

可視光タグシステムによる端末位置検出と アクセスポイントのキャリアセンス閾値制御による 無線LANのスループット向上方法の基礎評価

村上 航大¹ 伊藤 達哉¹ 石原 進¹

概要: IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) はフレームの衝突を回避するために Carrier Sense Multiple Access (CSMA/CA) 方式を用いている。CSMA/CA 方式では, キャリアセンス閾値を適切な値に設定することで無線 LAN の空間利用効率を改善することができる。各無線端末のキャリアセンス閾値をフレームの衝突を生じることなく高くすることができるならば, 同一時間における送信可能な無線端末数を増加させ, 無線 LAN 全体のスループットを向上させることができる。2 台の Access Point (AP) それぞれの近隣に端末 (STA) が存在する場合, 各 STA は近くの AP から強い電力で信号を受信できるため, たとえ 2 台の AP が同時に送信したとしても, 各 STA は正しくフレームを受信することができる。本稿では, STA の位置に応じて AP のキャリアセンス閾値を制御することで無線 LAN のスループットを向上させるシステムを提案する。このシステムでは, 複数の AP を集約して制御するコントローラを用いる。コントローラには STA の位置を取得するために, カメラが備え付けられているため, 取得した STA の位置に応じて, AP に適切なキャリアセンス閾値を与えることができる。シミュレーションにより, IEEE 802.11gAP2 台を 50 m 離して配置し, STA を AP から 15 m 以内に配置した場合において, 提案システムは従来の DCF 方式よりも 86% スループットを向上させることが確かめられた。

A basic study on improvement of wireless LAN throughput by tuning carrier sense threshold of access points based on node positions detected by a visible light tag system

MURAKAMI KODAI¹ ITO TATSUYA¹ ISHIHARA SUSUMU¹

1. はじめに

無線 LAN の Access Point (AP) が高密度に配置された環境では, 使用可能なチャンネルは有限であり, 全ての AP に異なるチャンネルを割り当てることできないため, 同一のチャンネルを近接する複数の AP に割り当てる場合がある。本来, AP の配置数を増加させた場合, 各 AP の負荷を分散できるため, 無線 LAN 全体のスループットの向上が期待できる。しかしながら, 同一のチャンネルを割り当てられた AP が複数存在する場合, それらの AP が同一時間にフレームを送信すると, チャンネル間で干渉が起り, 反って

スループットの低下を及ぼす。

IEEE 802.11 無線 LAN では複数の無線端末が同一のチャンネルを共有して通信を行うためのアクセス制御方式として CSMA/CA 方式を使用している。CSMA/CA では, 送信を試みる端末は事前にチャンネルの使用状況を確認し, そのチャンネルがアイドル状態であるならば, 送信を開始する。一方, 端末がある一定の閾値 (キャリアセンス閾値) 以上の信号電力を検出した場合, チャンネルがビジー状態であると判断し, そのチャンネルがアイドル状態になるまで送信を延期する。つまり, CSMA/CA では同一時間内に送信可能な無線機器の数を制限することによって, フレームの衝突を回避する。

CSMA/CA では, たとえ受信端末それぞれが高い SINR

¹ 静岡大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

(Signal to Interference and Noise power Ratio) でフレームを受信できる場合でも、無線機器の送信を抑制する場合があります。なぜなら、送信側は受信側の干渉信号電力までは把握していないため、自身の受信信号電力のみに基づいてチャンネルの使用状況を確認しているからである。このように、CSMA/CA 方式では、複数の無線端末がフレームロスすることなく同時に送信可能な場合でも、一方の送信を抑制するため、無線 LAN のスループットが抑制されている。

フレームの衝突を生じることなく、同時に同一チャンネルを使用した無線機器が送信できる数を増やすことができるならば、無線 LAN の空間利用効率、およびスループットを改善することができる。たとえば、2 台の AP それぞれが異なる端末へフレームを同時に送信したとしても、各端末が高い SINR で所望する AP からフレームを受信できる場合、AP のキャリアセンス閾値を高く設定することにより、AP は送信を延期することなくフレームを送信することが可能である。

これまで、無線 LAN の空間利用効率を向上させるためにキャリアセンス閾値、送信電力、データレートなどの通信パラメータを適切な値に調整する手法が多く提案されている [1][2][3]。これらの手法では、各無線機器の SINR を基に、適切なキャリアセンス閾値を設定するために、推定した干渉信号電力を用いる。この干渉電力を推定する方法として、RSSI (Received Signal Strength Indicator) を使用する方法 [1] や、端末が送信するフレーム内に自身の位置や、送信電力などの情報を加えてフレームを交換する方法 [2][3] がある。しかしながら、このような情報交換はオーバーヘッドを伴う。

本稿では、端末 (STA) の位置に応じて AP のキャリアセンス閾値を適切な値に制御することで CSMA/CA ベースの無線 LAN のスループットを向上させる方法を提案する。この手法では、複数の AP を集約し、制御するコントローラを用いる (図 1)。コントローラには、端末の位置を把握することができるカメラを付属しているため、この取得した位置に応じて AP に適切なキャリアセンス閾値を与えることができる [4]。

以下第 2 章で関連研究について述べた後、第 3 章では提案する STA の位置に応じた AP のキャリアセンス閾値制御システムの詳細を述べる。4 章では AP と端末の位置関係に応じた AP の適切なキャリアセンス閾値を求めるための調査について述べ、5 章で、シミュレーションによる提案システムの性能評価について述べる。6 章では提案システムの課題と解決策を議論し、7 章にて本稿をまとめる。

2. 関連研究

CSMA/CA 方式では、AP と STA のキャリアセンス閾値を低い値に設定することにより、フレームの衝突を回避することができる。しかしながら、低い値に設定されたキャ

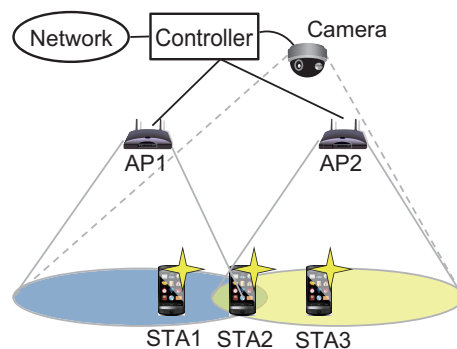


図 1 提案システムの全体像

リアセンス閾値は、たとえフレームロスを生じることなく複数の無線機器が同時に送信可能な場合においても、同一時間に送信可能な無線機器の送信を制限することから、空間利用効率を低減させる。したがって、無線機器のキャリアセンス閾値や送信電力などの通信パラメータを調整することで無線 LAN の空間利用効率を向上させる様々な方法が提案されている。

Zhou ら [1] はキャリアセンス閾値と送信電力、データレートの 3 つのパラメータを調整することで、無線 LAN の空間利用効率を向上させる手法を提案している。この手法では、各端末の SINR に応じて各パラメータに適切な値を設定するために、各端末が受信したフレームの RSSI を使用する。各端末の SINR を推定するにあたり、その端末の周囲に 4 台 (または 6 台) の干渉源となる端末が存在することを想定して計算した干渉電力 (固定値) と受信信号電力を用いる。この手法では常に固定の干渉電力値を用いて SINR を推定するため、電波環境の変動に対して柔軟に対応できない。

Lin らは、キャリアセンス閾値やコンテンションウィンドウサイズ、伝送レートといった PHY や MAC のパラメータを調整することによる相互作用について調査している [5]。彼らは電波伝搬モデルに基づいて、複数の無線端末が同時にフレームを送信することによる累積干渉電力を理論的に推定している。得られた累積干渉電力と受信信号電力から SINR を求めることによって、適切なキャリアセンス閾値を定める。また、シミュレーションによって適切なデータレートを与えるだけでなく、適切なキャリアセンス閾値とコンテンションウィンドウサイズを与えることで、さらにネットワークの通信容量を向上できることを示した。

Zhang ら [2] は coordinated dynamic physical carrier sense (CDPCS) 手法を提案している。この手法は、無線ネットワークにおける空間利用効率を向上させるために、近隣ノードの通信状態や位置などの情報を RTS/CTS フレームを用いて交換し、これらの値に基づいてノードのキャリアセンス閾値を適切な値に調整する。この方法では RTS/CTS フレームの交換によるオーバーヘッドを避けられない。

Nadeem ら [3] は Location Enhanced DCF (LED) を提案している。この手法では、各ノードは近隣ノードの位置を基に自身が送信することにより他の通信を妨げるかどうかを評価する。各ノードが送信するフレームに自身の位置を付加して送信することで、そのフレームを受信したノードまたはオーバーヒアしたノードは他のノードの位置を把握することができる。しかしながら、この手法はフレームの MAC ヘッダに情報を付加することから、端末側に IEEE 802.11 MAC の修正を必要とする。

Kim らは、設定された送信電力とキャリアセンス閾値によってどの程度ネットワークの通信容量に影響を与えるのかを調査した [6]。一般的に、キャリアセンス閾値を高く設定する、または送信電力を小さくすることで無線ネットワークの空間利用効率を向上させることができる。そこで、Kim らは送信電力またはキャリアセンス閾値を調整することは、どちらも無線 LAN の通信容量を向上させるために同じ効果を得ることができるのかどうかを調査し、キャリアセンス閾値を固定にし、送信電力を調整する方が利点があることを示した。これは、ある端末の送信電力を下げることで、その端末の近隣に位置する端末の SINR を高め、より高い伝送レートを用いた通信が可能になるためである。

Shrivastava らによる CENTAUR [7] では、予め各 AP-STA リンク同士の干渉関係を測定し、コントローラを用いて、下り通信におけるパケットの送信タイミングをスケジューリングすることで、隠れ端末問題とさらし端末問題を解消する。コントローラは、複数のキューを用意し、到着したダウンリンクパケットをこれらのキューの一つに格納する。ただし、到着したパケットの宛先と各キュー内のパケットの宛先をみて、宛先同士が干渉関係にある場合、到着したパケットを異なるキューへ格納する。同一のキュー内には、同時に送信可能なパケットのみを格納することで、キュー内のパケットを届けられた各 AP は、フレームロスすることなく、送信できる。

Vasan ら [8] は Radio Network Controller (uses) Secondary Channels (RNC-SC) アルゴリズムを提案している。このアルゴリズムは AP は複数のチャンネルの使用と各 AP は全ての利用可能なチャンネルにアクセスできることを想定し、全ての AP はコントローラによって管理されている。コントローラは AP の負荷状況をみて、負荷が大きい場合、AP のチャンネルを変更することによって、負荷を分散する。AP の負荷状況は MAC サービス時間（フレームが MAC に送信されてから、ACK を受信するまでの時間）により、過負荷か否かを判定する。この手法は、複数のチャンネルを使用することを前提としているが、本研究では単一チャンネルを用いて無線 LAN の空間利用効率を向上させることを目標としている。

従来の手法では無線 LAN の空間利用効率を向上させる

が、ほとんどの手法が無線機器の仕様の変更、あるいは干渉信号電力を推定するために無線通信資源を使用することによるオーバーヘッドを伴う。そこで、本稿では、これらの制限を必要とすることなく無線 LAN の空間利用効率およびスループットを向上させるシステムを提案する。無線 LAN の空間利用効率を向上させる方法として、送信電力またはキャリアセンス閾値を調整する方法がある。Kim ら [6] のように送信電力を調整する方法は、ある端末の送信電力を変更することにより、他の近隣端末の干渉信号電力に影響を与えるため、全ての AP および STA の送信電力を調整する必要がある。本稿では STA 側の仕様を変えず、AP に対してのみ制御を行うことを前提としているため、キャリアセンス閾値を調整することにした。

3. AP と端末の位置に基づく AP のキャリアセンス閾値制御

3.1 AP と端末の位置情報を用いたスループット向上戦略

現在、ほとんどの無線局のキャリアセンス閾値は、自身のカバレッジ内に存在する無線局が発した信号を感知できるように、低い値に設定されている。そのため、同一時間に十分に低いロス率で複数の無線局によるフレームの送信が可能の場合でも、一方の無線局はチャンネルをビジー状態と判断し、送信を延期する場合がある。

図 2 に示すように、AP2 が STA2 へフレームを送信中に AP1 が STA1 へフレームの送信を試みる場合、各 STA が高い SINR で所望波を受信できるならば、2 台の AP は十分に低いロス率でフレームを同時に送信できる。この場合、AP1 と AP2 のキャリアセンス閾値を互いの発した電波を感知しない程度まで高くすることで、AP2 が送信中でも AP1 は送信でき、各 STA はフレームを正しく受信可能である。STA の受信した電波の強度は、主に STA の位置と電波を発した AP の位置に依存する。両者の位置が分かれば、STA が受信する所望波と干渉波の強度を推測できるため、STA の SINR を推定することが可能である。したがって、AP と STA の位置に基づいて、AP のキャリアセンス閾値を制御できれば、同一時間により多くの AP に送信させることができるため、無線 LAN 全体のスループット向上が期待できる。

3.2 提案システムの概要

上記のスループット向上戦略に着目し、端末の位置に応じて AP に適切なキャリアセンス閾値を与えることで無線 LAN のスループットを向上させるシステムを提案する。このシステムは、複数の AP を集約して制御するコントローラを用いる。コントローラには端末の位置を検出するためにカメラが備え付けられているため、このカメラで撮影した動画像に基づいて検出した端末の位置に応じて AP に適切なキャリアセンス閾値を与えることができる (図 1)。以

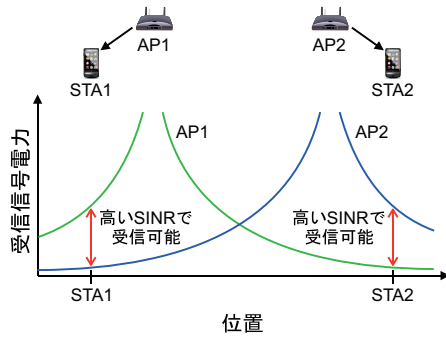


図 2 高い SINR でフレームを受信可能なシナリオ

下, 本システムにおける 2 つの重要な点 (i) 端末の位置の取得方法, (ii) キャリアセンス閾値の制御方法について述べる. 本手法では, 端末に点光源を取り付けるという点を除いて, AP と端末側のハードウェアの変更を必要としない. また, AP と端末の MAC に IEEE 802.11 DCF を使用することを前提とする.

3.3 端末の位置検出方法

端末の位置検出方法には, 筆者らが提案した光信号を用いた端末の位置検出方法 [4] を使用する. 端末の位置を検出するために, コントローラにはシステムのサービス提供エリア全体を見渡せるカメラが備えられている. コントローラはカメラでとらえた端末が発する光の点滅パターンを識別することにより, 端末を個々に検出することができる. この手法は端末の位置検出に可視光を用いるため, 無線通信資源を使わないという利点がある. 本稿では, この手法を用いて, コントローラは端末の位置と ID を取得できることを前提とし, 取得した位置情報を用いて無線 LAN のスループットを向上させる方法に焦点をあてる.

3.4 キャリアセンス閾値の制御方法

前述した位置検出方法により取得した STA の位置情報を基に, コントローラは各 STA の SINR を推定し, この推定結果から AP のキャリアセンス閾値を定める. 以下, STA の SINR の推定方法, および, 推定結果に応じた AP のキャリアセンス閾値の制御方法について詳しく述べる.

3.4.1 SINR の推定指標の選択

STA の位置に応じて AP に適切なキャリアセンス閾値を与えるために, STA の SINR を推定する必要がある. ここで, AP a_i とアソシエーションしている STA を $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ij}$ とする. また, $d(m, n)$ をノード m と n 間の距離とし, $\mathbf{N}(a_i)$ を a_i がそのキャリアを受信する可能性のある AP (つまり a_i に近接した AP) の集合とする. コントローラは a_i とアソシエーションしている STA s_{ij} ($j \neq i$) の SINR を推定するために, $d(a_i, s_{ij})$ から受信信号電力を, $d(a_k, s_{ij})$ と $d(s_{ij}, s_{kj})$ から, a_k または s_{kj} が送信した場合における干渉信号電力を推定することが可能である. こ

の推定結果に基づいて, コントローラは AP のキャリアセンス閾値を決定する.

3.4.2 端末の位置に応じたキャリアセンス閾値の決定

コントローラは $d(a_i, s_{ij}), d(a_k, s_{ij})$ および $d(s_{ij}, s_{kj})$ に応じて AP のキャリアセンス閾値を *High* または *Normal* に設定する. a_i のキャリアセンス閾値 *High* は, a_i は a_k が発した信号を感知しない程度に高いキャリアセンス閾値である. キャリアセンス閾値 *Normal* は, a_i は $a_k \in \mathbf{N}(a_i)$ が発した信号を感知する程度の低い値である. AP が他の AP または端末が発した電波を無視して送信したとしても, 各端末が十分に低いロス率で所望の AP からフレームを受信できる場合, コントローラは AP のキャリアセンス閾値を *High* にする. 反対に, AP のキャリアセンス閾値を高くすることにより, フレームロスが発生する確率が高くなる場合は, キャリアセンス閾値を *Normal* にする.

提案手法において, コントローラは $d(a_i, s_{ij}), d(a_k, s_{ij})$ および $d(s_{ij}, s_{kj})$ を入力とし, AP のキャリアセンス閾値を出力としたルックアップテーブル (LUT) を参照する. この LUT は AP または STA によるフレームの同時送信をさせたシミュレーション結果あるいは実測値を元に作成されるものとする. 次章にて, LUT を作成するために行ったシミュレーションについて述べる.

4. AP と端末の位置関係とフレームロス率の調査

本章では, LUT を生成するために, ネットワークシミュレータ Qualnet 5.1 [9] を使用し, AP のキャリアセンス閾値を *High* にしたとしても, AP または STA それぞれがフレームロス率 10% 以下となる条件を調査した. ここでは議論を単純にするため, 2 台の AP とそれぞれの AP に対してアソシエーションしている STA が 1 台ずつ存在する場合に限定して議論する.

4.1 シミュレーションシナリオ

AP のキャリアセンス閾値を *High* に設定することにより, フレームの衝突が生じると考えられるシナリオは, 同時に複数のダウンリンク通信が行われる場合と, アップリンク通信とダウンリンク通信が行われる場合の 2 通り考えられる (図 3). 同図 (a) に示す前者のシナリオは, a_1 と a_2 が同時に各宛先へフレームを送信する場合を示している. 同図 (b) に示す後者のシナリオは, s_{21} から a_2 へフレームを送信中に, a_1 が s_{11} へフレームの送信を開始する場合である. この 2 つのシナリオにおいて, AP のキャリアセンス閾値を *High* にしたとしても, AP または STA それぞれがフレームロス率 10% 以下を満たす AP と STA の位置関係のとき, AP のキャリアセンス閾値を *High* にすることが可能である.

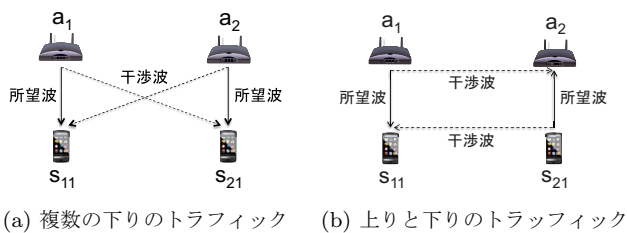


図 3 フレームの衝突が発生するシナリオ

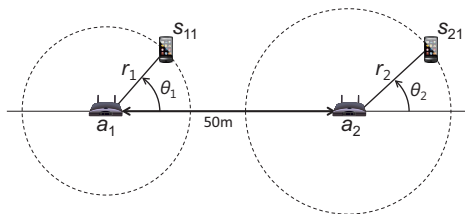


図 4 AP と端末の配置

表 1 フレームロス率 10% 以下を満たす条件

AP-STA distance				
$d(a_1, s_{11})$	$d(a_2, s_{21})$	$d(a_1, s_{21})$	$d(a_2, s_{11})$	$d(s_{11}, s_{21})$
≤ 4	≤ 4	-	-	-
$4 \sim 5$	≤ 5	$48 \leq$	$48 \leq$	$49 \leq$
≤ 5	≤ 5	-	-	$42 \leq$
$5 \sim 6$	≤ 6	$48 \leq$	$48 \leq$	$50 \leq$
≤ 7	≤ 7	-	-	$38 \leq$
$7 \sim 8$	≤ 8	$44 \leq$	$44 \leq$	$44 \leq$
$8 \sim 9$	≤ 9	$47 \leq$	$47 \leq$	$49 \leq$
$9 \sim 10$	≤ 10	$51 \leq$	$51 \leq$	-

4.2 シミュレーション条件

図 4 に示すように、2 台の AP (a_1, a_2) と 2 台の STA (s_{11}, s_{21}) を配置した。AP 間の距離を 50 m 離して AP を配置し、 a_1, a_2 を中心とした極座標 $(r_1, \theta_1), (r_2, \theta_2)$ の位置に s_{11} と s_{21} を配置した。 r_1 と r_2 は 0 から 15 m まで変化させ、 θ_1 は 0 から 180 度まで、 θ_2 は 0 から 360 度まで変化させた。各シナリオにおいて、15000 個の UDP パケット (1,024 bytes) を用意した。また、常にすべてのノードは他のノードが発した信号を感知しないように、キャリアセンス閾値 High (= -60 dBm) を設定し、送信電力を 16 dBm とした。各無線ノード間のトラフィック量を送信バッファが空にならない程度に維持した。MAC 層以下のプロトコルは IEEE 802.11g とし、AP の伝送レートを 24, 36, 48, 54 Mbps それぞれの場合を、伝搬モデルに 2 波モデルを使用して、シミュレーションした。ただし、STA の伝送レートは 24 Mbps に固定とした。また、各ノードはフレームの再送を行わない。

4.3 フレームロス率 10% 以下の AP と端末の位置関係

AP と STA のフレームロス率が 10% 以下を満たした $d(a_1, s_{11}), d(a_2, s_{21}), d(a_1, s_{21}), d(a_2, s_{11})$ および $d(s_{11}, s_{21})$ の値を表 1 に示す。この表から、フレームロス率が 10% 以下となる AP と STA の位置関係を読み取ることは困難であるため、以下、この表の結果を可視化した結果を各シナリオ毎に示す。

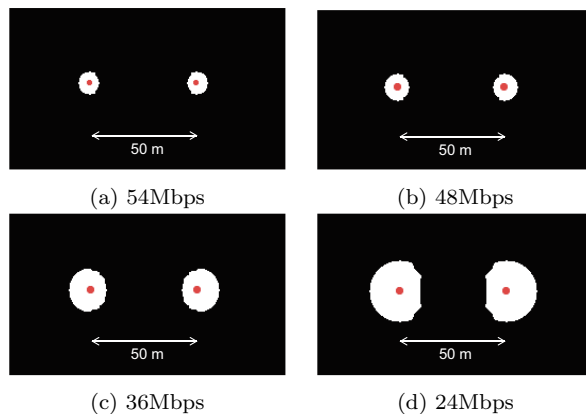


図 5 フレームロス率 10% 以下となる AP と STA の位置関係

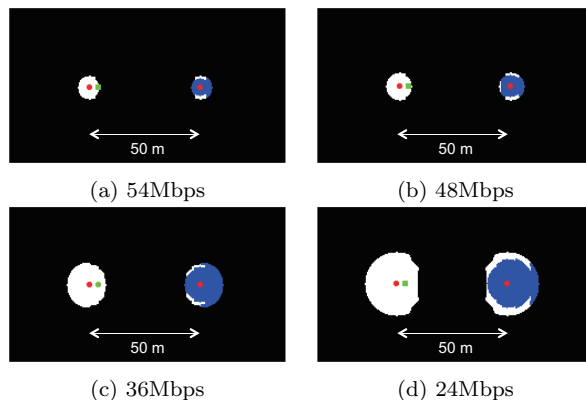


図 6 上りのトラフィックを考慮した場合におけるフレームロス率 10% 以下となる AP と STA の位置関係

4.3.1 複数の下りトラフィックを発生させたシナリオ

図 3 (a) に示すシナリオにおける、各ノードがフレームロス率が 10% 以下になる条件を満たす AP と端末の位置関係は $d(a_1, s_{11})$ と $d(a_2, s_{21}), d(a_1, s_{21}), d(a_2, s_{11})$ に依存した。これらの距離を基に、フレームロス率 10% 以下を満たす AP と STA の位置関係を可視化した図を図 5 に示す。赤色の点が AP を表し、白色で塗られた領域が、AP のキャリアセンス閾値を High にしたとしても、STA がロス率 10% 以下でフレームを受信することができる STA の位置を表している。同図から AP の伝送レートが低いほど、AP から STA がより遠くに存在する場合でも、AP はロス率 10% 以下でフレームを送信可能であることが分かる。

4.3.2 上りと下りトラフィックを発生させたシナリオ

図 3 (b) に示すシナリオにおける各ノードがフレームロス率を 10% 以下を満たす条件は、複数の下りトラフィックを発生させたシナリオでフレームロス率 10% 以下を満たす条件に加えて、 $d(s_{11}, s_{21})$ に依存する。フレームロス率 10% 以下を満たす全ての $d(s_{11}, s_{21})$ の位置関係を可視化させると、多くの紙面を要する。ここでは a_1 の右方向 4 m の位置に s_{11} を配置した場合に着目した結果を図 6 に示す。この図は、図 5 にフレームロス率 10% 以下を満たす $d(s_{11}, s_{21})$ を加えた図である。同図の緑色の点は s_{11} を表し、青色で塗られた領域が本シナリオでフレームロス率

表 2 Positions-CST Table

AP-STA distance					CST value		
$d(a_1, s_{11})$	$d(a_2, s_{21})$	$d(a_1, s_{21})$	$d(a_2, s_{11})$	$d(s_{11}, s_{21})$	54Mbps	48Mbps	36Mbps
≤ 4	≤ 4	-	-	-	Normal	High	High
4 ~ 5	≤ 5	48 \leq	48 \leq	49 \leq			
≤ 5	≤ 5	-	-	42 \leq	Normal	High	High
5 ~ 6	≤ 6	48 \leq	48 \leq	50 \leq			
≤ 7	≤ 7	-	-	-	Normal	Normal	High
7 ~ 8	≤ 8	44 \leq	44 \leq	44 \leq			
8 ~ 9	≤ 9	47 \leq	47 \leq	49 \leq			
9 ~ 10	≤ 10	51 \leq	51 \leq	-			
others							

10% 以下を満たす s_{21} の配置を表している. 図 6 において, 白色の面積に対して青色の面積が占める割合は, (a) は 84%, (b) は 85%, (c) は 92%, そして (d) は 74% であった. この結果から, 上りのトラフィックも考慮した場合, 複数のダウンリンク通信のみを考慮したシナリオと比べて, AP のキャリアセンス閾値を *High* にできる条件がより制限されることが分かる. 他の位置に s_{11} を配置した場合においても, 同様に条件が制限され, 最も条件が制限された場合は, 白色に対して青色の面積が占める割合は 61% であった.

4.4 LUT の生成

表 1 を基に, $d(a_i, s_{ij})$ と $d(a_k, s_{ij})$, $d(s_{ij}, s_{kj})$ を入力とし, AP のキャリアセンス閾値を出力とした LUT (positions-CST LUT) (表 2) を生成した. 2 通りのシナリオに対して, フレームロス率 10% 以下の条件を満たす, $d(a_i, s_{ij})$ と $d(a_k, s_{ij})$, $d(s_{ij}, s_{kj})$ に対して, キャリアセンス閾値に “High” を設定した. 本章では, STA が 2 台の場合に限定して議論したが, STA が 3 台以上の場合も, 全ての STA と 2 台の AP の位置関係をこの LUT に示す条件を満たすかどうかを判定することにより適合可能である.

4.5 LUT の拡張

提案システムの主な戦略として, ネットワークの空間利用効率を向上させるために AP のキャリアセンス閾値を適切な値に調整することに焦点を当てている. しかしながら, 一般的に受信側の SINR に応じて適切な伝送レートを与えることで, 無線 LAN のスループット向上が可能である.

本節では, AP のキャリアセンス閾値だけでなく, 伝送レートも制御することで更なる無線 LAN スループット向上を図る. そこで, LUT の出力値に AP の伝送レートを加えるように, positions-CST LUT を拡張する. 本稿では, AP の MAC 層以下のプロトコルに IEEE 802.11g を用いる場合を想定し, それがサポートする伝送レート群から適切な値を選択する. ただし, AP のキャリアセンス閾値を高くしたときに, キャリアセンス閾値が低いときよりもスループットが向上するように, 伝送レートの最低値を定める.

事前シミュレーションにより, キャリアセンス閾値を *High* に設定された AP2 台に異なる STA へフレームを送

表 3 Positions-CST-Rate LUT

(a) LUT #1					CST value
AP-STA distance					
$d(a_1, s_{11})$	$d(a_2, s_{21})$	$d(a_1, s_{21})$	$d(a_2, s_{11})$	$d(s_{11}, s_{21})$	
≤ 9	≤ 9	-	-	-	High
9 ~ 10	≤ 10	41 \leq	41 \leq	42 \leq	
10 ~ 11	≤ 11	41 \leq	41 \leq	45 \leq	
11 ~ 12	≤ 12	41 \leq	41 \leq	51 \leq	
12 ~ 13	≤ 13	45 \leq	45 \leq	57 \leq	
13 ~ 14	≤ 14	46 \leq	46 \leq	57 \leq	
others					

(b) LUT #2

AP-STA distance			DataRate
$d(a_1, s_{11})$	$d(a_2, s_{11})$	$d(s_{11}, s_{21})$	[Mbps]
≤ 4	-	-	54
4 ~ 5	48 \leq	49 \leq	
≤ 5	-	42 \leq	48
5 ~ 6	48 \leq	50 \leq	
≤ 7	-	38 \leq	36
7 ~ 8	44 \leq	44 \leq	
8 ~ 9	47 \leq	49 \leq	
9 ~ 10	51 \leq	-	
-	-	-	
≤ 9	-	-	24
9 ~ 10	41 \leq	42 \leq	
10 ~ 11	41 \leq	45 \leq	
11 ~ 12	41 \leq	51 \leq	
12 ~ 13	45 \leq	57 \leq	
13 ~ 14	46 \leq	57 \leq	

信させた結果, AP の伝送レートを 24Mbps まで下げても, キャリアセンス閾値を *Normal* にし, 最高伝送レート (54 Mbps) で送信させた場合よりもスループットが向上することが確かめられた. そのため, 本稿では, AP の伝送レートの最低値を 24 Mbps と定め, それ以下の伝送レートは扱わない. AP の伝送レートを 24 Mbps にしたときに, AP のキャリアセンス閾値を高く設定したとしても, フレームロス率が 10% 以下を満たす $d(a_i, s_{ij})$, $d(a_k, s_{ij})$ および $d(s_{ij}, s_{kj})$ に対して, AP のキャリアセンス閾値に *High* を与える. AP のキャリアセンス閾値 *High* を与えた条件において, フレームロス率を 10% 以下を満たす範囲で, できる限り高い伝送レートを与える. 表 3 に AP のキャリアセンス閾値と伝送レートを出力とした LUT (positions-CST-Rate LUT) を示す. コントローラは表 3 (a) に基づいて各 AP のキャリアセンス閾値を定め, 表 3 (b) から AP の伝送レートを定める.

5. 提案手法の性能評価

本章では, 従来の DCF 方式を使用した場合に対する, 提案手法のスループット向上効果をシミュレーションにより評価する. 加えて, 提案手法における AP または端末間のスループットの公平性についても評価する.

5.1 シミュレーション条件

本稿では, 2 台の AP と 2 台の端末を配置した場合と, 4 台の端末を配置した場合について, 提案手法の性能評価を行った. 端末が 2 台の場合, 図 7 に示すように s_{11} と s_{21} を配置した. 端末が 4 台の場合, s_{12} と s_{22} を加えて配置した. 各 STA はアソシエーションしている AP から半径

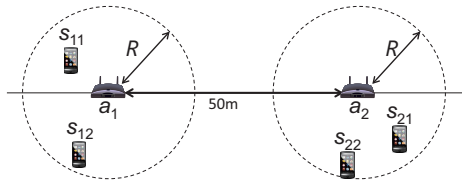
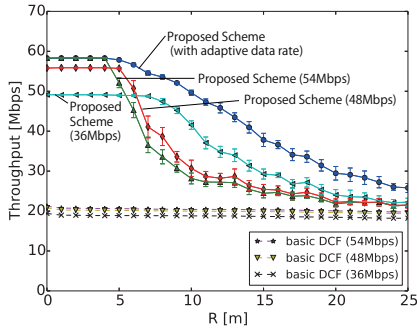
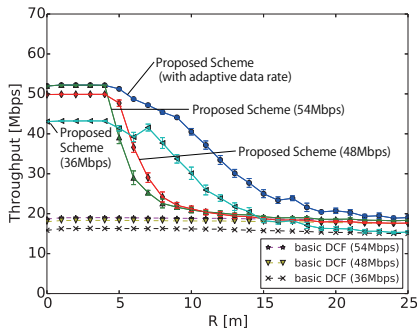


図 7 シミュレーション条件



(a) STA が 2 台の場合



(b) STA が 4 台の場合

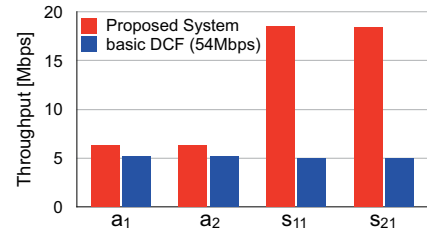
図 8 AP と STA の総スループット

R m 以内にランダムに配置した。 R は 0 から 25 m まで変化させ、各 R に対して 50 通りの異なる STA 配置を用意した。各 R に対して、AP と STA の総スループットを評価指標とした。本シミュレーションにおいて、全ての AP および STA それぞれのトラフィック量を送信バッファが空にならない程度に維持させた。AP のキャリアセンス閾値 *High* を -60 dBm, *Normal* を -87 dBm とした。各 STA のキャリアセンス閾値は常に *Normal* とした。また、MAC 層以下のプロトコルには、IEEE 802.11g を使用し、STA の伝送レートを 24 Mbps, AP の伝送レートを 24, 36, 48, 54 Mbps それぞれの場合をシミュレーションした。ただし、AP および STA は ACK を受信できなかった場合、フレームの再送を最大 3 回行うものとした。その他のシミュレーションパラメータは前の章と同じである。

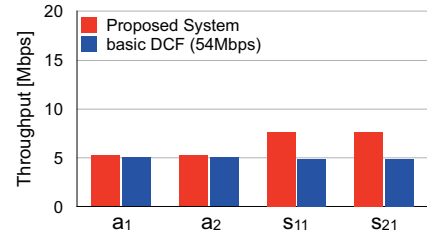
5.2 総スループット

5.2.1 端末が 2 台の場合

図 8 (a) に、端末が 2 台の場合の AP と STA の総スループットを示す。提案手法（データレート制御あり）はキャ



(a) R が 10 m の場合



(b) R が 25 m の場合

図 9 AP と STA ぞれぞれのスループット

リアセンス閾値を固定にした従来の DCF 方式と比べて総スループットを上回ることが確かめられた。 R が小さいとき、 R が大きい場合より STA の SINR は高い。提案システムでは、AP のキャリアセンス閾値を高い値に設定するため、各 AP は近隣 AP からの信号を無視して積極的に送信できることから、 R が小さいほど、スループットが高くなった。 R が 15 m のとき、提案システムの総スループットは 37.8 Mbps, 従来の DCF 方式は 20.3 Mbps であり、提案システムは従来の DCF 方式よりも、86 % スループットが向上した。また、提案システムの総スループットがもっとも悪い結果となった場合 ($R = 25$ m) でも、提案システムは 25.8 Mbps, 従来の DCF 方式は 19.8 Mbps であり、30% 向上した。

5.2.2 端末が 4 台の場合

図 8 (b) に、端末が 4 台の場合の AP と STA の総スループットを示す。2 台の場合と同様に、 R が小さいほど、提案手法の総スループットは高いことが確かめられた。図 8 (a) と比べると、 R が大きくなるにつれて、提案手法の総スループットの減衰が大きい。

5.3 各ノード間のスループットの公平性評価

提案システムにより、AP または STA 間のスループットの公平性を保つことができているかどうかを評価するために、各ノードのスループットを図 9 に示す。図 9 (a) は、 R が 10 m の場合の各ノードのスループットを示している。同図から、AP と STA 間のスループットに偏りがあることが分かる。提案システムでは、AP と STA 間の距離が近いとき、AP の伝送レートを高く設定するため、AP と STA 間のスループットに偏りが生じたことが考えられる。しかしながら、どの AP または STA のスループットは従来の DCF 方式よりも、スループットが上回る結果となった。図 9 (b) に示す R が 25 m のときも同様に、AP と STA 間のス

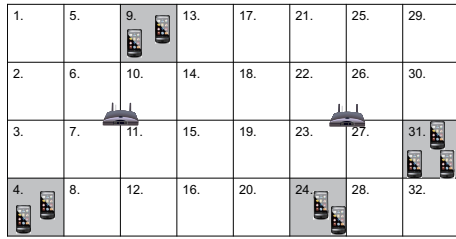


図 10 スケーラビリティの向上戦略

ループットに多少の偏りがみられるが、各ノードのスループットが従来の DCF 方式よりも下回ることはなかった。

6. 議論

ここまで、2 台の AP と複数の STA が配置された場合に限定して、本システムの検証をした。以下、AP または STA の配置数を 2 台より多い場合について議論する。また、本システムを実環境で運用する際の課題と対応策について議論する。

6.1 全 AP-STA 間距離の計算に伴うコスト

本システムを運用するにあたり、予めサービス提供エリア内の電波環境に適した LUT を作成しておく必要がある。コントローラは存在する全ての STA の SINR を推定するために、リアルタイムで STA と AP または他の STA 間の距離を計算する必要がある。本システムにおける距離計算のための計算量は AP または STA の設置数 n に対して、計算量は $O(n^2)$ である。

AP または STA の設置数の増加によるコントローラの計算量を減らすために、STA 単位で AP との位置関係を求めるのではなく、領域単位で AP との位置関係を求める方法を検討する。図 10 に示すように、運用空間を複数の領域に分割し、各領域で STA が存在している領域を対象として、AP との位置関係を計算する。同図では、運用空間に 9 台の STA が存在するが、STA が存在する領域は 4 箇所であるので、4 箇所の領域を対象に AP との位置関係を計算することで、計算コストを減少できる。この方法は空間を細かく分割することで、より正確に STA の位置を取得することができるが、計算量が大きくなる。そのため、本システムの精度と計算量はトレードオフの関係がある。

6.2 位置情報を用いた電波環境の推定値の精度

本稿では、電波伝搬モデルに 2 波モデルを用いてシミュレーションした。しかしながら、実環境では、天井や床、障害物などによる反射波の影響を無視できない。現実の環境で起こり得る全ての電波損失を考慮して電波干渉を推定することは困難であるため、位置情報から得た電波環境の推定値と実測値で誤差が生じることが考えられる。そこで、STA の位置と電波干渉の実測データを収集し、この収集したデータに応じて AP のキャリアセンス閾値と伝送レート

を出力とした LUT を動的に構成する方法が考えられる。

7. まとめ

本稿では無線 LAN の空間利用効率を向上させることを目的とし、端末の位置に応じて AP のキャリアセンス閾値とデータレートを制御するシステムを提案した。このシステムでは、複数の AP を集約して制御するコントローラを用いる。コントローラは付属のカメラで端末の位置を取得し、この端末の位置に応じて、AP に適切なキャリアセンス閾値を与える。本システムにおいて、コントローラは AP と STA の位置関係を入力値とし、AP のキャリアセンス閾値を出力とした LUT を参照する。AP または STA によるフレームの同時送信をさせた予備シミュレーション結果を基に LUT を作成し、本システムのスループット向上効果をシミュレーションにより評価した。この結果、提案システムでは IEEE 802.11g を使用する STA2 台が 50 m 離して置かれた 2 台の AP からそれぞれ 15 m 以内に存在する場合、従来の DCF 方式よりも 86 % スループットが向上することが確かめられた。今後、本システムにおけるスケーラビリティの拡張と、位置と受信信号強度の測定値を対応させた LUT の構成方法について詳しく検討する予定である。

謝辞 本研究は、科学研究費補助基礎研究 A (課題番号 24240009) の助成によるものである。

参考文献

- [1] Z. Zhou, Y. Zhu, Z. Niu, and J. Zhu, Joint Tuning of Physical Carrier Sensing, Power and Rate in High-Density WLAN, in Proc. Asia-Pacific Conference on Communications, pp.131-134, 2007.
- [2] X. Zhang, G. Qiu, Z. Dai, and D. K. Sung, Coordinated Dynamic Physical Carrier Sensing based on Local Optimization in Wireless Ad hoc Networks, in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.404-409, 2013.
- [3] T. Nadeem, L. Ji, A. Agrawala, and J. Agre, Location Enhancement to IEEE 802.11 DCF, in Proc. IEEE INFOCOM, pp.651-663, 2005.
- [4] 石川晃平, 石原進, 点滅光を利用した指向性無線通信システムのための点滅光源検出手法の基礎評価, DICOMO2012 シンポジウム論文集, pp. 1986-1994, 2012.
- [5] T. Lin, and J. C. Hou, Interplay of Spatial Reuse and SINR-determined Data Rates in CSMA/CA-based, Multi-hop, Multi-rate Wireless Networks, in Proc. IEEE INFOCOM, pp.803-811, 2007.
- [6] T. Kim, H. Lim, and J. C. Hou, Improving Spatial Reuse through Tuning Transmit Power, Carrier Sense Threshold, and Data Rate in Multihop Wireless Networks, in Proc. ACM MobiCom, pp.366-377, 2006.
- [7] V. Shrivastava, N. Ahmed, S. Rayanchu, S. Banerjee, S. Keshav, K. Papagiannaki, and A. Mishra, CENTAUR: Realizing the Full Potential of Centralized WLANs through a Hybrid Data Path, in Proc. ACM Mobicom, pp.297-308, 2009.
- [8] A. Vasani, R. Ramjee, and T. Woo, ECHOS -Enhanced Capacity 802.11 Hotspots, in Proc. IEEE INFOCOM, pp.1562-1572, 2005.
- [9] Qualnet, <http://web.scalable-networks.com>