

高信頼トランスポートの経路制御に関する検討

藪崎 仁史[†] 松原 大典[‡]

日立製作所中央研究所 〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

E-mail: {[†] hitoshi.yabusaki.vw, [‡] daisuke.matsubara.pj}@hitachi.com

あらまし 冗長パスによるトランスポートの高信頼化を実現する高信頼トランスポートにおいて、低遅延・高信頼な通信特性を要求するミッションクリティカルなアプリケーションのユーザ数の増大やトラフィック量の増大に対応するため、帯域を有効活用した冗長パスを自動的に算出する経路制御が必要になる。高信頼トランスポートの経路制御には経路計算アルゴリズムと予備パスの帯域確保アルゴリズムが必要になるが、従来の経路計算アルゴリズムでは遅延制約と帯域有効活用を考慮した際、計算コストが高くなるという問題がある。本報告では、経路計算アルゴリズムと予備パスの帯域確保アルゴリズムを検討し、遅延制約を満たしつつ、帯域を有効活用する経路を低い計算コストで算出する複路計算アルゴリズムを評価した。本アルゴリズムのシミュレーション評価によって現用の方式と同等の計算コストで2.2倍のパス数を収容できることを確認した。

キーワード トランスポート制御, 経路制御, 経路計算

Study on Path Control for Reliable Transport

Hitoshi YABUSAKI Daisuke MATSUBARA

Hitachi, Ltd., Central Research Laboratory 1-280, Higashi-koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8601 Japan

E-mail: {[†] hitoshi.yabusaki.vw, [‡] daisuke.matsubara.pj}@hitachi.com

Abstract: A reliable transport realizes low-delay and reliable communication for mission critical applications. In order to overcome increase of users and data traffic, an automatic path control is necessary for the reliable transport to calculate redundant paths utilizing network resource effectively. However, the conventional path calculation algorithms with a delay constraint are not suitable for the network operation due to long calculation time. In this paper, we propose an algorithm which calculates optimal active and backup paths with the delay constraint, and evaluate effectiveness of resource utilization and calculation time. The proposed algorithm enables the network to accommodate 2.2 times traffic numbers as many as the current algorithm used as the network operation.

Keyword: transport control, path control, path calculation

1. はじめに

近年, SaaS, オンライン取引, デジタルリカバリ等のミッションクリティカルなアプリケーションが注目されており, このようなアプリケーションが要求する低遅延・高信頼な通信特性が求められている。このような通信特性を満たすネットワークとして従来はATM網等を用いた専用線サービスが利用されてきた。専用線サービスは, 帯域確保や障害発生時の素早い経路切り替えによって, IPネットワークに比べて低遅延・高信頼な通信特性を持っている。

ミッションクリティカルなアプリケーションの増加により, 低遅延・高信頼な通信特性を満たしつつ, ネットワークを広帯域化・低コスト化することが求められており, それを実現する技術として高信頼トランスポートが注目されている。高信頼トランスポートはMPLS, MPLS-TP, GMPLS, PBB-TEといったパス技術を用いることによって低遅延・高信頼のミッションクリティカルなトラフィックからインターネットのような従来のデータトラフィックまで多種多様なトラフィ

ックを収容することが可能である。高信頼トランスポートには, 今後のトラフィック量の増大やユーザ数の増大に対応するため, 帯域を有効活用した冗長パスを自動的に算出する経路制御が必要になる。高信頼トランスポートの経路制御には経路計算アルゴリズムと予備パスの帯域確保アルゴリズムが必要になるが, 従来の経路計算アルゴリズムでは遅延制約と帯域有効活用を考慮した際, 計算コストが高くなるという問題がある。

本報告では, 遅延制約を満たしつつ, 帯域を有効活用する経路を低い計算コストで算出する経路計算アルゴリズムと予備パスの帯域確保アルゴリズムを検討し, その性能を評価した。

2. 高信頼トランスポートの経路制御の要件

本章では, 高信頼トランスポートの経路制御の要件を以下に示す。

(1)経路制御の自動化

高信頼トランスポートには多種多様な通信特性が要求されるため、遅延制約の考慮、優先制御、障害時のための適切な帯域を確保した予備パスの設定などが必要になる。さらに近年ではユーザ数やノード数が増大しており、パス設定の頻度や複雑度が増している。このような経路制御を行うためには、手動で経路設定する現在の経路制御では多大な運用管理コストが発生する。そのため、経路制御の自動化が必要となる。

(2)帯域の有効活用

近年、トラフィックの種類が文書データから容量の大きい画像や動画、音声データに移り変わり、またインターネットの普及によるユーザ数の増加によりトラフィック量が増大しているため、設備コストや消費電力が問題になっている。統計データによると、IXバックボーンにおける一日の最大トラフィック量が2005年以降、毎年約10Gbpsずつ増加しており、将来的にはトラフィック量の増大によって帯域資源の枯渇が懸念されている[1]。

現在ではこれに対し、回線の帯域を増やす手法が主である。しかし、現在のIPネットワークの経路制御は最短経路を用いるために一部のノードやリンクにトラフィックが集中しやすいという性質を持っており、実際には一部のノードやリンクの帯域が枯渇していても、他のノードやリンクの帯域は殆ど使われていないといった状態になりやすい傾向がある[2][3]。よって帯域の枯渇問題の解決策の一つとして、トラフィックの経路を最適にすることによって帯域を有効活用する経路制御が有効である。

(3)パスの冗長化

高信頼トランスポートの経路制御の要求条件として、ミッションクリティカルなアプリケーションが要求する、障害が発生した際にネットワーク利用者の通信特性への影響が十分に小さい高信頼なネットワークであることが挙げられる。ここでいう通信特性への影響が十分に小さいとは、通信断から通信再開までの復旧時間が専用線サービスと同等の数十～数百msec以内であることを示している。これに対して障害が発生した後に代替経路を計算して通信を再開するIPネットワークの復旧時間は数十秒である。専用線サービスと同等の復旧時間を実現するには、現用パスの経路上で障害が発生した際に用いる予備パスを予め設定することが必要になる。

従来のIPネットワークにおいてはOSPFのような自動経路制御が行われているが、帯域の有効活用や冗長

化はできない。他方、パス技術を用いたネットワークにおいてはTEによる帯域有効活用やパスの冗長化は行われているが、自動で経路制御することはできない。帯域を有効活用し、パスを冗長化した経路を自動的に算出する経路制御が求められている。

3. 経路制御アルゴリズムの検討

経路制御の要件は、経路制御の自動化、帯域の有効活用、パスの冗長化である。本章では、経路制御の自動化と帯域の有効活用の要件を満たす経路計算アルゴリズムを検討した。また、経路制御の自動化、帯域の有効活用、およびパスの冗長化を満たす予備パスの帯域確保アルゴリズムを検討した。

現在、実際のネットワーク運用で用いられている経路計算アルゴリズムでは、トポロジ情報のみから経路計算をしているため、帯域を有効活用することができない。また、学術的に研究されている経路計算アルゴリズムには計算コストが大きいと、適用範囲が限られるものもある。以下に、高信頼トランスポートで必要となる自動経路制御を開発するために、帯域を有効活用し、遅延制約を満たす経路を低い計算コストで計算する経路計算アルゴリズムと予備パス帯域確保アルゴリズムを示す。

3.1. 経路計算アルゴリズム

3.1.1. 現用の経路計算アルゴリズム

現用の経路計算アルゴリズムでは、トポロジ情報のみから経路計算をしているが、帯域を有効活用するためには帯域の使用率を考慮して経路計算する必要がある。現在広く用いられているOSPFのような経路計算アルゴリズムでは、経由するノード数が最も少ない最短ホップの経路が算出される。しかし、このようなアルゴリズムではリンクの帯域の使用率を考慮しないため、ネットワークの一部にトラフィックが集中して部分的に帯域が枯渇してしまうため、ネットワーク全体としては帯域が余っていても、パケットロスや輻輳が生じる[4]。また、これを改善した手法として余剰帯域が要求されたパスの帯域より小さく、帯域を確保できないリンクを除いて経路計算するCSPFが用いられている。

3.1.2. 経路計算アルゴリズムに関する従来研究

(1) 最短ホップベースのアルゴリズム

オンラインの経路計算アルゴリズムでは、初期の帯域の有効活用の方法として、最短ホップの経路が複数存在する場合にトラフィックをそれらの経路に割り振るECMP[5]、WSP[6]やSWP[7]、MRBHP[8]が提案されている。これらのアルゴリズムの計算コストは小さいが、最短ホップの経路が複数存在するケースが少ない

実ネットワークのトポロジでは帯域有効活用の効果が小さい。また遅延制約を考慮しない。

(2) 帯域に基づいたアルゴリズム

Fortzらはリンクのメトリック値を帯域使用率に連動させて指数的に増加するメトリックを算出し、メトリックの合計であるコストが最小となる経路を計算するアルゴリズム（以下、Exponent法と呼ぶ）を提案している[9]。Exponent法は、パスを設定する度に各リンクのメトリックを再計算し、帯域使用率が高いリンクのメトリックを大きくすることによって帯域使用率の高いリンクを避けるように経路設定する手法である。本アルゴリズムは計算コストが小さく、帯域有効活用の効果は大きいですが、遅延制約を考慮しない。

(3) 帯域とトポロジに基づいたアルゴリズム

より高度な計算手法としてMIRA[10][11][12]が検討されている。(1), (2), (4)のアルゴリズムがパス設定要求時における帯域の使用率を平準化させるのに対して、MIRAは将来ボトルネックになりやすいリンクを迂回するため、帯域有効活用の効果が大きい。しかし、これらのアルゴリズムはパス設定の度に最大流量問題を解く必要があり、計算コストが大きい。また、遅延制約を考慮しない。

(4) 制約ベースのアルゴリズム

その他にQoSを満たす制約ベースの経路計算アルゴリズムが提案されている。CBFに基づいたアルゴリズム[13][14][15]、メトリックの関数を変更して繰り返し計算するアルゴリズム[16]、k最短経路を用いたアルゴリズム[17][18]、ラグランジュ法を用いたLARAC[19]が提案されている。これらのアルゴリズムは遅延制約を満たすが、複数の制約条件を満たす経路の探索はNP-hard問題とされており、ネットワークのサイズが大きくなると計算コストが爆発的に増加する[20]。

表1にオンラインの各方式の代表的な経路計算アルゴリズムであるECMP, Exponent法, MIRA, CBFの比較を示す。帯域の有効活用に関しては、ECMPを除く、3種類のアルゴリズムが有効である。計算コストに関しては、ECMPとExponent法が低い計算コストでの経路計算が可能である。遅延制約に関しては、制約ベースではない経路計算アルゴリズムでは低い計算コストで帯域の有効活用が可能だが、遅延を保障することができない。また、制約ベースのアルゴリズムでは遅延制約を満たすが、計算コストが膨大になる。

表 1 経路計算アルゴリズムの比較

| | ECMP | Exponent 法 | MIRA | CBF |
|---------|------|------------|------|-----|
| 帯域の有効活用 | △ | ○ | ◎ | ○ |
| 計算コスト | ○ | ○ | × | × |
| 遅延制約 | × | × | × | ○ |

そこで、複路計算アルゴリズムを想定し、全ての経路計算アルゴリズムにおいて低い計算コストで遅延制約を満たすこと考える。図1に複路計算アルゴリズムのフローチャートを示す。複路計算アルゴリズムでは予め複数経路探索により、経路リストを作成し、パス設定要求を受け付けた際には、経路リストから遅延制約を満たす経路の中から、コストが最小の経路を選択する。複数経路探索では、ホップ数が指定したノード数に達するまで、隣接するノードのうち経由していないノードが存在する限り経路探索を継続する。経路リストには経由するノード、および経路の遅延やコストなどが保存される。

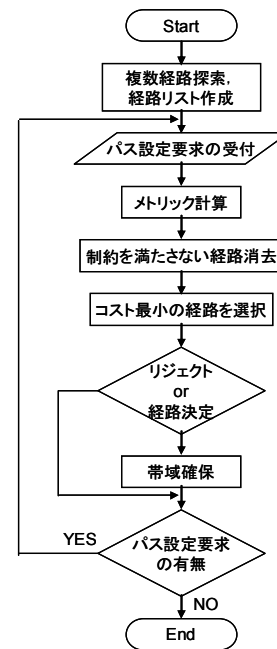


図 1 複路計算アルゴリズムのフローチャート

これにより、低い計算コストで遅延制約を満たす経路計算が可能になる。複路計算アルゴリズムのメトリック計算には、表1より低い計算コストで帯域有効活用の効果が大きいExponent法を採用する。

3.2. 予備パスの帯域確保アルゴリズム

予備パスの経路計算も現用パスと同様に上述の経路計算アルゴリズムを活用することによって、帯域を有効活用した経路を自動的に計算することが可能になる。ただし、予備パスは迂回経路を通るため現用パス

と同等以上の帯域を使用するが、予備パスの帯域は通常時には使用されず、障害時のみ使用される。そのため、予備パスの帯域は、帯域の確保方法を工夫することによってさらに削減することが可能である。

予備パスの帯域を有効活用する方法として、パスシェア[21]とリンクシェア[22]の2つの手法が提案されている。パスシェアは複数の現用パスが予備パスを共有する方法で、リンクシェアは複数の予備パス同士がリンクの帯域を共有する方法である。いずれの手法も、予め保障する障害数を規定し、規定された障害数以下の障害が発生しても全ての現用パスの予備パスが保障される。

パスシェアに比べ、リンクシェアの方が帯域の有効活用の効果大きい。これは、パスシェアでは端点が等しく同じリンクを通らない現用パス同士が予備パスの帯域を共有するのに対して、リンクシェアでは同じリンクを通らなければ端点が異なる現用パスでも、予備パス同士で帯域を共有するためである。

本研究では帯域有効活用が要件となっているため、帯域削減効果が大きいリンクシェアを採用する。

以上より、メトリック計算にExponent法を適用した複路計算アルゴリズムとリンクシェアを組み合わせたアルゴリズムをここでは用いる。以下で、本アルゴリズムの帯域有効活用の効果と計算コストを評価する。

4. シミュレーション評価

4.1. 目的

経路計算アルゴリズムとして、Exponent法に複路計算アルゴリズムを適用したアルゴリズムを用い、予備パス帯域確保アルゴリズムとして、リンクシェアを用いたアルゴリズムの帯域有効活用の効果と計算コストを評価することを目的とする。

4.2. 前提条件

本シミュレーションの範囲はパスの経路計算を行うコントロールプレーンのみとし、トラフィックの転送を行うデータプレーンを含まない。本シミュレーションにおいては、パスの端点やパスの帯域、トラフィックのクラス等がランダムで発生するパス設定要求に対して経路を計算し、パスの経路上のリンクの帯域を確保した。

パスの設定は、パスの設定要求に対して現用パスと予備パスの2本のパスをEnd-to-Endで設定した。予備パスは共にEnd-to-Endで迂回するグローバルリペアとした。パスのクラスとして、低遅延を要求するトラフィックを意識したクラスAとその他の遅延を許容するトラフィックを意識したクラスBを用意した。

帯域有効活用の評価方法は、パスの設定要求に対してリンクの帯域が不足してリジェクトされたリジェクト数を評価し、計算コストの評価方法は1万本のパス設定に所要した計算時間を評価した。

4.3. 実験内容

トポロジはAT&Tのコアネットワークのモデル[23]を用いた。AT&Tのコアネットワークはノード数が25、リンク数が41である。リンクの帯域はランダムで10G~50Gbpsとした。パス設定要求は、端点、帯域、クラスをランダムで発生させた。端点は、互いに異なるノードをランダムで選択される。パスの帯域は10M~50Mbpsとした。低遅延を要求するトラフィックの全体トラフィックに対する割合は一般的に低く、本評価ではクラスAの割合は10%とした。

経路計算アルゴリズムは、クラスAには遅延を最小化する最短ホップのCSPFを用いた。クラスBにはExponent法の他に、比較対象として現在のネットワークで用いられている最短ホップ、帯域有効活用の効果が大きいMIRAを加えた6つのケースでシミュレーションを行った。予備パスの帯域の確保方法は、クラスAは1:1とし、クラスBは1:1とリンクシェアの2つのケースにおいて実験した。1:1とは、各現用パスと同じ帯域の1本の予備パスを用意する方法である。表2に本実験で用いたクラスBの経路計算アルゴリズム、および予備パスの帯域確保アルゴリズムの組み合わせを示す。

表2 アルゴリズム

| | メトリック | 経路探索方法 | OSPF or CSPF | 予備パスの帯域確保 |
|---|-----------|-----------|--------------|-----------|
| ① | ホップ数 | DIJKSTRA法 | OSPF | 1:1 |
| ② | ホップ数 | DIJKSTRA法 | CSPF | 1:1 |
| ③ | ホップ数 | DIJKSTRA法 | CSPF | リンクシェア |
| ④ | Exponent法 | 複路探索 | CSPF | 1:1 |
| ⑤ | Exponent法 | 複路探索 | CSPF | リンクシェア |
| ⑥ | Mira | 複路探索 | CSPF | 1:1 |
| ⑦ | Mira | 複路探索 | CSPF | リンクシェア |

4.4. 実験結果

図2にパスの設定要求数とリジェクト数の関係を示す。横軸はパスの設定要求数であり、縦軸はリジェクト数である。リジェクトが発生した(1以上になった)パスの設定要求数が、ネットワークが許容する最大のパス数であり、この値が大きいほどネットワークの帯域を有効活用していることを示す。

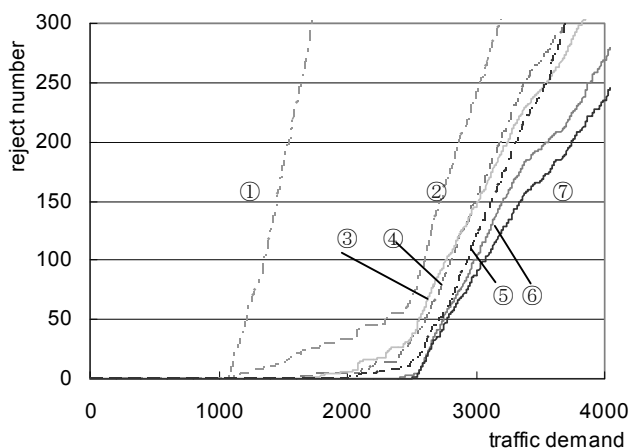


図 2 パスのリジェクト数

表 3に、ネットワークが許容する最大のパスの設定要求数、および現用パスと予備パスの計 1 万本のパスを計算するのに所要した時間を示す。アルゴリズム⑤、⑦がネットワークの許容するパスの設定要求数が大きく、アルゴリズム①に比べ 2.2 倍増えている。計算時間は、経路計算アルゴリズムが MIRA であるアルゴリズム⑥、⑦を除いた 5 つのアルゴリズムでは 4 秒程度であるのに対して、⑥、⑦では 30 分以上所要した。

表 3 各アルゴリズムの計算結果の比較

| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 最大許容パスの設定要求数 | 1073 | 1111 | 1675 | 1579 | 2405 | 2002 | 2505 |
| 計算時間[s] | 4.0 | 4.0 | 4.1 | 4.0 | 4.0 | 1923 | 1923 |

4.5. 考察

図 1 において、曲線の傾きが緩やかなほどネットワークの一部で帯域が枯渇した際にリジェクトされるパスの数が少ないことを示す。アルゴリズム①と②を比較する。①のグラフの形状がほぼ直線になっているのに対して、②では、傾きが緩やかな部分と傾きが急な部分に分かれている。これは、②が CSPF であるため要求された帯域を確保できない経路を除いて経路探索するためである。傾きが緩やかな部分では多くのパス設定要求に迂回経路が存在することから、傾きが緩やかな部分は一部のリンクの帯域は枯渇しているが他のリンクの帯域は余っている状態にあると考えられる。

Exponent 法、MIRA でリンクシェアしたアルゴリズ

ム⑤、⑦ではアルゴリズム②～④に比べ、傾きが緩やかな部分が少ない。このことから⑤、⑦では一部のリンクの帯域は枯渇しているが他の多くのリンクの帯域が余っている状態が少なく、各リンクの帯域使用率が平準化されていると考えられる。

OSPF を除いた全てのアルゴリズムの曲線が要求パスの設定要求数が、2500 付近で曲線の傾きが急になっている。このことから、いずれのアルゴリズムにおいてもパス設定要求が 2500 付近でネットワークの複数の箇所帯域が枯渇し始め、パスの迂回経路が少なくなっていると考えられる。

表 3 において、最大許容パスの設定要求はアルゴリズム⑤、⑥および⑦が高く、計算時間に関しては①～⑤のアルゴリズムの計算コストが低い。これより、経路計算アルゴリズムとして、Exponent 法に複数経路計算アルゴリズムを適用したアルゴリズムを用い、予備パス帯域確保アルゴリズムとしてリンクシェアを用いた本アルゴリズムは、従来方式と同等の計算コストで 2.2 倍のパス数を収容することを確認した。

5. まとめ

低遅延・高信頼な通信特性を要求するミッションクリティカルなアプリケーションを実現する上で、高信頼トランスポートには、ユーザ数やトラフィック量の増大に対応するため、帯域を有効活用した冗長パスを自動的に算出する経路制御が必要になる。高信頼トランスポートの経路制御で必要となる要件として経路制御の自動化、帯域の有効活用、パスの冗長化について以下の検討を実施した。

- (1) 経路計算アルゴリズムと予備パスの帯域確保アルゴリズムを、帯域の有効活用、計算コスト、遅延制約の有無を指標として調査した。調査した結果、制約ベースではない経路計算アルゴリズムでは低い計算コストで帯域の有効活用が可能だが遅延制約を考慮しないこと、制約ベースのアルゴリズムでは遅延制約を満たすが計算コストが膨大になることが明らかになった。
- (2) 低い計算コストで遅延制約を満たす複数経路計算アルゴリズムを開発した。本アルゴリズムと Exponent 法、およびリンクシェアを組み合わせることによって、低い計算コストで帯域有効活用の効果が大きく、遅延制約を満たす経路計算を可能とした。
- (3) アルゴリズムの帯域有効活用の効果と計算コストを評価する為に、パス設定のシミュレーションにて他のアルゴリズムと比較評価した。その結果、現用方式と同等の計算コストで 2.2 倍の

パス数を収容できることを確認した。

本研究は（独）情報通信研究機構の委託研究「ネットワーク仮想化を活用したデータサービスアプリケーション基盤技術に関する研究開発」の研究成果である。

文 献

- [1] AKARI プロジェクト／著，“新世代ネットワークアーキテクチャ AKARI 概念設計書”，NICT 公開資料，June，2008.
- [2] 宮村崇，栗本崇，青木道宏，山中直明，“MPLS の Explicit Routing を用いた負荷分散方式に関する一検討”，電子情報通信学会技術研究報告 (SSE2000-54)，vol.100.， no.154， pp. 25-30， June， 2000.
- [3] 鈴木忠道，伊藤順吾，中野和司，三木哲也，“IP トラフィック制御の解析とモデリング”，電気学会論文誌 D， vol.128， no.4， pp.529-536， April， 2008.
- [4] 福元良太，荒川伸一，村田正幸，“パワー則の性質を有するネットワークにおける出線数情報を利用した経路制御手法の提案と評価”，電子情報通信学会技術研究報告 (IN2005-68)， vol.105， no.279 pp. 43-48， Sep.， 2005.
- [5] J. Moy，“ OSPF Version 2，” IETF RFC 2328， Apr. 1998.
- [6] R. Guerin， H. Ahmadi， M. Naqshineh，“Equivalent bandwidth and its application to bandwidth allocation in high-speed networks” IEEE Communications， Vol.9， no.7， pp.968-981， Sep. 1991
- [7] Z. Wang and J. Crowcroft，“ Quality-of-Service Routing for Supporting Multimedia Applications”， IEEE Communications， vol.14， no. 7， Sep. 1996.
- [8] Shi Ming-Hong， Wang Shi-Bing， Bai Ying-Cai，“ A Bandwidth Constrained QoS Routing Optimization Algorithm”， Communication Technology Proceedings 2003. ICCT 2003， vol. 1， pp. 9-11， 2003.
- [9] B. Fortz and M. Thorup，“ Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights ”， Proceeding of INFOCOM， vol. 2， pp.519-528， 2000.
- [10] Murali Kodialam and T. V. Lakshman，“ Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering”， INFOCOM 2000， pp. 884-893， May 2000.
- [11] K. Kar， M. Kodialam， T. V. Lakshman，“ Minimum Interference Routing of Bandwidth Guaranteed Tunnels with MPLS Traffic Engineering Applications”， IEEE Communications， vol. 18， no. 12， pp. 2566-2579， Dec. 2000.
- [12] P. Aukia M. Kodialam， T. V. Lakshman， H. Sarin， B. Suter，“ RATES: A Server for MPLS Traffic Engineering”， IEEE Network Magazine， vol.14， Mar./Apr. 2002.
- [13] R. Widyono，“ The design and evaluation of routing algorithms for realtime channels”， Technical Report TR-94-024， University of California at Berkeley， June 1994.
- [14] D.H. Lorenz and A. Orda，“ QoS routing in networks with uncertain parameters”， IEEE/ACM Transactions on Networking， vol.6， no.6， pp768-778， Dec. 1998.
- [15] Danny Raz and Yuval Shavitt，“ Optimal Partition of QoS requirements with Discrete Cost Functions”， INFOCOM 2000.
- [16] A. Iwata， R. Izmailov， D. S. LEE， G.RAMAMURTHY， H. SUZUKI，“ ATM routing algorithm with multiple QoS requirements for multimedia interworking”， IEICE Transactions and Communications， vol.8， pp. 999-1006， 1998.
- [17] H. De Neve and P. Van Mieghem，“ A multiple quality of service routing algorithm for PNNI”， Proceedings of the IEEE ATM Workshop， pp. 324-328， May 1998.
- [18] E. I. Chong， S. Maddila， S. Morley，“ On finding single source single destination k shortest paths”， Proceedings of International Conference on Computing and Information， pp.40-47， July 1995.
- [19] A. Juttner， B. Szviatovszki， I. Meecs， Z. Rajko，“ Lagrange Relaxation Based Method for the QoS Routing Problem”， INFOCOM 2001， vol.2， pp. 859-868， Apr. 2001.
- [20] E. Aboelela， and C. Douligieris，“ Fuzzy reasoning approach for QoS routing in B-ISDN”， Journal of Intelligent and Fuzzy Systems， Application in Engineering and Technology， vol.9， pp.11-27， Nov. 2000.
- [21] IETF，“ Framework for Multi-Protocol Label Switching (MPLS)-based Recovery”， RFC 3469， Feb. 2003.
- [22] IETF，“ RSVP-TE Extensions For Shared-Mesh Restoration in Transport Networks”， Internet-Drafts Dec. 2001.
- [23] Denise M. Bevilacqua Masi and Martin J. Fischer，“ Modeling Internet Service Provider Backbone Networks”， Telecommunications Review 2007， pp. 91-103， 2007.