

携帯電話網における複数パケットサイズを用いた 通信品質推定に関する一検討

後藤 崇行[†] 田上 敦士[†] 長谷川輝之[†] 阿野 茂浩[†]

[†] 株式会社 KDDI 研究所 〒 356-8502 埼玉県ふじみ野市大原 2-1-15

E-mail: †goto@kddilabs.jp

あらまし 近年、携帯電話経由でのデータ通信量の増加に伴い、通信品質の把握・向上が重要な課題となりつつある。主要な通信品質指標である TCP スループットに関しては、有線網を対象に様々なアクティブ計測手法が存在する。しかしながら、大部分の手法は、大量のパケット送信が必要となりリソースの限られた携帯電話網には適さない。一方、網負荷の少ない手法として、少量のパケットの伝送時間分布から帯域を推定する手法も提案されているが、これらが無線状況により頻繁に変化する携帯電話網にそのまま適用することは困難であり、また、TCP スループットを直接推定するものではない。これに対して、筆者らは携帯電話網における通信品質として、異なるサイズのパケットを送信して得られる伝送時間分布から TCP スループットを推定する手法を提案する。具体的には、携帯電話網における TCP スループットが無線区間の物理帯域と伝送時間の揺らぎ成分から構成されるというモデル化を行い、実際にパケットを送信して得られる伝送時間分布から TCP スループットの推定式を求める手法である。本稿では、提案手法の詳細について述べ、商用の携帯電話網に対して実験を行った結果を示す。

キーワード 通信品質推定, 複数パケットサイズ, アクティブ計測, CDMA2000 1xEV-DO

A Study on Communication Quality Estimation Using Multiple Packet Size Probing in CDMA2000 1xEV-DO System

Takayuki GOTO[†], Atsushi TAGAMI[†], Teruyuki HASEGAWA[†], and Shigehiro ANO[†]

[†] KDDI R&D Labs. Ohara 2-1-15, Fujimino-shi, Saitama, 356-8502 Japan

E-mail: †goto@kddilabs.jp

Abstract Recently, it is becoming important to grasp and improve the communication quality in a cellular data service as the market grows. In regard to the TCP throughput, a major communication quality metric, there are a variety of active measurement methods for wired environments. However, it is difficult to apply them to cellular networks whose bandwidth resources are limited, because most of these techniques transmit a large amount of probing packets. Although some estimation methods use small amount of probing packets, it is still a challenge to apply them for wireless environment due to its unstable availability of bandwidth resource. Furthermore, these method cannot estimate TCP throughput directly. In this paper, we propose a method to estimates TCP throughput in cellular networks based on the propagation time of probing packets with multiple sizes. Specifically, we established a model that TCP throughput in wireless network is composed of physical bandwidth and its fluctuation elements. We also evaluated the model quantitatively with real measurement on a commercial cellular network.

Key words Communication Quality Estimation, Multiple Packet Size, Active Measurement, CDMA2000 1xEV-DO

1. はじめに

近年、携帯電話の契約台数が1億を突破し、国内で一人一台にまで幅広く普及したと言える状況となった。それに加え、携

帯電話向けの映像・音楽といった大容量コンテンツのダウンロード数は年々増加傾向にある。また、携帯キャリア各社がデータ通信定額制を導入しており、携帯電話を経由したデータ通信の増加傾向に拍車がかかっている。

このような背景において、ユーザからの通信品質改善に対する要求が高まってきており、キャリアで通信品質の改善が重要課題となっている。通信品質を改善するためには、まずは通信品質を把握することが必要であり、簡易に通信品質を把握できる手法の開発が望まれている。主要な通信品質の指標として TCP スループットが挙げられ、有線網を対象に様々なアクティブ計測手法が存在する [1]。しかしながら、大部分の手法は、大量の packets 送信が必要となり本研究で対象とするリソースの限られた携帯電話網には適さない。一方、網負荷の少ない手法として、少量の packets の伝送遅延からリンク毎の帯域、パス上のボトルネック帯域、可用帯域を推定する手法も提案されている [1] が、ボトルネック帯域が無線状況により頻繁に変化する携帯電話網にそのまま適用することは困難である。また、これらは TCP スループットを想定したものではない。

これに対して、筆者らは携帯電話網における通信品質として、packets の伝送時間分布から TCP スループットを推定する手法を検討してきた [2]。本稿では、更なる精度向上を目的として、複数の packets サイズを適用して TCP スループットを推定する新しい手法を提案する。具体的には、サイズの異なる packets を少量送信し、得られた伝送時間分布から無線区間の物理帯域と伝送時間の揺らぎを計算した上で TCP スループットを推定する。また、商用携帯端末を用いて実験を行った結果を示す。

2. 従来の通信品質把握手法

通信品質を把握する上で重要なパラメータとなるのがネットワークの帯域である。帯域を把握する手法として、直接計測する手法と推定する手法のそれぞれを説明する。

2.1 帯域計測手法

基本的な考えは、利用可能な帯域資源限界まで packets を送信し、その結果から値を計測する手法であり、種々のベンチマークツールが公開されている。計測した値がそのまま通信品質値を示すことである利点がある。一方、欠点として利用可能な資源限界まで packets を送信するため、計測対象のネットワークに対する負荷が大きいために挙げられる。この種のツールとしては、Iperf [3]、Netperf [4]、Sperf [5] がある。また、TCP セッションで転送可能なデータレートである BTC (Bulk Transfer Capacity) を計測する手法として、cap [6] がある。

DualPats [7] は定常状態の TCP スループットを推定する手法である。ファイルサイズとファイル転送時間が比例関係にあるとし、大小 2 種類のファイル転送それぞれから得られる TCP スループットを線形近似することにより推定する手法である。定常状態の TCP スループットを推定するが、ファイル転送による計測から推定する手法でありネットワークへの負荷は大きい。

2.2 帯域推定手法

従来の帯域推定手法は、大きく One-Packet 推定と Packet-Pair/Train 推定に大別でき、リンク毎の物理帯域やエンドエンドのボトルネックとなるリンクの物理帯域、エンドエンドの可用帯域を推定する手法が提案されている [1]。以下、これらにつ

いて説明する。

2.2.1 Packet-Pair/Train 推定

2 つ以上の連続した packets を送信し、2 番目以降の packets が受けるボトルネックリンクでのキュー遅延が受信側で観測される広がり (dispersion) であることを利用した推定手法である。物理帯域を推定する手法として、pathrate [8]、CapProbe [9] などがある。更に、物理帯域のうち実際に使用可能な帯域である可用帯域を推定する手法も提案されている [1]。しかし文献 [10] で指摘されているとおり、本研究で対象としている TCP スループットと可用帯域とは基本的に異なる概念である。

Packet-Pair による物理帯域推定は、クロストラヒックが少ない環境下では、比較的少量のプロブ packets で物理帯域を推定可能である利点がある。また、packets ペア間の伝送時間差を利用するため、送受信間で時刻を同期する必要がない。一方、計測単位としている packets ペアの両方がクロストラヒックによるキューイングの影響を受けてはならないため、クロストラヒックが多い場合には推定精度が悪くなるという問題点がある。この問題点を緩和したのが Packet-Train による推定であるが、Packet-Pair/Train 推定は Pair/Train 単位でバースト的に連続した packets を送信することから、短時間に送信する packets 量が多くなり、計測対象ネットワークへの負荷が大きくなる傾向にある。

2.2.2 One-Packet 推定

計測単位を 1 packet とし、1 packet 毎の振る舞いから帯域を推定する手法である。以下、One-Packet 推定について説明する [11]。リンク (ストアアンドフォワード装置で区切られた区間) 数 M のパスにおける伝送時間 T_M は次式で表わされる。

$$T_M = \sum_{i=1}^M \left(\frac{L}{B_i} + l_i + q_i \right) \quad (1)$$

L は packets サイズ、 B_i 、 l_i 、 q_i は i 番目のリンクの物理帯域、物理的距離に伴うレイテンシー、ルータでの待ち遅延と転送時間である。 q_i は確率変数であり最小値をとると 0 になるため以下のようになる。

$$\min\{T_M\} = \sum_{i=1}^M \left(\frac{L}{B_i} + l_i \right) \quad (2)$$

$$\min\{T_M\} - \min\{T_{M-1}\} = \frac{L}{B_M} + l_M \quad (3)$$

T_M は T_M の集合を表している。従って、様々な packets サイズに対する T_M の最小値と T_{M-1} の最小値の差をそれぞれ求め、packets サイズとその差の組を結んで出来る直線の傾きの逆数が物理帯域となる。この様子を図 1 に示す。

以上の原理を利用して、リンク毎の物理帯域やエンドエンドのボトルネック帯域を推定する手法が提案されている。pathchar [11] はリンク毎の物理帯域を推定する手法である。様々なサイズの packets を送信して RTT (Round Trip Time) を測定し、packets サイズと RTT の最小値を最小二乗法によっ

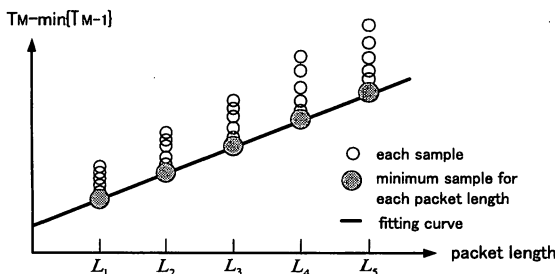


図1 物理帯域の推定

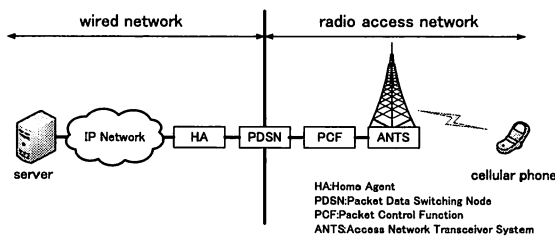


図2 CDMA2000 1xEV-DO システム

てフィッティングし、得られた傾きの逆数から物理帯域を推定する手法である。リンク毎の物理帯域の最小値はボトルネック帯域に相当するため、ボトルネック帯域推定手法でもある。

文献 [12] では pathchar を詳細に分析しており、pathchar の改良として伝送時間サンプルを偶奇によって分類し、それらから得られる 4 種類の推定値の収束性から物理帯域を推定する手法を提案している。pchar [13] は、傾きを得るために 3 つの線形回帰アルゴリズムが使用可能である。

One-Packet 推定は、1 パケット単位での制御に基づいているため、Packet-Pair/Train 推定に比べクロストラフィックの影響を受けにくいという利点がある。One-Packet 推定は、送受信間での時刻同期の難しさから、ICMP パケットを利用した RTT の差異から物理帯域推定を行う手法が多いが、上り方向と下り方向で異なる経路を通る場合には精度が悪くなる問題点がある。また、ICMP 応答に基づく手法では、スイッチングハブなどストアアンドフォワード処理を行うにもかかわらず TTL (Time To Live) 値を変化させない様な装置を通過する場合には、物理帯域が狭く推定される問題点がある。

3. 提案手法

提案手法は携帯電話網を対象として、TCP スループットをモデル化し少量のプロープパケットから TCP スループットを推定する手法である。本研究で対象とする携帯電話網は、CDMA2000 1xEV-DO システム [14] (以下、EV-DO システム) であり、大きく、有線区間 (wired network) と無線区間 (radio access network) から構成される (図 2)。以下、提案手法の詳細について述べる。

3.1 計測方法

提案手法ではサイズの異なるパケットを送信するが、関連するパラメータとして、パケットサイズの種類を N 、対応するパ

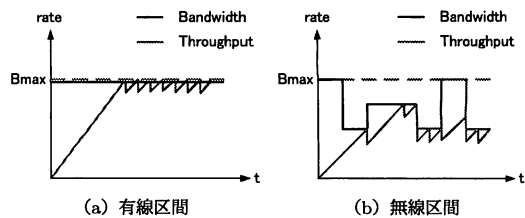


図3 物理帯域と TCP スループットとの関係

ケットサイズを L_i [byte] ($i = 1, 2, \dots, N$)、パケットの送信間隔を T [ms] とする。また送信方法として、サイズの小さなパケットから順番に大きなパケットまで 1 パケットずつ送信する試行を 1 試行とし、これを P 試行分送信する手順を採用する。図 4 は $N=4$ 、 $P=3$ としたときの結果例である。

3.2 TCP スループットのモデル化

携帯電話網の無線区間は、有線区間と異なり、チャンネル割当等により物理帯域が頻繁に変動する。例を図 3 (a), (b) に示す。図中の Throughput を TCP スループットの瞬間値、Bandwidth を物理帯域とする。図 3 (a) は物理帯域が一定な有線区間の例であり、TCP スループットの瞬間値も大きな変動を示さない。一方、図 3 (b) の無線区間の例では物理帯域が変動しており、TCP スループットが変動の影響を受けることがわかる。

EV-DO システムでは、物理帯域が頻繁に変動するため、追従するには計測対象網への負荷を大きくせざるを得ない。一方、TCP スループットはある一定の時間幅における積分値として定義されるため、そもそも時間変動に追従する必要はない。

そこで本研究では、物理帯域の変動をパケットの伝送時間の変動で推定できると仮定し、以下のように、TCP スループットを物理帯域の最大値と伝送時間の揺らぎとしてモデル化する手法を提案する。

$$Th = B_{max} \cdot F + C \quad (4)$$

Th は TCP スループットであり、 B_{max} は図 3 に示した計測時間内における物理帯域の最大値、 F は伝送時間の揺らぎ成分、 C は定数項である。以下、 B_{max} と F の算出方法について述べる。

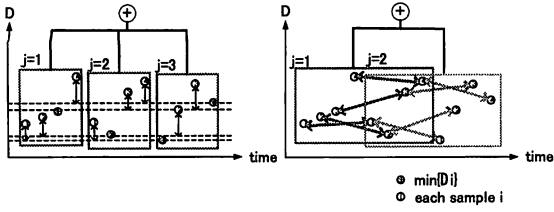
3.3 物理帯域の最大値

B_{max} を求める手法として、2 節で述べた pathchar の手法ベースにする。但し、本手法では以下の片方向伝送時間 D を用いる。

$$D = T_r - T_s \quad (5)$$

T_r は受信側が付与するプロープパケットの受信時刻、 T_s は送信側が付与するプロープパケットの送信時刻である。

有線区間の伝送速度は 100 [Mbps] 程度である一方、無線区間 (本研究で対象とする Rel.0) の理論上の最大値は 2.4 [Mbps] である。すなわち、有線区間と無線区間の伝送速度の差は大きく、物理帯域は伝送速度の低い無線区間によって決定される。この



(a) 最小値からの揺らぎ (b) 時間方向での揺らぎ
図4 揺らぎ成分 ($N=4, P=3$ の例)

時、式 (3) を以下のように近似する。但し、無線区間を $i=r$ とする。

$$\begin{aligned} \min\{\mathbf{D}\} &= \sum_i \left(\frac{L}{B_i} + l_i \right) \\ &= \frac{L}{B_r} + \sum_{i \neq r} \frac{L}{B_i} + \sum_i l_i \\ &\simeq \frac{L}{B_{\max}} + E \end{aligned} \quad (6)$$

無線区間の物理帯域 B_r とパケットサイズ L 以外を定数 E と見なすことで、 $\min\{\mathbf{D}\}$ はパケットサイズ L の線形関数となり、この傾きは無線区間の物理帯域 B_{\max} の逆数である。これより $\min\{\mathbf{D}\}$ を各パケットサイズ毎に求め、パケットサイズとパケットサイズ毎の伝送時間の最小値 $\min\{\mathbf{D}_i\}$ から最小二乗法を用いて傾き $1/B_{\max}$ を求める。

$$\frac{1}{B_{\max}} = \frac{\sum_{i=1}^N (L_i - \bar{L}_i) \cdot (\min\{\mathbf{D}_i\} - \overline{\min\{\mathbf{D}_i\}})}{\sum_{i=1}^N (L_i - \bar{L}_i)^2} \quad (7)$$

$\bar{L}_i, \overline{\min\{\mathbf{D}_i\}}$ は、使用するパケットサイズの平均値、伝送時間 D のパケットサイズ毎の最小値の平均値である。

pathchar はリンク毎に物理帯域を計算するため演算量がリンク数に比例するが、本手法では、無線区間をボトルネックリンクとして見なしてこの物理帯域の最大値を求めるため、リンク数に関係せず演算量は一定である。

3.4 揺らぎ成分

物理帯域成分の計算に使用したプローブパケットの結果を利用し、式 (4) における伝送時間の揺らぎ成分 F を算出する。 F を次式のように、各パケットサイズの伝送時間の最小値からの揺らぎ成分 F_m とパケットサイズの組単位での時間方向の揺らぎ成分 F_t の線形結合で定義する。

$$F = a_1 + a_2 \cdot F_m + a_3 \cdot F_t \quad (8)$$

3.4.1 最小値からの揺らぎ成分

F_m は伝送時間 D の最小値からの揺らぎ成分である (図 4 (a))。次式のとおり、各パケットサイズの最小値と各サンプル値との N 次元距離で求める。

$$F_m = \frac{\sum_{j=1}^P \sqrt{\sum_{i=1}^N (D_i^j - \min\{\mathbf{D}_i\})^2}}{P} \quad (9)$$

D_i^j は、 j 番目の試行における L_i [byte] パケットの伝送時間とする。

3.4.2 時間方向の揺らぎ成分

F_t は伝送時間 D の時間方向の揺らぎ成分である (図 4 (b))。時間方向の揺らぎはパケットサイズによって異なることが想定されるため、次式のとおり、時間方向で隣り合う同じサイズのパケットの伝送時間差の N 次元距離で求める。 D_i^j の定義は前述のとおりである。

$$F_t = \frac{\sum_{j=1}^{P-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (D_i^j - D_i^{j+1})^2}}{P-1} \quad (10)$$

4. 実験

4.1 概要

3 節で述べたモデルの有効性を確認するために、実環境 (東京都内各地) においてパケットの伝送時間を計測した。並行して、リファレンス用の TCP スループットも計測を行った。両計測結果から TCP スループットの推定式を作成し、リファレンス用 TCP スループットとの相関を調査した。

本研究のシステム構成図を図 5 に示す。サーバとクライアントから構成されており、サーバは、OS が Linux (kernel 2.6.19)、CPU が 2.13[GHz]、メモリが 1[GB] である。プローブパケットのクライアントである携帯端末は、機種が E02SA、OS が BREW version 3.1 [15] である。リファレンス用 TCP スループット計測のクライアントは、OS が Windows XP、カード端末機種が W01K のノート PC である。

プローブを行うに先立ち、サーバは文献 [16] の基本原理を利用した CPU クロックと NTP サーバにより、携帯端末は GPS によりクロック同期をする。これにより、文献 [17] で述べられているクロックドリフト問題は発生しない。

プローブの前後で TCP スループットを計測し、その平均値をリファレンスとして利用する。2 回計測するのは TCP スループットの変動を考慮するためである。TCP スループットは、プローブパケットを送信するサーバと同じサーバから、2[MB] のファイルを HTTP 経由でダウンロードして得られる値であり、ユーザ (アプリケーション) が体感するスループット (グッドプット) を用いる。

$$\text{TCPthroughput} \triangleq \frac{\text{EndSeqNum} - \text{StartSeqNum}}{\text{EndTime} - \text{StartTime}} \quad (11)$$

StartSeqNum, EndSeqNum, StartTime, EndTime はそれぞれ TCP フローの開始時のシーケンス番号、終了時のシーケンス番号、開始時刻、終了時刻である。

4.2 プローブパラメータ設定

パケットサイズを 5 種類 ($N=5$) とし、各サイズを $L_1=50, L_2=400, L_3=800, L_4=1200, L_5=1400$, パケットサイズ毎の送

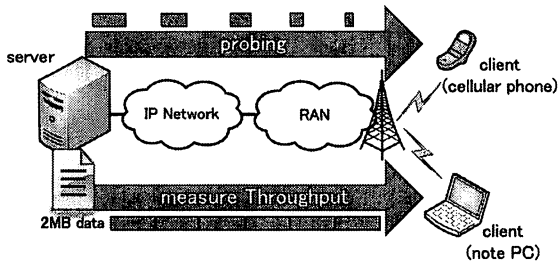


図5 システム構成

信数を $P=90$ とした。物理帯域推定のためには様々なパケットサイズが必要であること、及び無線区間での RLP (Radio Link Protocol) の仕様を考慮しての値である。

パケットの送信間隔 T は、計測対象ネットワークへの負荷を抑えるため、また各試行の独立性を保障するために RLP フレームの再送用タイマーの値を考慮した値 $T=500[\text{ms}]$ とした。以上のパラメータ設定により、12.32 [kbps] のストリームを 225 [sec] 送信することとなる。この値は DRC (Data Rate Control) が最小値の場合の物理帯域 38.4[kbps] の約 1/3 であり、計測対象ネットワークへの負荷は十分小さいと言える。

4.3 TCP スループット推定

プローブパケットを送信し、得られた伝送時間 D から物理帯域および揺らぎ成分を算出し、計測した TCP スループットの平均値から、TCP スループットを推定するモデル式を生成する。式 (4) に式 (8) を代入すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} Th &= B_{\max} \cdot F + C \\ &= B_{\max} \cdot (a_1 + a_2 \cdot F_m + a_3 \cdot F_t) + C \\ &= b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (12)$$

最小二乗法による線形重回帰分析を用いると、各係数は以下のように求められる。

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{T} \quad (13)$$

\mathbf{b} は求める係数のベクトル、 \mathbf{X} は説明変数 (物理帯域、最小値からの揺らぎ、時間方向の揺らぎ) を各計測毎にまとめた行列、 \mathbf{T} は目的変数 (各計測で得られた TCP スループット) のベクトルである。

5. 実験結果及び考察

5.1 実験結果

式 (12) を用いて TCP スループット推定式を作成した結果を図 6 に示す。横軸がリファレンス用の TCP スループット、縦軸が計測した伝送時間を生成したモデルに当てはめて推定される TCP スループットである。計測した TCP スループットと推定した TCP スループットの相関係数は 0.83 となり、相関係数があると考えられる。

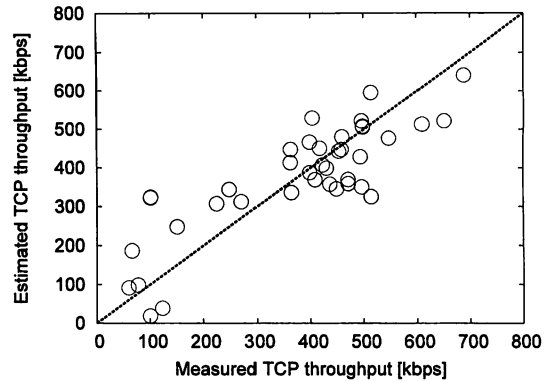


図6 TCP スループットフィッティング結果

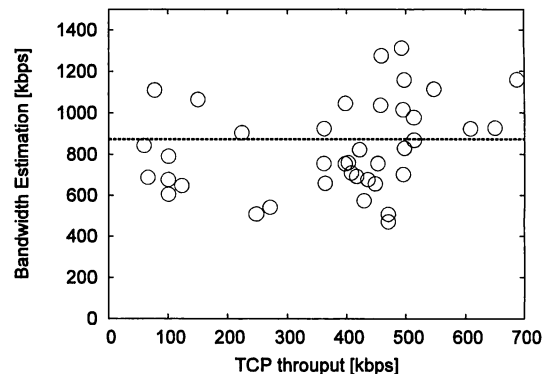


図7 物理帯域推定結果

5.2 物理帯域推定

式 (7) を用いて物理帯域の最大値 B_{\max} を推定した結果を図 7 に示す。横軸が計測した TCP スループット、縦軸が推定した物理帯域である。推定の平均値は 873.4[kbps]、最大値は 1311.8[kbps]、最小値は 470.5[kbps] であり、平均値を図中に破線で示してある。図から、TCP スループットと B_{\max} の間に相関はほとんどないことがわかり、相関係数も 0.28 であった。すなわち、 B_{\max} のみでは TCP スループットは推定できないことがわかった。これは 3. 節で述べたとおり、無線区間の物理帯域が頻繁に変動するからであると考えられる。

5.3 モデルの妥当性

今回提案した TCP スループットのモデルの妥当性を評価するために、推定した物理帯域が約 840[kbps] で近い 2 計測 (計測 A, 計測 B) の例を取り上げる。TCP スループットの計測値/推定値は、計測 A が 497[kbps]/505[kbps]、計測 B が 59[kbps]/91[kbps] である。この 2 計測の片方向伝送時間の時間変動を図 8 に示す。横軸は計測サンプルの時系列番号、縦軸は各計測値から計測値の最小値を引いた値である。図から、伝送時間の揺らぎが大きく異なることが視覚的にわかり、また各計測の分散が、計測 A が 381、計測 B が 69136 であることから、変動度合いの違いが確認できる。このように、物理帯域の最大値が同じであっても伝送時間の変動は大きく異なる場合

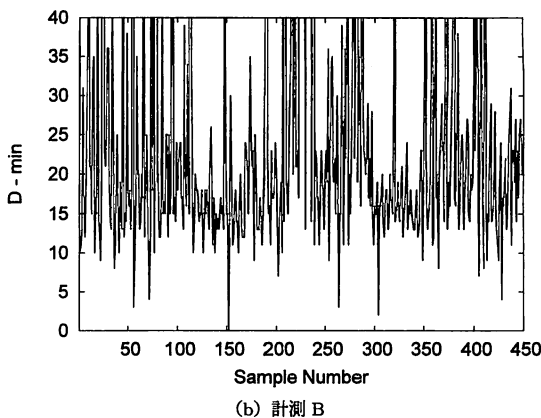
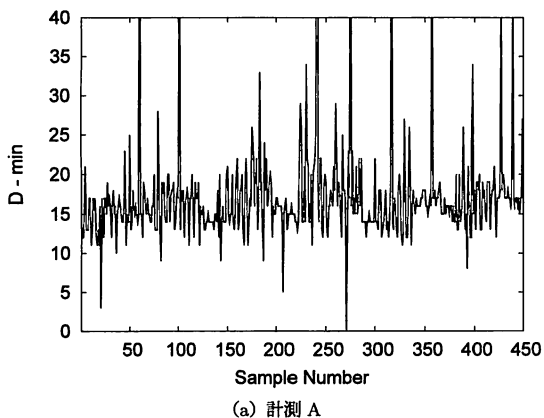


図 8 物理帯域推定が等しい (約 840[kbps]) 2 計測の揺らぎ成分比較

があることがわかる。推定結果の相関係数が 0.83 であったことから、提案手法はこの揺らぎ成分をうまく数値化できていると考えられる。

5.4 推定誤差の原因

推定誤差の原因として次の 3 点が考えられる。1 点目は、TCP スループットは RTT、すなわち上りと下りのネットワークの影響を受けるが、本研究では下りのみを考慮していることである。すなわち上りネットワークの影響が誤差として混入しているものと考えられる。2 点目はリファレンス用 TCP スループットの変動である。プローブの前後で計測した結果の平均を用いているが、そもそも式 (13) のモデル式の推定対象自体が変動しているということから、相応の影響を受けていると考えられる。3 点目は物理帯域推定の精度である。式 (4) からわかるとおり、TCP スループットの推定精度は物理帯域推定の精度に大きく影響を受け、物理帯域推定の精度は式 (6) の近似精度と関連する。無線区間では IP パケットがより細かな RLP フレームに分割されるため、サイズの大きなパケットほど無線区間における制御の影響を受けることとなり推定結果に影響を与えているものと考えられる。

6. おわりに

本稿では、複数のパケットサイズおよび少量のプローブパケットを用いてユーザが体感する通信品質である TCP スループットを推定する手法を提案した。物理帯域が頻繁に変動する携帯電話網の無線区間に対し、物理帯域の最大値、各パケットサイズの最小値からの揺らぎ成分及び時間方向の揺らぎ成分から TCP スループットをモデル化した。実環境において実験を行い推定モデルを生成した結果、計測した TCP スループットと推定したスループットは相関関係を示すことがわかり、モデルの妥当性が立証された。

今後の課題として、大規模な検証を行うこと、及びプローブパラメータ (N , $L_i (i = 1 \sim N)$, P) による精度の調査が挙げられる。

文 献

- [1] R.Prasad, M.Murray, C.Dovrolis and K.Claffy, "Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools," IEEE Network, Nov.-Dec. 2003.
- [2] 後藤, 田上, 長谷川, 阿野, "携帯電話網における通信品質推定に関する一検討," 信学総大, B-16-5, Mar. 2008.
- [3] Iperf, <http://www.dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>
- [4] Netperf, <http://www.netperf.org/netperf/>
- [5] 前田, 川上, 岸田, 河野, "二つのジッタ導出方式を用いる IP ストリーム伝送性能測定ツールの実装," 信学論 B, Vol.J89-B, No.12, pp.2175-2183, Dec. 2006.
- [6] M.Allman, "Measuring End-to-End Bulk Transfer Capacity," in Proc. ACM SIGCOMM IMW, Nov. 2001.
- [7] D.Lu, Y.Qiao, P.A.Dinda and F.E.Bustamante, "Characterizing and Predicting TCP Throughput on the Wide Area Network," in Proc. IEEE ICSCS, 2005
- [8] C.Dovrolis, P.Ramanathan and D.Moore, "What do packet dispersion techniques measure?," IEEE INFOCOM, Apr. 2001.
- [9] R.Kapoor, L.-J.Chen, L.Lao, M.Gerla and M.Y.Sanadidi, "CapProbe: A Simple and Accurate Capacity Estimation Technique," in Proc. ACM SIGCOMM, Aug. 2004.
- [10] G.Jin and B.Tierney, "Netest: A Tool to Measure the Maximum Burst Size, Available Bandwidth and Achievable Bandwidth and Achievable Throughput," IEEE ITRE, Aug. 2003.
- [11] V.Jacobson, "pathchar - a tool to infer characteristics of Internet paths," <ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/>, Apr. 1997.
- [12] A.B.Downey, "Using pathchar to estimate Internet link characteristics," in Proc. ACM SIGCOMM, pp.222-223, Sept. 1999.
- [13] B.A.Mah, "pchar: A Tool for Measuring Internet Path Characteristics," <http://www.kitchenlab.org/www/bmah/aSoftware/pchar/>
- [14] 3GPP2, "CDMA2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification," C.0024-a v3.0, Sep. 2006.
- [15] Qualcomm BREW, <http://brew.qualcomm.com/brew/ja/>
- [16] A.Pasztor and D.Veitch, "PC based precision timing without GPS," in Proc. ACM SIGMETRICS, Jun. 2002.
- [17] 北口, 町澤, 箱崎, 中川, "高精度 PC による片道遅延時間によるネットワーク帯域推定手法," 信学論 B, Vol.J87-B, No.10, pp.1696-1703, Oct. 2004.