

無線環境インターネットにおける MAC 層の情報を用いたクロスレイヤ制御方式の開発

大 坐 島 智 電気通信大学大学院情報システム学研究科准教授

1 はじめに

携帯端末は複数の無線インタフェースをもち、いつでもどこでもインターネット接続ができる環境が整いつつある。しかし、インターネットには接続できるだけであり、ユーザの要求する通信品質を提供することは現状では難しい。それはインターネットのアーキテクチャが有線ネットワークを前提としたデータ通信のための“届けばよい”という通信品質のために設計されているためである。よって、無線・モバイル環境において、音声、動画通信のための通信品質提供することはネットワークアーキテクチャ上困難である。その中で、無線 LAN がインターネットへの接続として広く普及してきている。それは、MAC プロトコル単純であり、設置が容易なためである。しかし、無線 LAN を用いて、単にインターネットに接続できればよいという通信環境から、音声、動画通信を快適に行える環境が求められるようになってきている。そこで、本研究課題では、無線チャンネルの利用状況を MAC 層から得られる情報から推定し、クロスレイヤ制御により、上位層にこの情報を伝える。上位層では、無線の状況に合わせてトラヒックを調節できる適応制御を行う方式を開発する。この制御により、動画の通信では、端末が利用できる帯域幅に合わせた動画転送制御により、ネットワークの輻輳によって品質の劣化しない動画通信を目的とした。TCP 通信では、動画通信を邪魔しない TCP 通信のバックグラウンド転送の実現を目的とした。端末側、および、基地局側でトラヒック制御する方式の開発し、FPGA を用いた無線 LAN ボードに実装したテストベッド、および、コンピュータシミュレーションによる評価を行った。

2 MAC 層の情報を用いたクロスレイヤ制御方式

2-1 端末による MAC 層の情報を用いた動画トラヒック制御方式（参考文献[1]-[3]）

IEEE 802.11 のインフラストラクチャモードでは、複数の無線端末が 1 つのアクセスポイントを共有し、各端末が利用できる帯域幅は、共有している端末台数と各端末の送信量によって決まる。アプリケーションが利用可能な帯域幅より多くのトラヒックを発生させた場合に通信品質は悪化する問題がある。そこで、下位層の情報を上位層が取得し、アプリケーションが利用可能な帯域以上のトラヒックを発生させないように制御するクロスレイヤ制御が有効である。

本研究課題では IEEE 802.11 インフラストラクチャモードにおいて QoS 制御を実現するために、下位層の情報をを用いて上位層でトラヒックの発生量を制御する方法を提案する。すなわち、IEEE 802.11 の制御情報から無線ネットワークのチャンネル占有率を推定し、トラヒック制御に用いる。IEEE 802.11 では隠れ端末問題を解決するために RTS (Request To Send) / CTS (Clear To Send) が使用される。RTS/CTS 交換する場合、周辺の端末にデータを送信する期間を通知するために NAV (Network Allocation Vector) が用いられる。周辺の端末は NAV の値を NAV 期間として設定する。その間、受信端末以外の周辺の端末は送信を禁止し衝突を回避する。NAV 期間を分析することにより、自端末内での情報のみから各端末は自身の端末がチャンネルを占有した時間 (チャンネル占有時間) を求めることができる。よって、下位層から取得したチャンネル占有率情報に応じて、アプリケーションが発生するトラヒックを制御することが可能となる。それらの制御と情報交換は、MAC 層とアプリケーション層の間のクロスレイヤ制御により実現される。クロスレイヤ制御部は次の 5 つの機能を持つ (図 1)。

- (1) 各端末の NAV 情報からチャンネル占有率を計算する。
- (2) 全端末のチャンネル占有率の合計を計算し、ネットワークが混雑しているかどうかを判断する。
- (3) ネットワークが混雑しているなら割り当て帯域を計算し、混雑していないならば割り当て帯域の上限を設定しない。

- (4) 割り当て帯域を自端末内のトラヒック発生アプリケーションに通知する．（上りトラヒックの制御）
- (5) 割り当て帯域を通信相手のトラヒック発生アプリケーションに通知する．（下りトラヒックの制御）
- (6) 割り当て帯域を帯域制御部に通知する．

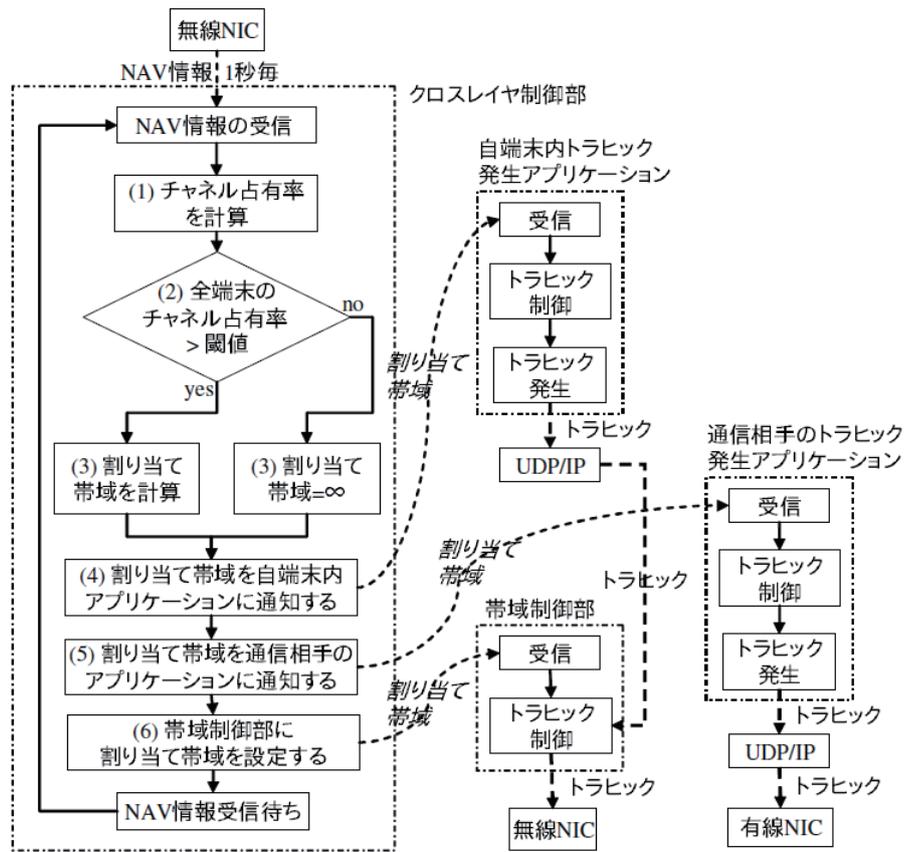


図1 端末でのクロスレイヤ制御

FPGA を搭載した無線 LAN 評価ボードを改造し，無線の利用状況を NAV (Network Allocation Vector) 測定することで，推定できるようにした．無線 LAN ボードの情報を解析し，上位層に伝えるためのクロスレイヤ制御プログラムを LINUX 上に実装した．クロスレイヤプログラムは，トラヒック生成アプリケーションに対して，自端末で獲得できる帯域を伝えることで，アプリケーションで生成するトラヒック量を調節する適応制御方式を開発した．

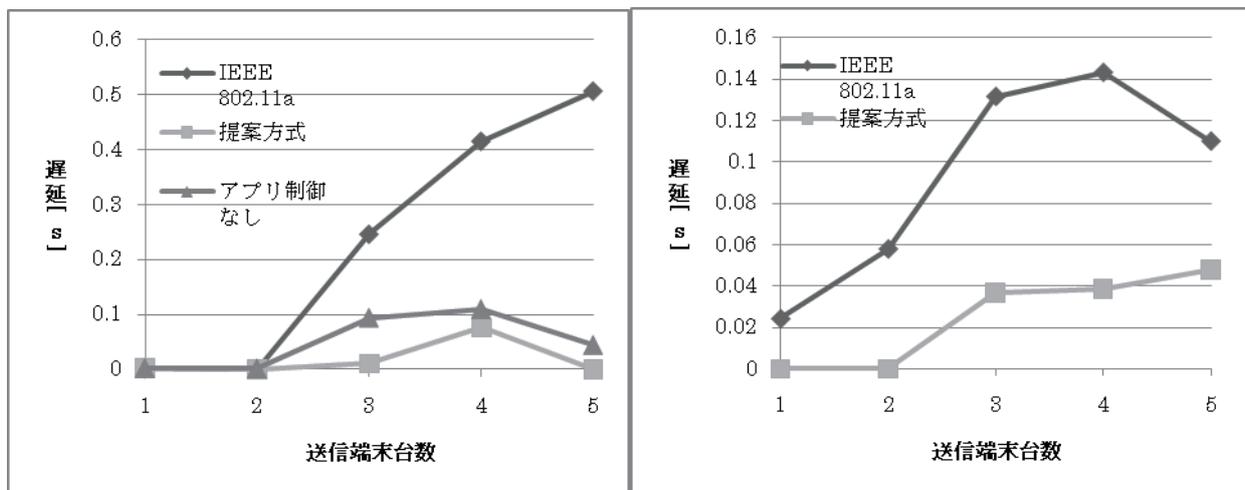


図2 UDP フローの片方向遅延 (左：上りトラヒック，右：下りトラヒック)

実機に評価実験により、端末から、サーバへの上り方向に対しては、通信品質が大幅に改善し、提案方式の有効性が確認できた。下り方向のトラヒック制御に関しては、基地局でのトラヒックのトラヒック制御方式が1つのFIFOのキューで行われており、帯域幅を制限しても、パケットの破棄がすべてのトラヒックに対して等確率のため、大きな改善は見られなかった。今後、基地局でのトラヒック制御方式による品質の改善が必要である。端末と動画配信サーバ間のシグナリングは独自のものを用いたが、RTCPを用い、さらに、通信品質の評価としてQoEを用いる予定である。

2-2 端末によるMAC層の情報を用いたTCPトラヒック制御方式(参考文献[4]-[5])

近年、IEEE 802.11による無線LANが、インターネットに接続するための技術として広く普及している。そのため、無線端末で、IP電話やストリーミング動画など広帯域幅のサービスを利用する需要が高まっている。IEEE 802.11のインフラストラクチャモードは、複数の無線端末が無線媒体として1つのアクセスポイント(AP)を共用する形となっており、各端末の利用するサービスの通信品質を低下させないように、一部の端末の利用する帯域幅を調節し、他端末に影響を与えないようにする必要がある。

TCPではエンドノードで、利用ネットワークの混雑状況を直接測定することができないため、輻輳ウィンドウサイズ(*cwnd*)を段階的に増加させ、パケット廃棄が起きた場合に輻輳とみなし*cwnd*を減らす制御を行っている。そのため、*cwnd*がある程度拡大するたびに輻輳が発生し、ネットワークを共用する他端末の通信に影響を与えてしまう場合がある。特に、無線部分がボトルネックになり輻輳が発生しやすい。例えば、無線ネットワークにおいて、ある端末が動画や音声のアプリケーションを利用するためにUDP通信を行っているとき、他の端末がTCP通信を行うことでUDP通信の方のサービス品質が低下してしまうことが考えられる。これは、TCP通信は輻輳を検知しないかぎり帯域幅を取れるだけ取ろうとするからである。したがって、各端末の利用するサービスの通信品質を低下させないように、個々のフローの帯域幅を適切に調節することが有効である。

そこで本研究ではIEEE 802.11インフラストラクチャモードにおいて、通信端末でTCP受信の品質を適応制御するため、MAC層の情報を用いて、端末の*awnd*を制御する方式を提案する。これにより、無線ネットワーク内の各端末が必要な帯域幅を確保しつつ、通信状況を悪化させる過剰なトラヒックを、TCPに発生させない制御を、クロスレイヤ制御により実現する。帯域幅の推定は、MAC層からIEEE 802.11の制御情報を用い、無線ネットワークのチャンネル利用率を推定する。各端末は自身の端末がチャンネルを利用した時間(チャンネル利用時間)を求めることができる。よって、下位層から取得したチャンネル利用情報に応じて、TCPが発生するトラヒックを制御することが可能となる。それらの制御と情報交換は、MAC層とTCPの間のクロスレイヤ制御により実現する。クロスレイヤ制御は提案方式搭載端末が測定した全体のチャンネル利用率がある閾値を越えるとき、輻輳ウィンドウ、もしくは、広告ウィンドウサイズの値の更新を行うことで、TCP送信端末のチャンネル利用率を下げさせる。これにより、無線ネットワーク内の端末の通信品質を改善する。

提案方式の動作概要を図3に示す。提案システムでクロスレイヤ制御プログラムは、MAC層の情報としてNAV(RTS/CTS)の計測値の累計を得て、各端末の無線チャンネル利用率を求める。MAC層の情報の計測は無線インタフェースで行う。帯域幅制御はTCPの動作を一部モジュール化し、クロスレイヤ制御プログラムから制御を加えられるようにしたものである。動作は次のようになる。

- 1) 無線LANインタフェースが一定時間ごとにNAV計測値の累計を無線LANドライバに送信する。
- 2) クロスレイヤ制御プログラムが無線LANドライバのNAVの計測値の累計を取り出す。
- 3) クロスレイヤ制御プログラムはNAV情報を元に、各端末の無線チャンネル利用率を計算する。
- 4) クロスレイヤ制御プログラムは提案システム搭載端末の無線チャンネル利用率が閾値を越えているかどうかを判定する。
- 5) 閾値を越えていれば、ウィンドウサイズの制御情報を輻輳制御モジュール、または、広告ウィンドウ制御モジュールに入力する。
- 6) 輻輳制御モジュールはウィンドウサイズ更新処理を行うとき、制御情報を参照し、制御を行う。
- 7) 制御端末と、他の同一チャンネル内端末の利用帯域幅が増減する。
- 8) (2)~(7)を繰り返す。

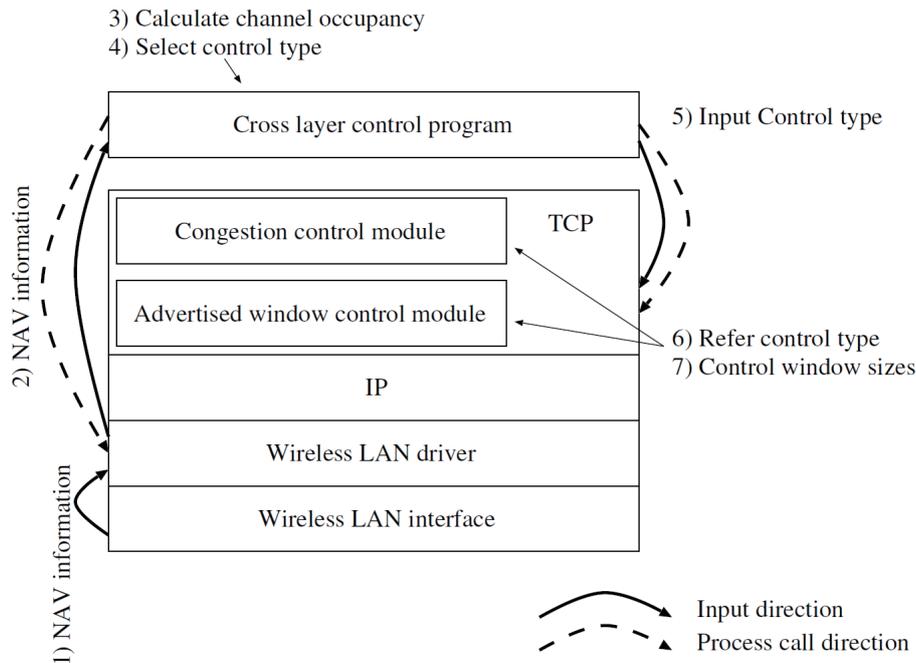


図3 提案ウインドウ制御システムの流れ

図4に輻輳ウインドウモジュール，図5に広告ウインドウモジュールの動作を示す．提案システムでは輻輳ウインドウサイズを更新するため，輻輳制御モジュール，広告ウインドウモジュールに独自のアルゴリズムを追加する．TCPではウインドウフロー制御による通信を行っている．確認応答を待たずに送ることのできるセグメント数をウインドウサイズとし，ウインドウサイズを増やすことで，利用帯域幅を増加させる．ウインドウサイズはTCP通信の利用帯域幅に影響する．TCPでは，ウインドウサイズ増加によるネットワークの輻輳を防ぐために，通信開始から少しずつウインドウサイズを増やし，もし輻輳が発生したときには一時的にウインドウサイズを小さくする輻輳制御アルゴリズムを用いている．

輻輳ウインドウモジュールでは，通常の輻輳制御の上に，無線の状況にあわせて，ウインドウサイズの上限を制御する機能を追加している．モジュールのウインドウサイズ更新関数は，TCPがACKを受信したとき呼び出される．クロスレイヤ制御プログラムによって更新された制御情報を参照する．輻輳制御モジュール内部のウインドウサイズの制御した上限値を $cIamp$ と定義する．制御情報は制御の状態を決定する変数 qos_c ，ウインドウサイズの減少値 β からなる．クロスレイヤ制御プログラムで占有率が閾値 α より大きいときは， qos_c に1を代入する． qos_c が1のときは制御の開始または続行で，ウインドウサイズが下限値 γ より大きいときは， $cIamp$ を β 減少させる．閾値よりも占有率が低く，直前の制御の判定まで閾値を越えていた場合は qos_c に2を代入する． qos_c が2のときは制御の解除で， $cIamp$ を制御を行う前の上限値に戻し輻輳回避状態に入る．以上の閾値の条件に当てはまらないときは qos_c に0を代入する．この場合はTCP Renoに準拠した輻輳制御処理を行う．

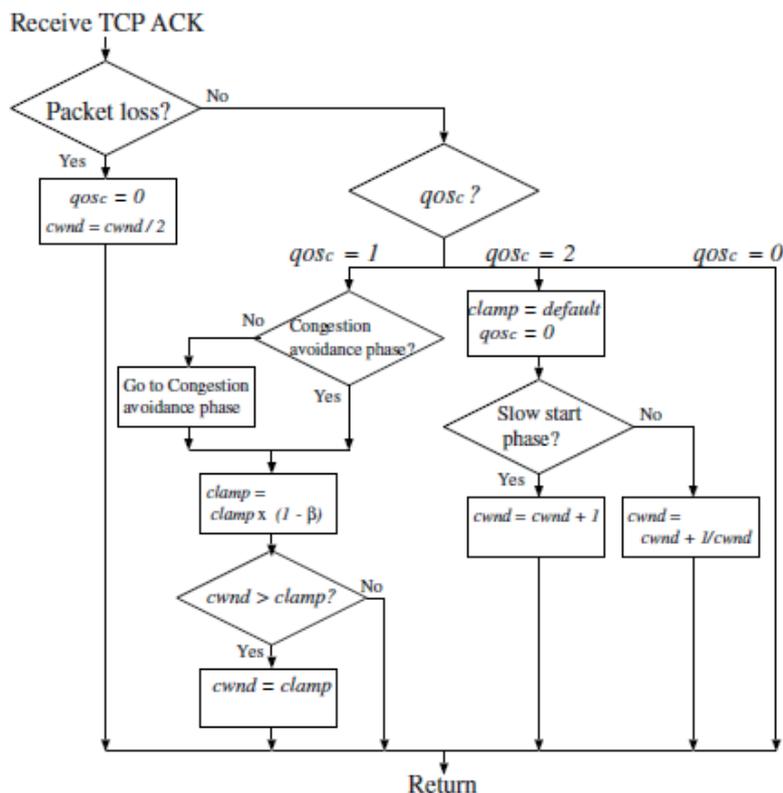


図4 輻輳ウィンドウモジュールの動作

広告ウィンドウ制御モジュールのフローチャートを図5に示す。受信側が通知してくるウィンドウ ($rwnd$) は受信側の未処理データ量の制限である。 $cwnd$ と $rwnd$ の小さい方の値がデータ送出量を規定する。 広告ウィンドウサイズは TCP の受信バッファの空きに依存するため、セグメントの受信状況で更新される。 提案方式では、送信する TCP ACK の広告ウィンドウサイズを任意の値以下に減らすため、広告ウィンドウサイズの最大値をクロスレイヤ制御プログラムから直接任意の値に書き換える。 モジュールは、カーネルで TCP ACK 送信処理が発生したときに呼び出され、クロスレイヤ制御プログラムによって更新された制御情報を参照し、広告ウィンドウサイズの上限を制御する。 時間 i での広告ウィンドウ制御モジュール内部の広告ウィンドウサイズの制御した上限値の変数を $rcv_ssthresh_i$ と定義する。 制御情報は制御の状態を決定する変数 qos_a 、広告ウィンドウサイズの変化割合 γ ($0 < \gamma < 1$) からなる。 クロスレイヤ制御プログラムで利用率が閾値 α より大きく、割り当て帯域幅を越えているときは qos_a に 1 を代入する。 qos_a が 1 のときは広告ウィンドウサイズを減少させる。 広告ウィンドウサイズが下限値 $2 \times SMSS$ (Sender Maximum Segment Size) より大きいときは、直前の制御で設定した $rcv_ssthresh_{i-1}$ に $(1 - \gamma)$ をかける。 直前の広告ウィンドウサイズの上限值を保存しておくのは、広告ウィンドウサイズの上限值は制御の間隔の間も TCP のバッファにあるデータが、プロセスに読み込まれるたびに増加しているからである。 クロスレイヤ制御プログラムで利用率が閾値 α より大きく、割り当て帯域幅より低いときは qos_a に 2 を代入する。 qos_a が 2 のときは広告ウィンドウサイズを維持し、端末における TCP の下り帯域幅が増えないようにする。 閾値の条件に当てはまらないときは qos_a に 0 を代入する。 この場合は、広告ウィンドウサイズを増やす。 広告ウィンドウサイズが受信バッファの空き容量より小さいときは、直前の制御で設定した $rcv_ssthresh_{i-1}$ に $(1 + \gamma)$ をかける。

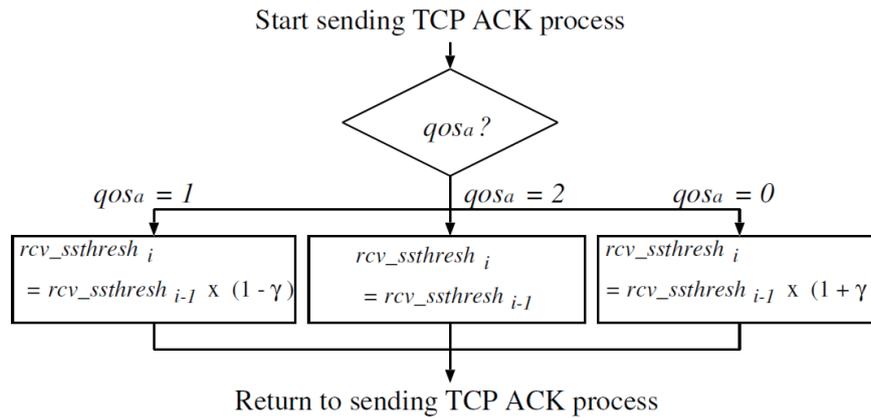


図5 広告ウィンドウモジュールの動作

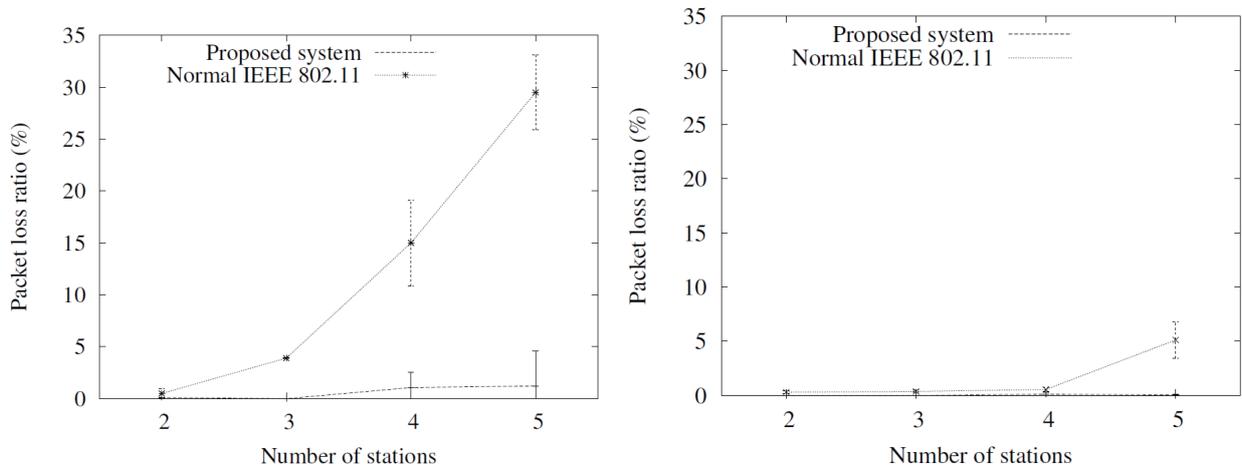


図6 パケットロス率 (左: 上り TCP トラフィック, 右: 下り TCP トラフィック)

提案方式を LINUX ベースのテストベッドに実装し、評価実験を行った。上り方向、下り方向ともにバックグラウンド転送を可能とし、動画の転送を邪魔せずに TCP 通信を行えることを示した (図6)。今後の課題として、1つの端末での複数の TCP フローの扱いや、複数の TCP 端末の場合での帯域制御の方式が必要である。

2-3 基地局による MAC 層の情報をを用いた端末ごとのトラフィック割り当て方式(参考文献[6])

近年、IEEE 802.11 標準規格の無線 LAN が広く普及してきている。一方で、基地局 (AP) に収容されている 1 台の端末だけが大きな通信量を得て、その他の端末がほとんど通信できない、通信機会の不公平が大きな問題となっている。この不公平は、フロー数、パケットサイズ、また端末ごとの送信レートなどの違いにより発生する。

本研究課題では、AP において、MAC 層の情報をを用い、各端末に公平に帯域を割り当てることにより、端末ごとの公平性を達成するクロスレイヤ制御方式を提案する。この提案方式では、UDP、TCP フローに対して端末ごとの不公平を改善し、STA の改良を必要とせず、AP の MAC 層と IP 層のみの小さな改良によって達成される。この端末ごとの公平性は、IP でのキューイング手法と MAC 層の最小コンテンツウィンドウサイズの制御の 2 つの方式を組み合わせることで実現する。まず、キューイングは AP で、Deficit Round-Robin を用いることにより、AP から各端末への下りのフローを制御し、各端末の上下のスループットの合計が等しくなるように制御を行う。次に、AP の最小コンテンツウィンドウサイズの動的な制御について述べる。無線 LAN では STA から AP への上りのフレームに比べ、AP から STA への下りのフレームは送信機会を得にくい。これに対して、AP の最小コンテンツウィンドウ (CW_{min}) サイズを小さくすることにより、十分な下りの送信機会を確保することができる。本提案方式では、AIMD (Additive Increase Multiplicative Decrease) を用いて AP の CW_{min} サイズを動的に設定することにより、必要な下りのスループットが得られるように改良する。この提案方式の有効性を示すために、QualNet シミュレータを用いて、評価を行う。

端末間の公平性を達成するための AP での提案制御方式の概略について述べる。本制御方式はクロスレイヤ制御を用いた無線チャネル状況の把握，キューイング手法(DRR)，動的な CW_{min} サイズの制御の 3 つの要素からなる。制御の流れを図 7 に示し，以下に手順を説明する。

- 1) AP は各 STA の上りのチャネル利用状況を MAC 層の情報から把握する。
- 2) クロスレイヤ制御により得た MAC 層の情報をもとに，上りと下りのチャネル利用時間が各 STA 間と同じになるように AP から各 STA に送信する送信量の割合を計算する。
- 3) 求めた割合で DRR を用いて各 STA に AP からの下りの通信量を割り振る。この処理により，各端末に割り当てた帯域幅よりも上りのチャネル利用時間が大き過ぎる場合を除き STA 間の公平性を達成することができる。
- 4) 動的な CW_{min} サイズの制御は，DRR の制御だけでは STA 間の通信量を平等にすることはできない問題を解決する手段として利用する。具体的には，AP の CW_{min} サイズを小さくすることにより，AP の送信機会を増やし，十分な下りの通信量を確保する制御を行う。

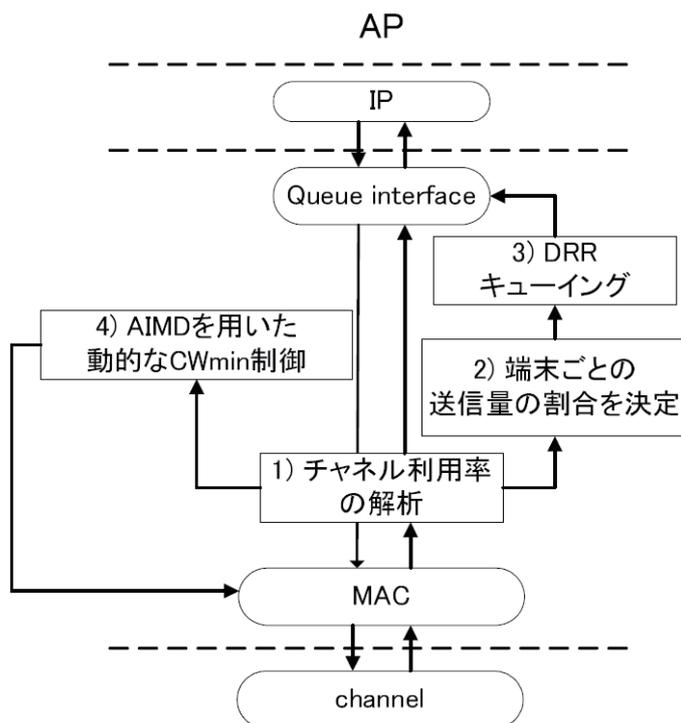


図 7 提案する AP におけるクロスレイヤ制御

コンピュータシミュレーションにより，評価を行い，UDP・TCP のどちらのフローに対しても，有効であることを示した (図 8, 9)。特に，TCP 通信では，上り，下りの通信，および，エンド・トゥ・エンドの異なるトラフィックが混在した場合でも，提案方式が有効に働くことを示した。今後の課題として，実機による評価と UDP トラフィックを極端に発生させる端末の制御方式の開発があげられる。

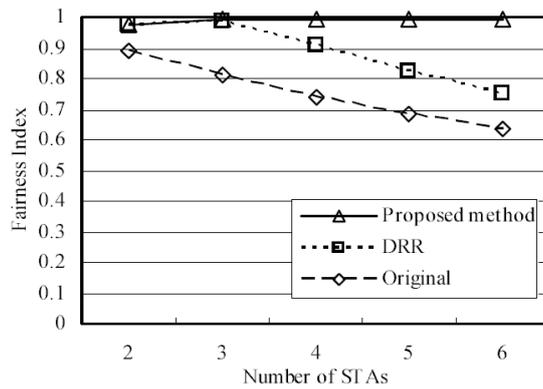


図8 UDPトラフィックの場合のフェアネスインデックス

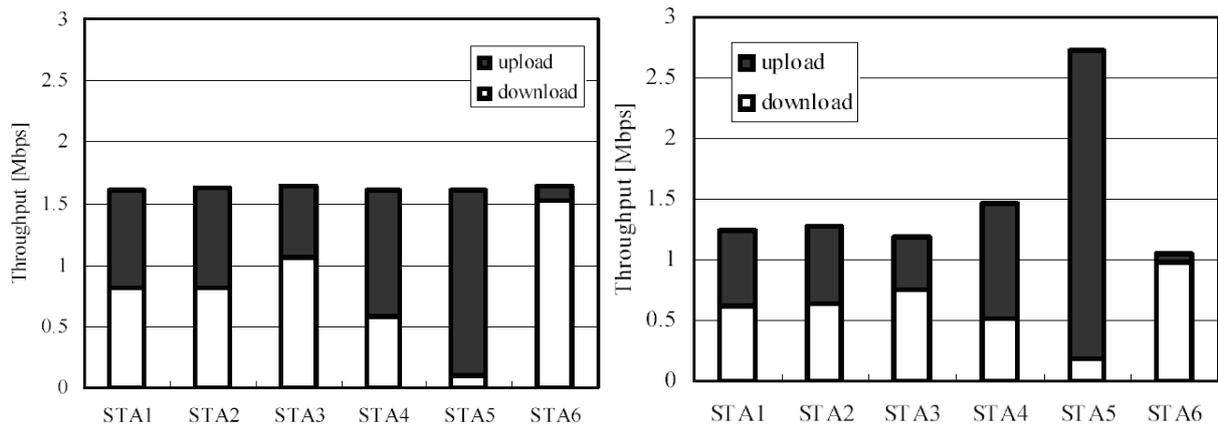


図9 TCPトラフィックの場合のスループット (左:提案方式, 右:DRR)

3 まとめ

NAV の情報を用いてチャネルの利用状況を推定することにより、各端末が自律的に通信品質制御を行うシステムを提案した。提案方式によって、各端末は割り当て帯域幅以下にトラフィック発生量を制御することができる。今後は、基地局でのトラフィック制御方式による品質の改善が必要である。端末と動画配信サーバ間のシグナリングは独自のものを利用したが、RTCPを用い、さらに、通信品質の評価としてQoEを用いる予定である。さらに、TCPフローの帯域幅制御を受信側で実現する方式を提案した。提案方式が輻輳・広告ウィンドウサイズを調整することにより、上下複数のフローが存在するネットワークで下りフローの帯域幅に影響を与えないことを示した。現在までの評価では、提案方式搭載端末は、ネットワーク内に1台しかなかったが、他端末にTCPフローが存在したときにも提案方式が有効なことを示す必要がある。

基地局側でも、UDP、TCPそれぞれのフローにおいて、MAC層情報を用いたクロスレイヤ制御を用いたDRRと動的なC_{Wmin}サイズ制御を用いて端末間の公平性を実現することを示した。また、提案方式の利用により、ネットワーク全体のスループットを落とさずに実現できていることがわかる。今後は、UDPとTCPのフローが混合したネットワーク環境でも、端末間の公平性が実現できるように改善し、評価を行う予定である。さらに、端末ごとに帯域幅を平等に割り当てるだけでなく、端末ごとに重み付けし、それに従った帯域幅制御を行えるような改良を予定している。

無線チャネル利用率の推定にRTSヘッダに記述されるNAV期間を用いたが、隠れ端末問題を解決するRTS/CTSのオプションは、必ずしも用いられるとは限らない。そこで、物理層のフレームの同期をとるプリアンブル部分を分析することにより、無線利用状況を把握する方式を開発した。性能評価は、実機、シミュレーションにより有効性を評価しており、次年度には、本方式を用いてシステムを構築する予定である。

【参考文献】

- [1] Hiroshi Nakashima, Satoshi Ohzahata, Konosuke Kawashima, "A Traffic Control Method with Channel Occupancy Information from MAC Layer in IEEE802.11," Proc. of ICOIN2009, 2009.
- [2] 中島裕, 大坐島智, 川島幸之助, IEEE802.11 における MAC 層の情報を用いた通信品質制御方式の一検討, 情報処理学会 MBL 研究会 MBL46, pp. 59-65, 2008.
- [3] 中島 裕, 大坐島智, 川島幸之助, IEEE 802.11 における MAC 層の情報を用いた動画のための通信制御方式, 信学技報, vol. 109, no. 3, pp. 55-58, 2009.
- [4] 御子柴健吾, 中島裕, 大坐島智, 川島 幸之助, IEEE 802.11 における MAC 層の情報を用いた TCP ウィンドウ制御による通信品質制御方式, 信学技報, vol. 108, no. 342, pp. 7-12, 2008.
- [5] 御子柴健吾, 中島裕, 大坐島智, 川島幸之助, IEEE 802.11 における MAC 層の情報を用いた広告ウィンドウ制御による TCP フロー制御, 信学技報, vol. 108, no. 458, pp. 37-42, 2009.
- [6] 吉岡俊博, 大坐島智, 川島幸之助, IEEE 802.11 における基地局の動的なコンテンションウィンドウ制御による端末ごとの帯域割り当て方式, 信学技報, vol. 109, no. 3, pp. 59-64, 2009.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
A Traffic Control Method with Channel Occupancy Information from MAC Layer in IEEE802.11	Proc. of ICOIN2009	2009年1月
IEEE802.11におけるMAC層の情報を用いた通信品質制御方式の一検討	情報処理学会 MBL研究会 MBL46	2008年9月
IEEE 802.11におけるMAC層の情報を用いた動画のための通信制御方式	信学技報 NS研究会	2009年4月
IEEE 802.11におけるMAC層の情報を用いたTCPウィンドウ制御による通信品質制御方式	信学技報 IN研究会	2008年12月
IEEE 802.11におけるMAC層の情報を用いた広告ウィンドウ制御によるTCPフロー制御	信学技報 IN研究会	2009年3月
IEEE 802.11における基地局の動的なコンテンションウィンドウ制御による端末ごとの帯域割り当て方式	信学技報 NS研究会	2009年4月