

## 移動体網を対象とした TCP スループット推定法の評価

後藤 崇行<sup>†1</sup> 田上 敦士<sup>†1</sup>  
長谷川 輝之<sup>†1</sup> 阿野 茂浩<sup>†1</sup>

移動体網経由でのデータ通信量の増加に伴い、移動体網における通信品質の把握及び改善がキャリアの重要課題となっている。移動体網では広範囲かつ様々な場所で通信品質を把握する必要があるため、簡易に把握可能な手法の開発が望まれている。そこで、我々はこれまでに、主要な通信品質指標の一つである TCP スループットを対象とし、アクティブ計測により低負荷に推定する手法を提案した。本手法は、まず幾つかの地点での TCP スループットの実測値と低負荷なプローブパケットから得られる遅延分布を用いて推定式を生成する。以後プローブパケットから得られる遅延分布のみ計測し、推定式により TCP スループットを推定するものである。本稿では、商用の CDMA2000 1xEV-DO による実験を行い、既存手法と比較し、提案手法が計測負荷を抑えつつ TCP スループットの推定精度向上が可能であることを評価する。

### Evaluation of TCP Throughput Estimation Method for Cellular Networks

TAKAYUKI GOTO,<sup>†1</sup> ATSUSHI TAGAMI,<sup>†1</sup>  
TERUYUKI HASEGAWA<sup>†1</sup> and SHIGEHIRO ANO<sup>†1</sup>

It is important for carriers to grasp and improve communication quality in cellular networks since the amount of data passing through the networks has been increasing. In cellular networks, it is necessary to grasp communication quality extensively. Hence, it is required to develop a technique that can grasp communication quality efficiently. Therefore, we proposed a lightweight method to estimate TCP throughput which is one of the major communication quality metrics in the past. This method first generates an equation for estimation using TCP throughput measurements and delay distributions which are obtained from lightweight probing. Then, the method estimates TCP throughput using delay distributions and the generated equation. In this paper, we evaluate that our proposed method can reduce measurement load and improve estimation accuracy of TCP throughput compared with conventional methods by the experiment in a commercial CDMA2000 1xEV-DO network.

#### 1. はじめに

近年、移動体網のエリア拡大やデータ通信の高速化、低価格化により、移動体によるデータ通信がインフラとして認識されるようになってきている。これに伴い、ユーザの通信品質に対する意識が高まっており、キャリアは通信品質の改善を重要課題としている。通信品質を改善するためには、まず、通信品質を把握する必要がある。現在、移動体網はあらゆる場所で利用可能であり、ユーザは様々な場所で通信を行うことから、広範囲かつ様々な場所で通信品質を把握する必要がある。このため、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。通信品質を把握する方法は、網にプローブパケットを送信するアクティブ計測と、網を流れるパケットを観測するパッシブ計測とに分類される。我々は任意の場所・時間で計測可能なアクティブ計測に関する研究を行ってきた<sup>1)</sup>。ここでは、通信品質として主要な指標である TCP スループットを対象としている。

アクティブ計測による TCP スループット把握手法はこれまでに様々な手法が考案されている<sup>2)</sup>。これらは大きく実測手法と推定手法とに分類できる。実測手法は、実際に TCP 通信を行って TCP スループットを計測する手法である。推定手法は直接 TCP スループットを計測するのではなく、推定式を用いて TCP スループットを計測する。

実測手法は、測定した値がそのまま TCP スループットを表すという利点があるが、利用可能な帯域を最大限使用するため網への負荷が大きいという欠点を有する。そこで、本研究は少量のプローブパケットを用いる学習ベースの推定手法に着目する。本手法は、学習時には TCP スループットを実測する必要があるため網への負荷が大きいですが、学習後には TCP スループットの実測は必要ないため負荷を抑えつつ品質の計測が可能である。学習ベースの従来手法<sup>3)-6)</sup>は、主に固定網を対象に検討がなされており、同一地点での実測値からその地点での現在または将来の値を推定する手法である。また、Mirza らの手法<sup>7)</sup>は、様々な地点での実測値を用いて、ある地点での TCP スループットを推定する手法であるが、推定にはバースト的な負荷をかけるという問題がある。

我々は、移動体網 (CDMA2000 1xEV-DO 網) を対象にし、様々な地点の実測値を用いて、ある地点での TCP スループットを推定する手法を提案する。本提案手法は、まず TCP スループットの実測値とプローブパケットから得られる遅延分布を用いて推定式を生成す

<sup>†1</sup> 株式会社 KDDI 研究所  
KDDI R&D Laboratories, Inc.

る．一度推定式を生成すれば，以後プローブパケットから得られる遅延分布のみ計測し，推定式により TCP スループットを推定する．使用するプローブパケットは，間隔を大きく空けて送信するものであり，網への負荷は小さい．また，プローブパケットにより得られる遅延分布から TCP スループットを推定するためのモデルを提案する．本モデルは，TCP スループットを端末の電波受信状態と基地局の混雑度により表現する．しかし，両パラメータを取得するのは困難であるため，遅延分布から算出可能なパラメータとして，物理帯域の推定値  $\hat{B}$  と遅延の揺らぎ  $F$  を用いる．本提案手法は，低負荷なプローブパケットから得られる遅延により TCP スループットを推定でき，簡易に TCP スループットを把握可能である．以下，2. では TCP スループット把握の関連研究を，3. では提案手法である低負荷 TCP スループット推定法を述べる．4. では検証実験について説明し，5. では考察を行う．6. では本稿のまとめを述べる．

## 2. 関連研究

TCP スループット把握手法には，実測手法と推定手法がある．以下でそれぞれを説明する．

### 2.1 実測手法

実測手法とは，実際に TCP 通信を行って TCP スループットを計測する手法である．例として，FTP によるファイルのダウンロードが挙げられる．種々のベンチマークツールとして，Iperf<sup>(8)</sup> や Netperf<sup>(9)</sup> も公開されている．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<sup>(10)</sup> がある．これらの手法は計測した値がそのまま TCP スループットを示すという利点がある．一方，利用可能な資源限界までパケットを送信するため，網への負荷が大きという欠点がある．

### 2.2 推定手法

推定手法とは，実測手法よりも少量のプローブパケットを用いて推定する手法であり，解析ベース手法と学習ベース手法に分類される．

解析ベース手法<sup>(11),(12)</sup> は TCP の輻輳制御手順を詳細に解析して定式化し，それを利用して推定する手法である．Mathis ら<sup>(11)</sup> は，TCP スループットを最大セグメントサイズ，平均 RTT，パケットロス率によって定式化している．Padhye ら<sup>(12)</sup> は，更に ACK 当たりの TCP セグメント数，再送タイムアウト時間を考慮して定式化している．これらの手法は，式を構成するパラメータ全てが正確に求められる場合には比較的少量のパケットで推定可能であるという利点がある．また，後述する学習ベース手法に比べ，実際に TCP スループットを測定する必要がない．一方，推定対象の TCP フローが実際に被るパステ性を正確に測

定できるかどうかにより，推定精度が大きく変わることが知られている<sup>(4)</sup>．すなわち，推定したい TCP フローが帯域資源を占有する状態でのパステ性を計測する必要がある．また，解析ベース手法は，定式化が特定の TCP 実装に依存する場合には，他の TCP 実装にはそのまま適用できないという欠点も有する．

学習ベース手法<sup>(3)-7)</sup> は事前に TCP スループットを実測し，その値から推定式を学習する手法である．よって，複雑な TCP の挙動を詳細に解析する必要がなく，TCP 実装が変わったとしても推定式を再構成することにより推定可能であるという利点がある．一方，推定式の生成には TCP スループットの実測が必要となる欠点がある．Swamy ら<sup>(3)</sup> および He ら<sup>(4)</sup> は，過去の実測 TCP スループットの線形和により推定を行う手法を提案している．Kharat ら<sup>(5)</sup> および Shah ら<sup>(6)</sup> は，TCP スループットを実測した時に得られる RTT 等の各種パラメータを入力とし，学習により推定式を求める手法を提案している．これらは同じ地点における将来の値を推定する手法である．Mirza ら<sup>(7)</sup> は，固定網を対象に，TCP スループットが可用帯域とロス率，ロス持続時間，キュー長によって表現されるとし，これらパラメータを実測 TCP スループットとは別に求め，学習により推定することで各パラメータの有用性を検証している．その結果，可用帯域の効果が薄いことを明らかにし，ロス率，ロス持続時間，キュー長により TCP スループット推定する PathPerf を提案している．ただし，ロス率の計測にあたり網にパステ的な負荷をかける必要がある．

我々は，移動体網を対象に TCP スループットの推定を目的とした研究を行っている．本研究では，TCP スループットの実測値と低負荷なプローブパケットにより得られる遅延分布から，少ないプローブパケットで低負荷に TCP スループットの推定を行う点が特長である．

## 3. 低負荷 TCP スループット推定法

### 3.1 推定法の枠組み

本研究では，移動体網を対象に，TCP スループットを低負荷に推定する手法を提案する．対象とする移動体網は CDMA2000 1xEV-DO 網<sup>(13)</sup> (以下，EV-DO 網)であり，有線区間 (wired network) と無線区間 (radio access network) から構成される (図 1)．2.2 節で述べたとおり，解析ベース手法は計測負荷を大きくせざるを得ないため，我々は低負荷での実現可能性のある学習ベース手法に着目する．本手法は，学習 (learning) と推定 (estimation) の二つのフェーズからなる．学習では，遅延分布と TCP スループットを計測し，これらの実測値を学習して推定式を生成する．推定では，遅延分布のみを計測し，学習時に生成した

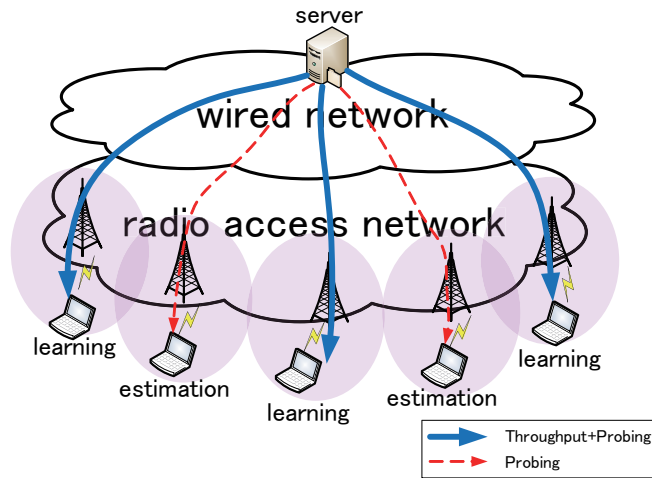


図 1 提案推定法の枠組み  
Fig. 1 Framework of proposed estimation method

推定式を使って TCP スループットを推定する．プローブパケットによる計測対象は片方向遅延だけであり，これは少量のパケットでも計測可能なパラメータである．更に，遅延の計測には間隔を大きく空けたプローブパケットを用いるため，網へバースト的な負荷をかけることもない．

### 3.2 TCP スループットのモデル化

TCP スループットは，転送ファイルサイズ，受信側ウィンドウサイズ，パス環境（可用帯域，RTT，ロス率，クロストラヒック特性，ルータ/スイッチのバッファ），TCP 実装といった多数の要因により決定される．しかし，これら全パラメータを正確に求めるためには相応のプローブパケットを送信する必要があり，移動体網への適用は負荷が大きく現実的ではない．そこで，低負荷なプローブパケットから算出される遅延分布のみを用いた新しい TCP スループットのモデルを提案する．

本研究で対象とする EV-DO 網は，データパケットのロス率を所定値（例えば 1%）以下にするために適応変調と Hybrid ARQ を用いる．すなわち，端末の電波受信状況に応じて最大データ転送レートが変化する．この値は DRC (Data Rate Control) 値と呼ばれ，EV-DO Rel.0 の場合，38.4[kbps] から 2457.6[kbps] までの離散的な値を取る<sup>13)</sup>．一方，DRC 値が

高い場合であっても必ずしも高い TCP スループットが得られるわけではない．TCP スループットは基地局の同一セクター内ユーザ数とその振る舞い（混雑度）により影響を受ける．以上より，我々は TCP スループットが DRC 値とセクターの混雑度によって決定されると考える．しかし，DRC 値を取得するには特殊な端末が必要となり，セクターの混雑度を知るには基地局へのアクセスが必要となるため，両パラメータを直接計測するのは困難である．そこで，エンドエンドのプローブパケットを用いて計測可能，かつ両者を代替するパラメータとして，物理帯域の推定値  $\hat{B}$  と伝送遅延の揺らぎ  $F$  を用いる．すなわち，提案手法における TCP スループットのモデルは次式のとおりである．

$$\text{Throughput} = f(\hat{B}, F) \quad (1)$$

### 3.3 プロブパケット

プローブパケットとして，サイズの異なるパケットを周期的に送信する．これは次節のとおり， $\hat{B}$  及び  $F$  の算出に適しているためである．パケットサイズの種類を  $N$ ，対応するパケットサイズを  $L_i$  [bytes] ( $i = 1, 2, \dots, N$ )，パケットの送信間隔を  $T$  [ms] とする．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用いる．

### 3.4 推定物理帯域 $\hat{B}$ の算出

DRC 値相当の値として，物理帯域の推定値  $\hat{B}$  を用いる．物理帯域推定法には様々な手法があるが，サイズの異なるパケットから推定するワンパケット推定法<sup>14)</sup>を用いる．様々なサイズのパケットを独立に送信し，1 パケット毎の振る舞いから物理帯域を推定する方法である．物理帯域推定法には他にも，同じサイズの 2 パケットを連続送信し，受信側で観測される 2 パケット間の広がり具合から推定するパケットペア推定法<sup>15)</sup>もあるが，端末での複数のパケットを一括して受信する処理が原因で正確な 2 パケット間の広がりを観測することが困難なため，ワンパケット推定法を用いる．また，ワンパケット推定法は 1 パケット単位で独立に送信するため，瞬間的な負荷を抑えることが可能である．

#### 3.4.1 ワンパケット推定の原理

リンクをストアアンドフォワード装置で区切られた区間と定義する．リンク数  $M$  のパスにおける伝送時間  $H_M$  は次式で表わされる<sup>14)</sup>．

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

$L$  はパケットサイズ， $B_i$ ， $l_i$ ， $q_i$  は  $i$  番目のリンクの物理帯域，物理的距離に伴う遅延，ルータでのキュー遅延である． $q_i (\geq 0)$  は確率変数であり最小値をとると消失するため，以下の

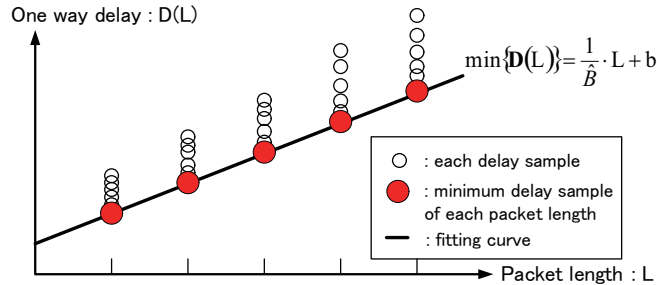


図2 ワンパケット推定による物理帯域推定の原理  
Fig. 2 Principle of bandwidth estimation by one-packet method

ようになる。

$$\min\{\mathbf{H}_M(L)\} = \sum_{i=1}^M \left( \frac{L}{B_i} + l_i \right) \quad (3)$$

$$\min\{\mathbf{H}_M(L)\} - \min\{\mathbf{H}_{M-1}(L)\} = \frac{L}{B_M} + l_M \quad (4)$$

ここで  $\mathbf{H}_M(L)$  は  $H_M(L)$  の集合を表している。式(4)から、様々なパケットサイズ  $L_j$  に対する  $H_M(L_j)$  の最小値と  $H_{M-1}(L_j)$  の最小値の差をそれぞれ求め、パケット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。

### 3.4.2 EV-DO 網における簡略化

代表的なワンパケット推定手法である pathchar<sup>14)</sup> は、パスを構成するリンク毎に物理帯域を計算するため、計測負荷がリンク数に比例する。しかし、EV-DO 網におけ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。よって以下の簡略化が可能であり、リンク数に関係せず負荷を抑えることができる。すなわち、無線区間を  $j = r$  とすると  $B_j \gg B_r$  であり、式(3)は以下ようになる。

$$\min\{\mathbf{D}(L)\} = \sum_i l_i + \sum_i \frac{L}{B_i} \simeq \frac{L}{B_r} + E$$

$D(L)$  はパケットサイズ  $L$  に対するエンドエンドの遅延であり、エンドエンドのリンク数が  $M$  である場合、 $D(L) = H_M(L)$  である。 $\min\{\mathbf{D}(L)\}$  は  $D(L)$  の最小値を表している。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、 $\min\{\mathbf{D}(L)\}$  はパケットサイズ  $L$  の線形関数となる(図2)。この線形関数の傾きの逆数が、無線区間の物

理帯域  $B_r$ 、すなわちエンドエンドの物理帯域であると考えられる。推定値  $\hat{B}$  は、様々なパケットサイズ  $L_i (i = 1, 2, \dots, N)$  と対応する遅延時間の最小値  $\min\{\mathbf{D}(L_i)\}$  から、最小二乗法により次式で求められる。

$$\hat{B} = \frac{\sum_{j=1}^N (L_j - \bar{L})^2}{\sum_{j=1}^N \{(L_j - \bar{L}) \cdot (\min\{\mathbf{D}(L_j)\} - \min\{\mathbf{D}\})\}}$$

$\bar{L}$ ,  $\min\{\mathbf{D}\}$  は、パケットサイズの平均値,  $\min\{\mathbf{D}(L_j)\}$  の平均値である。

### 3.5 揺らぎ $F$ の算出

セクターの混雑度相当の値として、片方向遅延のキュー遅延を基にした揺らぎ  $F$  を用いる。キュー遅延は基本的に、混雑度が高い場合には大きくなり、逆に低い場合には小さくなるためである。そこで、揺らぎ  $F$  をキュー遅延の平均値の逆数として定義する。式(2)及び(3)より、キュー遅延  $q_i$  は計測された各遅延値からその分布の最小値を差し引くことで得られるため、 $F$  は試行数  $P$  を用いて次式で表現される。

$$F(L) = \frac{P}{\sum_{j=1}^P |D_j(L) - \min\{\mathbf{D}(L)\}|}$$

$F$  はパケットサイズ  $L$  毎に定義される。我々はこれまでに、本パラメータの有効性を確認済みである<sup>1)</sup>。

### 3.6 推定式

式(1)の  $f$  を次式で定義し、推定に SVR (Support Vector Regression) を用いる。

$$y = f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b \quad (5)$$

$y$  は目的変数であり、本研究では TCP スループットである。 $\mathbf{x}$  は説明変数であり、正規化された物理帯域の推定値  $\hat{B}$  及び各種パケットサイズにより得られる揺らぎ  $F(L)$  から構成される。 $\mathbf{w}, b$  は重みベクトル及び定数である。推定式の生成には Vapnik の提案する  $\epsilon$ -SVR<sup>16)</sup> 及びカーネル法を用いる。許容する学習誤差  $C$  及びガウスカーネルの分散  $1/\sigma^2$  の決定手順として、 $C$  及び  $1/\sigma^2$  を変化させ、学習用データの半数(学習用データのうちの学習用データ)を使って推定式を作成し、学習用データの残りの半数(学習用データのうちの推定用データ)を使って推定したときに得られる実測値と推定値の二乗誤差を最小化する値を選択する。 $C$  は  $2^{-5}, 2^{-4}, \dots, 2^{19}, 2^{20}$  に、 $1/\sigma^2$  は  $2^{-15}, 2^{-14}, \dots, 2^2, 2^3$  にそれぞれ変化させた。

## 4. 実験

### 4.1 システム構成

本実験のシステムはサーバとクライアントから構成される(図3)。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

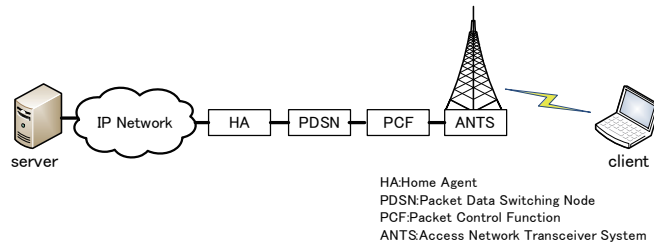


図 3 実験システム構成  
Fig. 3 System structure of experiment

クライアントは OS が Windows XP, EV-DO 通信用カード端末を備えたノート PC である。また時刻同期に関して、サーバは文献<sup>17)</sup>の基本原理を利用した CPU クロックと NTP サーバを用いる手法を、クライアントは Windows XP デフォルトの SNTP をそれぞれ用いた。

## 4.2 実験内容

### 4.2.1 測定手順

一連の計測手順は以下の 3 手順より成る。

- (1) TCP スループット実測
- (2) プローブパケット計測
- (3) TCP スループット実測

プローブパケット計測は、3.3 節で述べたとおりの方法で行った。得られるエンドエンド遅延の時系列を遅延分布と呼ぶ。TCP スループット実測は、2[MB] ファイルをダウンロードし、以下の式で計算される値を算出する。

$$\text{TCPthroughput} \triangleq \frac{\text{ESN} - \text{SSN}}{\text{ET} - \text{ST}}$$

SSN, ESN, ST, ET 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。EV-DO 網における TCP スループットの変動性を考慮し、計測手順 (1) と (3) の平均値を実測 TCP スループットとした。各地点で得られる実測 TCP スループットと遅延分布の組をデータセットと呼ぶ。

### 4.2.2 プローブパケットのパラメータ設定

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信数を  $P=90$  とした。これらは無線区間での 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は、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 値の最小値 38.4[kbps] の約 1/3 であり、網への負荷は十分小さいと言える。

### 4.2.3 評価方法

我々は提案手法の性能を相関係数 CC (Correlation Coefficient) により評価した。以下に評価手順を示す。

- (1) 4.2.1 節で述べた手順で取得したデータセットの半数をランダムに選択することにより、学習用データセットと推定用データセットを作成する。
- (2) 学習用データセットを用いて 3.6 の手順で推定式を生成する。
- (3) 推定用データセットの遅延分布と手順 (2) で生成した推定式から推定 TCP スループットを算出する。
- (4) 実測 TCP スループットと推定 TCP スループットから CC を計算する。
- (5) 手順 (1) ~ (4) の評価を 1000 回繰り返す。

なお、CC の定義は以下のとおりである。

$$\text{CC} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

$x_i, \bar{x}, y_i, \bar{y}$  は実測 TCP スループット, 実測 TCP スループットの平均値, 推定 TCP スループット, 推定 TCP スループットの平均値をそれぞれ表している。CC は値が大きい方が性能が良い。

## 4.3 評価

様々な地点で取得した 117 データセットを用い、3 章で述べた提案手法を評価する。まず、1000 回分の評価結果の平均 CC を求めると 0.7754 となり、実測 TCP スループットと推定 TCP スループットは相関関係を示すことがわかる。

次に、TCP スループットのモデル化を検証するため、物理帯域の推定値  $\hat{B}$  のみの推定 (BE) と、提案手法である  $\hat{B}$  に遅延の揺らぎ  $F$  を加えた推定 (BE+F) との比較を行う。1000 回分の評価結果に対する CC の累積分布関数 (CDF) を図 4 に示す。図より、BE よりも BE+F の方が推定性能が良いことがわかる。また、BE の平均 CC は 0.7106 であり、BE+F は前述のとおり 0.7754 であるため、平均値に関しても同様に提案手法の方が優れていることが確認できる。よって、TCP スループットのモデルとしては、BE ではなく BE+F の方が有効であると言え、TCP スループットを DRC 値と基地局の混雑度により表現するとい



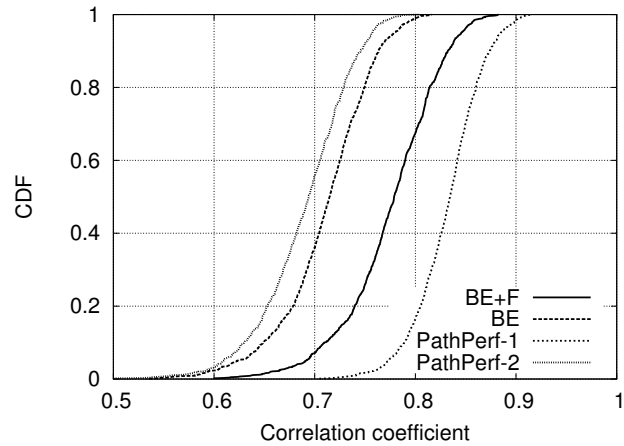


図4 CCのCDFによる従来手法との比較  
Fig. 4 Comparison to conventional methods by CDF of CC

う提案モデルの妥当性が示された。

また、従来手法である PathPerf<sup>7)</sup> との比較を行う。提案手法のデータセットを取得した117地点において、4章で述べた手順により PathPerf用のデータセットを取得した。PathPerfは、デフォルトのパラメータでは、平均864[kbps]の packets ストリームを30[sec]送信する。この時に送信される総バイト数は3.24[MB]であり、TCPスループットを実測する以上の負荷かける。そこで、3.24[MB]のプロブパケット量を用いる場合を PathPerf-1、提案手法と同じ量(346.5[kB])を用いる場合を PathPerf-2とし、CCのCDFを図4に示す。まず、BE+FとPathPerf-1とを比較すると、PathPerf-1の方が性能が良いことがわかる。しかし、大量の packets を送信するため、資源の限られた移動体網に対しては適さない。次に、BE+FとPathPerf-2とを比較すると、BE+Fの方が性能が良いことがわかる。これは、PathPerfはプロブパケットをバースト的に送信しキューを溢れさせることでロス率、ロス継続時間、キュー長を推定するが、計測負荷が小さい場合はキューが溢れず、値を正確に求められないためである。また、PathPerf-1及びPathPerf-2の平均CCはそれぞれ、0.8321, 0.6899であり、平均値に関しても同様の傾向が見受けられる。以上より、低負荷な計測が必要とされる環境下における、従来手法(PathPerf)に対する提案手法の有効性を確認した。

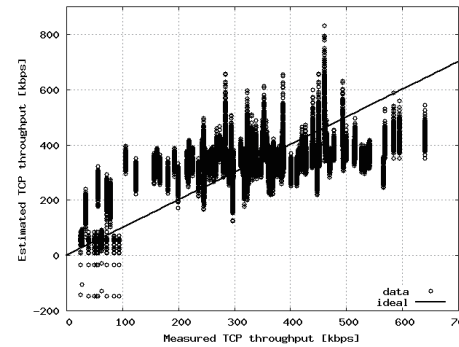


図5 BEによる推定結果  
Fig. 5 Estimation result by BE

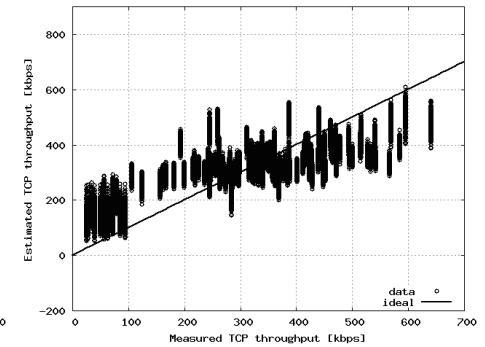


図6 BE+Fによる推定結果  
Fig. 6 Estimation result by BE+F

## 5. 考察

### 5.1 揺らぎ $F$ の効果

前節の結果において、提案手法である揺らぎ  $F$  を考慮した推定法の方が性能が良いことを確認した。そこで本節ではその理由を考察する。物理帯域の推定値  $\hat{B}$  のみの推定 (BE) と物理帯域の推定値  $\hat{B}$  と揺らぎ  $F$  を用いた推定 (BE+F) の、全推定結果を図5及び図6にそれぞれ示す。図中の ideal は実測値=推定値であり、このグラフに近ければ近い程性能が良いことを意味している。両者を比較すると、BEで発生していた負の推定値や大きく外れる値がBE+Fでは低減しており、性能が向上していることが確認できる。

### 5.2 プロブパケットの削減

前節の実験では、5種類の packets サイズ ( $N=5$ ) をそれぞれ90 packets ずつ ( $P=90$ )、計450 packets 送信した。本節では更に、網への負荷を軽減することを目指し、4.3節で取得したデータセットを用いてプロブパケット量を減少させた時の性能について考察する。

まず、各サイズの packets 数は90 packets のままで、packets サイズの種類を2種類にしたときについて考察する。2種類の選び方は様々なものが考えられるが、短い packets の組  $(L_1, L_2) = (50, 400)$ 、長い packets の組  $(L_1, L_2) = (1200, 1400)$ 、短い packets と長い packets の組  $(L_1, L_2) = (50, 1400)$  の3種類に対して比較を行った。それぞれのCCのCDFを図7に示す。図から、短い packets の組、長い packets の組は5種類と比べて性能が劣化するが、短い packets と長い packets の組は5種類とほぼ同等の性能であることが

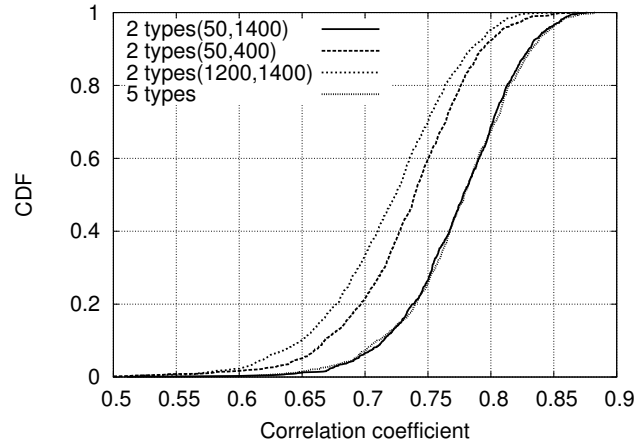


図7 パケットサイズ種類の違いに対する比較  
Fig.7 Comparison in terms of various packet sizes

表1 2種類及び5種類による平均CC  
Table 1 Average CC of 2 types and 5 types

Packet size	Method	Average CC
2 types(50,1400)	BE	0.7094
	BE+F	0.7760
2 types(50,400)	BE	0.5733
	BE+F	0.7353
2 types(1200,1400)	BE	0.3495
	BE+F	0.7198
5 types	BE	0.7106
	BE+F	0.7754

わかる。そこで、この原因を調査した。それぞれに対するBEとBE+Fの平均CCを表1に示す。表より、短いパケットの組及び長いパケットの組はBEの推定精度が悪いことがわかる。揺らぎを加えることで推定精度が向上しているものの、BEのみの推定精度の低さにより、最終的なBE+Fの推定精度が低くなっていると判断できる。一方、短いパケットと長いパケットの組は5種類とほぼ同等の推定性能が得られていることがわかる。以上から、パケットサイズの種類は2種類まで削減可能であるが、使用するパケットサイズとして、短いパケットと長いパケットを選択する必要があることがわかる。

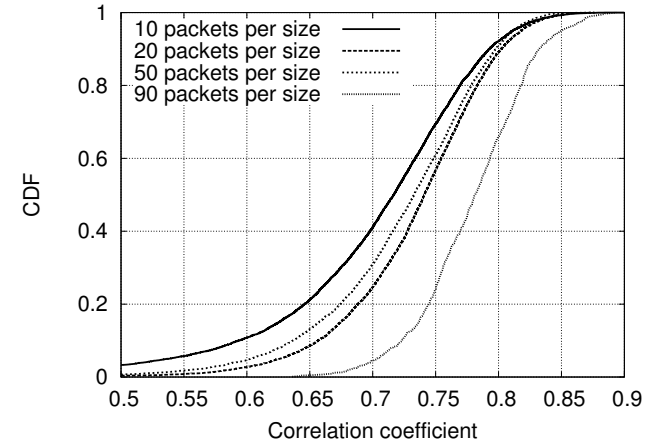


図8 様々なパケット数に対する比較  
Fig.8 Comparison in terms of number of packets per size

次に、パケットサイズの種類は5種類のままで、各サイズのパケット数を減らしたとき ( $P = 10, 20, 50, 90$ ) について考察する。90パケットから一部のパケットを取り出す方法は様々なものが考えられ、 $n = 1, 11, 21 \dots$  とし、 $n$ 番目のパケットから連続する  $P$  個のパケットを取り出すことを考える。よって、 $P = 10, 20, 50, 90$  に対して、それぞれ9, 8, 5, 1通りの結果が得られることとなる。  $P$  毎に集計したCCのCDFを図8に示す。図から、サイズ毎のパケット数を減らすことにより、推定精度が劣化することがわかる。更に、パケットサイズを2種類 ( $L_1, L_2$ ) = (50, 1400) または5種類とし、また、( $P = 10, 20, 50, 90$ ) としたときの結果を、図9に示す。図は平均CCの、プローブパケット量毎の平均値、最大値、最小値を表している。図より、サイズ毎のパケット量が少なくなることにより、値のばらつきが大きくなることがわかる。更に、最小値に着目すると、2種類及び5種類共に、サイズ毎のパケット数を減らすことにより、推定精度が大幅に低下することがわかる。以上から、推定精度を保ちつつ各サイズのパケット数を削減することは不可能であると言える。

以上の議論より、推定精度を保ちつつプローブパケットの量を減らすには、パケットサイズの種類を減らすことが有効である。この知見に基づき5種類(プローブパケット量: 346.5[kB])のパケットサイズを2種類(プローブパケット量: 130.5[kB])に減らすことで、約6割の計測負荷を低減させることが可能である。

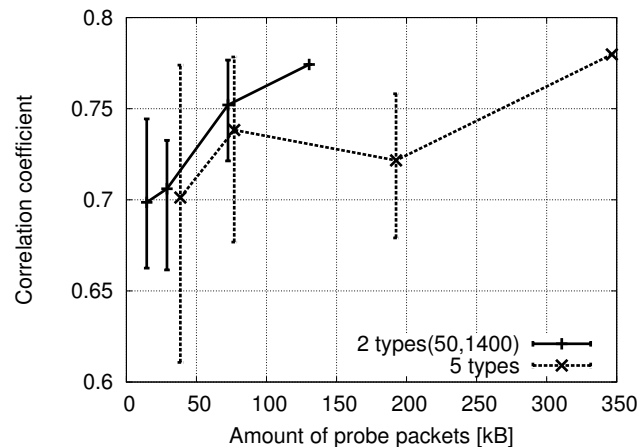


図9 総バイト数に対する比較

Fig.9 Comparison in terms of the amount of probe packets

## 6. おわりに

本稿では、学習ベースでの低負荷な TCP スループット推定手法を提案した。本手法は、プローブパケットによる計測結果から TCP スループットを推定することにより、低負荷に通信品質を把握することを特長とする。推定は、予め多地点で測定した TCP スループットとプローブパケットの遅延分布から学習により生成される推定式を用いる。更に、学習を行う際の TCP スループットモデルは、TCP スループットを DRC 値（無線区間の最大転送レート）と基地局のセクター内混雑度により表現するものである。商用の EV-DO 網による実験を通じて、提案手法の枠組み及びモデルの有効性を実証した。また、プローブパケット量を削減するために、パケットサイズの種類及び各サイズのパケット数の観点から考察し、精度を保ちつつパケットサイズの種類を減らすことにより、約 6 割のプローブパケット量を削減可能なことを示した。以上より、本提案手法はアクティブ計測により移動体網のような広範囲に通信品質を把握する必要がある際に有益な手法である。

今後の課題として、推定精度を更なる精度向上させる方法の検討や WiMAX 等の他の通信方式での検討、位置情報や時刻を考慮した場合の検討が挙げられる。

## 参考文献

- 1) Goto, T., Tagami, A., Hasegawa, T. and Ano, S.: TCP Throughput Estimation by Lightweight Variable Packet Size Probing in CDMA2000 1xEV-DO Network, *International Symposium on Applications and the Internet*, pp.1-8 (2009).
- 2) Prasad, R.S., Murray, M., Dovrolis, C. and Claffy, K.: Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools, *IEEE Network*, Vol.17, pp.27-35 (2003).
- 3) Swamy, M. and Wolski, R.: Multivariate Resource Performance Forecasting in the Network Weather Service, *ACM/IEEE conference on Supercomputing*, pp.1-10 (2002).
- 4) He, Q., Dovrolis, C. and Ammer, M.: On the predictability of large transfer TCP throughput, *Computer Networks*, Vol.51, No.14, pp.3959-3977 (2007).
- 5) Khayat, I.E., Geurts, P. and Leduc, G.: Machine-learned versus analytical models of TCP throughput, *Computer Networks*, Vol.51, No.10, pp.2631-2644 (2007).
- 6) Shah, S. M.H., Rehman, A., Khan, A.N. and Shah, M.A.: TCP throughput estimation: A new neural networks models, *Emerging Technologies, 2007. ICET 2007*, pp.94-98 (2007).
- 7) Mirza, M., Sommers, J., Barford, P. and Zhu, X.: A Machine Learning Approach to TCP Throughput Prediction, *SIGMETRICS*, pp.97-108 (2007).
- 8) NLNR/DAST: Iperf.
- 9) Jones, R.: Netperf.
- 10) Allman, M.: Measuring End-to-End Bulk Transfer Capacity, *ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop*, pp.139-143 (2001).
- 11) Mathis, M., Semke, J., Mahdavi, J. and Ott, T.: The Macroscopic Behavior of the TCP Congestion Avoidance Algorithm, *Computer Communication Review*, Vol.27, No.3, pp.67-82 (1997).
- 12) Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D.F. and Kurose, J.F.: Modeling TCP Reno Performance: A Simple Model and Its Empirical Validation, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.8, pp.133-145 (2000).
- 13) 3GPP2: CDMA2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification C.0024-a v3.0, 3GPP2 (2006).
- 14) Jacobson, V.: pathchar - a tool to infer characteristics of Internet paths (1997).
- 15) Carter, R.L. and Crovella, M.E.: Measuring Bottleneck Link Speed in Packet-Switched Networks, *Performance Evaluation*, Vol.27/28, No.4, pp.297-318 (1996).
- 16) Vapnik, V.: *Statistical Learning Theory*, John Wiley (1998).
- 17) Pasztor, A. and Veitch, D.: PC Based Precision Timing Without GPS, *SIGMETRICS*, pp.1-10 (2002).