivity Control) と呼ばれる CS しきい値制御が含まれており、合計スループットの向上、公平性の改善も確認されている [18]。

[7], [8] では、各端末が一定時間ごとにアクティビティレポートと呼ばれる各端末の送信時刻を記載したレポートを所属 AP に送信するという方法が提案されている。AP は受信したアクティビティレポートをリストにし、一定時間ごとブロードキャスト送信する。各端末は AP から受信したリストを元に隠れ端

末とさらに端末を特定する。そして特定した隠れ端末、さらに端末からの送信によるチャネルビジーの時間を比較して、チャネルビジーの時間に応じた CS しきい値制御を行う。しかし、アクティビティレポートは他 BSS (Basic Service Set) の端末情報は取得できないため、他 BSS 端末による隠れ端末問題には対応できない。[10] では、AP から一定時間ごとに AP の受信端末リストをブロードキャスト送信し、端末が自身のさらに端末問題と隠れ端末問題を認識する方法を提案している。その後、端末が自身のさらに端末問題、隠れ端末問題に合わせた CS しきい値制御、送信電力制御を行うことで最低スループットを増加させることを考えている。しかし、最低スループットの改善は十分といえない。

2.4 CTS-self

CTS は、RTS の宛先端末がその送信端末に向けて返信する制御フレームである。これとは別に、IEEE 802.11a/g には、CTS-self と呼ばれる RTS フレームとは独立して自端末あてに送信する仕組みがある [14]。CTS-self フレームには、CTS と同様、周辺端末の通信を禁止する NAV が記載されており、隠れ端末問題を回避することができる [15]。CTS-self を利用することで、アップリンクとダウンリンク間の公平性を考慮した手法 [13] や、スループットを改善する手法が提案されている [14]。

[13] では、AP が ACK を送信端末へ返信した後、送信端末に対するデータが AP のキューにあるかどうかを調べ、ある場合は CTS を自身へ向けて送信するという手法を提案している。これによってアップリンクとダウンリンク間の公平性改善が確認されているが、アップリンクのスループットを改善しているわけではない。[14] では、AP が ACK 返送時に高優先で通信させたい端末を宛先とした CTS-self の送信によって、総スループットの減少を抑えつつ優先端末を通信させることをねらっている。しかし、他 BSS からの通信がある場合のことが考慮できておらず、CTS-self を受信した端末がさらに端末の影響を受け通信を行わないとすると、全体の通信機会損失につながるおそれがある。

3. 提案手法

本章では、提案手法である ACST with TOC (Adaptive Carrier Sense Threshold with Transmitting Opportunity Control) について述べる。

3.1 概要

さらに端末問題、隠れ端末問題は、端末のスループットに大きな影響を与える。これらの問題を解消するために、本稿では、ACST という各端末が自身のさらに端末数、隠れ端末数に応じた CS しきい値制御を提案する。さらに端末が存在する端末は、CS しきい値を増大することで、さらに端末からの通信を認識しないようにし通信機会の増加をねらう。隠れ端末が存在する端末は、AP でフレーム衝突が発生する可能性があるため、CS しきい値を減少することで隠れ端末同士の通信を認識できるようにする。着目端末にさらに端末と隠れ端末の両方が存在する場合は、その数を比較し、さらに端末数の方が多ければ CS しきい値を増大し、隠れ端末数の方が多ければ CS しき

い値を減少させる。

このように、さらに端末問題と隠れ端末問題はトレードオフ関係にあるため、CS しきい値制御のみで同時に解決することはできない。したがって、CS しきい値制御に加えて、最低スループットを改善する仕組みが必要となる。隠れ端末問題は AP から距離が遠い端末が影響を受けやすく、さらに端末問題は隣接 BSS との距離が近い端末が影響を受けやすい。つまり、さらに端末は、隣接 BSS との距離が近くなりやすい BSS の辺付近に数多く存在すると考えられる。そのため、AP から距離が遠い BSS の辺付近端末は多数のさらに端末、隠れ端末が存在するケースが考えられる。そこで本稿では、辺付近端末を優先的に通信させる TOC を提案する。TOC では、AP は、自身から距離が近い端末にのみ CS できる NAV が記載された CTS-self を送信する。AP から距離が近い端末の通信を制御することにより、AP から距離が遠い端末の通信機会の増加をねらう。

3.2 ACST

CS しきい値制御を行う方法として ACST を提案する。ACST では、全ての端末が自身周辺のさらに端末数、隠れ端末数に応じた CS しきい値制御を行うことで、最低スループットの増加をねらう。

しかし、端末は自身が保有している情報だけでは、周辺の隠れ端末問題、さらに端末問題を認識できず、CS しきい値を決定することができない [12]。そのため、AP が一定時間ごとに AP の周辺端末リストをブロードキャスト送信することにより、着目端末は周辺の端末情報と AP 周辺の端末情報を把握する。AP 周辺端末リストに含まれており、着目端末の周辺端末リストに含まれていない端末は、AP でデータフレームが衝突する可能性のある隠れ端末と考えられる。一方で着目端末の周辺端末リストに含まれており、AP 周辺端末リストに含まれていない端末は、AP に影響を与えず、着目端末にのみ影響を与えるさらに端末と考えられる。

さらに端末は、同時にフレーム送信を行ったとしても、互いに接続された AP でのフレーム受信失敗の可能性は低いと考えられるため、CS しきい値を増大することで同時通信を行うようにする。また、隠れ端末同士は、お互いが CS できないために同時に通信を行うことがあり、同時通信を行うと AP でフレーム衝突が発生し、スループットが低下する原因となる。そのため、隠れ端末同士はお互いに CS しきい値を下げることで、互いの隠れ端末を認識できるようにする。CS できない、かつ、フレーム長が長い場合は RTS/CTS を用いる。ただし、フレーム長が短いときは、オーバーヘッドによるスループット低下の影響が大きいため RTS/CTS は使用しない。

3.3 TOC

ACST では、多数の端末や AP が高密度に配置された環境において CS しきい値制御によるさらに端末問題、隠れ端末問題の解消をねらいとしている。しかし、さらに端末問題と隠れ端末問題は、トレードオフ関係にあり、さらに、1 つの端末に同時に多数のさらに端末、隠れ端末が発生するケースが考えられる。そのため、ACST のみでは、さらに端末問題、隠れ端末問題の影響を受けやすい AP からの距離が遠い端末はスループッ

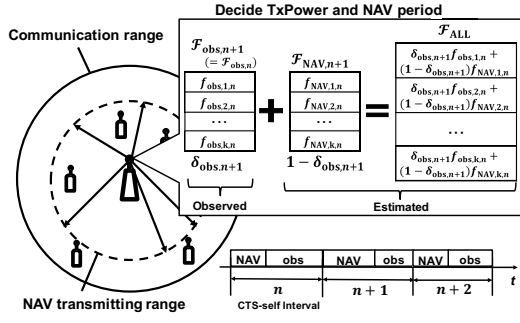


図1 TOC の概要

トが十分に上がらず、デッドスポットの解消はできない。

そこで、CTS-self を利用することで、AP から距離が遠い端末を優先的に通信させる TOC を提案する。TOC では、図1のように AP から一定時間ごとに AP 付近端末にのみ CS できる NAV を記載したパケットを送信する。パケットを受信した端末は、NAV に記載された時間だけ自身のパケット送信を行うことができない。その結果、NAV による通信禁止がされていない AP から距離が遠い端末は優先的にパケットを送信することができる。

しかし、CTS-self の送信電力や NAV 期間を適切な値に設定しなければ、端末ごとのスループットに大きく偏りが生じる可能性がある。例えば、CTS-self の送信電力が弱いために AP から距離が近い端末が通信を禁止されず、AP から距離が遠い端末のスループットが十分に上がらないことが考えられる。また、必要以上に NAV 期間を長くすることで AP 付近端末のスループットが下がりすぎる可能性がある。そこで、TOC では、AP が一定時間ごとに同 BSS 端末からの受信フレームサイズを記録することにより、適切な CTS-self の送信電力と NAV 期間を求める。具体的には、AP が、観測期間と呼ばれる期間に同 BSS 端末から受信した端末ごとの総フレームサイズを記録する。CTS-self の送信電力と NAV 期間が決定できれば、観測期間に記録した総フレームサイズより、NAV 期間における端末ごとの総フレームサイズを予測することができる。その後、観測期間と NAV 期間を足し合わせた 1 期間の端末ごとの総フレームサイズを求める。本稿では、上記手順で求めた端末ごとの総フレームサイズの偏りをできるだけ小さくするような NAV 期間と送信電力を求める。そのために **Algorithm 1** によって、観測期間割合 $\delta_{\text{obs},n+1}$ 、CTS-self を CS させる端末数 N_{NAV} を決定する。また、後述するように N_{NAV} を決定することで、CTS-self の送信電力を求めることができる。**Algorithm 1** で用いる記号を表 1 に示す。

$\delta_{\text{obs},n+1}$ と N_{NAV} を決定するために AP は観測期間に受信したフレームの送信端末 id とフレームサイズ、受信電力を記録する。受信したフレームの送信端末 id が、既に記録されていれば記録されている総データ量と受信フレームサイズの和を計算し、記録されていない場合は新たに要素を追加する。AP は、上記手順により端末 id ごとに観測期間の総フレームサイズリスト $\mathcal{F}_{\text{obs},n}$ 、受信電力リスト $\mathcal{P}_{\text{obs},n}$ を作成する。なお、 $\mathcal{F}_{\text{obs},n}$ と $\mathcal{P}_{\text{obs},n}$ の要素は端末 id ごとに対応しており、受信電

表 1 CTS-self の送信電力、NAV 期間決定アルゴリズムの変数表

Notation	Meaning
$\mathcal{F}_{\text{obs},n}$	n 番目の観測期間に受信した総フレームサイズリスト
$f_{\text{obs},k,n}$	$\mathcal{F}_{\text{obs},n}$ の要素 (ノード k からの総受信フレームサイズ)
$\mathcal{F}_{\text{NAV},n}$	n 番目の NAV 期間に受信した予測総フレームサイズリスト
$f_{\text{NAV},k,n}$	$\mathcal{F}_{\text{NAV},n}$ の要素 (ノード k からの総受信フレームサイズ)
$\mathcal{K}_{\text{obs}}$	観測期間に受信したフレームの送信端末 id
$\mathcal{K}_{\text{far}}$	$\mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}$ の受信端末 id
$\delta_{\text{obs},n}$	NAV の影響を受けない観測期間割合
$\delta_{\text{tmp},j}$	次の観測期間割合候補
N_{NAV}	CTS-self を受信する端末数
$\mathcal{F}_{\text{ALL}}$	重みを考慮した観測期間と NAV 期間の合計フレームサイズ
$f_{\text{ALL},k}$	$\mathcal{F}_{\text{ALL}}$ の要素
σ_k	受信フレームサイズの分散

Algorithm 1 NAV Parameter Decision

Require: $\delta_{\text{obs},n+1}, N_{\text{NAV}}$

Ensure: $\mathcal{F}_{\text{obs},n}$

```

1:  $N_{\text{NAV}} \leftarrow 0$ 
2:  $\delta_{\text{obs},n+1} \leftarrow 0$ 
3:  $\mathcal{K}_{\text{obs}} \leftarrow \{1, 2, \dots, |\mathcal{F}_{\text{obs},n}|\}$ 
4: for all  $j \in \mathcal{K}_{\text{obs}}$  do
5:    $\mathcal{K}_{\text{far}} \leftarrow \{k \in \mathcal{K}_{\text{obs}} | k > j\}$ 
6:    $\mathcal{F}_{\text{obs},n+1} \leftarrow \mathcal{F}_{\text{obs},n}$ 
7:   for all  $k \in \mathcal{K}_{\text{obs}}$  do
8:      $f_{\text{NAV},k,n+1} \leftarrow \begin{cases} 0 & (k \leq j) \\ \frac{\sum_{i \in \mathcal{K}_{\text{obs}}} f_{\text{obs},i,n}}{\sum_{i \in \mathcal{K}_{\text{far}}} f_{\text{obs},i,n}} f_{\text{obs},k,n} & (\text{otherwise}) \end{cases}$ 
9:   end for
10:   $\delta_{\text{tmp},j} \leftarrow -\frac{\sigma_{\mathcal{F}_{\text{obs},n+1} \mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}} - \sigma_{\mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}}^2}{\sigma_{\mathcal{F}_{\text{obs},n+1}}^2 - 2\sigma_{\mathcal{F}_{\text{obs},n+1} \mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}} + \sigma_{\mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}}^2}$ 
11:  for all  $k \in \mathcal{K}_{\text{obs}}$  do
12:     $f_{\text{ALL},k} \leftarrow \delta_{\text{tmp},j} f_{\text{obs},k,n+1} + (1 - \delta_{\text{tmp},j}) f_{\text{NAV},k,n+1}$ 
13:  end for
14:   $\sigma_j^2 \leftarrow \frac{1}{|\mathcal{F}_{\text{ALL}}|} \sum_{k \in \mathcal{K}_{\text{obs}}} (f_{\text{ALL},k} - \overline{\mathcal{F}_{\text{ALL}}})^2$ 
15: end for
16:  $N_{\text{NAV}} \leftarrow \arg \min_{k \in \mathcal{K}_{\text{obs}}} \sigma_k^2$ 
17:  $\delta_{\text{obs},n+1} \leftarrow \delta_{\text{tmp},N_{\text{NAV}}}$ 
18: return  $N_{\text{NAV}}, \delta_{\text{obs},n+1}$ 

```

力の降順にソートされたものとする。

そして、 $\mathcal{F}_{\text{obs},n}$ に記載された端末を CTS-self により送信抑制する端末 (c-STA: controlled station) と送信抑制しない端末 (nc-STA: not controlled station) に受信電力ごとに順に決定する。送信抑制範囲の決定後、 $\mathcal{F}_{\text{obs},n}$ より NAV 期間割合を $1 - \delta_{\text{obs},n+1}$ としたときの nc-STA の総フレームサイズリスト

$\mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}$ が推定される。また、次の観測期間の総フレームサイズリスト $\mathcal{F}_{\text{obs},n+1}$ は、 $\mathcal{F}_{\text{obs},n}$ と大きく値が変わらないという仮定に基づき、 $\mathcal{F}_{\text{obs},n+1}$ は $\mathcal{F}_{\text{obs},n}$ の値を利用する。上記手順により求めた $\mathcal{F}_{\text{obs},n+1}$ と $\mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}$ より、次の観測期間と NAV 期間の受信総フレームサイズリストの分散を表す、式 (1) の右辺を最小化する観測期間 $\delta_{\text{obs},n+1}$ を解く。ただし $\mathcal{K}_{\text{obs}}$ を $\mathcal{F}_{\text{obs},n+1}$ の要素を示す端末 id 集合、 $\mathcal{F}_{\text{ALL}}$ を重みを考慮した $\mathcal{F}_{\text{obs},n+1}$ と $\mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}$ の要素 k に対応するフレームサイズの和、 $f_{\text{ALL},k}$ を $\mathcal{F}_{\text{ALL}}$ の要素とする。

$$\delta_{\text{obs},n+1} \leftarrow \arg \min \frac{1}{|\mathcal{F}_{\text{ALL}}|} \sum_{k \in \mathcal{K}_{\text{obs}}} (f_{\text{ALL},k} - \overline{\mathcal{F}_{\text{ALL}}})^2 \quad (1)$$

式 (1) より観測期間割合 $\delta_{\text{obs},n+1}$ が決定できたので、観測期間と NAV 期間を求めることができる。以上の手順から、観測した観測期間の総フレームサイズリスト $\mathcal{F}_{\text{obs},n+1}$ と推定した NAV 期間の総フレームサイズリスト $\mathcal{F}_{\text{NAV},n+1}$ を元に、観測期間と NAV 期間の理論総スループットを求めることができる。

この操作を AP に所属する端末数だけ受信電力順に繰り返す。その中で求めた理論総スループットの分散が最小となる c-STA 数を決定し、そのときの NAV 期間を求める。

Algorithm 1 により c-STA 数が求められたので、CTS-self の送信電力を決定する。端末が AP に最大電力 P_{max} (20 dBm) で AP が受信した受信電力を P_{Rx} とすると、パケット送信したときのパスロス P_L が以下の式より求められる。

$$P_L = P_{\text{max}} - P_{\text{Rx}} \quad (2)$$

さらに、TOC を受信する端末の CS しきい値が IEEE 802.11 規格の CST (−82 dBm) と仮定すると、CTS-self によって通信禁止になる端末が CS するために必要な送信電力 P_{Tx} を以下の式で求められる。

$$P_{\text{Tx}} = \text{CST} + P_L \quad (3)$$

最終的に、次式から CTS-self の送信電力 P_{Tx} が求められる。

$$P_{\text{Tx}} = \text{CST} + P_{\text{max}} - P_{\text{Rx}} \quad (4)$$

4. シミュレーション評価

本章では、オフィス環境を想定した ACST with TOC のシミュレーションについて述べる。シミュレーションでは、IEEE802.11 規格の DCF と比較して平均スループット、最低スループット、公平性について評価を行う。公平性の評価指標には、Jain's Fairness Index (JFI) を用いる [10]。また、IEEE 802.11 の振る舞いを正確に考慮するため、商用シミュレータ Scenargie を用いてシミュレーションを行う。

4.1 シミュレーション条件

表 2 にシミュレーション設定を示す。また、端末と AP は図 2 のように AP を 7 つ、端末を 42 個設置されたケースを想定しており、1 つの部屋には AP を中心とした 6 つの端末がランダムに配置されているケースを考える。

上記のケースでは、BSS の辺付近に存在する端末はお互いに

表 2 シミュレーション設定

Parameter	Value
Simulator	Scenargie2.0
Simulation time	60
Simulation trials	5
Position types	5
Mac protocol	DCF
Pathloss model	COST231 Indoor
Traffic model	VBR
Message length	128 byte
Modulation scheme	Minstrel
Offerd load	0.5, 1, 1.5, 2 Mbit/s

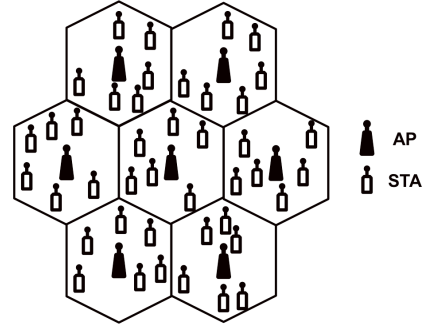


図 2 端末配置例 (AP: 7, STA: 42)

通信の CS を行うため、さらし端末となる可能性がある。つまり、隣接 BSS が多い環境において、多くのさらし端末問題が発生する。一方、同じ BSS に所属するお互いに CS できない端末同士では隠れ端末問題が発生する。このように多数の BSS が密集する環境下において、さらし端末問題、隠れ端末問題が複雑に絡み合うことが予想され、通信が極端に行えないデッドスポットが発生すると考えられる。そのため、本稿では、BSS が密集した環境において最低スループットの改善をねらう。

なお、今回のシミュレーションではオフィス環境を想定しているため、BSS が隣接する辺に壁が設置されており、壁を境とする送信には 10 dB の電力減衰が発生するものとする。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 3～図 5 に示す。

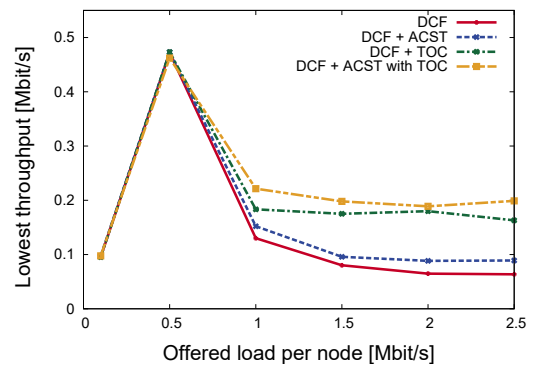


図 3 ノードあたりの負荷対最低スループット特性

シミュレーションはトラフィックごとに端末配置を 5 種類考慮する。それぞれの端末配置でシミュレーションを行い、グラフ

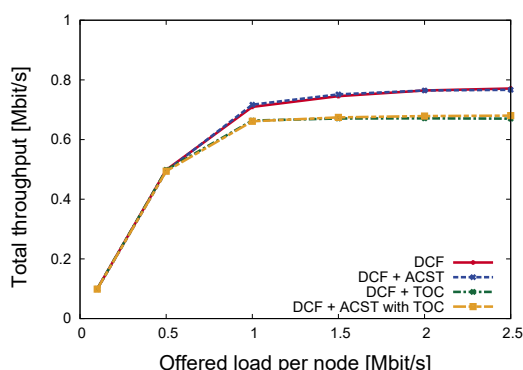


図4 ノードあたりの負荷対平均スループット特性

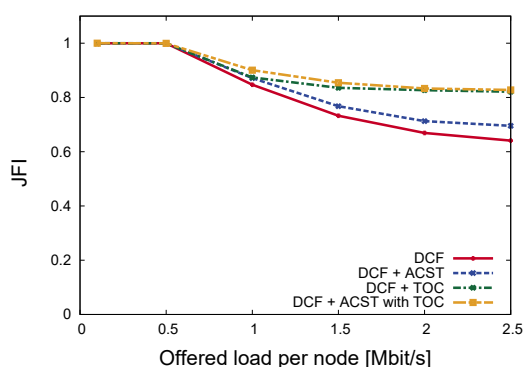


図5 ノードあたりの負荷対公平性

ではこれらの平均値を示す。

図3から、DCFと比較して高負荷時において最低スループットが大きく改善されていることがわかる。特に各端末の負荷が2.0 Mbit/sの環境において、最低スループットが最大312%に増加しており、制御が有効であるといえる。また、図4に示すように平均スループットは減少しているが、図5に示すように公平性が改善されていることがわかる。十分にスループットが出ている端末のスループットが減少し、デッドスポットに存在する端末のスループットが増加したことが示されており、提案手法の有効性が確認できたといえる。

5. ま と め

本稿では、多数の端末とAPが高密度に配置された環境において最低スループットを改善する手法について述べた。そして、ネットワークシミュレータ Scenarie を用いたシミュレーション結果により、平均スループットを大きく損なうことなく、最低スループットと公平性の改善を確認した。

今後の課題として、より現実的なオフィスシナリオでのシミュレーション実験、TOCの送信電力とNAV期間をより適切な値設定にするアルゴリズムの検討が挙げられる。

謝辞 本研究は、科研費(基盤(C)15K00124, 15K00125)の助成によりおこなわれた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- [1] The Working Group for WLAN Standards, IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks, <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>
- [2] The Working Group for WLAN Standards, IEEE 802.11

Wireless Local Area Networks, http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgax_update.htm

- [3] Space-time Engineering Inc., <http://www.spacetime-eng.com/>
- [4] S. Khurana, A. Khaol, and S. C. Liew, "Effect of hidden terminals on the performance of IEEE 802.11 MAC protocol," Proc. IEEE Local Computer Networks, pp.12–20, Oct. 1998.
- [5] L. B. Jiang and S. C. Liew, "Improving throughput and fairness by reducing exposed and hidden nodes in 802.11 networks," IEEE Trans. on Mobile Computing, vol.7, no.1, pp.34–49, Jan. 2008.
- [6] A. Panagiotakis, P. Melidis, P. Nicopolitidis, and M. S. Obaidat, "Power-Controlled Reduction of Exposed Terminals in Ad-Hoc Wireless LANs," Proc. International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems, pp. 1–5, June 2012.
- [7] C. Thorpe, S. Murphy, and L. Murphy, "IEEE 802.11k enabled adaptive physical carrier sense mechanism for wireless networks (K-APCS)," Proc. Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, pp.209–215, Oct. 2009.
- [8] C. Thrope, S. Murphy, and L. Murphy, "IEEE802.11k enabled adaptive carrier sense management mechanism (KAPCS2)," Proc. IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management, pp.509–515, Aug. 2011.
- [9] O. Oteri, P. Xia, F. LaSita, and R. Olesen, "Advanced Power Control Techniques for interference mitigation in dense 802.11 networks," Proc. 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, pp.1–7, June 2013.
- [10] I. Roslan, T. Kawasaki, T. Nishiue, Y. Takaki, C. Ohta, and H. Tamaki, "A Study on Control of Transmission Power and Carrier Sense Threshold to Enhance Throughput and Fairness in IEEE 802.11 Wireless Networks," 信学技報, vol.115, no.172, MoNA2015–18, pp.49–54, Aug. 2015.
- [11] 熊谷 菜津美, 磯村 美友, 村瀬 勉, 小口 正人, "無線 LAN アクセスポイントのチャネル内競合とチャネル間干渉を同時に考慮したチャネル割当手法," 信学技報, vol.112, no.288, CQ2012-68, pp.59–64, Nov. 2012.
- [12] K. Nishide, H. Kubo, R. Shinkuma, and T. Takahashi "Detecting hidden and exposed terminal problems in densely deployed wireless networks," IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol.11, No.11, pp.3841–3849, Oct. 2012.
- [13] J. O. KIM, H. Tode K. Murakami, "Medium Access Control Protocol for Voice Traffic in IEEE 802.11 WLANs," IEICE TRANSACTIONS on Communications, vol.E89-B, no.5, pp.1545–1553, May 2006.
- [14] 増井浩, 阪田史郎, 塩田茂雄, 平野由実, 村瀬勉, "無線 LAN における CTS を利用した端末優先制御方式とその評価," 電子情報通信学会, IN 情報ネットワーク vol.109, no.37, pp.31–36, May 2009.
- [15] 宇都宮依子, 旦代智哉, 足立朋子, 高木雅裕, "IEEE 802.11n 高速無線 LAN 実現に向けた 20/40Hz 端末共存方式," 電子情報通信学会, vol.J89-B, no.2, pp.153–170, 2006.
- [16] H. Jasani and N. Alaraje, "Evaluating the Performance of IEEE 802.11 Network using RTS/CTS Mechanism," Proc. IEEE International Conference on Electro/Information Technology, pp.616–621, May 2007.
- [17] R. Ito, D. Nobayashi and T. Ikenaga, "Adaptive Contention Window Control Scheme for Dense IEEE802.11 Wireless LANs," Proc. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, pp.326–331, Aug. 2015.
- [18] M. S. Afaqui, E. G. Villegas, E. L. Aguilera, G. S. D. Camps, "Evaluation of Dynamic Sensitivity Control Algorithm for IEEE 802.11ax," Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp.1060–1065, June 2015.