

Evolved UTRA and UTRAN ネットワークにおける パケット合成型 Hybrid ARQ の性能評価

山本 篤[†] 山本 寛[†] 塚本 和也[†] 内田 真人^{††} 鶴 正人^{†††}
尾家 祐二^{†††}

九州工業大学 情報工学部 電子情報工学科
〒 820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4

E-mail: †{atsushi,yamamoto,kazuya}@infonet.cse.kyutech.ac.jp, ††m.uchida@ndrc.kyutech.ac.jp,
†††{tsuru,oie}@cse.kyutech.ac.jp

あらまし 次世代の移動体通信システムとして, Evolved UTRA and UTRAN に注目が集まっている. この次世代移動体通信システムでは, 効率の良い再送方式としてパケット合成型 Hybrid ARQ (HARQ) が必須とされている. しかし, Evolved UTRA and UTRAN ネットワークを対象としたパケット合成型 HARQ の TCP 伝送特性への有効性はまだ調査されていない. そこで本稿では, 従来の再送方式である Basic HARQ を比較対象とし, Evolved UTRA and UTRAN ネットワーク上でパケット合成型 HARQ を使用した場合の TCP 伝送特性への有効性を調査する. その結果, パケット合成型 HARQ を利用することによって, 受信状態の悪いユーザの TCP のスループットが改善し, ユーザ間の公平性が向上することを示す.

キーワード Evolved UTRA and UTRAN, Hybrid ARQ, Chase combining, スケジューリング機構, TCP, 公平性

Performance of Hybrid ARQ with Packet Combining for Evolved UTRA and UTRAN

Atsushi YAMAMOTO[†], Hiroshi YAMAMOTO[†], Kazuya TSUKAMOTO[†], Masato UCHIDA^{††},
Masato TSURU^{†††}, and Yuji OIE^{†††}

Dept. of Computer Science and Electronics, Kyushu Institute of Technology
Kawazu 680-4, Iizuka, Fukuoka, 820-8502, Japan

E-mail: †{atsushi,yamamoto,kazuya}@infonet.cse.kyutech.ac.jp, ††m.uchida@ndrc.kyutech.ac.jp,
†††{tsuru,oie}@cse.kyutech.ac.jp

Abstract Evolved UTRA and UTRAN has emerged as a next generation mobile communication system. Hybrid ARQ with packet combining (HARQ with PC) is essential for this system as a well effective retransmission scheme. However, how the HARQ with PC over the Evolved UTRA and UTRAN has an effect on the TCP performance is not clarified yet. Thus, in this paper, we examine the TCP performance when using HARQ with PC, comparing to a conventional retransmission scheme (Basic HARQ). The HARQ with PC is shown through performance evaluation to improve TCP throughputs of users in bad reception conditions, achieving the fair utilization of wireless resource between users.

Key words Evolved UTRA and UTRAN, Hybrid ARQ, Chase combining, Channel-State-Aware Scheduling, TCP, fairness

1. はじめに

近年, 移動体通信は世界規模で急速に普及してきている. 特に日本市場では, Wideband Code Division Multiple Access

(W-CDMA) 方式をはじめとする第 3 世代移動体通信 (3G) の普及が進んできている. さらに現在では, 下り方向で 100Mb/s - 1Gb/s の通信速度を実現する第 4 世代 (4G) の移動体通信技術が検討されている. しかし, 4G では, 3G とは全く異なった

システム・周波数帯を採用する予定であるため、3G から 4G への移行には膨大な資金が必要になる。特に、ヨーロッパの移動体通信オペレータは非常に高い金額で 3G の周波数帯を買収しているため、3G の周波数帯をできるだけ長く使うことが望まれている。そこで、3G の周波数帯を使いながら、4G の技術を利用して通信の高速化を行う、Evolved UTRA and UTRAN に注目が集まっている [1]。

しかし、無線通信を高速化することは容易ではない。それは、無線通信では、干渉やフェージングなどが原因で伝送誤りが起きやすいからである。そのため、高速な無線通信を実現するためには、伝送誤りを効率よく回復する技術が重要となる。

従来の移動体通信システムでは、伝送誤りが生じ、誤りのあるパケットを受信した際、そのパケットを破棄して再送要求を行う Basic Hybrid Automatic Repeat reQuest (Basic HARQ) が用いられてきた。しかし、無線区間の状態が悪い場合、何度再送を行っても伝送誤りが発生してしまい、通信品質が低下してしまう。そこで、次世代の移動体通信システムでは、誤りのあるパケットを受信しても、受信側はそれを保持し、再送されたパケットと合成することによって誤り回復を行うパケット合成型 Hybrid ARQ (Hybrid ARQ with packet combining: HARQ with PC) の技術が必須とされている。しかし、Evolved UTRA and UTRAN ネットワークを対象とした、パケット合成型 HARQ の TCP 伝送特性への有効性はまだ調査されていない。

そこで本稿では、Basic HARQ を比較対象とし、Evolved UTRA and UTRAN ネットワーク上でパケット合成型 HARQ を使用した場合の TCP の伝送特性について、コンピュータシミュレーションを用いて評価する。特に、Basic HARQ を利用した場合にはほとんど通信が行えない受信状態の悪いユーザに着目し、パケット合成型 HARQ が各ユーザの TCP の通信品質に与える影響について調査する。さらに、パケット合成型 HARQ がユーザ間の公平性に与える影響についても併せて調査する。

まず 2 章では、Evolved UTRA and UTRAN ネットワークを構成する各技術について説明する。3 章では、本研究で利用したシミュレーションモデルについて説明し、4 章ではシミュレーション結果を示す。最後に、5 章でこの論文をまとめる。

2. Evolved UTRA and UTRAN

本節では、Evolved UTRA and UTRAN ネットワークを構成する各技術について説明する。まず 2.1 節で、Evolved UTRA and UTRAN におけるパケット通信の仕組みについて説明する。次に 2.2 節で、無線基地局のスケジューリング機構について、その役割と仕組みについて説明し、2.3 節で、パケット合成型 HARQ の特徴と仕組みについて説明する。

2.1 Evolved UTRA and UTRAN におけるパケット通信

Evolved UTRA and UTRAN は、3G の技術を大幅に拡張し、下り最大 100Mb/s の通信速度を実現する次世代の移動体通信システムである。この通信システムでは、高速な通信を達成するために、周波数帯域幅を W-CDMA が採用している 5MHz から最大 20MHz まで拡張することや、変調方式に Orthogonal

Frequency Division Multiplexing (OFDM) を使用することなどが検討されている [1]。

Evolved UTRA and UTRAN の詳細な仕様は現在策定中であるが、High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) を拡張した技術が Evolved UTRA and UTRAN となるため、基本的な仕様は HSDPA から引き継がれると考えられる。そのため本稿では、基本的な仕様は HSDPA に従うこととする。以下に、HSDPA におけるパケット通信の大まかな仕組みを述べる。HSDPA ネットワークにおける無線基地局では、TCP/IP プロトコルスタックにおけるデータリンク層に位置する Radio Link Control (RLC) 層と Media Access Control (MAC) 層の仕様が規定されている [2]。RLC 層では、パケット伝送誤りを軽減するための通信制御を行う。具体的には、IP データグラムに相当する Service Data Unit (SDU) は、RLC 層で固定サイズの複数の RLC Protocol Data Unit (RLC PDU) に分割され、MAC 層に渡される。このようにトランスポート層のセグメントに比べて小さなサイズの PDU を使用することにより、細粒度の制御が可能となる。無線基地局では PDU 単位で再送制御が行われ、移動局では SDU の到着順序の反転を防ぐために SDU の到着順序制御が行われる。MAC 層では、移動局の受信状態に応じた適切な変調方式 (MCS: Modulation and Coding Scheme) の選択や、パケットスケジューリング等の通信制御が行われる。

2.2 無線基地局のスケジューリング機構

Evolved UTRA and UTRAN では、複数のユーザで共有する高速共通チャネルを利用してパケット通信を行う。高速共通チャネルは Transmission Time Interval (TTI) ごとに時分割で使用され、TTI 毎のユーザの割り当ては、無線基地局に設けられたスケジューリング機構が行う。そのため、動的に状態が変動する無線環境において効率的に無線資源を利用するためには、各ユーザに無線資源を割り当てるスケジューリング機構の役割が重要であり、これまでに様々な研究がなされている [2] [3] [4]。

以下で、代表的なスケジューリング機構について説明する。ここでは、TTI はスロットと呼ぶことにする。あるスロット n におけるユーザ m のユーザ選択指標を $M_m(n)$ と定義すると、スケジューリング機構は各スロット毎に $M_m(n)$ が最大となるユーザに無線資源を割り当てる。ただし、スロット n で複数のユーザの $M_m(n)$ が等しい場合は、その中から任意のユーザを選ぶこととする。

Maximum Carrier-to-Interference power Ratio (Max CIR) 機構

Max CIR 機構は、総スループットの最大化を目的とし、各スロットで最も受信強度の高いユーザを選択する機構である。今回は、受信強度の代わりに、ユーザ m の可用転送速度 $R_m(n)$ を選択指標として用いた。このため、Max CIR 機構を用いた場合、

$$M_m(n) = R_m(n)$$

となる。

Proportional Fairness (PF) 機構

PF 機構 [3] [4] は、総スループットとユーザ間のスループットの公平性を同時に考慮した有力な機構である。この機構では、各

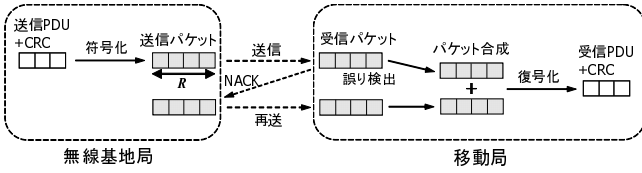


図 1 Type-I HARQ with packet combining の動作

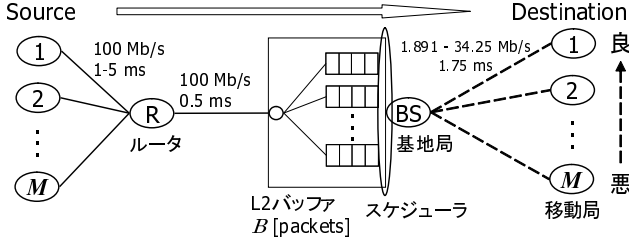


図 2 トポロジーモデル

ユーザの平均スループットと可用転送速度を比較し、過去あまり通信を行っていないユーザに対して、受信状態が良い時にスロットを割り当てる．また、PF 機構は、近似的に Proportional Fairness [5] を満たす．PF 機構では、ユーザ m の平均スループット $T_m(n)$ を用いて、

$$M_m(n) = \frac{R_m(n)}{T_m(n)}$$

と定義される．ここで、スロット n で選択されたユーザを m^* とすると、各ユーザの平均スループット $T_m(n)$ は、次のように定義される．

$$T_m(n+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_m(n) + \frac{1}{t_c} R_m(n) & \text{if } m = m^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_m(n) & \text{if } m \neq m^* \end{cases}$$

なお、本稿では、 $t_c = \min(n, c)$ とし、 $c = 1000$ とした．また、 $T_m(1) = \min_{m,n} R_m(n)$ とした [2] ．

2.3 パケット合成型 HARQ

本稿では、パケット合成型 HARQ として、パケット合成に Chase combining [6] を用いる Type-I HARQ with packet combining を使用する．Chase combining は、無線リンクの状態が悪く、無線基地局が送信した全てのパケットに誤りが含まれるような状況下でも、移動局がすでに受け取ったパケットと無線基地局から再送されたパケットをビット毎に比較し、統計的に処理することによって誤りを回復して通信を行えるようにする技術である．そのため、伝送誤りが頻繁に起こる受信状態の悪いユーザにとって特に効果的である [6] ．

図 1 に Type-I HARQ with packet combining の基本的な仕組みを示す [7] ．まず、無線基地局は、送信 PDU に誤り検出のための Cyclic Redundancy Check (CRC) チェックビットを付加したビット列を、符号化率 R で符号化し、移動局へ送信する．移動局は受信したパケットを復号化した後、CRC を用いて誤り判定を行う．もし誤りが検出されれば、Negative ACKnowledgement (NACK) を無線基地局に送る．この時、誤りの含まれているパケットは、移動局内に設けられたバッファに保持される．NACK を受け取った無線基地局は、1 回目の送

表 1 変調方式・符号化率と可用転送速度

MCS	変調方式	符号化率	転送速度 [Mb/s]
1	QPSK	1/8	1.891
2	QPSK	1/4	3.793
3	QPSK	1/2	7.6
4	QPSK	2/3	10.13
5	16QAM	1/2	15.22
6	16QAM	2/3	20.29
7	64QAM	1/2	22.83
8	64QAM	2/3	30.45
9	64QAM	3/4	34.25

信時と同じパケットを再送する．その後、移動局は保持しておいたパケットと再送されたパケットをビット毎に合成し、復号化した後に再び CRC チェックを行う．誤りが検出されれば再び NACK を無線基地局に送り、誤りが検出されなければデータが正しく届いたことになる．なお、無線基地局からの再送処理は、あらかじめ決められた再送回数の上限値まで行うことができ、それでも誤りが回復しない時にはパケットが破棄される．

3. シミュレーションモデル

今回のシミュレーションで使用するトポロジーモデルを図 2 に示す．なお、シミュレータとして、TCP の性能評価に広く用いられている VINT プロジェクトの Network Simulator (Version 2.27) [8] を独自に拡張したものを使用する．有線のアクセスリンク (Source - R) の転送速度は 100Mb/s とし、伝送遅延時間は、TCP の同期を防ぐために 1ms - 5ms の間で一樣に変化させる．コアリンク (R - 無線基地局 (BS)) の転送速度は 100Mb/s とし、伝搬遅延時間は 0.5ms とする．無線基地局 (BS) から移動局 (Destination) へのリンクは無線リンクとし、その転送速度は表 1 に示した MCS に従って、1.891Mb/s - 34.25Mb/s の間を変動する．無線リンクの伝搬遅延時間は、無線基地局および移動局の処理遅延を含めて 1.75ms とする．また、TCP トラヒックとして、Source から Destination へ向けて無限のデータを連続して転送する greedy トラヒックを使用する．TCP のアルゴリズムは、現在インターネットで広く用いられている NewReno とし、TCP のパケットサイズは、IP ヘッダも含めて 1500 バイトとする．また、RLC PDU のサイズは 42 バイトとし、そのヘッダサイズは 2 バイト、ペイロードサイズは 40 バイトとする [2] ．無線基地局は、到着した TCP パケットを RLC PDU に分割し、ユーザ毎に設けられた L2 バッファにそれぞれバッファリングする．そのバッファサイズは B パケット分とする．また、PDU の最大再送回数は 10 回とする．移動局において、SDU 到着順序のミスオーダーが生じた場合、SDU の整合性を保つために、未到着の SDU が到着するまで到着している組み立て可能な SDU を上位層に渡さない．この時、組み立て可能な SDU は移動局に設けられた順序再送用のバッファにバッファリングされる．その最大待ち時間は WT (Waiting Timeout) とする．今回、総スループットが最大となるような B と WT の値を発見的に調査した結果、 $B=40$ パケット、 $WT=7ms$ が最適であることが分かった．本稿では、以後のすべてのシミュレーションでこの値を用いる．シ

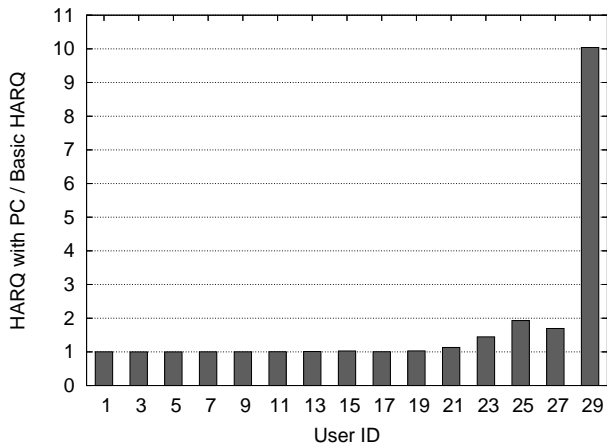


図 3 パケット合成型 HARQ 使用時のスループット / Basic HARQ 使用時のスループット

シミュレーションでは、30 ユーザ分の受信 Signal-to-Interference plus background Noise Ratio (SINR) 値の変動ファイルを用いて、各ユーザの無線リンクの状態変化を再現する。評価対象としたセルは、3 セクタ化された正六角形 19 セル群の中心セルである。また、無線リンクには、6-path GSM Typical urban モデルを使用する。ドップラー周波数は 5.55Hz とし、距離減衰は 3.76 乗則に従うこととする。シャドウイングは、標準偏差は 8dB とし、相関距離は 50m とする。以上の設定を用いて 120 秒間のシミュレーションを行う。

なお、本稿では評価対象として、各ユーザの TCP のスループットと、ユーザ間の公平性に着目する。ユーザ間の公平性としては、PF 機構が着目しているユーザ間のスループットの公平性ではなく、各ユーザがスケジューリング機構から選択された回数の公平性に着目する。複数ユーザが存在する通信環境においてユーザ間の公平性について議論する場合、通常はユーザのスループットに着目するが多い。しかし、Evolved UTRA and UTRAN ネットワークでは、各ユーザの受信状態によって最適な MCS が決定され、それによって可用転送速度が表 1 に示すように 1.891Mb/s – 34.25Mb/s の間を変動する。このように、受信状態の良いユーザと悪いユーザのスループットには本質的に大きな差が生じるため、Evolved UTRA and UTRAN ネットワークでは、ユーザ間のスループットの公平性について議論することは無意味である。そこで本稿では、無線資源を公平に割り当てることがユーザ間の公平性につながると考え、各ユーザがスケジューリング機構から選択された回数の公平性について議論する。

4. シミュレーション結果

まず 4.1 節で、セル内に 1 ユーザのみが存在する環境でシミュレーションを行い、パケット合成型 HARQ が TCP のスループットに与える効果について調査する。次に 4.2 節で、複数のユーザが存在する環境を想定してシミュレーションを行い、パケット合成型 HARQ がスケジューリングに与える影響について調査する。

4.1 パケット合成型 HARQ の基本特性

本節では、受信状態の良いユーザから順に User 1, User 2,

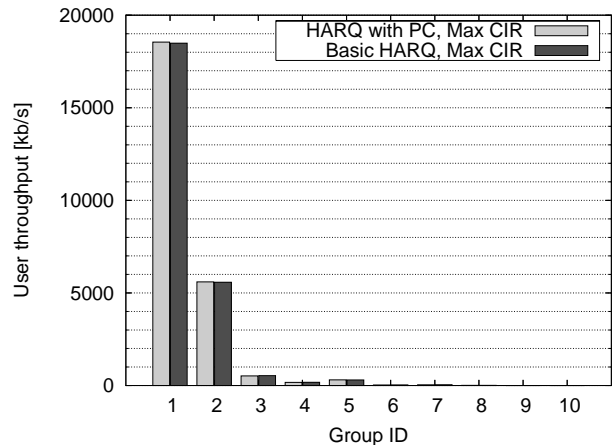


図 4 各グループのスループット (Max CIR 機構)

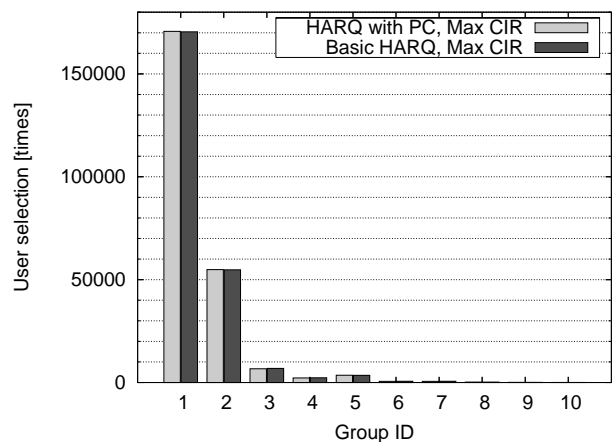


図 5 各グループがスケジューリング機構によって選択された回数 (Max CIR 機構)

..., User 30 と ID を振り、セル内に 1 ユーザのみが存在する環境でユーザ毎に 100 回シミュレーションを行い、スループットの平均値を調査する。この場合、スケジューリング機構から選択されるユーザは 1 人しかいないため、どのスケジューリング機構を使っても常に同じ 1 人のユーザが選択される。ゆえに、スケジューリング機構は性能に影響を与えず、パケット合成型 HARQ が TCP 伝送特性に与える純粋な効果を見ることができる。図 3 に、パケット合成型 HARQ を使用した時のスループットを、Basic HARQ を使用した時のスループットで正規化した値を示す。この値が 1 に近い時は、Basic HARQ とパケット合成型 HARQ のスループットにほとんど差がないことを示し、値が大きくなるほどパケット合成型 HARQ の効果があることを示す。図 3 より、受信状態の悪いユーザほど、パケット合成型 HARQ を使用することによってスループットが改善していることが分かる。これは、2.3 節で述べたように、受信状態の悪いユーザほどパケット合成による誤り率改善の効果が大きいからである。

4.2 パケット合成型 HARQ がスケジューリングに与える影響

次に、セル内に複数のユーザが存在する環境において、パケット合成型 HARQ が TCP の伝送特性やスケジューリング

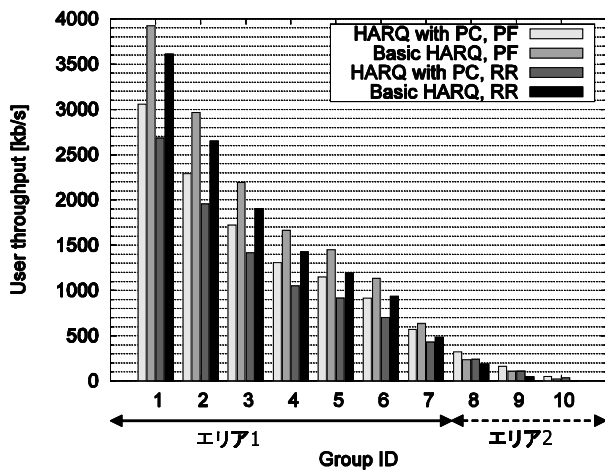


図 6 各グループのスループット (PF, RR 機構)

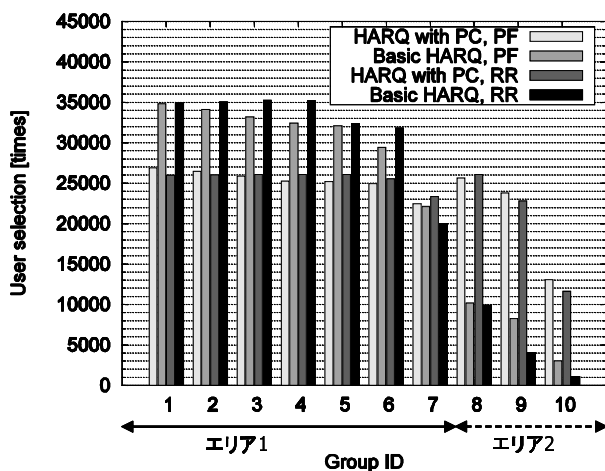


図 7 各グループがスケジューリング機構によって選択された回数 (PF, RR 機構)

に与える影響について調査する。なお、スケジューリングアルゴリズムとして Max CIR 機構, PF 機構の評価を行う。また, PF 機構との比較対象として, 無線リンク状態などを考慮せず均等にユーザを選択する Round Robin (RR) 機構の評価も行う。ここでは, 30 ユーザの中から, 受信状態の良いユーザから順に 3 ユーザずつ, 10 個のユーザのグループに分け, それぞれ Group 1, Group 2, ..., Group 10 とする。そして, 各グループから 1 ユーザを毎回ランダムに選択して 100 回シミュレーションを行う。

まず, スケジューリング機構に Max CIR 機構を使用した場合の packets 合成型 HARQ の効果について調査する。Max CIR 機構を使用した場合の各グループのスループットの平均値を図 4 に, 各スケジューリング機構, 再送方式を用いた場合の総スループットを表 2 に示す。また, 各グループがスケジューリング機構によって選択された回数の平均値を図 5 に示す。図 4 を見ると, packets 合成型 HARQ と Basic HARQ のどちらを用いた場合でも, 受信状態の良いグループ (Group 1, Group 2) が高いスループットを示すことが分かる。これは, Max CIR 機構は総スループットを最大化することを目的としているので, 図 5 のように, 受信状態の良い Group 1, Group 2 に選択が集

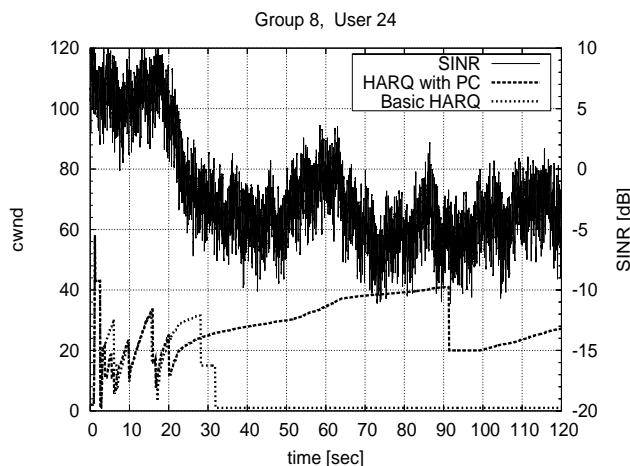


図 8 User 24 の受信 SINR 値の変動とウィンドウサイズの変化

表 2 総スループット [Mb/s]

	Basic HARQ	パケット合成型 HARQ
Max CIR	25.160	25.223
PF	14.312	11.534
RR	12.419	9.522

中してしまうためである。また, Basic HARQ と packets 合成型 HARQ の性能を比較すると, 図 4 の各グループのスループット, 表 2 の総スループットは共にほぼ同じ値であることが分かる。これは, 4.1 節の図 3 で示したように, 受信状態の良いユーザは packets 合成型 HARQ の効果が小さいので, 受信状態の良いユーザばかり選択される Max CIR 機構を用いた場合は, Basic HARQ を使用した時との性能の差がほとんど現れないからである。

次に, PF 機構を使用した場合の packets 合成型 HARQ の効果について調査する。PF 機構と, 比較対象の RR 機構を使用した場合の各グループのスループットを図 6 に, 各グループがスケジューリング機構によって選択された回数を図 7 に示す。PF 機構と RR 機構のスループット特性を比較した場合, 表 2 の総スループット, 図 6 の各グループのスループット共に, PF 機構の方が良好な値を示していることが分かる。これは, RR 機構は何も考慮せずにユーザを選択しているのに対し, PF 機構は各ユーザの受信状態を考慮してスケジューリングを行うため, 無線資源を効率的に利用できているためである。また, 表 2, 図 6 より, PF 機構と RR 機構を用いた場合の両方とも, 総スループットや Group 1 - Group 7 (エリア 1) のスループットは, Basic HARQ を使用した時の方が良好な特性を示している。一方, Group 8 - Group 10 (エリア 2) は, packets 合成型 HARQ を使用した時の方が高いスループットを示している。これは, 各ユーザがスケジューリング機構によって選択された回数に起因する。図 7 を見ると, Basic HARQ を使用した場合, エリア 2 のグループの選択回数は少なく, エリア 1 のグループの選択回数は多いことが分かる。エリア 2 の選択回数が少ない理由は, TCP のフロー制御が関係している。図 8 に, 受信状態の悪いユーザの例として, エリア 2 の Group 8 に属する User 24 の受信 SINR 値変動と TCP のウィンドウサイズの変化を示す。図 8 より, Basic HARQ を使用した場合, User

表 3 ユーザの選択回数の balance index

	Basic HARQ	パケット合成型 HARQ
Max CIR	0.176	0.176
PF	0.800	0.970
RR	0.753	0.963

24 は受信状態の良い 0~30 秒の間のみ通信ができており、30 秒を過ぎた辺りからウィンドウサイズが 1 となることが分かる。ウィンドウサイズが 1 の間は Source からパケットがほとんど送信されず、基地局に設けられた User 24 用の L2 バッファは空となり、User 24 がスケジューリング機構から選択されることはなくなる。受信状態の悪い他のユーザにも同様のことが言え、Basic HARQ を使用した場合は、図 7 のように受信状態の良いユーザ（エリア 1）と悪いユーザ（エリア 2）の間で、選択回数に大きな差が生じる。一方、パケット合成型 HARQ を使用するとパケットの伝送誤りを回復できるため、図 8 のように 30 秒以降の受信状態が悪い状態においてもウィンドウサイズが増加し通信が行える。それにより、基地局の L2 バッファは空にならず、他のユーザと同等に選択される。以上のことから、受信状態が悪く、Basic HARQ を利用した場合にはほとんど通信が行えなかったユーザが、パケット合成型 HARQ を利用することによって通信が可能となることが分かる。

最後に、ユーザ間の公平性について調査する。3 章で述べたように、本稿では、各ユーザがスケジューリング機構から選択された回数の公平性に着目する。なお、各ユーザの選択回数の公平性を示す指標として、balance index を使用する。balance index の値は次式で与えられ、この値が 1 に近いほど公平であると言える。

$$\text{balance index} := \frac{\left(\sum_{m=1}^M S_m\right)^2}{M \sum_{m=1}^M S_m^2}$$

ここで S_m は、シミュレーション中にユーザ m がスケジューリング機構から選択された回数を表し、 M は全ユーザ数を表している。各スケジューリング機構、再送方式を用いた場合の balance index を表 3 に示す。表 3 より、Max CIR 機構を使用した場合、受信状態の良好なユーザのみにスロットが割り当てられるため、balance index の値は非常に低く、ユーザ間の公平性に問題があることが分かる。一方、PF 機構を用いた場合、割り当てを均等に行う RR 機構よりも balance index の値が多少高いことから、公平性は高いと言える。また、PF 機構を用いた場合、図 7 から分かるように、Basic HARQ を使用した場合よりも、パケット合成型 HARQ を使用した場合の方がユーザ間の選択回数の較差が少ないため、表 3 の balance index の値が高くなっている。これより、パケット合成型 HARQ を使用することによってユーザ間の選択回数の公平性が向上することが分かる。

5. ま と め

本稿では、次世代の移動体通信システムである Evolved UTRA and UTRAN ネットワーク環境において、従来の再送方式である Basic HARQ を比較対象として、パケット合成型 HARQ を使用した時の TCP 伝送特性の評価を行った。まず、1

ユーザのみが存在する環境を想定して、パケット合成型 HARQ の基本特性をシミュレーションにより評価した。その結果、パケット合成型 HARQ を用いることによって PDU 送信時の誤り率が改善し、Basic HARQ と比較して、特に受信状態の悪いユーザのスループットが改善することを明らかにした。次に、10 ユーザが存在する環境を想定してシミュレーションを行った。その結果、PF 機構や RR 機構を用いた場合、Basic HARQ を使用した時と比較して、パケット合成型 HARQ を使用した時の方が受信状態の悪いユーザのスループットが改善することを明らかにした。また、受信 SINR 値の変動が TCP のウィンドウサイズに与える影響を調査し、受信状態が悪く、Basic HARQ を使用した場合ほとんど通信が行えなかったユーザが、パケット合成型 HARQ を使用することによって通信が可能となることを明らかにした。最後に、各スケジューリング機構、再送方式を使用した場合の選択回数の公平性について調査した。その結果、PF 機構は、RR 機構以上の選択回数の公平性を実現しており、さらに、パケット合成型 HARQ を組み合わせることによって受信状態の悪いユーザのスループットが改善し、ユーザ間の公平性が向上することを明らかにした。

本稿では、TCP トラヒックとして、無限のデータを連続して転送する greedy トラヒックを使用した。今後の課題として、より現実のネットワーク環境に近いトラヒックモデルを使用して評価を行う予定である。

文 献

- [1] 3GPP, “Proposed study item on Evolved UTRA and UTRAN,” *TSG-RAN meeting #26*, RP-040461, December 2004.
- [2] Y. Ohta, M. Tsuru, and Y. Oie, “Fairness property and TCP-level performance of unified scheduling algorithm in HSDPA networks,” *3rd European Conference on Universal Multiservice Networks*, LNCS 3262, Springer, pp. 185–195, October 2004.
- [3] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, “Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system,” *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference 2000 (Spring)*, pp. 1854–1858, May 2000.
- [4] P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia, “Opportunistic beamforming using dumb antennas,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277–1294, June 2002.
- [5] F. Kelly, “Charging and rate control for elastic traffic,” *European Transactions on Telecommunications*, vol. 8, no. 1, pp. 33–37, January 1997.
- [6] D. Chase, “Code combining—a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 33, no. 5, pp. 385–393, May 1985.
- [7] N. Miki, H. Atarashi, S. Abeta, and M. Sawahashi, “Comparison of throughput employing Hybrid ARQ packet combining in forward link OFCDM broadband packet wireless access” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, no. 2, pp. 594–603, February 2005.
- [8] VINT Project, Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.