

インターネットにおける統計的手法に基づいた帯域測定

的場 一峰 阿多 信吾 村田 正幸

大阪大学 大学院基礎工学研究科 情報数理系専攻

〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

Tel: 06-6850-6616 Fax: 06-6850-6589

E-mail: {k-matoba, ata, murata}@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし ネットワークが安定した通信品質を提供するためにはネットワーク特性を正確に見積もる必要がある。特に、ネットワーク設計を考える上でボトルネックとなるリンクを特定するためにはエンドホスト間のリンクの帯域推定が不可欠である。これまで、ネットワークの帯域計測ツールとして Pathchar などが開発されてきたが、ネットワークの状態が変化することで測定結果にさまざまな誤差が含まれるために、正確な帯域推定ができないといった問題がある。そこで、本稿では計測を行なう際に発生しうる誤差を除去し、得られた結果に対する信頼性を考慮した帯域推定法について検討する。このために、パラメトリックやノンパラメトリック推定法を用いた推定帯域の信頼区間の導出方法を示す。また、信頼区間に基づいたパケット数の適応型制御方法について提案し、数値結果を用いてその有効性を明らかにする。

キーワード 帯域推定、Pathchar、Pchar、M 推定法、ノンパラメトリック法、信頼区間

Improving Bandwidth Estimation for Internet Links by Statistical Methods

Kazumine Matoba Shingo Ata Masayuki Murata

Department of Informatics and Mathematical Science
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Phone: +81-6-6850-6616, Fax: +81-6-6850-6589
E-mail: {k-matoba, ata, murata}@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract Network dimensioning is an important issue to provide stable and QoS-rich communication services. A reliable estimation of bandwidths of links between the end-to-end path is a first step towards the network dimensioning. Pathchar is one of such tools for the bandwidth estimation for every link between two end hosts. However, Pathchar still has several problems. If unexpectedly large errors are included or if route alternation is present during the measurement, the obtained estimation is much far from the correct one. We investigate the method to eliminate those errors in estimating the bandwidth. To increase the reliability on estimation, the confidence interval for the estimated bandwidth is important. For this purpose, two approaches, parametric and nonparametric approaches, are investigated to add the confidence intervals against the estimated values. Another important issue is the method for controlling the measurement period. If the link is stable, only a few measurement data is sufficient. On the other hand, if the data is not sufficient, many measurements is necessary to obtain an accurate and reliable estimation. We propose a measurement method to adaptively control the number of measurement data sets.

Keyword bandwidth estimation, Pathchar, Pchar, M-estimation method, nonparametric method, confidence interval

1 はじめに

安定した通信品質を提供するためには、ネットワークの特性をあらかじめ知っておく必要がある。例えば、diff-serv [1] では各 QoS クラスのために十分な帯域を用意しなくてはならない。また、MPLS [2] や IP-over-WDM ネットワークでは、物理パスの容量を予め適切に見積もっておく必要がある。

しかしながら、急速に発展するインターネットにおいて、現状をもとに将来のトラフィックを予測することは困難であり、TCP のような輻輳制御を持つアプリケーションでは、ノードやリンクにおける測定だけでは不十分で、エンドホスト間での性能計測が不可欠である。そのためツールが現在多く開発されている（例えば [3]）。

インターネットにおいて、エンドホスト間のリンクの正確な帯域測定は、ネットワーク設計を考える上で重要な指標となる。Pathchar [4] は、エンドホスト間リンクごとの伝播遅延と帯域、バッファ待ち遅延、そしてパケット棄却率を計測することができる。

Pathchar は、ルータや受信ホストに特別な機能を追加することなく、送受信間のリンクの帯域を測定することが可能である。しかし、その一方で Pathchar にはいくつかの問題が指摘されており [5]、特に測定値に誤差を含んだ場合には、正確な帯域測定ができないという問題がある。そこで本稿では、誤差に対してロバストな帯域推定方法を提案し、推定した帯域に信頼性の尺度を与えるための信頼区間を導出する。また、不必要なパケットを送信しないための計測制御方法を提案する。

以下、2 章では Pathchar における帯域推定方法を説明し、解決すべき問題点を挙げる。次に 3 章で、帯域の信頼区間を利用した帯域推定方法の提案を行なう。また、提案方式での計測結果を 4 章で示す。最後にまとめと今後の課題を 5 章で述べる。

2 Pathchar の基本構造と問題点

2.1 Pathchar の基本構造

本節では、Pathchar で使用されている帯域推定方法の概略を説明する。詳細は文献 [4], [5] を参照のこと。

まず Pathchar は計測地点から対象となるホストおよびその間にある各ルータとの RTT (Round Trip Time) を計測する。RTT の計測には、ICMP パケットの TTL (Time To Live) Expired メッセージを利用する。TTL は、従来経路情報の設定ミスによるパケットの無限ループを回避するために、パケットに有効期限を定めたものである。Pathchar では、パケット内の TTL フィールドを n に設定することによって、送信ホストから n ホップ目のルータから ICMP パケットを受け取る。この時間を計測することで n ホップ目のルータとの RTT を求める。この方法は、送受信ホスト間の経路を調査する traceroute [6] など広く利用されているものである。

測定された RTT は (1) ルータ i ($1 \leq i \leq n$) におけるバッファ待ち遅延 q_i 、(2) 途中のルータにおけるパケット転送にかかる時間、(3) ルータ i でのパケットを転送するための処理にかかる時間 f_i 、(4) リンク j ($1 \leq j \leq n$) における伝播遅延時間 p_j の和によって構成される。従って、サイズ s のパケットを n ホップ目のルータに送出したときの RTT は、

$$RTT_s = \sum_{j=1}^n \left(\frac{s}{b_j} + \frac{s_{ICMP}}{b_j} + 2p_j \right) + \sum_{i=1}^n (q_i + f_i) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 s_{ICMP} は ICMP のエラーメッセージのサイズであり、 b_j はリンク j の帯域を表す。

図 1 に、パケットサイズと得られた RTT の関係を示す。これは計測先を www.gulf.or.jp、TTL を 16 とし

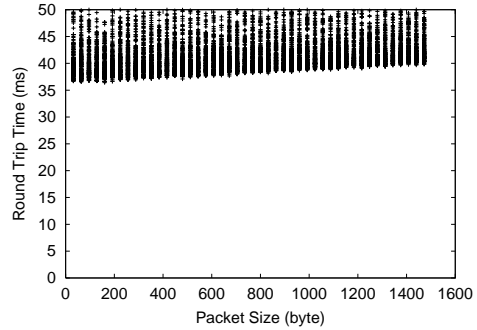


図 1: RTT とパケットサイズの分布

て 1999 年 12 月 18 日 12:54 から計測を開始した結果である。図より RTT はパケットサイズを固定にした場合でも大きく変化していることがわかる。これはルータにおけるバッファ待ち遅延がネットワークの状態によって変動することに起因している。しかしながら RTT の計測回数を増やすことで、バッファ待ち遅延の影響を受けない RTT が得られる可能性が大きくなる。図中のパケットサイズごとの最小 RTT はバッファ待ち時間が含まれていない可能性が大きい。このような最小 RTT ($minRTT_s$) は以下の式で表される。

$$minRTT_s = \sum_{j=1}^n \left(\frac{s + s_{ICMP}}{b_j} + 2p_j \right) + \sum_{i=1}^n f_i \quad (2)$$

ICMP パケットサイズ s_{ICMP} が 56 [bytes] の固定長であることから、 $minRTT_s$ はパケットサイズ s にほぼ比例する。これは図 1 の最小 RTT の分布が、ほぼ直線になっていることからわかる。この直線の係数 β_n を求めることにより、帯域 b_j との関係は $\beta_n = \sum_{j=1}^n 1/b_j$ で表すことができる。すなわち、 β_{n-1} と β_n を求めることにより、リンク n の帯域は

$$b_j = \frac{1}{\beta_n - \beta_{n-1}} \quad (3)$$

で求めることができる。

2.2 Pathchar における問題点

前節で述べた通り、Pathchar を用いた帯域測定では、バッファ待ち遅延を含まない最小 RTT が必要となるが、インターネットでは、ネットワーク状態が頻繁に変化するため、理想的な最小 RTT を得ることが難しい。このため、Pathchar は同サイズのパケットを多数送信する必要があり、多くの帯域を消費するという問題がある。さらに、多くの RTT を計測したとしてもその測定結果には誤差が存在するため、式 (2) を直接用いることができない。Pathchar では、最小二乗法による直線推定でこの問題を解決しているが、最小二乗法を用いた近似だけでは以下に述べるように、信頼性の高い帯域推定を行うことができない。以下では、Pathchar の帯域測定における問題点について説明する。

2.2.1 推定結果の信頼性

Pathchar では、推定した帯域の信頼性を測る尺度が存在しない。また、Pathchar は最小 RTT の誤差が正規分布に従うという仮定によって最小二乗法を適用し、係数 β_n を推定する。しかしながら、誤差の分布が正規分布であるとは限らないため、誤差の分布によらない帯域推定ができる方法を使う必要がある。この方法はノンパラメトリック推定法と呼ばれており、Pathchar の改良版である Pchar ですでに採用されている [7]。Pchar では通常のパラメトリック推定法とノンパラメトリック推定法を選択することができるが、この二つの方法を選択する基準は与えられていない。

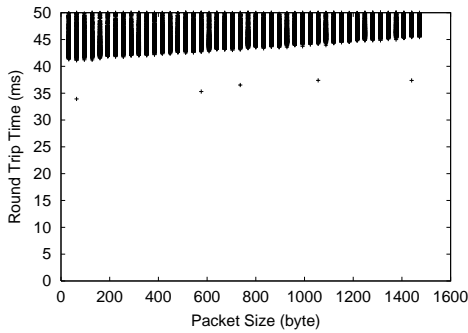


図 2: 誤差が正規分布に従わない例外的な誤差

2.2.2 計測の効率

Pathchar は各リンクごとに固定数のパケットを送信しているが、妥当な精度でリンクの帯域を計測するためには、リンクの状況に応じて送信パケット数を変化させることが望ましい。[5] では各リンクごとに送信するパケット数を変化させることで、全体の送信数を減らす手法が提案されている。しかし、この方式も結果に対する信頼性を示しておらず、統計的な正確さは保証されない。

2.2.3 RTT の例外的な誤差

実際に測定した最小 RTT には、多くの種類の誤差が混在している。一方で Pathchar は計測時の少量の誤差のみを考慮しており、計測誤差は正規分布に従うものと仮定している。これは、多くのパケットを送信することで、途中のルータにおけるバッファ待ち遅延の影響を除去できることを前提としているためである。

しかしながら、実際には誤差が明らかに正規分布に従わない場合も存在する。図 2 に、1999 年 12 月 21 日 8:39 から www.try-net.or.jp に向けて TTL を 13 にして計測を行なった結果を示す。図 2 より、正規分布に従わない誤差を含んだ RTT が存在することが分かる。正確な帯域を推定するためにはこのような誤差を取り除く必要があり、本稿では重み付き最小二乗法を用いた帯域推定法を利用する。

また、パケットの通過する経路の変更によっても正規分布に従わない誤差が生じる。望ましい最小 RTT を計測するためには、全てのパケットが同じ経路を通る必要がある。Pathchar では返送されてきた ICMP パケットの送信元アドレスをチェックすることで、異なるルータからのパケットの測定値を排除するが、送信ホストとルータ間の経路が変更されたことは検知できない。途中の経路が変更されることは、ルータにおける負荷分散などによって少なからず発生する現象であり [8]、その結果、複数の経路の測定値が混在する。図 3 に、経路変更が起こった場合の測定結果を示す。図は 1999 年 12 月 10 日 12:29 より www.kyotoinet.or.jp に向けて TTL を 8 に設定して計測を行なった結果である。図より、明らかに二つ以上の経路を通過したパケットの RTT が混在していることがわかる。このような誤差を除去するために、適切な RTT の標本を抽出する必要がある。

3 帯域計測における精度と信頼性の向上

3.1 正確かつ信頼性の高い係数の推定方法

ここでは、前節で挙げた誤差のうち図 2 で示される誤差を除去するための二種類の方法を説明する。一つは Tukey の biweight 法を利用した M 推定法と呼ばれるパラメトリック手法であり、少数のデータにのみ大きな誤差が含まれている場合でも信頼性の高い係数推定が可能である。もう一つはノンパラメトリック最小二乗法で、誤差の分布を仮定することなく係数を推定する手法である。

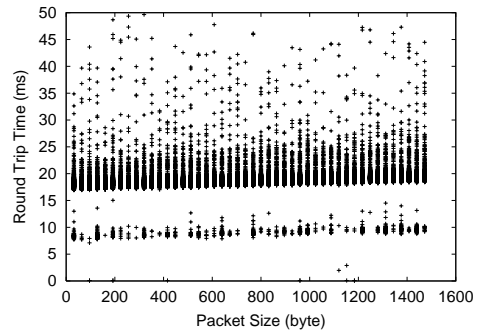


図 3: 複数の集合からなる RTT



図 4: Biweight 法の重み

3.1.1 M 推定法

M 推定法は重み付き最小二乗法を利用し、適切な重みを求めるまで直線の推定を繰り返す手法である。重みは図 4 で示されるような、大きな誤差ほど影響が少なくなるものが用いられる。その結果、M 推定法は少数の大きな誤差に影響されず、ロバストな推定が可能となる。以下に、M 推定法を用いた推定手順を示す。以下、送信するパケットサイズを m 種類とする。

1. パケットサイズを x 、最小 RTT を y としたとき、直線は $y = \alpha + \beta x$ と表現できる。この直線の切片 α 、係数 β を通常の最小二乗法で算出する。

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x}, \quad \beta = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i - m \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^m x_i^2 - m \bar{x}^2} \quad (4)$$

ここで \bar{x} と \bar{y} は x_i および y_i の平均である。

2. 直線と最小 RTT の距離 $|v_i|$ を $|v_i| = |y_i - \beta x_i - \alpha|$ から導出する。
3. この中央値を取り、平均的な誤差 $s = \text{median}\{|v_i|\}$ を算出する。
4. 各点ごとに biweight 法によって重み調節因子 ω_i^{adj} を決定する。

$$\omega_i^{adj} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{|v_i|}{cs}\right)^2\right]^2 & \text{if } |v_i| < cs, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 c は重みを 0 にする基準となる定数である。

5. ω_i を各最小 RTT に対する重みとすると、 ω_i は

$$\omega_i = \frac{m \omega_i^{adj}}{\sum_{i=1}^m \omega_i^{adj}} \quad (6)$$

で表される。この重みを利用して重み付き最小二乗法を行い、新しい α と β を算出する。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i y_i}{m}, \quad \beta = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i x_i y_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i x_i^2} \quad (7)$$

6. 以上の作業を k 回繰り返し、解 α 、 β を求める。

4 章の数値例では $c = 3$ とし、推定の繰り返し回数を $k = 5$ と設定した結果を示す。

次に、M 推定法による帯域の信頼区間の導出法について示す。まず、信頼区間を求めるために、(1) パケットサイズ x に対して最小 RTT の確率変数 Y は平均 $\alpha + \beta x$ 、分散 σ^2 の正規分布に従い、(2) パケットサイズごとの m 回の計測結果はそれぞれ独立であると仮定する。これに

より、係数の集合は以下で示される平均 $\bar{\beta}$ 、分散 σ_B^2 の正規分布に従う。

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2}, \quad \sigma_B^2 = \frac{\sigma^2}{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2} \quad (8)$$

ここで σ^2 は最小 RTT の分散であり、

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y_j - \alpha - \beta x_j)^2 \quad (9)$$

で表される。従って、式 (8) よりリンク n と $n-1$ の係数 $\hat{\beta}_{n-1}$ 、 $\hat{\beta}_n$ および分散 $\hat{\sigma}_{n-1}^2$ 、 $\hat{\sigma}_n^2$ を算出することができる。

次に帯域の信頼区間を求めるために、係数の差の信頼区間を算出する。係数の差は以下のような平均と分散を持っている。

$$\beta_u = \hat{\beta}_n - \hat{\beta}_{n-1}, \quad \sigma_u^2 = \hat{\sigma}_n^2 - \hat{\sigma}_{n-1}^2 \quad (10)$$

この係数の差は自由度 $2m-4$ の t 分布に従う。従って、信頼区間の幅 k は、 $k = \frac{c\sigma_u}{\sqrt{m-2}}$ で表される。ここで 95% の信頼区間を求めるために、 c は t 分布の上側 97.5% 点の値を取る。よって、推定する帯域 $1/\beta_u$ の信頼区間は $1/(\beta_u + k) \leq 1/\beta_u \leq 1/(\beta_u - k)$ (11) となる。

信頼区間を利用することで推定結果に信頼性の指標が得られるが、より正確な信頼区間を求めるためには、誤差の分布に依存しないノンパラメトリック法についても考える必要がある。これについては次節で示す。

3.1.2 ノンパラメトリック法

ノンパラメトリック法を利用することによって、誤差の分布を考慮する必要がなくなる。ノンパラメトリック法において、パケットサイズが m 種類である時の係数は、(1) m 個の最小 RTT の中から任意の二つの点を結び、 $m(m-1)/2$ 個の係数を算出し、(2) 得られた係数の集合の中央値をとることによって導出できる。

ノンパラメトリック最小二乗法による係数の信頼区間を求める方法としては、Kendall の順位相関係数を用いる方法が一般的である。しかし、ここでは係数の差から求められる帯域の信頼区間の算出が目的であるため、この方法は直接適用することができない。その代わりに二つのデータ集合 S 、 T の中央値の差から算出する、Wilcoxon の検定から求められる信頼区間 [9] を利用する。

リンク $n-1$ と n の係数のデータ集合を S 、 T とする。 S と T の要素数をそれぞれ $|S|$ 、 $|T|$ とし、それぞれの要素を $s(j)$ 、 $t(i)$ ($1 \leq i \leq |T|$, $1 \leq j \leq |S|$) とおく。このときの帯域と信頼区間は以下の手順で求められる。

1. S と T の任意の要素の差 $t(i) - s(j)$ ($1 \leq i \leq |T|$, $1 \leq j \leq |S|$) を計算し、ソートした集合を U とする。
2. U の i 番目の要素を $u(i)$ ($1 \leq i \leq |S| \times |T|$) とし、係数の差 β_u の信頼区間を以下の式により算出する。

$$u\left(\frac{|T|(2|S| + |T| + 1)}{2} + 1 - a\right) \leq \beta_u \leq u\left(a - \frac{|T|(|T| + 1)}{2}\right)$$

例えば 95% の信頼区間を計算するには、確率 $P(\sum u(i) \geq a)$ が 0.975 となる a の値を決定する必要がある。計測したサンプル数 $|S|$ と $|T|$ が多ければ、 $\sum u(i)$ は平均 $|T|(|S| + |T| + 1)/2$ 、分散 $|S||T|(|S| + |T| + 1)/12$ の正規分布に従うことから、 a は

$$a = \frac{|T|(|S| + |T| + 1)}{2} + \frac{1}{2} + 1.96 \sqrt{\frac{|S||T|(|S| + |T| + 1)}{12}}$$

で求めることができる。

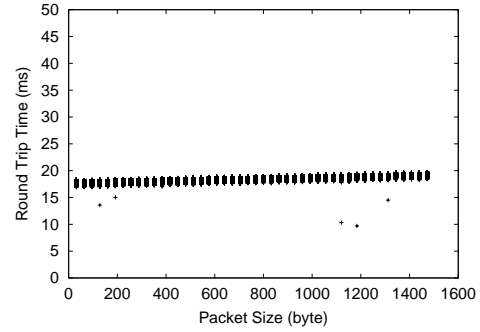


図 5: クラスタリングの結果

上記の方法で正確な信頼区間を求めることができるが、計測回数を制御する目的で信頼区間を導出するためには、オンライン計算をする必要がある。しかし、この算出方法では、Pathchar の規定値である 45 種類のパケットサイズを用いると、リンク一つあたりの係数が 990 個となり、係数の差 U の要素数が約 1,000,000 にまで増大する。このため、膨大な計算時間が必要となる。

そこで、Kendall の順位相関係数 [10] を利用して近似的に信頼区間を計算する方式について検討する。まず、 m の最小 RTT から $m(m-1)/2$ 個の係数を算出することで、 $|S|$ と $|T|$ をそれぞれ $m(m-1)/2$ で置き換える。その後以下の手順で信頼区間を計算する。

1. S と T をソートし、 $u'(i) = s(i) - t(i)$ ($1 \leq i \leq m(m-1)/2$) で表される集合 U' を求める。
2. 係数の差 β_u の信頼区間を次式で求める。

$$u'\left(\frac{\frac{m(m-1)}{2} - C}{2}\right) \leq \beta_u \leq u'\left(\frac{\frac{m(m-1)}{2} + C}{2}\right)$$

ここで、 C は Kendall の順位相関係数であり、95% の信頼区間を算出するためには K を正規分布の上側 97.5% 点として $C = K \sqrt{\frac{m(m-1)(2m-5)}{18}}$ を用いる。

推定帯域の信頼区間を用いたパケット送信数の制御法については 3.3 節で述べる。

3.2 不要な RTT の除去

図 3 のように複数の RTT データ集合が混在する場合、Pathchar では望ましい最小 RTT を検知できない。このため本稿では、データをいくつかの集合に振り分けるためにクラスタリング手法 [11] を利用する。まず、測定された RTT のうち小さい値から 70% のデータに対して複数のクラスタに分割する。そして、最も要素数の多いクラスタに正しい最小 RTT が含まれているものと仮定する。また、各クラスタの要素の値が近い場合は経路変更がなかったものとしてクラスタリングを無効とする。

図 5 は、図 3 に示したデータを 3 つのクラスタに分割した結果である。図より、クラスタリングを用いることで正しい RTT の集合を取り出せることが推定できる。ただし、この方法は各クラスタに分割する際の計算量が膨大であり、パケット到着のたびにクラスタリングを繰り返すことができない。そこで、計測中は明らかに経路が異なるものと考えられる RTT をできるだけ排除し、計測後にクラスタリングを実行する方式を用いる。

最小 RTT を持つパケットが望まれた経路を経由したかどうかは、以下の方法で判定する。まず、あるパケットサイズ x において最小 RTT ($\min RTT$) よりも小さい値 y が得られた時、現在推定している直線と計測で得られた RTT との誤差 $|y - \beta x - \alpha|$ を計算する。その誤差が最小 RTT と直線との間の誤差 $|\min RTT - \beta x - \alpha|$

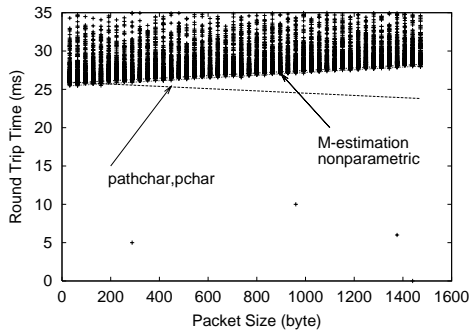


図 6: 例外的な誤差を持つ場合の推定直線

の例えば 3 倍以内なら y を新しい $minRTT$ として書き換える。

3.3 パケット送信数の適応型制御方法

本節では、前述の手法を利用したパケット送信数の適応型制御方法を説明する。以下ではリンク $n-1$ の計測が終了して、リンク n の計測をする場合の手順を示す。

1. n 番目のリンクに対して、固定数のパケットを送信する。本稿の数値例では 10 パケットを送信する。また、40 バイトから 1500 バイトまでの 46 種類のパケットサイズについて RTT を計測する。
2. 経路の変更をチェックするため、ICMP パケットの送信元アドレスを調べ、最も多くのパケットを送り返しているルータを n 番目のルータであるとする。
3. 3.1 節で示した、ノンパラメトリック法または M 推定法を用いてリンク n の帯域と信頼区間を求める。
4. 適切な帯域と信頼区間を得るため、以下の手順を繰り返す。
 - (a) n 番目のリンクに対して、新たにパケットを送信する。今回の測定では各パケットサイズごとに 10 個のパケットを送信する。
 - (b) 計測した RTT が現在の最小 RTT よりも小さければ、最小 RTT が望まれた経路を経由したかどうかを判定する。
 - (c) $n-1$ 番目のルータに送信したパケット数が、 n 番目のルータに送信したパケット数よりも少ない場合、 $n-1$ 番目のリンクに対してもパケットを送信し、パケット送出数を等しくする。
 - (d) 3.1 章の方法を用いて帯域とその信頼区間を推定する。この信頼区間がある設定値よりも狭くなったところで繰り返しを終了する。
5. 繰り返しを終了したところでクラスタリングを使い、推定に使用した RTT が経路変更の影響を受けているかどうかチェックする。経路変更の影響を受けている場合は手順 4 から計測をやり直す。

4 計測結果

4.1 例外的な誤差をもつ最小 RTT の除去

まず最初に、図 2 のような、例外的に大きな誤差を含んだ最小 RTT を持つデータに対して帯域推定を行なった結果を示す。図 6 で Pathchar、Pchar で推定された直線と提案した二つの手法で推定した直線を示す。Pathchar と Pchar の推定結果が 288、960、1376、1440 バイトのパケットの影響から不適切な直線を描いているが、提案方法ではこの影響を受けていないことがわかる。

表 1 で帯域の推定結果を示す。ここでは 202.231.198.2 と 210.142.124.1 の 1.5 Mbps の回線に対する結果と、202.232.8.66 から 210.141.224.162 の間の 45 Mbps に対する結果を示す。この結果からも Pathchar、Pchar での

表 1: 例外的な誤差を持つ場合の帯域および信頼区間推定結果

帯域	推定法	推定帯域	パケット数
1.5M	Pathchar	0.87	200
	M 推定法	$1.34 \leq 1.35 \leq 1.36$	10
	Wilcoxon	$1.32 \leq 1.33 \leq 1.36$	20
	Kendall	$1.30 \leq 1.33 \leq 1.37$	20
45M	Pathchar	86.65	200
	M 推定法	$44.06 \leq 46.58 \leq 49.42$	200
	Wilcoxon	$42.99 \leq 53.44 \leq 66.54$	200
	Kendall	$52.22 \leq 53.44 \leq 54.69$	200

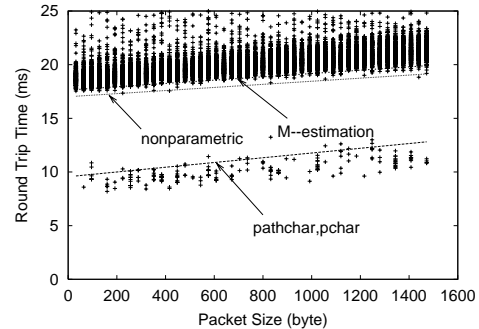


図 7: 複数の集合からなる RTT を持つ場合の推定直線

手法を用いると帯域推定結果にずれが生じている一方、提案方式では正確に推定されていることがわかる。45 Mbps の結果での実際の帯域と推定した帯域の誤差はネットワークのオーバーヘッドに起因するものと考えられる。

またこの表では、それぞれの手法を用いた時に送信したパケット数も示している。今回の計測において、この最大値は各パケットサイズごとに 200 個としている。提案方式では 1.5 Mbps のリンクでは少数のパケットで十分であり、反対に 45 Mbps では Pathchar の場合と同じくパケットサイズごとに 200 個のパケットを送信している。これは [5] で指摘されているように、推定帯域が大きくなるほど正確な帯域推定が難しいことを示している。

4.2 経路変更による誤差の除去

経路変更による影響で RTT の分布が複数の分布から構成されている場合、クラスタリングを行なう必要がある。図 7 から、Pathchar、Pchar の手法によって推定された直線は全く意味をなしていないことが分かる。提案方式では、経路が異なると考えられる RTT を除去することで適切な RTT の集合を取り出している。

表 2 で経路変更の場合における帯域の推定結果を示す。表では 150.100.59.2 と 202.219.160.22 の 10 Mbps の回線に対する結果と、210.157.131.158 から 210.224.236.1 の間の 12 Mbps に対して計測結果である。Pathchar、Pchar の結果が負の値を推定しているのに対し、提案方式では妥当な結果が得られている。

しかし、提案方式でも表 2 において一部精度の悪い結果が得られている。これは、クラスタリング等で帯域推定に使用されなかったパケットが約 7% 入り、結果として有効サンプル数が減少するためと考えられる。

4.3 適応型計測制御

次に、提案した適応型の計測制御方式による結果を示す。これまでの結果と異なり、図 8 で示すように、Pathchar でも正しい帯域を推定している。表 3 においても、推定帯域がそれぞれの方式で差が少ないことが分かる。これらの結果から、ネットワークにおける誤差の影響が小さい場合、誤差が正規分布に従うと推測できる。

一方送出パケット数について見ると、提案方式では Pathchar、pchar の方式と異なり送信パケット数の適

表 2: 複数の RTT からなる場合の帯域および信頼区間

帯域	推定法	推定帯域	パケット数
10M	Pathchar	-22.6	200
	M 推定法	$10.07 \leq 12.40 \leq 16.11$	200
	Wilcoxon	$16.59 \leq 16.95 \leq 24.07$	200
	Kendall	$14.24 \leq 16.95 \leq 25.29$	200
12M	Pathchar	8.25	200
	M 推定法	$9.79 \leq 9.94 \leq 10.09$	20
	Wilcoxon	$13.3 \leq 13.8 \leq 14.4$	90
	Kendall	$13.6 \leq 13.8 \leq 14.1$	90

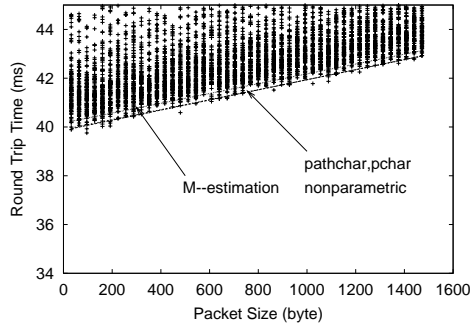


図 8: 誤差の少ない RTT と推定直線

応型制御を行なっているため、表 3 のように送信パケット数を減らすことが可能である。ここで表 4 で帯域の 95% の信頼区間が推定値の 5% の幅になるために必要なパケット数を示す。表中の記号 * は送信パケット数が示されている値になっても 5% 幅に収まらなかったことを表す。パラメトリック推定法とノンパラメトリック推定法では、ノンパラメトリック推定法がより多くのパケットを必要とする。これはノンパラメトリック推定法が誤差の分布を仮定していないことが原因である。このように、提案方式では送信するパケット数を制御でき、信頼区間の幅から推定結果が信頼性を判断できる。反対に Pathchar、Pchar では送信するパケット数の基準も不明であり、結果の信頼性に対して保証を得ることはできない。

4.4 オンラインでの信頼区間の算出

最後に信頼区間の算出方法について考察する。3.1.2 で述べたように、Kendall の順位相関係数を用いた方法は近似値しか得ることができない。しかし表 1~3 から、実際の帯域と信頼区間との関係において二つの手法に大きな差は見受けられない。 m 種類のパケットサイズに対して計測する場合、Wilcoxon の方法では計算時間が $O(m^4)$ であるが、Kendall の方法では $O(m^2)$ に改善される。従って、オンラインで信頼区間を算出するには Kendall の方法が適していることがわかる。

また、表 3 では、M 推定法による信頼区間の算出ができない場合が存在する。これは、式 (10) が送受信ホスト間すべてのルータに対し 1 個のパケットで RTT を測定することを仮定しており、ルータごとにパケットを送出する必要がある実際の測定では、ネットワークの状態により仮定が満たされない場合があるためと考えられる。

これまで得られた結果から誤差の分布が正規分布に従うという仮定は誤差が小さいときに成り立つが、今回はあらかじめ帯域の分かっているリンクに対してのみ計測をしているので、実際の帯域の推定にはノンパラメトリック法を利用すべきである。

5 まとめ

本稿では、精度の高い帯域推定を行うために、Pathchar とその改良版である Pchar の帯域推定法における問題点を明らかにし、信頼性の高い帯域測定を行う二つの帯域

表 3: 帯域および信頼区間推定結果

帯域	推定法	推定帯域	パケット数
6M	Pathchar	5.75	200
	M 推定法	$6.48 \leq 6.60 \leq 6.72$	200
	Wilcoxon	$5.65 \leq 5.87 \leq 5.92$	200
	Kendall	$5.67 \leq 5.87 \leq 5.94$	200
1.5M	Pathchar	1.46	200
	M 推定法	$1.37 \leq 1.40 \leq 1.43$	20
	Wilcoxon	$1.43 \leq 1.45 \leq 1.47$	110
	Kendall	$1.42 \leq 1.45 \leq 1.48$	110
12M	Pathchar	10.6	200
	M 推定法	$-\leq 10.5 \leq -$	200
	Wilcoxon	$10.40 \leq 11.34 \leq 12.28$	50
	Kendall	$11.04 \leq 11.34 \leq 11.59$	50

表 4: 帯域推定に必要なパケット数

帯域 (Mbps)	リンク	M 推定法	ノンパラメトリック
10	10	10	630
10	12	*1127	220
12	15	10	10
12	12	30	80
45	13	370	*1007
100	16	427	979
100	9	*1080	*1080

推定方法を提案した。数値結果より、提案方法がネットワークの状況に左右されにくいロバストな推定が可能であることを示した。提案した二つの手法は計算時間と信頼性に依りて使い分けるべきであるが、手法を決定するための明確な指標が明らかになっていない。この点については今後の課題である。

参考文献

- [1] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wangm, and W. Weiss, "An architecture for differentiated services," *IETF RFC 2475*, December 1998.
- [2] E.C.Rosen, A.V.Than, and R.Callon, "Multiprotocol label switching architecture," *IETF draft*, March 1998.
- [3] "Caida measurement tool taxonomy," <http://www.caida.org/Tools/taxonomy.html>.
- [4] V. Jacobson, "pathchar," <ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/>.
- [5] A. B. Downey, "Using pathchar to estimate Internet link characteristics," *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 241-250, August 1999.
- [6] V. Jacobson, "traceroute," <ftp://ftp.ee.lbl.gov/traceroute.tar.Z>.
- [7] B. A. Mah, "pchar: A tool for measuring Internet path characteristics," <http://www.ca.sandia.gov/~bmah/Software/pchar>.
- [8] V. Paxson, "Measurements and analysis of end-to-end internet dynamics," *Ph.D.Thesis*, April 1997.
- [9] G.Noether, "Some simple distribution-free confidence intervals for the center of a symmetric distribution," *J. Am. Statist. Assoc.*, 68, pp. 716-719, 1973.
- [10] M.G.Kendall, "Rank correlation methods," 1970.
- [11] J. A. Hartigan, *Clustering algorithms*. John Wiley & Sons, 1975.