

基地局ダイバーシティを利用した TCP 無線接続に関する一検討

内藤 克浩^{†a)} 岡田 啓^{††} 山里 敬也^{††} 片山 正昭^{††}

A Study for Wireless TCP Access with Base Station Diversity

Katsuhiro NAITO^{†a)}, Hiraku OKADA^{††}, Takaya YAMAZATO^{††},
and Masaaki KATAYAMA^{††}

あらまし 無線環境からの TCP を利用したインターネット接続では、TCP の特性が劣化し通信がほとんど行えなくなることが知られている。本研究では、無線端末が自らの無線環境と TCP の特性を評価することで、複数の基地局に接続するセルラーシステムを提案する。また、提案システムでの TCP の特性について検討を行う。結果より、TCP の特性は基地局ダイバーシティを利用することにより大幅に改善する。そして、提案する接続基地局選択手法を利用することで、無線資源を不必要に利用することも避けることができる。更に、TCP の特性を改善するためには、要求される TCP の特性をもとに、適切なセル半径を決定する必要があることを示す。

キーワード TCP, インターネット, セルラーシステム, ダイバーシティ

1. ま え が き

近年の無線通信技術の発展に伴い、無線通信環境からのインターネットアクセスに対する需要は増加している。しかし、インターネットアクセスで利用される多くのプロトコルは既存のインターネットを構成する有線ネットワークの特徴に最適化されている [1], [2]。そのため、無線ネットワークで既存のプロトコルを利用した場合、多くの弊害が発生することが知られている。

TCP (Transmission Control Protocol) は信頼性プロトコルとして多くのインターネットアプリケーションから利用されているが、無線ネットワークからの利用では、無線通信環境における伝送誤りによって、その特性が急激に劣化することが知られている [3], [4]。無線ネットワークで TCP を利用した場合、無線ネットワークで頻繁に発生する伝送誤りによるセグメント損を、TCP はネットワークのふくそうと誤って判断す

る。そして、本来帯域は十分確保されている場合においても、TCP は自ら送信を抑制する動作を行う。その結果、データの転送はほとんど行われないう状態になる [7] ~ [10]。

無線環境では TCP の特性が急激に劣化することから、既存の研究では無線環境に最適化させた TCP の設計を行った検討 [2], [11], TCP コネクションを無線区間と有線区間で分離することで特性改善を行った検討 [12], [13], 無線区間において FEC (Forward Error Correction) や ARQ (Automatic Repeat reQuest) などを利用することにより、無線区間での TCP に対するセグメント損率を低くし、特性を改善させる検討 [14] ~ [16] が提案されている。また、これらの無線環境において TCP の特性改善を行う検討では、1 個の基地局に無線端末が接続して通信を行っている状況を主に考えている。

一方、高速化、小電力化を図るためには、通信エリアを比較的小規模で運用するマイクロセルラーシステムが考えられている [5], [6]。マイクロセルラーシステムでは、通信エリアであるセルのサイズが小さく、多数の無線基地局が配置されている。そのため、状況によっては無線端末が複数の無線基地局の電波を受信可能であることが予想される。

そこで、本研究では、無線端末が無線環境の状態を評価することで、複数の無線基地局に接続する基地局

[†] 名古屋大学大学院工学研究科, 名古屋市

Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 名古屋大学情報メディア教育センター, 名古屋市

Center for Information Media Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: naito@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

ダイバーシチシステムの提案を行う．複数のアンテナを利用するダイバーシチシステムは既に検討が行われているが，これらの検討ではビット誤り率に対する評価のみを行っている [17]．本研究では，複数の基地局からの信号を受信することによるダイバーシチ効果を利用することで，無線リンクでの伝送誤りの軽減を行い TCP の特性改善を目指す．更に，無線端末がどの基地局に対して接続を行うのかは，無線端末が自らの無線環境と TCP の特性との関係性を評価することにより決定する点が大きな特徴である．提案する基地局ダイバーシチを利用したシステムが，TCP の特性にどのように影響するのかについて検討を行う．

2. 基本となるシステムモデル

本研究では，無線ネットワークの利用形態として，WWW や FTP を利用したインターネットアクセスを考える．このような状況では，多くのデータ転送はサーバからクライアントへのダウンリンク側の通信として行われる．そこで，本研究ではインターネット上に存在する固定端末から無線ネットワーク上に存在する無線端末へパルク転送が行われる状況を考える．

次に，前提とするセルラー無線システムを図 1 に示す．このセルラーシステムは基地局管理局と複数の基地局から構成される．基地局管理局は各基地局の通信の制御とインターネット上のホストとの接続を行う．よって，すべての通信は基地局管理局を通して行われる．また，各セルには隣接セルとは異なるチャネル資源が割り当てられており，基地局管理局は無線端末に対して，どのチャネルを利用して基地局と通信を行うのかを制御する．よって，各無線端末には異なるチャ

ネルが割り当てられるため，無線端末間での干渉は起きないものとする．更に，隣接セルでは異なるチャネル資源を利用しているため，隣接セル間でのチャネル干渉も発生しないものとする．

検討対象としている無線システムは複数の建物などが存在する中で利用される状況を考える．そのため，無線環境としては，複数の建物などが存在する条件をモデル化したレイリーフェージング環境を想定する．また，平均の受信電力は距離の増加に対して，累乗的に減衰する．

3. 提案システムの原理

セルラーシステムを考えた場合，セルの中央部では無線端末の受信電力は高く，セルの境界部に向かうに従い，平均受信電力は低下する．一方，TCP のスループットは受信電力の低下に対して線形に特性が劣化するのではなく，ある時点から急激に劣化する．そのため，1 基地局にのみ接続を行っている場合，セルの境界部付近では受信電力が低下するため，TCP の特性を良好な状態で維持できない状況が発生する可能性がある．また，無線端末が移動している際に受信電力が大きく変動するフェージングなどが発生した場合，TCP の特性は大幅に劣化する．

これらの問題に対して，基地局を密に配置することにより，セル境界部での電力低下に対する改善は可能である．しかし，基地局を密に配置した場合，同一エリアを網羅するために必要となる基地局数が大幅に増加してしまう．その上，フェージングによる影響は受信電力を高くするだけでは解決することが困難である．

そこで，無線端末が複数の基地局に接続を行うことで，基地局ダイバーシチを利用するシステムを提案する．以下にその提案システムについて述べる．

3.1 基地局ダイバーシチを利用した通信

基地局ダイバーシチを利用するために，提案システムでは図 1 に示すように，各基地局が基地局管理局により管理されている状況を考える．このシステムでは，インターネット上のホストとの通信を行う場合，必ず基地局管理局を通して通信を行う．そのため，基地局管理局が各無線端末が接続する基地局を把握することが可能であれば，基地局ダイバーシチを利用することが可能となる．

そして，無線端末が基地局ダイバーシチを利用するためには，各基地局から受信したフレームの SNR を推定するとともに，各ビットの軟判定値を一時的に格

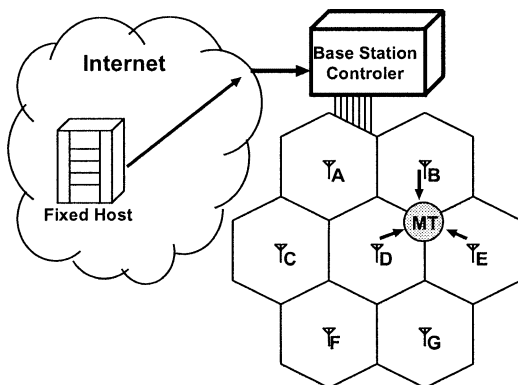


図 1 システムモデル
Fig. 1 System model.

納する必要がある。次に、接続基地局からのフレーム受信がすべて完了した時点で、格納されていた各フレームの SNR と軟判定値を利用することで、フレームのデータを最大比合成して復号する。このような動作を行うことで、無線端末は複数基地局を利用したダイバーシチ効果を得る。

基地局ダイバーシチを利用することにより、TCP の特性を改善することができると予想されるが、TCP は無線環境がどれだけ良好な状態であっても、受信バッファサイズ以上のデータを一度に送信することはない。そのため、TCP が要求する無線環境以上の状況をシステムが提供しても、TCP の特性はそれ以上には改善しない。

そこで、本研究では TCP の特性と無線環境を評価することにより、接続する基地局数を変化させる基地局ダイバーシチシステムの提案を行う。提案システムでは、基地局管理局が接続基地局を決定するのではなく、無線端末が無線環境と TCP の特性との関係性を評価することにより、接続基地局数を決定する点が大きな特徴である。なお、どのように接続基地局数を決定するのかについては次の節で述べる。

無線端末が接続基地局数の決定を行うため、決定された接続基地局名は基地局管理局に通知される必要がある。そこで、無線端末はこの接続基地局名をアップリンクの通信に付加して送信を行う。なお、この接続基地局名を接続基地局リストと呼ぶことにする。

3.2 接続基地局数の決定方法

本研究では、無線端末が接続を行う基地局を選択するために、各基地局からの受信電力と TCP スループットとの関係を利用する。無線端末は TCP の特性が良好な無線環境では、1 基地局にのみ接続を行って通信を行う。一方、TCP の特性を維持するために不十分な無線環境では、複数の基地局に対して接続を行う。複数の基地局に対して接続を行うことで、無線端末は受信電力を増やすことができるだけでなく、基地局を利用したダイバーシチ効果により、フェージングが発生している状況でも特性改善を行うことが可能となる。

無線端末がどの基地局に対して接続を行うのかを決定するためには、無線端末が各基地局からの SNR (Signal to Noise Ratio) と接続基地局数の関係を知っている必要がある。ここで、無線端末が同時に接続可能な基地局数は事前に決定されているものとする。以下では、この接続可能な基地局数が 3 である場合を例

に SNR と接続基地局数の関係を示す。

まず 1 基地局のみに接続を行っている場合の SNR と TCP の最大スループットで正規化したスループットの関係を計算機シミュレーション等により表 1 のように求める。表 1 は TCP の受信バッファサイズが 16 セグメント分であり、1 基地局のみに接続を行い TCP を利用した通信を行った場合の、SNR と正規化スループットの関係である。次に、2 基地局に接続を行っている場合の SNR と TCP の正規化スループットの関係を表 2 のように求める。表 2 は表 1 と同様に TCP の受信バッファサイズが 16 セグメント分であり、2 基地局に同時に接続した場合に、各基地局からの SNR と正規化スループットの関係である。表 1、表 2 において、TCP の受信バッファサイズを考慮するのは、TCP は最大でも受信バッファサイズのデータしか同時に送信しないためである。そのため、TCP のスループットの上限は受信バッファサイズにより制限される。また、受信バッファサイズが大きな値になるに従って、TCP のスループットを維持するのに必要とする受信電力は、高くなる傾向になるためである。

以上により求めた各基地局からの SNR と正規化スループットの関係から接続基地局数を決定する。まず、無線端末は平均 SNR が最も大きい基地局のみに接続を行った場合に、しきい値以上の平均スループットが期待できるのかを表 1 を利用して判定する。しきい値以上の平均スループットが期待できる場合は、1 基

表 1 接続基地局数が 1 個の場合の受信電力と TCP の正規化スループット特性

Table 1 Normalized TCP throughput versus SNR with 1 connected base station.

スループット	基地局 1 の SNR				
	40[dB]	41[dB]	42[dB]	43[dB]	44[dB]
	0.657	0.721	0.782	0.826	0.866

表 2 接続基地局数が 1 個の場合の受信電力と TCP の正規化スループット特性

Table 2 Normalized TCP throughput versus SNR with 1 connected base station.

基地局 2 の SNR		基地局 1 の SNR				
		20[dB]	21[dB]	22[dB]	23[dB]	24[dB]
2	20[dB]	0.462	0.531	0.599	0.680	0.739
	21[dB]		0.603	0.668	0.736	0.795
	22[dB]			0.739	0.797	0.840
	23[dB]				0.836	0.872
	24[dB]					0.878

地局のみに接続を行う。一方、しきい値以下の平均スループットしか期待できない場合、無線端末は表 2 を利用することで、平均 SNR が 1 番目に大きな基地局と 2 番目に大きな基地局の 2 基地局に接続した場合に、2 基地局に接続するだけでしきい値以上のスループットを期待できるのか、3 基地局に接続を行う必要があるのかを決定する。そして、2 基地局に接続するだけではしきい値以上の平均スループットが期待できない場合、必ず 3 基地局に接続を行う。しかし、3 基地局に接続した場合に、しきい値以上の平均スループットを期待できるのかについて無線端末は判断していない。提案システムでは、最大接続基地局数が事前に決まっていると仮定している。そのため、3 基地局に接続を行った際に、しきい値以上の平均スループットを維持できるのかは、各基地局からの距離が最も遠くなる、セル境界点での平均スループット特性をしきい値以上に保証することで可能だと思われる。セル境界点での TCP の特性と SNR の関係については、5. の数値例で議論する。

本研究では、各無線端末の TCP のスループットをどのように維持するのかという観点で検討を行っている。そのため、システム設計者は TCP のスループットがどの程度まで劣化してもよいのかを許容値として決定する。例えば、最低スループットを最大スループットの 7 割以上に維持させたい場合は、この許容値を 0.7 とする。許容値を 0.7 とした場合、1 基地局のみに接続を行うには、表 1 から 41[dB] の SNR が必要になることが分かる。また、表 2 から許容値に当てはまる条件をもとに、表 3 のような各基地局の SNR と接続基地局数の関係を求める。

実際に接続基地局数を決定する場合は、無線端末は各基地局からの SNR を高い順に並べ、表 3 を参照す

ることで、接続基地局数を決定する。このように提案システムは、表 3 のような簡単な表を参照するだけで、接続基地局数を容易に決定することが可能となる。また、同時に接続可能な基地局数が 3 以外の場合においても、同様の方法で接続基地局数を決定することが可能である。

4. 提案システムの動作

本章では提案システムにおいて実際にどのように通信が行われるのかについて次に述べる。なお、本研究では、インターネット上のサーバに無線端末が接続する状況を主に検討対象としている。そのため、TCP のデータセグメントはダウンリンクで通信が行われ、アップリンクでは TCP の ACK セグメントのみ通信が行われるものとする。そのため、本章での記述ではダウンリンクのみの表で接続基地局数を制御した記述となっている。一方、アップリンク、ダウンリンクで双方向の通信が行われ、アップリンクとダウンリンクで異なる無線特性が見込まれる状況では、アップリンク、ダウンリンクのそれぞれについて接続基地局数を決定する表を作成する必要がある。

4.1 接続基地局の選択

前章で提案システムの原理と接続基地局数の決定方法について述べたが、本節ではその動作について述べる。

(1) 基地局の受信電力の測定

無線端末は接続可能な基地局が存在した場合、一定間隔ごとに受信電力の測定を行う。そして、測定値の平均から各基地局の平均 SNR を推定する。

(2) 平均受信電力による順序付け

無線端末は平均 SNR が大きい順に基地局の順序付けを行う。

(3) 接続基地局数の決定

無線端末は事前に決定された表 3 などを参照することで接続基地局数を決定する。例えば、許容値が 0.7 の場合において、基地局 1 の SNR が 23[dB]、基地局 2 の SNR が 21[dB]、基地局 3 の SNR が 15[dB] とする。このとき、無線端末は表 3 を参照し、基地局 1 の SNR が 21[dB] の場合、基地局 2 の SNR は 21[dB] 必要であることを知る。そのため、この例の場合は条件を満たすために、接続基地局数は 2 個に決定される。

(4) 接続基地局リストの基地局管理局への通知

無線端末は現在利用している接続基地局リストと新たに決定した接続基地局リストが異なったとき、アッ

表 3 受信電力と接続基地局数の関係
Table 3 The number of connected base station versus SNRs.

		基地局 1 の SNR				
		20[dB]	21[dB]	22[dB]	23[dB]	24[dB]
基地局 2 の SNR	20[dB]	3	3	3	3	2
	21[dB]		3	3	2	2
	22[dB]			2	2	2
	23[dB]				2	2

プリリンクの通信を行う際に、新たな接続基地局リストの送信を行う。

4.2 固定端末から無線端末へのデータの配送方法

(1) 基地局管理局の処理

基地局管理局がインターネット上のホストから無線端末へのデータを受信した場合、基地局管理局は各無線端末とその接続基地局リストを参照することで、必要数のデータ複製を行った上で各基地局にデータの送信を行う。

(2) 基地局の処理

基地局は基地局管理局から受信したデータを無線端末に対して送信を行う。

(3) 無線端末の処理

無線端末は希望した基地局からのフレーム受信を待つ。無線端末は各基地局から受信したフレームの SNR を推定するとともに、各ビットの軟判定値を一時的に格納する。希望していた基地局すべてからのフレーム受信が完了した時点で、格納されていた各フレームの SNR と軟判定値を利用することで、フレームのデータを最大比合成して復号する。

4.3 無線端末から基地局へのデータの配送方法

(1) 無線端末の処理

無線端末は自らが決定し所持している接続基地局リストを参照する。次に、参照情報をもとに、無線端末は必要数のフレームの複製を行い、各基地局に送信を行う。

(2) 基地局の処理

基地局は無線端末から受信したフレームについて、フレームの SNR を推定するとともに、各ビットの軟判定値を含む受信フレーム情報を基地局管理局に送信する。

(3) 基地局管理局の処理

基地局管理局は基地局からの受信フレーム情報を一時的に格納する。その後、自らが所持している接続基地局リストに登録されている基地局からの受信フレーム情報がそろった時点で、フレームの情報を最大比合成することで復号する。復号されたデータはインターネット上の固定端末に向けて送信される。

5. 数 値 例

提案方式の特性を検討するにあたり、無線端末がセル内でどのような位置にいるのかを図 2 に示す 2 種類の状況に分けて考える。図 2 において、状況 1 は無線端末が 2 個の基地局間を直線上に移動する場合であ

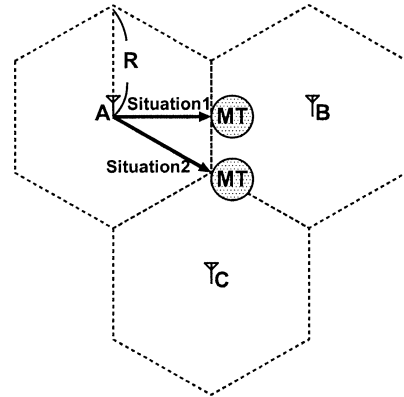


図 2 無線端末の移動シチュエーション
Fig. 2 Situation of a wireless terminal movement.

る。状況 1 では、無線端末と基地局 A、基地局 B との距離は最も短くなるが、無線端末と基地局 C との距離は基地局 A、基地局 B との距離に比べ長くなる状況である。次に、状況 2 は無線端末が 3 個の基地局が構成するセルの交点に向かって直線に移動する場合である。状況 2 では、無線端末と基地局 B、基地局 C との距離が同じ状況である。

また、接続基地局数が 1 個の場合には、無線端末は基地局 A と通信を行い、接続基地局数が 2 個の場合には、無線端末は基地局 A、基地局 B と通信を異なったチャネルで行う。そして、接続基地局数が 3 個の場合には、無線端末は基地局 A、基地局 B、基地局 C と各々異なったチャネルで通信を行うものとする。

無線環境としては、レイリーフェージングを想定する。無線端末の移動速度は歩行速度程度を想定し、受信電力はフレームごとに独立に変動するものとする。そして、平均電力は距離の増加に対して 3.5 乗で減衰するものとし平均 SNR は基地局から 1[m] の場所で 80[dB] とした。

次に、仮定した無線システムについて述べる。まず、無線リンクでの変調方式を BPSK (Binary Phase Shift Keying) とし、帯域は 2M[bit/s] とする。次に、TCP セグメントのサイズはデフォルトの 536[byte] とする。インターネットにアクセスする場合を考えているため、TCP セグメントは IP データグラムにカプセル化されて送信されるものとする。そのため、無線リンクで送信するデータ長は TCP セグメントと IP ヘッダの合計 576[byte] となる。また、受信者のバッファ容量は TCP セグメント 16 個と同量とする。IP

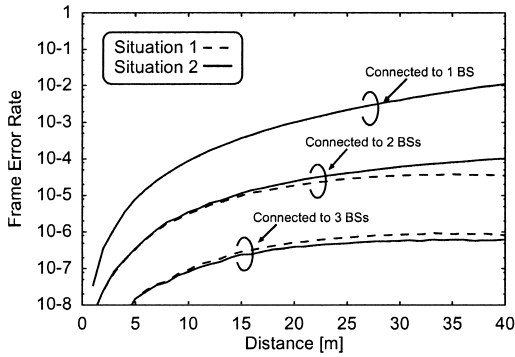


図 3 フレーム誤り率と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 40[m])
 Fig. 3 Frame Error Rate versus distance with a cell radius equals to 40[m].

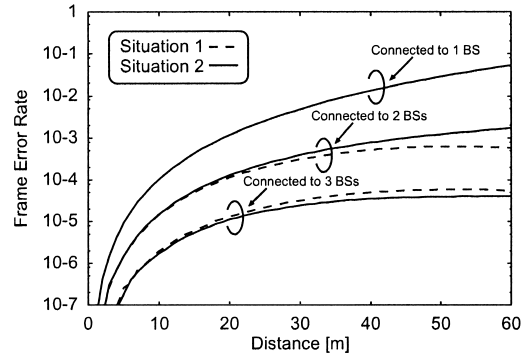


図 4 フレーム誤り率と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 60[m])
 Fig. 4 Frame Error Rate versus distance with a cell radius equals to 60[m].

データグラムは無線リンクで送信される際に 127[bit] のフレームに分割されて送信されるものとする。そのため、1 個の IP データグラムは 37 個のフレームに分割される。TCP の ACK セグメントは IP データグラムにカプセル化され、6 個のフレームに分割される。なお、無線リンクではフレーム損に対する再送制御などは行っていない。そのため、TCP セグメント、ACK セグメントのどちらについても、IP データグラムを構成する複数のフレームのうち 1 フレームでも損失した場合、IP データグラムは破棄されるものとする。また、無線端末と固定端末間の RTT (Round Trip Time) は 100[ms] とする。

なお、提案システムの数値例では、TCP スループットのしきい値は 0.7 とした。しきい値を 0.7 としたのは、TCP の正規化スループットが 0.7 程度維持可能な場合、文献 [18] においてタイムアウトの発生確率を非常に低く可能であることが示されているためである。タイムアウトは通信の一時中断に繋がるため、これをもとにしきい値を決定した。

まず、提案システムで利用する基地局ダイバーシティは各基地局からの平均 SNR が異なっている条件であるため、基地局と無線端末間の 1 対 1 でダイバーシティを利用する場合とは特性が異なる。そこで、図 3、図 4 にフレーム誤り率と基地局 A からの距離の関係を示す。図 3、図 4 より、基地局 A からの距離が離れるほど FER は劣化していくが、接続基地局数が多いほど FER の劣化は少なくなることが確認できる。これは、基地局 A からの距離が離れた場合、基地局 B、C への距離は逆に近くなる。そのため、基地局ダイバーシティ

を利用した場合には、基地局 A の平均 SNR の減少分は基地局 C、B の平均 SNR の増加分として相殺することができるためである。

次に、基地局ダイバーシティの TCP スループットへの影響を考える。そこで、TCP の正規化スループットと基地局 A からの距離の関係について、セル半径が 40[m] の場合を図 5 に、セル半径が 60[m] の場合を図 6 に示す。ここで、正規化スループットとは受信バッファサイズによって決定される TCP の最大スループットを用いてスループットを正規化した値である。図 5、図 6 には、提案システムの特性を太線で示している。ここで、平均 SNR を求めるための観測期間は 50[ms]、無線端末は静止しているものとする。また、基地局ダイバーシティの効果を検討するために接続基地局数を固定にした場合についても細線で示した。

まず、無線環境での TCP 本来の特性を示す接続基地局数が 1 個だけの場合、TCP のスループット特性はセルの中心部のみで良好な特性を示し、中間部よりも外側のエリアでは、その特性は急激に劣化することが確認できる。このような劣化が発生する理由としては、TCP はセグメント損失率の増加に対して、自らセグメントの送信を止める動作を行うためである。

一方、接続基地局数を 2 個にした場合、状況 1 の方が状況 2 よりも良好な特性を示している。このような差が出る原因としては、状況 1 の方が状況 2 に比べて、無線端末と基地局 A、B との距離が近いためと考えられる。また、このことは、状況 2 は距離が増加するに従いスループット特性も劣化する一方、状況 1 はある距離からは劣化し続けていたスループット特性が改善

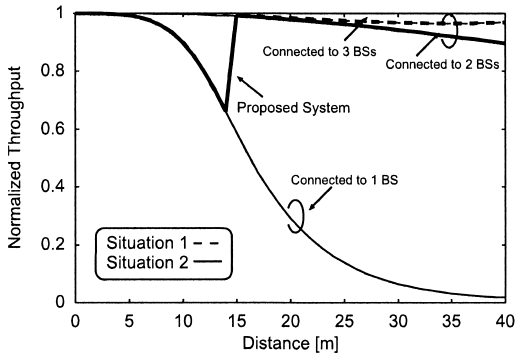


図 5 TCP スループット特性と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 40[m])

Fig. 5 Normalized TCP throughput versus a distance from a base station with a cell radius equals to 40[m].

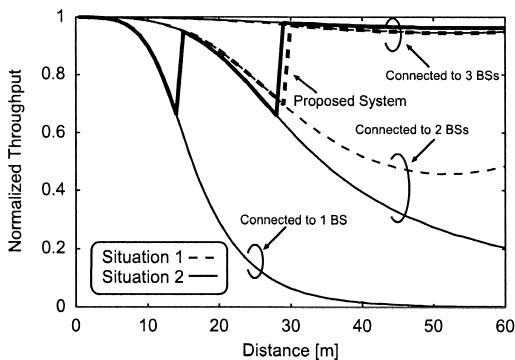


図 6 TCP スループット特性と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 60[m])

Fig. 6 Normalized TCP throughput versus a distance from a base station with a cell radius equals to 60[m].

していることから確認できる。このようになる理由は状況 1 の場合、セル半径に達する前に隣接セル内に入るため、基地局 A からの受信電力は低下するが、基地局 B からの受信電力が増加するためと考えられる。

また、接続基地局数を 3 個にした場合、状況 2 の方が状況 1 に比べて良好な特性を示している。このようになる理由は、状況 1 は無線端末と基地局 A、B の距離は短くできる一方で、無線端末と基地局 C との距離はそれほど短くならない。一方、状況 2 の場合、セル境界部では、無線端末と基地局 A、B、C の距離は等しくなるため、ダイバーシチ効果が最も発揮される状況になるためと考えられる。

そして、提案システムに基づき接続基地局数を動的に変更した場合、図 5 では、セル半径が短いために、

セル境界部においても接続基地局数を 2 基地局で対応しているのが確認できる。一方、図 6 では、セル半径が長いためにセル境界部では、3 基地局に接続することで TCP のスループットを維持していることが確認できる。TCP は伝送路の状況が優れた場合でも、受信バッファサイズにより最大スループットは制限されている。そのため、TCP の要求以上の伝送路特性を無線システムが提供する必要はない。提案した接続基地局数の選択手法を利用することにより、TCP の特性を事前に指定した値以上に維持することができる上に、不必要なチャネル資源の利用を防ぐことが可能となる。

なお、図 5 と図 6 を比較すると、セル半径を増加させた場合、TCP のスループット特性は基地局ダイバーシチを利用しても大きく下がってしまうことが分かる。そのため、提案システムを利用する場合、所望性能に対して適切なセル半径を決定し、基地局を設置することが重要となる。

TCP のスループット特性は無線端末へのデータ転送量に直接影響するため重要である。一方、データ転送にかかる時間を考えた場合、ファーストリトランスミットの発生では送信データ量を半減させ、タイムアウト発生時は送信を一時的に行わなくなるため、TCP のファーストリトランスミットとタイムアウトの特性は重要な意味をもつ。そこで、1 セグメントを送信するために、何回のファーストリトランスミットが発生したのかと基地局 A と無線端末の距離の関係について、セル半径が 40[m] の場合を図 7 に、セル半径が 60[m] の場合を図 8 に示す。図 7、図 8 には、図 5、図 6 と同様に接続基地局数を固定にした場合と、接続基地局数を動的に変化させた場合について示す。

図 7、図 8 からセル半径に関係なく、接続基地局数を 2 個とした場合では、状況 1 の方が状況 2 に比べファーストリトランスミットの発生回数は少なく、接続基地局数を 3 個とした場合では、状況 2 の方が状況 1 に比べてファーストリトランスミットの発生回数は少なくなることが確認できる。このことから、接続基地局数に応じて TCP の特性に対する最適な位置は変化することが分かる。なお、図 8 において接続基地局数が 1 個の場合、ファーストリトランスミット発生回数が距離の増加に対して、増加後減少している。このような結果になる理由としては、距離が増加した場合、スループットはほぼ 0 の状態であるため、タイムアウトは発生してもファーストリトランスミットが発

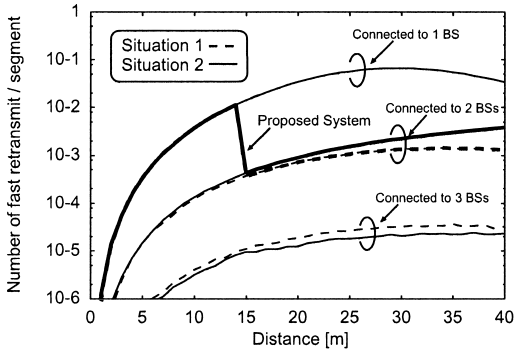


図 7 1 セグメント当りの TCP のファーストリトランスミット発生回数と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 40[m])

Fig. 7 The number of fast retransmit for each segment versus a distance from a base station with a cell radius equals to 40[m].

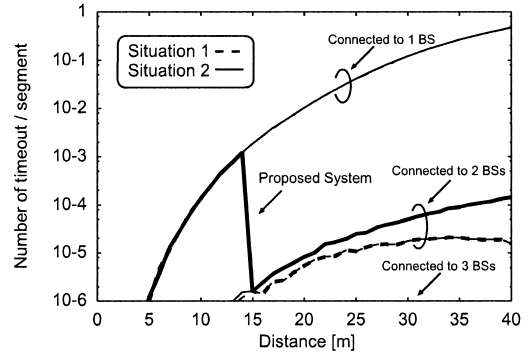


図 9 1 セグメント当りの TCP のタイムアウト発生回数と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 40[m])

Fig. 9 The number of timeout for each segment versus a distance from a base station with a cell radius equals to 40[m].

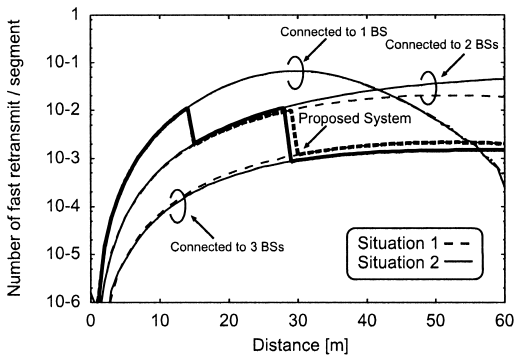


図 8 1 セグメント当りの TCP のファーストリトランスミット発生回数と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 60[m])

Fig. 8 The number of fast retransmit for each segment versus a distance from a base station with a cell radius equals to 60[m].

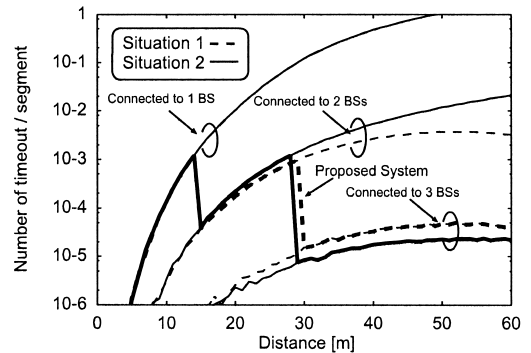


図 10 1 セグメント当りの TCP のタイムアウト発生回数と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 60[m])

Fig. 10 The number of timeout for each segment versus a distance from a base station with a cell radius equals to 60[m].

生する状態に TCP が達することができないためと考えられる。

そして、1 セグメントを送信するために、何回のタイムアウトが発生したのかと基地局 A と無線端末の距離の関係について、セル半径が 40[m] の場合を図 9 に、セル半径が 60[m] の場合を図 10 に示す。図 9、図 10 には、図 5、図 6 と同様に接続基地局数を固定にした場合と、接続基地局数を動的に変化させた場合について示す。

図 9、図 10 を比較すると、タイムアウトの発生回数はセル半径が変わった場合、ファーストリトランスミットの発生に比べより大きな変化が起ることが確認できる。タイムアウトが発生した場合、一時的に通

信を行わなくなるため、タイムアウトの影響はファーストリトランスミットに比べ大きなものである。そのため、タイムアウトの発生回数を減少させる意味でも適切なセル半径の設定は重要であることが確認できる。

提案システムは接続基地局の選択のために、各基地局の平均 SNR 情報を必要とする。しかし、平均 SNR は各基地局の SNR 情報を観測することからしか推定することができない。そして、無線端末が移動している場合には、一定期間の観測値から推定する平均 SNR には誤差が発生する。これは、無線端末が移動している場合には、無線端末が物理的に移動しているため、各観測点での平均 SNR が異なっているためである。そこで、無線端末が静止している場合、移動している場合について、観測時間が変わることで、接

表 4 SNR の測定時間と基地局変更位置の関係(セル半径 = 40[m], 基地局数 1 から 2 への変更)

Table 4 Location versus observation period of SNR (Cell Radius = 40[m], 1 BS 2 BSs).

観測時間	基地局変更位置					
	静止		基地局へ移動		基地局から移動	
	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散
50[ms]	14.36	0.014	14.32	0.014	14.39	0.014
100[ms]	14.36	0.0071	14.29	0.0071	14.43	0.0071
250[ms]	14.36	0.0029	14.19	0.0029	14.53	0.0028
500[ms]	14.36	0.0014	14.02	0.0014	14.71	0.0014

表 5 SNR の測定時間と基地局変更位置の関係(セル半径 = 60[m], 基地局数 1 から 2 への変更)

Table 5 Location versus observation period of SNR (Cell Radius = 60[m], 1 BS 2 BSs).

観測時間	基地局変更位置					
	静止		基地局へ移動		基地局から移動	
	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散
50[ms]	14.36	0.014	14.32	0.014	14.39	0.014
100[ms]	14.36	0.0071	14.29	0.0071	14.43	0.0071
250[ms]	14.36	0.0029	14.19	0.0029	14.53	0.0028
500[ms]	14.36	0.0014	14.02	0.0014	14.71	0.0014

続基地局を変化させる位置がどのように変わるのかを表 4~表 7 に示す。ここで、観測時間は 50, 100, 250, 500[ms], 無線端末の移動速度は 5[km/時] とする。

表 4 はセル半径が 40[m] の場合に、接続基地局数を 1 個から 2 個に変更する位置を示し、表 5 はセル半径が 60[m] の場合に、接続基地局数を 1 個から 2 個に変更する位置を示す。表 4, 表 5 から、無線端末が静止している状態では、観測期間を長くすることにより変更位置の分散値を小さくすることが可能であることが確認できる。一方、無線端末が基地局方向へ移動している場合では、観測期間を長くすることにより分散値は小さくできるが、変更位置は基地局側に近づいていくことが確認できる。逆に、無線端末が基地局から離れる方向へ移動している場合では、観測期間を長くすることにより、変更位置は基地局から離れていくことが確認できる。これらは、観測期間が長いほど、実際の位置から離れた場所の SNR 値を平均値の推定で利用するためと考えられる。このような基地局変更位置の誤差は、結果として TCP のスループットに影響を与える。特に、本来の平均 SNR に比べて推定した平均 SNR が高い値となる、基地局から離れる方向へ移動した場合、基地局変更の必要があるにもかかわらず、基地局変更が行われなため、TCP のスループットがしきい値以下になると考えられる。しかし、基地局変更位置の誤差は 1[m] 以内とそれほど大きくはな

表 6 SNR の測定時間と基地局変更位置の関係(状況 1, セル半径 = 60[m], 基地局数 2 から 3 への変更)

Table 6 Location versus observation period of SNR (Situation 1, Cell Radius = 60[m], 2 BSs 3 BSs).

観測時間	基地局変更位置					
	静止		基地局へ移動		基地局から移動	
	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散
50[ms]	29.61	0.061	29.57	0.060	29.64	0.061
100[ms]	29.61	0.030	29.54	0.030	29.68	0.030
250[ms]	29.61	0.012	29.44	0.012	29.78	0.012
500[ms]	29.61	0.0060	29.27	0.0061	29.96	0.0060

表 7 SNR の測定時間と基地局変更位置の関係(状況 2, セル半径 = 60[m], 基地局数 2 から 3 への変更)

Table 7 Location versus observation period of SNR (Situation 2, Cell Radius = 60[m], 2 BSs 3 BSs).

観測時間	基地局変更位置					
	静止		基地局へ移動		基地局から移動	
	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散	平均 [m]	分散
50[ms]	28.52	0.69	28.48	0.69	28.56	0.69
100[ms]	28.54	0.69	28.47	0.69	28.61	0.69
250[ms]	28.47	0.74	28.30	0.74	28.64	0.74
500[ms]	28.32	0.71	27.98	0.71	28.67	0.71

いため、TCP のスループットが大幅にしきい値以下になることはないと思われる。なお、接続基地局数を 1 個から 2 個に変更する場合には、基地局 A の平均 SNR 情報のみを利用するため、状況 1, 2 で差は発生しない。

次に、表 6, 表 7 にセル半径が 60[m] の場合に、接続基地局数を 2 個から 3 個に変更する位置を示す。表 6, 表 7 では、表 4, 表 5 と同様の傾向が見られる上に、表 7 は表 6 と比較して、分散値が非常に大きくなっていることが確認できる。これは、状況 1 では各基地局の平均 SNR は明確に順序付けでき一方で、状況 2 では基地局 A の平均 SNR が一番高く、基地局 B, C の平均 SNR は同一となる状況であるため、基地局数を変更する位置が明確に決定できないためと思われる。

提案システムは複数の基地局に接続を行うことにより、セル境界付近での TCP の特性改善を達成することができることを確認できたが、その利点を有効に利用するためには、適切なセル半径を知る必要がある。そこで、状況 2 の場合について、セル境界部での TCP の正規化スループットと受信電力との関係を図 11 に示す。図 11 を利用することで、セル境界部で保証したい TCP の正規化スループットを決定すれば、セル境界部で要求される受信電力を決定することが可能と

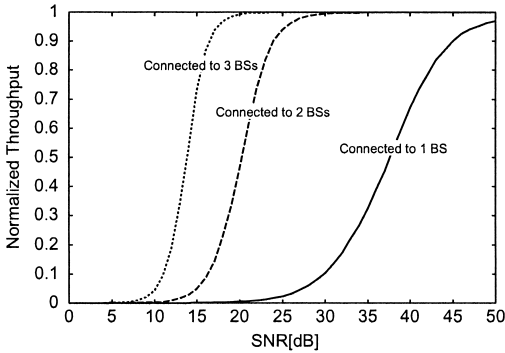


図 11 状況 2 でのセル境界点での TCP スループット特性と受信電力の関係
 Fig. 11 Normalized TCP throughput versus SNR on the borders of cell in the second situation.

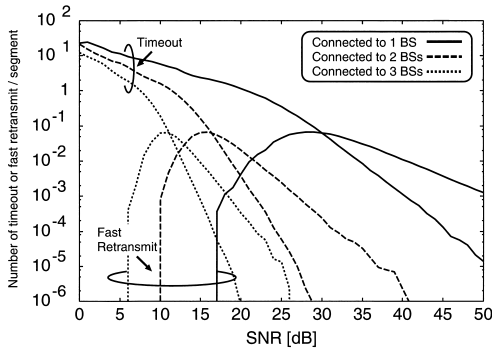


図 12 状況 2 でのセル境界点での 1 セグメント当りの TCP のタイムアウトとファーストリトランスミット発生回数と受信電力の関係
 Fig. 12 The number of fast retransmit or timeout for each segment versus SNR on the borders of cell in the second situation.

なる。

次に、同様の状況での 1 セグメントを送信するために、何回のファーストリトランスミットとタイムアウトが発生したのかと、セル境界部での受信電力の関係を図 12 に示す。図 12 から特に通信の中断につながるタイムアウトの発生などの発生率という観点からも受信電力を決定することが可能となる。

本研究では TCP の特性を考える上で、主に各無線端末の TCP の特性をどの程度維持するのかという観点で議論を行ってきた。一方で、無線システム全体として考えた場合の最適な接続基地局数を考えることも重要である。そこで、TCP の正規化スループットを接続基地局数で割ったスループットについて、セル半径が 40[m] の場合を図 13 に、セル半径が 60[m] の場合を図 14 に示す。このスループットは無線端末でのス

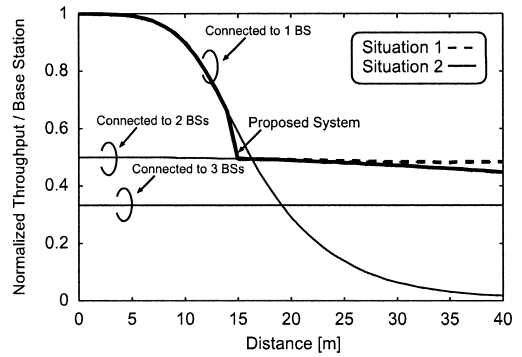


図 13 接続基地局数で正規化した TCP スループット特性と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 40[m])
 Fig. 13 Normalized TCP throughput for each base station versus distance with a cell radius equals to 40[m].

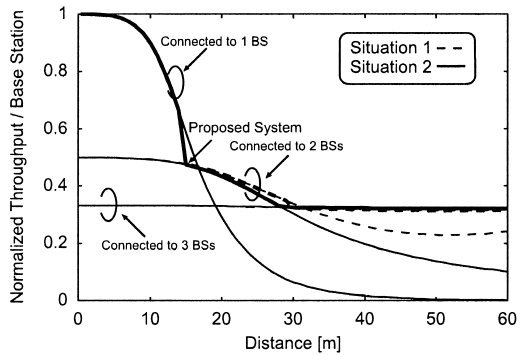


図 14 接続基地局数で正規化した TCP スループット特性と基地局からの距離の関係 (セル半径 = 60[m])
 Fig. 14 Normalized TCP throughput for each base station versus distance with a cell radius equals to 60[m].

ループット値ではなく、システムとして見た場合の無線資源当りのスループットを表す。図 13, 図 14 には、接続基地局数を固定にした場合についてと、提案システムのしきい値を 0.7 とした場合について示した。システム全体に着目して接続基地局数を決める場合は、この接続基地局数で割ったスループットを最大になるようにすればよい。図 13 から、セル半径が 40[m] の場合、接続基地局数は基地局 A からの距離が 16[m] 付近で 1 基地局から 2 基地局に変更するのがシステム全体としては効率が良いことが確認できる。一方、図 14 から、セル半径が 60[m] の場合、接続基地局数は基地局 A からの距離が 17[m] 付近で 1 基地局から 2 基地局に変更され、距離が 30[m] 付近で 2 基地局から 3 基地局に変更するのがよいことが確認できる。しかし、

提案システムでしきい値を 0.7 にした場合には、接続基地局数の変更点が上記のシステムから考えた最適点とは多少異なっていることが確認できる。なお、提案システムのように各無線端末の TCP スループットに着目してシステムを設計するのか、システム全体の効率に着目するのかは管理者の運用方針と思われる。

6. む す び

本研究では、無線端末が無線環境と TCP の特性の関係を評価することにより、接続する基地局数を動的に変化させる基地局ダイバーシチシステムの提案を行った。その結果、提案システムを利用することにより、TCP の要求に適した無線資源を利用しながら、セル全域にわたって TCP の特性を良好に維持することが可能であることを確認した。しかし、セル全域で TCP の特性を良好に保つためには、基地局ダイバーシチが有効に働くセル半径を決定することが重要であることが分かった。そこで、受信電力が最も低くなると考えられるセル境界部での TCP のスループット特性やタイムアウトの発生率などを評価対象として、セル半径を設定することが重要であることを示した。更に、提案システム全体の性能を考えた場合、セル半径に応じた接続基地局数を変化させるべき状況があることが分かった。

提案システムは既存の 1 基地局と無線端末が通信を行うのを前提とした特性改善手法に比べ、基地局管理局や無線端末の処理は増加すると考えられる。しかし、1 基地局のみに接続している場合には解決が難しい、受信電力が低下するセル境界付近での TCP 特性の良好な維持や、フェージングなどからの TCP 特性の劣化を回避する手段としての意義は大きいと思われる。更に、提案システムはダイバーシチを利用した誤り訂正符号などを同時に利用することにより、その特性はより向上するものと考えられる。そのため、今後のセルラーシステムからのインターネット接続を検討する上で広く適用可能な技術と思われる。

なお、本研究では、無線リンクでの伝送誤りの軽減を目的としたため、ふくそうについては考慮しなかった。しかし、接続基地局数を増加させることで、無線資源を多く利用することになり、ふくそうが起りやすくなることも考えられる。このため、複数の無線端末が存在する場合において、ふくそうも考慮に入れて、接続基地局数を決定する必要がある。今後、この点についても検討していく。

謝辞 本研究の一部は、通信・放送機構の創造的情報通信技術開発推進制度の公募課題及び、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「社会情報基盤のための音声・映像の知的統合、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の公募課題、日本学術振興会特別研究員奨励費の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

- [1] V. Jacobson, "Congestion avoidance and control," Proc. ACM SIGCOMM'88, pp.314-329, Aug. 1988.
- [2] K. Fall and S. Floyd, "Simulation-based comparisons of Tahoe, Reno, and SACK TCP," Comput. Commun. Rev., vol.26, no.3, pp.5-21, July 1996.
- [3] R. Caceres and L. Iftode, "Improving the performance of reliable transport protocols in mobile computing environments," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 13, no. 5, pp. 850-857, June 1995.
- [4] E. Amir, H. Balakrishnan, S. Seshan, and R.H. Katz, "Efficient TCP over networks with wireless links," Proc. Hot Topics in Operating Systems, pp.35-40, 1995.
- [5] J.A. Laurila, J. Mikkonen, and J. Rinne, "Wireless LAN access network architecture for mobile operators," IEEE Commun. Mag., vol.39, no.11, pp.82-89, Nov. 2001.
- [6] P.J. Mccann and T. Hiller, "An Internet infrastructure for cellular CDMA networks using mobile IP," IEEE Pers. Commun., vol.7, no.4, pp.26-32, Aug. 2000.
- [7] H. Balakrishnan, V.N. Padmanabhan, S. Seshan, and R.H. Katz, "A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links," IEEE/ACM Trans. Netw., vol.5, no.6, pp.756-769, Dec. 1997.
- [8] A. Chockalingam, M. Zorzi, and R. Rao, "Performance of TCP on wireless fading links with memory," Proc. IEEE ICC'98, June 1998.
- [9] T. Lakshman and U. Madhow, "TCP/IP performance with random loss and bidirectional congestion," IEEE/ACM Trans. Netw., vol.8, no.5, pp.541-555, Oct. 2000.
- [10] M. Zorzi and R. Rao, "Perspectives on the impact of error statistics on protocols for wireless networks," IEEE Pers. Commun. Mag., vol.6, no.5, pp.32-40, Oct. 1999.
- [11] B. Bakshi, P. Krishna, N.H. Vaidya, and D.K. Pradhan, "Improving performance of TCP over wireless networks," IEEE ICDCS'97, pp.365-373, 1997.
- [12] A.V. Bakre and B.R. Badrinath, "Implementation and performance evaluation of indirect TCP," IEEE Trans. Comput., vol.46, no.3, pp.266-278, March 1997.
- [13] K. Brown and S. Singh, "M-TCP:TCP for mobile

- cellular networks,” ACM Comput. Commun. Rev., vol.28, no.2, pp.19–43, 1997.
- [14] E. Ayanoglu, S. Paul, T. Laporta, K. Sabnani, and R. Gitlin, “AIRMAIL: A link-layer protocol for wireless networks,” Wirel. Netw., vol.1, pp.47–60, 1995.
- [15] C. Parsa and J.J. Garcia-Luna-Aceves, “Improving TCP performance over wireless network at the link layer,” ACM Mobile Networks & Applications Journal, vol.5, no.1, pp.57–71, March 2000.
- [16] J.W.K. Wong and V.C.M. Leung, “Improving end-to-end performance of TCP using link-layer retransmissions over mobile inter networks,” IEEE ICC’99, vol.1 pp.324–328, June 1999.
- [17] S.M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.16, no.8, Oct. 1998.
- [18] K. Naito, H. Okada, M. Saito, T. Yamazato, and M. Katayama, “New analytical model for TCP in wireless environments,” IEICE Trans. Fundamentals, vol. E85-A, no.7, pp.1501–1510, July 2002.

(平成 15 年 6 月 10 日受付, 10 月 24 日再受付)



内藤 克浩 (正員)

1999 慶大・理工・電気卒。2001 名大工学研究科情報工学専攻博士課程前期課程了。現在, 同博士課程後期課程。無線パケットネットワーク, 無線インターネット接続の研究に従事。IPSJ, IEEE 各学生員。



岡田 啓 (正員)

1995 名大・工・電子情報卒。1997 同大大学院博士課程前期課程了。1999 同大学院博士課程後期課程了。工博。同年日本学術振興会特別研究員・PD。2000 名大・情報メディア教育センター・助手, 現在に至る。パケット無線通信, マルチメディア通信, 符号分割多元接続方式, マルチホップネットワーク等の研究に従事。情報理論とその応用学会, IEEE 各会員。1996 電気・電子情報学術振興財団・猪瀬学術奨励賞, 1998 本会学術奨励賞受賞。



山里 敬也 (正員)

1988 信州大・工・電子卒。1990 同大大学院修士課程了。1993 慶大大学院博士課程了。工博。同年, 名大工学部電子情報学科助手。1998 同大情報メディア教育センター助教授, 現在に至る。1997 より 1998 まで, ドイツカイザースラウテルン大学客員研究員。スペクトル拡散通信, 変復調理論, トラヒック制御, 誤り制御などの研究に従事。1995 本会学術奨励賞受賞。情報理論とその応用学会, IEEE 各会員。



片山 正昭 (正員)

1981 阪大・工・通信卒。1986 同大大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大助手。1989 阪大大型計算機センター講師。1992 名大工学部電子情報学科講師。1993 同大助教授, 2001 年 7 月より情報メディア教育センター教授(電子情報学専攻, 兼任)現在に至る。1995 年 10 月より 1996 年 4 月まで, 米国シンガン大学アンアーバ校工学部電気電子計算機科学科客員助教授。雑音理論, 信号伝送と変復調技術, 誤り制御, 多元接続方式, トラヒック制御, ソフトウェア無線技術などの研究に従事。1986 本会篠原記念学術奨励賞。1996, 2001 本会通信ソサイエティ功労感謝状。情報理論とその応用学会, IEEE 各会員。