

マルチホップ無線ネットワークにおける プローブ送出先の切替え制御を用いた可用帯域計測の高速化

祐成 光樹 中尾 敏康

日本電気株式会社 サービスプラットフォーム研究所 〒630-0101 奈良県生駒市高山町 8916-47

E-mail: t-sukenari@cj.jp.nec.com, t-nakao@bp.jp.nec.com

あらまし マルチホップ無線ネットワークで利用可能な帯域(可用帯域)が低下した場合、ネットワーク輻輳が発生し、通信品質劣化(伝送データの遅延やパケット損失率の増大)を招く。このような劣化を回避するには、End-to-End経路の可用帯域をリアルタイム計測し、輻輳状態を定量的に把握する可用帯域計測方式が重要である。従来の可用帯域計測方式は、計測時間が長くなるだけでなく、プローブトラフィックによりネットワーク負荷が大きくなる問題があった。さらに、ネットワークの可用帯域が短周期で変動する環境では、計測時間が長い計測偏差が大きくなる問題があった。マルチホップ無線ネットワークにおいて、高速、低ネットワーク負荷で可用帯域を計測するために、プローブ送出先の切替え制御を用いた可用帯域計測方式を開発した。提案方式は、ネットワークを部分区間(パス)に分割し、送信ノードがプローブ送出先を順次切替えることで、各パスにおけるプローブ往復時間を測定する。複数のパスについて測定したプローブ往復時間を比較し、可用帯域に該当する無線リンクを絞り込み探索する。実機評価の結果、提案方式は、従来方式と比較して、計測時間を94%短縮でき、プローブトラフィックを89%削減できた。さらに、計測時間を短縮できた結果、クロストラフィックが従来方式の計測時間よりも短周期で変動する環境において、計測偏差を79%低減できた。

キーワード 可用帯域, アクティブ計測, プローブ送出先切替え制御, プローブ往復時間

The Fast Available Bandwidth Measurement in wireless multi-hop network based on the switching control of probing-destination

Teruki SUKENARI Toshiyasu NAKAO

NEC Service Platform Research Laboratories 8916-47 Takayama-Cho, Ikoma, Nara, 630-0101 Japan

E-mail: t-sukenari@cj.jp.nec.com, t-nakao@bp.jp.nec.com

Abstract The degradation of available bandwidth along wireless multi-hop network leads to the network congestion, and causes the deteriorations in streaming quality (the increasing delay, packet loss). The Network Measurement Methodology for detecting congestion quantitatively, such as available bandwidth measurement considering real-time property, is of major importance in avoiding the deteriorations. Problems with existing common methods are that measurement-time gets longer, and congestion is also invoked by probe-traffic. In addition, in case that available bandwidth changes in short period, measurement deviation deteriorates because of long measurement-time. We propose the method for available bandwidth measurement in high-speed and low-load using the switching control of probing-destination in wireless multi-hop network, and evaluate performance. Our method divides network into sub-interval(called PATH), and monitors probe's Round-Trip-Time(RTT) over each PATH with sequentially switching probing-destination. By comparing probe RTT monitored over different PATH, our method detects the PATH including the wireless link of available bandwidth. As an experimental result, we confirmed that the measurement-time is shortened by 94%, and probe-traffic is reduced by 89% compared to the existing common method. Moreover, in case that available bandwidth changes in shorter period than the measurement-time of the existing common method, our method improves measurement deviation by 79%.

Keyword Available bandwidth, Active measurement, The switching control of probing-destination, Round-Trip-Time

1. 概論

我々は、映像ストリームをマルチホップ無線送信する「カメラセンサネットワーク」の研究開発に取り組んでいる。マルチホップ無線ネットワークで利用可能

な帯域(可用帯域)が低下した場合、ネットワーク輻輳が発生し、通信品質劣化(伝送データの遅延やパケット損失率の増大)を招く。このような劣化を回避するには、End-to-End経路の可用帯域をリアルタイム計測し、輻

輻状態を定量的に把握する可用帯域計測方式が重要である。

従来の可用帯域計測方式(Pathload[1], pathChirp[2])は、高レートのプローブ(可用帯域計測で使用するパケット列)をネットワークに複数回送するため計測時間が長くなるだけではなく、プローブトラヒックによりネットワーク負荷が大きくなる問題があった。さらに、ネットワークの可用帯域が短周期で変動する環境では、計測時間が長い計測偏差(可用帯域計測値の可用帯域理論値に対する偏差)が大きくなる問題があった。

Pathload では、パケット送出間隔を調整しながらプローブを複数回送する。そして、パケットの送出間隔と到着間隔の差が所定の誤差範囲内に収束した際のプローブレートと可用帯域の真値の差が大きい場合、収束までに時間を要し計測時間が長くなる。さらに、パケットの送出間隔と到着間隔の差を利用するため高レートのプローブを送出する必要があり、プローブトラヒックの影響でネットワーク負荷が高くなる。pathChirp では、異なる送出間隔でパケットを配置したプローブを送出することでプローブの送出回数を減らし、Pathload と比較して計測時間を短縮している。しかし、高レートのプローブを利用するため、Pathload と同様にネットワーク負荷は高くなる。

我々は、マルチホップ無線ネットワークにおいて、高速(計測時間が短い)、低ネットワーク負荷(プローブトラヒックが小さい)で可用帯域を計測するために、プローブ送出先の切替え制御を用いた可用帯域計測方式を開発し、実機評価した。提案方式は、ネットワークを部分区間(パス)に分割し、送信ノードがプローブ送出先を順次切替えることで、各パスにおけるプローブ往復時間を測定する。そして、複数のパスについて測定したプローブ往復時間を比較し、可用帯域に該当する無線リンク(可用帯域リンク)を含むパスを絞り込み探索する。その結果、可用帯域と可用帯域リンクの位置を特定できる。従来の Pathload, pathChirp との違いは、プローブの送出回数を減らせることと、低レートのプローブで可用帯域計測が可能となる点である。

2. 提案する可用帯域計測方式

マルチホップ無線ネットワークの可用帯域を、プローブ往復時間を用いてモデリングする。そして、送信ノードがプローブ送出先を順次切替えて測定するプローブ往復時間に基づき、可用帯域を計測する方法を説明する。

2.1. 可用帯域のモデリング

マルチホップ無線ネットワークの可用帯域を、待ち行列理論で定式化した送受信ノード間のプローブ往復

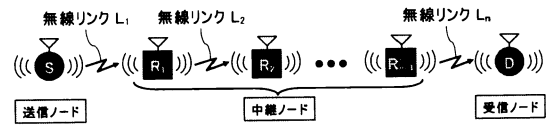


図 1: マルチホップ無線ネットワークの構成

時間を用いてモデリングする。

マルチホップ無線ネットワークは、送信ノード S, パケットを中継する $n-1$ 台の中継ノード R および受信ノード D から構成される(図 1). 可用帯域 A は、マルチホップ無線ネットワークを構成する無線リンク L_i ($i=1,2,\dots,n$) で利用可能な帯域(余剰帯域) E_i の内最小の余剰帯域で与えられる(式(1)). 送受信ノード間のパケット往復時間 T_{S-D} は、無線リンク L_i で 1 パケットを送信するのに要するリンク遅延 D_i を、全無線リンクの往復にわたり合計した値となる(式(2)).

$$A = \min\{E_i \mid i=1,2,\dots,n\} \quad (1)$$

$$T_{S-D} = 2 \sum_i D_i \quad (2)$$

リンク遅延 D_i は、ノード処理遅延 d_{pi} , キューイング遅延 d_{qi} , シリアル化遅延 d_{si} および伝播遅延 d_{ri} に分解できる[3]. 提案方式では、キューイング遅延を、ノード内部キューへのパケット到着確率がポアソン分布に従うと仮定して、待ち行列 M/M/1 モデルで定式化する。送信側ノードが送信するパケット(サイズ p)は、受信側ノードの内部キューにランダムバックオフ時間毎にキューイングされる。ランダムバックオフ時間に応じて決定されるパケット到着確率がポアソン分布に従うと仮定すると、キューイング遅延は式(3)となる[4]. 但し、無線リンク L_i のリンク速度を c_i , 隣接ノード通信で発生するクロストラヒックを v_i , パケットに付加される MAC ヘッダサイズを p_m とする。シリアル化遅延は、パケットのサイズおよびリンク速度を用いて式(4)となる。そして、ノード処理遅延および伝播遅延は一定と仮定し、ノード処理遅延および伝播遅延の合計値を d_c とする(式(5)). したがって、マルチホップ無線ネットワークの無線リンク L_i 間のパケット往復時間は、式(2)(3)(4)(5)を用いて、式(6)となる。

$$d_{qi} = \frac{v_i(p + p_m)}{c_i(c_i - v_i)} \quad (3)$$

$$d_{si} = \frac{p + p_m}{c_i} \quad (4)$$

$$d_{pi} + d_{ri} = d_c \quad (5)$$

$$T_{S-D} = 2 \sum_i \left\{ \frac{p + p_m}{c_i - v_i} + d_c \right\} \quad (6)$$

無線リンク L_i の余剰帯域 E_i は、無線リンク L_i のリンク速度 (c_i) からクロストラフィック (v_i) を減じた値 ($E_i = c_i - v_i$) である。よって、マルチホップ無線ネットワークの可用帯域は、式(7)でモデリングできる。

$$A = \min\{E_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

$$\text{Subject to } T_{S-D} = 2 \sum_i \left\{ \frac{p + p_m}{E_i} + d_c \right\}$$

2.2. 計測方式

提案方式では、最小の余剰帯域を求めるために、マルチホップ無線ネットワークを複数のパスに分割し、各パスのプロープ往復時間を測定する。その後、各パスのプロープ往復時間を比較し、可用帯域リンクを含むパス(可用帯域パス)を絞り込み探索する。その結果、可用帯域および可用帯域リンクの位置を特定できる。

2.2.1. ネットワークの分割パターン

4つの無線リンクで構成されるマルチホップ無線ネットワークを例として説明する。4つの無線リンクで構成されるマルチホップ無線ネットワークの場合、2つの分割パターン1, 2を考える(図2)。分割パターン1は、マルチホップ無線ネットワークを、送信ノード側パス(P_{S-R2})と受信ノード側パス(P_{R2-D})に同数の無線リンクが含まれるよう2等分割する。さらに、分割パターン2は、分割パターン1の P_{S-R2} および P_{R2-D} を、さらに2等分割し、生成したパス(P_{S-R1} , P_{R1-R2} , P_{R2-R3} , P_{R3-D})に唯一の無線リンクが含まれるようにする。マルチホップ無線ネットワークに含まれる無線リンク数が増加した場合でも、分割数が最も多い分割パターン中のパスに唯一の無線リンクが含まれるまで2等分割を繰り返す。但し、奇数個の無線リンクで構成されるマルチホップ無線ネットワークでは、2等分割によりパス生成できないため、パスに含まれる無線リンク数が不均一な分割パターンが存在しても良い。

2.2.2. プロープ往復時間の測定方法

送信ノードは、分割パターン毎に生成した各パス上の受信ノード側端点に存在するノードにプロープを送出し、各パスのプロープ往復時間を算出する。提案方式で使用するプロープは、複数のプロープ packets を内部に含むトレインから構成される(図3)。トレインには、 u 個のプロープ packets を配置する。さらに、プロープには、時間間隔 Δt で w 個のトレインを配置する。但し、トレイン中の各プロープ packets 間に時間間隔は設けない。プロープ往復時間は、送信ノードがトレインを送信開始して、受信ノードが返信したトレインを受信完了するまでの時間を、プロープ中の全トレインについて平均した値とする。

提案方式で使用するプロープをトレイン単位で構

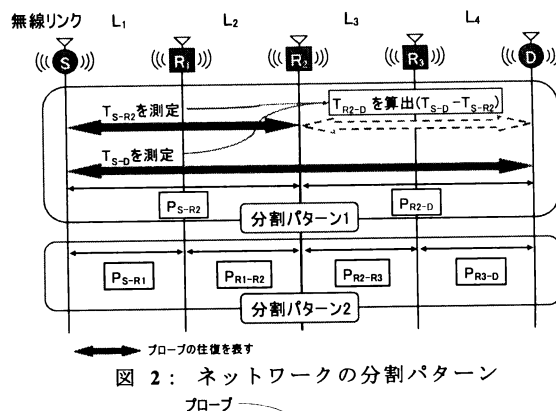


図2: ネットワークの分割パターン

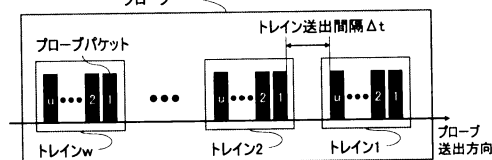


図3: プロープの構成

成した理由は、可用帯域パスの特定精度を向上するために、可用帯域パス特定処理においてトレイン単位で測定するプロープ往復時間に加え、トレイン中のプロープ packets 単位で測定する packets 到着間隔を併用するからである。

分割パターン1の P_{R2-D} を例にして、プロープ往復時間 T_{R2-D} の測定方法を説明する(図2)。 P_{S-D} , P_{S-R2} のプロープ往復時間 T_{S-D} , T_{S-R2} を測定するために、送信ノード S は受信ノード D, 中継ノード R_2 にプロープを送出する。その結果、 T_{S-D} から T_{S-R2} を減算することで、プロープ往復時間 T_{R2-D} を測定できる ($T_{R2-D} = T_{S-D} - T_{S-R2}$)。

2.2.3. 可用帯域の計測方法

送信ノードは、分割パターン各パスのプロープ往復時間を比較し、可用帯域無線リンクを含むパスを絞り込み探索する。探索中に可用帯域無線リンクが存在しないと判断したパスに対してはプロープを送出しないため、プロープ送出回数を低減できる。

送信ノード S は、中継ノード R_2 および受信ノード D に第1のプロープを送出し、プロープ往復時間 T_{S-R2} , T_{S-D} を測定する(分割パターン1)。プロープ往復時間は、各パスに含まれる無線リンクの余剰帯域逆数の合計値である(式(7))。その後、プロープ往復時間 T_{S-R2} , $T_{R2-D} (= T_{S-D} - T_{S-R2})$ を、各パスに含まれる無線リンク数で除算し、無線リンク1つ当りの平均リンク遅延 $D_{aS-R2} = T_{S-R2}/4$ および $D_{aR2-D} = T_{R2-D}/4$ を算出する。そして、平均リンク遅延 D_{aS-R2} , D_{aR2-D} を比較し、平均リンク遅延が大きいパスに可用帯域リンクが含まれると判断する。

次に、可用帯域リンクが含まれる可用帯域パス(本説

明では P_{S-R_2} とする)についても同様に、平均リンク遅延を計算する。つまり、送信ノード S は、中継ノード R_1 および中継ノード R_2 に第 2 のプローブ送出し、プローブ往復時間 T_{S-R_1} 、 T_{S-R_2} を測定する(分割パターン 2)。そして、測定したプローブ往復時間に基づき、平均リンク遅延 $D_{aS-R_1}=T_{S-R_1}/2$ および $D_{aR_1-R_2}=T_{R_1-R_2}/2$ を算出する。その結果、算出したリンク遅延を比較し、リンク遅延の大きい無線リンク ($\max(D_{aS-R_1}, D_{aR_1-R_2})$) が可用帯域リンクと判断し、可用帯域を算出する(式(8))。

$$A = \frac{p + p_m}{\max\{D_{aS-R_1}, D_{aR_1-R_2}\} - d_c} \quad (8)$$

提案方式では、第 1 のプローブ送出の結果、 P_{R_2-D} には可用帯域リンクが含まれないと判断する。このため、第 2 のプローブ送出では、 $P_{R_2-R_3}$ 、 P_{R_3-D} のプローブ往復時間を測定するためのプローブ送出を回避でき、プローブ送出回数を削減できる。

2.2.4. パケット到着間隔による可用帯域パス特定方法

分割パターンのパスに含まれる無線リンク数が増加した場合、平均リンク遅延を指標にして可用帯域パスを特定できない場合がある。このため、提案方式では、トレイン中のプローブパケット間の到着間隔を併用して、可用帯域パスの特定精度を向上している。

無線リンク n 個で構成されるマルチホップ無線ネットワーク(可用帯域リンクを L_1 とする)を用いて、可用帯域パスを特定できないケースを説明する。 P_{S-R_m} に含まれる無線リンク $L_2, \dots, L_m(1 < m < n)$ のリンク遅延総和が、パス P_{R_m-D} の無線リンク L_{m+1}, \dots, L_n のリンク遅延総和よりも十分に小さい場合、平均リンク遅延が $D_{aS-R_m} < D_{aR_m-D}$ となる。その結果、送信ノードは P_{R_m-D} が可用帯域パスと判断するため、可用帯域リンク L_1 を特定できない。

このため、提案方式では、可用帯域パスの特定精度を向上するため、トレイン中のプローブパケット間の到着間隔を測定する。プローブパケット到着間隔は、可用帯域リンク以降の無線リンクでは拡大しない性質 [5] を用いて特定精度を向上する。

送信ノードが、トレイン中の各プローブパケットの送出間隔を十分小さくして、連続的に送出する。次に、送信ノードは、受信ノードが返信したプローブパケットの到着間隔 $\Delta\lambda$ を測定する。到着間隔 $\Delta\lambda$ は、可用帯域リンクで発生しているクロストラヒックおよびリンク速度から一意に決定される。つまり、可用帯域リンクをプローブパケット 2 つが連続して通過した結果、2 つのパケットの間隔が $\Delta\lambda$ となり、さらに可用帯域無線リンク以降ではパケット間隔が拡大しない性質がある。本性質を利用すると、中継ノード R_m および受信ノ

ード D へのプローブ送出で得られる到着間隔 $\Delta\lambda_{S-R_m}$ および $\Delta\lambda_{S-D}$ に基づき、可用帯域パスを特定できる。つまり、 $\Delta\lambda_{S-R_m} = \Delta\lambda_{S-D}$ の場合、可用帯域パスが P_{S-R_m} と判断する。一方、 $\Delta\lambda_{S-R_m} < \Delta\lambda_{S-D}$ の場合、可用帯域パスが P_{R_m-D} と判断する。

3. 実機評価

可用帯域を調整可能なマルチホップ無線ネットワーク実験環境において、提案方式および従来方式(Pathload)を実行する。(1) 可用帯域の計測時間、(2) 計測に要するプローブトラヒック、(3) 可用帯域の計測偏差の測定結果を示す。

3.1. 実験環境

提案方式を実装したマルチホップ無線ネットワーク実験環境を図 4 に示す。送信ノード S 、中継ノード R_1, R_2, R_3 および受信ノード D を用いてマルチホップ無線ネットワークを構成する。さらに、クロストラヒック送信ノード C_S およびクロストラヒック受信ノード C_D を用いて、無線リンク L_C を構成する。無線リンク L_3 および L_C は、無線リンク L_1, L_2 および L_4 と周波数独立である(表 1)。このため、クロストラヒック送信ノード C_S からクロストラヒック受信ノード C_D に単位時間当りに伝送するデータ量(クロストラヒック)を調整することで、無線リンク L_1, L_2 および L_4 の余剰帯域に影響を与えずに、無線リンク L_3 の余剰帯域だけを調整できる。

3.2. 実験方法

本実験では、無線リンク L_3 が可用帯域リンクとなるようクロストラヒックを調整する。提案方式の動作フローを説明する。送信ノード S は、マルチホップ無線ネットワークを、図 2 に示す分割パターン 1, 2 に従っ

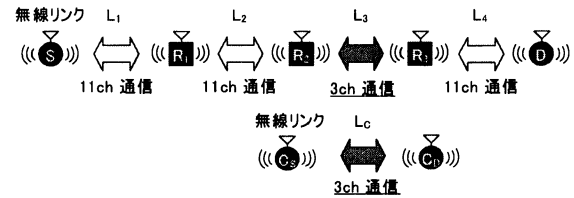



図 4: マルチホップ無線ネットワーク実験環境

表 1: 実験環境の諸元一覧

ノードの概観		ノードの仕様	
		プロセッサ	Intel XScale 400MHz
		メモリ	64MB SDRAM
		無線通信	IEEE802.11b
周波数バンド		リンク速度の測定値	
無線リンク L_1, L_2, L_4	11チャンネル 2.452-2.472[GHz]	無線リンク L_1	5455.7 [kbps]
		無線リンク L_2	5263.0 [kbps]
無線リンク L_3, L_C	3チャンネル 2.412-2.432[GHz]	無線リンク L_3	5233.4 [kbps]
		無線リンク L_4	5129.2 [kbps]

てパス分割する。その後、分割パターン1の中継ノード R_2 および受信ノード D にプローブ送出し(第1送出期間), 可用帯域リンクを含む可用帯域パス R_{R_2-D} を特定する(第1探索期間)。さらに, 可用帯域パス P_{R_2-D} を構成する中継ノード R_3 および受信ノード D にプローブ送出し(第2送出期間), 可用帯域リンクを特定し, 可用帯域を算出する(第2探索期間)。

(1) 可用帯域の計測時間

送信ノード S の第1送出期間, 第1探索期間および第2送出期間, 第2探索期間の総時間とする。

(2) 計測に要するプローブトラフィック

第1送出期間または第2送出期間において, 単位時間当りにマルチホップ無線ネットワーク上の全ノードが送信または中継したプローブパケットの総サイズとする。

(3) 可用帯域の計測偏差

第2探索期間で算出した可用帯域計測値と可用帯域理論値の偏差とする。但し, 可用帯域理論値は, リンク速度(表1)から, クロストラフィックを減じた値とする。

3.3. 実験結果

プローブ構成およびクロストラフィックを変更しながら測定した(1) 可用帯域の計測時間, (2) 計測に要するプローブトラフィックの実験結果を示す。さらに, クロストラフィックが短周期で変動する環境で測定した

(3) 可用帯域の計測偏差の実験結果を示す。

3.3.1. 可用帯域の計測時間

提案方式および Pathload の計測時間の測定結果を図5に示す。提案方式では, 3種類のプローブを使用する。パケットサイズを $p=1000[\text{Byte}]$ に固定する。そして, トレインサイズが 8000, 5000, 2000[Byte]になるように, トレイン中パケット数($u=8, 5, 2$)を調整する。但し, トレイン数 $w=6$, トレイン送出間隔 $\Delta t=0.5[\text{sec}]$ は共通とする。クロストラフィックは, 1000, 3000, 5000[kbit/sec]の3種類を使用する。

提案方式では, トレインサイズおよびクロストラフィックに関係なく, 平均 5.20~5.49[sec]で1計測を完了した。一方, Pathload では, クロストラフィックの増大に応じて, 計測時間が増加する傾向を確認した。

3.3.2. 計測に要するプローブトラフィック

提案方式および Pathload のプローブトラフィックの測定結果を図6に示す。送信ノード S が, 可用帯域計測時間内に送受信したプローブパケットの総サイズを測定する。そして, プローブパケットの総サイズについて計測時間当りの平均値をプローブトラフィックとする。クロストラフィックは, 3000[kbit/sec]を使用した。

提案方式では, 最小のトレインサイズ 2000[Byte]を

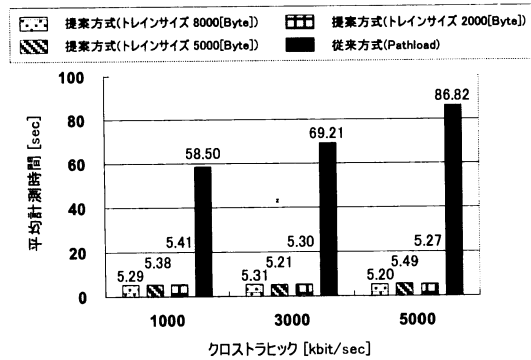


図 5: 計測時間の測定結果

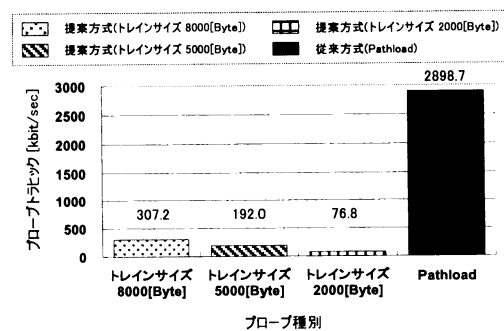


図 6: プローブトラフィックの測定結果

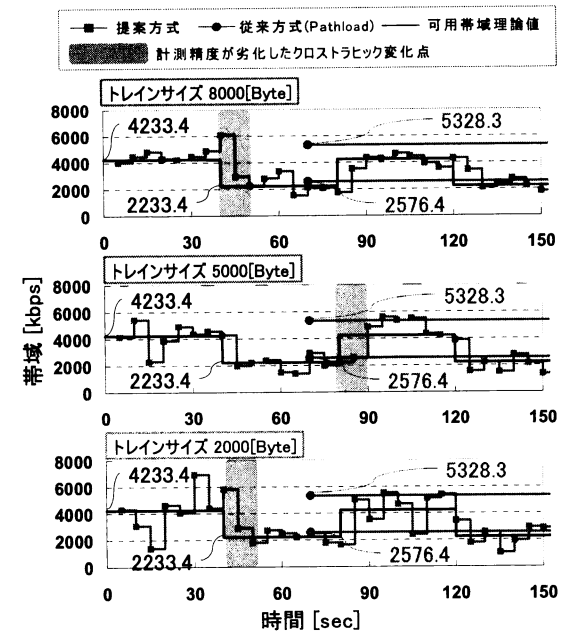


図 7: 計測偏差の測定結果

表 2: 計測偏差(平均, 最大, 最小)

	トレインサイズ 8000[Byte]	トレインサイズ 5000[Byte]	トレインサイズ 1000[Byte]	Pathload
平均偏差	362.7	882.9	946.3	1719.0
最大偏差	2048.4	1953.4	2789.4	3094.9
最小偏差	81.6	2.6	13.6	343.0

単位 [kbps]

使用したプローブで、プローブトラフィックが 38.4[kbit/sec]となった。さらに、最大のトレインサイズ 8000[Byte]を使用したプローブでは、プローブトラフィックは、153.6[kbit/sec]となった。一方、Pathload では、プローブトラフィックは 2898.7[kbit/sec]となった。

3.3.3. 可用帯域の計測偏差

提案方式および Pathload の可用帯域計測結果を図 7 に示す。プロット上のマーカー(提案方式は■, Pathload は●)を使用し、可用帯域計測結果を得た時間を示す。さらに、提案方式の計測偏差に関して、平均偏差、最大誤差、最小誤差を表 2 に示す。可用帯域計測を、Pathload の計測時間(図 5)と比較して、クロストラフィック 1000, 3000[kbit/sec]が短周期(40 秒)で変動する環境で実行する(可用帯域理論値は、それぞれ 4233.4, 2233.4[kbps]となる)。

提案方式では、トレインサイズ 8000[Byte]のプローブを使用した場合の平均偏差が 362.7[kbps]となり、3 種類のプローブ中で平均偏差が最小となった。さらに、クロストラフィックが 1000[kbit/sec]から 3000[kbit/sec]に変化するクロストラフィック変化点(図 7 の 40[sec]付近)では、可用帯域を過大計測し、最大誤差 2048.4[kbps]となった。一方、Pathload は、可用帯域の上限値および下限値を計測結果として出力する。このため、可用帯域の上限値 5328.3[kbps]、下限値 2576.4[kbps]という結果を得た。

3.4. 考察

提案方式は、Pathload と比較して計測時間を 94%短縮できた(表 3)。計測時間を短縮できた理由は、プローブ送出回数を減らせたからである。提案方式では、中継ノード R₂ および受信ノード D にプローブ送出する(第 1 送出期間)。その後、中継ノード R₃ および受信ノード D にプローブ送出する(第 2 送出期間)。各送出期間の 2 プローブは同時に送出するため、2 回のプローブ送出で可用帯域計測を完了できる。

提案方式は、Pathload と比較してプローブトラフィックを 89%削減できた(表 3)。プローブトラフィックを削減できた理由は、パケットを疎に配置したプローブを用いたからである。提案方式では、分割パターン上のパス毎で測定するプローブ往復時間を比較し、可用帯域を計測する。プローブ往復時間に基づき可用帯域計測するため、パケットを疎に配置したプローブを使用できる。

表 3: 提案方式と Pathload の性能比較

	改善率	提案方式	Pathload
計測時間	94%短縮	5.49[sec]	86.82[sec]
計測負荷	89%削減	プローブトラフィック 307.2[kbit/sec]	プローブトラフィック 2898.7[kbit/sec]
計測偏差	79%低減	平均偏差 362.7[kbps]	平均偏差 1719.0[kbps]

クロストラフィックが Pathload の計測時間よりも短周期で変動する環境において、提案方式では、Pathload と比較して計測偏差を 79%低減できた(表 3)。計測偏差を低減できた理由は、提案方式では可用帯域を短時間で計測できるため、計測時間中に測定するプローブ往復時間が、クロストラフィック変動の影響を受けないからである。

提案方式で、トレインサイズの増大に応じて計測偏差が改善するのは、プローブ往復時間のサンプル数が増加するため、クロストラフィックがプローブ往復時間に与える変動を精度高く測定できたためと考えられる。一方、クロストラフィック変化点の近傍では、クロストラフィック変化前に送出したプローブパケットのプローブ往復時間に基づき可用帯域を計測する。このため計測偏差が増大したと考えられる。

4. 結論

マルチホップ無線ネットワークにおいて、高速、低ネットワーク負荷で可用帯域を計測するために、プローブ送出先の切替え制御を用いた可用帯域計測方式を開発し、実機評価した。提案方式は、従来方式(Pathload)と比較して、計測時間を 94%短縮でき、プローブトラフィックを 89%削減できた。さらに、計測時間を短縮できた結果、クロストラフィックが Pathload の計測時間よりも短周期で変動する環境において、計測偏差を 79%低減できた。今後は、マルチホップ無線ネットワークの大規模化(ネットワーク数、無線リンク数の増加)が、計測時間、プローブトラフィックおよび計測偏差に与える影響を評価する。

謝辞 本研究は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業「半導体アプリケーションチッププロジェクト」の一環として支援を受けて行われたものです。

文 献

- [1] M. Jain, et al., "End-to-end available bandwidth: measurement methodology, dynamics, and relation with tcp throughput." *In Proc. ACM SIGCOMM*, 2002.
- [2] V. Ribeiro, et al., "Pathchirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths." *In Proc. PAM workshop*, 2003.
- [3] N. Bisnik, et al., "Queuing network models for delay analysis of multihop wireless ad hoc networks," *In Proc. ACM IWCMC*, pp.773-778, 2006.
- [4] J. Bolot, "Characterizing End-to-End Packet Delay and Loss in the Internet," *In Proc. ACM SIGCOMM*, pp.289-298, 1993.
- [5] 石井純ほか, "プローブ遅延時間の相関を利用したアクティブ計測による可用帯域推定手法の提案とその評価," 信学技報, pp.73-78, 2004.