

[奨励講演] 無線通信環境におけるアクティブ計測の バイアスを補正するアクセス遅延推定法の提案

渡部 康平[†] 中川 健治[†]

[†] 長岡技術科学大学 大学院 工学研究科 〒940-2188 新潟県 長岡市 上富岡町 1603-1

E-mail: {k.watabe, nakagawa}@nagaokaut.ac.jp

あらまし ネットワークにプローブを送出することでエンドツーエンドの通信品質を計測するアクティブ計測では、プローブの送出により計測対象のネットワークの状態を変化させてしまうという問題がある。この問題は、先行研究において有線ネットワークを前提に議論が進められてきたが、帯域制約の厳しい無線通信環境においてより顕著に現れることが予想される。本稿では、IEEE 802.11 MAC におけるアクセス遅延の分布をアクティブ計測により計測する際に、プローブの送出の影響による精度の限界が存在することを示し、精度の限界を克服するためプローブのフレームが経験したアクセス遅延の分布をユーザのフレームが経験したアクセス遅延の分布に補正する推定法を提案する。シミュレーションによって、ユーザのフレームが経験したアクセス遅延分布を適切に推定できることを確認した。

キーワード ネットワーク計測, QoS, アクセス遅延, アクティブ計測, 無線 LAN

[Encouragement Talk] A Proposal of Unbiased Estimation Using Active Measurement for Access Delay of Wireless Communications

Kohei WATABE[†] and Kenji NAKAGAWA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology

Kamitomiokamachi 1603-1, Nagaoka, Niigata, 940-2188 Japan

E-mail: {k.watabe, nakagawa}@nagaokaut.ac.jp

Abstract In active measurements in which probe packets are injected into a target network, there is a problem wherein probe packets perturb the network state. In our previous works, the problem has been discussed in the field of wired networks. The problem, however, remarkably appears in wireless environments where bandwidth is severely constrained. In this paper, we show that there is an accuracy bound when we measure a distribution of access delay on IEEE 802.11 MAC. Moreover, we also propose modification method in which we modify a distribution of access delay that is experienced by probe frames to estimate a distribution of access delay that is experienced by user frames on a network without probe. By using simulations, we confirm that our method can appropriately estimate the distribution

Key words Network measurement, QoS, Access delay, Active measurement, Wireless LAN

1. はじめに

ネットワークのエンドツーエンドの遅延を正確に計測し、パステ性を評価することはネットワーク設計およびアプリケーション設計の立場から非常に重要である。テレビ会議に代表されるリアルタイム通信を伴うアプリケーションでは、エンドツーエンドの遅延の増大はアプリケーションの品質の悪化を招く。ITU-T Recommendation G.114 [1]によれば、エンドツーエンドの片道遅延が 150 msec を超えると、インタラクティブな VoIP アプリケーションの品質に影響が現れるとされている。VoIP アプリケーションの品質を決定付けるのは、相対的に大

きな遅延の発生頻度などであり、平均遅延のみならず、遅延の 99% 分位点など、高分位点の推定が重要になる。

ネットワークのエンドツーエンド遅延を計測する代表的な技術として、プローブパケットを送出することで計測を行うアクティブ計測がある [2]。アクティブ計測に関しては、先行研究により豊富な研究成果が挙げられており、エンドツーエンド遅延 [3]~[5] を始め、パケットロス [6], [7], 可用帯域 [8], [9], リンク品質 [10], トラヒック特性 [11], ノード故障 [12], [13] など、様々な対象を計測する技術が提案されている。これらの計測ツールを提案する研究に加え、近年では、遅延分位点・パケットロス率の推定精度や計測オーバーヘッドの削減に着目した研

究も報告されている [14]~[19]. また, 実ネットワークでの大規模計測なども盛んに行われ, ネットワークの様々な品質特性が明らかにされている [20], [21].

アクティブ計測では, 高精度化のために大量のプローブパケットを送出すると, プローブフローの流入により計測しているネットワークの状態が変化してしまう問題がある [22], [23]. 一般に遅延のアクティブ計測では, プローブパケットの送出は送出時点における遅延過程のサンプリングと捉えることができ, 多数のプローブパケットを送出してサンプル数を増やすことで, 推定精度は向上する. しかし, プローブパケットの転送はネットワーク資源を浪費するため, ネットワーク内部でパケットが受けるプローブパケットの遅延は, プローブパケットフローが流入していない状態でのユーザパケットの遅延とは異なるものになってしまう.

我々にとって本当に興味があるのは, プローブフローが流入してかき乱されたネットワークの遅延ではなく, プローブフローが流入していない状態での遅延である. プローブパケット自体が受ける遅延は, プローブフローによりかき乱されたネットワークの遅延であるため, プローブパケットが受けた遅延から算出される推定値はプローブフローが流入していない状態の真値に比べ大きくなる. 言い換えるならば, アクティブ計測による遅延計測の推定値にはバイアスがあり, 不偏推定量にならない.

我々はこれまで, 有線ネットワークを前提として, プローブパケットから得られたエンドツーエンド遅延を基に, プローブパケットが送出されていない状態における遅延を推定する INTrusiveness-aware ESTimation (INTEST) を提案してきた. INTEST では, ルータのキュー内のパケットが 0 でない区間 (ビジー区間) とそうでない区間 (アイドル区間) を分割することにより, プローブパケットによるキューの増加分を推定し, 増加分を減算することにより, プローブパケットが送出されていない状態の遅延を推定する.

しかし, INTEST では, FIFO のキューによりモデル化される有線ネットワークを前提としているため, 無線ネットワークのアクセス遅延を考慮することができない. IEEE 802.11 の Carrier Sense Medium Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) に基づく無線通信においては, ノードがチャネルにアクセスを試みてから実際に転送が成功し, ACK フレームが返ってくるまでのアクセス遅延がエンドツーエンドの遅延に対して支配的な影響を及ぼす. 無線通信のチャネルアクセスにおいては, フレームの衝突による再転送が頻繁に発生するため, アクセス遅延を FIFO キューによるモデル化で表現することは困難である. しかし, プローブフローの影響による遅延の変化は, 帯域制約の厳しい無線通信環境において, より顕著に現れることが予想されるため, 無線通信環境におけるプローブフローの影響を考慮した遅延計測法の実現は重要である.

本稿では, IEEE 802.11 において, プローブフローのフレームが経験したアクセス遅延から, プローブフローが送出されていない状態におけるアクセス遅延を推定する手法を提案する. 本手法では, プローブフローのフレームの再転送頻度の分布とメディアを共有する各フローの送出回数を基に, プローブフローのフレームが経験したアクセス遅延の分布を補正することにより, プローブフローが送出されていない状態においてユーザフローのフレームが経験するアクセス遅延の分布, 特に高分位点を推定する. ns-3 [24] によるシミュレーションにより, プローブフローのフレームが経験するアクセス遅延の分布が本手法により適切に補正されることを示す.

本稿の構成は以下の通りである. まず, 第 2 章で,

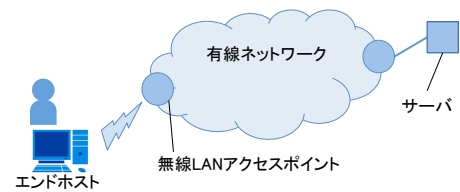


Fig. 1 想定するネットワーク

IEEE 802.11 のバックオフメカニズムについて概説し, 他フローの影響によるアクセス遅延の増加について考察する. 次に第 3 で, IEEE 802.11 において, 従来のアクティブ計測による推定値でアクセス遅延の分布および分位点の推定を行うと, バイアスにより精度に限界が存在することを確認する. 第 4 では, 前章で確認したバイアスを補正し, プローブフローが流入しないネットワークにおいてユーザフローのフレームが経験する遅延の分布を推定する手法を提案する. 第 5 章で, 提案した推定手法が適切にユーザフローのフレームが経験するアクセス遅延の分布を推定できることを, シミュレーションにより検証する. 最後に, 第 6 章において, 本稿のまとめと今後の展望について述べる.

2. IEEE 802.11 バックオフメカニズムにおけるアクセス遅延

本稿では, Fig. 1 に示すようなネットワークのエッジにおいて無線 LAN が設置されたネットワークを考え, エンドツーエンドの遅延に大きな影響を及ぼす無線区間におけるアクセス遅延の分布を推定する. 無線区間はエンドホストから 1 ホップ目にのみ存在し, 他区間是有線によりサーバまで接続していると仮定する. また, 無線 LAN アクセスポイントとエンドホスト間の通信は, CSMA/CA を用いる IEEE 802.11 の Distributed Coordination Function (DCF) を採用しているとする.

IEEE 802.11 DCF では, CSMA/CA に基づくバックオフメカニズムを利用することでフレームの衝突を回避する. CSMA/CA においては, フレームを送信するノードは最初にキャリアセンスを行い, Distributed Inter-Frame Space (DIFS) 期間だけチャネルがアイドル状態であることを確認した場合, 転送を開始する. 一方, チャネルがビジー状態であった場合, チャネルがアイドル状態になり DIFS 期間だけ経過するまで待機し, さらにバックオフタイマーをランダムな時間に設定して, タイマーが 0 になるまで待機してから転送を行う. Fig. 2 のように, バックオフタイマーの待機中に再びチャネルがビジー状態になった場合, タイマーは一時的にカウントダウンを停止し, 再びアイドル状態に戻った際にカウントダウンを開始する. ランダムなバックオフタイムだけ各ノードが転送を待機することにより, チャネルがアイドル状態になった直後に複数のノードが同時に転送を開始することによる衝突の発生確率を抑制している.

しかし, 多数のノードが同時に通信を行う高負荷状態においては, フレームの衝突が頻発し, チャネルへのアクセス遅延が増大する. 複数のノードが同時にフレームの転送を開始した場合, フレームの衝突により, アクセスポイントはフレームを受信できないため, ACK フレームは送信されない. 転送を行ったにもかかわらず ACK フレームを受信できなかったノードは, バックオフタイマーをリセットし, フレームの再転送を行う. Fig. 3 に示すように, フレームが経験するアクセス遅延は再転送によって増加するが, その増加量は

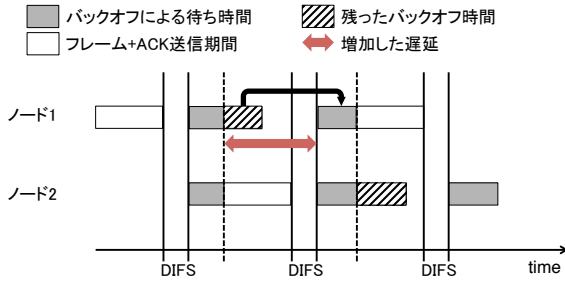


Fig. 2 他フローのフレーム転送によるビジー区間の増加とそれに伴う遅延時間の増加

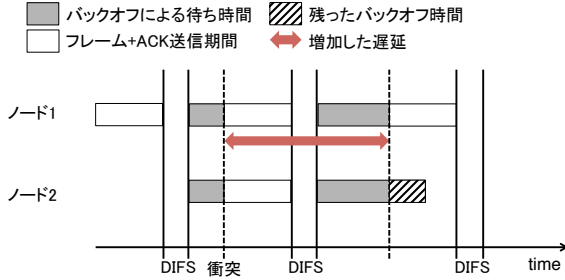


Fig. 3 フレームとの衝突による再転送とそれに伴う遅延時間の増加

(データフレーム送信時間) + (SIFS)
+ (ACK フレーム送信時間) + (DIFS) + (バックオフタイム)

となる。再転送後のバックオフタイマーのカウント中に他のフレームの転送があれば、アクセス遅延はさらに増加する。また、さらに衝突が発生すれば再再転送となるため、フレームが経験する遅延は非常に大きなものになる。

3. 無線通信環境におけるアクティブ計測の推定値のバイアス

我々が推定したいのは、ネットワークに流入する他のユーザのフローはそのままに、プローブフローが流入していない状態において計測対象のユーザフローのフレームが受けるアクセス遅延の分布 D_u の特性である。これはプローブフローが流入するネットワークにおいて、ユーザフローのフレームが経験する遅延の分布とは異なることに注意する。プローブフローが流入している場合、プローブフローの負荷によりネットワークはより混雑するため、遅延は一般的に大きくなる。

一般的にアクティブ計測では、 n 個のプローブフローのフレームが経験した遅延 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ を昇順に並べて、 $\kappa(l) = \lceil (1-l)n \rceil$ 番目の遅延を推定値とすることで l -分位点を推定し、ユーザの遅延の分布を推定する [18]。ここで、 $\lceil \cdot \rceil$ は天井関数を表しており、 $\kappa(l)$ は l に関して広義単調増加の階段関数になる。これは、 $I(x) = \{i | d_i < x\}$ として、プローブフローのフレームが経験した遅延の分布 D_p の累積分布関数、

$$f_p(x) = \frac{\# \{I(x)\}}{n} \quad (1)$$

の逆関数により、分位点を推定する方法である。ここで、 $\#\{\cdot\}$ は集合の要素数を表す。この推定法は、プローブの遅延の分布により、ユーザ遅延の分布を代表できるという考え方に基づいている。

しかし、 D_u はプローブフローが流入していない状態におけ

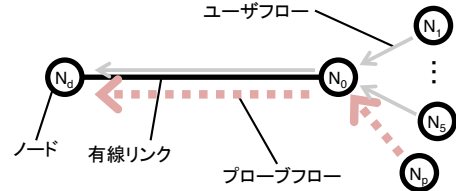


Fig. 4 シミュレーションで用いたネットワーク

る遅延の分布であるため、 D_u とプローブが経験した遅延の分布 D_p は異なり、従来の推定値は不偏推定量にならない。無線ネットワークにおいては、アクティブ計測によりプローブフローを送出する場合、プローブフローによりメディアを共有するフロー数が増えるため、一般的に D_u は、プローブフローのフレームが受けるアクセス遅延の分布 D_p とは異なる。よって、安易にプローブフローのフレームが経験したアクセス遅延を D_u の推定値として、ユーザの遅延を評価することはできない。

従来の分位点の推定値が不偏推定量とならないことを確認するために、Fig. 1 に示すネットワークを ns-3 [24] によりシミュレーションし、プローブフローの影響を調査した。有線区間と無線区間の帯域は、それぞれ 155.52 Mbps と 11 Mbps とし、無線区間の MAC プロトコルは IEEE 802.11b であるとした。ユーザフローを生成する 5 つのノードが存在し、各ノードは平均 1.0 msec 間隔のポアソン到着に従うタイミングでパケットを生成する。一方、プローブフローは、全く生成しない場合と、ノード N_p から平均 16.0 msec 間隔のポアソン到着に従うタイミングでパケットを生成する場合の 2 つを行い比較した。セグメントサイズは、ユーザ、プローブ共に 600 byte としており、 N_0 におけるバッファサイズは十分に大きく、バッファ溢れによるロスは発生しない。すべてのフローに関して、トランスポート層プロトコルは UDP とした。シミュレーション時間は 50.0 sec とし、無線区間における各フレーム送信において、フレームが MAC 層のキューの先頭に到達してから ACK フレームが返ってくるまでの遅延を計測した。

Fig. 5 に、プローブフローのフレームが経験した遅延、およびプローブフローが送出されている場合とそうでない場合それぞれについてのユーザフローのフレームが経験した遅延の補分布を示す。縦軸が対数表示になっていることに注意する。図中で、プローブフローの結果の縦軸の値が 0.01 のときの横軸の値は、上述の 99%-分位点の推定値に相当する。図を見ると、ユーザフローのフレームが経験する遅延は、プローブフローの有無に影響され、大きく変化することが確認できる。また、我々が計測を目指すのはプローブフローが流入していない状態におけるユーザの遅延であるが、プローブフローのフレームが経験する遅延と異なることが確認できる。遅延の 99%分位点の真値は、34.4 msec であるが、推定値は 46.5 msec となっているため、12.1 msec ものバイアスが存在することがわかる。

バイアスが存在する非不偏推定量の推定精度は、MSE により評価することができる。任意の推定値 \hat{P} の MSE は以下の式で定義され、バイアスと推定値の分散を同時に考慮して推定値の優劣を評価することができる。

$$E[(\hat{P} - P^*)^2] = \text{Var}[\hat{P}] + \{E[\hat{P}] - P^*\}^2. \quad (2)$$

ここで、 P^* は推定対象の真の値を示す。MSE は式 (2) の右辺に示すように推定値の分散とバイアスの 2 乗の和に展開することができるため、推定値がばらつかず、かつバイアスも小さいほど小さな値を取る。本稿では、MSE が小さい推定値をより

よい推定値と定義し、評価を行う。

バイアスを考慮して推定値を評価するため、プローブフローの平均パケット生成間隔を様々に変化させてシミュレーションを行い、推定値の MSE を調査した。プローブフローの平均パケット生成間隔は、1.0 msec から 2 倍ずつ増加させて 512.0 msec まで変化させ、プローブフローのパケット生成間隔以外は、上述のシミュレーションと全く同じ条件でシミュレーションを行った。50.0 sec のシミュレーションを 20 回実施し、それぞれのシミュレーションにおいてプローブフローのフレームが経験した遅延を計測し、従来の推定値に基づき 99%-分位点を推定した。20 回分の推定値から分散およびバイアスを算出し、MSE を算出した結果を Fig. 6 に示す。横軸が、プローブフローのパケット生成レートになっていることに注意する。図から、プローブフローのパケット生成レートが増加するに連れて、分散が減少していくことが確認できる。これは、プローブフローのフレーム数が増加するほど、推定値における階段関数 $\kappa(l)$ のステップが細くなるためである。

一方、バイアスについては、プローブフローのパケット生成間隔をどのように変化させてもほとんど変化しない。有線ネットワークの場合では、プローブのパケット数を増加させると、プローブの負荷によって試験パケット数が増加するが、無線ネットワークにおいては同様の結果にはならない。無線ネットワークでは、自フローのフレーム同士が衝突することはないため、プローブパケットを大量に生成してもプローブフローの品質は必ずしも悪化しないためである。逆に、プローブフローのフレーム数を抑制しても、衝突頻度が減少しないため、バイアスがなくなることはない。結果として、プローブフローのパケットを増やせば分散の減少効果により MSE が減少し、精度が向上するものの、バイアスの影響により MSE は一定値以下にはならない。

上記の結果から分かる通り、従来のアクティブ計測における推定値にはバイアスが存在し、例えば、プローブフローのパケット生成レートを小さくしてトラヒック量を抑制しても、バイアスを除去することはできない。バイアスの存在により精度の限界が存在するため、従来のアクティブ計測の枠組みでは、無線区間を含むネットワークの遅延の分位点を高精度に推定することは難しい。

4. アクティブ計測の推定値のバイアスを補正する推定法

前節の検証の通り、一般的なアクティブ計測による推定値にはバイアスが存在し、プローブフローが流入していない場合にユーザフローのフレームが経験するアクセス遅延を正確に推定することはできないため、本稿では、プローブフローのフレームが経験したアクセス遅延の分布をユーザフローのフレームが経験したアクセス遅延分布に補正する推定法を提案する。

IEEE 802.11 のバックオフメカニズムにおいては、再転送の頻度がアクセス遅延に対して大きな影響を及ぼすため、プローブフローのフレームの転送回数分布 q_j とユーザフローのフレームの転送回数分布 p_j の関係を明らかにすることで、プローブフローが受ける遅延を補正する。今、プローブフローが流入していない状態における計測対象のユーザフロー F_1 について、1 つのフレームを転送して ACK フレームを受け取るまでに行った転送の回数を j とし（つまり、再転送回数は $j-1$ 回）、その分布を p_j とする。一方、プローブフローについて、1 つのフレームを転送して ACK フレームを受け取るまでに行った転送の回数の分布を q_j とする。 F_1 以外に $m-1$ 本のユーザフロー

$\{F_i (i = 2, \dots, m)\}$ がメディアを共有しているとする、プローブフローが流入していないとき、計測対象のユーザフロー F_1 のフレームは $\{F_i (i = 2, \dots, m)\}$ のフレームと衝突する可能性があるため、 $\{F_i (i = 2, \dots, m)\}$ のトラヒック量によって p_j が特徴付けられる。一方、プローブフローのフレームはすべてのユーザフロー $\{F_i (i = 1, \dots, m)\}$ のフレームと衝突する可能性があるため、 q_j は $\{F_i (i = 1, \dots, m)\}$ により特徴付けられ、衝突頻度はユーザフローに比べ大きくなる。この p_j と q_j の違いにより、ユーザフローのフレームが経験するアクセス遅延とプローブフローのフレームが経験するアクセス遅延の分布に差異が生まれ、推定のバイアスが生まれる。

ユーザフロー F_1 のフレームは F_1 自身のフレームと衝突する可能性はないため、プローブフローのフレームの転送回数分布 q_j から、 F_1 との衝突による影響を除去できれば、ユーザフローのフレームの転送回数分布 p_j を求めることができる。プローブフローが流入している条件下において、ユーザフロー $F_i (i = 1, \dots, m)$ の計測期間中におけるフレーム受信成功回数を X_i とすると、フレーム数と衝突頻度が比例すると考えられるため、プローブフローのフレームが他フレームと衝突した際に、 F_1 との衝突である確率は $\rho = X_1 / \sum_{i=1}^m X_i$ と推定することができる。プローブ送出ノードがアクセスポイントに十分近く、隠れ端末問題の影響がないとすると、 X_i はプローブ送出ノードによるメディアの監視で計測することができる。プローブフローのフレームとユーザフロー F_1 のフレームの衝突は、プローブフローのフレームの転送毎に独立であると仮定すると、プローブフローのフレームが、 j' 回目に初めて F_1 のフレームと衝突している確率は $\rho(1-\rho)^{j'-1}$ となり、パラメータ ρ の幾何分布に従う。3 つ以上のフレームが同時に衝突する可能性を無視すると、 j' 回目で初めてユーザフロー F_1 のフレームと衝突したプローブフローのフレームは、 F_1 の影響を除外すれば、 j' 回目の転送で受信成功すると考えられる。 F_1 の影響を除外すると、 $j(>j')$ 回転送されたプローブフローのフレームのうち、割合として $\rho(1-\rho)^{j'-1}$ 分は j' 回目の転送で受信成功していると捉えられる。

上記を考慮すると、 q_j は p_j の推定値 \hat{p}_j に以下のように補正することができる。

$$\hat{p}_j = q_j - q_j \rho \sum_{k=0}^{j-2} (1-\rho)^k + \rho(1-\rho)^{j-1} \sum_{k=j+1}^{\infty} q_k \quad (3)$$

右辺第 2 項は、 j 回目の転送で受信成功したプローブフローのフレームのうち、 F_1 の影響がなければ j 回以前に受信成功していたであろうフレームの割合を表している。一方、右辺第 3 項は、 j 回よりも多くの転送を経て受信成功したプローブフローのフレームのうち、 F_1 の影響がなければ j 回目で受信成功しているであろうフレームの割合を表している。

この転送回数の分布 \hat{p}_j と q_j の違いを反映して、プローブフローのフレームが経験したアクセス遅延の分布からプローブフローのフレームが流入していない状態でのユーザフローのフレームが経験するアクセス遅延の分布に補正を行う。前述の通り、通常、 n 個のプローブフローのフレームのアクセス遅延 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ から、アクセス遅延の分布を推定する場合、式 (1) で推定される。式 (1) の遅延分布 $f_p(x)$ は、プローブフローのフレームが経験した遅延であり、その際の転送回数分布は q_j である。我々が推定したいユーザフロー F_1 のフレームが経験した遅延の分布 $f_u(x)$ は、転送回数分布が p_j であるため、転送回数が j 回である F_1 のフレーム数は、プローブフローのフレームに比べて p_j/q_j 倍になっている。よって、 r_i をプローブフロー

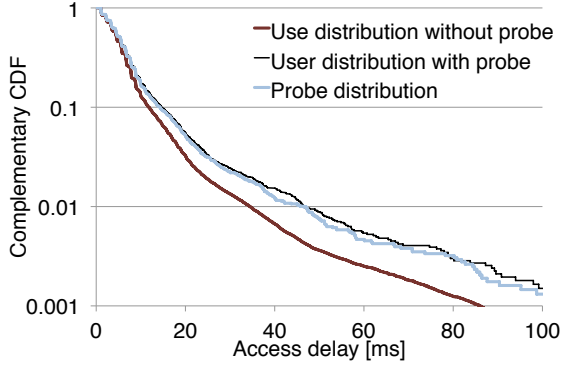


Fig. 5 従来のアクティブ計測におけるアクセス遅延分布の推定値

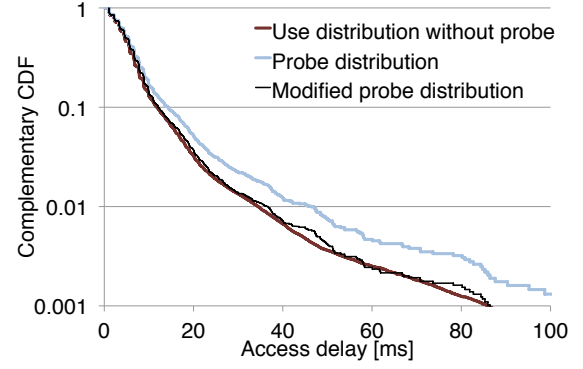


Fig. 7 提案手法による分位点推定でのアクセス遅延分布

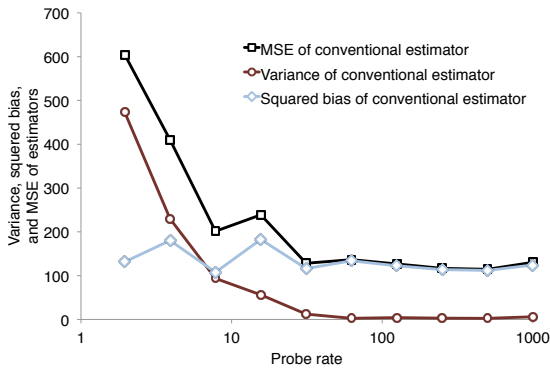


Fig. 6 従来のアクティブ計測における分位点推定の推定値の分散、バイアス、および MSE

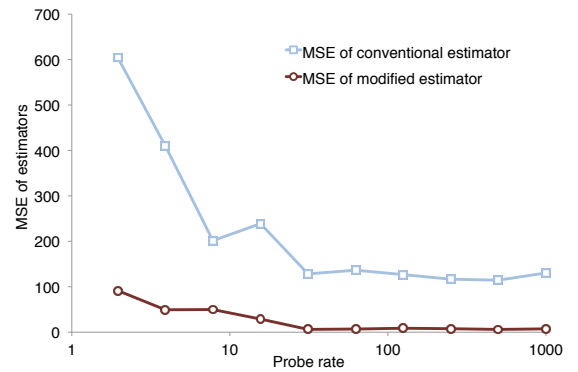


Fig. 8 提案手法による分位点推定の MSE

の i 番目のフレームを転送して ACK フレームを受け取るまでに行った転送回数 d_i として、 $I_k(x) = \{i | r_i = k, d_i < x\}$ とすると、

$$\hat{f}_u(x) = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\hat{p}_k}{q_k} \# \{I_k(x)\}}{n} \quad (4)$$

とすることで、補正することができる。上式は、 $f_p(x)$ において、転送回数が k 回のフレームに対して \hat{p}_k/q_k のウェイトをかけて積算しており、 $\hat{f}_u(x)$ を推定値とすることで、 F_1 のフレームが経験するアクセス遅延の分布を推定できる。また、 F_1 のフレームが経験するアクセス遅延の l -分位点は、 $\hat{f}_u(x)$ の逆関数 $\hat{f}_u^{-1}(l)$ により推定される。

5. シミュレーション評価

上記の補正による推定の妥当性を確認するために、ns-3 [25] を利用したシミュレーションを実施し、従来の推定値と比較した。シミュレーション条件は、第3章において、プローブフローの平均パケット生成間隔を 16.0 msec としたシミュレーションと等しくした。シミュレーションを 50.0 sec 実施し、プローブフローが流入していない状態においてユーザフローのフレームが経験した遅延の分布の補分布 $1 - f_u(x)$ 、プローブフローのフレームが経験した遅延の補分布 $1 - f_p(x)$ 、および、プローブフローのフレームが経験した遅延の分布を提案手法によって補正した分布の補分布 $1 - \hat{f}_u(x)$ を Fig. 7 を示す。図から、提

案手法によりプローブフローのフレームが経験したアクセス遅延が適切に補正され、プローブフローが流入していない状態においてユーザフローのフレームが経験するアクセス遅延の分布を推定できていることが確認できる。例えば、縦軸が 0.01 の点を見ると、従来の推定法では、横軸のアクセス遅延の値が真値よりも 12.1 msec も大きく、バイアスが存在したのに対して、補正した分布では、わずか 1.9 msec の差となっている。

また、アクセス遅延の分位点を推定した際の精度を検証するため、同様のシミュレーションを複数回行い、分位点の推定を行った。シミュレーションの条件は、第3章において、プローブフローの平均パケット生成間隔を 1.0 msec から 512.0 msec まで変化したシミュレーションと同様とした。50.0 sec のシミュレーション 20 回繰り返し、各シミュレーション毎に 99%-分位点を提案手法により推定し、推定値の MSE を算出した。MSE の値を従来の推定値と比較した結果を Fig. 8 に示す。横軸が、プローブフローのパケット生成レートになっていることに注意する。従来の推定値に比べ、MSE の値が飛躍的に減少し、精度が向上していることが確認できる。提案手法を用いると、プローブフローのパケット生成レートが十分に大きければ、ほとんどバイアスなく推定できている。

6. まとめと今後

本稿では、IEEE 802.11 において、プローブフローのフレームが経験したアクセス遅延から、プローブフローが流入していない状態において各ユーザが経験するアクセス遅延の分布を

推定する手法を提案した。提案手法では、プローブフローのフレームの転送回数分布を計測し、ユーザフローのフレームが経験する転送回数分布を推定する。推定の際には、メディアを共有するフローのフレーム送信回数のみを利用し、推定を行う。その後、推定されたユーザフローの転送回数分布とプローブフローの転送回数分布の比を考慮して、プローブフローのフレームが経験した遅延の分布をユーザフローのフレームが経験する遅延に補正する。

提案手法により、プローブフローが流入していない状態におけるユーザフローのフレームが経験するアクセス遅延の分布が適切に推定されることを確認し、精度が従来手法に比べて飛躍的に向上することを確認した。アクセス遅延の99%-分位点を推定した場合の推定精度をMSEにより評価し、プローブフローのパケット生成レートが十分に大きければ、ほとんどバイアスなく推定できることが確認できた。

今回の検証では、提案手法におけるキーアイデアである転送回数分布による遅延分布の補正が適切に機能することを単純なシミュレーションモデルで確認できたものの、フロー特性の多様性や無線干渉、隠れ端末問題を考慮したモデルでは検証できていない。今後は、パケットサイズ、レートなどユーザフローの特性を多様にした場合に、適切に各フローのフレームが経験するアクセス遅延を推定できるかを検証する。また、無線干渉や隠れ端末といった無線固有の問題も考慮して、より現実的なシミュレーションモデルの利用や、実機による実験なども実施する予定である。

Acknowledgment

本研究の一部は、JSPS 科研費 26880008 の助成を受けたものである。

References

- [1] “One-way Transmission Time,” ITU-T Recommendation G.114, May 2003.
- [2] S. Lee, K. Levanti, and H.S. Kim, “Network Monitoring: Present and Future,” *Computer Networks*, vol.65, no.2, pp.84–98, June 2014.
- [3] J.-C. Bolot, “Characterizing End-to-End Packet Delay and Loss in the Internet,” *Journal of High Speed Networks*, vol.2, no.3, pp.289–298, 1993.
- [4] K.P. Gummadi, S. Saroiu, and S.D. Gribble, “King: Estimating Latency between Arbitrary Internet End Hosts,” *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement (IMW 2002)*, pp.5–18, Marseille, France, Nov. 2002.
- [5] L. De Vito, S. Rapuano, and L. Tomaciello, “One-way Delay Measurement: State of the Art,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.57, no.12, pp.2742–2750, Dec. 2008.
- [6] J. Sommers, P. Barford, N. Duffield, and A. Ron, “Improving Accuracy in End-to-End Packet Loss Measurement,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol.35, no.4, pp.157–168, Oct. 2005.
- [7] F. Baccelli, S. Machiraju, D. Veitch, and J. Bolot, “Probing for Loss: the Case against Probe Trains,” *IEEE Communications Letters*, vol.15, no.5, pp.590–592, March 2011.
- [8] J. Strauss, D. Katabi, and F. Kaashoek, “A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools,” *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement (IMC 2003)*, pp.39–44, Miami, FL, USA, Oct. 2003.
- [9] V.J. Ribeiro, R.H. Riedi, R.G. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, “pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths,” *Proceedings of the 4th Passive and Active Measurement Conference (PAM 2003) Workshop*, San Diego, CA, USA, April 2003.
- [10] K.G. Anagnostakis, M. Greenwald, and R.S. Ryger, “Cing: Measuring Network-Internal Delays Using Only Existing Infrastructure,” *Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Computer Communication (INFOCOM 2003)*, pp.2112–2121, San Francisco, CA, USA, March 2003.
- [11] A. Rizk, Z. Bozakov, and M. Fidler, “H-Probe: Estimating Traffic Correlations from Sampling and Active Network Probing,” *IFIP Networking 2013 Conference*, Brooklyn, NY, USA, March 2013.
- [12] A. Habib, M. Khan, and B. Bhargava, “Edge-to-edge Measurement-based Distributed Network Monitoring,” *Computer Networks*, vol.44, no.2, pp.211–233, Feb. 2004.
- [13] L. Cheng, X. Qiu, L. Meng, Y. Qiao, and R. Boutaba, “Efficient Active Probing for Fault Diagnosis in Large Scale and Noisy Networks,” *the 29th IEEE International Conference on Computer Communication (INFOCOM 2010)*, San Diego, CA, USA, March 2010.
- [14] M. Aida, N. Miyoshi, and K. Ishibashi, “A Scalable and Lightweight QoS Monitoring Technique Combining Passive and Active Approaches,” *Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Computer Communication (INFOCOM 2003)*, pp.125–133, San Francisco, CA, USA, March 2003.
- [15] B.-Y. Choi, S. Moon, R. Cruz, Z.-L. Zhang, and C. Diot, “Quantile Sampling for Practical Delay Monitoring in Internet Backbone Networks,” *Computer Networks*, vol.51, no.10, pp.2701–2716, July 2007.
- [16] M. Roughan, “A Comparison of Poisson and Uniform Sampling for Active Measurements,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.24, no.12, pp.2299–2312, 2006.
- [17] F. Baccelli, S. Machiraju, D. Veitch, and J. Bolot, “On Optimal Probing for Delay and Loss Measurement,” *Proceedings of the 7th ACM Conference on Internet Measurement (IMC 2007)*, pp.291–302, San Diego, CA, USA, Oct. 2007.
- [18] J. Sommers, P. Barford, N. Duffield, and A. Ron, “Accurate and Efficient SLA Compliance Monitoring,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol.37, no.4, pp.109–120, Oct. 2007.
- [19] N. Zhu, J. He, Y. Zhou, and W. Wang, “On the Accuracy of Packet Delay Estimation in Distributed Service Networks,” *Journal of Network and Systems Management*, vol.21, no.4, pp.623–649, Feb. 2013.
- [20] M. Jainik, S. Moon, J. Kurose, and D. Towsley, “Measurement and Modelling of the Temporal Dependence in Packet Loss,” *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Computer Communication (INFOCOM 1999)*, pp.345–352, New York, NY, USA, March 1999.
- [21] H. Pucha, Y. Zhang, Z.M. Mao, and Y.C. Hu, “Understanding Network Delay Changes Caused by Routing Events,” *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol.35, no.1, p.73, June 2007.
- [22] F. Baccelli, S. Machiraju, D. Veitch, and J. Bolot, “The Role of PASTA in Network Measurement,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol.36, no.4, pp.231–242, Oct. 2006.
- [23] M. Roughan, “Fundamental Bounds on the Accuracy of Network Performance Measurements,” *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol.33, no.1, pp.253–264, June 2005.
- [24] T.R. Henderson, M. Lacage, G.F. Riley, G. Dowell, and J.B. Kopena, “Network Simulations with the ns-3 Simulator,” *Proceedings of ACM SIGCOMM 2008*, p.527, Seattle, WA, USA, Aug. 2008.
- [25] “The Network Simulator – ns-2”. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>