

可変長 Chirp 方式によるインターネットの可用帯域の測定
Available Bandwidth Estimation Technique Using Chirp Packets of Variable Length

小関 翔斗 加藤 陽介 小原 仁

Shoto Koseki, Yosuke Kato, Hitoshi Obara

秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科

Department of Electrical and Electronic Engineering,
Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

E-mail: obara@ee.akita-u.ac.jp

キーワード：可用帯域，アクティブ測定法，プローブ，パケットトレイン

あらまし ネットワークの End-to-End 通信路における可用帯域を測定する方法として、プローブと呼ばれる試験用パケットをネットワーク内に送出し、プローブが被る品質からパスの状態を推定するアクティブ測定法がある。そして現在、様々な可用帯域のアクティブ測定方法が考案されている。既存の可用帯域測定技術に PathChirp 方式がある。PathChirp は送信プローブトレイン内のプローブ間隔を指数関数的に減少させることでトレイン内のプローブの速度を徐々に増加させる(Chirp)ようにプローブを送信する。そして、プローブの速度が可用帯域を越えたところでそのプローブに遅延が急増するという現象を利用し、遅延の立ち上がりのポイントを可用帯域と推定する。本稿では、その PathChirp 方式の方法論をベースとして、プローブの間隔とプローブ長を同時に変化させてプローブの速度をチャープさせる可変長 Chirp 方式を新たに提案する。また、シミュレーションによって提案方式と従来方式である PathChirp の性能の比較を行い、負荷が 50~90% の場合は従来方式と同等の推定誤差であったが、低負荷時に従来方式よりも推定誤差が大きくなるという結果を得た。

1. はじめに

近年、インターネットの急速な発展に伴い、高速かつ大容量の通信が行われるようになってきている。また、IP 電話や映像配信など通信サービス品質(Quality of Service, QoS)に敏感なアプリケーションも多く展開されている[1][2]。ここで、このようなアプリケーションの使用中にパケットが通信経路の途中で遅延や損失などを起こすと音ずれや映像データの消失といったエラーが生じ、アプリケーションを満足に使用することができなくなる。そこで、このような事態が起こらないようにネットワークを管理する QoS の保証が重要視されている。

ネットワークの End-to-End 通信路における可用帯域の測定法として、プローブと呼ばれる試験用パケットをネットワークに送出し、プローブが被る品質からネットワークの状態を推定するアクティブ測定法[3]がある。一般にアクティブ測定法は、送出プローブ量を増やせばそれだけ高い推定精度を得ることができるが、多量のプローブはネットワークへの余分な負荷と

なる。このように送出プローブ量と推定精度の間にはトレードオフの関係がある。可用帯域のアクティブ計測による測定は 2000 年ごろから世界的に研究が行われおり、現在アクティブ計測による様々な可用帯域の推定方法が考案されている。アクティブ計測はプローブの形態から、2 つのプローブで測定を行うパケットペア方式と、3 つ以上のプローブを 1 つのまとまりとして送信し測定を行うパケットトレイン方式の 2 つに大別される[2][4]。現在、可用帯域の推定には、パケットトレイン方式が主に用いられている。以下に従来の代表的な可用帯域の推定技術をいくつか紹介する。

Pathload[5]は 2002 年に M. Jain らによって提案された方式で、プローブトレインの被る OWD の増加傾向により二分探索法で次に送信するトレインの速度を決定し可用帯域の推定値を絞りこんでいくように決定する。推定精度は非常に優れているが、測定時間が長く、それに伴いネットワークにかかる負荷も他の推定方式と比較して大きい。

IGI(Initial Gap Increasing)[6]は 2003 年に N. Hu らによって提案された方式である。IGI はプローブト

レインの送信間隔を増加させながら複数送信し、送信間隔と受信間隔が等しくなった速度を可用帯域と推定する方式である。Pathloadと比較して軽負荷であるが精度の面で劣る。

PathChirp[7]は、2003年にVinay J. Ribeiroらによって提案された可用帯域推定方式である。PathChirpでは、トレイン内のプローブ間隔を指数関数的に減少させていき、これによってトレイン内のプローブ速度は増加していく。プローブの速度が可用帯域を越えたところから遅延が発生するという現象を利用し、この遅延の立ち上がりのプローブ速度を可用帯域と推定する。他のパケットトレイン方式と比較すると、突発的なクロストラヒックの変動などにより臨界点を誤る可能性が高いため、精度の面では劣るが、非常に軽負荷な推定を可能とする。1トレインのプローブ量はPathChirpの測定ツールのデフォルトの値で21600[bytes]である。

本研究では、上で述べたPathChirpの可用帯域推定の方法論をもとに、プローブの間隔とプローブ長を同時に変化させてプローブの速度をチャープさせる可変長Chirp方式を新たに提案する。また、シミュレーションによって提案方式と従来方式であるPathChirpの性能を比較する。

以下の2章では提案方式の可用帯域推定原理について述べる。3章では提案方式と従来方式のシミュレーションによる推定誤差の比較を行い、4章で本稿の結論をまとめる。

2. 提案方式の推定原理

本研究の提案方式と従来方式のPathChirp方式のプローブの転送方法の比較を図1に示す。PathChirp方式は、送信プローブの間隔のみを変化させて速度をチャープさせているのに対して、提案方式では、送信プローブ長とプローブ間隔を同時に変化させて速度をチャープさせる。これにより、従来方式よりも少ないプローブ量、測定時間で推定が可能と考えられる。

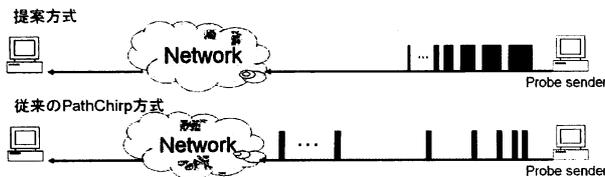


図1 提案方式と従来方式のプローブ転送法の比較

送信するプローブは従来方式との比較のため、従来方式と同じ速度変化をさせる。従来方式の発生プローブのパラメータを表1に示す。

表1 従来方式のプローブ発生のパラメータ

プローブ	プローブ長[bytes]	間隔[s]	速度[bps]	速度[bps]
1	1200	0.001848843	5,192,438	5M
2	1200	0.001540702	6,230,925	6M
3	1200	0.001283918	7,477,110	7M
4	1200	0.001069932	8,972,532	9M
5	1200	0.00089161	10,767,039	11M
6	1200	0.000743008	12,920,447	13M
7	1200	0.000619174	15,504,536	16M
8	1200	0.000515978	18,605,443	19M
9	1200	0.000429982	22,326,532	22M
10	1200	0.000358318	26,791,838	27M
11	1200	0.000298598	32,150,206	32M
12	1200	0.000248832	38,580,247	39M
13	1200	0.00020736	46,296,296	46M
14	1200	0.0001728	55,555,556	56M
15	1200	0.000144	66,666,667	67M
16	1200	0.00012	80,000,000	80M
17	1200	0.0001	96,000,000	96M
18	1200			

提案方式のプローブ長の変化はプローブ長の変化については、100~1500[bytes]の範囲で80[bytes]ずつ比例的に変化させる方法1と、500~1200[bytes]の範囲で40[bytes]ずつ比例的に変化させる方法2の2つの方法を採用する(表2)。

表2 プローブの発生方法

	変化範囲 [bytes]	変化方法
従来方式(pathchirp)	1200[bytes]	一定
方法1	100~1500	比例的
方法2	500~1200	

プローブ長の変化について2通りの変化範囲を採用しているが、

1. 従来方式のPathChirpにおいて、プローブ長が小さいものほど推定精度が悪くなるという報告があるため。
2. プローブ長が大きいほどプローブ量が多くなるため。

という2つの理由のために、プローブ長の変化範囲の違いで推定の精度に違いが出るのではないかと考えたからである。

また、プローブ長の変化方法は比例的な変化でなければならない。図2に無負荷時の提案方式のプローブ長の変化方法別の遅延特性を示す。

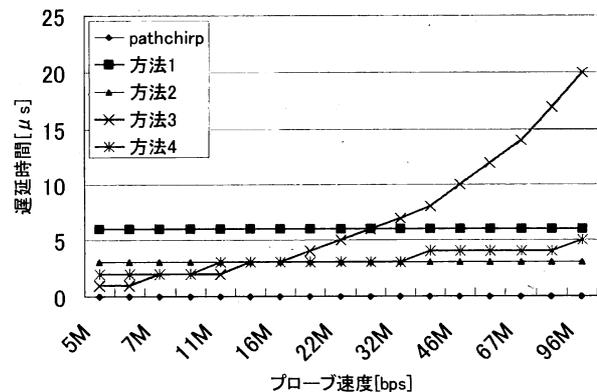


図2 プローブ長の変化方法別の遅延特性(無負荷時)

表3 方法1~4のプローブの発生方法

従来方式(pathchirp)	変化範囲 [bytes]	変化方法
	1200[bytes]一定	
方法1	100~1500	比例的
方法2	500~1200	
方法3	100~1500	指数関数的
方法4	500~1200	

図2の方法3,4はそれぞれ,プローブ長を100~1500[bytes]の範囲で指数関数的に変化させたものと,プローブ長を500~1200[bytes]の範囲で指数関数的に変化させたものである.表3に従来方式と方法1~4のプローブ発生方法を示す.

図2.2より,従来のPathChirp方式は遅延が発生していないのに対して,提案方式の方法1~4はクロストラヒック負荷が無いにもかかわらず遅延が発生しているのがわかる.これは,ルータの packets 転送方式がストア・アンド・フォワード方式であるためである.ストア・アンド・フォワード方式とは,送られてきた packets を一度ルータのバッファに格納(ストア)してから,誤り検出を行った後に後続の回線に送信(フォワード)するという方式で,

$$\text{遅延[s]} = \text{パケット長[bits]} / \text{ルータの出力回線速度 [bps]} \quad (1)$$

という遅延が発生する.この遅延は1つの packets をルータが処理する時間である.

プローブ長を指数関数的に変化させた方法3,4は,プローブの速度が大きくなるにしたがって遅延が段々に大きくなっていることがわかる.本提案方式は遅延の立ち上がり点を検出し可用帯域を推定する方法であるため,方法3,4のプローブの発生方法は推定に不向きである.一方プローブ長を比例的に変化させた方法1,2は前後のプローブのプローブ長の差が一定であるため,プローブの速度が大きくなっても遅延は一定である.このため方法1,2は遅延の立ち上がり点の検出は可能である.以上の理由からプローブ長の変化は比例的なものでなければならない.

図3,4にそれぞれ,従来のPathChirp方式と提案方式(方法1,2)のプローブ量の比較を表したものと,プローブの送信時間の比較を表したものを示す.ここでのプローブの送信時間とは,1トレインについて,最初のプローブを送信してから最後のプローブを送信し終わるまでの時間である.また,測定回線速度を100Mbpsとしている.なお,比較するPathChirpのプローブ長は1つ1200[bytes](測定ツールのデフォルト値)である.

図3より,プローブ量は方法1,2でそれぞれ従来方式に比べて2/3となり,プローブ量が約6.5k[bytes]

削減される.また,図4より,プローブの送信時間は方法1,2でそれぞれ従来方式に比べて2/5,3/5となり,約6.4m[s],4.5m[s]削減される.

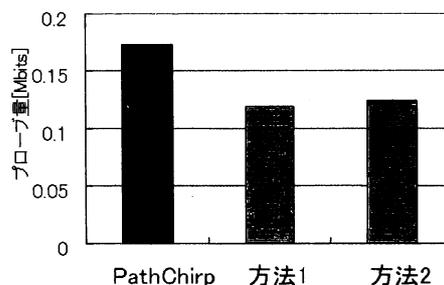


図3 従来方式と提案方式のプローブ量の比較

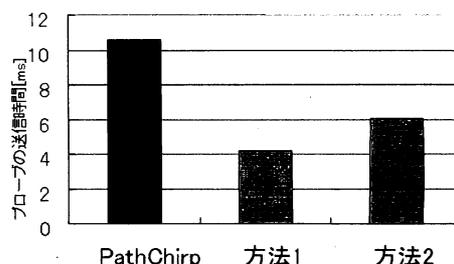


図4 従来方式と提案方式のプローブの送信時間の比較

3. 推定性能の比較

提案方式と従来方式の基本的な性能を比較するために,最も単純な1ホップリンクでの動作をシミュレーションによって評価した.図5にシミュレーションモデルを示す.モデルはプローブとクロストラヒックにそれぞれ送受信端があり,2つのルータには含まれたリンクを測定対象リンクとし,リンク速度は100Mbpsとする.ルータはスケジューリングをFIFO(First In First Out)とし,バッファサイズを無限大と仮定する.また,ルータの packets 転送方式をストア・アンド・フォワード方式とする.

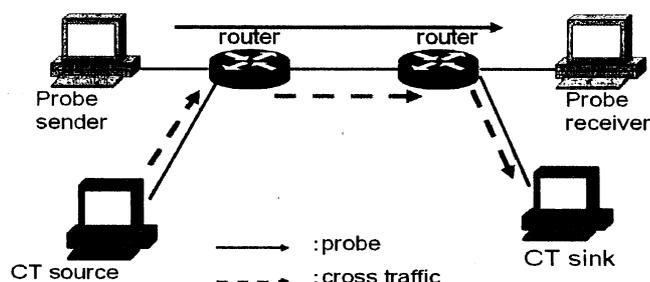


図5 シミュレーションモデル

クロストラヒックはCBR(Constant Bit Rate)とVBR(Variable Bit Rate)の2つの場合についてシミュレーションを行う.CBRは packets 長1000[bytes]の packets

トを一定の間隔で送信するものである。VBRはパケット長 100[bytes]と 1500[bytes]のものを指数分布に従った間隔で送信するものである。VBRは実際のネットワークのクロストラヒックを想定したものである。また、CBR, VBRともに負荷 10, 50, 90%の場合についてシミュレーションを行う。

プローブは提案方式は方法 1, 2 に従って送信する(第 2 章)。また、比較する従来の PathChirp 方式は図 2.3 より、プローブ量を提案方式と統一するために 1 プローブ長を 800[bytes]とする。プローブの個数は提案方式、従来方式ともに 18 個とする。可用帯域の推定は、トレインを 30 回送信しそれぞれ推定値を求め、その平均の値を可用帯域として推定するものとする。

以下の図 6~8 に CBR 負荷の場合の推定誤差の比較を示す。

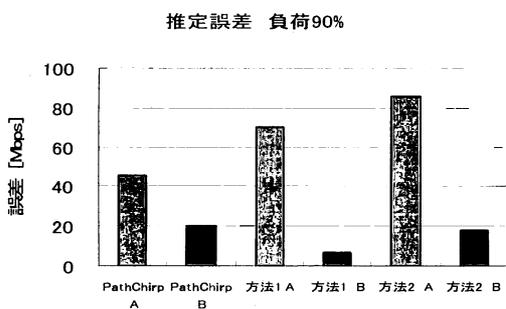


図 6 CBR 負荷 90%の推定誤差の比較

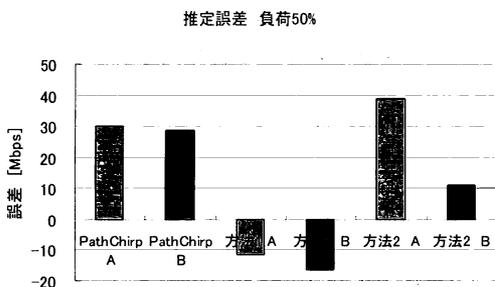


図 7 CBR 負荷 50%の推定誤差の比較

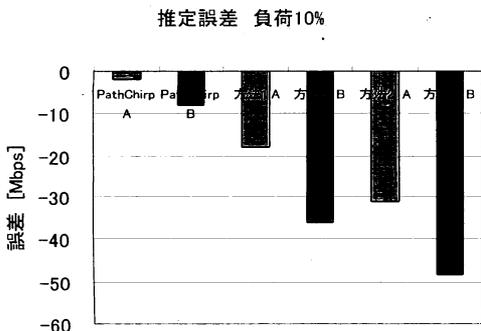


図 8 CBR 負荷 10%の推定誤差の比較

以下の図 9~11 に VBR 負荷の場合の推定誤差の比較を示す。

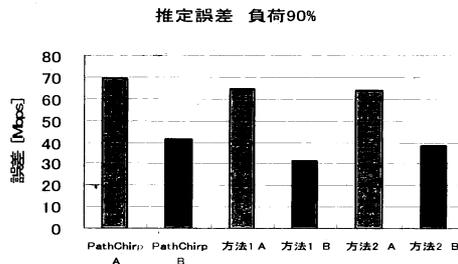


図 9 VBR 負荷 90%の推定誤差の比較

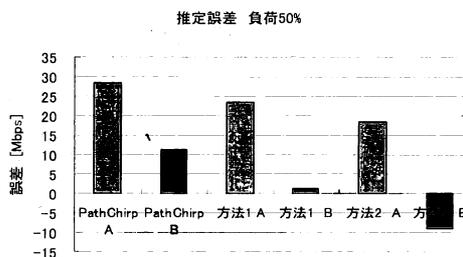


図 10 VBR 負荷 50%の推定誤差の比較

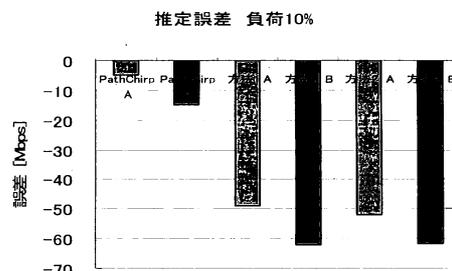


図 11 VBR 負荷 10%の推定誤差の比較

上の図の青いバー(A)は、遅延の立ち上がり点の検出計算の際に用いる値、閾値 L (busy period threshold) と減衰定数 F (decrease factor) を実際のネットワークにおける最適値 ($L=5, F=1.5$) に設定した場合で、赤いバー(B)は理論上の最適値 ($L=3, F=6$) に設定したものである。

CBR, VBR の場合ともに高負荷のときに $L=3, F=6$ の場合の方が $L=5, F=1.5$ の場合よりも誤差が小さいことがわかる。これは実際のネットワークではなくシミュレーションによる実験の結果であるから、理論上の最適値である $L=3, F=6$ の場合の方の誤差が小さくなるのだと考えられる。

また、負荷 90~50%のときの推定誤差は従来方式と同等の性能であると言えるが、負荷 10%のときの推定誤差が従来方式 3~4 倍になっている。この理由として以下の 2 つが考えられる。

可用帯域の推定値の計算過程でプローブの遅延が 0 以下であれば 0 とする行程がある。その行程において提案方式も同様に遅延が 0 以下の場合は 0 と補正していた。しかし第 2 章より、方法 1, 2 はストア・アンド・フォワード処理による転送遅延を 1 プローブごと一定に必ず被るため、無負荷の場合であっても遅延が 0 になることは無い(図 2)。

例えば提案方式による推定において、ある時間の負荷がほぼ 0% であるときに、先頭のプローブの遅延が 0 以下になったとすると、その遅延が 0 と補正されるため図 12 のような遅延特性となる。すると、実際の可用帯域が 100Mbps であるのに、遅延の立ち上がり点が 5Mbps に見えてしまい、誤った推定値(5Mbps)を可用帯域としてしまう。よって方法 1, 2 はそのプローブ長の変化に応じた一定遅延の分の補正が必要であると考えられる。

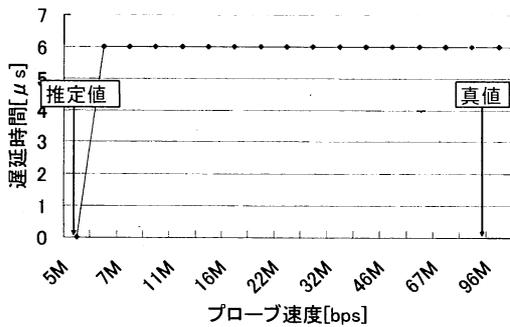


図 12 低負荷時の提案方式の遅延特性の例

しかし、実際のネットワークで推定を行う際にはホップ数は不明であるため、今後の課題として、チャープトレインを送信する前にホップ数やプローブがストア・アンド・フォワードによって被る遅延時間を調べるための別のプローブを送信するなどの対処が必要と考えられる。

2 つめの理由として、従来方式よりもチャープさせる時間が短くなったことにより、サンプリングが雑になってしまったのではないかと考えられる。図 13 に低負荷時のチャープトレインを視覚化した例を示す。

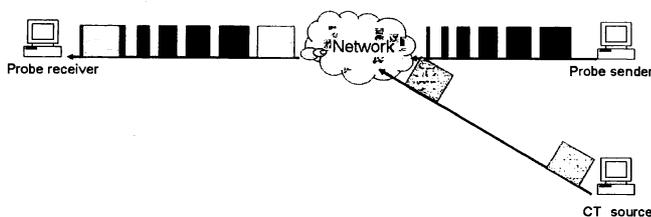


図 13 低負荷時の提案方式のチャープの様子

低負荷時のクロストラヒックの packets 間隔は大きいいため、速度の遅いプローブの間隔にクロストラヒック packets が入り込んだ後、次のクロストラヒック packets の到着がチャープトレインの最後のプローブよりも遅かった場合は、速度の速いプローブの間隔には packets が入り込まないということが起こってしまう。トレインの長さを調整し、最適なトレイン長を調べる必要がある。

4. まとめ

本稿では PathChirp の可用帯域推定の方法論をベースに、プローブ長とプローブ間隔を同時に変化させプローブの速度をチャープさせる可変長 Chirp 方式を提案した。プローブ長も変化させることで、従来方式よりもプローブ量と測定時間を削減させることが可能である。また本稿では提案方式と従来方式の推定誤差を比較するため、1 ホップモデルについてシミュレーションを行った。シミュレーションの結果から、提案方式は、負荷 50~90% の場合の推定誤差は従来方式と同等の性能である。しかし、負荷 10% のときの推定誤差が従来方式の 3~4 倍になることが判明した。この問題の原因の考察より、今後の課題を明らかにした。

文 献

- [1] 福田健介,長健次郎,江崎浩,加藤朗,国内ブロードバンドトラヒックの動向,気電子情報通信学会誌, Vol.93 No.4, pp.276-279, April,2010.
- [2] 長谷川和音,異速度パケットトレインを用いた通信路可用帯域のアクティブ測定方式に関する研究,秋田大学修士論文,2009.
- [3] 鶴正人,中村勝一,アクティブ計測によるネットワーク品質計測,電子情報通信学会誌, Vol.93 No.4, pp.298-303, April, 2010.
- [4] R.Prasad, C.Dovrolis, M.Murray, and K.Claffy. Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools. IEEE Network, pp.27-35, 2003
- [5] M.Jain and C.Dovrolis. Pathload: A Measurement Tool for End-to-end Available Bandwidth. In Proceedings of 3rd Passive and Active Measurements Workshop, March 2002.
- [6] N.Hu and P.Steenkiste. "Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no .6, pp. 879-894. Aug. 2003
- [7] V. Ribeiro, R. Riedi, R. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell. Pathchirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths. In Proc. PAM workshop, La Jolla, California, Apr. 2003.