

文章编号: 1001- 2486(2008) 02- 0067- 05

ATIE: 一种自适应的可调域间出口选择算法*

刘亚萍, 何俊峰, 龚正虎

(国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: TIE 算法能对域间出口的选择进行调节, 但是该算法的参数计算过于复杂, 并且出口选择的调节并不能随负载的变化而变化, 因此提出了一种自适应的可调域间出口选择算法 ATIE, 该算法能够满足流量工程和网络健壮性要求, 并通过参数 T 的改变随当前负载的变化而变化。实验表明, ATIE 算法能够在控制剖面敏感性和随负载变化的流量工程自适应性上达到合理的折衷。

关键词: 流量工程; 路由优化; BGP; 控制剖面敏感性

中图分类号: TP393.4 **文献标识码:** A

ATIE: An Adaptive Tunable Inter-domain Egress Selection Algorithm

LIU Ya-ping, HE Jun-feng, GONG Zheng-hu

(College of Computer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Although inter-domain egress is tunable by TIE, it is too complex to compute its parameters, and it is impossible to tune its egress on different traffic load. Accordingly, an adaptive tunable inter-domain egress selection algorithm (ATIE) is proposed. ATIE can satisfy traffic engineering and network robustness by tuning parameter T with current traffic load. Experiments demonstrate that our solution can achieve a good balance between control plane sensitivity and traffic engineering adapting to different network traffic load.

Key words: traffic engineering; optimal routing; BGP; control plane sensitivity

1 TIE 算法简介

当前 BGP 出口选择优化算法主要有两类: 拓扑结构变化立刻触发出出口选择变化的算法以及当拓扑结构发生变化时, 对路由稳定性可调节的出口选择算法。热土豆算法^[1]、常见的流量工程路由算法^[2-4]、自适应路由算法^[6-7]都属于拓扑结构变化立刻触发出出口选择变化的算法。热土豆算法随域内 IGP (Interior Gateway Protocol) 距离的变化而变化, 常见的流量工程路由算法在拓扑结构发生变化时需要重新进行优化计算来调整, 自适应路由算法随负载和网络拓扑结构的变化而实时变化。这些算法主要的缺点是路由的稳定性较差, IGP 路由的微小变化就能引起 BGP 出口的改变。对路由稳定性可调节的出口选择算法综合了上述两类算法的优点, 比较有代表性的是 TIE 算法^[5]。

TIE 算法通过引入一个线性表达式对 IGP 距离进行控制来适应域内路由的变化。其基本原理是为每个路由器到每个目标地址流的可选出口分配一个度量 $m(i, p, e)$, i 表示入口路由器标识, p 表示目标地址标识, e 是可选出口路由器标识。选择 $m(i, p, e)$ 最小的对应出口作为 BGP 出口。 $m(i, p, e)$ 的定义如下:

$$m(i, p, e) = \alpha(i, p, e) \times d(i, e) + \beta(i, p, e) \quad (1)$$

其中, $d(i, e)$ 表示在当前拓扑结构中节点 i 和节点 e 之间的 IGP 距离。 $\alpha(i, p, e)$ 、 $\beta(i, p, e)$ 是待计算的参数, $\alpha(i, p, e)$ 反映 IGP 变化的自适应性, $\beta(i, p, e)$ 反映 IGP 变化的健壮性。TIE 算法描述如图 1 所示, 其中, G 表示无向图, $d(G, i, e)$ 表示拓扑图 G 下节点 i 和 e 间的 IGP 距离, P 表示目标地址集合, $E(p)$ 表示目标地址 p 的可行出口集, ΔG 表示拓扑变化的集合, δ 表示某种拓扑变化。TIE 算法主要思

* 收稿日期: 2007- 05- 19

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 刘亚萍(1973-), 女, 副研究员, 博士。

想是采用前摄式方法,预先为每个可能拓扑变化 δ 计算出每个流的 $\alpha(i, p, e)$ 和 $\beta(i, p, e)$ 的值。只有在发生变化的拓扑结构 $\delta(G)$ 下,如果某条流入口到原出口间的 IGP 距离超过初始拓扑结构下入口到原出口间的 IGP 距离的 T 倍时,才选择在当前拓扑结构距离入口最近的出口作为其出口;否则,仍然选择原出口作为出口。在该原则下建立参数 $\alpha(i, p, e)$ 和 $\beta(i, p, e)$ 的不等式,通过解不等式构成的方程组求出参数 $\alpha(i, p, e)$ 和 $\beta(i, p, e)$ 的值。

TIE 算法为 BGP 出口选择在路由稳定性和对拓扑变化的适应性方面给出了一个通用解决方案。但是该算法存在的主要问题是:(1)解不等式组求参数 $\alpha(i, p, e)$ 和 $\beta(i, p, e)$ 的计算过程非常复杂,甚至不能保证有解;(2)不等式是基于 $d(\delta(G), i, b) \leq T \times d(G, i, b)$ 的原则得到的, TIE 算法并没有考虑阈值 T 应该如何设置。

2 ATIE 算法描述

针对 TIE 算法的不足,本文提出了 ATIE 算法。ATIE 算法的思想是为每个路由器到每个目标地址流的可选出口分配一个 BGP 距离 $m(i, p, e)$,用 $m(i, p, e)$ 代替 IGP 距离来进行 BGP 出口的选择。在 ATIE 算法中,一方面,只采用 1 个参数 $T(i, p)$,与 TIE 算法相比 ATIE 算法省去了参数复杂的计算过程;另一方面,参数 $T(i, p)$ 随网络负载变化而自适应。ATIE 算法的描述如图 2 所示。定理 1 保证了 ATIE 算法在功能上与 TIE 算法等价。

- 1) 根据热土豆算法确定初始拓扑图中每个流的出口
 $b = \operatorname{argmin}_e \{d(G, i, e) \mid e \in E(p)\};$
- 2) for each $e \in E(p) \setminus \{b\}$, generate the constraint **do**
 $\alpha(i, p, b) * d(G, i, b) + \beta(i, p, b) <$
 $\alpha(i, p, e) * d(G, i, e) + \beta(i, p, e);$
- 3) for each $\delta \in \Delta G$ **do**
 a) 确定每个流的出口 b' :
 if $d(\delta(G), i, b) \leq T * d(G, i, b)$ then $b' = b;$
 else $b' = \operatorname{argmin}_e \{d(\delta(G), i, e) \mid e \in E(p)\};$
 b) for each $e \in E(p) \setminus \{b'\}$, generate the constraint **do**
 $\alpha(i, p, b') * d(\delta(G), i, b') + \beta(i, p, b') <$
 $\alpha(i, p, e) * d(\delta(G), i, e) + \beta(i, p, e)$

图 1 TIE 算法

Fig. 1 Algorithm: TIE

- 1) 根据热土豆算法确定初始拓扑图中每个流的出口
 $b = \operatorname{argmin}_e \{d(G, i, e) \mid e \in E(p)\};$
- 2) for every default egress point b **do**
 $m(i, p, b) = d(G, i, b);$
- 3) for each $e \in E(p) \setminus \{b\}$ and for each $\delta \in \Delta G$ **do**
 if $(d(\delta(G), i, b) > T(i, p) * d(G, i, b))$ then
 $m(i, p, e) = d(\delta(G), i, e);$
 else $m(i, p, e) =$
 $\max(d(\delta(G), i, e), T(i, p) * d(G, i, b)) + 1;$

图 2 ATIE 算法

Fig. 2 Algorithm: ATIE

定理 1 如果 ATIE 算法的参数 $T(i, p)$ 与 TIE 算法的阈值 T 的值相同,那么 ATIE 算法与 TIE 算法有相同的 BGP 出口选择结果。

证明 要证明 ATIE 算法与 TIE 算法具有相同的 BGP 出口选择结果,就是要证明 ATIE 算法满足如下条件:

(1) 在初始拓扑图中, ATIE 算法按热土豆算法选择 IGP 距离最近的出口作为其出口。

(2) 对于任意 $\delta \in \Delta G$, 某条流按照下面的条件选择出口 b' :

若 $d(\delta(G), i, b) \leq T * d(G, i, b)$, 则 $b' = b$; 否则 $b' = \operatorname{argmin}_e \{d(\delta(G), i, e) \mid e \in E(p)\}$ 。

首先证明 ATIE 算法满足条件(1):

根据命题的条件令 $T = T(i, p)$, 则根据 ATIE 算法的步骤(2), 下式成立:

$$m(i, p, b) = d(i, p, b), \quad b = \operatorname{argmin}_e \{d(G, i, e) \mid e \in E(p)\} \quad (2)$$

令 $\delta = \text{NULL}$, 根据 ATIE 算法的步骤(3), 条件 $d(\delta(G), i, b) > T(i, p) * d(G, i, b)$ 不满足, 因此下面的不等式成立:

$$m(i, p, e) > d(i, p, e), \quad e \in E(p) \setminus \{b\} \quad (3)$$

显然, 根据式(2)和(3)有(4)式成立。

$$m(i, p, b) = d(i, p, b) < d(i, p, e) < m(i, p, e) \quad (4)$$

因此, 在初始拓扑图中 ATIE 算法选择 IGP 距离最近的出口作为其出口。

证明 ATIE 算法满足条件(2):

对于任意 $\delta \in \Delta G$, 根据 ATIE 算法的步骤(3), 如果 $d(\delta(G), i, b) \leq T \times d(G, i, b)$, 那么对于每一个 $e \in E(p) \setminus \{b\}$, 有

$$m(i, p, e) = \max(d(i, p, e), T \times d(G, i, b)) + 1$$

由于 $m(i, p, b) = d(i, p, b)$, 故下式成立:

$$m(i, p, b) \leq T \times d(G, i, b) < T \times d(G, i, b) + 1 \leq m(i, p, e) \quad (5)$$

因此 $b' = b$ 。

如果 $d(\delta(G), i, b) > T \times d(G, i, b)$, 则 $m(i, p, e) = d(i, p, e)$, 因此,

$$b' = \operatorname{argmin}_e \{d(\delta(G), i, e) \mid e \in E(p)\}$$

综上所述, 命题成立。 \square

在域内流量工程中, 当网络负载是轻载时, 由于有足够多的剩余带宽可以满足传输的服务质量, 不需要调整路由使得流量的分布平衡; 而当网络重载时, 例如发生拥塞, 路由的稳定性比流量分布的平衡更加重要, 因此只有当网络处于中等负载时, 基于流量的分布平衡才显其必要性^[8-9]。域间路由与域内路由在路由稳定性与流量分布平衡性的关系上有相似性, 基于此我们提出基于网络负载变化而自适应的参数 $T(i, p)$ 的设置方法。参数 $T(i, p)$ 的设置可以用式(6)表示, 其中 M 是一个较大的数, 它表示当前的任意两个节点间的 IGP 距离不会超过 $M \times d(G, i, b)$, $1 \leq h_i < M$, u 表示网络的负载, k_i, h_i 的值由网络管理员定义, $k_1 < k_2 < \dots < k_n$ 。如果 $T(i, p)$ 的值等于 M , 表示当前采用固定出口选择算法, 出口选择不发生变化。如果 $T(i, p)$ 的值等于 1, 表示当前采用热土豆算法。

$$T(i, p) = \begin{cases} M, & u \in [0, k_1) \\ h_1, & u \in [k_1, k_2) \\ h_2, & u \in [k_2, k_3) \\ \dots & u \in [\dots, \dots) \\ M, & u \in [k_n, \infty) \end{cases} \quad (6)$$

例如式(7)中当网络负载小于 0.67 时, $T(i, p)$ 的取值等于 M , 表示出口不随拓扑变化而变化; 当网络负载在 0.67~ 1.15 之间时, $T(i, p)$ 的取值等于 h , 满足路由的稳定性是热土豆算法下的稳定性和固定出口选择算法下稳定性的中值, 其中, 路由的稳定性采用控制剖面的敏感性^[1]来定义(参见式(8)), h 的表示见式(9); 当网络负载大于 1.15 时, 出口不随拓扑变化而变化。其中, $p(\delta)$ 表示发生拓扑变化 δ 的概率。 $R_i(G, N)$ 表示将图 G 划分为 N 个区域, 每个区域 $R_i(G, N)$ 表示以点 i 为根节点的最短路径树。如果 N 表示目标网络 p 的可达出口集合, 那么 $RI(G, N, v)$ 表示节点 v 到目标网络 p 的出口选择。 $H(G, N, v, \delta)$ 表示当网络拓扑发生变化后, 节点 v 到目标网络 p 的出口选择是否发生变化, 若发生变化, $H(G, N, v, \delta)$ 的值为 1, 否则为 0。上述示例中 $T(i, p)$ 的计算复杂性是 $O(|\Delta G| |N(G)|^2)$, 其中, $|\Delta G|$ 表示集合 ΔG 的大小, $|N(G)|$ 表示图 G 的节点个数。与 TIE 算法中参数 $\alpha(i, p, e)$ 和 $\beta(i, p, e)$ 的计算在某些情况下是 NP 难问题^[5]相比, ATIE 算法的复杂性优于 TIE 算法。

$$T(i, p) = \begin{cases} M, & u \in [0, 0.67) \\ h, & u \in [0.67, 1.15) \\ M, & u \in [1.15, \infty) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} R_i(G, N) = \{v \mid \forall v \in V, m(v, i) \leq m(v, i'), \forall i' \in N, i \neq i'\} \\ RI(G, N, v) = \{i \mid \forall i \in N, v \in R_i(G, N)\} \\ H(G, N, v, \delta) = \begin{cases} 1, & RI(G, N, v) \neq RI(\delta(G), N, v) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ \sigma^M = \frac{1}{|P|} \frac{1}{|V|} \sum_{\delta \in \Delta G} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} H(G, E(p), v, \delta) P(\delta) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} h = \frac{\hat{d}(G, i, p, b)}{d(G, i, b)} \\ \hat{d}(G, i, p, b) = \frac{\sum_{\delta \in \Delta G} H(G, \beta(p), i, \delta) \times d(\delta(G), i, b) \times P(\delta)}{\sum_{\delta \in \Delta G} H(G, \beta(p), i, \delta) \times P(\delta)} \end{cases} \quad (9)$$

3 模拟实验

将热土豆算法、固定出口选择算法、TIE 算法、ATIE 算法分别进行模拟实现。模拟实验的目的是对比这些算法在路由稳定性、流量分布特性以及它们与网络负载间的关系。假设 ATIE 算法的参数取值符合式(7), TIE 算法中 T 的取值为 2, 路由稳定性用控制敏感性式(8)表示, 流量分布平衡用网络代价^[4]或网络的最大链路利用率表示。采用最大链路利用率衡量网络负载的 ATIE 算法记为 ATIE1, 采用平均链路利用率衡量网络负载的 ATIE 算法记为 ATIE2。

模拟实验采用的网络拓扑结构是 Abilence^[11] 的结构, BGP 路由表以及流量信息是 totem 公布的 Abilence 的 2005 年 1 月 1 日的相关数据^[12]。由于公布的 Abilence 未包括域间链路信息, 因此流量分布平衡的考察对象只包括域内链路的利用率。BGP 的行为模拟采用模拟器 G-BGP^[12], 模拟程序在 totem 提供的流量工程工具平台^[12]上进行开发。

图 3 是这几种算法在不同网络负载下的网络代价值。其中, 横坐标 ω 表示实际流量的倍数, 纵坐标表示各路由算法的网络代价值与热土豆算法下的网络代价值之间的相对差异。模拟结果表明: TIE、ATIE1 以及 ATIE2 算法的网络代价值都介于热土豆算法和固定出口选择算法之间。其中, 热土豆算法的网络代价值最小, 固定出口选择算法的网络代价值最大。ATIE1 及 ATIE2 算法的网络代价值随负载的变化而变化, 网络轻载时, ATIE1、ATIE2 算法与 TIE 算法之间的网络代价仅相差 2%, 网络重载时, ATIE1、ATIE2 算法与 TIE 算法之间的网络代价仅相差 4%。

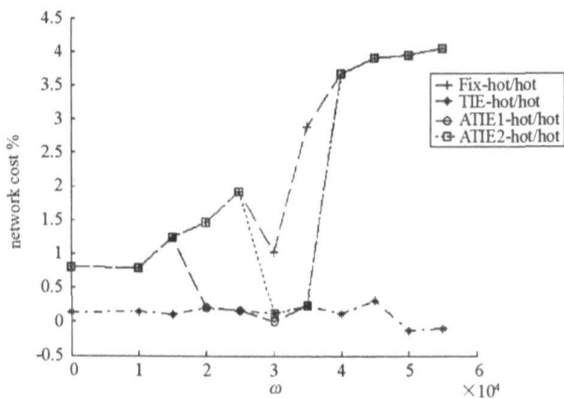


图 3 不同算法下的网络代价

Fig.3 Network cost under different algorithms

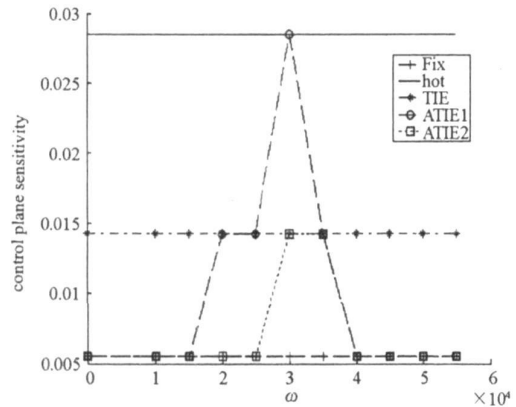


图 4 不同算法下的控制剖面敏感性

Fig.4 Control plane sensitivity under different algorithms

图 4 是这几种算法在不同网络负载下的控制剖面敏感性比较。模拟结果表明: TIE、ATIE1 以及 ATIE2 算法的控制剖面敏感性介于热土豆算法和固定出口选择算法之间。热土豆算法的控制剖面敏感性最大; 固定出口选择算法的控制剖面敏感性最小。ATIE1 以及 ATIE2 算法的控制剖面敏感性随负载的变化而变化, 在网络轻载和网络重载条件下, ATIE1、ATIE2 算法的控制剖面敏感性只有 TIE 算法的 1/3, 而在其他情况下, ATIE1、ATIE2 算法的控制剖面敏感性与 TIE 算法的控制剖面敏感性非常接近。以上模拟实验表明, 与 TIE 算法相比, ATIE 算法能够以牺牲较少的流量平衡为代价, 改进域间路由的稳定性。

参考文献:

- [1] Rekhter Y, Li T. Border Gateway Protocol 4, RFC 1771[S]. SRI Network Information Center, July 1995.
- [2] Tao Y, Kaur H, Kalyanaraman S. Large-scale Network Parameter Configuration Using an On-line Simulation Framework[R]. Technical Report, ECSE Department, Rensselaer Polytechnic Institute, 2002.
- [3] Uhlig S. A Multiple-objectives Evolutionary Perspective to Interdomain Traffic Engineering[C]//Workshop on Nature Inspired Approaches to Networks and Telecommunications(NIANI) in PPSN04, Birmingham, UK, September 2004.
- [4] Bressoud T, Rastogi R, Smith M. Optimal Configuration for BGP Route Selection[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM, 2003.
- [5] Teixeira R, Griffin T, Resende M, et al. TIE Breaking: Tunable Interdomain Egress Selection[R]. Technical Report TD- 69EJBE, AT&T Labs Research, February 2005.
- [6] Elwalid A, Chen J, Low S, et al. MATE: MPLS Adaptive Traffic Engineering[C]//Proc. of IEEE INFOCOM'01, April, 2001.
- [7] Kandula S, Katabi D. TeXCP: Responsive Yet Stable Traffic Engineering[C]//Proc. of ACM SIGCOMM, August 2005.
- [8] Ericsson M, Resende M, Pardalos P. A Genetic Algorithm for the Weight Setting Problem in OSPF Routing[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2002, 6: 299- 333.
- [9] Buriol L, Resende M, Ribeiro C, et al. A Hybrid Genetic Algorithm for the Weight Setting Problem in OSPF/IS- IS Routing[R]. Technical Report TD-5NTNSG, AT&T Labs Research, 2003.
- [10] Teixeira R, Shaikh A, Griffin T, et al. Network Sensitivity to Hot-potato Disruptions[C]//Proc. of SIGCOMM2004, Aug-Sep, 2004, USA.
- [11] Abilene Backbone Network[Z]. <http://abilene.internet2.edu/>.
- [12] TOTEM Project Toolbox for Traffic Engineering Methods[Z]. <http://totem.run.montefiore.ulg.ac.be/download.html>, 2005.

(上接第 27 页)

参考文献:

- [1] Chen G D, Zhou S X, Gu G X, et al. Acrylic-based Polyurethane/Silica Hybrids Prepared by Acid-catalyzed Sol-gel Process: Structure and Mechanical Properties[J]. Macromol. Chem. Phys., 2005, 206: 885- 892.
- [2] Silva N J O, Amaral V S, Bemudez V D, et al. Matrix Assisted Formation of Ferrhydrite Nanoparticles in a Siloxane/Poly (Oxyethylene) Nanohybrid[J]. J. Mater. Chem., 2005, 15(4): 484- 490.
- [3] Giulio M, Akko P, Marco S, et al. Hybrid Nanocomposites Containing Silica and PEO Segments: Preparation Through Dual-curing Process and Characterization[J]. Polymer, 2005, 46(9): 2872- 2879.
- [4] Fu Y Q, Ni Q Q, Masaharu I, et al. Interaction of PMMA-silica in PMMA-silica Hybrids under Acid Catalyst and Catalyst-less Conditions[J]. J. Non-Crystalline Solids, 2005, 351(8- 9): 760- 765.
- [5] Xu P, Wang H T, Tong R, et al. A Two-dimensional Infrared Correlation Spectroscopic Study on the Thermal Degradation of Poly(2-hydroxyethyl acrylate)-co-Methyl Methacrylate/SiO₂ Nanohybrids[J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91: 1522- 1529.
- [6] Sunajadevi K R, Sugunan S. Preparation and Characterization of Nanocrystalline Transition Metal-loaded Sulfated Titania through Sol-Gel Method[J]. Materials Letters, 2004, 58(26): 3290- 3296.
- [7] 张玲, 曾兆华, 杨建文, 等. 溶胶-凝胶法制备光固化聚氨酯丙烯酸酯杂化材料的研究[J]. 功能高分子学报, 2004, 17(3): 442- 446.
- [8] Uhlmann D R, Teowee G. Sol-gel Science and Technology: Current State and Future Prospects[J]. J. Sol-gel Sci. and Tech., 1998, 13: 153- 162.
- [9] 贾正锋, 周静芳, 张治军, 等. 纳米复合含氟聚合物的制备及其涂层性能研究[J]. 塑料工业, 2004, 32(2): 36- 38.
- [10] Tsujimoto T, Uyama H, Kobayashi S. Green Nanocomposites from Renewable Resources: Biodegradable Plant Oil-silica Hybrid Coatings[J]. Macromol. Rapid. Comm., 2003, 24(12): 711- 714.
- [11] Huang Z H, Qiu K Y. The Effects of Interactions on the Properties of Acrylic Polymers/Silica Hybrid Materials Prepared by the In-situ Sol-gel Process[J]. Polymer, 1997, 38(3): 521- 526.
- [12] Wenzel R N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water[J]. Ind. Eng. Chem., 1936, 28(8): 988- 994.