

(4) データリンクレイヤ / 物理レイヤにおける高効率パケットアクセス技術

ブロードバンド無線アクセス方式におけるデータリンクレイヤおよび物理レイヤにおいて、トラヒックデータの所要QoS（パケット誤り率、遅延）を実現する高効率パケットアクセス技術について述べる。

あ べ た さだゆき た ん の もとひろ み き のぶひこ
安部田 貞行 丹野 元博 三木 信彦
は ら だ あつし さ わ は し まる
原田 篤 佐和橋 衛

1. まえがき

第2世代のデジタル携帯電話方式（PDC：Personal Digital Cellular）、第3世代の広帯域符号分割多元接続方式（W・CDMA：Wideband Code Division Multiple Access）などの移動通信システムは回線交換方式をベースとしたシステムであり、ユーザに個別チャネル（Dedicated Channel）を割り当てている。このような方式は、音声、動画像などのインタラクティブな通信がサービスの中心であるシステムには適していると考えられる。しかしながら、第4世代移動通信システム（以下、4Gシステム）では、将来のコアネットワークのIP（Internet Protocol）化に伴い、音声、動画像、画像配信、大容量ダウンロードなどのすべてのトラヒックがIPパケットとしてパースト的に到着することを考慮すると、無線区間においてもパケットフォーマットによる信号伝送が望ましい。さらに、無線区間のパケット信号を用いてトラヒックデータは、共有チャネル（Shared Channel）、共通チャネル（Common Channel）あるいは個別チャネルでアクセスユーザへの信号伝送が行われる。そのため、基地局構成は、それぞれのユーザに対して送受信モジュールを用意する回線交換方式に比較して無線部回路の規模を小さく構成できる。また、さまざまなサービス品質（QoS：Quality of Service）を有する（本稿では、許容遅延、残留パケット誤り率をQoSの対象とする）、音声帯域の低速データから100Mbit/s以上の高速データまでの伝送を同一の無線インタフェースにより柔軟に提供する観点からも、パケットベースの無線アクセスが適していると考えられる。このような無線区間のパケット化に伴い、無線区間における遅延を最小にし、なおかつ所要送信電力を低減してリンク容量の大容量化を実現する、IPパケットの無線パケットへの効率的な変換が重要となる。また、無線区間における誤りの影響を軽減し、高信頼度のパケット伝送を

実現するためには、自動再送要求（ARQ：Automatic Repeat reQuest）およびチャネル符号化が、必須の技術である[1]、[2]。さらに、システムのスループットの向上（システム容量の増大）の観点からは、複数のユーザのパケットを共有チャネルに効率良く割り当てて伝送することが必要である。具体的には、下りリンクにおいては、複数ユーザのパケット信号を共有チャネルの時間スロットに割り当てるパケットスケジューリング技術[3]～[5]、上りリンクにおいてはブリアンブルで後続するメッセージデータの送信予約を行うランダムアクセス、あるいは、予約パケットをあらかじめ送信して、後続するデータパケットの送信スロットを予約する予約型パケットアクセスなど[6]の技術による効率的なパケットアクセスの適用が考えられる。

本稿では、高効率パケット伝送に必須の技術である、ARQ、下りリンク高速パケットスケジューリング、上りリンク高効率パケットアクセス技術について説明する。

2. データリンクレイヤ / 物理レイヤにおける信号変換過程

図1にIPパケットを無線区間（物理レイヤ）の信号フォーマットに変換する過程の一例を示す。高効率なパケット制御を行うためには、IPパケットを物理レイヤの無線フレームにマッピングする前に、データリンクレイヤにおいて、ARQ制御、チャネル符号化の効果を十分に得るため、また効率的なパケット制御を行うために、以下に示すIPパケットの信号変換を行う。

データリンクレイヤはRLC（Radio Link Control）とMAC（Medium Access Control）の2つのサブレイヤで構成される。送信するIPパケットは、このRLCサブレイヤにおいて、再送制御や順序制御の処理に適した長さの処理単位に分割・結合される。さらに、RLCサブレイヤでは、処理（フロー制御機能 / プロトコルエラー検出・復帰）に必要な情報をヘッダ情報として付加したRLC・PDU（Protocol Data Unit）を生成し、MACサブレイヤへ転送される。一方、MACサブレイヤでは、効率的なパケット伝送を行うため、論理チャネルの多重 / 分離、論理チャネルとトランスポートチャネルの対応付けや優先制御 / スケジューリング処理が行われる。

ブロードバンド無線アクセス方式では、MACサブレイヤにおいて無線区間における誤りを検出・再送を行うことで、再送に伴う遅延を最小にしている。このため、RLC・PDUに付加するMACヘッダとしてチャネルの対応関係を表す情報に加え、再送制御や順序制御に必要な制御情報（シーケンス番号）を加えて、MAC・PDUを生成し、適切

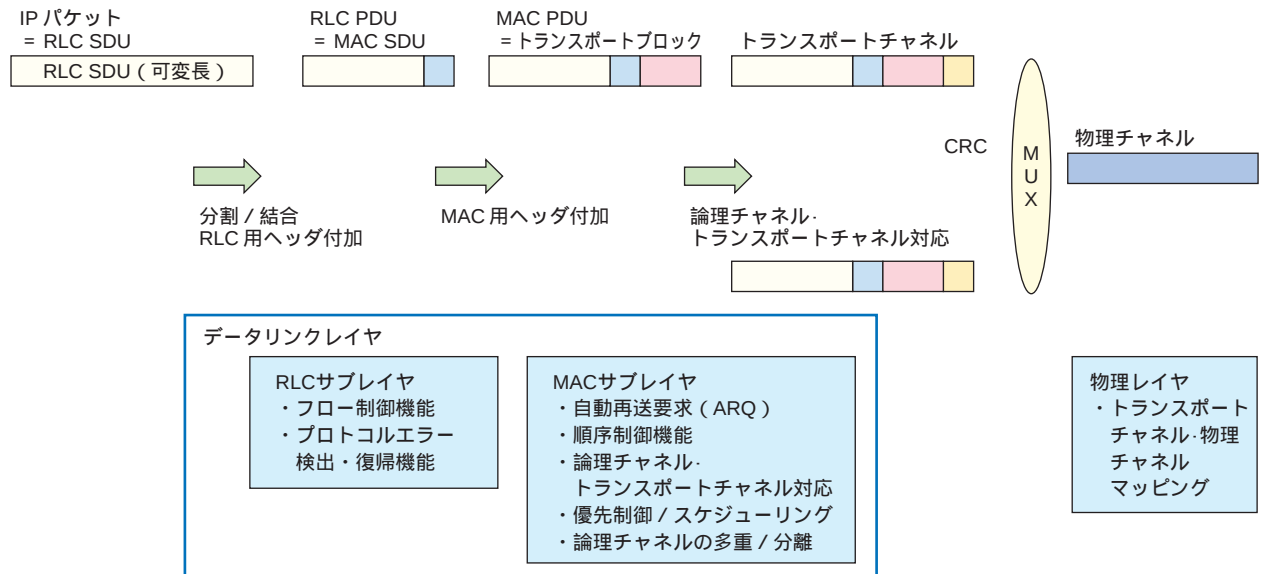


図1 IPパケットの物理レイヤ信号フォーマットへの変換

なトランスポートチャンネルに割り当てた後、物理レイヤに転送する。物理レイヤでは、データリンクレイヤより転送されたトランスポートチャンネルに対し、誤り検出符号の付加・誤り訂正符号化・インタリーブ処理、拡散、コード多重などの物理レイヤにおける処理を行い、無線フレームにマッピングする。

3. MAC レイヤにおける ARQ 制御

MAC レイヤにおける ARQ 制御は、無線区間で生じたパケット誤りを短い制御遅延時間で効率的に補償するのに有効な技術であり、W・CDMA 無線インタフェースに基づく下りリンク高速パケットアクセス（HSDPA：High-Speed Downlink Packet Access）でも採用されている。ブロードバンド無線アクセス方式においても、低遅延を実現する MAC レイヤの再送制御は必須である。図2に MAC レイヤにおけるパケット合成型 H・ARQ（Hybrid ARQ）の受信部の構成を示す。受信部では、受信パケットを復号した後、巡回冗長検査（CRC：Cyclic Redundancy Check）符号により、パケットの誤り検出を行う。パケットに誤りが検出された場合は、誤りの検出されたパケットを廃棄せずに受信バッファに保存し、送信部に対して、再送要求信号（NACK：Negative Acknowledgement）を送信する。NACK 信号を受信した送信部はパケットの再送を行い、受信部では再送パケットと受信バッファに蓄積されたパケ

ットの合成を行う。再送パケットの送信方法、および合成方法として、主に図3に示す2つの方法が実用システムを対象として検討されている。

(1) Chase 合成法（パケット合成型 Type・I 法）[1]

送信部は NACK を受信したパケットと同一パケットを再送する。受信部は、再送パケットを受信後、受信バッファに蓄積されているパケットと最大比合成（MRC：Maximal Ratio Combining）を行い、誤り訂正復号処理を行う。Chase 合成法では、パケットを MRC 合成することにより、受信信号の希望波信号電力対干渉および雑音電力比（SINR：Signal to Interference and Noise power Ratio）が向上し、パケット誤りの低減を図ることができる。

(2) Incremental redundancy 法（Type・II 法）[2]

情報信号系列を符号化率 R' で符号化した後、送信回数に応じて異なる消去規則によりパंकチャド符号化（符号化率 $R (> R')$ ）を行い、送信する。具体的には、符号

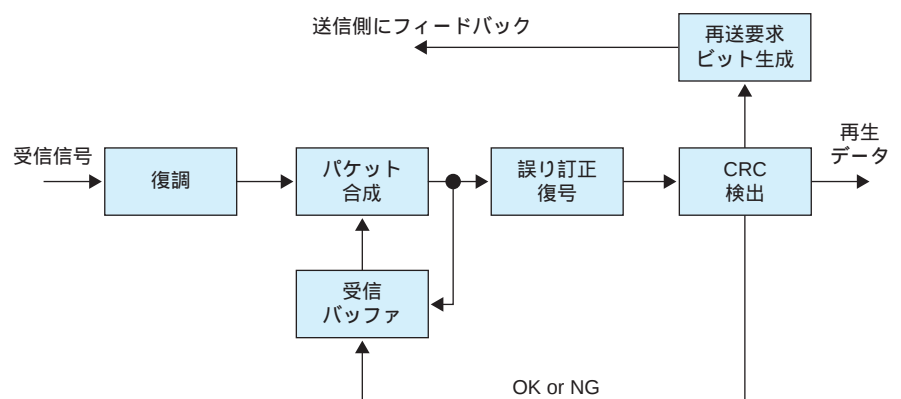


図2 パケット合成型 H・ARQ の受信部構成

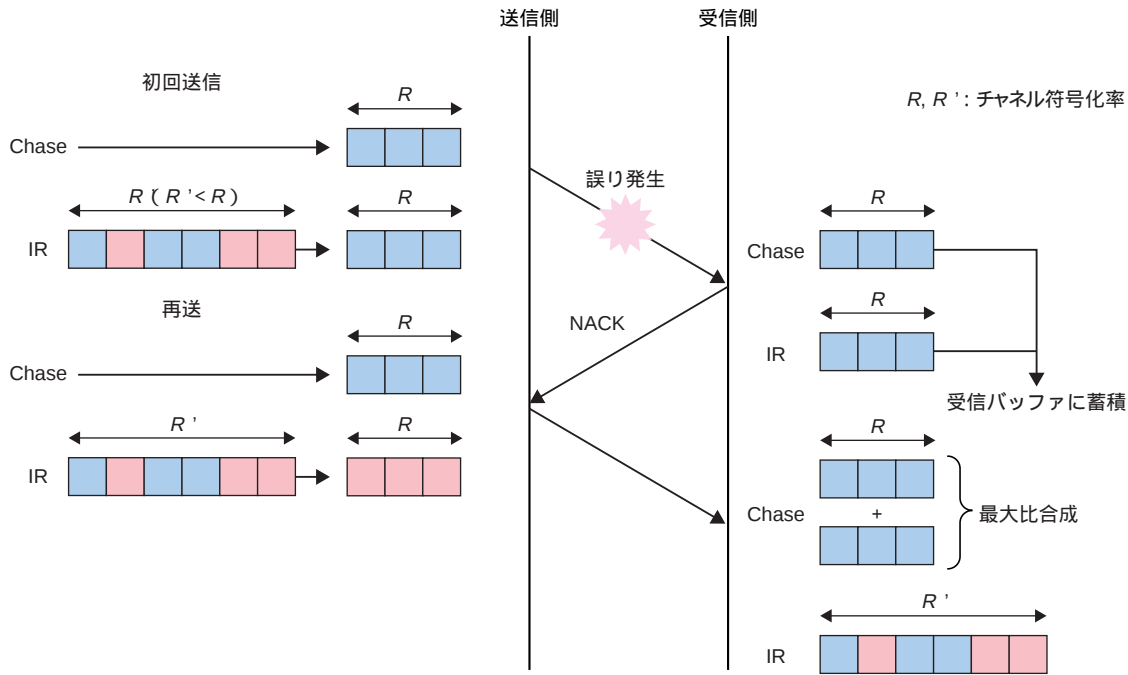


図3 パケット合成型H-ARQの原理説明図

化率 R' のターボ符号化後のデータ系列において、パリティビットを一定周期で間引く（バンクチャする）ことにより、符号化率 R' よりも大きな符号化率 R の符号化データ系列を生成する。したがって、再送パケットとして初回送信時のパケットとは異なる符号化系列が送信されるため、受信部ではバッファに保存された初回送信時の受信パケットおよび再送パケットを組み合わせることで、送信時の R よりも小さい符号化率で誤り訂正復号できる。すなわち、Incremental redundancy法は、パケットを合成することにより符号化利得が向上し、Chase 合成法よりも大きなパケット誤り低減効果を実現することができる。

図4に前述の2種類のパケット合成型ハイブリッドARQと適応変復調・チャンネル符号化（AMC：Adaptive Modulation and channel Coding）を併用したときの平均受信 E_b/N_0 （情報1シンボル当りの信号エネルギー対雑音電力密度比）に対するスループット特性を示す[7]。ここで、AMCに用いる変調方式および符号化率の組合せ（MCS：Modulation and channel Coding Scheme）はそれぞれの方式において、最適化したものを用いた。また、AMCの効果、および主にMCS選択誤りに起因するパケット誤りは最大ドップラー周波数 f_D に大きく依存するため、MCS選択誤りが少ない $f_D = 20\text{Hz}$ 、およびMCS選択誤りが頻繁に起こる $f_D = 400\text{Hz}$ の特性について示した。 $f_D = 20\text{Hz}$ では、ともに最適なMCSを選択できており、Chase 合成法とIncremental redundancy法のスループット

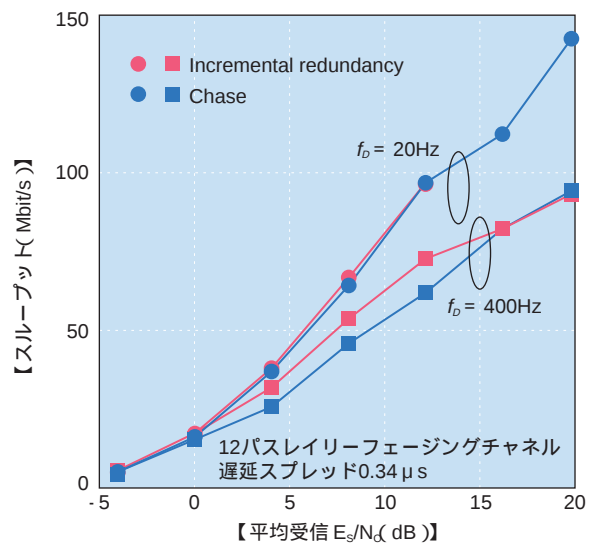


図4 Chase combining 法, Incremental redundancy 法の比較

特性に顕著な差はない。一方、 $f_D = 400\text{Hz}$ においては、MCS選択の誤りに起因して再送が増加し、再送時に大きい符号化利得が得られるIncremental redundancy法が、Chase 合成法に比較して特性が優れていることが分かる。

4. 下りリンクにおける高速パケットスケジューリング法

図5に下りリンク高速パケットスケジューリングの概念図を示す。高速パケットスケジューラの目的は、さまざま

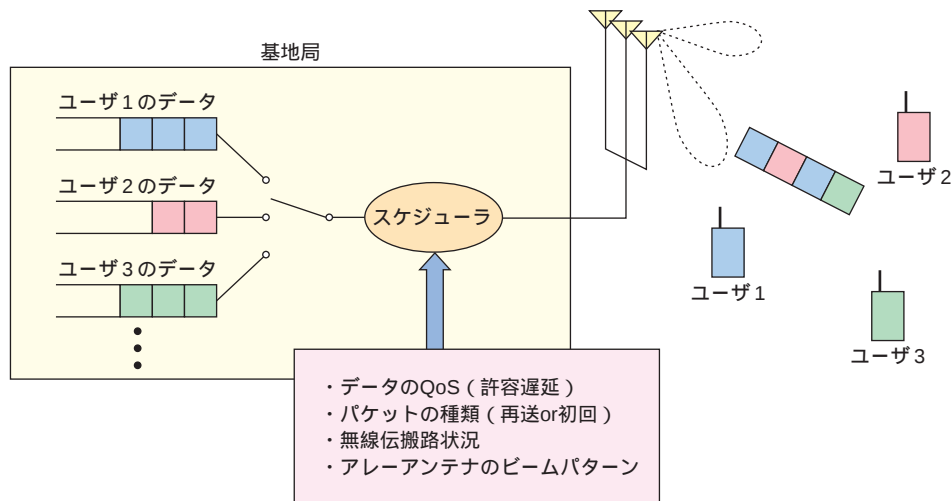


図5 高速パケットスケジューラ概念図

なQoSを満たしながら、基地局におけるスループットを向上し、さらに、ユーザ間でのパケット割当ての公平性を保つことである。したがって、スケジューリングにおいては、以下の優先順位に基づいて送信スロットの割当てを行う。

第1に、情報パケットのQoS（特に許容遅延）を最優先する。例えば、動画のような実時間（RT（Real Time））トラヒックでは許容遅延が小さく、データのダウンロードなどの非実時間（NRT（Non Real Time））トラヒックでは許容遅延が大きい。したがって、許容遅延の小さいユーザを優先することにより、異なるQoSのトラヒックを効率的に提供する。

第2に優先するファクタは、パケットの種類（再送パケットあるいは初回送信パケット）である。これは、再送パケットを初回送信パケットよりも優先させることにより、再送に伴う遅延の増大を軽減するためである。

第3に優先するファクタは、各ユーザの無線伝搬路状態である。無線伝搬路状態の指標としては、一般には、希望波信号電力対干渉電力比（SIR：Signal to Interference power Ratio）が用いられる。移動通信では伝搬路状態が大きく変動するため、それぞれのユーザの受信SIRが良い状況を選び、高効率な多値データ変調を用いることによりスループットの向上が期待できる。ブロードバンド無線アクセス方式では、カバレッジの増大を実現するため、アダプティブアレーの適用が有効である。そこで、指向性ビーム送信のビームパターンを考慮して、パケットスケジューリングを行う[8]。これにより、空間的に信号の分離が可能な複数ユーザに対して送信スロット割当てを行うことができ、セクタスループットの向上が期待できる。

具体的なパケットスケジューリングは次のように行われる。

基地局に到着した各ユーザのパケットは、各ユーザごとにバッファに蓄積される。

パケットのトラヒック種別に応じた許容遅延に基づき、バッファに蓄積されている時間に応じ、パケットに対して優先度を与える。

で与えた優先度に加えて、再送パケットに対してはさらに優先度を与える。特に許容遅延の厳しいパケットに対しては最優先となるように優先度を制御する。

で与えた優先度に加えて、SIRに基づく優先度を与える。ここで許容遅延が小さいRT型トラヒックに対しては、公平性よりも瞬時SIRを最優先する。

これは、RT型トラヒックはほぼ一定間隔でパケットが到着すると考えられ、許容遅延内では、伝搬路の良好なユーザから確実にパケットを通すことにより、パケット誤り率が改善しつつ、他のユーザに対してもスロットが割り当てられるからである。一方、許容遅延条件が緩やかなNRT型トラヒックに対しては、ユーザ間の不公平性が生じるため、公平性を考慮した瞬時SIRによる優先度を決定する。受信SIRに基づくパケットスケジューリングとしては、Maximum CIR法やProportional Fairness法[3]が提案されている。さらに、Maximum CIR法に近いセクタスループットを実現しつつ、ユーザ間の送信スロット割当ての不公平性を小さくした、最低レート保証拘束条件付き瞬時SIR（MTA-ISIR：Minimum Throughput Assured Instantaneous-SIR）法が提案されている[5]。

図6にMTA-ISIR法の動作原理図を示す。MTA-ISIR法は、Maximum CIR法と同様に、瞬時受信SIRの大きく、ユーザに優先的にスロットを割り当てる方法である。しかしながら、ユーザ間のスロット割当て機会を公平にするため、平均受信SIR Q_{avg}^i があらかじめ設定したしきい値 Q_w よりも

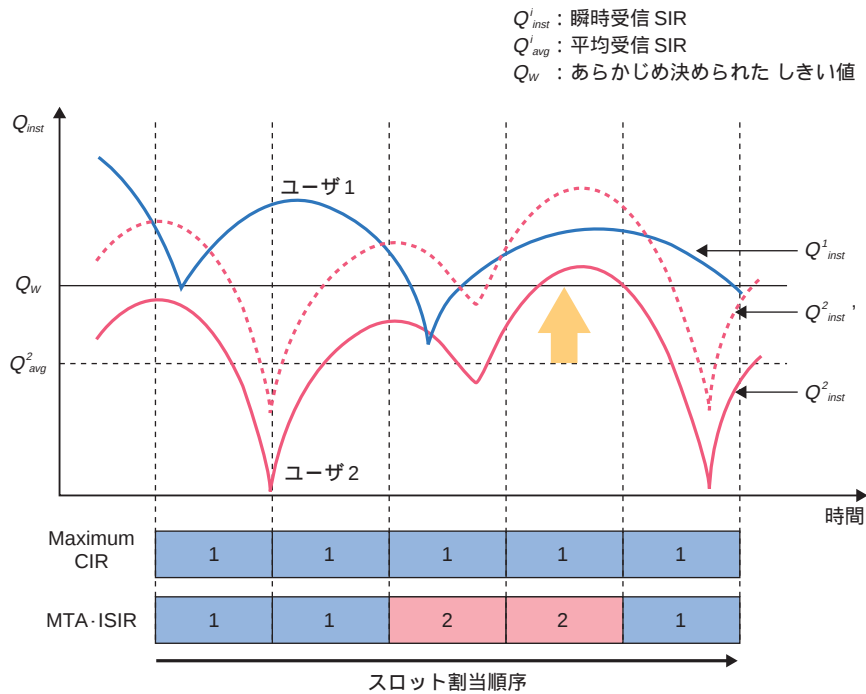


図6 最低レート保証拘束条件付き瞬時SIR法の原理図

小さなユーザ（図6の例ではユーザ2）に対しては、このユーザの瞬時受信SIR Q_{inst}^i に重み付けを行い、重み付け後の受信SIR変動の平均値が Q_w となるように制御を行う。スケジューラは重み付け後の瞬時受信SIR $Q_{inst}^{i'}$ に基づいて、最大となるユーザから順に優先的にスロット割当てを行う。ここで、 $Q_{inst}^{i'}$ は以下に示す式(1)で表される。

$$Q_{inst}^{i'} = \begin{cases} Q_{inst}^i & \text{for the users such as } Q_{avg}^i > Q_w \\ Q_{inst}^i \cdot \frac{Q_w}{Q_{avg}^i} & \text{for the users such as } Q_{avg}^i \leq Q_w \end{cases} \quad (1)$$

本アルゴリズムでは、 $Q_{avg}^i < Q_w$ であるユーザは、平均受信SIRが Q_w であると思なされるため、このようなユーザ間では、スロットの割当て機会がほぼ均等となり、平均受信SIRの小さなユーザに対してもスロットが割り当てられる。したがって平均受信SIRの小さいユーザに対し、所要のスループット以下となるユーザの割合を低減できる。一方、瞬時受信SIRの大きいユーザに対してスロット割当てにおける優位性を保つことにより、各ユーザの瞬時受信SIRと平均受信SIRの比に基づいてスロットを割り当てるProportional Fairness法に比較して、ピークスループット、およびセクタスループットを改善することができる。

図7にMTA-ISIR法を用いたときのセル半径で正規化した基地局からの距離に対するスロットの割当率を示す。比較としてProportional Fairness法およびMaximum CIR法の結果も併せて示す。ここでスロット割当率は、基地局のパ

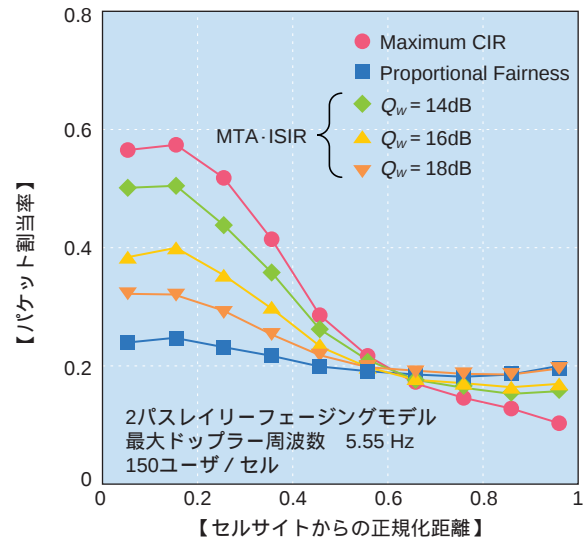


図7 パケット割当率

ッファに送信待ちデータを有するユーザがスロットを割り当てられる確率として定義した。MTA-ISIR法は、基地局からの距離が小さい領域のユーザに対して、 Q_w が小さい場合にはスロットの割当率が大きく、 Q_w を増加するに従って割当率が低下している。一方、基地局からの正規化距離が大きい領域のユーザに対しては、Maximum CIR法に対してスロットの割当率が改善されており、 Q_w が大きいほど割当率の改善量は大きい。また、MTA-ISIR法を用いたときのスロット割当率は基地局からの距離が大きくなるにつれて、ほぼ単調に減少していくものの、正規化距離が0.6以上

では、ほぼ一定の割当率となっていることが分かる。したがって、MTA・ISIR法では基地局からの距離が大きいユーザに対して、Proportional Fairness法と同等のスロット割当てを実現することにより公平性を保ち、セル近傍のユーザにはMaximum CIR法に近いスループットが実現できる。

5. 上りリンクにおける 高効率パケットアクセス法

図8に上りリンクにおけるパケットアクセスの概要構成を示す。

移動端末は、送信すべきデータが発生すると、まず予約パケットを送信する。予約パケットには、ユーザID、データパケットのデータサイズ、ユーザノ制御データ識別子などに加え、許容遅延時間や許容残留パケット誤り率などのQoS情報が含まれる。さらに、移動端末において測定された無線伝搬路状態に関する情報も含まれる。基地局は予約パケットを受信すると、これらの情報を基に予約制御（スケジューリング）を行い、移動端末に対して応答パケットを送信する。応答パケットには、アクセス許可／拒否識別子、スケジューリング情報、データパケット無線パラメータ、送信タイミング制御情報などが含まれる。移動端末は応答パケットの内容に従い、データパケットの送信を行う。このように予約制御を行うことで、無線リンクやトラヒックの状況に応じた効率的なパケットアクセスが可能となる。

予約パケット構成として次の2つの方法が考えられる。1つは、階層化シグネチャを用いる方法である。基地局においてユーザ識別やパスサーチのために用いられるシグネ

チャを階層化し、上位レイヤシグネチャ[9]で予約制御情報を伝送する。シグネチャ検出と予約制御情報の検出が同時に行えるため、復号処理などが不要である利点があり、比較的短い予約制御情報の伝送に適した方法である。もう1つは、パイロット信号とデータシンボルを併用する方法である。この方法では、比較的長い予約制御情報を伝送でき、誤り訂正符号の適用により高信頼伝送が可能である。

上りリンクにおいて、図9に示すような許容遅延に応じた無線パラメータ制御を行う高効率パケットアクセス法が提案されている[10]、[11]。移動局は予約パケットにより許容遅延を基地局に通知し、基地局は予約パケットに対するデータパケットの送信電力オフセット量を制御する。RT型トラヒックのように許容遅延が厳しい場合には、大きな送信電力オフセットを適用し、低遅延を実現する。NRT型トラヒックのように許容遅延が比較的緩やかな場合には、小さな送信電力オフセットを適用し、パケット再送合成による時間ダイバーシチ効果を利用することで、トータルの所要受信 E_b/N_0 （情報1ビット当りの信号エネルギー対雑音電力密度比）を低減し、システム容量を増大する。

図10に計算機シミュレーションにより求めた送信電力オフセット量に対するトータル所要受信 E_b/N_0 特性を示す。送信電力オフセット量を小さくしていくと、時間ダイバーシチ効果により所要受信 E_b/N_0 が低減する。さらに小さくすると、1パケット当りの受信電力が小さくなりすぎるため、再送が多発して所要受信 E_b/N_0 が増大する。従来は、許容遅延に応じた制御が行われていなかったため、大きな送信電力オフセット量を用いて許容遅延の厳しいトラヒックの要求を満たしていた。これに対し、提案方法では、許

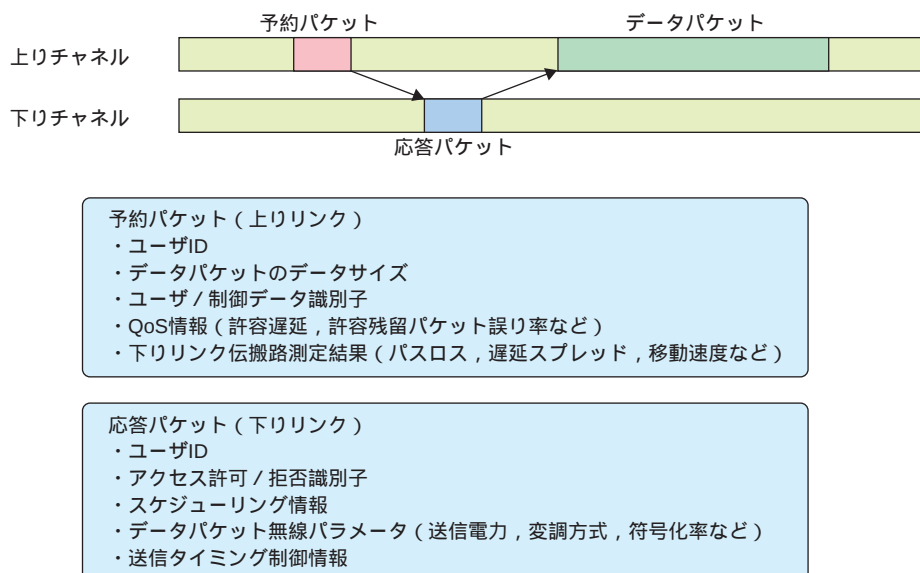


図8 上りリンクにおけるパケットアクセスの概要構成（予約パケット、データパケット）

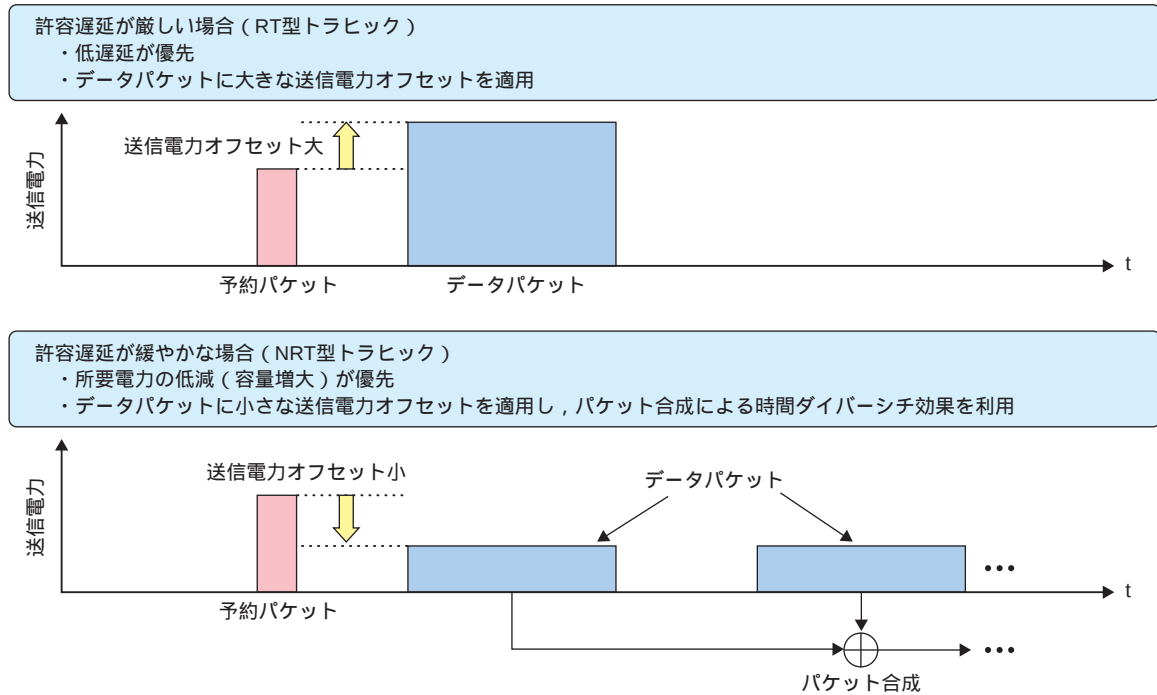


図9 時間ダイバーシチの提案

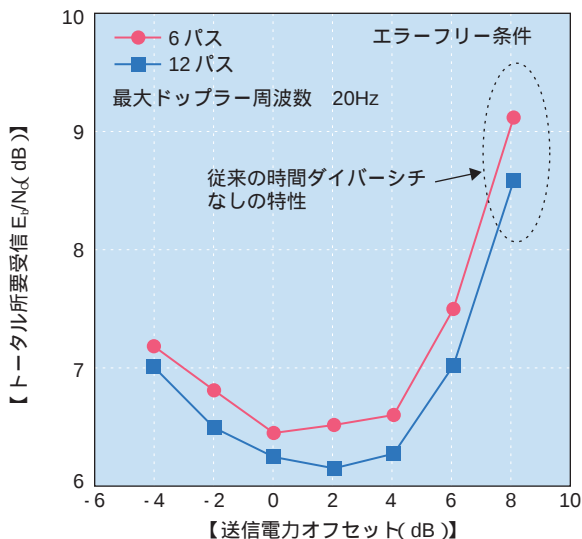


図10 時間ダイバーシチの特性

容遅延が比較的緩やかなトラヒックに対しては2dBの送信電力オフセットを適用することで、従来方法に比較して所要受信 E_0/N_0 を2dB以上低減できる。このように、提案方法では、それぞれのトラヒックの許容遅延を満たしつつ、システム容量を増大できる。

6. あとがき

本稿では、ブロードバンド無線アクセス方式におけるデータリンクレイヤおよび物理レイヤにおいてトラヒックデータの所要QoS（パケット誤り率，許容遅延）を実現する

高効率パケットアクセス技術について説明した。

今後は、室内および屋外実験を通じて、ブロードバンドチャネルにおける高効率パケットアクセス技術の効果の検証，ハンドオーバーの効果の検証，およびIPパケットの伝送特性の評価を行う予定である。

文 献

- [1] D. Chase: "Code combining - a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets," IEEE Trans. Commun., Vol.33, No.5, pp.385-393, May 1985.
- [2] J. Hagenauer: "Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications," IEEE Trans. Commun., Vol.36, No.4, pp.389-400, Apr.1988.
- [3] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj: "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System," IEEE VTC2000-Spring, pp.1854-1858, Tokyo, May 2000.
- [4] Y. Ofuji, S. Abeta, and M. Sawahashi: "Comparison of Packet Scheduling Algorithms Focusing on User Throughput in High Speed Downlink Packet Access" IEICE Trans. Commun. Vol.E86-B No.1 pp.132-141, Jan.2003.
- [5] Y. Ofuji, S. Abeta, and M. Sawahashi: "Fast Packet Scheduling Algorithm Based on Instantaneous SIR with Constraint Condition Assuring Minimum Throughput in Forward Link," IEEE WCNC pp.860-865, New Orleans, March 2003.
- [6] D.J.Goodman, R.A.Valenzuela, K.T.Gayliard, and B.Ramamurthi: "Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications," IEEE Trans.Commun., Vol.37, No.8, pp.885-890, Aug.1989.

- [7] N. Miki, S. Abeta, and M. Sawahashi: "Evaluation of Throughput Employing Hybrid ARQ Packet Combining in Forward Link OFCDM Broadband Wireless Access," IEEE PIMRC2002, pp.394 - 398, Sep.2002.
- [8] 大藤, 安部田, 佐和橋: "下りリンク高速パケット伝送における複数指向性ビーム送信を行うスケジューリング法の検討," 2002 信学ソ大B - 5 - 88, Sep.2002 .
- [9] 3GPP RAN, 3G TS 25.211 V3.8.0, Sep.2001
- [10] 飯塚, 丹野, 佐和橋: "ブロードバンドマルチキャリア/DS-CDMAにおけるパケット再送合成を用いるランダムアクセスチャネル," 信学技報RCS2002 - 195, pp.19 - 24, Nov.2002.
- [11] Y. Iizuka, M. Tanno, and M. Sawahashi: "Efficient random access channel transmission method utilizing soft-combining of retransmitted message packets according to QoS," IEEE ICCS2002, pp.441 - 445, Nov.2002

用語一覧

AMC : Adaptive Modulation and channel Coding
(適応変復調・チャネル符号化)

ARQ : Automatic Repeat reQuest (自動再送要求)

CIR : Carrier to Interference power Ratio (対干渉電力比搬送波)

CRC : Cyclic Redundancy Check (巡回冗長検査)

H-ARQ : Hybrid ARQ

HSDPA : High-Speed Downlink Packet Access
(下りリンク高速パケットアクセス)

IP : Internet Protocol

IR : Incremental Redundancy

MAC : Medium Access Control

MCS : Modulation and channel Coding Scheme

MRC : Maximal Ratio Combining (最大比合成)

MTA-ISIR : Minimum Throughput Assured Instantaneous-SIR
(最低レート保証拘束条件付き瞬時SIR)

MUX : MultipleXer (多重化)

NACK : Negative ACKnowledgement (再送要求信号)

NRT : Non Real Time (ノンリアルタイム)

PDC : Personal Digital Cellular (デジタル携帯電話方式)

PDU : Protocol Data Unit

QoS : Quality of Service (サービス品質)

RLC : Radio Link Control

RT : Real Time (リアルタイム)

SINR : Signal to Interference and Noise power Ratio
(希望波信号電力対干渉および雑音電力比)

SIR : Signal to Interference power Ratio (希望波信号電力対干渉電力比)

W-CDMA : Wideband Code Division Multiple Access
(広帯域符号分割多元接続方式)