

第3世代移動通信網における スプリアスタイムアウトを考慮したTCP再送方式

関 口 克 己^{†1,†2} 外 村 彩^{†1} 山 本 和 徳^{†3}
鈴 木 偉 元^{†1} 石 川 憲 洋^{†3} 高 橋 修^{†2}

本稿は、第3世代移動通信網のトランスポート層プロトコルとして利用されるTCPのスプリアスタイムアウト再送(STO)の課題を解決するためのTCP再送の改善手法の提案を行う。移動通信網では、移動端末の移動による無線チャネルの誤り率の変動、無線チャネル制御により、伝送遅延が変動し、TCPにSTOを発生させる。STOにより、TCPでは不要パケット再送、不要な輻輳制御によるスルーット低下などの問題が発生する。本稿では、無線チャネル上で発生するTCPのタイムアウト再送に関する課題について述べ、この課題の対策として、TCP再送パラメータのSTO発生頻度に着目した最適化と、STO検出・応答技術を組み合わせた改善手法を提案する。

TCP Retransmission with Spurious Timeout Detection for 3G Mobile Packet Access Network

KATSUMI SEKIGUCHI,^{†1,†2} AYA HOKAMURA,^{†1}
KAZUNORI YAMAMOTO,^{†3} HIDEHARU SUZUKI,^{†1}
NORIHIRO ISHIKAWA^{†3} and OSAMU TAKAHASHI^{†2}

This paper describes the tuning method of TCP RTO parameters and an implementation of spurious retransmission timeout detection for the 3G mobile packet network. At first, we discuss the issues about TCP RTO timer and STO on the 3G mobile packet channel. And we propose the tuning method for RTO timer optimization to reduce an incidence of STO and applied them to mobile packet access service. We choose F-RTO/Eifel Response for STO detection and response algorithms. We evaluate a performance of optimized RTO and F-RTO/Eifel Response on a commercial network of 3G mobile packet system.

1. はじめに

第3世代移動通信網(IMT-2000)では、2006年8月より無線帯域幅を下り最大3.6Mbpsに拡大したHSDPA¹⁾の商用サービスが開始された。HSDPAは、無線帯域幅を下り最大14Mbpsに拡大可能であり、ADSLなどのブロードバンド回線並みのサービス展開が期待される。IMT-2000は、広帯域無線帯域を持つことに加え、端末の移動に対し、通信の連続性の確

保、伝送品質の維持のため、無線チャネル制御や誤り制御を行うことが特徴としてあげられる。これらの制御は、無線チャネルにおける伝送遅延変動の発生要因となる。

伝送遅延変動の要因は、無線区間のデータリンク層プロトコルであるRLC(Radio Link Control)²⁾の再送制御によるもの、ハンドオーバや無線チャネルの動的な割当て制御などの無線チャネル制御³⁾によるもの、シャドウイングなどの電波環境によるものがあげられる。特に、無線チャネル制御やシャドウイングが発生した場合、無線チャネルが一時的に不通状態となることがある。この挙動は、トランスポート層プロトコルでは、突発的にRTT(Round Trip Time)が増加する現象(Delay Spike)^{4),5)}として認識される。Delay Spikeが発生すると、モバイルインターネットにおいて一般的に使われ、高信頼なエンド・エンド通信を実現するTCPの再送動作に影響を与える。

†1 株式会社 NTT ドコモネットワーク開発部
Core Network Development Department, NTT DoCoMo, Inc.

†2 公立はこだて未来大学システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University-Hakodate

†3 株式会社 NTT ドコモサービス&ソリューション開発部
Service & Solution Development Department, NTT DoCoMo, Inc.

TCP はエンド・エンド回線で生じたパケットロス回復のため、再送タイムアウト (RTO: Retransmission Time Out) に基づく再送処理 (RTO 再送) を行う。RTO 再送は、パケット送信後、確認応答 (Ack: Acknowledgement) が受信されないまま、RTO タイマがタイムアウトすることで実行される。RTO タイマは、Ack の到達時間に応じて調整され、RTT が RTO タイマを超過すると RTO 再送が行われる。

Delay Spike が発生すると、パケットが正常に転送されたにもかかわらず、RTT 増加により Ack が遅延し、RTO 再送が発生する。この再送をスプリアタイムアウト再送 (STO: Spurious retransmission Time Out) と呼ぶ。STO が発生すると、不要なパケット再送により無線チャネル容量を消費する、不要な輻輳制御によりスループットが低下する、などの問題が発生し、TCP の伝送効率が低下する。この対策として、STO 発生頻度を低減させる方法と、STO を識別し、不要パケット再送と不要な輻輳制御を回避する方法の2つがあげられる。

STO 発生頻度を低減させる技術として、Delay Spike に比べ十分に大きな RTO タイマ値を用いることで、RTT が RTO タイマを超過することを防ぐ方法がある。しかし、この方式は Delay Spike による RTT 増加量が大きい環境で STO を完全に抑止しようとした場合、パケットロス発生時の再送処理が遅延し、スループット低下が生じる。

STO を識別し不要パケット再送と不要な輻輳制御を抑止する技術は、複数の技術が提案されている。これらは、STO を検出し不要パケット再送を抑止する STO 検出技術、STO 検出後の不要な輻輳制御を回避する STO 応答技術に分類される。STO 検出・応答技術を用いることで、STO 発生時の不要パケット再送と不要な輻輳制御による TCP の効率低下を抑止することができる。しかし、STO 検出技術は、RTO 発生時に起動し、最低1パケットは重複パケットとなるため、STO 発生頻度が高い場合、不要パケット再送の課題が排除できなくなる。

上記2つの対策において、RTO タイマの拡大は、パケットロス発生時の再送処理遅延の課題があり、STO 検出・応答技術は、STO 発生頻度が高いと、不要パケット再送抑止の効果が低下するという課題が存在する。本稿では、これらの課題を解決するための、STO 発生を考慮した TCP 再送改善手法を提案する。

提案方式は、第1に RTO タイマを RLC 再送の挙動に着目し、STO 発生頻度の収束する領域に決定することを提案する。RLC では無線区間の誤りにより再

送数が増減し遅延変動が生じる。RLC 再送中の RTO 再送は STO となるため、提案方式では、RTO タイマの下限値を制限し、RLC 再送が行われる可能性が高い値以下に RTO タイマが減少することを抑止し、STO 発生率の低減を行う。ただし、Delay Spike による RTT 増加は、RLC 再送数の変動による増加に比べ、頻度が小さく増加量が非常に大きいと仮定し、RTO タイマの設定による STO 抑止対象外とすることで、RTO タイマの長大化によるスループット低下を抑止する。第2に、RTO タイマの最適化で抑止対象外とした STO に対し、STO 検出・応答技術を用いて不要パケット再送、不要な輻輳制御を回避し伝送効率低下の影響を最小限にとどめる。

上記のように、提案方式として、RTO タイマの下限値を制限し、基地局エリア内の静止状態、低速移動中などの環境での STO 発生頻度を抑止したうえで、高速移動中など Delay Spike が発生する環境では、RTO を発生させ、パケットロスと STO を判定し、STO 検出・応答技術により伝送効率低下を抑止する、という2段階の方式を提案する。

本稿は、2章では STO による RTO 再送の課題を述べ、関連研究における RTO 再送の改善技術について述べる。3章では STO 発生頻度に基づいた RTO タイマの最適化方法と、STO 発生時の対処方法について提案し、移動通信網に適用する STO 検出技術 (Forward-RTO Recovery^{6),7)} と STO 応答技術 (Eifel Response^{5),8)} の特徴について述べる。4章では提案する RTO タイマの最適化方法に基づき、実環境において測定した結果を報告し、RTO タイマと STO の関係を明らかにしたうえで、ここで得られた RTO タイマの妥当性について考察する。5章では STO 検出・応答技術について、IMT-2000 の回線モデルを用いた数値解析とシミュレーション実験を行い、選択方式が STO の対策技術として有効であることを明らかにする。6章では、提案方式の、IMT-2000 の実網における、より実際の利用に近い通信環境での性能評価結果を示し、提案方式の有効性を明らかにする。

2. TCP 再送の課題と対策

2.1 無線チャネルにおける STO

TCP はパケット送信後一定期間 Ack が未受信のまま、RTO タイマがタイムアウトとすると再送を行う。RTO タイマは送信側で観測された RTT の値によって更新される。更新方法は RFC2988⁹⁾ の方式が Linux などにおいて実装されている。RTO タイマのパラメータは、RTO タイマの初期値、最小値、最大値が与え

られる。初期値は、TCP コネクション接続時に初期化される値であり、パケット転送中は、最小値、最大値の間で RTT の観測値に応じて調整される。RTT の観測値は、無線チャネルの再送制御、無線チャネル制御により変動するため、RTO タイマのパラメータを適切に設定しなければ、以下のような問題が発生する。

RTO タイマの初期値が小さい場合、パケット転送初期に無線チャネル制御や伝播環境の変化により Delay Spike が発生すると、RTT が RTO タイマを超過し STO が発生する。最小値が小さい場合、基地局近傍などで電界強度が強く遅延変動が少ない状況では、データ転送の進行にともない RTO タイマが RTT に接近し、RTT 増加が小さい Delay Spike でも STO が発生する。また、シャドウイングなどの要因で発生する Delay Spike は、RTT 増加量が移動端末の移動速度や伝播環境に依存するため、その発生の予測が困難である。この場合 RTO タイマの更新式で RTO タイマを RTT に追従させることは困難であり、STO の発生は避けられない。

2.2 STO によるスループット低下

STO が発生すると、Go-Back-N 再送により cwnd (Congestion Window) 分のパケットが再送され、受信側では、正常にパケットを受信したにもかかわらず、重複してパケットを受信する。加えて、送信側は輻輳回避により、cwnd を 1 に減少させ、ssthresh (Slow Start Threshold) を直前の cwnd の半分に減少させる。cwnd はスロースタートにより、ssthresh まで指数関数的に増加し、それ以降は線形的に増加する。この挙動による伝送効率の低下は、移動通信網向けに最適化された TCP で大きくなる。移動通信網向けの TCP は、遅延量の大きい無線チャネルに対応するため、cwnd の最大値を拡大している。cwnd の最大値は、最大スループットの確保のため伝送路の帯域幅遅延積 (BDP: Bandwidth Delay Product) より大きくすることが必要となる。BDP は、無線チャネルの広帯域化に応じて増大する。仮に帯域幅が 3.6 Mbps、RTT が 300 ms とすると 135 KB である。このとき 1 回の STO で最大 135 KB のデータが過剰に再送される。また ssthresh が半減されることで、スロースタートが停止し、cwnd が STO 発生前の値に戻るまでスループットが低下するという問題がある。

2.3 STO 対策技術と課題

STO 対策技術としては、RTO タイマの設定値を最適化し STO の発生頻度を低減させる方法と、STO 検出・応答技術により STO 発生時の影響を低減させる方法があげられる。本節では、2 つの課題対策技術を比

較したうえで、RTO タイマの設定値に応じて生じる不要パケット再送とスループット低下の課題と、RTO タイマの最適化を行わず、STO 検出・応答技術を用いた場合の不要パケット再送の課題について述べる。

2.3.1 RTO タイマの最適化技術

RTO タイマの最適化技術は、2 つのアプローチに分類される。1 つは RTO タイマの下限値を制限することで、Delay Spike 発生時の STO 発生を抑止する技術である。2 つ目は RTO タイマの更新式を改善することで、RTT 変動に効率的に追従する技術である。

RTO タイマの下限値を制限する技術は、実装を入れ替えることなく、パラメータ変更のみで対応できるメリットがある。しかし、伝送路の特性が未知である場合、設定値を適切に決定することは困難である。RTO タイマの下限値が伝送路の遅延変動量に対して短い場合、STO 発生頻度が高くなり、逆に長すぎる場合、再送処理が遅延し、スループット低下が生じるデメリットが存在する。

RTO タイマ更新式を変更する技術としては、RFC2988 の既知の課題について、RTO タイマの更新式を入れ替えることで対処する技術が提案されている^{10),11)}。RFC2988 は、RTO タイマの更新式の入力パラメータとして遅延変動量を用いているため、RTT 変動量が大きいと、RTO タイマが長大となり、再送処理が遅延する課題があることについて指摘されている¹¹⁾。

RTO タイマ更新式を改善しても、RLC が再送中の領域まで RTO タイマが低下すると STO 発生頻度が高くなるという問題に加え、伝播環境要因で発生する RTT の急増 (Delay Spike) に追従することは難しく、完全に STO を抑止することは難しいという課題は残る。これらの技術を IMT-2000 に適用する場合、提案方式である RTO タイマの最適化と STO 検出・応答技術の適用を組み合わせることで、相乗的な改善効果が得られると考えられる。

2.3.2 STO 検出・応答技術

STO 検出技術は、Forward-RTO Recovery (F-RTO)、Eifel Detection^{5),12)}、DSACK¹³⁾ が提案されている。各技術の比較について表 1 に示す。F-RTO は、RTO 発生時に 1 パケットの再送後、再送対象のパケットの送信を保留し、Ack 受信後、新たに後続の 2 パケットを送信する。その後、返信された Ack が Duplicate Ack かどうかで STO 検出を行う。F-RTO は送信側の実装のみで動作可能である。Eifel Detection は、パケットに timestamp を付加し、送信パケットと Ack パケットの対応付けにより STO を検出する。Eifel

表1 STO 検出技術の比較

Table 1 Features of STO detection algorithms.

	F-RTO	Eifel Detection	DSACK
送信側実装	要	要	要
受信側実装	不要	不要	要
付加情報	不要	Timestamp を付加	Ack パケットに 情報を付加

表2 STO 発生時の STO 応答技術の挙動比較

Table 2 Features of STO response algorithms.

	Eifel Response	RFC2861	TCP Reno
cwnd	変更なし	変更なし	1
ssthresh	変更なし	半減	半減

Detection は送信側に実装し、送受信側で timestamp に対応する必要がある。DSACK は SACK¹⁴⁾ を拡張し、Ack パケットに重複して受信されたパケットの情報を付加し、送信側へ通知することで STO 検出を行う。DSACK は送受信側双方での対応が必要となる。

STO 応答技術は、STO 検出時の輻輳制御について規定しており、Eifel Response と RFC2861¹⁵⁾ が提案されている。以下では、各技術の cwnd が最大値となった状態での STO 発生時の挙動について、TCP Reno との比較を述べる。比較結果を表 2 に示す。

Eifel Response は、STO 検出後、cwnd、ssthresh を変更せず、STO 検出前のパケット送信量を維持する。RFC2861 では、STO 検出後、ssthresh を半減する。STO 検出後、パケット送信量は維持されるが、STO が短期間で頻発すると ssthresh が低減し、パケットロス発生時のパケット送信量が低下する。STO 検出方式が実装されていない TCP Reno の場合、STO が発生するとパケットロス発生時と同様 cwnd を 1 に ssthresh を半減し、パケット送信量が低下する。

STO 検出・応答技術は、STO 発生時の不要パケット再送、不要な輻輳制御を抑止できるが、RTO タイマの最適化を併用しない場合、以下のような問題が生じる。RTO タイマが短かすぎ STO が頻発すると、STO 検出のためのパケット送信が頻発し、不要パケット再送の削減効果が低下することに加え、STO 応答技術に Eifel Response 以外を用いた場合、STO のつど cwnd、ssthresh が低下するという問題が生じる。逆に RTO タイマが長すぎる場合、STO 検出動作の開始が遅延し、スループットが低下するという問題が生じる。

3. TCP 再送方式の改善提案

本章では、RTO タイマの最適化と STO 検出・応答技術を組み合わせた TCP 再送改善方法について提案する。まず、無線チャネルにおける遅延発生要因を分類し、2つの技術の適用領域を決定する。そのうえで、各適用領域に対応した、提案方式である、RTO タイマの最適化と STO 検出・応答技術の適用について述べる。

3.1 遅延発生要因の分類と適用領域の決定

2つの技術の適用領域を決定するため、移動端末の通信環境ごとの無線チャネルの遅延発生要因を分類し、それぞれの特徴について考察する。ここでは、移動端末の通信環境を以下の3つに分類する。

- (1) 基地局近傍の強電界（静止）
- (2) エリア端の弱電界（静止）
- (3) 移動環境

各環境の通信状態は、以下のような状況を前提と仮定する。基地局近傍(1)では、誤り率が低く、RLC再送数が少ないため、遅延量、遅延変動量、パケットロス率が小さい。エリア端(2)では、誤り率が高く、RLC再送数が多いため、遅延量は大きい変動量は小さい。場合によって、電界強度の低下による RLC再送の失敗や隣接エリアにハンドオーバーすることで、パケットロス、Delay Spikeが発生するが、これらの発生率は低く、遅延要因の大部分は RLC再送によるものと仮定する。移動環境(3)は、無線品質の変動により、RLC再送数が大きく増減することに加え、ハンドオーバーやシャドウイングの頻度が増加し、遅延変動量、パケットロス率、Delay Spikeの頻度が高くなる。

次に、各通信環境に対応する RTO タイマの最適化方式と、STO 検出・応答技術の適用領域を決定する。基地局近傍(1)では、遅延量、遅延変動量、パケットロス率が低く、RTO再送の頻度が低いため、RTO タイマの最適化、STO 検出・応答技術による改善効果は得られない。したがって、この環境に特化した対策は実施しない。エリア端(2)では、基地局近傍に比べ RLC再送回数が増加し遅延量が增大する。遅延量の増加量は、基地局の提供エリアは重畳して設計されるため、電界強度が限りなく低下することはなく、RLC再送回数の上限値は限定されると考える。提案方式は、エリア端での遅延量が、この環境での上限と仮定し、この領域に合わせて RTO タイマの最適化を適用する。移動環境(3)では、遅延変動が大きく、Delay Spikeが多発するため、RLCの挙動から RTO タイマの最適値を求めることが困難となる。この環境では、RTO タイマの下限値の増大により、他環境での再送処理が

表 3 通信環境と遅延変動要因
Table 3 Environment and behavior of delay.

	基地局近傍	エリア端	移動中
定常的な遅延量 (RLC 再送数)	小	大	大
遅延変動量 (Delay Spike 頻度)	小	小	大
パケットロス頻度	小	小	大
対策技術	—	RTO タイマ 最適化	STO 検出技術 STO 応答技術

遅延することを抑止するため、RLC 再送を意識した RTO タイマの設定は行わず、エリア端 (2) で決定した RTO タイマ値以上の領域では、RTO タイマ更新式の追従量を超えた RTT 変動による RTO を許容し、STO 検出・応答技術により伝送効率低下を抑止する。

表 3 に各環境の遅延変動要因と提案方式の適用領域を示す。

3.2 移動通信網向け RTO タイマの最適化方法

RTO タイマの下限値の設定によるパラメータ最適化は、3.1 節で述べたエリア端 (2) に合わせて実施する。提案方式は、STO の発生頻度に基づいて、RTO タイマの初期値、最小値を決定し、RTO タイマ更新式による追従範囲を制限する。RTO タイマの初期値、最小値が小さい場合、RLC 再送による RTT 増加が生じる領域まで RTO タイマが低下することがある。この状況では、RLC 再送処理中に RTO 再送が発生し STO となる。この状況を回避するため、RTO タイマの初期値、最小値を拡大させ、RLC 再送中の RTO 発生を抑止することで、STO の発生頻度は低減可能である。STO 発生頻度は、RTO タイマの増加にとともに徐々に低下し、その環境における RLC 再送数の最大値となる値で、収束するものと考えられる。

提案方式は、移動通信網においては、無線リソースの効率的な利用を優先し、STO による不要なパケット再送と不要な輻輳制御は極力抑える必要があること、STO 収束点に達した領域以上で RTO 再送を待ち合わせることは、再送処理の遅延により無通信時間が増大し無線リソースの利用効率の低下につながると考え、STO 発生頻度が収束する領域に RTO タイマの初期値、最小値を設定する。

提案方式の IMT-2000 の実網における、STO 発生頻度の傾向と、RTO タイマの関係は、4 章において実測を行い明らかにした。

3.3 移動通信網向け STO 検出・応答技術

3.2 節の RTO タイマの最適化は、RLC 変動要因の STO を抑止できるが、Delay Spike に対しては STO を発生させてしまう。3.1 節で述べた移動環境 (3) など、Delay Spike が発生する環境に対しては、STO 検出・応答技術を適用する。STO 検出・応答技術としては 2.3 節で述べた F-RTO と Eifel Response を選択する。

STO 検出技術の候補には、F-RTO のほかに Eifel Detection, DSACK を取り上げた。Eifel Detection は、送受信パケットに timestamp を付加するため、パケット長により 0.8% から 23% のデータ量が増加する。データ量増加により無線リソースを消費し、スループット低下、収容加入者数の減少などの問題が生じる。DSACK は、重複パケットの通知のため受信側の実装を変更する必要がある。商用サービスでは、ユーザの手にわたった移動端末に実装の変更を行うことは困難である。F-RTO は他方式との比較から、送信側の実装で動作可能であること、送受信パケットに付加情報を用いないことが利点であり、無線リソース、移動端末の実装変更制限がある移動通信網向けの STO 検出技術として最適であると考えられる。

STO 応答技術として、Eifel Response のほかに RFC2861 と TCP Reno を取り上げた。各方式の動作の違いとしては、STO 発生時に cwnd と ssthresh の値を低下させるかという点にある。

Eifel Response の選択理由として、以下の 3 つがあげられる。1 つ目として 2.2 節で述べたように、移動通信網向けの TCP は cwnd が拡大されており、cwnd と ssthresh が RTO で低下すると、RTO 前の数値に回復するまでの時間が長期化する点、2 つ目として、STO 発生時に cwnd, ssthresh の制御を行った場合、STO が頻発する環境では、各値が低下し続ける点、3 つ目として、IMT-2000 において Delay Spike が発生する要因は、無線チャネル制御など一時的な不通状態と考え、通常の TCP が RTO を輻輳と認識する状況とは異なり、cwnd, ssthresh の制御は不要である、という点である。

F-RTO と Eifel Response を組み合わせた方式の IMT-2000 での改善効果は、5 章において評価を行う。

4. IMT-2000 網での RTO タイマ最適化

本章では 3.2 節で述べた RTO タイマ最適化方式に基づき、IMT-2000 の実網において RTO タイマ最適化の測定を実施した。測定結果より、実網での STO 発生頻度と RTO タイマの関係を明らかにし、RTO タイマの最適値について考察する。

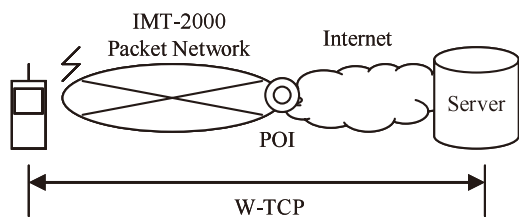


図1 RTO タイマ最適化の測定環境

Fig.1 Test environment for RTO timer optimize.

4.1 測定環境

RTO タイマ最適化の測定環境を図1に示す。移動端末はPCMCIAカード型端末とPCを用い、サーバはHP-UXサーバをテスト環境に設置し、インターネットおよびIMT-2000網を介し接続した。無線チャネルの帯域幅は上り最大64kps、下り最大384kbpsである。TCPコネクションは移動端末とサーバで直接接続するエンド・エンド接続とした。ここで利用するTCPは、IMT-2000で実際に利用されている移動通信網向けTCPのプロファイルであるW-TCP^{4),16),17)}を適用した。W-TCPは、TCPを移動通信網で利用するためのTCP通信パラメータを最適化した規格である。TCP Westwood¹⁸⁾やJTCP¹⁹⁾などの移動通信網向けのTCPでは、輻輳制御を変更するなど実装を入れ替えるのに対し、W-TCPは既存の実装のパラメータ変更のみであり、標準的TCPとも通信可能である。したがって、W-TCPの輻輳制御は既存実装からの変更はなく、多くの場合TCP Renoと同様となる。本章および6章の測定では、Internet-Draft¹⁷⁾で示されている4つのパラメータ(cwnd 64kbyte, Initial cwnd 4kbyte, SACK有効化, MTU 1500byte)と同じ値を用いた。

4.2 測定方法

測定方法は、サーバのRTOタイマの初期値、最小値を1.5秒から10秒の間で変化させて、各値のSTO発生頻度を測定した。移動端末はエリア端の弱電界に設置し、コンテンツは一般サイト140サイトのサンプルをランダムに取得した。コンテンツサイズは0byteから50kbyteが66%、50kbyteから100kbyteが22%、100kbyteから150kbyteが7%、150kbyteから200kbyteが2%、500kbyte超が2%である。測定時間は、RTOタイマ値ごとに24時間とし、上記コンテンツのダウンロードを行った。

4.3 測定結果

図2にRTOタイマの最適化の測定結果を示す。STOが発生したコネクションの頻度は、RTOタイマの初期値、最小値1.5sで10%に近くなるが、RTO

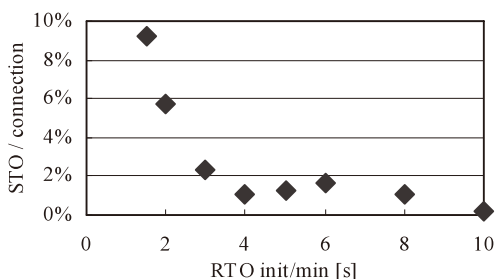


図2 STO発生頻度

Fig.2 Incidence of STO per TCP connection.

タイマを長くしていくに従って4秒で約1%まで低下した。4秒以上の領域ではそれ以上の低下が見られないことから、この環境においては、RLC再送回数の収束値が約4秒にあると推測される。また、RTOタイマの初期値、最小値4秒で、基地局近傍の強電界で測定した結果、STO発生率は0.4%となり、STO発生をほぼ抑止できることを確認した。

4.4 RTOタイマの最適値

今回の測定環境では、RTOタイマの初期値、最小値を4秒とすることで、RLC再送処理中のRTO発生を抑止し、STO発生頻度を低減できると考えられる。ただし、実網では、置局設計の考え方やRLC再送パラメータなどの変更により、エリア端の電界強度やRLC再送回数などが異なり、測定結果が環境によって変わる可能性がある。また、RLCは仕様上²⁾、PDUサイズが42byte、400ms間隔でMAXDAT-1回の再送を行うが、MAXDATの値に基づいて机上でRTOタイマを設計することは困難である。RLCは上下回線に適用され、TCPがRLC再送の終了を待つために、RTOタイマを400ms×MAXDAT×2秒に設定することが考えられる。しかし、TCPのMTUは1500byteでRLCと転送単位が異なり、RTOタイマを上記の値に設定しても両者の再送タイミングは正確に一致しない。MAXDATの値は、文献20)では、TCP向けの最適値として6が示されているが、実際の運用ではUDPなどの到達確認のないプロトコルの信頼性確保を考慮して、それ以上の値が必要となる。実測では、RTOタイマが4秒以上の領域ではSTO発生頻度が収束しており、この領域にRTOタイマ値を設定した場合、STOの発生確率が低いにもかかわらずTCPが再送を待ち続ける状態となり、パケットロス発生時のスループット低下が生じる。したがって、この領域では、早期にRTOを発生させSTO発生に対しては、STO検出・応答方式を適用することが最適であると考えられる。

5. F-RTO/Eifel Response の性能解析

本章では、STO 検出・応答技術の改善効果を数値解析とシミュレーション実験により明らかにする。文献 5), 6) では、第 2 世代移動通信網や PHS に近い回線モデルを前提として性能解析が行われているが、第 3 世代移動通信網での検証は行われていない。また、性能解析については、不要パケット再送抑止による転送データ量削減によって得られるスループット改善効果を検証しているが、STO 応答技術との併用による不要な輻輳制御抑止によって得られる改善効果の評価が行われていない。本章では、IMT-2000 を前提としたモデルにおいて F-RTO と Eifel Response を組み合わせた方式の改善効果を明らかにする。

5.1 TCP の再送手順のモデル化

数値計算による性能解析のため、RTO 発生時の cwnd の挙動を図 3 のようにモデル化する。cwnd w は初期ウィンドウ w_0 から指数的に増加する。 t_s において、継続時間 τ の Delay Spike により STO が発生する。

F-RTO/Eifel Response が有効の場合、cwnd は STO が発生した w_s から指数的に w_{\max} まで増加する。 w_{\max} は BDP c に等しいとする。STO 発生時の F-RTO の動作は、cwnd を 1 に減少させパケットを再送し Ack の受信を待ち、Ack 受信後、後続の未送信の 2 パケットを送信し、再度 Ack の受信を待つ。その後に受信された Ack が Duplicate Ack でなければ STO と判断する。ただし、Ack Burst²¹⁾ により Delay Spike の発生直後に、直前の cwnd 分の Ack が受信されるため、F-RTO の動作時間は非常に短く、性能に与える影響は小さいと考え、この間の動作は考慮しない。F-RTO/Eifel Response が無効の場合、STO が発生すると cwnd はスロースタートによって $w_s/2$ まで指数的に増加し、その後輻輳回避により線形的に w_{\max} まで増加する。ただし、この挙動は Ack Burst の影響で、cwnd が $w_s/2$ に達するまでの時間は非常に短く、この期間では cwnd は $w_s/2$ から線形的に増加するものとする。

5.2 数値解析条件

本節では、5.1 節で定義したモデルに基づき、F-RTO/Eifel Response による、不要パケット再送の削減と、スループット改善効果を数式化する。

5.2.1 不要パケット再送数の数式化

STO による不要パケット再送数は、F-RTO を用いることで 1 パケットに低減させることができる。F-RTO を用いない場合、不要パケット再送数は cwnd の大き

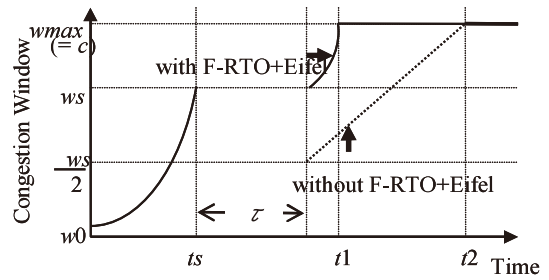


図 3 cwnd の挙動
Fig. 3 Behavior of cwnd.

さに等しくなる。不要パケット再送数を R 、無線帯域幅を b_{\max} 、RTT を d とすると、 R は式 (1) によって与えられる。 r はスロースタート中の Ack ごとの cwnd の増加率を示し、Delayed Ack 利用で 1.5、利用なしで 2 となる。

$$R = \begin{cases} 1, & \text{(with F-RTO and Eifel Response)} \\ \min(w_s, w_{\max}) = \min(w_0 r^{t_s-1}, b_{\max} d) & \text{(without F-RTO and Eifel Response)} \end{cases} \quad (1)$$

5.2.2 スループットの数式化

スループットは、5.1 節のモデルをもとに、各区間のデータ転送量を求めたうえで算出する。STO はデータ転送中 1 回発生すると仮定する。

データ転送量 D を以下のように定義する。STO 発生時点 (t_s) までのデータ転送量を D_s 、スロースタートによって cwnd が w_{\max} に達した時点 (t_1) のデータ転送量を D_1 、STO 発生によりスロースタート中に輻輳回避に入り、cwnd が w_{\max} に達した時点 (t_2) のデータ転送量 D_2 とする。 m は輻輳回避中の Ack ごとの cwnd の増加率とすると、 D_s, D_1, D_2 は、それぞれ式 (2), (3), (4) で与えられる。

$$D_s = \frac{w_0(r^{t_s-1})}{r-1} \quad (2)$$

$$D_1 = \frac{rc - w_0}{r-1} \quad (3)$$

$$D_2 = D_s + \frac{1}{2m} \left(c^2 - \frac{w_s^2}{4} \right) \quad (4)$$

次に、 D の各区間におけるスループットを、F-RTO/Eifel Response ありの場合を T_1 、なしの場合と T_2 として数式化する。STO 発生までの、スループットは、両方式とも D_s/t_s と等しくなる。STO 発生後のスループットは、 D の値により、1) F-RTO/Eifel Response によりスロースタートが継続し cwnd が最

大値となるまで, 2) 輻輳回避により cwnd が最大値となるまで, 3) それ以降, の領域に分けて数式化すると, それぞれ式 (5) から (10) で示される.

1) $D_s \leq D < D_1$

$$T_1 = \frac{D}{\tau + \log_r \left(\frac{D \times (r-1)}{w_0} + 1 \right)} \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{D}{t_s + \tau + \frac{-w_s + \sqrt{w_s^2 + 8m(D - D_s)}}{2m}} \quad (6)$$

2) $D_1 \leq D < D_2$

$$T_1 = \frac{D}{t_1 + \frac{D - D_1}{c}} \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{D}{t_s + \tau + \frac{-w_s + \sqrt{w_s^2 + 8m(D - D_s)}}{2m}} \quad (8)$$

3) $D_2 \leq D$

$$T_1 = \frac{D}{t_1 + \frac{D - D_1}{c}} \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{D}{t_2 + \frac{D - D_2}{c}} \quad (10)$$

5.3 数値解析結果

前節で示した数式による不要パケット数の削減効果とスループット改善効果の結果を示す.

不要パケット削減効果については, F-RTO を用いることで, 1 パケットに削減できる. F-RTO を利用しない場合, 不要パケット数は cwnd の値に依存する. 無線帯域幅 384 kbps, RTT 300 ms では, cwnd を BDP と等しくした場合, 最大 10 パケット, 実網と同じく cwnd を 64 kbyte とした場合, 最大 44 パケットとなる.

スループット改善効果は, 無線帯域幅 384 kbps, RTT 300 ms, コンテンツサイズ 300 kbyte において, STO がスロースタート中の, 初期 $w = 3$, 中盤 $w = c/2$, 最大 cwnd に達したとき $w = c$ で発生した条件で解析を行った.

数値解析の結果を図 4 で示す. F-RTO/Eifel Response を用いない場合, パケット転送初期で STO が発生すると, cwnd が低い状態で輻輳回避動作となりスループットが低下するが, F-RTO/Eifel Response を用いることで, STO 発生時のスループットは STO

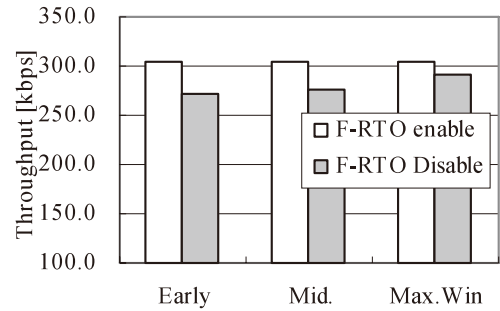


図 4 スループット改善効果

Fig. 4 Improvement of throughput.

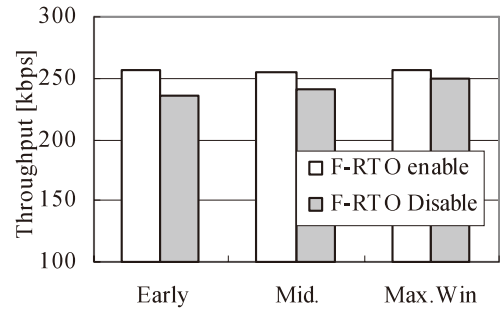


図 5 シミュレーション実験結果

Fig. 5 Experimental results.

発生箇所に依存せず一定となることを確認した.

5.4 シミュレーション実験結果

本節は, 回線エミュレータを用いたシミュレーション実験結果について述べる. 実験環境は, 移動端末を模擬した PC と, F-RTO/Eifel Response を実装したサーバを回線エミュレータ経由で接続した. 測定条件としては, 回線条件を無線帯域幅上り 64 kbps 下り 384 kbps, RTT 300 ms とし, コンテンツサイズを 300 kbyte とした. TCP パラメータは, cwnd を BDP と一致させ, キューイング遅延や cwnd 枯渇などの影響を排除し, 数値解析と条件を揃えた.

シミュレーション実験の結果を図 5 に示す. 数値解析と同じく, F-RTO/Eifel Response を用いない場合, パケット転送初期で STO が発生した場合に, スループット低下が最も大きく, F-RTO/Eifel Response を用いることで, スループットが一定になることを確認した.

しかし, 数値解析とシミュレーション実験では, 改善比率の傾向は一致したが, スループットはシミュレーション実験の値が改善後で約 15% 小さくなった. 原因としては, 実験装置の処理負荷による遅延増加や, 数値解析において簡略化した Ack Burst の回線エミュレータ上の挙動が影響しているものと考えられる.

6. IMT-2000 網における性能評価

本章では、提案方式に 4 章で得られた RTO タイマの最適値を適用し、IMT-2000 における実際の利用形態に近い環境での性能評価を実施し、提案方式の有効性を明らかにした。

6.1 評価環境，評価方法

評価環境は、5 章において RTO タイマ最適化の測定を実施した系 (図 1) を用い、サーバに、F-RTO と Eifel Response を実装した。移動端末の通信環境は、固定 (弱電界，強電界)，低速移動 (歩行者)，中速移動 (自動車)，高速移動 (特急電車) の各環境で実際の交通機関を利用し測定を行った。取得するコンテンツは、6 kbyte，18 kbyte，300 kbyte，2 Mbyte の 4 種類を用意し、それぞれメール受信，Web アクセス，動画閲覧を想定した。高速移動の測定では、試行回数，測定時間の制限により 500 Mbyte のファイル取得により測定を実施した。測定項目としては、STO 発生頻度，STO 発生時の不要再送パケット数，スループットを算出した。

6.2 評価結果

6.2.1 STO 発生頻度

STO の発生頻度は、サーバの RTO タイマ値を標準 (初期値 3 秒，最小値 0.5 秒) と提案方式による最適値 (初期値 4 秒，最小値 4 秒) に設定した場合の比較を行った。図 6 に移動環境別の STO の 1 MB 転送あたりの発生回数を示す。標準の RTO タイマでの STO 発生回数の最大値は、高速移動の 0.36 回/MB で、最小値は固定 (弱電界) の 0.18 回/MB となった。最適化した RTO タイマでは、最大値は高速移動の 0.23 回/MB，最小値は固定 (弱電界) の 0.01 回/MB となった。RTO タイマの最適化により、全環境での STO 発生頻度が低減され、移動環境では速度低下にともない STO の発生頻度が減少した。移動環境では Delay Spike の遭遇回数は速度に比例するため、RTO タイマの最適化により Delay Spike 要因以外の STO を抑止できたものと考えられる。

固定環境では弱電界より強電界の STO 発生回数が多くなるという結果となった。標準の RTO タイマの場合、強電界では RTT が安定し RTO タイマと接近するため、伝播環境の変動による RTT 増加で RTO が発生しやすくなったと考えられる。RTO タイマを最適化した場合では、環境要因により Delay Spike が発生したためと考えられるが、頻度が小さく、サンプル数を増加させることにより、弱電界と同等以下となるものと思われる。

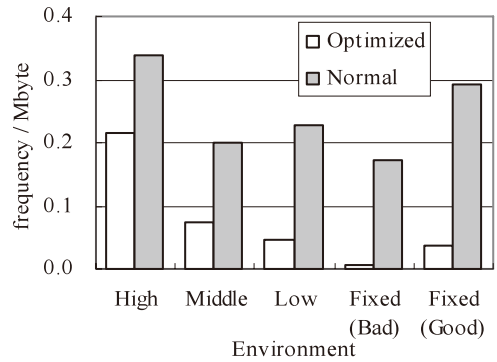


図 6 スプリアスタイムアウト再送頻度 Fig. 6 Frequency of STO.

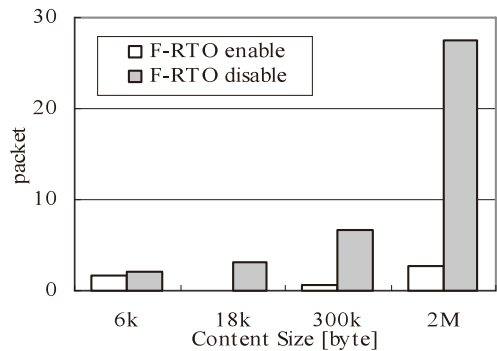


図 7 不要パケット再送数 (コンテンツサイズ別) Fig. 7 Unnecessary retransmit packet by content size.

6.2.2 不要パケット再送数

図 7 に F-RTO/Eifel Response の適用の有無による STO 発生時の不要パケット再送数を示す。不要パケット再送数の値は、STO の発生によって受信側に重複して受信されたパケット数の平均値を示している。F-RTO を無効とした場合、不要パケット再送数は STO が発生したときの cwnd の大きさに依存する。測定結果は cwnd の平均値が最も大きくなるコンテンツサイズ 2 Mbyte のときに平均 28 パケットと最も大きく、逆に cwnd を最大値まで利用しない 6 kbyte のときに平均 1.6 パケットと最も小さくなった。F-RTO を用いることで不要パケット再送数を 2 Mbyte のときに平均 3 パケット、その他の領域でも平均 2 パケット未満に低減できることが明らかとなった。

6.2.3 スループット改善効果

図 8 に F-RTO/Eifel Response の有無による、スループットを示す。スループットの値は、スロースタート中に STO が 1 回発生したサンプルの平均値と信頼度 95%の信頼区間を示す。コンテンツサイズ 6 kbyte では、cwnd が小さく、改善効果は限定的となったが、

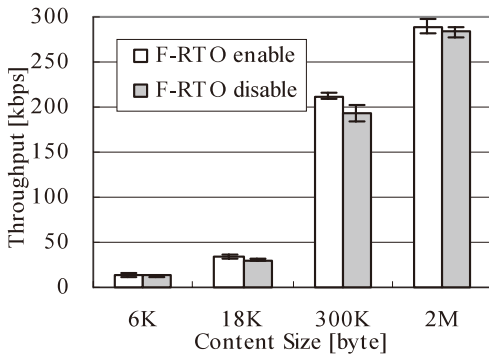


図8 スループット比較

Fig. 8 Throughput by content size.

18kbyte 以上のコンテンツにおいては、2%~12%程度の改善効果が得られることを確認した。この結果は、不要パケット再送抑止によるパケット送信量の削減と Eifel Response による不要な輻輳制御抑止の相乗的な効果により得られていると考えられる。今後、無線チャネルの広帯域化やコンテンツの大容量化にともない、cwnd の拡大および転送データ量の増加が想定され、より提案方式の有効性が高まると思われる。

6.3 F-RTO の正確性

F-RTO は、送信側の実装のみで動作可能という移動通信網に最適な特徴を有する。この特徴は、他方式が重複パケットの通知や timestamp による対応付けにより直接的に重複パケットを検出することに対し、F-RTO が再送手順を変更し Duplicate Ack により間接的に重複パケットを検出することで得られている。本節では、F-RTO が移動通信網のような特性変動が大きい環境でも正確に動作するかという点について、実網での測定で発生した STO について、F-RTO により検出できなかった事象を解析することで検証する。

今回の測定で発生した全 STO のうち 29% が検出不能となった。内訳は以下の 3 通りとなった。(1) STO が発生したが、送信すべきパケットがすべて受信側に到達し、FIN が送信された。(2) STO が発生し F-RTO の動作に入ったが、cwnd に空きがなく、新たなパケットの送信が不可能だった。(3) RTO 発生後、重複 ACK を受信し F-RTO が動作しなかった。それぞれの頻度を表 4 に示す。

(1) では、F-RTO が動作する以前に転送が終了し検出動作が行われなかった。この状況では他方式でも検出動作は行われないため、F-RTO 特有の問題ではない。(2)、(3) は、F-RTO の仕様上、検出動作不可であった事象である。これらの事象は全 STO のうち 1% であり、全トラフィック中の STO 発生頻度と比べる

表 4 F-RTO により検出不能な STO

Table 4 Undetected STO by F-RTO.

STO発生後FINで終了	28%	合計 29%
STO発生後Windowの空きが がなかった	0.70%	
Timeout後のDup-Ack受信	0.30%	

とわずかであり、F-RTO の正確性に問題はないと考える。

7. ま と め

本稿で、IMT-2000 のエンド・エンド回線で利用される TCP の再送方式として、RTO タイマの最適化技術と、STO 検出・応答技術を組み合わせた再送方式の提案を行った。

RTO タイマの最適化では、無線チャネルの遅延発生要因のうち、RLC 再送の挙動に着目し、Delay Spike による STO 発生を対象外とすることで、STO 発生率を低下させ、かつ RTO 再送待ち時間の長大化を防ぐ RTO タイマ設定方法を提案した。提案方式に基づき、実網で RTO タイマ最適化測定を行った結果、今回の測定環境では、RTO タイマ初期値、最小値を 4 秒とすることで、STO 発生頻度がコネクションあたり約 1% と収束し、それ以降の値では大きな減少がないことを確認した。RTO タイマ最適化で対象外とした Delay Spike による STO に対しては、STO 検出・応答技術を適用し、不要パケット再送、不要な輻輳制御を回避することを提案した。STO の検出・応答技術としては、移動通信網に最も適した特徴を持つ F-RTO と Eifel Response を選択した。F-RTO と Eifel Response については、数値解析とシミュレーション実験により性能解析を行い、IMT-2000 をモデルとした条件における両方式の性能改善効果を明らかにした。

F-RTO と Eifel Response は IETF において標準化が行われており、Linux においては 2.4.21 から実装されている。また F-RTO は HP-UX に実装され、オープンソース OS だけでなく商用の OS にも搭載が行われ始めており、今後普及が進むことが期待される。

提案方式の IMT-2000 の実網での性能評価では、移動環境において、4 章で得られた RTO タイマ初期値、最小値 4 秒を適用し、STO 発生頻度が低減することを確認した。このときの STO 発生頻度は、移動速度に比例する傾向が得られ、これは STO の発生要因を移動環境で頻発する Delay Spike に限定できたことを示していると考えられる。不要パケット再送数の抑止効果としては、コンテンツサイズ 2Mbyte のデータ転

送において平均 28 パケットから平均 3 パケットに低減し、スループット改善効果については、最大 12% 向上という結果が得られた。

提案方式の適用方法としては、本稿ではサーバとクライアントが直接 TCP で接続されるエンド・エンド接続モデルを前提に評価を実施した。しかし、エンド・エンド接続モデルでは、提案方式をサーバ側に適用させることが必須であり、インターネット上に存在するサーバへ広く普及させることが困難である点、RTO タイマ値が、サーバが設置された固定網の遅延の影響を受け、STO 収束値から乖離する可能性がある点が課題となる。この課題の解決策として、今後、提案方式を移動通信網と固定網の接続点で TCP パラメータを変換するゲートウェイ²²⁾ に実装することを検討したい。ゲートウェイを用いることで、提案方式が未実装のサーバに対するアクセスにおいても提案方式を有効化できることに加え、TCP の終端が移動端末とゲートウェイ間となることで、固定網の遅延の影響を排除することが可能となる。これにより、RTO タイマ値を移動通信網の遅延特性に正確に設定することが可能となること、帯域幅遅延積が小さくなることで回線の最大スループットを得るために必要な cwnd 値が低減可能となること、といった利点が得られると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 3GPP, TR25.308, High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2 (Mar. 2007).
- 2) 3GPP TS25.322, Radio Link Control (RLC) protocol specification (June 2007).
- 3) 3GPP TS25.303, Interlayer procedures in Connected Mode (June 2005).
- 4) Inamura, H., et al.: TCP over Second (2.5G) and Third (3G) Generation Wireless Networks, RFC3481 (Feb. 2003).
- 5) Gurtov, A. and Ludwig, R.: Evaluating the Eifel Algorithm for TCP in a GPRS network, *Proc. European Wireless* (Feb. 2002).
- 6) Sarolahti, P., Kojo, M. and Raatikainen, K.: F-RTO: An Enhanced Recovery Algorithm for TCP Retransmission Timeouts, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.33, No.2, pp.51–63 (Apr. 2003).
- 7) Sarolahti, P. and Kojo, M.: Forward RTO-Recovery (F-RTO): An Algorithm for Detecting Spurious Retransmission Timeouts with TCP and the Stream Control Transmission Protocol (SCTP), RFC4138 (Aug. 2005).
- 8) Ludwig, R., et al.: The Eifel Response Algorithm, RFC4015 (Feb. 2005).
- 9) Paxson, V. and Allman, M.: Computing TCP's Retransmission Timer, RFC2988 (Nov. 2000).
- 10) Ekstrom, H. and Ludwig, R.: The peak-hopper: A new end-to-end retransmission timer for reliable unicast transport, *IEEE INFOCOM 2004* (Mar. 2004).
- 11) Kesselman, A. and Mansour, Y.: Optimizing TCP Retransmission Timeout, ICN2005, pp.133–140 (Apr. 2005).
- 12) Ludwig, R. and Meyer, M.: The Eifel Detection Algorithm for TCP, RFC3522 (Apr. 2003).
- 13) Blanton, E. and Allman, M.: Using TCP Duplicate Selective Acknowledgement (DSACK) and Stream Control Transmission Protocol (SCTP) Duplicate Transmission Sequence Numbers (TSNs) to Detect Spurious Retransmissions, RFC3707 (Feb. 2004).
- 14) Mathis, M., Mahdavi, J., Floyd, S. and Romanow, A.: TCP Selective Acknowledgment Options, RFC2018 (Oct. 1996).
- 15) Handley, M., et al.: TCP Congestion Window Validation, RFC2861 (June 2000).
- 16) 石川, 稲村, 高橋: W-CDMA 向け TCP プロファイル, 情報処理学会研究報告, 2000-ITS-003 (Dec. 2000).
- 17) Inamura, H. and Ishikawa, T.: A TCP profile for W-CDMA: 3G wireless packet service, draft-inamura-docomo-00.txt (July 2000).
- 18) Casetti, C., Gerla, M., et al.: TCP Westwood: Bandwidth Estimation for Enhanced Transport over Wireless Links, *Proc. ACM Mobicom 2001*, Rome, Italy, pp.287–297 (July 16–21 2001).
- 19) Wu, E.H.K. and Chen, M.Z.: JTCP: Jitter-based TCP for heterogeneous wireless networks, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.22, No.4, pp.757–766 (May 2004).
- 20) Mey, O., et al.: Optimum Number of RLC Retransmissions for Best TCP Performance in UTRAN, *PIMRC 2005* (Sep. 2005).
- 21) Sarolahti, P.: TCP Performance in Heterogeneous Wireless Networks, Department of Computer Science Series of Publications A Report A-2007-1, Helsinki Univ. (2007).
- 22) 高橋, 関口, 鶴巻, 稲村, 渥美, 水野: 第3世代移動通信網を介した高速インターネットアクセスのためのステルス型ゲートウェイの提案と実装評価, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.3, pp.637–646 (2003).

(平成 19 年 4 月 4 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



関口 克己

1997年群馬大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年NTT移動通信網株式会社(現,NTTドコモ)入社。以来,移動パケット通信システム,モバイルVPNプロトコル,ゲートウェイシステムの研究開発に従事。現在,同社ネットワーク開発部および公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程に在籍。電子情報通信学会会員。



外村 彩

2003年慶應義塾大学環境情報学部卒業。同年株式会社NTTドコモ入社。以来,開発プロセス改善システム,モバイルインターネットの研究開発,iモードゲートウェイ装置開発を経てAIPNに向けたネットワーク付加価値サービス検討に従事。現在,同社ネットワーク開発部に在籍。



山本 和徳

2003年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年株式会社NTTドコモ入社。以来,移動通信網におけるトランスポートプロトコルに関する研究・開発に従事。現在,同社サービス&ソリューション開発部に在籍。電子情報通信学会会員。



鈴木 偉元

1991年千葉大学大学院工学研究科修士課程修了。同年NTT入社。現在,NTTドコモネットワーク開発部に所属。移動通信網向け情報蓄積系システムの開発に従事。博士(情報学)。電子情報通信学会会員。



石川 憲洋(正会員)

1978年京都大学工学部情報工学科卒業。1980年同大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社(現,NTT)入社。現在,NTTドコモサービス&ソリューション開発部に所属。モバイルインターネット,ユビキタスネットワーク等の研究開発に従事。博士(情報学)。電子情報通信学会,IEEE各会員。



高橋 修(フェロー)

1975年3月北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年電電公社(現,NTT)入社。電気通信研究所にてコンピュータネットワークアーキテクチャの研究開発,およびOSIの標準化に従事。1999年1月NTTドコモに異動。モバイルインターネットの研究開発に従事。2004年4月より公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科教授。博士(工学)。電子情報通信学会,IEEE各会員。当会フェロー。