

研究速報

UR 方式における被中継パケット重複送信回避及び送信電力制御

賈 中寧[†] (学生員) 六浦 光一^{††} (正員)
 半田 志郎[†] (正員) 秋月 治^{†††} (正員)
 大下眞二郎[†] (正員)

Avoidance of Duplicated Relayed Packets and Transmission Power Control for User Relay Scheme

Zhongning JIA[†], Student Member, Kouichi MUTSUURA^{††},
 Shiro HANDA[†], Osamu AKIZUKI^{†††},
 and Shinjiro OSHITA[†], Regular Members

[†] 信州大学工学部, 長野市

Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato,
 Nagano-shi, 380-8553 Japan

^{††} 信州大学経済学部, 松本市

Faculty of Economics, Shinshu University, 3-1-1 Asahi,
 Matsumoto-shi, 390-8621 Japan

^{†††} 宮城大学事業構想学部デザイン情報学科, 宮城県

School of Project Design, Miyagi University, 1 Gakuen
 Taiwa-cho, Kurokawa-gun, Miyagi-ken, 981-3298 Japan

あらまし 利用者中継方式における中継端末での被中継パケットの重複送信回避法, 被中継端末の送信電力制御法を提案する. シミュレーション結果により, 提案方式の有効性が実証された.

キーワード 移動通信, 利用者中継方式, チャンネル利用効率, 送信電力制御

1. まえがき

移動通信における従来の接続方式では, 固定割当接続 (Fixed-Assignment Access) 方式が採用されている. しかし, 音声通信, 対話的なデータ通信及び動画像などのブロードバンド伝送において, 相当なアイドル区間が存在し [1]~[4], チャンネルの利用効率は極めて低い. チャンネルの利用効率を改善するため, 筆者らは「利用者中継方式: UR (User Relay) 方式」を提案した [5], [6].

UR 方式では, 実時間性要求度の低いデータ通信を行う端末 (被中継端末) は基地局との間で呼設定を行わず, 一つの共用チャンネル (中継チャンネル) を介して, ランダムアクセス方式で, 基地局と直接通信中の端末 (中継端末) にパケットを送信する. 被中継端末の近傍に中継端末が存在する場合, その中継端末は被中継端末のパケット (被中継パケット) を受信, 蓄積, そして, 自端末の非送信区間を利用して, 基地局に伝送する. 基地局では, 制御用ダウンリンクチャンネルを通じて, 被中継パケットの ACK 信号をサービス区域に放送する. これにより, 被中継端末は, 個々のパケットの中継成功を確認する.

UR 方式では, 被中継パケット送出の際には, 特定の中継端末ではなく, その周りの受信条件を満足するすべての中継端末が, パケットを中継できる. したがって, 被中継端末の近傍に条件を満足する多数の中継端末が存在する場合, 同一パケットが複数の中継端末に受信されることになる. これにより, 少なくとも一つの中継端末にパケットが受信される可能性が高まる. しかしながらそれに伴い, 同一パケットの重複送信を招き, チャンネルの利用に悪影響を及ぼす. この問題を解決するために, 本論文では, 被中継パケットの重複送信回避法 ADRP (Avoidance of Duplicated Relayed Packets) を提案する.

一方, 被中継端末は中継チャンネルを介してランダムアクセス方式で, あらかじめ想定した中継半径内に存在する中継端末に対してのみ, 通信可能となるように設定した送信電力で, 近傍の中継端末に向けパケット送信を行う. このとき, 中継半径が呼損率, 平均遅延時間など性能に大きく影響する. したがって, パケット送出の際に, 被中継端末がいかに適当な中継半径を選定するかが, 実際の通信システムにとって, 極めて重要である. この問題を解決するために, 本論文では, 被中継端末の送信電力制御法 TPCM (Transmission Power Control Method) を提案する.

2. 被中継パケットの重複送信回避

上述のように, UR 方式では, 被中継パケットの重複送信問題が存在する. 例として, 図 1 に示すように, 仮にあるパケット P_0 が, 三つの中継端末 A, B, C に受信され, 各自の中継バッファに蓄積される. 図 1 の状況において, パケット P_0 は中継端末 A から送出された後, 他の二つの同じものが依然として, 中継端末 B, C のバッファに保存されている. これらは, 各端末の非送信時間を利用して, 基地局へ中継され, 重複

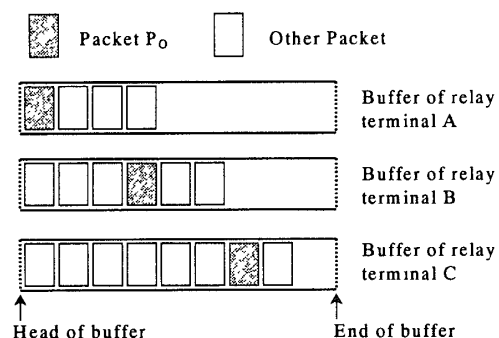


図 1 中継端末 A, B, C に受信, 蓄積された同一パケット
 Fig 1 Same packet is received and stored by relay terminals A, B and C

送信が生じる。基地局では重複パケットの排除を行うが、基地局の負担も増大し、不必要な重複送信はチャネルの利用時間を占有するため、他の被中継パケットの送にも悪影響を及ぼす。すなわち、パケットの重複送信により、遅延やバッファあふれを生じ、被中継端末による再送信を引き起こし、遅延時間及び呼損率特性の劣化を招く。この問題を解決するために、下記の被中継パケットの重複送信回避法を提案する。

被中継パケットを受信した基地局は、その端末番号とパケット番号を含んだ ACK 情報を、制御用ダウンリンクチャネルを通じて、サービス区域に放送形式で伝送する。したがって、中継端末は被中継端末と同様に各被中継パケットの ACK 信号を監視できる（シミュレーションにおいては、受信誤りを無視して全中継端末で 100% 確実に受信されるものと仮定する）。このため、中継端末は被中継パケットの ACK 信号を観測し

て、バッファに蓄積された各被中継パケットに対して、ACK 信号と一致するパケットを検出したとき、そのパケットが既に他の中継端末で無事に中継されたことが判明するので、そのパケットを直ちにバッファから削除する。

図 2, 図 3 には、計算機シミュレーションにより、被中継パケット重複送信回避を用いる方式と用いない方式の呼損率、遅延時間の特性を示す。シミュレーションにおいて、表 1 のパラメータを用いた。ここで、 R は中継半径であり、文献 [6] での方法及び 3.1 の検討により、最適値として 150 m とした。なお、中継バッファサイズが大きすぎる場合、多数の被中継パケットがバッファの中にたまり、過大な遅延と被中継パケットの再送を誘引する。このことを考慮して、中継バッファサイズは 10 パケットに制限した。図 2, 図 3 により、被中継パケット重複送信回避を用いない場合と比較して、標準的上限呼損率として考えられている 0.03 の値 [7] となる許容トラヒックは、ADRP なしの方式での 1.135 Erl から、ADRP 方式での 1.215 Erl へ、約 7% の増大が認められる。また、平均遅延時間の減少量はトラヒックが 0.95~1.27 Erl において、約 150~200 ms となり、呼損率、遅延時間ともに改善されることがわかる。これは被中継パケット重複送信回

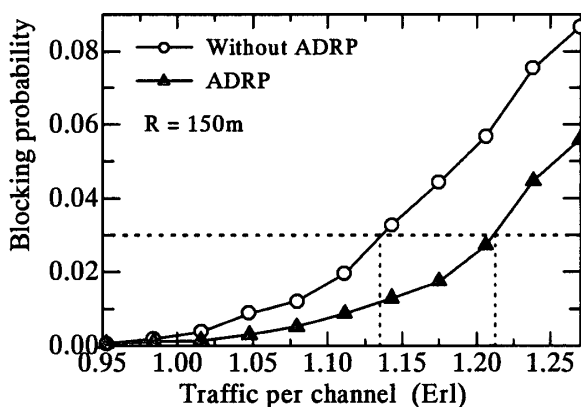


図 2 被中継パケット重複送信回避を用いる方式と用いない方式の呼損率
Fig. 2 Blocking probability for ADRP and without ADRP.

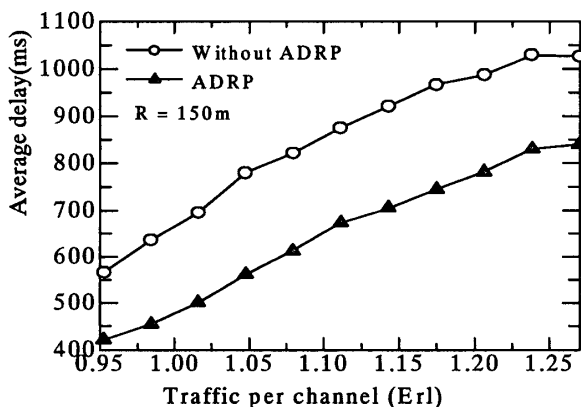


図 3 被中継パケット重複送信回避を用いる方式と用いない方式の平均遅延時間
Fig. 3 Average delay for ADRP and without ADRP.

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

基地局サイズ	1 km×1 km の正方形
トータルチャネル数	105
固定割当てチャネル数	101
帯域幅比 [5], [6]	4
捕そく比 [5], [6]	12 dB
音声呼の保留時間	平均 3 分の指数分布
音声呼の待機時間	平均 15 分の指数分布
データ呼の保留時間	平均 12 分の指数分布
データ呼の待機時間	平均 60 分の指数分布
音声呼の有声区間	平均 1 秒の指数分布
音声呼の沈黙区間	平均 1.35 秒の指数分布
データパケットの生起	毎秒平均 3 パケットのポアソン分布
パケット伝送時間	中継チャネル: 25 ms
	固定割当てチャネル: 100 ms
端末分布	2 次元一様分布
端末移動速度	最大値 25 km/h のランダム値
距離減衰係数	2 0
シミュレーション時間	60 h
データ端末数: 音声端末数	1:1
中継用バッファ容量	10 パケット
パケット再送平均待ち時間	平均 700 ms の指数分布
固定割当て接続移行への最大待ち時間	8000 ms
固定割当てチャネル占有比	0.85

避法を行うことによって、不必要なパケット重複送信によるチャネル利用時間の無駄を軽減して、パケット衝突が更に緩和されたからである。

3. 被中継端末の送信電力制御

UR方式では、所定トラフィック量のもとで、呼損率、平均遅延時間などの性能は中継半径内に存在する端末数に大きく依存する [5], [6]。実際の通信システムでは、通信中の端末数（中継端末及び被中継端末）が時間的に変動する。したがって、被中継端末はパケット送出の際に、固定中継半径を用いると、中継半径内の端末数は時間的に変動するので、中継機能が十分に発揮されない。図4に示すように、過小な中継半径においては、被中継端末の送信圏内に中継端末が存在することが頻繁に発生して、パケットの反復再送信を引き起こす。逆に、過大な中継半径においては、被中継端末の送信圏内に多数の中継端末が存在するが、他の被中継端末からの干渉により、パケット衝突が多発して、先ほどと同様に、パケットの反復再送信をもたらす。なお、基地局のサービス区域の面積は市街地、郊外地、開放地など地域環境により異なる。この場合、依然として固定中継半径を採用すれば、総通信端末数が一定の場合でも、中継半径内の端末数は、基地局のカバーする面積により異なってくる。このため、呼損率、平均遅延時間など評価指標の特性は基地局のサービス区域の面積により、激しく変動する。これらの要因を考慮すれば、被中継端末がパケットを送出する際には、通信中の端末数に応じた中継半径を選択し、所要送信電力でパケット送出を行うことが極めて重要となる。そこで、下記の送信電力制御法を提案する。

3.1 被中継端末の所要送信電力

所定通信トラフィック量のもとでの、呼損率、平均遅

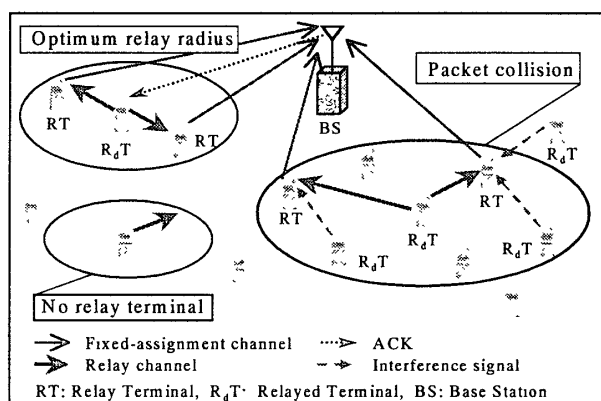


図4 中継半径が中継機能に与える影響
Fig. 4 Effect of relay radius on relay performance

延時間と中継半径内に存在する端末数（通信中の端末数及び待機中の端末数） N_{RR} の関係はそれぞれ図5、図6に示される。シミュレーションにおいて、従来のUR方式のもとで、被中継パケット重複送信回避法を用い、表1のパラメータを使った。Trafficはチャネル当りのトラフィック量を表す。以下、図5と図6に関する考察により被中継端末の所要送信電力を求める。

呼損率と N_{RR} の関係を考察し、図5に示す呼損率特性を目視により、二つの区域に分割する（縦の点線で境界を示す）。図5より、境界線の左側では、 N_{RR} の減少に伴い中継半径内の中継端末数が減少して、呼損率の特性が急激に劣化する。逆に、境界線の右側では、 N_{RR} の増加に伴い呼損率の変化はトラフィックの度合いに応じ、緩やかな増加となり、比較的広い範囲内で、良好な呼損率特性が得られている。一方、図6に

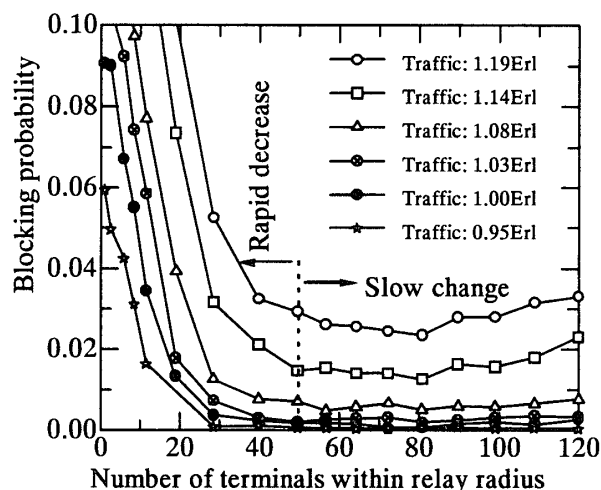


図5 中継半径内の端末数が呼損率に与える影響
Fig. 5 Effect of number of terminals within relay radius on blocking probability

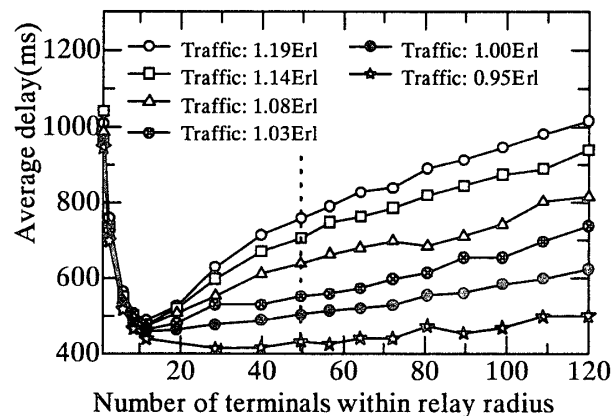


図6 中継半径内の端末数が平均遅延時間に与える影響
Fig. 6 Effect of number of terminals within relay radius on average delay

より、被中継パケットの遅延時間は、呼損率の境界とした N_{RR} より小さい値から増加に転じて、境界線の右側では、 N_{RR} の増加に伴い過大な値となることがわかる。

上記の呼損率、遅延時間と N_{RR} の関係より、呼損率が良好となる境界の右側の範囲内で、遅延が最も小さくなる N_{RR} 、すなわち境界線上の N_{RR} ($\doteq 50$) を、被中継端末がパケット送出を行うときの最適な N_{RR} と考え、それを N_{opt} と書く。ちなみに、表1のパラメータでは、 N_{opt} と対応する最適な中継半径は約 150 m となる。

実際の通信の際には、通信中の端末数が変動するため、良好な呼損率、遅延時間特性を得るためには、被中継端末は端末密度の時間的変動に適応する最適な中継半径 R_{opt} と対応する送信電力で、パケット送出を行う必要がある。基地局は通信中の端末数を把握できるため、実際の通信中の端末数に基づき、 N_{opt} に対応する中継半径内に存在する通信中の端末数を満足する最適な中継半径 R_{opt} を算出できる。

上記の考え方に基づき、実際の通信の際には、基地局は通信中の端末数 N_{act} により、以下の式で

$$\lambda H N_{opt} = \frac{N_{act}}{S} R_{opt}^2 \pi \quad (1)$$

N_{act} に対応する最適な中継半径 R_{opt} を算出して、 R_{opt} に対応する所要送信電力を各被中継端末に放送する。式(1)の左辺： $\lambda H N_{opt}$ は N_{opt} に対応する中継半径内の通信中の端末数の期待値を表す。 λ は端末呼の平均生起率、 H は呼の平均保留時間、 S は基地局のサービス区域の面積である。こうして、被中継端末はパケット送出の際には、基地局に要求された所要送信電力で、パケット送出を行う。被中継端末の送信エリアを最適な中継半径 R_{opt} の円形区域と定義して、所要送信電力は、他の被中継端末からの干渉パケットがない場合、その送信エリアの円周部に位置する中継端末で、ぎりぎり受信できるような送信電力を意味する。また、前記の受信電力を中継端末の所要受信電力と呼ぶ。被中継端末が所要送信電力でパケット送出を行うことにより、送信圏内に最適な端末数 N_{opt} が存在することを期待できる。

本論文で提案する送信電力制御方式では、基地局は、通信中の端末密度の時間的変動により、被中継端末に異なる所要送信電力を指定する。同一の基地局に属するすべての被中継端末はそれぞれの時刻で、同じ送信電力でパケット送出を行う。送出したパケットが中継

半径内の中継端末に受信されるか否かは、次式で示す捕そく比 C_a により決定される。

$$C_a = 10 \log \left(\frac{P_C}{P_I} \right) \quad (2)$$

$$P_C = P_r \left(\frac{R_{opt}}{R_C} \right)^\alpha \quad (3)$$

$$P_I = \sum_k P_r \left(\frac{R_{opt}}{R_{i,k}} \right)^\alpha \quad (4)$$

ただし、 P_C は中継端末に到着する注目する被中継パケットの電力、 P_I は他のすべての干渉パケットの総電力和（干渉範囲は基地局全域と設定した）、 P_r は中継端末の所要受信電力、 R_C は注目する被中継端末と中継端末間の距離、 $R_{i,k}$ は中継端末と k 番目の干渉端末間の距離、 α は電波伝搬距離減衰係数 ($\alpha = 2.0$) である。デジタル通信では、捕そく比の代表的な値として、12 dB が想定される [8]。

3.2 シミュレーション結果とその考察

UR 方式における送信電力制御の目的は、端末密度の時間的変動に適応する中継半径を選定して、良好な呼損率、遅延時間特性を図ることである。したがって、ここでは、シミュレーションにより、端末密度の変化に伴う、送信電力制御方式の性能を評価する。

実際の通信システムでは、各基地局に属する端末数は時間的に変動する。このため、各基地局は常に円滑な通信を確保するために、動的チャネル割当方式により、通信需要に応じたチャネル数を割り当てられる [7]。ここでは、送信電力制御方式と固定中継半径方式の性能を比較評価するために、シミュレーションにおいて、送信電力制御を用いる場合、所定の呼損率 2.5% を確保できるような所要通信チャネル数を、基地局に動的に割り当てる。一方、固定中継半径方式に対して、基地局の利用可能なチャネル数は同じ端末数（端末密度）の場合、送信電力制御方式を用いたときの同じ値を使う。なお、シミュレーションにおいて、正方形基地局のエリアエッジ付近に存在する被中継端末に対して、そのカバー範囲は所属基地局のエリア内の領域に制限した。他のパラメータは表1の値を使った。また、中継端末の受信条件として、捕そく比 $C_a \geq 12$ dB の場合、注目する被中継パケットが中継端末に中継され、逆の場合、廃棄される。

図7、図8には、送信電力制御方式及び固定中継半径方式の呼損率、平均遅延時間の特性を示す。ここで、横軸は端末密度、 R は固定中継半径である。固定中継半径は 2. と同じ値、 $R = 150$ m を用いた。

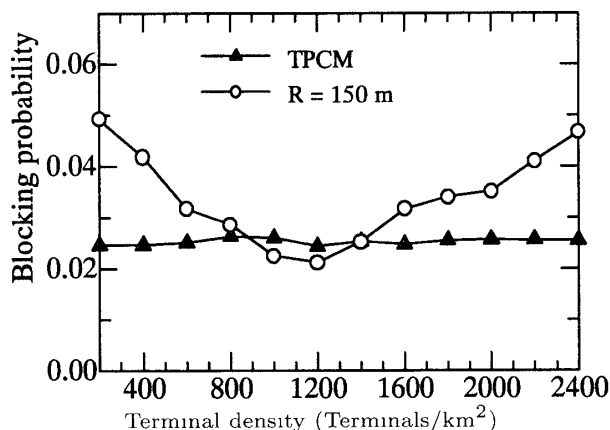


図7 送信電力制御方式と固定中継半径方式の呼損率
Fig 7 Blocking probability for transmission power control and fixed relay radius.

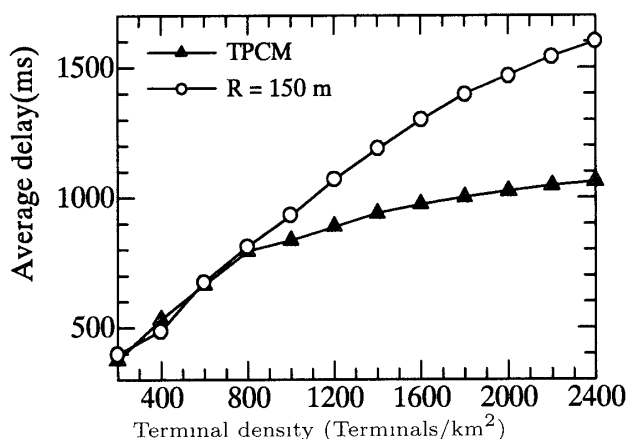


図8 送信電力制御方式と固定中継半径方式の平均遅延時間
Fig 8 Average delay for transmission power control and fixed relay radius

図7, 図8により, 固定中継半径方式と比較して, 送信電力制御法を行うことにより, 呼損率, 遅延時間ともに, 大幅な特性の改善が認められる. 送信電力制御方式では, 呼損率が一定となるよう, 端末密度に対応したチャネル数を供給しているが, その同一チャネル数において, 固定中継半径の呼損率の性能は, 端末密度の低い領域及び高い領域のいずれにおいても, 大幅に劣化している. すなわち, 固定中継半径方式では, 端末密度の小さい領域において, 中継半径内の中継端末数が不足するため, 呼損率性能の劣化を引き起こす. 逆に, 端末密度の大きい領域においては, パケット衝突により, 呼損率, 遅延時間ともに, 性能の劣化をもたらす. なお, 図7では, 固定中継半径の呼損率が, 特

定の範囲で優れている. これは, 送信電力制御方式が式(1)に従った制御を行っているのに対して, 固定中継半径では図5, 図6により局所的な最適値を個別に求めているためである. しかも, この範囲における両者の差は極めてわずかである.

4. むすび

UR方式の性能向上を目的として, 中継端末での被中継パケットの重複送信回避法, 被中継端末の送信電力制御法の二つの改善方式を提案し, 動作特性を検討した. 被中継パケットの重複送信回避を行うことにより, 呼損率, 遅延時間など特性の改善が可能である. また, 送信電力制御法を適用することにより, 通信中の端末数の変動による呼損率, 遅延時間の性能の劣化, 基地局のカバー面積の差異が呼損率の性能に与える悪影響など実際上の問題を解決できる. 提案方式の有効性はシミュレーション結果により, 確認された.

謝辞 本研究を行うにあたり, 懇切な御教示を賜った元信州大学教授 近藤昭治先生, 信州大学助手 笹森文仁博士, 研究の御協力をして下さった信州大学大学院 嘉田寛幸氏に深く感謝致します.

文 献

- [1] W C Y. Lee, *Mobile Communications Engineering Theory and Applications*, second ed., pp.533-540, McGraw-Hill, 1998
- [2] T S Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, second ed., p.563, Prentice Hall, 2002.
- [3] 瀬戸崇志, 上原利幸, 赤岩芳彦, “予約パケット伝送セルラシステムにおける動的チャネル割当方式,” 信学論 (B), vol.J82-B, no 3, pp.386-392, March 1999.
- [4] S.-C Yeh, J-S Wu, and Y-C Liang, “Integrated video and voice transmission using packet reservation multiple access,” *Int J Commun Syst.*, vol 14, pp 95-104, 2001
- [5] Z-N. Jia, K Mutsuura, O. Akizuki, Y-T Chin, S Handa, and S Oshita, “Improvement of channel efficiency in mobile communications by user relay scheme,” *ITC-CSCC 2002*, pp.1447-1450, 2002.
- [6] 賈 中寧, 六浦光一, 秋月 治, 半田志郎, 大下眞二郎, “利用者中継方式による移動通信のチャネル利用率の改善,” 信学論 (B), vol J86-B, no 1, pp 21-30, Jan 2003
- [7] 笹岡秀一, *移動通信*, pp 138-147, オーム社, 1998
- [8] T.S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, second ed., pp 469-474, Prentice Hall, 2002.

(平成 15 年 1 月 9 日受付, 4 月 24 日再受付)