

## [ポスター講演] ネットワーク機器の省電力動作を考慮した エンド間帯域計測手法の性能評価

小林 大翼<sup>†</sup> 長谷川 剛<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 大阪大学サイバーメディアセンター 〒 560-0043 豊中市待兼山町 1-32

E-mail: <sup>†</sup>{d-kobays,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年、ネットワークトラフィックの増加に伴うネットワーク機器の消費電力の増加が問題となっている。この問題に対して、ネットワーク負荷に応じてルータ処理性能やリンク速度の動的な変更を行うことにより、省電力を図る技術に関する研究が行われている。しかし、そのような省電力ルータがネットワーク内に存在すると、ネットワーク負荷に応じてエンド端末間パスの物理帯域が変動するため、従来提案されているエンド間利用可能帯域計測手法の計測精度が劣化すると考えられる。また、帯域計測のために発生するネットワーク負荷により、省電力ルータが十分に省電力効果を発揮できない可能性がある。本稿では、省電力ルータがネットワーク内に存在する環境におけるエンド間利用可能帯域計測手法の性能評価を行う。シミュレーション結果より、省電力ルータが存在する環境下では既存の利用可能帯域計測手法の計測精度が大きく低下することを示す。また、計測手法のパラメータを、省電力ルータに与える負荷を考慮して調整することにより、省電力ルータに影響を与えない計測が可能であることを示す。

キーワード 利用可能帯域, 帯域計測, 省電力, ルータ

## Evaluation of end-to-end bandwidth measurement method with power-saving routers

Daisuke KOBAYASHI<sup>†</sup>, Go HASEGAWA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University  
Yamadaoka 1.5, Suita-shi, Osaka 565-0871 Japan

<sup>††</sup> Cybermedia Center, Osaka University

Machikaneyama 1.32, Toyonaka-shi, Osaka 560-0043 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{d-kobays,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In recent years, the increase of energy consumption associated with network traffic explosion is becoming a major problem. For energy-efficient networking, some researchers focus on the technologies of dynamically changing router's processing performance and link bandwidth according to the network traffic load. However, if such power-saving routers exists on an end-to-end network path, the accuracy of existing measurement methods of end-to-end available bandwidth may degrade because of fluctuations of bandwidth and delay at a bottleneck link. Furthermore, the energy efficiency of power-saving routers also decreases due to additional traffic load by bandwidth probing. In this report, we evaluate the performance of Pathload, one of the popular end-to-end available bandwidth measurement methods, in the environment with power-saving routers. We also show the parameter settings of Pathload for not affecting the behavior of power-saving routers, while keeping the measurement accuracy.

**Key words** available bandwidth, bandwidth measurement, energy efficiency, router

## 1. はじめに

近年、ネットワーク上を流れるトラフィックの増加に伴うネットワーク機器の消費電力の増加が問題となっている。経済産業省の試算によると、国内のルータを含むネットワーク機器の総消費電力は、2006年度の約80億kWhから2025年度には約1033億kWhと、およそ13倍に増加すると指摘されている[1]。この問題に対して、様々な方法でネットワーク機器の省電力化に関する研究が行われており、その一つにルータの省電力化が挙げられる。ルータにおける省電力化の手法として、ルータを構成するハードウェアのスライス化を行うことで、負荷に応じてルータの処理能力やリンク速度を制御することによって省電力を図るものが提案されている[2]。また[3]では、トラフィック量に応じて、G-PONの物理帯域を1Gbps, 10Gbps, スリープ状態と切り替える事により省電力を図っている。他にも、トラフィック量に応じてイーサネットリンクのデータレートを切り替えて省電力を図る手法[4]やADSL2, ADSL2+の省電力手法[5]など、ネットワーク機器の省電力に関する様々な提案がなされている。

しかし、上述のようなリンクの物理帯域そのものをネットワーク負荷に応じて変化させるような機構がネットワーク内に存在する場合、リンクにおけるパケット処理遅延時間やキューイング遅延時間が物理帯域により変化するため、エンド端末間のRTTの変動を引き起こす。このような環境においては、RTTの変動やパケット廃棄の発生をネットワークの輻輳状態を表す指標として用いることが困難となり、近年提案されているTCP改良手法の性能が大きく劣化することが予測される。これらの環境においてネットワークの輻輳状態を適切に把握するためには、エンド端末におけるTCPコネクションの利用可能帯域を計測によって直接的に知ることが有用であると考えられる。

これまでに提案されているエンド間利用可能帯域計測手法としてはPathload[6]やImTCP[7]などが挙げられ、他にも数多くが提案されている[8–12]。しかし、従来提案されているエンド間利用可能帯域計測手法は、エンド端末間パスに含まれるリンクの物理帯域そのものが変化する環境を想定していない。また、Pathloadに代表されるSLoPS(Self-Loading Periodic Streams)型アルゴリズムを用いた利用可能帯域計測手法は、短い時間に高いレートで計測用パケットを送出するという特徴を持つため、計測トラフィックによるネットワーク負荷によって省電力ルータが省電力動作を解除し、結果として十分な省電力効果が得られない可能性がある。

そこで本稿においては、リンクの物理帯域を動的に変化させる省電力ルータがネットワークに存在する環境における、エンド間利用可能帯域計測手法Pathloadの性能評価を行い、利用可能帯域計測と省電力ルータが相互に及ぼす影響を明らかにする。また、Pathloadが省電力ルータに与えるトラフィック負荷を解析的に明らかにし、その結果に基づいて、計測手法のパラメータを調整することにより、省電力ルータに影響を与えない計測

が可能であることを示す。

以下、2章では本稿で対象とする省電力ルータの概要、およびネットワーク負荷に応じた物理帯域変更アルゴリズムについて説明する。3章では、ネットワーク中に省電力ルータが存在する環境におけるPathloadの性能評価をシミュレーションによって行い、解決すべき問題点を明らかにする。4章ではPathloadによる計測と省電力ルータの物理帯域の関係を示した上で、計測手法の改良方針を示す。最後に、5章で本稿のまとめと今後の課題を示す。

## 2. 省電力ルータアルゴリズム

本章では、トラフィック量に応じて接続されているリンクの物理帯域を段階的に増減させて省電力を図るルータ(以降、省電力ルータと称する)、およびその物理帯域変更アルゴリズムについて説明する。

本稿では、[13]で提案されているような、一定の時間間隔(数ミリ秒~数秒)毎にリンク利用率を観測し、その大きさに応じてリンクの物理帯域を増減させるような省電力ルータを対象とする。省電力を行わない時の物理帯域(省電力ルータのリンクの物理帯域の最大値)を $C_{max}$ とし、リンク利用率に応じて $N$ 段階に物理帯域を変動させるものとする。 $i$ 段階目の物理帯域 $C_i$ ( $i = 1, \dots, N$ )を以下のように定める。

$$C_i = \frac{i}{N} C_{max} \quad (1)$$

以降、リンク利用率の観測間隔によって区切られた時間をタイムスロットと呼び、その長さを $\tau$ とする。 $t$ 番目のタイムスロットにおける、リンクへのパケット到着量を $P(t)$ 、リンクの物理帯域を $C(t) = C_i$ とした時、タイムスロット $t$ におけるリンク利用率 $u(t)$ は以下のように表される。

$$u(t) = \frac{P(t)}{C(t)\tau} \quad (2)$$

タイムスロット $t$ における平均リンク利用率 $U(t)$ を、重み $w$ ( $0 \leq w \leq 1$ )の指数移動平均を用いて以下のように定義する。

$$U(t) = (1-w)U(t-1) + wu(t) \quad (3)$$

本稿における省電力ルータは、タイムスロット $t+1$ におけるリンクの物理帯域 $C(t+1)$ を、以下の式に基づいて決定するものとする。

$$C(t+1) = \begin{cases} C_{i+1} & \text{if } U(t) \geq \lambda_u \text{ and } i < N \\ C_{i-1} & \text{if } U(t) \leq \lambda_l \text{ and } i > 1 \\ C_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\lambda_u$ ,  $\lambda_l$ は、物理帯域を変更するか否かを判断するための、リンク利用率に関する閾値である。これは、タイムスロット $t$ での平均リンク利用率 $U(t)$ が閾値 $\lambda_u$ 以上になれば物理帯域を1段階増加させ、 $U(t)$ が閾値 $\lambda_l$ 以下になれば物理帯域を1段階減少させることを示している。

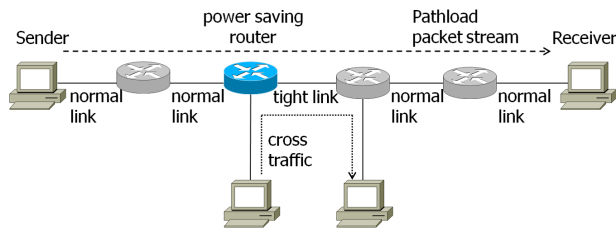


図 1 シミュレーションに用いたトポロジ

表 1 シミュレーションで用いた省電力ルータのパラメータ

パラメータ名	変数名	値
物理帯域の最大値	$C_{max}$	1000, 100, 10 [Mbps]
物理帯域の段階数	$N$	10
物理帯域を増加させる平均リンク利用率の閾値	$\lambda_u$	80 [%]
物理帯域を減少させる平均リンク利用率の閾値	$\lambda_l$	30 [%]
指数移動平均の重み	$w$	0.6
リンク利用率の観測間隔	$\tau$	1000, 100, 10 [ms]

表 2 シミュレーションで用いた Pathload のパラメータ

パラメータ名	値
パケットサイズ	1500 [bytes]
パケットストリームに含まれるパケット数	10
フリートに含まれるパケットストリーム数	3
利用可能帯域の推定精度	1 [Mbps]

### 3. 物理帯域が変動する環境における Pathload の性能評価

本章では、ns-2 [14] を用いたシミュレーションによって、ネットワーク内に 2 章で定義した省電力ルータが存在する環境において、Pathload による利用可能帯域計測の性能評価を行った結果を示す。シミュレーションにおいては、パス中の最も利用可能帯域が小さいリンク（以下タイトリンクと称する）に省電力ルータを配置し、Pathload による計測を行った時の省電力ルータへの影響および Pathload の計測精度に与える影響を評価する。

#### 3.1 シミュレーション設定

シミュレーションに用いたトポロジを図 1 に示す。省電力ルータがタイトリンクに接続されているとして、タイトリンク以外のリンクをノーマルリンクとして十分大きい物理帯域を設定し、利用可能帯域が最小となるリンクがシミュレーション中に変動しないようにする。また、クロストラヒックとして、タイトリンクを通過するトラヒックが存在するものとする。タイトリンクの非省電力時の最大物理帯域を  $C_{max}$  とし、ノーマルリンクの物理帯域は  $C_{max}$  の 2 倍とする。全てのリンクの伝搬遅延は 5 [ms] とする。クロストラヒックのレートは  $C_{max}$  の 10 [%] とした。このトポロジを用いて、送信端末と受信端末の間のパスの利用可能帯域を Pathload を用いて計測する。シミュレーションに用いた省電力ルータの設定を表 1 に、Pathload

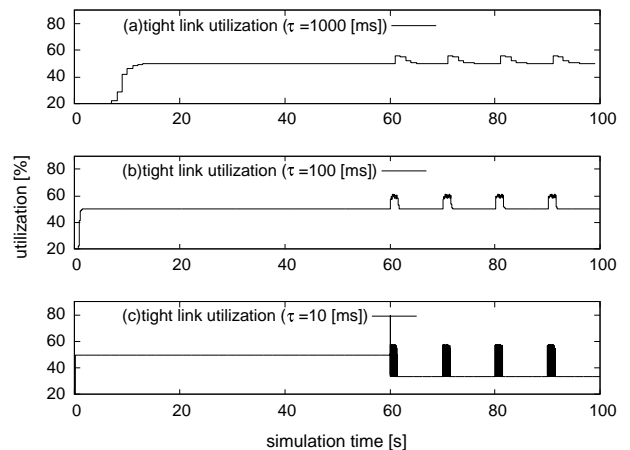


図 2 リンク利用率観測間隔を変化させた時の平均リンク利用率の変動

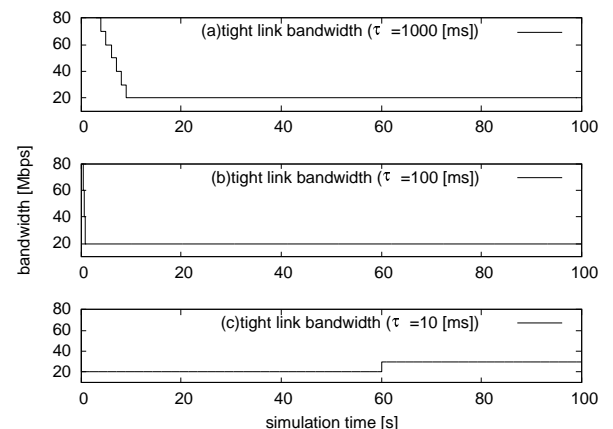


図 3 リンク利用率観測間隔を変化させた時の物理帯域の変動

に与えたパラメータを表 2 にそれぞれ示す。

以上の設定で、0 [s] から 100 [s] までシミュレーションを行う。0 [s] から 100 [s] までクロストラヒックを流し、Pathload は 60 [s] から 10 秒毎に 1 度計測を行う。省電力ルータの物理帯域の初期値は  $C_{max}$  とし、0 [s] から 60 [s] まではクロストラヒックのみを流すことで省電力ルータの動作を安定させ、十分長い時間の経過後に Pathload を用いた利用可能帯域計測を開始する。

#### 3.2 シミュレーション結果

まず最初に、 $C_{max} = 100$  [Mbps] とし、 $\tau$  を 1000 [ms], 100 [ms], 10 [ms] と変化させた時の省電力ルータの平均リンク利用率、物理帯域の変動を比較する。図 2, 3 にそれぞれ、シミュレーションの経過時間に対する平均リンク利用率及び物理帯域の変動を示す。

図 2 から、 $\tau$  の値に関わらず平均リンク利用率が 60 [s] までに 50 [%] に収束していることが分かる。これは、図 3 から分かる通り、省電力ルータがリンクの物理帯域を減少させた結果である。また、60 [s] に Pathload が利用可能帯域計測を開始すると、平均リンク利用率が一時的に上昇している事が分かる。具体的には、 $\tau$  が小さいほど平均リンク利用率が大きく上昇しており、特に、 $\tau = 10$  [ms] の場合は、リンク利用率が省電力ルータの物理帯域を上昇させる閾値を超過するため、図 3(c) か

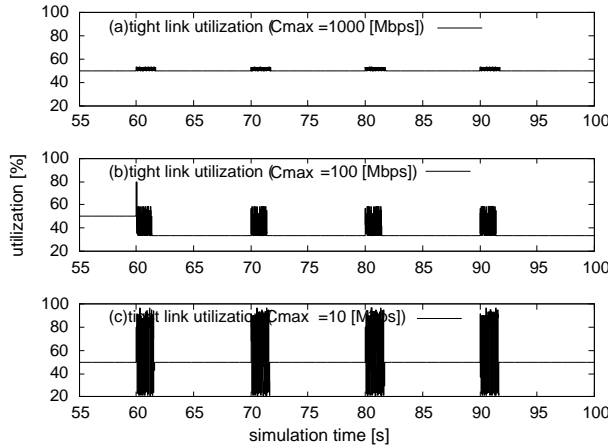


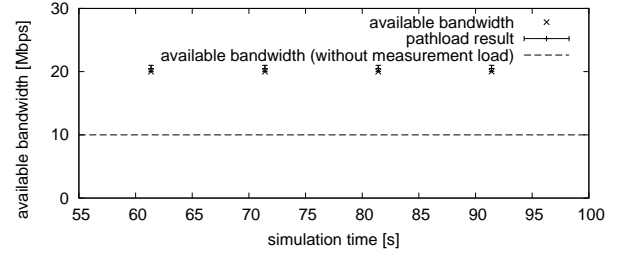
図 4 物理帯域の最大値を変化させた時の平均リンク利用率の変動

らも分かるように物理帯域を 1 段階増加させている．その為、60 [s] 以降のリンク利用率が他の場合よりも低く推移しているが、2 回目以降の計測においても平均リンク利用率の変動幅が他の場合よりも大きいことが分かる．

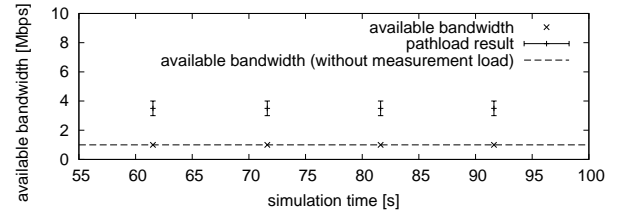
これらの現象は、Pathload など SLoPS 型アルゴリズムを用いた利用可能帯域計測手法が原因となって発生する．SLoPS 型の帯域計測においては、実際の利用可能帯域に近いレートで計測用パケット (パケットストリーム) を送出する．また、計測精度を保ちながら計測負荷を下げる目的で、一度に纏めて送出するパケットストリームに含まれるパケット数を制限したり、パケットストリーム送出間隔を十分に空けて送出する．そのため、 $\tau$  が大きい場合には、リンク利用率観測時間の一部の時間のみ計測トラフィックが通過するため、リンク利用率が大きく上昇する事はないが、 $\tau$  が小さい場合には、1 つの計測トラフィックが複数のリンク利用率観測区間にまたがって観測されるため、一時的にリンク利用率が大きく上昇する．

図 4 は、 $\tau = 10$  [ms] とし、 $C_{max}$  を 1000 [Mbps]、100 [Mbps]、10 [Mbps] と変化させた時のシミュレーションの経過時間に対する平均リンク利用率を示している．図 4(c) より、 $C_{max} = 10$  [Mbps] とした時に、Pathload が利用可能帯域の計測を開始する 60 [s] 以降において平均リンク利用率の変動が最も激しくなっている事が分かる．一方で、図 4(a) より、 $C_{max} = 1000$  [Mbps] とすると平均リンク利用率の変動幅は小さい．これは、Pathload はパケットストリームを実際の利用可能帯域に近いレートで送出すること、及び、パケットストリームに含まれるパケット数は送出レートにかかわらず一定であることから、リンクの利用可能帯域が大きいほど短い時間でパケットストリームが省電力ルータに到着する為であると考えられる．一方で、省電力ルータの利用可能帯域が大きい場合でも、省電力ルータのリンク利用率観測間隔を更に短くした場合には平均リンク利用率が上昇し、物理帯域の変動を引き起こす可能性がある．

最後に、省電力ルータが存在する環境における Pathload の計測精度の評価を行う．図 5(a)、5(b) に  $C_{max} = 100$  [Mbps]、10 [Mbps] の時の Pathload の計測結果をそれぞれ示す．また、

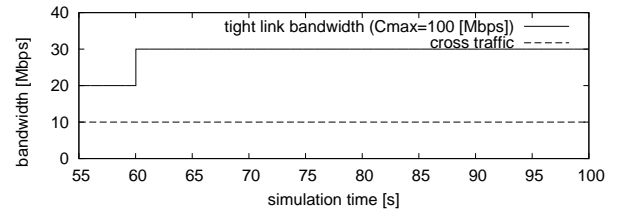


(a) 物理帯域の最大値 100 Mbps の時

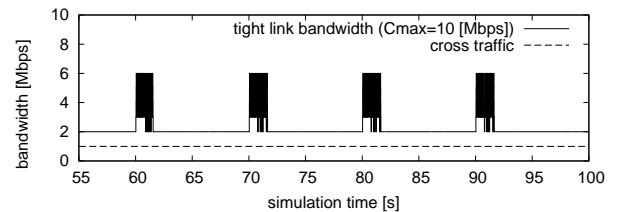


(b) 物理帯域の最大値 10 Mbps の時

図 5 物理帯域の最大値を変化させた時の Pathload の計測結果



(a) 物理帯域の最大値 100 Mbps の時



(b) 物理帯域の最大値 10 Mbps の時

図 6 物理帯域の最大値を変化させた時の省電力ルータの物理帯域の変動

その時の物理帯域の変動とクロストラフィックのレートをそれぞれ図 6(a)、6(b) に示す．図 5(a)、5(b) は Pathload の計測結果に加えて、計測中および計測前の利用可能帯域の値を示している．ここで、計測中の利用可能帯域は、計測パケットが省電力ルータを通過している際の物理帯域からクロストラフィックのレートを引いた値である．また、計測前の利用可能帯域は、PathLoad による計測が開始される直前の物理帯域からクロストラフィックのレートを引いた値である．Pathload は計測結果として利用可能帯域の推定範囲を出力するため、その範囲をエラーバーを用いてプロットしている．

図 5(a) より、 $C_{max} = 100$  [Mbps] の場合においては、Pathload の計測結果が計測中の利用可能帯域を含んでいる事が分かる．しかし、計測前の利用可能帯域からは大きく外れている．これは、図 6(a) に示すように、Pathload が計測を開始することによりリンク負荷が上昇し、省電力ルータが物理

帯域を増加させたためである。すなわち、この環境においては、Pathload は計測負荷によって増加した物理帯域における利用可能帯域を計測している。一方、図 5(b) より、 $C_{max} = 10$  [Mbps] の場合においては、Pathload の計測結果が計測中、および計測前の利用可能帯域から大きく外れている事が確認できる。これは、図 6(b) に示すように、Pathload による計測中に省電力ルータの物理帯域が増減を繰り返しており、Pathload のパケットストリームの通過中に物理帯域が変更されたためであると考えられる。これらの結果から、計測負荷によって省電力ルータが物理帯域を増加することは、省電力の観点で問題があるだけでなく、計測の精度低下の問題も引き起こすことが分かった。

また、省電力ルータのリンクの利用可能帯域として、省電力動作を行っていない時の最大の物理帯域を基準とした値と定義することも考えられる。この点については今後の課題とし、本章においては、Pathload の計測負荷によって省電力ルータがリンクの物理帯域を増加させることがないように利用可能帯域の計測を行うための条件について考察する。

#### 4. 省電力ルータの存在を考慮した Pathload のパラメータ調整

前章の評価結果から、Pathload の計測負荷が物理帯域の増加を引き起こし、利用可能帯域を正確に計測できない場合があることがわかった。本章では、Pathload の計測負荷によって省電力ルータがリンクの物理帯域を増加させないように Pathload のパラメータ設定を適切に行うための議論を行う。

##### 4.1 Pathload における SLoPS アルゴリズム

Pathload の計測アルゴリズムでは、複数のパケットで構成されるパケットストリームを一定のレートで複数個送出し、パケットの受信間隔に変化があるかどうかを調べて次のストリーム送出レートを調節する。この一定レートで送出されるパケットストリームの集合をフリートと呼ぶ。 $f$  ( $f = 1, \dots$ ) 回目のフリートに含まれるパケットストリームの送出レートを  $R(f)$  とすると、 $R(f)$  は  $R_{max}(f)$ ,  $R_{min}(f)$  を用いて以下の式で決定される。

$$R(f) = \frac{R_{max}(f) + R_{min}(f)}{2} \quad (5)$$

Pathload は (5) 式の  $R_{max}(f)$ ,  $R_{min}(f)$  をパケットストリームの観測結果に基づいて調節することにより次フリートの送出レートを調節する。 $R_{min}(f)$  の初期値は 0,  $R_{max}(f)$  の初期値は、[15] で述べられている決定方法に基づき決定する。 $R_{max}$  は、計測するパスの利用可能帯域のおおよその値が分かる場合は、その値よりも十分大きい値を設定する事が望ましいとされている。おおよその値が得られない場合には、パケットストリームを 1 [Mbps] より指数的に増加させて送出し、パケット送受信間隔に初めて遅延の増加傾向が見られた時の送出レートを  $R_{max}$  に設定する。

$R(f)$  が与えられると、パケットサイズ  $L$  を用いて、パケットストリームに含まれるパケットの送信間隔  $T(f)$  は以下のよ

うに決定される。

$$T(f) = \frac{L}{R(f)} \quad (6)$$

(6) 式とパケットストリームに含まれるパケット数  $K$  を用いて、パケットストリームの長さ  $V_S(f)$  は以下のように表される。

$$\begin{aligned} V_S(f) &= KT(f) \\ &= \frac{KL}{R(f)} \end{aligned} \quad (7)$$

4.2 省電力ルータに与える影響を考慮したパラメータ調整  
ここでは、省電力ルータが省電力動作中である状況を想定し、Pathload による利用可能帯域計測によって省電力ルータが物理帯域を引き上げないためのパラメータ調整方法について述べる。

(3), (4) 式により、省電力ルータが物理帯域を増加させないための条件は次のように表される。

$$\begin{aligned} U(t) &= (1-w)U(t-1) + wu(t) \\ &= w \sum_{k=1}^t (1-w)^{t-k} u(k) \\ &\leq \lambda_u \end{aligned} \quad (8)$$

タイムスロット  $t$  において省電力ルータがリンクの物理帯域を  $C(t)$  に制限していると仮定すると、タイムスロット  $t$  におけるリンク利用率  $u(t)$  は以下のように表される。

$$u(t) = \frac{P(t)}{C(t)\tau} \quad (9)$$

ここで、省電力ルータのリンクへのパケット到着量  $P(t)$  を、Pathload の計測用パケットストリーム量  $P^L(t)$  とクロストラヒック量  $P^C(t)$  に分ける。この時、 $P(t)$  は以下のように表される。

$$P(t) = P^L(t) + P^C(t) \quad (10)$$

(9), (10) 式により、平均リンク利用率  $U(t)$  は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} U(t) &= w \sum_{k=1}^t (1-w)^{t-k} u(k) \\ &= w \sum_{k=1}^t (1-w)^{t-k} \frac{P^L(k) + P^C(k)}{C(t)\tau} \\ &= w \sum_{k=1}^t (1-w)^{t-k} \frac{P^L(k)}{C(t)\tau} + \\ &\quad w \sum_{k=1}^t (1-w)^{t-k} \frac{P^C(k)}{C(t)\tau} \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式の第 1 項は Pathload の計測用パケットストリーム、第 2 項はクロストラヒックがそれぞれリンク利用率に寄与する部分である。クロストラヒックが一定のレート  $R^C$  で到着すると仮定した場合、(11) 式は以下のように変形できる。

$$U(t) = w \sum_{k=1}^t (1-w)^{t-k} \frac{P^L(k)}{C(t)\tau} + \frac{R^C}{C(t)} \quad (12)$$

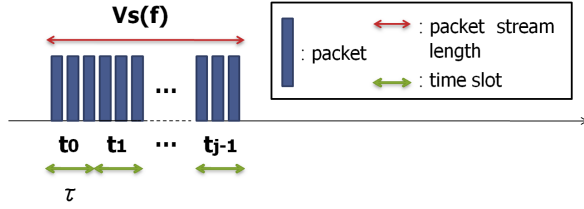


図 7 パケットストリームの長さと言用率観測間隔の関係

ここで、Pathload の計測がリンク利用率により大きな影響を与える場合として、 $\tau \leq V_s(f)$  の場合を考え、簡単のために  $j\tau = V_s(f)$  であるとする。ただし  $j$  は正の整数である。この場合のパケットストリームの長さと言用率観測間隔の関係を図 7 に示す。図 7 においては、タイムスロット  $t_0$  から  $t_{j-1}$  において、Pathload が送出するパケットストリームを観測している状況を示している。SLoPS 型アルゴリズムによる利用可能帯域計測においては、パケットストリームの送信レート  $R(f)$  は実際の利用可能帯域程度となる。したがって、図 7 のような場合においては、複数のリンク利用率観測間隔においてパケットストリームがリンクを通過するため、平均リンク利用率が大きく上昇すると考えられる。ここで、パケットストリーム間の間隔は十分大きく、タイムスロット  $t_0$  以前に送信されたパケットストリームが平均リンク利用率の計算に与える影響は十分小さいと仮定する。すると、(8) 式は以下のように表すことができる。

$$U(t_{j-1}) = w \sum_{k=0}^{j-1} (1-w)^{j-1-k} \frac{R(f)}{C(t)} + \frac{R^C}{C(t)} \leq \lambda_u \quad (13)$$

(13) 式のうち、Pathload のパラメータ調整によって制御が容易なのは  $j$  のみである。 $j$  の定義および (7) 式から、パケットストリームに含まれるパケット数  $K$  を変化させることにより、 $j$  の値を制御することができる。すなわち、(13) 式を満たすように  $K$  を調整することによって、計測時に省電力ルータがリンクの物理帯域を変更することを避けることができる。

今回議論したパラメータ調整方法は、 $\tau \leq V_s(f)$  の場合について有効であり、 $\tau > V_s(f)$  となる場合については考慮していない。しかし、3 章におけるシミュレーションでは、 $\tau$  が大きい場合は平均リンク利用率が大きく上昇する事は無かった。そのため、今回議論したパケット数のパラメータ調整のみでも十分な効果が得られると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、ネットワーク負荷に応じてリンクの物理帯域を変化させる省電力ルータがネットワーク中に存在する環境において、利用可能帯域計測と省電力ルータが相互に及ぼす影響をシミュレーションによる性能評価により示した。その結果、計測負荷によって省電力ルータが物理帯域を増加させた場合、省電力動作中の物理帯域を基準とした利用可能帯域を計測すること

が困難になることを示した。また、省電力ルータへの負荷を考慮した Pathload のパラメータ調整方法を示した。

今後の課題として、4 章で示したパラメータ調整を行った場合における Pathload の性能評価が挙げられる。また、省電力ルータが省電力動作を行っていない時の最大の物理帯域を基準とした利用可能帯域の計測を可能にする事が挙げられる。

## 謝 辞

本研究の一部は総務省地球温暖化対策 ICT イノベーション推進事業 (PREDICT) の助成を受けたものである。

## 文 献

- [1] 経済産業省, “グリーン IT イニシアティブ,” 2007. <http://www.meti.go.jp/press/20071207005/20071207005.html>
- [2] 岩本 久, 井上一成, 阿多信吾, “省電力化を実現するスライスルータアーキテクチャ,” 信学技報, vol.110, no.448, pp.129–134, 2011-3-3.
- [3] R. Kubo, J. Kani, Y. Fujimoto, and N. Yoshimoto, “Performance analysis of energy efficient 10G-PON with adaptive link-rate function,” IEICE technical report. Communication systems, vol.108, no.279, pp.53–58, Oct. 2008.
- [4] F. Blanchicet and K. Christensen, “An initial performance evaluation of rapid PHY selection (RPS) for energy efficient ethernet,” Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, pp.223–225, IEEE Computer Society, Oct. 2007.
- [5] G. Ginis, “Low-power modes for ADSL2 and ADSL2+,” White paper, Broadband Communications Group, Texas Instruments, Jan. 2005.
- [6] M. Jain and C. Dovrolis, “End-to-end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with tcp throughput,” Proceedings of ACM SIGCOMM, pp.295–308, July 2002.
- [7] C.L.T. Man, G. Hasegawa, and M. Murata, “Imtcp: Tcp with an inline measurement mechanism for available bandwidth,” Computer Communications Journal special issue of Monitoring and Measurements of IP Networks, pp.1614–1626, June 2006.
- [8] V.J. Ribeiro, R.H. Riedi, R.G. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, “pathChirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths,” Proceedings of Passive and Active Measurements (PAM) Workshop, pp.1–11, April 2003.
- [9] 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, pp.39–44, Oct. 2003.
- [10] R.L. Carter and M.E. Crovella, “Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks,” Technical report, Performance Evaluation, March 1996.
- [11] A. Downey, “Using pathchar to estimate Internet link characteristics,” Proceedings of ACM SIGCOMM, pp.241–250, Oct. 1999.
- [12] Pchar. available at <http://www.kitchenlab.org/www/bmah/Software/pchar/>.
- [13] 阿多信吾, 米崎加奈子, 岡 育生, “帯域追従型省電力ルータのためのトラフィック予測手法,” 信学技報, vol.111, no.43, pp.121–126, 2011-05-19.
- [14] The VINT Project, “Ucb/lbnl/vint network simulator - ns (version 2).” available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [15] M. Jain and C. Dovrolis, “Pathload: A measurement tool for End-to-End available bandwidth,” Proceedings of Passive and Active Measurements (PAM) Workshop, pp.14–25, March 2002.