

## 最低帯域保証のための適応スケジューリングアルゴリズム

## Adaptive Schedule Algorithm for Minimum Bandwidth Guaranteed Service

青木 健\*

田邊 造\*

川端 信吾†

松江 英明\*

Ken AOKI

Nari TANABE

Shingo KAWABATA

Hideaki MATSUE

## 1 はじめに

近年、映像や音声などを用いたアプリケーションの利用する機会が多くなっている。これらアプリケーションは、一定の通信品質が保証された元で動作するため、要求された通信品質を確保できる通信品質保証手法が求められる。

通信品質保証を行う際、映像や音声などを利用する端末が移動端末であるとき、通信経路が変化するためアプリケーションの要求する通信品質を厳密に保証することはかえって帯域利用効率の低下を招く場合がある [1]。この問題に対し吉村らは、まずアプリケーションの動作を確保するための最低帯域を保証し、その後チャンネルの状態が良いフローに残余帯域を割り当てる通信品質保証手法を提案している [1]。これによりアプリケーションの動作を着実に保証しつつ、移動端末チャンネルの状態が悪化した場合でもチャンネルの状態が良好になるまで必要以上の帯域割り当てを避けており、ネットワーク全体への負荷を減らし効率的な帯域利用が可能である。

しかし、従来手法では最低帯域を保証するための CFP が固定であるため、時変であるトラフィックの流量やフロー数に対して適応できない場合が考えられる。この問題に対して、提案 (a) はバッファ量を考慮した CFP の設定を行うことにより帯域利用の効率化を図っている。また、提案 (a)+(b) は提案 (a) を行った後の残余帯域に EDCA(Enhanced Distributed Channel Access) を用いることで、優先度の高いフローから残余帯域の優先的利用を行い、厳密な通信品質保証の提供を図っている。

本論文では、以上提案 (a) および (a)+(b) を用いることにより安定した通信品質サービスを提供することを目的としたトラフィックの流量変動に対応可能な適応スケジューリングアルゴリズムを実現している。

## 2 従来手法 [1]

無線環境において単にパラメータ保証型 QoS を求めることは、効率低下をまねく可能性も考えられることから、その導入は困難である [1]。この問題に対し、吉村らは Guaranteed Scheduler[2] と CSDP Scheduler(Cannel State Dependent Packet)[3] を用いた無線環境向けの通信品質手法を提案している。以下に各スケジューラについて述べる。

## 2.1 Guaranteed Scheduler

Guaranteed Scheduler は、ネットワークに存在する各フローについて最低帯域を保証するために次のパケットを送信しなければならない時間である  $start\_time$  というパラメータを用いて送信スケジューリングを行う。このスケジューリング

\* 諏訪東京理科大学

† 情報工房

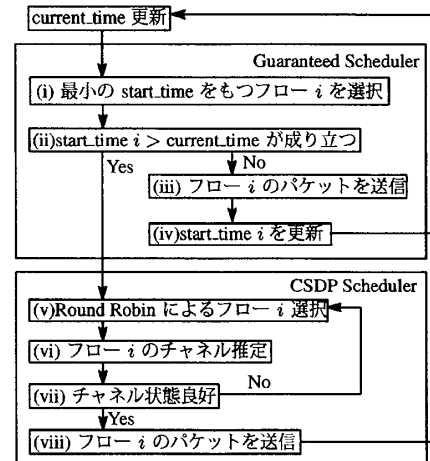


図 1: 従来手法スケジューラ構成

は、PCF 期間である CFP(Contention Free Period) に行われる。以下図 1 を用い Guaranteed Scheduler の動作説明を行う。

まず、図 1(i) においてフローの中で最小の  $start\_time$  を持つフローを選択する。次に、選択されたフローは (ii) において  $start\_time > current\_time$  が満たされているかチェックされる。(ii) が満たされている場合、選択されたフローの最低帯域は保証されているため、続いて他のフローの最低帯域のチェックが行われる。(ii) が満たされていない場合、選択されたフローの最低帯域は保証されていないため、(iii) において選択されているフローの送信スケジューリングが行われる。最後に (iii) で送信スケジューリングが行われたフローは、(iv) において  $start\_time$  を以下の式 (1) により更新される。

$$start\_time \leftarrow start\_time + data\_length / b_{min} \quad (1)$$

ただし、 $data\_length$  は送信を行ったパケット長を示し、 $b_{min}$  は送信スケジューリングされたフローの最低帯域である。また、フローに送信すべきデータが存在しない場合は、以下の式 (2) を用い更新が行われる。

$$start\_time \leftarrow \max(current\_time, start\_time) \quad (2)$$

ただし、 $\max(current\_time, start\_time)$  は、現在時刻よりも大きな値とする、フローにデータが存在しない場合  $start\_time$  の値は  $current\_time$  よりも大きな値で更新されることになる。

このように、Guaranteed Scheduler は最低帯域を満たすためにデータを送信しなければならない時刻である  $start\_time$  を  $current\_time$  の値よりも大きい状態を維持するように送信スケジューリングを行うことで最低帯域保証を行う。

2.2 CSDP Scheduler

CSDP Schedulerによる送信スケジューリング手順は図1(v)から開始される。まず、送信を開始するフローがRound Robin[4]に基づき選択される。次に、(vi)において選択されたフローはチャンネル推定を行われ、(vii)でチャンネルの状態にあわせ処理がされる。チャンネル状態が良い場合はそのフローの packets を(viii)において送信し、チャンネル状態が悪い場合は再度(v)においてフローの選択が行われる。以上のスケジューリングは、DCF期間であるCP(Contention Period)に行われる。このように、CSDP SchedulerはGuaranteed Schedulerによって最低帯域が保証された後の残余帯域を利用し、チャンネル状態の良いフローへのみ無線資源の割り当てを行う。

以上のように従来手法は、最低帯域を着実に保証した後、残余帯域を状態のよいフローから順に使用するため、通信品質を保証しつつネットワークの状態に合わせた帯域利用が可能である。しかしながら、従来手法は最低帯域を保証するためのCFPが固定長なため、受付フローの増減などネットワークの状態の変化に対し即座に適応できない場合が考えられる。この問題に対し、次章ではネットワーク状態変動に対して適応できるようなスケジューラの提案を行う。

3 提案手法

本論文では、変動するネットワーク負荷に適応するために、以下の2つの提案を実行する。図2に提案(a), (b)の詳細とともに提案手法のスケジューリング手順を示す。

提案(a)バッファ量を考慮したCFPの設定

ネットワーク上のトラフィックの流量やサービスクラスに応じたフロー数は時変である。このようなネットワークの状態に適応するためには、トラフィック流量を考慮して送信スケジューリングを行う必要がある。提案(a)では、最低帯域を保証するための期間であるCFPを、固定長ではなくバッファの状況を元に最低帯域を保証できるだけの時間に設定する。これにより、より多くの残余帯域を確保でき、基地局への上りトラフィック送信機会を増加させる効果を期待できる。

また、ネットワークに入力されるトラフィックがオンオフトラフィックの場合、動的にCFPを設定することで固定長のCFPを用いるよりもネットワークに対応できることは明らかである。

$n$  回目の  $CFP_n$  は、以下のように設定を行う。

$$CFP_n = (No\_Guaranteed\_PacketsSend\_time) \quad (3)$$

ただし、 $No\_Guaranteed\_PacketsSend\_time$  は、最低帯域を満たしていないパケットの送信にかかる時間を示している。このように  $CFP_n$  は、最低帯域が保証されていない全てのフローの packets を送信するための時刻に設定する。

しかしながら、式(3)による  $CFP_n$  の決定方法では、特定のフローにおいて最低帯域が保証されていないパケットがバースト的に発生した場合、最低帯域が保証されるまでの間、特定フローの送信のみ連続的にスケジューリングを行ってしまう。これは、最低帯域の値を通常よりも大きく設定されたフローが存在する場合のみ起こる問題である。このようなフローに対して最低帯域保証を行うと、帯域を独占的に割り当てなければならず、他のフローの最低帯域保証ができないことが容易に予想される。本論文では、このような状況を避けるためにCFPには上限値を設けるとする。

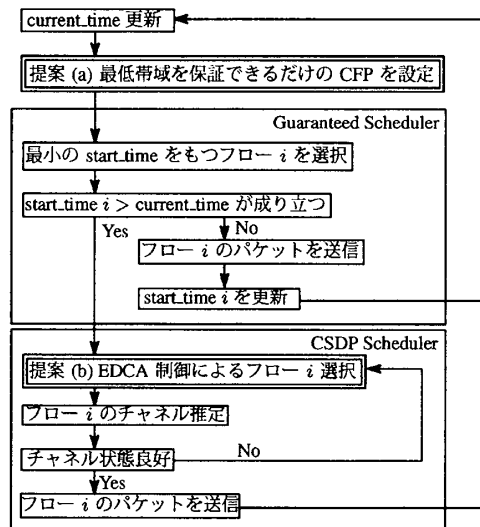


図2: 提案手法スケジューラ構成

以上のように、CFPはPCF開始前に最低帯域を保証できるだけの長さに設定され、この期間中Guaranteed Schedulerにより最低帯域保証するための送信スケジューリングが行われる。

提案(a)+(b) 残余帯域EDCA

提案(a)+(b)では、提案(a)により最低帯域が満たされた後の残余帯域にIEEE802.11eにより規定されているEDCAを用いる[5]。なぜならEDCAは、チャンネル獲得のパラメータに差異を設けているため、優先度の高いトラフィックがより多くの送信機会を得るが、優先度の低いトラフィックの送信機会は減少し、優先度上位フローによる優先度下位フローへの送信頻度抑圧の問題が発生してしまう。

しかしながら、提案(a)+(b)ではEDCAが行われるCSDP Schedulerに移行する前に既にアプリケーションの動作はGuaranteed Schedulerによって保証されているおり、優先度上位フローから優先度下位フローへの送信抑圧の影響は少ない。つまり、残余帯域では全てのアプリケーションの動作を保証された上での厳密な通信品質保証を行うこと可能であり有効である。

また、式(3)のCFP設定を行う場合、最低帯域を満たすために非常に少ないパケットを送信するようなPCFが連続的に起動する状況が考えられる。このような少ないパケットを送信するために短い間隔でPCFに連続的に移行することは、制御パケット量の増加などから非常に効率が悪い。

表1: 使用パラメータ 表2: 各フローの設定

Bit Rate	2Mbit/s		最低帯域	割り当て	状態
Packet Size	1024Byte		(kbit/s)	AC	
ACK Size	14Byte	Flow1	100	BE	down
SIFS	9μ	Flow2	200	BE	down
PIFS	16μ	Flow3	300	VO	down
DIFS	32μ	Flow4	400	VO	down
CW <sub>min</sub>	15	Flow5	-	BE	up
データ発生量	無限	Flow6	-	BE	up

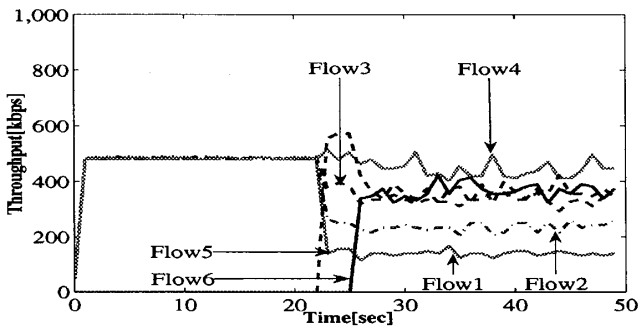


図3: 従来手法 (CFP=10msec)

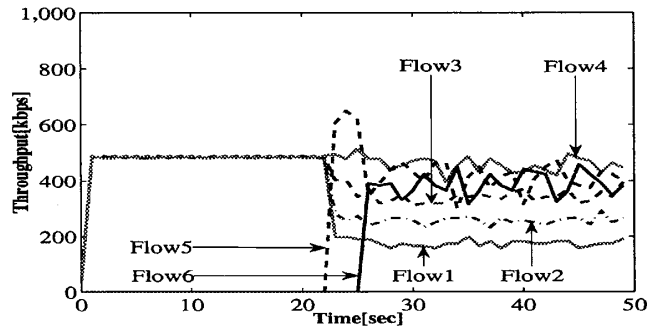


図5: 提案 (a)

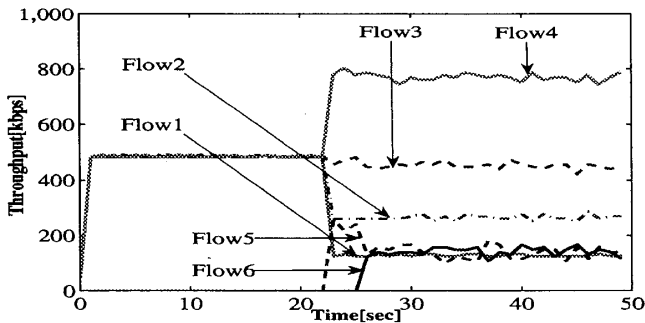


図4: 従来手法 (CFP=50msec)

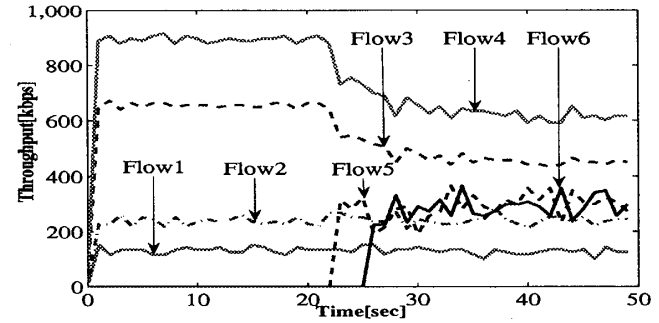


図6: 提案 (a)+(b)

この問題に対して、提案 (a)+(b) は有効である。なぜなら EDCA を用いているため優先度上位フローに対し多く送信権を与えることが可能であるからである。これにより送信要求間隔の短い優先度上位フローの *start\_time* の更新は頻繁に行われる。つまり、優先度上位フローの最低帯域を保証するために起こる連続的な PCF への移行回数が残余帯域に DCF を用いる従来手法よりも減少すると考えられる。

一方で、優先度下位フローの送信回数が減少するため、優先度下位フローの最低帯域を保証するための Guaranteed Scheduler が起動するケースが増加する可能性がある。しかしながら、送信要求間隔は優先度上位フローに比べ優先度下位フローのほうが長いことから結果的に少量の packets を送信するため、連続的に PCF に移行するような送信スケジューリングを回避できると期待される。

また、提案手法では優先度の低いトラフィックを Guaranteed Scheduler 中にサービスが終了するように最低帯域の設定を行うことで、残余帯域 EDCA においてチャンネル競合するフロー数を減らすことが可能である。これにより、優先度上位フローは EDCA 中連続的に送信する機会を得ることができ、優先度上位フローの遅延を抑える効果も期待できる。

以上のように、提案 (a)+(b) では、最低帯域が保証された後の各フローに対して厳密な通信品質の保証を目的とし残余帯域に EDCA を用いる。これにより、優先度の高いマルチメディアトラフィックの遅延変動などがさらに抑制される効果が期待でき、安定した通信品質を提供可能である。

## 4 計算機シミュレーション

### 4.1 シミュレーション条件

本節では、シミュレーション条件について述べる。表1にシミュレーションで使用するパラメータを示す。また、表2に各フローの詳細および残余帯域で使用する EDCA において各フローに割り当てる AC を示す。ただし、up はアップリ

ックフロー、down はダウンリンクフローを示している。

ネットワーク環境は、スケジューラ機能を有する基地局と2台の移動端末で構成される。フローは6種存在し、Flow5 および Flow6 は外部のセルからハンドオフしてくるアップリンクフローの移動端末である。また、Flow5 はシミュレーション開始 23 秒後から、Flow6 は開始 26 秒後からデータの送受信を行う。データロス送信タイミング一致によるパケット衝突の場合のみ発生し、チャンネル状態の悪化によるデータの誤りは起こらないとする。

また、より詳細なスケジューリングを行うため WFQ (Weighted Fair Queueing) [6] を用いることも有効であるが、本論では残余帯域に EDCA を用いた状態での帯域利用効率に関する比較を中心に行うため、キューイングは AC (Access Category) 別に FIFO (First-in First-out) を用いる。

### 4.2 シミュレーション評価

#### 4.2.1 スケジューリング結果考察

適応的に CFP を設定した効果を比較するために、従来手法は CFP を 10msec と 50msec に設定した場合について、提案手法は提案 (a) および提案 (a)+(b) の各々についてシミュレーションを行う。

図3に従来手法 CFP を 10msec としたときのスループットの時間変動を示す。ハンドオフ端末が現れ CSMA/CA によるチャンネル競合が開始される 23 秒以降、ダウンリンクフローで使用されていた帯域が一部アップリンクフローに割り当てられることによりダウンリンクフローのスループットが低下している。しかし 23 秒以降も全てのフローにおいて最低帯域が満たされていることがわかる。

次に、図4に従来手法 CFP を 50msec としたときのスループットの時間変動を示す。アップリンクフローが現れる 23 秒以降も各フローの最低帯域は満たされている。ただし図3とは異なり、23 秒以降最低帯域の保証値が高い Flow4 のスループットはハンドオフ端末が現れる 23 秒以前よりも上がって

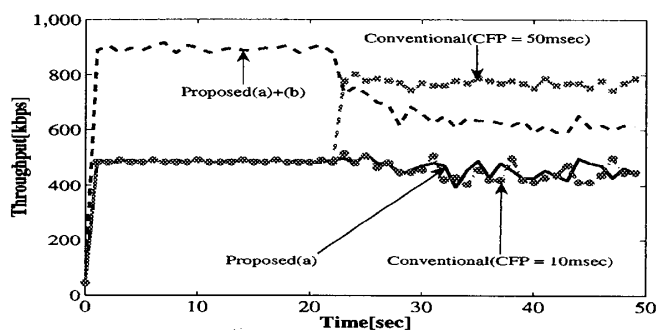


図7: ダウンリンクフロー流量比較

しまっている。これは、必要以上の CFP 設定が行われたため最低帯域値の高いフローが連続的に送信スケジューリングされ、帯域の大部分を占有してしまったためである。

これに対し、提案 (a) を用いた結果である図 5 は最低帯域を保証できるだけの CFP の設定を行うため最低帯域値の高い Flow4 のみに過度に帯域を割り当てるような状態を避けている。また、これにより図 4 の場合よりも残余帯域を多く確保できている。一方、図 3 と図 5 のダウンリンクフローのスループットについては、大きな変化は見られない。これは CFP が 10msec の場合、一部のフローが帯域を占有してしまうほどの CFP ではなく、帯域の占有が起らないためである。しかしながら、短い CFP では複数のフローの最低帯域保証を同時に行えない場合が考えられる。一方、提案 (a) では、CFP が可変長であるため最低帯域を保証可能なフロー数も可変である。以上の点で、提案手法のほうがネットワーク状態に対してより適応的であるといえる。

最後に、提案 (a)+(b) のスループットの時間変動を図 6 に示す。図 6 は、図 3、4 に比べ、最低帯域値の高いフローに対してより多く残余帯域の割り当てを行っている。一方、最低帯域の低いフローに対しては必要最低限の帯域のみ割り当てている。最低帯域保証値の大きい Flow4 についての比較を行ったものが図 7 である。チャンネル競合が起こる 23 秒以降において、Flow4 のスループットの低下は他のスケジューラよりも少ないことがわかる。このように、残余帯域に EDCA を用いたことにより最低帯域を満たした状態で優先度上位フローから順に残余帯域を利用することができ、最低帯域保証後厳密に通信品質保証を行う場合の優先制御として有効である。

#### 4.2.2 アップリンク受付量

図 8 に各シミュレーションにおけるアップリンクフローのスループット合計値の時間変動結果を示す。全てのスケジューラの中で、提案 (a) が最もアップリンクフローを受付けている。これは、CFP が最低帯域を満たすための最短時間に設定されていることから、最低帯域の保証に用いる帯域の利用効率がよくなったためである。

提案 (a) と従来手法 CFP が 10msec である場合の結果比較では、ダウンリンクフローのスループットにおいて大きな差は見られなかったものの、図 8 のアップリンクフローの結果では、CFP の設定を適切な値にしたことでアップリンクフローのための残余帯域をより多く確保できていることがわかる。

次に、提案 (a)+(b) におけるアップリンクフローの受付量は、提案 (a) や従来手法 CFP が 10msec の場合よりも低下している。これは、ダウンリンクフローにのみ EDCA による優先制御が行われたためである。しかしながら、図 6 の全体のスループット特性から、残余帯域に EDCA を用いることで優

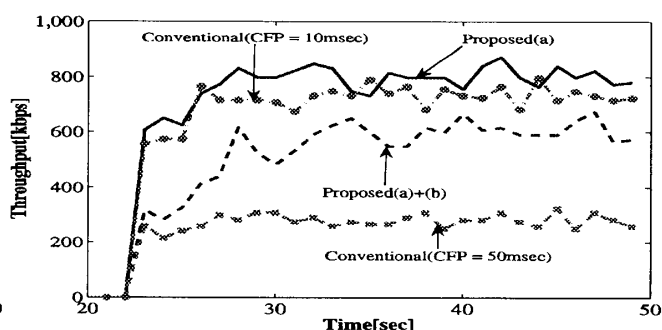


図8: アップリンクフロー流量比較

先度上位フローから順に残余帯域が利用可能になることがわかる。したがって、アップリンクフローの受付量を増やしたい場合、アップリンクフローに割り当てる AC の優先度を高くすることで、よりよいスループットが得られることは明らかである。このように、最低帯域保証後の残余帯域に EDCA を用いた場合、必要に応じアップリンクに割り当てる AC の優先度を上げることでアップリンクフローの受付量を調整することが可能となる。

以上のことから、4.2.1 では提案 (a) を用いることで最低帯域を損なうことなく残余帯域をより多く確保できることがわかる。さらに、提案 (a)+(b) を用いることで優先度上位フローから順に厳密に通信品質保証を行う場合に有効であることが明らかである。また、4.2.2 では提案 (a) を用いることでアップリンクフロー受付量を増加させることがわかる。さらに、提案 (a)+(b) を用いることで割り当てる AC によってアップリンクフローの受付量を調整可能であることについても明らかである。

#### 5 まとめ

本論では、無線 LAN 上で安定した通信品質保証サービスを提供可能な適応型サービスについて、提案 (a) では、最低帯域を保証を損なうことなく CFP が固定時よりもアップリンクフロー受付量を増加可能であることを明らかにした。また、提案 (a)+(b) では、優先度上位フローの遅延を抑制し、かつアップリンクフローの受付量を調整することが可能であることも明らかにした。以上より、提案手法は実環境のトラフィック変動に対して有効な手法といえる。

#### 参考文献

- [1] 吉村 健, 鄭 武龍, 森川博之, 青山友紀, “無線 LAN におけるマルチメディアスケジューリング手法,” 信学技報, RCS98-70, pp. 79-84, 1998.
- [2] S. Shenker, C. Partridge, and R. Guerin. Specification of Guaranteed Quality of Service. IETF Request for Comments (RFC)2212, 1997.
- [3] J. Wroclawski. Specification of the Controlled-Load Network Element Service. IETF Request for Comments(RFC)2211, 1997.
- [4] P. Bhagwat, P. Bhattacharya, A. Krishna, and S. Tripathi. Enhancing throughput over wireless LANs using Channel State Dependent Packet Scheduling. In *Proc. of Infocom '96*, 1996.
- [5] IEEE 802.11e draft/D4.1, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service(QoS)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003.
- [6] Christine Fragouli, Vijay Sivaraman, and Mani Srivastava. Controlled Multimedia Wireless Link Sharing via Enhanced Class-Based Queueing with Channel-State-Dependent Packet Scheduling. In *Proc. of Infocom '98*, 1998.
- [7] 守倉 正博, 久保田 周治, 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス, Feb. 2006.