

予測分布を用いたネットワーク制御における トラヒックの観測スケジューリング手法

佐竹 幸大[†] 大歳 達也[†] 大下 裕一[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{k-satake,t-otoshi,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし トラヒックの時間変動が激しい状況下においても、輻輳を生じずトラヒックを収容するためには、トラヒックエンジニアリング (TE;Traffic Engineering) が有効である。トラヒックエンジニアリングは、トラヒックの時間変動に追従して動的に経路最適化を行う。TEに関する既存の提案では、制御サーバーは、対象とするネットワークの全対地間において、正確なトラヒック情報を収集可能であるという前提を課している。しかしながら、常に全対地間の正確なトラヒックを把握することは、ネットワークにとって大きな負荷となるため、収集する時間粒度や空間粒度を荒くし、不足情報を予測値を用いて補うことが現実的な解決策として考えられる。本稿では、観測負荷を抑えた中で、制御に必要な情報を取り出し、時々刻々と変動するトラヒックに追従した経路設定を行うためのトラヒックの観測スケジューリング手法の検討を行う。実際に運用されているネットワークのトラヒックトレースデータを用いたシミュレーション評価により、予測・制御への影響を考慮した観測箇所の選択を行うことで、トラヒックに関して限られた情報しか得られない状況においても、輻輳を回避した経路制御が可能であることが明らかになった。

キーワード 観測スケジューリング、トラヒックエンジニアリング、観測負荷、予測分布

Traffic observation scheduling method in network control using predictive distribution

Kodai SATAKE[†], Tatsuya OTOSHI[†], Yuichi OHSITA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †{k-satake,t-otoshi,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Traffic Engineering (TE) is effective for accommodating traffic without congestion even when traffic fluctuate drastically. Traffic engineering dynamically optimizes the routes following the traffic changes. In the existing TE method, it is assumed that we can obtain accurate observational data about all traffic in the network. However, obtaining data from all nodes in the network may cause a large overhead. To solve this, a network control method that works even if only a limited observation can be obtained at each time slot. We propose a method to collect the data that has a large impact of the TE at each time slot. By collecting such data, we can control the routes properly, even if only a limited number of data can be collected at each time slot. In this paper, through simulation using actual traffic trace data, we clarify that our method avoids congestion even if only a limited number of data is obtained at each time slot.

Key words Observation Scheduling, Traffic Engineering, Observation Load, Predictive Distribution,

1. ま え が き

近年、インターネットサービスの普及や、接続端末数の激増に伴い、インターネットを流れるトラフィックの時間変動は、ますます激しくなりつつある。このような、トラフィックの時間変動が激しい今日においても、情報ネットワークは、トラフィックの輻輳を防ぎ、トラフィックを安定して収容することが求められる。

トラフィックが急増した際にも、輻輳を生じずトラフィックを安定して収容する方法の一つに、オーバープロビジョニング [1] がある。オーバープロビジョニングは、トラフィック急増時にも、トラフィックを収容できるよう十分なネットワーク資源をあらかじめ確保しておく方法である。しかしながら、オーバープロビジョニングでは、余剰な資源を確保しなければならないため、利用効率が悪く、設備投資や維持費といったコストも高くなる。また近年、消費電力の観点からも、限られた帯域の中でトラフィックを収容することが求められてきている。

限られた資源下で、ネットワークの資源を効率的に利用する技術として、トラフィックエンジニアリング (TE; Traffic Engineering) と呼ばれる手法の研究が進められている [2-5]。トラフィックエンジニアリングでは、トラフィックの状況に応じて、動的にネットワークの資源割当を変更することで、トラフィックの輻輳を防ぎ、トラフィックを安定して収容することを可能とする。これらの方法では、トラフィックに関する観測情報を定期的に収集・解析し、その観測情報に基づいて経路変更を行う。

急激なトラフィック変動にも追従して、ネットワーク性能劣化が発生する時間帯を抑えるためには、トラフィック情報を観測・収集し、経路変更を行う周期を短く設定する必要がある。従来、TE では、ネットワークの全地点のトラフィック情報が収集可能であるという前提を課していた。しかしながら、短周期でネットワーク全体のトラフィック情報を収集・解析することは大きな負荷がかかる。

本稿では、観測負荷を抑えた中で、制御に必要な情報を取り出し、時々刻々と変動するトラフィックに追従した経路設定を行うためのトラフィックの観測スケジューリング手法の検討を行う。具体的には、バイズ実験計画法を応用し、その時点までに得られた知識を活用することで、いつどこかの情報を収集することが推定・予測・制御を総合的に見て効果的であるかを経験的に見積もり、それを活用して有用な収集箇所を特定する手法を提案する。

提案手法では、(1) トラフィック情報を観測し、トラフィック状況を推定する、(2) 将来のトラフィック状況を予測する、(3) 予測をもとに経路制御を行うとともに、次の時刻に観測する情報を指定するという手順を繰り返すことにより行う。本手順の (1) において、各時刻で観測可能な情報が限られている場合、観測できない地点のトラフィック量は予測により補うことが現実的である。しかしながら、予測したトラフィック量には誤差が含まれる。そこで、(2) 以降では、このような誤差を確率変数として扱う。すなわち、現在のトラフィック量を誤差が含まれている確率変数として扱った上で、将来のトラフィック量の確率分布を予

測する。そして、手順 (3) では、将来のトラフィック量の確率分布をもとに、輻輳が生じる確率を一定以下とするように制御を行う。また、その際に、合わせて、制御性能を考慮した上で、次の時刻の制御性能への影響が大きい箇所を次の時刻の観測対象として選択する。これにより、制御への影響が大きい地点のトラフィック量を頻繁に観測することができ、短周期のトラフィック変動に対応しつつ、ネットワーク性能を維持する制御が可能となる。

本稿では、実ネットワークのトラフィックトレースを用いたシミュレーション評価によって、限られた観測情報のみを用いて、輻輳を防いだ経路制御が可能であることを示す。以降の章の構成は以下の通りである。2 章では、関連研究について述べる。3 章では、提案手法について述べ、4 章では、実際のトラフィックトレースを用いたシミュレーション評価について述べる。5 章で、まとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

ネットワーク制御・管理のために必要なトラフィックマトリクスや、リンクの遅延・ロス率を直接または間接的に収集し、推定する方法は幅広く検討されてきている。文献 [6] では、リンクのトラフィックと経路情報を用いたトラフィックマトリクス推定をベースとしながら、少数本のフローの情報を直接収集することで、推定精度を向上させる方法を検討している。文献 [7] でも、同様に、フローの観測データの収集方法について検討されているが、どこに観測器を配置するかを扱っており、観測器を経由するフローは全て収集されるものを想定している。しかし、これらの方法では、全地点間のトラフィックの平均誤差を抑えることに焦点を当てており、それを用いた TE の性能については考慮していない。TE では、帯域が圧迫されていないリンクを経由するフローの推定誤差の影響は、帯域が圧迫されているリンクを経由するフローに比べ小さいなど、推定誤差の影響の大きさはフロー毎に異なる。そこで、本研究では、予測や制御といった利用目的を意識した場合に、必要な情報を取り出す収集方法を検討する。

トラフィック予測に関しても、従来より幅広い研究がなされており、様々な予測モデルが検討されている (例えば、ARMA, ARIMA [8], ARCH [9], GARCH [10] 等)。予測では、過去のトラフィックの時系列から、モデルのパラメータの推定を行い、決定されたモデルと、直近のトラフィック系列から、先の将来の予測を行う。TE においても、このような予測モデルを用いることができ、予測モデルと過去の時点のトラフィックの推定値から、予測が可能である。トラフィック予測を確率的な時間発展モデルでとらえる。本稿の評価においては、将来になるにつれ誤差が拡大するとした単純な予測モデルを当てはめたが、本稿の手法においては、確率的な時間発展モデルであらわすことができる任意の予測手法を適用可能である。

3. 提案手法

3.1 全体像

本手法の全体像は図 1 の通りである。本手法では、観測、収

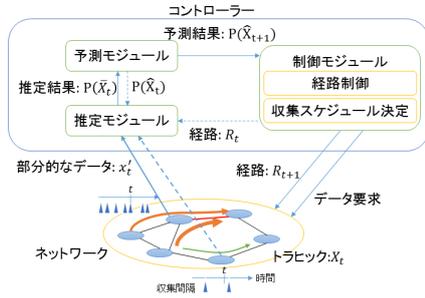


図 1: 提案手法の全体像

集、推定、予測、制御のループによって、観測負荷を抑えた中で、制御に必要な情報を取り出し、時々刻々と変動するトラヒックに追従した経路設定を行う。トラヒック予測の結果、将来のトラヒックの予測分布が得られると、制御モジュールは、予測分布が示唆する様々なトラヒックパターンを収容可能な経路を一通りに決定する。また、各タイムスロットにおいて、次の経路制御への利用を意識した観測箇所の決定を行う。すなわち、各観測箇所を得られる観測値を推定し、その推定分布と将来トラヒックの予測分布を用いて制御性能を行った場合に、予想される制御性能の損失を最小化するように、観測箇所を決定する。

観測はネットワーク上のルーターに複数配置された観測器が独立して局所的に行い、観測データが要求に答えられるように観測データを一時的に保持しておく。観測器は、従来研究のように、Netflow や SNMP によって、フローやリンクのトラヒックを観測していると想定する。

3.2 推定モジュール

推定モジュールは、ネットワークの各ルーターに配置された観測器からデータを収集し、現時点のネットワークの状態を推定する。TE において必要なネットワークの状態情報は、トラヒックとトポロジー情報であるが、トポロジーの変化は制御の時間粒度よりも十分に長いことが想定されるため、推定対象は、トラヒック情報のみとする。

推定モジュールは、収集される部分的なトラヒック観測情報に基づいて、現時点での対地間トラヒックの情報を推定する。トラヒックの推定は 2 つのステップから成る。一つ目は、部分的に収集されたフローについて、合計のトラヒック量を推定する操作である。各フローは、観測器でのサンプリングや、収集時の漏れ等によって、全ての packets が観測されているわけではないため、その観測値を基にした総トラヒックの推定にはサンプリング誤差が伴う。二つ目は、そのようなサンプリング誤差を伴った不確実なトラヒックの値に対して、直前の予測値を基に補正を行う操作である。特に、サンプル数が極端に少ない、または、収集の対象とならなかったフローについては、直前の予測値の方が、より正確な値を示す可能性が高く、補正によって、収集されなかった情報を補えると考えられる。

推定対象のフローを構成する packets の総数を N として、

それぞれのフローのトラヒックを X_k^i とすれば、総トラヒック $X_k = \sum_{i=1}^N X_k^i$ を、実際に収集した n 個の packets の平均トラヒック $\bar{X}_k^n = \sum_{i=1}^n X_k^i$ を用いて、 $x_k = \frac{N}{n} \sum_{i=1}^n X_k^i = N \bar{X}_k^n$ で推定する。

この時、収集対象 O_t の観測値が与えられた下での推定誤差の分布を $P(\epsilon_{ik}|O_k)$ とすると、実際の値が X_k であるときに推定値が x_k である確率は

$$P(x_k|X_k; O_k) = \sum_e P(x_k|X_k, \epsilon_k = e) \cdot P(\epsilon_k = e|O_k) \quad (1)$$

$$= P(\epsilon_k|O_k) \quad (2)$$

である。

直前の予測から得られている現時点での X_k の確率分布を $P(X_k)$ とすると、データの推定値 x_k が与えられた下で、補正された確率分布は

$$P(X_k|x_k; O_k) = \frac{1}{P(x_k|O_k)} P(x_k|X_k; O_k) P(X_k) \quad (3)$$

である。真の値 X_k は観測方法に依存しないため、 $P(X_k|O_k) = P(X_k)$ であることに注意する。

3.3 予測モジュール

予測モジュールでは、推定モジュールから得た現時点のトラヒックの推定分布を用いて、将来のトラヒックの変化を確率分布として求める。

トラヒック需要の時間発展のモデル $P(X_{k+1}|X_k, \dots, X_{k-s})$ が与えられている時、将来のトラヒック需要の確率分布は、過去の観測データを基に

$$P(\vec{X}_{k+1}|\vec{x}_k, \dots, \vec{x}_1) = P(\vec{X}_{k+1}|\vec{X}_k) P(\vec{X}_k|\vec{x}_k, \dots, \vec{x}_1) \quad (4)$$

である。ここで、 $\vec{X}_k = (X_k, \dots, X_{k-s})$ 、 $\vec{x}_k = (x_k, \dots, x_{k-s})$ である。 s は、モデル中において依存関係が存在する最大のラグの大きさである。

3.4 制御モジュール

制御モジュールは、予測モジュールによって得られた将来のトラヒック変動の情報を基に、将来の経路やデータ収集スケジュールについての決定を行う。

3.4.1 経路制御

制御モジュールは、予測分布が示唆する様々なトラヒックパターンを収容可能な経路を一通りに決定する必要がある。

$$\text{minimize : } ((1-w)f(\vec{y}_{t+1}, R_{t+1}) + w\|\Delta R_{t+1}\|) \quad (5)$$

$$\text{subject to : } \vec{y}_{t+1} = G \cdot R_{t+1} \cdot \vec{X}_{t+1} \quad (6)$$

$$\forall l, P[y_{t+1}^l > c_{t+1}^l] \leq p_{t+1} \quad (7)$$

$$\forall i, \forall j, R_{t+1}^{i,j} \in [0, 1] \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \varphi(j)} R_{t+1}^{i,j} = 1 \quad (9)$$

ここで、 \vec{y}_{t+1} はリンク i 上のトラヒック、 c_{t+1}^l は目標帯域、 p_{t+1} は許容される輻輳発生の確率、 $R_{t+1}^{i,j}$ はフロー j のトラヒックが経路 i に分割して割り当てられる時の割合、 $G^{i,j}$ は経路 j がリンク i を含む場合に 1、それ以外では 0 の値をとる行列、 f は遅延などのネットワーク性能を表す。

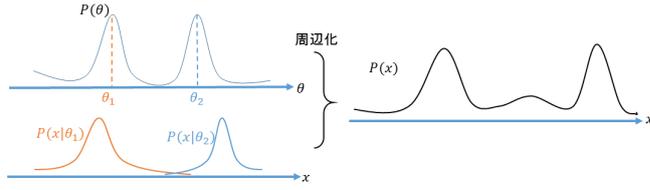


図 2: 周辺化された予測分布

トラフィックマトリクス of 予測分布が既に与えられているため、この問題は制約条件付きの目的関数を最小化する最適化問題であり、一般的な最適化手法で解くことが出来る。本稿では Lagrange 関数を導入し、その Lagrange 関数を最急降下法によりこの最適化問題を解く。

3.4.2 収集スケジュールの決定

経路制御における観測の役割は、情報が不足して適切な制御が決定できない、あるいは決定した制御に確信が持てないような状況から、新たな情報を取得することで、適切な制御を行えている状態にすることである。特に、制御サーバーは、限られた観測リソースの制約の下で、経路制御に有用な情報を取り出すように、収集対象を決定する必要がある。情報は最終的に予測分布の形で経路制御に用いられることになるので、観測方法を変更することで、予測の更新を調整し、適切な経路制御に導く必要がある。

経路制御のように得られた情報から特定の意思決定を行うために必要な情報を取り出す問題は、ベイズ実験計画法として定式化される [11]。観測の決定問題は、次の二段階の最適化問題として定式化できる。

$$\text{minimize} : E_{P(x_k|O_k)}[f(x_k, O_k)] \quad (10)$$

$$\text{subject to} : \sum_{o_{ij} \in O_t} C(o_{ij}) \leq W \quad (11)$$

$$f(x_k, O_k) = \min_{R_{k+1}} \{ E_{P(X_{k+1}|x_k, O_k)}[f(R_{k+1}, y_{k+1})] \} \quad (12)$$

$$\text{subject to} : \bar{y}_{k+1} = G \cdot R_{k+1} \cdot \bar{X}_{k+1}$$

$$P[y_{k+1}^l > c_{k+1}^l] \leq p_{k+1}$$

$$R_{k+1}^{i,j} \in [0, 1]$$

$$\sum_{i \in \varphi(j)} R_{k+1}^{i,j} = 1 \}$$

上述の最適化問題は、目的関数 $f(O_k)$ を最小化するように観測方法 O_k を決定する問題である。目的関数は、経路の設定及びリンクを流れるトラフィックの関数であるが、経路の設定は、その時の観測値ひいては、観測方法に依存している。ここで、 $E_{P(X_{k+1}|x_k, O_k)}[\cdot]$ は確率分布 $P(X_{k+1}|x_k, O_k)$ の下での期待値を意味し、また R_{k+1} の範囲は制約を満たした範囲であるとする。観測方法 O_k を定めたとき、 x_k は確率変数であるから、その時の目的関数の期待値を取ることにする。

本稿では、上述の最適化問題の近似解を、各観測方法 O_k に

対する目的関数 $f(O_k)$ の値を、評価し、評価値の高い順に採用する貪欲法によって求める。その際、観測方法 O_k が与えられたとき、それによって得られるであろう観測値 x_k の期待値は、直前のタイムスロットにおける予測分布 $P(X_k)$ と同一であると仮定する。また、観測値 x_k の分散は、観測方法 O_k に従って変化させる。すなわち、観測方法 O_k によって十分に観測されるフローほど、分散を小さくする。実際には、観測方法 O_k によって定まる観測値 x_k は、観測方法 O_k に基づいて実際に観測するまで定まらないが、短い時間周期の中でフローの分布が急激に変化することは稀であると考えられるので、この仮定は妥当である。

上述の方法は、確率的にあり得る全ての観測データについて、その時達成し得る制御の目的関数の期待値を最大とするという意味で最適な観測方法を与えている。

4. 評価

4.1 評価方法

4.1.1 評価環境

提案した TE が実際のネットワークにおいて有効に機能するかどうかを検証するため、Internet2 のバックボーンネットワークポロジーおよびトラフィックトレースデータ [12] を用いてシミュレーションを行う。Internet2 のトポロジーは、9 つの PoP(Point-of-Presence) ルーターで構成され、各ルーター間を、72 本の OD フローが流れる。

本稿では、2011/11/1 00:00 - 2011/11/8 23:59 の 8 日間において集計されたフロー情報を用いて、各フローの分散を算出し、そのフローの分散が既知の状態では提案手法の評価を行う。そして、2011/11/13 00:00 - 2011/11/14 23:59 の 2 日間において集計されたフロー情報を評価に用いた。Netflow を用いてフロー単位で計測されたトラフィックの情報から、トラフィックレートを算出する。トラフィックレートは、単位時間における総トラフィック量を経過時間で除することによって算出する。5 分間隔のタイムスロットに区切り、各タイムスロットにおける平均トラフィックレートを求める。

また、本評価において、internet2 に存在する合計 9 つある PoP ルーターが、当該 PoP ルーターが終点となるトラフィック量を観測しているものとし、各タイムスロットにおいて、9 つある観測地点のうち、2 箇所のみから観測情報を収集するという制約を置く。

4.1.2 比較対象

予測・制御への影響を考慮して観測箇所を決定することによる効果を検証するため、予測・制御への影響を考慮せず、ランダムに観測箇所を決定し、観測結果をもとに、式 (5)-(9) の最適化問題を解くことにより経路を定めた場合と、提案手法を比較する。

4.1.3 評価指標

本稿の TE の目的は、各リンクに流れるトラフィックを低く抑え、輻輳を防ぐこととする。TE を適用するネットワークの制御目標に合わせて目的関数を変更することで、提案手法は様々な要求に対しても有効に動作することが期待されるが、今回の

評価においては、各リンクに流れるトラフィックを低く抑えることを制御目標とする。

そこで、この制御目標が達成できていることを確認するために、本稿では、2種類の評価を行う。

1つ目の評価では、制御システムが計算している、各リンクの目標帯域超過確率を評価指標として用いる。これを比較することで、制御への利用を意識した観測箇所決定が、目標帯域を超過する確率をどの程度抑えるのかを確認することが出来る。

2つ目の評価では、各タイムスロットにおける最大リンク利用率を評価指標として用いる。ここで各リンクの帯域は、各リンクの目標帯域 c_k^l であるとする。リンク利用率の比較することで、制御への利用を意識した観測箇所決定が、各リンクにおけるトラフィック量をどの程度抑えるのかを確認することが出来る。

4.1.4 各モジュールにおける制御

本評価においては、制御への影響を考慮して観測情報収集箇所を決定することによる、制御への効果を検証するために、各モジュールにおける処理は以下のように単純なものを用いる。

推定では、各タイムスロットにおいて観測できたフローと観測できなかったフローの2種類を考え、観測できたフローについてはその時点での正しい観測値が得られる一方、観測できなかったフローに関する情報は全く得られないとする。観測できたフローについては、観測値を期待値とし、分散を0とする分布を推定分布とし、観測できなかったフローについては、直前のタイムスロットにおける予測分布を推定分布として用いる。

予測に関しては、各タイムスロットにおける各フローの推定分布 $P(\bar{X}_t)$ に対して1タイムスロット分の予測誤差 e_t を加えた分布を次の予測分布 $P(X_{t+1})$ として用いる。すなわち、予測分布は以下の式で与えられる。

$$P(X_{t+1}) = P(\bar{X}_t) + e_t \quad (13)$$

また、本評価では、1タイムスロット分の予測誤差 e_t に関しては、予め過去のトラフィックデータから学習した各フローの分散を用いるため、時刻 t によらない。

経路制御にあたっては、前述の最適化問題において、 $w = 0$ 、 $h = 1$ 、 $p_k = 15$ とし、目的関数 f は、各リンクにおける目標帯域の超過確率の合計を用いる。この最適化問題を解くことで、経路の決定を行う。また、目標帯域 c_k^l はすべてのリンクに対して均一で、 $1.0 * 10^3$ [Mbyte/sec] である。

4.2 評価結果

シミュレーションによる評価結果を、図3および図4に示す。これらの図では、各タイムスロットにおいて、制御への利用を考慮して観測箇所を決定した場合と、ランダムに観測箇所を決定した場合の比較結果を表している。前者が提案手法、後者が比較手法である。“Considering Performance”は、制御への利用を考慮して観測箇所を決定した場合の結果を示しており、“Random Select”は、ランダムに観測箇所を決定した場合の結果を示している。観測箇所の選択以外の部分においては同一の処理を行う。横軸はタイムスロット t を表している。横軸の1タイムスロットは5分間である。縦軸は評価指標を表している。

図3は、目標帯域の超過確率についての比較結果を示す。こ

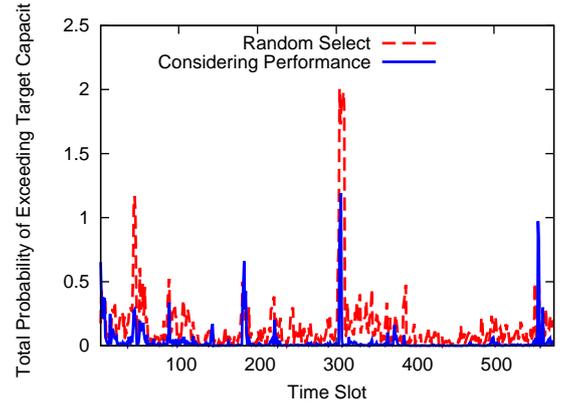


図3: 評価結果

の目標帯域の超過確率とは、TEの制御システムがトラフィックの予測分布と経路から計算した確率である。縦軸の値は、各リンクに対する目標帯域超過確率の和を示すため、1を超えることもある。図3では、多くのタイムスロットにおいて、提案手法が比較手法よりも目標帯域超過確率が低く抑えられていることが分かる。これは、各タイムスロットにおいて、目標帯域の超過確率を最も下げることができる観測箇所を選んでいるためである。具体的には、逼迫しているリンクを経由する、分散の大きなフローを観測できるような観測箇所を積極的に選択することによって、フローに対する不確実さが常に低い状態に保たれるため、フローの予測値に対して最適経路計算が行いやすくなる。

図4は、最大リンク利用率についての比較結果を示している。図4では、多くのタイムスロットにおいて、最大リンク利用率が低く抑えられていることがわかる。これは、提案手法においては、逼迫しているリンクを経由する、分散の大きなフローを積極的に観測することで、不確実さを減らし、フローの予測値に対して適切な経路選択が行えるようになったためである。比較手法においても、経路制御では、各リンクの目標帯域超過確率を最小化するような経路選択を行うものの、観測箇所がランダムであるために、有効な経路制御に必要なフローに関する分散が大きく、トラフィックの予測値に対する不確実性が高いために、分散の大きなフローに対して必要以上の帯域を確保してしまったり、本来帯域を割くべきフローに対して十分な帯域を割り当てられないために、適切な経路設定ができていないと考えられる。また、この結果は、過去のトラフィックデータを基に、事前に計算しておいた各フローの分散と、評価期間における各フローの分散との乖離が少なかったことを示唆している。その結果、TEの制御システムが計算した、目標帯域の超過確率が実際のトラフィックの状況を的確に捉え、結果的に観測すべきフローの選択が正しく行えたと考えられる。

5. まとめ

本稿では、トラフィックに関する限定的な情報しか得られない状況において、TEを適用した場合でも、適切な経路制御を行えることを検証するため、実際のトラフィックのトレースデータ

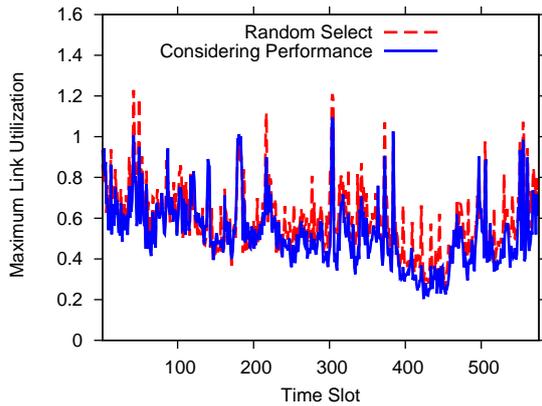


図 4: 評価結果

を用いてシミュレーション評価を行った。評価の結果、予測・制御への影響を考慮せずランダムにトラフィックの観測情報を収集するだけでは、推定誤差の影響による輻輳を生じるような場合においても、予測分布を用いた確率的な制御を行うことにより、予測・制御への影響を考慮した観測箇所の選択を行うことで、輻輳を回避した経路を設定できることが明らかになった。

今後の課題としては、他のトポロジー構造やトラフィックパターンでも有効に動作するのか、どのような条件下であれば有効に動作するのか、を理論的に解析することと、トラフィックの状況に合わせて、制御に用いるパラメータも動的に変更し、より柔軟性のある制御にすることが挙げられる。また、実環境に導入するには本来考慮すべき、シミュレーションでは検証できない影響も含めた評価を実機を用いて行うことが挙げられる。

6. 謝 辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「未来を創る新たなネットワーク基盤技術に関する研究開発」により得られたものである。よって、ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] C. Fraleigh, F. Tobagi, and C. Diot, "Provisioning ip backbone networks to support latency sensitive traffic," in *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, vol. 1, pp. 375–385, IEEE, 2003.
- [2] S. Kandula, D. Katabi, B. Davie, and A. Charny, "Walking the tightrope: Responsive yet stable traffic engineering," in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, pp. 253–264, ACM, 2005.
- [3] A. Elwalid, C. Jin, S. Low, and I. Widjaja, "Mate: Mpls adaptive traffic engineering," in *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, pp. 1300–1309, IEEE, 2001.
- [4] H. Wang, H. Xie, L. Qiu, Y. R. Yang, Y. Zhang, and A. Greenberg, "Cope: traffic engineering in dynamic networks," in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 36, pp. 99–110, ACM, 2006.
- [5] N. Wang, K. Ho, G. Pavlou, and M. Howarth, "An overview of routing optimization for internet traffic engineering," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 10, no. 1, 2008.
- [6] G. Liang, N. Taft, and B. Yu, "A fast lightweight approach to origin-destination ip traffic estimation using partial measurements," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2634–2648, 2006.
- [7] G. Sagnol, S. Gaubert, and M. Bouhtou, "Optimal monitoring in large networks by successive c-optimal designs," in *Teletraffic Congress (ITC), 2010 22nd International*, pp. 1–8, IEEE, 2010.
- [8] K. Papagiannaki, N. Taft, Z.-L. Zhang, and C. Diot, "Long-term forecasting of internet backbone traffic: Observations and initial models," in *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, vol. 2, pp. 1178–1188, IEEE, 2003.
- [9] B. Krithikaivasan, Y. Zeng, K. Deka, and D. Medhi, "Arch-based traffic forecasting and dynamic bandwidth provisioning for periodically measured nonstationary traffic," *IEEE/ACM Transactions on networking*, vol. 15, no. 3, pp. 683–696, 2007.
- [10] B. Zhou, D. He, Z. Sun, and W. H. Ng, "Network traffic modeling and prediction with arima/garch," in *Proc. of HET-NETs Conference*, pp. 1–10, 2005.
- [11] H. H. Song, L. Qiu, and Y. Zhang, "Netquest: a flexible framework for large-scale network measurement," in *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 34, pp. 121–132, ACM, 2006.
- [12] T. Y. Berger-Wolf, "Internet2 data." <http://internet2.edu/observatory/archive/data-collections.html>.