

複数の無線基地局を用いた QoS 制御システムにおける 通信チャンネル制御方式

伊藤 淳[†] 水野 邦彦[†] 毛利 公一^{††}

[†]立命館大学大学院理工学研究科 ^{††}立命館大学情報理工学部

無線 LAN では、複数の端末が同一周波数のチャンネルを用いて通信を行うため、その通信品質を保証することは困難となっている。そこで、我々は、複数の無線基地局を用い、さらに適応的に通信チャンネルを切替えることで、QoS 満足度を向上させることを可能とする QoS 制御システムを提案する。本システムでは、基地局がトラフィック状況、帯域予約状況、各端末の接続状況の変動を監視する。それらの値から、端末の要求帯域をどれだけ満たしているかを示す QoS 満足度をコネクション毎に算出する。基地局は、この QoS 満足度の和が最大となるような基地局と端末の組合せを求め、それに応じて端末の接続先基地局を動的に切り替える。

A Communication Channel Control Method in QoS Control System with Multiple Wireless Access Points

ATSUSHI ITO[†] KUNIHICO MIZUNO[†] KOICHI MOURI^{††}

[†]Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

^{††}College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

Guaranteeing QoS is difficult in wireless communication environment because multiple clients share a channel which uses same frequency. To solve this problem, we propose a communication channel control method with multiple wireless access points. In this method, access points watch network's situations, such as traffic, bandwidth reservation and fluctuation of number of flow. A delegated access point collects them and calculates QoS satisfaction of each flow. Furthermore it calculates a better combination of access points and clients to make QoS satisfaction maximum. It directs clients to change access point according to the result if necessary.

1 はじめに

無線 LAN は、その利便性、機器の低価格化、伝送速度の高速化などにより、企業、家庭、学校などへの導入が進んでいる。また、駅、空港、飲食店などのホットスポットにとどまらず、広い範囲をカバーする公衆無線 LAN サービスも利用可能となっている。今後も無線 LAN を利用するユーザ数は増加し、利用頻度も高くなることが予想される。無線 LAN の適用場面も、動画や音声のストリーミング再生、VoWLAN (Voice over Wireless LAN)、ビデオ会議といったマルチメディア通信に広がりを見せようとしている。これらの通信においては、QoS (Quality

of Service) を保証することが不可欠となる。

無線 LAN の通信方式であるインフラストラクチャモードでは、基地局と端末が同一周波数のチャンネルを共有して通信を行う。そのため、1 台の端末がチャンネルを使用している間は、他の端末はチャンネルを利用することが不可能である。よって、端末数が増加するにつれ、チャンネルを利用可能になるまでの待機時間が長くなり、スループットの低下や通信の遅延が発生する。また、端末の位置によって電波品質が異なり、利用可能な帯域が変化する。これらにより、QoS の保証が困難となる。

無線 LAN では、利用可能なチャンネルがあらかじめ

決められており、IEEE802.11b および IEEE802.11g の 2.4GHz 帯では、最大 3 つのチャンネルが同時に利用可能である。また、IEEE802.11a の 5.2GHz 帯と 5.3GHz 帯では、最大 8 つのチャンネルが同時に利用可能である。一般に、無線 LAN で、より多くの端末をより良い通信品質で通信させるために、複数のチャンネルを利用可能とするように複数の基地局を配置することがある。しかし、1 つの基地局に通信が偏るなど必ずしも最適な通信状態とは限らない。

以上の背景から、本論文では、複数の無線基地局を用いた QoS 制御システムを提案する。本システムでは、特定のエリア内に複数の基地局を配置する。さらに、各基地局に 1 枚以上の無線 NIC を装着し、各無線 NIC に他の無線 NIC と干渉しないチャンネルを割り当てる。このとき、複数の基地局と通信可能な端末は、それらの基地局のチャンネルの中から 1 つを選択して使用できる。このような場合に、QoS 満足度を最大となるようなチャンネルと端末の組み合わせを求め、さらに動的に端末の通信チャンネルを切り替える。

最適な組み合わせを求めるために、全基地局の中から、代表となる基地局を 1 台選出し、各基地局のトラフィック状況、帯域予約状況、各端末の接続状況の変動をまとめて監視する。代表基地局は、それらのパラメータから、端末のプロセスが要求する帯域をどれだけ満たしているかという QoS 満足度の総和を算出する。さらに代表基地局が、状況に応じて、端末の接続先基地局を動的に切り替えるように端末に指示をし、端末がそれに基づいて切り替えることで、QoS 満足度をシステム全体で最大化させる。

2 想定環境

本システムは、ホットスポットや教室のように、特定のエリアで多数のユーザが無線 LAN を用いて、インターネットに接続する場合を想定する (図 1 参照)。基地局は、エリア内に複数用意し、通信可能な範囲が重なるように配置する。さらに、互いに干渉しないチャンネルを使用する。また、基地局は、同じ ESSID を用いることで、端末が基地局間を移動するローミング通信を可能とする。基地局同士は、同一セグメント内に存在し、有線 LAN で接続する。

エリア内には、複数のノート PC、PDA などの端末が存在する。各端末は、エリア内の位置によって、接続可能な基地局とその電波状況が変化する。そのため、端末は、接続可能な基地局のチャンネルで通信

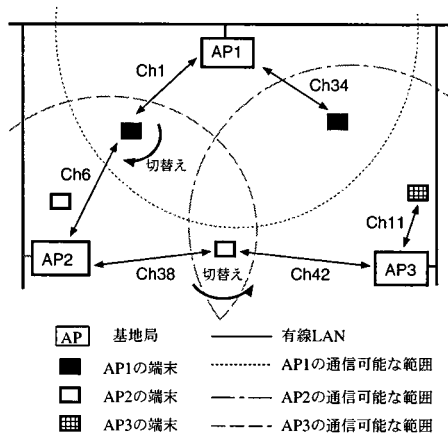


図 1 想定環境

を行う。

3 通信チャンネル制御方式

3.1 概要

本システムでは、QoS に影響を与えるパラメータとして帯域に着目し、帯域要求を満たすことで QoS 満足度が最大になると考える。しかし、帯域は、端末の電波状況や基地局のトラフィック状況に影響を受ける。そこで、全基地局の中から代表となる基地局を 1 台選出し、代表基地局においてこれらの値の変動をまとめて監視し、適応的に QoS 制御を行う。各端末の接続可能な基地局における電波品質から最大通信速度を求め、要求帯域を保証するために必要な割付時間割合を求める。その時間割合の中で、帯域要求を受け入れ可能な基地局において、帯域を予約する。帯域要求が受け入れ不可能の場合は、帯域予約を行っているプロセスが終了し、時間割合を確保できるまでベストエフォートによる通信とする。

3.2 システム要件

本システムにおける基地局と端末のシステム要件を図 2 に示す。

- 帯域予約

各ユーザが利用するアプリケーションのプロセスによって必要とする帯域は異なるため、プロセスごとの要求帯域を接続先となる基地局において予約する必要がある。代表基地局は、要求帯域の予約可能な基地局を選択し、その基地局のバッケットスケジューラに帯域を予約する。基地局において、要求

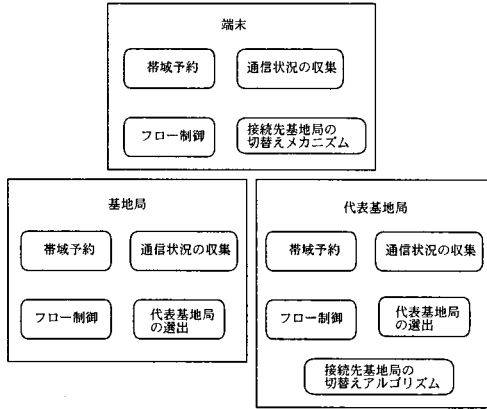


図 2 システム要件

帯域を満たさないプロセスもパケットスケジューラに帯域を予約する。そして、そのプロセスの予約割合は、要求帯域のあるプロセスの予約割合に応じて変動し、ベストエフォートによる通信とする。また、本システムを実装していない端末が接続された場合を考慮し、基地局と通信を行っている全端末のプロセスを監視することで、その端末のプロセスもパケットスケジューラに帯域を予約する。このプロセスの予約割合も変動し、ベストエフォートによる通信とする。

- フロー制御

帯域が変動する中で、予約された帯域を保証する仕組みが必要となる。そのため、基地局と端末の双方のパケットスケジューラで帯域を予約することで、基地局から端末への通信だけでなく、端末から基地局への通信にもフロー制御を行い、予約帯域を保証する。

- 代表基地局の選出

各基地局の情報や各端末の情報をまとめて監視するために、代表となる基地局を選出する必要がある。各基地局に同一セグメントの IP アドレスを割り当て、その IP アドレスが最も大きい基地局が代表基地局とする。

- 通信状況の収集

各基地局と各端末において、フロー制御を行うために、刻々と変化する状況を常に監視する必要がある。基地局は、接続されている全端末の全プロセスが送

受信するパケットを監視し、通信状況を把握する。端末は、端末情報として、全プロセスが送受信するパケットや接続可能な基地局の電波品質を監視し、定期的に基地局へ送信する。そして、各基地局は、基地局自身の情報と各端末情報を代表基地局に送信する。

- 接続先基地局の切替えアルゴリズム

QoS 満足度を最大化させるためには、代表基地局で各端末の電波状況、各基地局のトラフィック状況と予約帯域を考慮して、よりユーザの要求帯域を満たすことのできる可能な基地局と端末の組合せを求める必要がある。端末が接続先を切り替えることで、電波状況、トラフィック状況の改善、予約帯域の分散が可能である。

- 接続先基地局の切替えメカニズム

端末が接続先の基地局を変更する場合、端末は、接続先基地局の切替えアルゴリズムによって選択された基地局に切り替える必要がある。端末は、接続先の基地局の MAC アドレスを設定することで、ローミング通信による切替えを行う。

3.3 QoS 満足度最大化手法

3.2 節で述べたシステム要件のうち、特に、帯域予約と接続先基地局の切替えアルゴリズムにおいて QoS 満足度を最大化する手法を述べる。

代表基地局は、端末の接続可能な基地局の電波品質から、接続先基地局での予約帯域の割付時間割合を求め、予約が可能か判断する。ユーザからの要求帯域を R 、端末の電波品質を Q 、電波品質から求まる最大通信速度を $f(Q)$ 、割付時間割合を C とし、式 1 によって帯域の予約が可能か判断する。各基地局の C の値が 100% を超えない限り、帯域の予約が可能である。

$$C = \frac{R}{f(Q)} \cdot 100 \quad (1)$$

$f(Q)$ は、本論文では、Intel PRO/Wireless 2915ABG で実測した値を用いた。この無線 LAN カードで、IEEE802.11a を使用した際の電波品質と TCP 通信での通信速度の関係を図 3 に示す。図 3 より、電波品質が 100% の場合は、最大約 25Mbps の通信速度が出ることがわかる。また、電波品質が 80% より小さくなると、最大通信速度が著しく低下することがわかる。

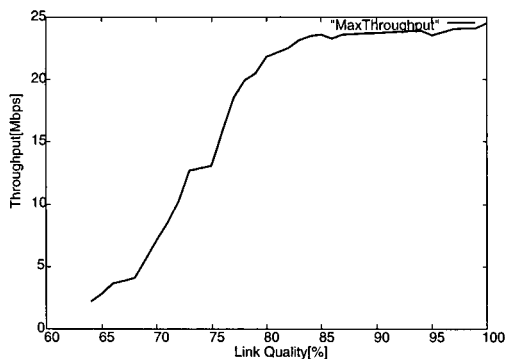


図 3 電波品質と通信速度

例えば、端末の電波品質が 70% であり、要求帯域が 3.5Mbps の場合は、接続先基地局との最大通信速度が 7Mbps となるため、その端末に対する割付時間割合は 50% になる。そのため、この基地局における他の端末に対する割付時間割合は、残り 50% となる。この割付時間割合において、他の端末の電波品質が 100% で、要求帯域が 15Mbps の場合は、接続先基地局との最大通信速度が 25Mbps となるため、その端末に対する割付時間割合が 60% となり、帯域の予約が不可能となる。なお、各基地局ですでに帯域予約があり、要求帯域が受け入れ不可能の場合は、残りの割付時間割合で帯域を予約し、ベストエフォートによる通信とする。また、代表基地局において、要求帯域の受け入れ不可能な端末が発生した場合は、接続先基地局の切替えアルゴリズムを実行する。

接続先基地局の切替えアルゴリズムは、代表基地局において、各端末の通信可能な基地局での電波品質から、各基地局での各端末に必要なとなる割付時間割合を求め、そして、その割付時間割合の合計値が最も大きい基地局の中から割付時間割合の最も小さい端末を選択する。その端末が、割付時間割合の合計値の最も小さい基地局に切り替えた際に、割付時間割合の小さい基地局の合計値が割付時間割合の大きい基地局の合計値を上回らない場合は、端末の接続先基地局の切り替えを行う。そして、端末の接続切替先の基地局に予約帯域を移行させ、端末に対して接続先基地局の切り替えを指示する。これによって、端末の QoS 満足度をシステム全体で最大化させることが可能となる。

本システムにおける帯域要求を行った端末の接続

先基地局が決定する手順を次に示す。

1. 端末で、アプリケーションを起動する。ユーザは、アプリケーションのプロセスごとに帯域要求を行う。その際、端末は、プロセスの情報、要求帯域、端末から接続可能な各基地局の電波品質を送信する。
2. 各基地局は、端末からの情報、基地局自身の通信情報と予約帯域情報を代表基地局に送信する。代表基地局は、各基地局での残りの割付時間割合から要求帯域を満たせる基地局を選択する。代表基地局は、選択された基地局に帯域予約依頼情報を送信する。また、代表基地局は、端末に接続先基地局の MAC アドレスと予約された帯域を通知し、5 の処理を行う。帯域要求を満たせる基地局が選択されない場合は、4 の処理を行う。
3. 代表基地局は、接続先基地局の切替えアルゴリズムを実行し、端末の接続切替先の基地局に予約帯域を移行させ、端末に対して接続先基地局の切替えを指示し、5 の処理を行う。
4. 端末は、接続先基地局の MAC アドレスを設定し、接続先の基地局へローミング通信による切替えを行う。また、端末は、予約された帯域を端末のパケットスケジューラに設定する。
5. 端末の帯域要求アプリケーションは、帯域要求を行っていたプロセスの終了を検知すると、端末情報での帯域要求がなくなる。そのため、基地局は予約帯域を解除する。

4 ソフトウェア構成

4.1 端末のソフトウェア構成

本システムの端末は、OS として、Fedora Core 5 (Linux カーネル 2.6.18) を用いた計算機上に構築した。端末のソフトウェア構成を図 4 に示し、3.2 節で述べた端末におけるシステム要件を実装するための各構成要素を次に述べる。

- Packet Scheduler CL

端末のパケットスケジューラは、フロー制御を行うため、CBQ (Class-based Queueing) を用いる。CBQ では、パケットの IP アドレスやポート番号によってクラスと呼ばれる単位に分類し、クラスごとにパケットをキューイングしながらスループットを監視する。そして、各クラスが占める帯域を調整す

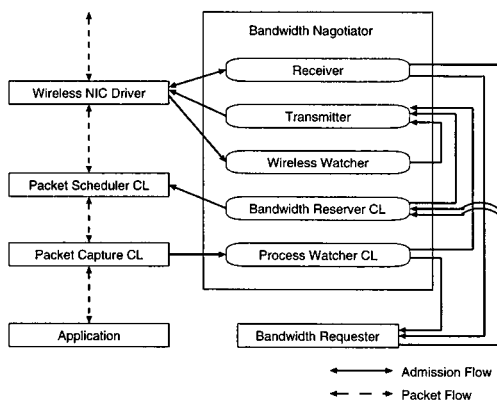


図4 端末のソフトウェア構成

ることが可能である。

- Packet Capture CL

端末のパケットキャプチャは、通信状況を収集するため、IPTraf を改良したものをを用いる。これは、パケットの送信先 IP アドレス、送信元 IP アドレス、送信先ポート番号、送信元ポート番号、パケット長を取得して、プロセス情報取得モジュールに UDP 通信によって送信する。

- Bandwidth Requester

帯域要求受付アプリケーションは、通信を行っているプロセスのポートを lsof パッケージに含まれる lsof コマンドによってアプリケーション名に変換し表示する。そして、ユーザからアプリケーションごとの帯域要求を受け付ける。また、アプリケーションごとのスループットと予約帯域を表示する。

- Bandwidth Negotiator

帯域要求を行うソフトウェアは、次のモジュールによって構成される。

- Process Watcher CL

プロセス情報取得モジュールは、パケットキャプチャから、パケットの送信先 IP アドレス、送信元 IP アドレス、送信先ポート番号、送信元ポート番号、パケット長を受信し、1 秒間ごとのスループットを求める。そして、帯域要求受付アプリケーションにパケットの送信先 IP アドレス、送信元 IP アドレス、送信先ポート番号、

送信元ポート番号、スループットを TCP 通信によって送信する。

- Bandwidth Reserver CL

帯域予約モジュールは、帯域予約を行うため、iproute パッケージに含まれる tc コマンドを用いる。基地局で予約された帯域をパケットスケジューラに tc コマンドを用いて設定する。帯域要求受付アプリケーションからの要求帯域が、端末のパケットスケジューラにおいて、他プロセスの帯域を制限することで受け入れ可能な場合は、端末のパケットスケジューラを設定する。そして、受け入れ不可能な場合は、要求帯域を端末情報送信モジュールに通知する。

- Wireless Watcher

無線情報取得モジュールは、Wireless tools パッケージに含まれる iwlist コマンドを改良したものをを用いる。これは、各基地局の電波品質と MAC アドレスの無線情報を 1 秒ごとに無線 LAN カードのドライバから取得する。

- Transmitter

端末情報送信モジュールは、無線情報取得モジュールからの無線情報、帯域予約モジュールからの帯域要求、プロセス情報取得モジュールからのプロセス情報を 1 秒ごとに TCP 通信によって基地局に送信する。

- Receiver

基地局情報取得モジュールは、接続先基地局の切替メカニズムを行うため、基地局から接続先基地局の MAC アドレス、予約帯域を TCP 通信によって受信する。そして、無線 NIC ドライバに、MAC アドレスを、帯域予約モジュールに予約帯域を通知する。また、帯域要求受付アプリケーションに予約帯域を TCP 通信によって送信する。

- Wireless NIC Driver

無線 LAN カードは、intel 製の Intel PRO/Wireless 2915ABG を使用するため、ドライバとして ipw2200 を用いる。

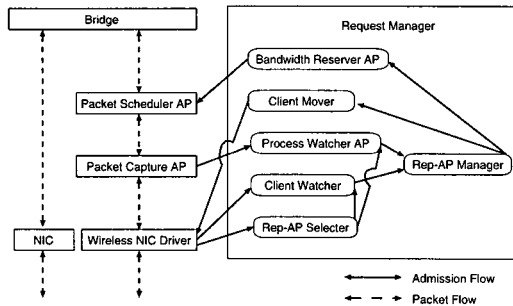


図 5 基地局のソフトウェア構成

4.2 基地局のソフトウェア構成

本システムの基地局でも端末と同様に、Fedora Core 5 (Linux カーネル 2.6.18) を用いた計算機上に構築した。基地局のソフトウェア構成を図 5 に示し、3.2 節で述べた基地局におけるシステム要求を実装するための各構成要素を次に述べる。

- Packet Scheduler AP

基地局のパケットスケジューラは、フロー制御を行うため、CBQ (Class-based Queueing) を用いる。

- Packet Capture AP

基地局のパケットキャプチャは、通信状況を収集するため、IPTraf を改良したものをを用いる。これは、基地局と通信を行っている全端末の全プロセスの送信先 IP アドレス、送信元 IP アドレス、送信先ポート番号、送信元ポート番号、パケット長を取得して、プロセス情報取得モジュールに UDP 通信によって送信する。

- Request Manager

帯域要求の管理ソフトウェアは、次のモジュールによって構成される。

- Bandwidth Reserver AP

帯域予約モジュールは、帯域予約を行うため、iproute に含まれる tc コマンドを用いる。各基地局は、代表基地局からの通知された予約情報をパケットスケジューラに tc コマンドを用いて設定する。

- Process Watcher AP

プロセス情報取得モジュールは、パケットキャプチャから、プロセス情報として、パケットの送信先 IP アドレス、送信元 IP アドレス、送信先ポート番号、送信元ポート番号、パケット長を受信し、1 秒間ごとのスループットを求める。そして、そのプロセス情報を代表基地局に TCP 通信によって送信する。

- Rep-AP Selector

代表基地局選択モジュールは、代表基地局の選出を行うため、各基地局の有線 LAN カードに割り当てた IP アドレスが最も大きい基地局を代表基地局とする。プロセス情報取得モジュールと接続端末情報取得モジュールに代表基地局の IP アドレスを通知する。

- Rep-AP Manager

代表基地局情報管理モジュールは、接続先基地局の切替えアルゴリズムを実施する。帯域要求の予約が可能な基地局を選択した後、端末の接続先基地局と予約帯域を端末移動指示モジュールに通知し、帯域予約モジュールに予約帯域を通知する。

- Client Watcher

接続端末情報取得モジュールは、端末から受け取った情報を代表基地局情報管理モジュールに TCP 通信によって送信する。

- Client Mover

端末移動指示モジュールは、端末に接続先基地局の MAC アドレスと予約帯域を TCP 通信によって送信する。

- Bridge

ブリッジ通信を行うソフトウェアは、Bridge-utils を用いる。これにより、有線 LAN カードと無線 LAN カードをブリッジ通信する。

- Wireless NIC Driver

無線 LAN カードは、NEC 製の WL54AG を使用するため、ドライバとして、MadWifi-NG を用いる。このドライバにより、無線 LAN カードを基地局として利用可能な Master モードに設定する。本システムでは、IEEE802.11a, IEEE802.11g, IEEE802.11b での通信が可能である。

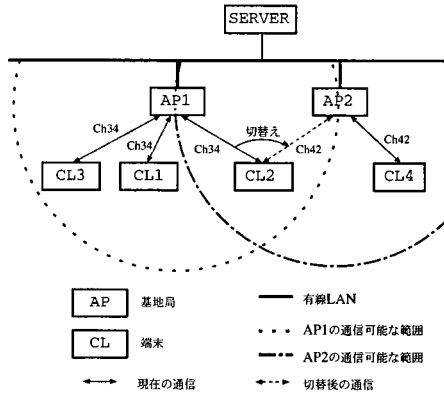


図 6 評価環境

• NIC

有線 LAN カードは, intel 製の Intel PRO/100 を使用するため, ドライバとして e100 を用いる.

5 評価

5.1 評価環境

評価に用いた環境を図 6 に示す. 2 台の基地局 AP1, AP2 とサーバを有線 LAN で接続し, 同一セグメント上に配置する. 各 AP は, IEEE802.11a の無線 NIC を 1 枚装着し, AP1 で 34 チャンネル, AP2 で 42 チャンネルを使用し, 同一の ESSID を用いる. 各端末 CL1, CL2, CL3, CL4 は, 各基地局と通信可能な範囲に配置し, 基地局を介して, サーバから HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) 通信によって 3GB のファイルをダウンロードする.

5.2 性能評価

ベストエフォートによる通信と, 本システムを用いて帯域要求を行った場合の, スループットによる性能評価を行う.

5.2.1 ベストエフォートでのスループット

AP1 に CL1, CL2, CL3 を接続し, AP2 に CL4 が接続を行い, 全ての端末がベストエフォートで通信を行い, 各端末のスループットと経過時間の関係を図 7 に示す.

図 7 より, 端末によってスループットが高い端末と低い端末が存在し, 各端末は均等なスループットにならないことがわかる.

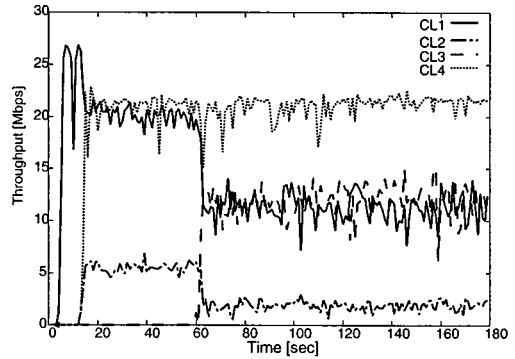


図 7 ベストエフォートでのスループット

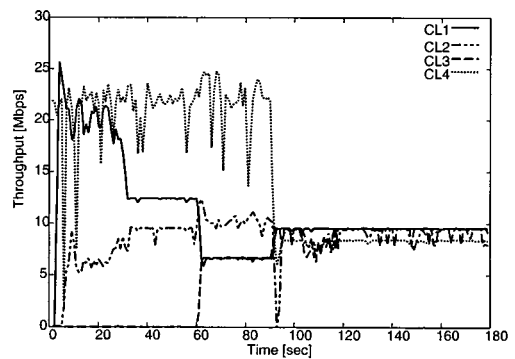


図 8 帯域要求を行った場合のスループット

5.2.2 帯域要求を行った場合のスループット

本システムを用いて, 各端末が状況に応じて帯域要求を行い, 次に示す処理を実行した. このときの各端末のスループットと経過時間の関係を図 8 に示す. 経過時間ごとの処理を次に示す.

1. 時刻 0 から, AP1 に CL1 と CL2, AP2 に CL4 を接続し, ベストエフォートで通信を行う.
2. 時刻 30 で, CL2 は, 10Mbps の帯域要求を行う. そのため, AP1 は CBQ による帯域予約が開始され, CL1 は, 帯域要求を行っていないため, 残りの割付時間割合からベストエフォートによる通信となる.
3. 時刻 60 で, CL3 が AP1 で帯域要求を行わず通信を開始することで, CL1 と CL3 は, 残りの割付時間割合からベストエフォートによる通信となる. そのため, CL1 はさらにスループット

トが低下する。

- 時刻 90 で、CL1 と CL3 が 10Mbps の帯域要求を行う。しかし、AP1 の残り割付時間割合では、要求が受け入れられないため、他の基地局と通信可能な CL2 を AP2 にローミング通信により切り替える。CL2 の AP2 に対する電波品質は 75%であったため、最大通信速度は 13Mbps となり、割付時間割合は、76%となる。これにより、AP2 は CBQ による帯域予約が開始され、CL4 は残りの割付時間割合からベストエフォートの通信となる。

5.3 考察

性能評価では、本システムを用いることで、帯域要求が満たされず、かつ通信資源がある場合に、端末と基地局の組合せを動的に切り替え、帯域を割り当てることが可能であることを示した。その際、切替えにかかる時間は 1 秒未満であった。また、端末の接続先基地局を切り替えたことで、切替え元の基地局において、新たな帯域要求を受け、帯域保証が可能となる。

6 関連研究

複数の端末に対して複数の基地局を用いて高速な通信の実現を目指したシステムに無線 LAN 統合アクセスシステム [1] がある。このシステムでは、基地局が電波到達範囲の狭い指向性の強いアンテナを用いて、密に基地局を配置することで、基地局当たりの端末数を軽減し、スループットの向上を実現している。また、基地局から端末への通信と、端末から基地局への通信のタイミングを適切にスケジューリングすることで、通信の衝突を軽減している。さらに、ACK などのパケットをまとめ、端末から基地局への通信を軽減し、高速化を実現している。このシステムは、基地局を複数利用している点、パケットをスケジューリングする点など、関連する点が多い。ただし、本システムでは、動的に基地局と端末の組合せを変更し、システム全体としての QoS を向上させる点で新たな試みである。

また、QoS 満足度の向上を目指した方式として文献 [2] がある。この方式では、QoS 満足度の向上のために、入札の仕組みを取り入れている。全ての通信には対価が必要であり、より高い対価を支払う通信が優先的に帯域予約できる。これにより、ユーザは、通信の優先度をシステムに対して明示すること

ができる。QoS 満足度の向上を目指している点では同様であるが、本システムでは、複数の基地局間での協調と、基地局と端末間での協調によって、利用可能な通信のための資源がある限り、それを有効活用することを目的としている。ただし、資源が不足し、QoS 交渉が必要になった場合には文献 [2] の方式を利用できる。

7 まとめ

本論文では、複数の基地局を用いた QoS 制御システムについて述べた。本システムでは、複数の基地局を用い、端末の帯域要求を受け入れ可能な基地局を割り当てることで、帯域を保証する。また、基地局間での協調や、基地局と端末間での協調によって、利用可能なチャネルを有効に活用する。これにより、要求が受け入れられる端末数が増し、QoS 満足度の向上を実現する。

現在、帯域要求を先に行った端末から予約するため、後から接続してきた端末に対しては、要求が受け入れ不可能となる。また、帯域要求を行わない通信は、ベストエフォートによる通信となるため、帯域要求を行った通信の割付時間割合に応じて、スループットに影響を受ける可能性がある。これらの課題について、今後解決する予定である。

参考文献

- [1] 矢野 隆, 玉木 剛, 萩野 敦, 石藤 智昭, 加藤 猛: 無線 LAN 統合アクセスシステム (1)–(5), 電子情報通信学会ソサエティ大会, pp. 483–487, 2002.
- [2] S. H. Shah, K. Nahrstedt: Price-based channel time allocation in wireless LANs, Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW '04), pp. 511–517, 2004.