

超高速ネットワークにおけるトラフィック測定分析技術

01110530	NTT サービスインテグレーション基盤研究所	川原亮一	KAWAHARA Ryoichi
	NTT サービスインテグレーション基盤研究所	森達哉	MORI Tatsuya
1006850	NTT サービスインテグレーション基盤研究所	阿部威郎	ABE Takeo

1 はじめに

近年、回線速度の高速化に対してスケラブルなトラフィック測定を可能とする技術としてパケットサンプリングが注目されている [1]。パケットサンプリングは、例えば N 個に 1 個のパケットを周期的に参照し、サンプルされたパケットのみを用いることにより、測定に必要とされる処理を軽減させる。本稿では、サンプルパケット情報からトラフィック制御・品質管理に有用な統計情報を推定する手法について、著者らのこれまでの検討結果を 2 つ紹介する。まず、回線帯域の占有率が大きいユーザを特定する手法 [2] について述べる。本手法は、そのようなユーザを迅速に切り分けて制御あるいは分離することを可能とする。次に、パケットサンプリングにより抽出されたユーザのみの挙動を把握して、元のユーザ全体の品質劣化を検出する方法 [3] について述べる。また、実測データ分析を通じて各方式の有効性を検証した結果についても報告する。

2 高トラフィックユーザフロー特定手法

2.1 エレファントフロー

本稿では、同一の (発信元 IP アドレス, 着信先 IP アドレス, 発信元ポート番号, 着信先ポート番号, プロトコル番号) を持つパケット群をユーザフロー (あるいは単にフロー) と定義する。このフローの定義に基づいて、フロー j のパケット数 X_j の分布を実測データから分析した結果を図 1 に示す。実測データとして、2.4Gbps 回線上で 10^7 個のパケットをキャプチャしたトレースを用いた (トラフィック量は平均約 500Mbps) [2]。これより、 X_j の分布はほぼべき乗の形で減衰し、裾野が重い性質を有することが分かる。様々なインターネット回線上において、このようなトラフィック特性を有することが報告されている。このデータにおいて、総フロー数は 737,780 であり、そのうち、 $X_j \geq 10^4$ であるフロー (エレファントフローと定義する) の数は 167 本であり、これらごくわずかなフローによるトラフィック量の総計は全体の 59.3% を占める。

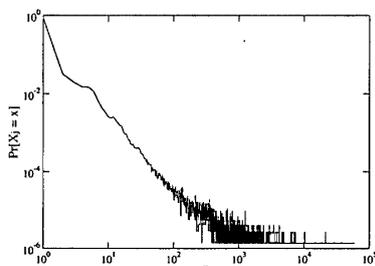


図 1 フロー当りのパケット数分布

2.2 エレファントフロー特定手法

サンプルパケットから帯域占有率の大きいフロー (エレファントフロー) を特定する手法を提案する。パケットサンプリングを行うと、少数パケットで構成される大多数のフローは無視されるが、エレファントフローはサンプルされる確率が高いことを利用する。ここでは、あ

るフローについてサンプルされたパケット数が \hat{y} 以上であるとき、エレファントフローと判定する方法を考える。このとき、サンプルされたフローがエレファントフローではない確率をある一定値以下に抑えるようにしきい値 \hat{y} を決定する必要がある。以下ではこのしきい値決定方法について説明する。

N 個のパケットを母集団とし、母集団からランダムに n 個のパケットをサンプルする。また、 n 個のサンプルパケットの内、フロー j からとりだされたパケットの数を Y_j とする。あるフロー j の母集団におけるパケット数が $X_j = x$ であるという条件のもとで、サンプリングによってとりだされるフロー j のパケット数が $Y_j = y$ である確率は、次式の超幾何分布であたえられる。

$$\Pr[Y_j = y | X_j = x] = \frac{x C_y N - x C_{n-y} / N C_n}{N C_n} \quad (1)$$

サンプリングによってとりだされたフロー j のパケット数が $Y_j \geq y$ という条件のもとで、そのフロー j の母集団におけるパケット数が $X_j \geq x$ である確率は、

$$\Pr[X_j \geq x | Y_j \geq y] = \frac{\sum_{i=x}^N \Pr[Y_j \geq y | X_j = i] \Pr[X_j = i]}{\sum_{i=1}^N \Pr[Y_j \geq y | X_j = i] \Pr[X_j = i]} \quad (2)$$

と計算できる。 $N, n, x, \Pr[X_j = i]$ を与え、以下で定義される false positive ratio (FPR) (誤ってエレファントフローと判定する確率) を ϵ (e.g., 0.05) 以下とするような y の最小値 \hat{y} を求め、それをしきい値として用いれば、誤判定率を ϵ 以下に抑えてエレファントフローを検出できる。

$$FPR(y) := 1 - \Pr[X_j \geq x | Y_j \geq y] \quad (3)$$

2.3 評価結果

$N = 10^7, x = 10^4$ とし、図 1 に示した実測データの $\Pr[X_j = i]$ を用いて、式 (3) を $\epsilon = 0.05$ 以下とする \hat{y} を求めると、 $n = 10^4$ のとき $\hat{y} = 13$ 、 $n = 10^3$ のとき $\hat{y} = 4$ であった。それらの値を用いて提案方式を実測データに対して適用したときの評価結果を表 1 に示す。ここで、 $f = n/N$ はサンプリングレート、 \hat{n}_e はサンプリングによって \hat{y} 以上のパケットが検出されたフロー数、 n_e はそれらのフローのうち実際にエレファントフロー (i.e., 10^4 個以上のパケットからなるフロー) であった数を表す。これより、FPR を理論値程度に抑えられていることが確認できる。また、false negative ratio (FNR) (エレファントフローを見逃す割合) についても評価した。FNR は、 $FNR = 1 - n_e / N_e$ (N_e は真のエレファントフロー数で 167) と定義される。表 1 より、 f が小さくなると FNR が大きくなるのがわかる。つまりトラフィック測定にかかるコストと特定精度はトレードオフの関係にある。ただし、トラフィック制御の観点からは、低いサンプリングレートで検出されたエレファントフローであってもその情報は有用であると考えられる。なぜなら、検出されたフロー ($n_e = 38$ フロー) の多くはエレファントフローの中でも特にフロー当りのパケット数の多いフローであり、

表 1 エレファントフロー特定精度評価結果

f	\hat{n}_e	n_e	FPR	FNR
10^{-3}	134	127	0.053	0.240
10^{-4}	38	38	0.000	0.772

これらフローによるトラフィック量は全体の約 1/5 以上を占めているため、これらフローを制御対象とするだけでも制御の効果は期待できると考えられるからである。

3 フローレベル品質劣化検出法

本節では、パケットサンプリングにより抽出されるフローの統計情報から、TCP フローレベルの品質劣化を検出する方法を提案する。なおここでは、TCP 品質としてフローレート (=フローサイズ/フロー持続時間) を扱う。提案手法は、(i) パケットサンプリングで抽出されるフローが高レートフローになりやすく、(ii) リンク輻輳時にはレートの高いフローから先に品質劣化が生じる、という 2 つの特性を利用する。これら特性 (i),(ii) を用いれば、パケットサンプリングで抽出されたフローのみの挙動を把握することにより、フロー管理に必要なとされる処理を軽減しつつ、フロー全体のうち輻輳に敏感なフロー (高レートフロー) の品質劣化を検出することが可能となる。

3.1 フロー特性分析

上で述べた 2 つの特性について説明する。特性 (i) は、パケットサンプリングによりサイズの大きいフローが抽出されやすいことと [2], サイズの大きいフローはフローレートも高くなる傾向にある [4], という 2 つの特性に基づいている。

特性 (ii) について、実測データを用いて示す。ある企業 LAN~ISP 間の 17Mbps 回線において、2003 年 8 月の平日数日間、全パケットヘッダをキャプチャした。図 2 に、ある平日 8:30-18:00 のリンク利用率、およびフローレートが r_{th} ($r_{th} = 10, 100, 1000\text{kbps}$) を超えた割合の時系列データ (15 分間隔) を示す。これより、リンク利用率が 1 に近くなると、1000kbps を超える割合はリンク利用率が低い時間帯に比べて非常に小さくなるのに対し、10kbps を超える割合はほとんど変わらないことがわかる。つまり、リンク輻輳時には転送可能レート (リンク非輻輳時のレート) の高いフローから先に品質劣化が生じている。(この現象は、TCP フロー制御による帯域配分が max-min 公平性に従うと考えられることを用いて説明できる [3].) 従って、リンク非輻輳時のレートの高いフローの方が、輻輳に敏感に反応して品質劣化を生じ、かつ、その劣化度 (=リンク非輻輳時のレート/リンク輻輳時のレート) も大きくなる。

3.2 提案方式

Step 1) 周期 τ 毎に区間 $((i-1)\tau, i\tau]$ でのリンク利用率 $\rho(i)$ を測定する。また、サンプリングレート f でパケットを抽出し (i.e., f^{-1} 個の到着パケットに対し 1 個のパケットを抽出), そのパケットが属するフロー k のレート $F_k(i)$ を求め ($F_k(i)$ の推定方法は [3] 参照),

$$\bar{F}(i) = \sum_{k=1}^{N_f(i)} F_k(i) / N_f(i) \quad (4)$$

を求める ($N_f(i)$ はサンプルされたフロー数). ($\bar{F}(i)$ とし平均レートを用いているが、例えば上位 $x\%$ 値を用いる方法も考えられる.)

Step 2) 品質劣化が起こり得ない利用率 (ρ_0) (e.g., 0.6) に対して $\rho(j) < \rho_0$ を満たす組 ($\rho(j), \bar{F}(j)$) を抽出し (組数を m とおく), $F_{avg} = \sum_j \bar{F}(j) / m$ とする。 F_{avg} は

表 2 品質劣化検出精度評価

f	FPR	FNR
10^{-2}	0.0076	0.031
10^{-3}	0.023	0.078
10^{-4}	0.038	0.094

リンク非輻輳時のフローレートを意味する。 Step 3) F_{avg} と、予め定めた品質劣化許容度 γ (e.g., 0.3) を用い、現時点 $n\tau$ のフローレート $\bar{F}(n)$ が

$$\bar{F}(n) < (1 - \gamma) \times F_{avg} \quad (5)$$

であれば、品質劣化状態にあるとして検出する。

3.3 評価

以上の方式を評価するため、8:30-18:00 における平日 5 日分 (測定周期は 15 分, 測定回数 195 回) の平均フローレートとリンク利用率を測定した (図 3)。これより、元のフローレート ($f = 1$) とサンプルされたそれ ($f = 10^{-4}$) は値自体は一致しないが (高めになる), サンプルされたフローレートから元のフローレートの劣化を検出できることが期待できる¹。表 2 に、FPR (=誤って品質劣化と判定された回数/真の品質維持 (i.e., 品質劣化していない) 回数), および FNR (=誤って品質維持と判定された回数/真の品質劣化回数) を評価した。なお、真の品質劣化回数は 64 であった。これより、いずれの割合も小さく抑えられていることが確認できる。

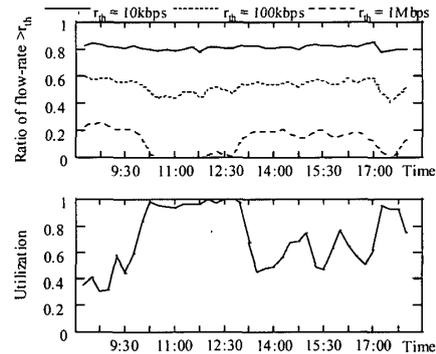


図 2 フローレートが r_{th} kbps を超える割合

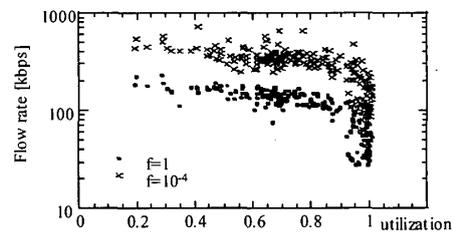


図 3 f を変えたときのフローレート vs 利用率

参考文献

- [1] IETF Packet Sampling (psamp) Working Group, <http://www.ietf.org/html.charters/psamp-charter.html>
- [2] T. Mori, M. Uchida, R. Kawahara, J. Pan and S. Goto, "Identifying elephant flows through periodically sampled packets," ACM SIGCOMM/Internet Measurement Conference (IMC 2004) to appear, Oct. 2004
- [3] 川原, 石橋, 森, 阿部, "サンプルパケット情報を用いた TCP フローレベル性能劣化検出法," 信学技報 TM2004-34, 2004-07.
- [4] K. C. LAN et al., "On the correlation of Internet flow characteristics," ISI-TR-574, USC/ISI, July, 2003.

¹3 節で、サンプルされたフローレートの方が元のそれよりも高レートとなるために先に劣化すると述べたが、ここでの両者の劣化の様子はほぼ同様にみえる。これは、 $f = 1$ のときの F_{avg} が 149kbps なのに対し、 $f = 10^{-4}$ の場合は 374kbps であり、それらの差が集約リンク帯域 17Mbps からみてわずかであることに起因する [3]。