

All-IP モバイル網アーキテクチャの提案(3) — 基地局における QoS 保証パケットスケジューラの検討 —

小野 真裕[†] 松永 泰彦[†] 百名 盛久[†] 岡ノ上 和広[†]

[†] NEC ネットワーキング研究所 〒216-8555 神奈川県川崎市宮前区宮崎 4-1-1

E-mail: [†] {m-ono@cb, y-matsunaga@bl, m-momona@ce, okanou@ct}.jp.nec.com

あらまし 次世代の All-IP モバイル網では、多様なデータサービスに対して QoS を保証するとともに、希少な無線リソースを有効に制御してシステム容量を最大化することが求められる。特に無線環境では、リンク品質がユーザ毎に異なり、且つ動的に変化するため、リンク品質にあわせてパケットの送信方法や送信順序を制御するパケットスケジューラが QoS やシステム容量を左右する。しかしながら、従来のパケットスケジューラでは、QoS 保証とシステム容量の最大化を同時に考慮しておらず両立できていなかった。本稿では、リンク品質及び要求されるサービス品質に基づき適応的に送信機会の割当を制御することにより、上記の 2 つの要求を満たす基地局パケットスケジューラを提案する。また、無線リンクとして 3GPP Release 5 の HSDPA(High-Speed Downlink Packet Access)を想定した場合の提案方式の効果をシミュレーションにより検証した。その結果、提案方式では従来の QoS 保証を行う QRR(Quasi-Round Robin)方式に比較してシステム容量を最大 80% 程度の改善が得られることがわかった。

キーワード 3G、HSDPA、QoS、スケジューリング

A Proposal of All-IP Mobile Wireless Network Architecture (3)

— QoS Packet Scheduler for Base Stations —

Masahiro ONO[†] Yasuhiko MATSUNAGA[†] Morihisa MOMONA[†] Kazuhiro OKANOUE[†]

[†] Networking Research Laboratories, NEC Corporation

4-1-1 Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki, Kanagawa, 216-8555 Japan

E-mail: [†] {m-ono@cb, y-matsunaga@bl, m-momona@ce, okanou@ct}.jp.nec.com

Abstract In the next-generation All-IP mobile network, it is required to maximize the system capacity as well as to guarantee QoS for various data services by controlling radio resources effectively. In wireless environment, link quality differs from one user to another and changes very rapidly, causing the QoS and the system capacity dependent on the link adaptation method and transmission order controlled by the packet scheduler. However, conventional packet schedulers treated the QoS guarantee and the maximization of the system capacity separately and did not achieve both of them. This paper proposes a packet scheduler that satisfies both of the two requirements, by adaptively allocating time-slots according to the wireless link quality and required QoS level. We evaluate the effectiveness of the proposed packet scheduler by computer simulation, assuming the high-speed downlink packet access (HSDPA) defined in the 3GPP Release 5 specifications as a wireless link. It is confirmed that the proposed packet scheduler can increase the system throughput by 80% compared with the conventional QRR (Quasi-Round Robin) packet scheduler.

Keyword 3G, HSDPA, QoS, Scheduling

1. はじめに

筆者らは IP トラフィックと親和性の高い次世代 All-IP モバイル網のアーキテクチャの研究[1][2]を行っている。一般にモバイル網では利用可能な無線周波数資源が希少であるため、次世代の All-IP モバイル網においても無線区間のシステム容量の最大化は重要な課題である。また、既存の回線交換サービスや、TCP/IP 上の各種サービスを収容するためには、多様なトラフィックに応じた QoS (Quality of Service) 制御が必要である。広帯域で安価な有線のアクセス回線やバックボ

ーン回線が急速に普及しつつある現在では、End-to-End の QoS 制御に向けた傾向が強まる中、今後、無線基地局(BTS: Base Station Transceiver)ー移動端末(MT: Mobile Terminal)間の無線リンクがボトルネックとなる可能性が高い。従って、実質的に無線基地局におけるパケットスケジューリングの方法が、ユーザに提供する QoS やシステム容量に大きく影響を及ぼすことになる。

無線リンクの品質は MT 毎に異なり、かつ動的に変化することから、無線基地局ではこれに追従した適応

的なパケットスケジューリングが求められる。従来のモバイル網では、個別チャネルを用いて MT 毎に閉ループの高速送信電力制御をおこない、リンク品質の変動を補償することによって QoS 保証を実現していた。しかし、バースト的に発生する IP トラフィックに対しては、制御に時間を要する閉ループの高速送信電力制御は必ずしも有効ではなく、無線リソースの効率的な割り当ても難しい。これに対し、最近では IP トラフィックとより親和性の高い無線アクセス方式として、広帯域な下り共有チャネルを用いて、送信電力制御はおこなわず、パケット単位で変調方式や符号化方式を動的に変更する High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA)[3]や High-Speed Data Rate (HDR)[4]が標準化されている。しかし従来、これらの共有チャネルを用いたパケット通信では、QoS 保証にのみ着目しシステム容量を考慮しない方式[3]、あるいは QoS 保証を考慮せずにシステム容量を最大化する方法[5][6]しかなく、QoS 保証とシステム容量の最大化を統合的に考慮した検討がなされていなかった。

そこで、本稿では、特に無線基地局におけるパケットスケジューリングの技術に着目し、QoS を保証しつつシステム容量を最大化するスケジューラを提案する。また、3GPP (3rd Generation Partnership Project) Release 5 の HSDPA を想定した場合の提案方式の効果をシミュレーションにより検証し、従来方式との比較をおこなったので報告する。

2. 無線基地局パケットスケジューラの課題

無線基地局は、MT や上流のアクセスルータ(AR)からシグナリングによって QoS 保証要求を受け、この要求を満たすようにパケットのスケジューリングをおこなう[2]。また、無線基地局では、変動する無線リンク品質に応じて変調方式や符号化方式(MCS: Modulation and Coding Scheme)等を適応的に制御し、ユーザへパケットを送信するタイミングを決定する。

従来の無線基地局におけるパケットスケジューリング方式としては、主に

- QoS として最低帯域の保証を目的とするもの
- システム容量の最大化を目的とするもの
- MT 間の送信機会割り当ての公平性を目的とするもの

の3種類に分類できる。以下では、これらの3方式の概要と課題について説明する。

2.1. 最低帯域の保証を目的としたパケットスケジューラ

QoS として最低帯域の保証を目的としたスケジューラとしては、Quasi-Round Robin (以下、QRR 方式)が

ある[6]。QRR 方式は、まず QoS を保証すべき MT に対しては、QoS を満足するように送信機会を優先的に割り当てる。その他の余剰帯域は QoS を保証しなくても良い MT を含め、すべての MT に対して均等に RR (Round Robin) 方式で割り当てる。そのため、MT 間の公平性に優れる一方、必ずしも無線リンク品質が良くない MT に対しても一律に帯域を割り当ててしまうため、システム容量が低く抑えられてしまうという問題がある。

2.2. システム容量の最大化を目的としたパケットスケジューラ

システム容量の最大化を目的としたパケットスケジューラとしては、Maximum CIR (Carrier-to-Interference power Ratio) 方式[3] (以下、Max C/I 方式)がある。Max C/I 方式では、無線リンク品質が良い MT ほど優先して送信機会を割り当てる。無線リンク品質の尺度としては、パイロットチャネルの測定によって得られる CIR 等を使用する。無線リンク品質が良い MT に対しては、多値変調や冗長度の低い符号化方式を適用することにより、単位時間あたりのデータ転送レートを高めてシステム容量を最大化することができる。しかし、この方式では MT から要求された QoS に対する考慮がなされないため、QoS が保証できなかった。また、無線リンク品質の劣る MT には継続して送信機会が与えられない問題もある。

2.3. MT 間の送信機会割り当ての公平性を目的とするパケットスケジューラ

MT 間の送信機会割り当ての公平性を目的とするパケットスケジューラとしては、Proportional Fairness (PF) 方式[5]がある。PF 方式では、(瞬時無線リンク品質) / (平均無線リンク品質)等をメトリックとして使用し、メトリックが大きい MT ほど優先して送信機会を割り当てる。これにより MT の無線リンク品質に追従し、品質が良い瞬間を選択して送信機会を割り当てられる事になる。MT 間で送信機会を公平にする条件では、無線リンク品質に関係なく送信機会が割り当てられる QRR 方式に比べ、システム容量を増加できる。Max C/I 方式に比べるとシステム容量は劣化するが、無線リンク品質の劣る MT に継続して送信機会が割り当てられない問題は発生しない。

しかし、この方式では、Max C/I 方式と同様に QoS が保証できないという問題がある。QoS 保証については、基準レートを閾値として優先度に重みをつけたスケジューラも提案されている[6]が厳密な QoS 保証は提供されていない。

以上述べたように、現在の無線基地局におけるパケットスケジューラでは、QoSを保証できるもののシステム容量が低く抑えられてしまう(QRR方式)か、公平性を考慮しない場合にシステム容量を最大化できるがQoSを保証できない(Max C/I方式)か、各MTに送信機会を公平に割り当てる条件下でシステム容量を最大化できるがQoSを保証できない(PF方式)という問題がある。以上の課題は、QoS保証とシステム容量最大化を同時に考慮していないことに起因するものである。

3. 提案するパケットスケジューラ

3.1. 提案アルゴリズム

提案するパケットスケジューラは、QoS保証とシステム容量最大化を統一的に制御することで、QoS保証を行いつつ余剰帯域でシステム容量を最大化するものである。提案するスケジューラの構成を図1に示す。動作説明の簡素化のためにQoS保証を要求するサービスは1種類とし、それ以外はQoS保証を要求しないBEの2つのサービスクラスのみを想定する。無線基地局は、MT毎にパケットを一時的に保持するキューを用意する。さらにMTがQoS保証サービスとBEサービスを同時に利用する場合は、サービスクラス毎にキューを用意する。

無線基地局は、入力されたパケットからMTとサービスクラスを識別し、該当するキューにパケットを挿入する。提供QoSレベルが要求レベルに対して余裕がないMTのキューはQoSクリティカルグループに、QoSレベルを十分に満たしている場合はQoSノンクリティカルグループに属する。QoSレベルを満たしているかどうかは、パケットの送信時点でMTあたりの平均スループットや遅延時間を計測し、ある程度のバースト性を考慮して判断する。QoSクリティカルグループとQoSノンクリティカルグループを分離する事により、要求されたQoSレベルを満たしつつ、QoSに余裕があるMTに対してはシステム容量を最大化するように送信機会を割り当てることできる。また、QoSを要求しないMTのキューはBEグループに分類される。BEグループに対しても、基本的にシステム容量を最大化するように送信機会を割り当てるようにする。

まずQoSクリティカルグループのキューに対しては、最優先で送信機会を割り当てねばならない。このため、QoSクリティカルグループと、それ以外のグループの選択はPRR(Priority Round Robin)式におこなう。すなわち、QoSクリティカルグループのキューに送信待ちパケットがあれば、他のグループに属するキューのサービスに割り込んでも、必ず優先して送信機会を割り当てる。ここでPRRを採用し、WRR(Weighted Round Robin)のように予めキュー毎に固定的なリソースを割

り当てる方法を用いない理由は、無線リンク品質は時間変動するので、前もって固定のリソースを割り当てるのは困難だからである。

QoSクリティカルグループの中では、現在のQoS保証実現具合などに応じて送信機会を分配する。QoSノンクリティカルグループとBEグループの選択は、QoS保証サービスとBEサービスに対する余剰帯域分配方針に基づき、重み付けをした上でWRRによりスケジューリングをおこなう。

QoSノンクリティカルグループ内のパケットキューに対しては、既にQoS保証はされているので、できるだけシステム容量を増加させるためMax C/I方式でスケジューリングする。BEグループ内のパケットキューに対しては、MTとの間の無線リンク品質に応じて重み付けをおこない、PF方式によってスケジューリングする。ここでは送信機会の公平性は追及せず、無線リンク品質の良いMTほど大きなウェイトを与えることにより、余剰帯域を有効に割り当ててシステム容量を最大化する。

これらの仕組みによって、QoSを保証すべきMTに対してはQoS保証が可能となる。また、余剰帯域については、無線リンク品質の良いMTほど大きなウェイトを与えて優先的に送信機会を与える仕組みにより、システム容量を最大化することができる。また、継続的に通信不能となるMTは発生しない。

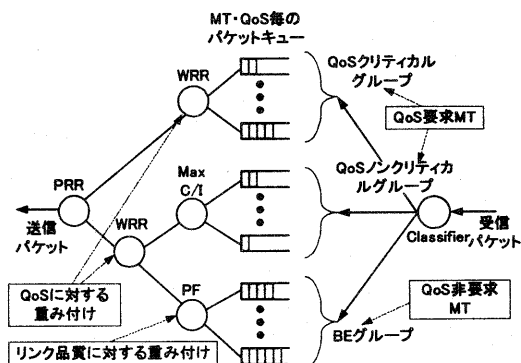


図1 提案スケジューラ構成図

4. 特性比較

前節で提案したパケットスケジューラの効果を調べるため、OPNET[13]を用いて無線リンクに3GPP Release 5のHSDPAを想定したシステムシミュレーションをおこなった。

4.1. シミュレーション内容

シミュレーションにおけるネットワークボロジを図2に示す。MTは、WebサーバもしくはCBRサーバとの間で、TCP/IPプロトコルに基づくクライアント

ーサーバ通信をおこなう。BTS(Node B)は無線基地局、AR(RNC)は基地局制御局、Core Networkはモバイルコア網、The Internetは外部の固定網に対応する。シミュレーションにおいては、有線側のネットワークがボトルネックとならないよう、有線のリンク速度とノード処理速度は十分速く設定した。BTSは図2の右下に示すように正六角形オムニセルを環状に19個配置し、MTはセル内で一様分布させた。

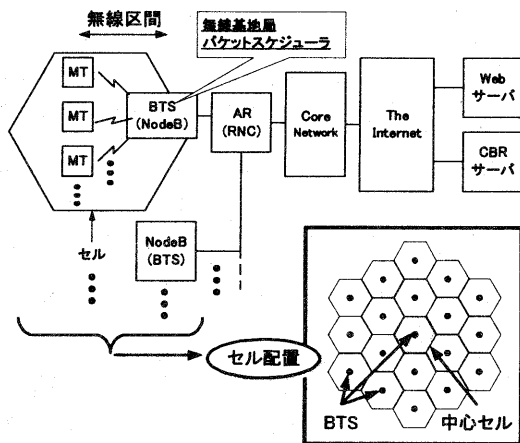


図2 シミュレーション・トポロジ

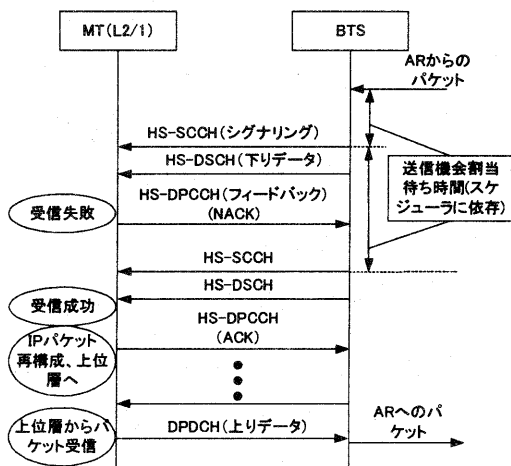


図3 BTS-MT間データ送受信シーケンス図

図3にBTS-MT間のデータ送受信手順を示す。BTSはARから下りパケットを受信すると、パケットに対応するキューに格納する。スケジューラによってMTに送信機会が与えられると、無線リンク品質に応じてMCSを選択し、送信可能な単位にデータを分割した後MTにフレームを送信する。このとき、BTSは基本

的に開ループの電力制御しかおこなわないが、セル中心から遠く離れたMTに対し、ターゲットBlock Error Rate (BLER)を達成できない場合には、送信電力にオフセットを加えるようにした。

フレーム送信の際、BTSはまず共有シグナリングチャネル(HS-SCCH)を用いてMTにデータ送信のタイミングとMCS情報を通知し、通知した情報に基づき共有データチャネル(HS-DSCH)からデータフレームを送信する。MTではフレームを受信すると、受信の成功/失敗、および次回送信時に要求するMCSを上りフィードバックチャネル(HS-DPCCH)を用いて通知する。MTがフレームの受信に成功した場合は、順序制御をおこなったのちにIPパケットを復元して上位層へ渡す。また、MTがフレーム受信に失敗した場合は、受信した信号をバッファに保存しておき、後で再送されるフレームとのChase合成[9]を実行する。これらの下りデータトラフィックの転送に伴うメッセージシーケンスに加えて、TCPのACKなどの上り方向のトラフィックも発生する。この上りデータの転送に関しては、個別チャネルであるDPDCHを利用して行われる。表1に、システムシミュレーションで用いた無線リンクの主要諸元を示す。無線リンクでのエラー確率は、リンクシミュレーション結果[8]に従うものとした。

表1 シミュレーション主要諸元

パラメータ	設定値
セル構成	19 オムニセル
SF (HS-DSCH)	16
HS-DSCH コード数	10
HS-DSCH target BLER	0.1
HS-DSCH 最大電力	0.7 (基地局が出力可能な全電力に対する比)
CPICH 電力	0.1 (基地局が出力可能な全電力に対する比)
HS-SCCH target BLER	0.01
短区間中央値変動 (シャドウイング)	対数正規分布、標準偏差 8 dB [10]
セル間シャドウイング相関	0.5
電波減衰モデル	Pedestrian A[11]
使用 MCS [MCS クラス : 変調方式 (符号化率)]	1: QPSK (1/4) 2: QPSK (1/2) 3: QPSK (3/4) 4: 16QAM (1/4) 5: 16QAM (1/2) 6: 16QAM (3/4)
HARQ 方法	Chase combining[9]
スケジューラ	Max C/I, QRR, Proposed
MT 数	16, 32, 64, 110
MT 移動速度	3 km/h
QoS 保証要求ユーザ数	10
QoS 保証要求ユーザに対する L2 保証レート	64 kbps

BE サービス、QoS 保証サービスの評価に用いたトラフィックモデルの諸元を表 2 に示す。各々のパケットコールは、表 2 のコールサイズで要求した大きさのデータを、サーバからクライアントに送信する一連の通信である。BE サービスのトラフィックモデルには ETSI の Web browsing モデル[11]を用いた。QoS 保証サービス用のトラフィックモデルは一種類とし、64kbps の CBR ストリームでシミュレーション終了まで継続するようにした。実際には無線リンクでヘッダやパディングによって 20% 程度のオーバーヘッドが発生するため、レイヤ 2 の負荷としてはストリームあたり 80kbps 程度となった。これに対しレイヤ 2 で保証すべきレートを 64kbps と低めに設定し、提案方式で QoS ノンクリティカルグループのパケットキューに分類された場合の動作を評価した。

表 2 トラフィック諸元

	BE サービス	QoS 保証サービス
コールサイズ	パレート分布 ($\alpha=1.1$, $k=4.5\text{Kbytes}$, $m=2\text{Mbytes}$, $\mu=25\text{Kbytes}$)	64[kbps]× (継続時間)
コール間隔	幾何分布 ($\mu=5\text{s}$)	—
パケットサイズ	1500[Bytes]	1500[Bytes]
トランスポートプロトコル	TCP	UDP
パケット送信間隔	TCP による制御	0.1875[s] の固定間隔

4.2. シミュレーション結果

パケットスケジューラの評価指標として、パケットコールスループットとシステムスループットを用いる。パケットコールスループットは、表 2 に示した各々のパケットコールに関し、受信成功したフレームサイズの合計をパケットコールの継続時間で除した値である。また、システム容量をあらわすシステムスループットは、計測時間内に全ての MT が受信成功したフレームサイズの合計を計測時間で除した値である。

まず、QoS を保証するスケジューラにより、背景トラフィックの増加に関わらず、継続して QoS 保証が実現されている事を確認した。QoS を保証しない Max C/I スケジューラでは QoS/BE トラフィックの区別なくスケジューリングされる。図 4 に MT 数の増加に対する QoS 保証要求ユーザの平均パケットコールスループット特性をスケジューリングアルゴリズムごとに示す。Max C/I 方式では、セル内の MT 数が増加した場合に、QoS 保証を要求するユーザに対して保証レートを満たすこ

とができていない。ただし、QoS 要求ユーザの数を 10 と少なくしているため、MT 数を増加させた場合でも継続的に送信機会を割り当てられる MT の存在により大幅な劣化は見られない。それに対して、QRR 方式と提案方式は MT 数によらず保証レートを維持している。QRR 方式および提案方式では、MT の数が少ない場合には保証レート以上の帯域が割り当てられており、MT 数が増加するに従い、徐々に余剰帯域の割り当て量が減少する。

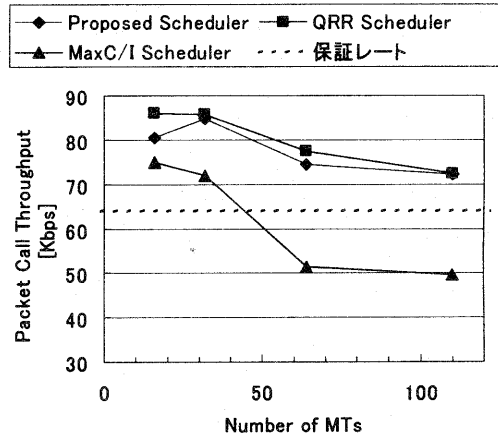


図 4 QoS 保証要求ユーザの平均パケットコールスループット特性

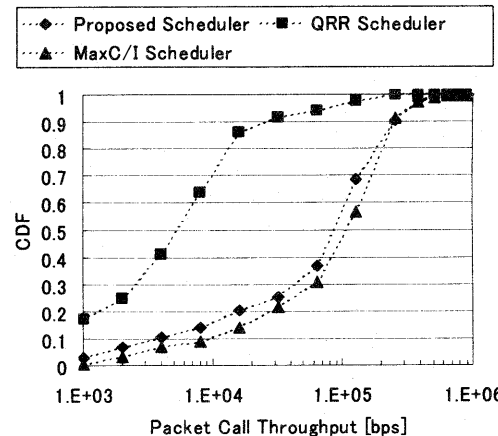


図 5 BE ユーザのパケットコールスループット分布特性 (MT=110)

次に、図 5 に MT 数を 110 とした場合の、BE トラフィックのパケットコールスループットの累積確率分布 (CDF: Cumulative Distribution Function) をスケジューラ方式ごとに示す。この図では横軸のある点に注目し

たとき、縦軸はそのパケットコールスループット以下となるパケットコールの割合を示す。QRR 方式では、パケットコールスループットのばらつきが Max C/I 方式や提案方式よりも小さく、より公平なスケジューリングが実現できているものの、90% 近くのスループットが 50kbps 以下と低く抑えられている。これに対し、提案方式では、パケットコールスループットのばらつきは大きいものの、全体として Max C/I に近い高スループットを実現できている。

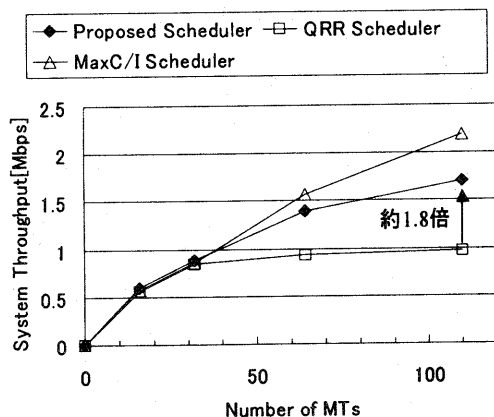


図 6 システムスループット特性

図 6 に、MT 数の増加に対するシステムスループット特性を示す。16、32MT の場合はシステムの保持する無線リソースに対して、入力されるトラフィックが小さいため、全てのスケジューリングアルゴリズムの性能は等しい。MT 数の増加につれて無線リソースの制限によるスケジューラの送信機会割り当て方法の差異が現れる。MT 数 110 の場合、提案方式は Max C/I 方式と比べて 20% 程度のスループット劣化となり、QRR 方式に比べると 80% 程度のシステムスループット増大効果が得られた。Max C/I 方式に対してスループットが減少した理由は、提案方式は QoS 保証のために無線リンク品質の劣る MT にも送信機会を割り当てていることに起因する。また、QRR 方式に対してスループットが上昇した主な理由は、QRR 方式では余剰帯域を各 MT に公平に割り当てるのに対し、提案方式では無線リンク品質の優れる MT から優先的に割り当てるからである。

これらの結果から、提案方式は無線リソース使用効率の劣化を抑えつつ、システム容量を増加させる効果があるといえる。

5. おわりに

本報告では、将来の All-IP モバイル網において無線

リンク部分の QoS 保証を司る無線基地局に注目し、従来同時には考慮されていなかった QoS 保証とシステム容量を統一的に扱う無線基地局パケットスケジューラを提案した。提案手法では、要求された QoS を保証しつつ、余剰帯域を無線リンク品質に応じて動的に割り当てる事によりシステム容量を最大化可能である。

また、提案したパケットスケジューラを HSDPA に基づく無線基地局に適用し、64kbps の最低保証帯域を要求する 10MT が存在する場合のシステムシミュレーションをおこなった。その結果、システム容量の最大化を目指し余剰帯域の配分を行う場合には、提案スケジューリングアルゴリズムは従来の QoS 保証パケットスケジューラである QRR 法に比べて、最大 80% 程度のシステムスループット向上効果があることを示した。

文 献

- [1] 百名他, "All-IP モバイル網アーキテクチャの提案 (1) - IMT2000 からの Evolution -," 信学技報, May 2002.
- [2] 須田他, "All-IP モバイル網アーキテクチャの提案 (2) - 無線リソース管理フレームワークの検討 -, " 信学技報, May 2002.
- [3] 3GPP, 3G TR 25.848, "Physical Layer Aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access," Mar. 2001
- [4] P. Bender et al., "CDMA/HDR: A Bandwidth-Efficient High-Speed Wireless Data Service for Nomadic Users," IEEE Comm. Mag, July 2000.
- [5] A. Jalali, et al., "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system," Proc. of IEEE VTC 2000-Spring, vol.3, pp.1854-1858, 2000.
- [6] 大藤他, "下りリンク高速パケット伝送における最低レート保証を考慮したスケジューラの検討," 2002 信学全大, no.SB-2-1, pp.817-818, Mar. 2002.
- [7] R. Prasad et al. ed., "Third Generation Communication Systems," Artech House, 2000.
- [8] 3GPP, Tdoc R1-02-0015, "UL signaling," TSG-RAN WG1 #23, Jan. 2002.
- [9] D. Chase, "Code combining - A Maximum-Likelihood Decoding Approach for Combining an Arbitrary Number of Noisy Packets," IEEE Trans. Comm., vol.33, no.5, pp.385-393, May 1985.
- [10] M. Gudmundson, "Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems," Electron. Lett., vol.27, no.23, pp.2145-2146, Nov. 1991.
- [11] ETSI, UMTS TR 101 112, "Selection Procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS," Apr. 1998.
- [12] <http://www.opnet.com/>