

边界网关协议收敛问题研究综述

郭 辉,常晋义

(常熟理工学院 计算机科学与工程学院,江苏 常熟 215500)

(guohui@cslg.cn)

摘 要:边界网关协议(BGP)是Internet目前实际使用的主要域间路由协议,但其存在收敛慢等问题,各方面性能无法满足客观需求。详细剖析了BGP收敛问题的产生原因,并对已有的研究工作进行了综述和分析,将目前的BGP收敛问题的解决方案分成调整协议参数、增加新机制和设计新协议三大类。最后,在进一步分析比较的基础上,总结了BGP收敛问题研究的几大趋势。

关键词:边界网关协议;路由收敛;自治系统;外部网关协议;传输控制协议

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A

Survey on convergence problem of border gateway protocol

GUO Hui, CHANG Jin-yi

(School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu Jiangsu 215500, China)

Abstract: Border Gateway Protocol (BGP), currently the core Internet inter-domain protocol in use, is not satisfying in some aspects, such as slow convergence. The root cause of the BGP convergence problem was deeply analyzed, and the current researches on this problem were also summarized. The presented approaches on slow convergence problem of BGP could be broadly categorized into three kinds: adjusting protocol parameters, adding new mechanisms, and designing new protocols. Finally, several major trends of BGP convergence research were concluded based on thorough analysis and comparison.

Key words: Border Gateway Protocol (BGP); routing convergence; Autonomous System (AS); Exterior Gateway Protocol (EGP); Transmission Control Protocol (TCP)

0 引言

边界网关协议(Border Gateway Protocol, BGP)^[1]是一种自治系统(Autonomous System, AS)间的动态路由发现协议,基本功能是在AS之间自动交换无环的路由信息。与开放式最短路径优先(Open Shortest Path First, OSPF)和路由信息协议(Routing Information Protocol, RIP)等内部网关协议(Interior Gateway Protocol, IGP)相对应,BGP是一种外部网关协议(Exterior Gateway Protocol, EGP),并且是目前唯一运行在Internet上的外部网关协议,是现行Internet的实施标准,目前使用的是版本4。在以IPv6为主的下一代互联网体系结构中,BGP仍然有着不可取代的地位^[2]。

BGP是一种基于策略的路径向量协议,利用UPDATE消息实现增量、触发式的路由更新,而不是一般距离向量协议中的整个路由表的周期性更新。当新增加或删除一条路由时,相关UPDATE消息在各AS间传播,并可能引起路由表的改变。整个Internet上所有BGP路由器的路由不断变化最终达到一个一致状态的过程,称为BGP的路由收敛过程。在BGP收敛过程中,分组可能无法到达目的地,进而对用户端到端通信造成影响,因此如何让BGP快速收敛是学术界研究的热点问题。目前的研究表明,BGP协议收到UPDATE消息后在收敛时间方面的表现比人们的期望相差甚远^[3-4]。Labovitz等人^[3]在互联网上做的实验表明,BGP协议在路由取消或路由切换事件发生时的平均收敛时间长达3 min;在最坏的情况

下,这个收敛时间甚至会大于15 min,远远不能满足Internet用户对域间路由协议在收敛性能上的需求。

本文将对导致BGP收敛问题的原因进行分析,并重点阐述目前针对BGP收敛问题国内外学者的一些重要工作。最后,在对这些重要工作分析比较的基础上,总结了BGP收敛问题研究方面的几大趋势。

1 BGP收敛问题分析

Internet是由两万多个相互连通的、处于各种不同机构管理下的AS组成的,它们之间具有复杂的连通结构,并且这种连通结构随时在发生着改变,这给BGP收敛性能带来很大挑战。Internet每天都会产生几十万条的UPDATE消息需要BGP协议处理^[5]。

导致路由变化的原因是故障,由系统或线路维护、硬软件问题、外界干扰或破坏等原因所导致的故障在互联网中大量存在^[6],其中链路故障占了主导地位,并且很大比例的链路故障具有瞬时、抖动的特点,即很多故障持续的时间都较短(小于10 s),并且很多故障会反复发生。这些特性会影响BGP的收敛性能,例如在BGP收敛过程未完成之前反复发生的故障可能导致BGP不收敛。然而,BGP机制自身存在的缺陷才是导致BGP收敛问题的根源。

与域内路由协议类似,BGP收敛过程可以分为三个阶段:故障检测、路由计算和路由传播。然而与域内路由协议不同的是,BGP还是一个基于策略的协议,这也导致了BGP收敛

收稿日期:2010-04-01;修回日期:2010-05-19。

作者简介:郭辉(1969-),男,江苏徐州人,讲师,主要研究方向:计算机网络通信、计算机电力系统仿真;常晋义(1952-),男,山西忻州人,教授,主要研究方向:空间决策支持系统、软件工程。

问题的特殊性。从以上这些方面可以分析出造成 BGP 收敛问题的主要原因有以下四点。

1) BGP 建立在 TCP 协议的基础上可能导致错误的故障检测。与直接发送 IP 分组的域内路由协议不同, BGP 使用 TCP 协议在路由器之间建立对等体关系, 并通过周期性的 KeepAlive 消息来保活。然而, TCP 会话的异常可能造成 KeepAlive 消息的延迟甚至丢弃, 导致 BGP 路由器不必要的路由重计算^[7], 并可能影响多个 AS。

2) BGP 在路由被取消或路由发生切换时会经历较长的路径搜索过程, 延长了路由收敛时间。这种搜索过程不仅仅包括路由计算本身, 也涉及到 BGP 路由在 AS 之间逐跳传递的特性, 这是由 BGP 作为一个路径向量协议的特点决定的。每条 BGP 路由都包含了目的网络的 IP 地址前缀和到达目的网络所要经过的 AS 路径 (AS_PATH 属性)。BGP 路由器存储邻居路由器发送来的路由表, 根据自己所在 AS 的策略从中选择一条作为自己的转发路由, 并发送给她 BGP 对等体。当该转发路由不再可用时, BGP 路由器需要在它的邻居发送来的路由中重新搜索新的转发路由; 或者当该 BGP 路由器又收到一条到达该目的 IP 地址前缀的新路由时, 则需要重新计算最优路由。在这个过程中, BGP 路由器所搜索到的一些路由在收敛过程结束后已经不再可用, 这样延长的搜索过程将导致整个 Internet 上 BGP 路由收敛时间被增大。

3) BGP 协议的某些设计和实现机制会导致路由消息传播时间大大增加。BGP 协议中规定, BGP 路由器向其对等体发送到达同一目的网络路由的最小时间间隔值限定为一确定值 MRAI (Minimum Route Advertisement Interval)。BGP 的这种设计虽然可以在一定程度上减小通信开销, 但同时也增大了路由收敛过程所花费的时间。

4) BGP 策略设置的灵活性和隐蔽性可能导致不收敛。不同的 AS 分别由不同的机构管理, 它们根据自己的需要设置不同的 BGP 路由策略, 具有很大的灵活性。另外, 出于安全性等方面的考虑, 各 AS 的 BGP 路由策略通常不对外公开, 具有很强的隐蔽性。这种特性使得各个 AS 都无法获得全部路由策略信息, 不能判断策略冲突, 有时可能最终导致路由的不收敛。此外, 计算路由的收敛特性具有相当高的复杂性。即使各个 AS 都将自己本地 BGP 路由策略全部公布出来, 判断路由能否全局收敛仍然是一个 NP-Complete 问题或者 NP-Hard 问题^[8]。

2 BGP 收敛问题解决方案

现有的解决 BGP 收敛问题的方案可以分为调整协议参数、增加新机制、设计新协议三类。因为每一类中具体的方案可能针对的是导致 BGP 收敛问题的一个或多个原因, 所以在介绍每一种方案时都将给出该方案改进的是哪些方面, 并从收敛性能的提高、代价、可行性等方面对各方案进行评价。

2.1 调整协议参数

这类方案对 BGP 的内在机制进行优化, 它们并不改变 BGP 协议对外表现的特征, 更不需要底层基础设施的配合, 因此具有实现简单、兼容性好的优点。典型的方案有 Ghost Flushing、路由抖动抑制和一致性断言。

2.1.1 Ghost Flushing

Afek 等人^[9]提出的 Ghost Flushing 方案是一种重要的 BGP 改进方案。RFC 1771^[11]中规定, 只对 BGP 声明新路由的 UPDATE 消息应用 MRAI。也就是说, BGP 路由器向其对等体

通告到达某一目的 IP 地址前缀的路由的最小时间间隔值至少为 MRAI, 而发送取消路由的 UPDATE 消息的时间间隔没有受到限制。Ghost Flushing 机制正是利用了这种对不同类型 UPDATE 消息发送时间间隔规定上的差异, 并提出: 在 BGP 路由发生变化时, 立即发送一个 UPDATE 消息取消之前发布的但现已不可用的旧路由, 之后再发送另一个 UPDATE 消息通告新选择的替代路由。因为第一个取消路由的 UPDATE 消息为发现路由变化后立即发送的, 未受到 MRAI 的限制, 所以它可以通知各 BGP 路由器删除路由表中已经失效的路由, 从而使得无效路由不会在 BGP 路径搜索过程中被错误选择。

Ghost Flushing 通过坏消息快速传播缩短了路由消息传播时间, 通过在声明新路由前撤销旧路由缩短了路由计算时间, 从而有效缩短了 BGP 收敛时间。然而反复发生的故障会影响协议的稳定性。此外, 新的 BGP 协议规范 RFC 4271^[10]中并未明确规定 MRAI 是否适用于 BGP 取消路由的 UPDATE 消息, 因此具体路由器协议实现上可能会有差别, 而这种差别将会限制应用 Ghost Flushing 机制的效果。

2.1.2 路由抖动抑制

路由抖动抑制 (Route Flap Damping, RFD)^[11]是一种已经被广泛使用的用来降低 BGP 路由抖动对 Internet 路由稳定性影响的有效机制。RFD 对持续不稳定的路由和偶尔发生变化的路由进行区分, 并抑制抖动的路由以加快路由收敛。具体来说, 对每条路由都被设置了一定的阈值, 当某条路由的抖动值超过该阈值后, 这条路由将受到惩罚: 在一段时间内这条路由将不会被采用。当这条路由的抖动值回落到阈值以下时才能使用它。

RFD 机制可以减少不必要的路由计算次数, 从而缩短 BGP 收敛的时间。但有研究表明, RFD 机制在有效抑制路由抖动的同时, 也有可能使路由被错误抑制, 甚至有可能导致有效路由长达十几分钟不可用^[12]。此外, 不同路由器上所应用的 RFD 机制之间的相互作用, 也可能使一条刚刚被一台 BGP 路由器解除抑制的路由又被其他 BGP 路由器再次抑制^[13]。

2.1.3 一致性断言

一致性断言^[14]采用了特殊的算法来减少路径搜索以改进 BGP 收敛的性能。当一台 BGP 路由器收到 UPDATE 消息后, 将对收到的多条路由进行比较以区分出无效的路由消息。例如, BGP 路由器 S 收到两条去往前缀 P 的路由, 路径分别为 $\langle A B C \rangle$ 和 $\langle D E B C \rangle$ 。如果第一条路由被撤销, 则第二条路由也不会被采用, 这是因为经过计算可知第二条路径与第一条路径有较高的重复度, 很有可能也是不可行的。这样, 通过识别和删除不可行的路径就能大大减少路由搜索的次数, 即通过缩短路由计算时间来缩短 BGP 收敛时间。但是, 在路由器上实现无效路径检索算法比较困难, 而且这个算法会给路由器增加很多额外的计算开销。

2.2 增加新机制

这类方案在旧的 BGP 的基础上进行修改, 典型的做法是增加新的属性, 因此它们的部署需要许多 BGP 路由器的共同支持, 然而这并不会影响旧的 BGP 的运行。典型的方案为根源原因通知、几种多路径方案和 BGP 快速重路由。

2.2.1 根源原因通知

Pei 等人^[15]提出一种称做根源原因通知 (Root Cause Notification, RCN) 的方法。该方法试图通过在 BGP 的

UPDATE 消息中携带一些新的路由属性,用以指示发生路由更新的原因,即产生此条 UPDATE 消息的原因。这些属性包括:引起路由变化的链路、链路当前状态和一个序号。RCN 可以有效地缓解路由黑洞带来的影响,加快 BGP 收敛速度。

举例来说,如图 1 所示,A、B、C、D 为四个 AS,P 为一个通过 B 可达的 IP 地址前缀。B 向外发布该路由,BGP 收敛后最终 A 的 BGP 路由器中会有两条到达 P 的路径和<C D B>。假如发生故障导致 B 不再能够到达 P,则 B 需要同时向所有的邻居 AS(A 和 D)发送撤销路由的 UPDATE 消息。最终 A 将收到两条撤销路由的 UPDATE 消息:一条是从 B 直接发来的,通告路径失效;另一条是从 C 发来的,通告路径<C D B>失效。由于消息在网络中传输的时间有差距,A 一般不会同时收到这两条撤销消息。假设它先收到了撤销路径的消息,此时它将错误地认为路径<C D B>仍然可用,并将其选为到达 P 的最优路由。这样,在第二条消息到达之前,A 将其所有发往 P 的数据发往 C,然而这也是一条不可用的路径,这些数据都将被丢弃,这就是路由黑洞现象。由于撤销路由的消息往往都需要向多个 AS 通告,这种情况非常常见,这是路径向量的特性决定的。路由黑洞不仅会造成数据包的丢弃,同时还会让 BGP 路由器进行不必要的路径搜索计算。

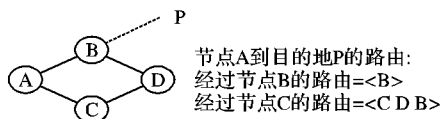


图1 BGP收敛问题示例

在 RCN 中,首先检测到故障的 BGP 路由器将路由发生改变的位置和原因等信息加入了 UPDATE 消息,这样在一定程度上可以避免在路由收敛过程中的路由黑洞问题。例如如图 1 中当 A 的 BGP 路由器收到了第一个撤销消息时,它便可以知道和<C D B>这两条路径都不再可用,而不用等到第二条撤销消息到来。此外,在 RCN 机制中使用序号区分连续发生的相同类型事件:只在收到代表路由真实变化的 BGP 消息时,RFD 才增加惩罚值;如果收到多个 RCN 序号相同的 BGP 消息,RFD 惩罚值只增加一次,这样便能够有效避免 RFD 中的重复抑制问题。

然而,RCN 机制对部署的规模要求较高,如果只有一台 BGP 路由器支持 RCN 则没有任何作用,这使它难以实现灵活的增量部署。并且在 RCN 方案中 BGP 收敛性能直接依赖于 BGP 路由器在网络拓扑中的连接关系,对端自治系统中 BGP 的收敛性改进比较明显。此外,UPDATE 消息中新引入的属性会增加一定的通信开销。

2.2.2 多路径方案

Kushman 等人^[16]提出了一种称为 R-BGP 的 BGP 协议改进方案。R-BGP 方案中为每条路由都预先根据各 AS 的策略计算出几条备用路由,一旦某处发生故障造成某条路由不可用,在等待控制层面搜索新的最优路由的同时,在数据层面立即启用该路由的一条备用路由作为转发数据的路径,不中断数据传输。R-BGP 方案试图保证:只要在路由全部收敛之后源节点和目的节点之间存在符合各 AS 策略的可达路由,那么在收敛过程中源和目的节点之间的通信就始终保持不中断。

R-BGP 方法可以在一定程度上减少受到短暂不连接情形影响的 AS 的数量,减少暂时的断连对整个网络的影响;同时,由于该方法在 UPDATE 消息中也采用了类似 RCN 的根源原因通知的方法,因而既保证了持续的数据转发,也有效避免了路由黑洞。但 R-BGP 方法在备用路由的选择上考虑不够

充分,没有充分考虑备用路径和原路径的关系。例如,如果备用路径与原路径的公共节点过多,可能在某节点失效时,两条路径同时不可用,在这种情况下保护将失效。

类似的多路径方案包括 Gao 等人^[17]提出的备用域间路由方案,它通过给出不同的 BGP 多路径策略配置准则确保 BGP 在任何节点故障或链路故障情况下的收敛。该方案有效的前提是本地 AS 和邻居 AS 的策略在商业关系上能够保持一致。Xu 等人^[18]也提出了一个多路径的域间路由方案(Multi-path Inter-domain ROuting, MIRO),该方案设计了一种 AS 间的动态备用路径协商机制,当协商完成后,可以使用隧道在备用路径转发数据包。

2.2.3 BGP快速重路由

Bonaventure 等人^[19]提出了 BGP 快速重路由方案。该方案为不同类型的客户 AS 预先部署连接到提供者 AS 的隧道,并利用 BFD 技术^[20]检测故障,检测到以后立即启用预先设置的隧道,并抑制 UPDATE 消息的通告。该方案能针对不同隧道技术的特点采用不同的保护方法。此外,该方案还利用 BGP 的 Local Preference 属性进行路由的动态调整,避免了隧道启用引起的路由回路;同时,还提出了 FIB 加速更新方法。

BGP 快速重路由方案消除了由于短期故障引起的不必要路由搜索,与多路径方案相比收敛性能更好。但是该方案在多个并发链路故障的情况下仍然会失效^[21]。此外,它仅适用于短期故障,对于长期故障的隧道保护会给 BGP 边界路由器增加额外的处理代价,尤其当需要对隧道包分片时。所以,BGP 快速重路由方案只有在一定条件下才能提高 BGP 收敛的性能。

2.3 设计新协议

最后一类方案致力于设计全新的协议以取代 BGP,最典型的方案是 Subramanian 等人^[21]提出的混合链路状态和路径向量协议(Hybrid Link-state and path-vector Protocol, HLP)。HLP 是一种全新的域间路由协议,它利用 AS 间的“提供者-客户”关系形成的层次结构,限制不同层次路由信息的可见性,以解决 BGP 路由的扁平结构所引起的路由收敛慢和路由变化全局传播等问题。具体来讲,BGP 以目的网络的 IP 地址前缀为路由粒度,而 HLP 路由的粒度变为一个 AS,从而减少了 Internet 中域间路由的数量。HLP 的信息隐藏特点隔离了局部路由变化,大大提高了协议的可扩展性和路由收敛性。基于目前 Internet 上的 AS 连接拓扑的实验结果表明,HLP 能把传递路由消息的通信开销降低到原来的 1/400^[21]。通过限制路径搜索过程,HLP 的路由收敛延时为线性。然而作为一种全新的域间路由协议,HLP 不支持在 Internet 的逐步部署,这使它在实际网络中的应用受到了相当大的限制。

2.4 方案总结

表 1 显示了现有方案对造成 BGP 收敛问题的各项原因进行的不同程度的改进,并对多种 BGP 收敛问题解决方案在路由可用性(例如路由黑洞会降低可用性)、路由稳定性、计算或通信开销以及部署难度等方面的性能进行了比较。

从表中可以看出:对故障检测方面的改进不多,多数方案都维持了现有的机制;提高路由计算性能、缩短路径搜索过程是人们较为关注的热点问题,有较多研究成果;路由消息传播方面的改进较为困难,这是由路径向量协议的特点决定的,对它的改进关系到路由稳定性问题,或需要设计新的协议;防止不收敛的问题也有一定的研究,但还没有从根本上找到避免策略冲突的方法。此外对路由可用性和稳定性都有所提高的方案需要一定的计算或通信开销,或者在部署方面有一定难度。

表 1 BGP 收敛问题解决方案性能比较

类别	方案	故障检测	路由计算	路由消息传播	防止不收敛	路由可用性	路由稳定性	计算、通信开销	部署
调整 协议 参数	Ghost Flushing	维持	改进	改进	维持	提高	降低	维持	支持增量
	路由抖动抑制	维持	改进	降低	维持	降低	提高	维持	支持增量
	一致性断言	维持	改进	维持	维持	提高	维持	增大	支持增量
增加 新机制	根源原因通知	维持	改进	维持	维持	提高	维持	增大	较难增量
	多路径	维持	维持	维持	改进	提高	提高	增大	一定条件
	BCP 快速重路由	改进	维持	维持	改进	提高	提高	增大	一定条件
新协议	HLP	维持	改进	改进	维持	提高	提高	减小	不可增量

3 BGP 收敛问题研究的发展趋势

从 Internet 发展的特点和对路由的需求,以及目前对 BGP 收敛问题的国内外研究成果来看,BGP 收敛问题的研究和域间路由协议的发展具有以下特征。

1) 不仅仅关注路由收敛问题,应当同时考虑到路由可用性和稳定性,这两个性能与端用户直接相关,是最终要解决的问题。特别是当前 BGP 路由表前缀数量巨大且增长迅速,一些路由器扩展技术例如 Route Reflector^[22]虽然能够通过减少路由的计算提高路由的收敛性能^[23],但是也不能忽视 BGP 中采用 Route Reflector 可能会引起的路由震荡^[24]。

2) 新的方案或域间路由协议必须支持在现有互联网中逐步部署,并能与 BGP 交互,传递网络层可达性信息。因为任何时候 Internet 都不可能完全停下来以在所有路由器上部署某个协议,否则再好的研究也只能停留在实验阶段,无法得到广泛应用。

3) 路径向量协议受到自身内在特点的限制,不能使路由在规模不断增大的互联网中快速收敛,新的 BGP 机制或域间路由协议要想提高路由收敛速度,必须在一定程度上突破路径向量协议的限制。

4) AS 间连接变得越来越复杂是 Internet 的重要发展趋势,利用丰富的连接,AS 可以灵活地选择路由,同时,使用多条转发路由能够迅速完成路由切换。新的 BGP 机制或域间路由协议如果能充分利用 Internet 丰富的连接资源,可能在提供路由收敛性能方面会产生更好的效果。

参考文献:

- [1] REKHTER Y, LI T. RFC 1771, A border gateway protocol 4 (BGP-4) [S]. IETF, 1995.
- [2] 徐格,徐明伟,吴建平,等.面向 IPv6 的边界网关路由协议 BGP4+ 的设计与实现 [J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24 (11): 1898 - 1903.
- [3] LABOVITZ C, MALAN R G, JAHANIAN F. Internet routing instability [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(5): 515 - 527.
- [4] LABOVITZ C, AHUJA A, BOSE A, *et al.* Delayed Internet routing convergence [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9 (3): 293 - 306.
- [5] HUSTON G. The BGP report for 2005 [EB/OL]. (2006 - 06) [2010 - 02 - 18]. <http://www.potaroo.net/ispool/2006-06/bgp-upds.pdf>.
- [6] MARKOPOULOU A, IANNACONE G, BHATTACHARYYA S, *et al.* Characterization of failures in an IP backbone [C]// Proceedings of INFOCOM. Washington, DC: IEEE, 2004: 2307 - 2317.
- [7] WANG FENG, GAO LIXIN, WANG JIA, *et al.* On understanding of transient interdomain routing failures [C]// ICNP 2005: 13th IEEE International Conference on Network Protocols. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 30 - 39.
- [8] GRIFFIN G T, WILFONG G. An analysis of BGP convergence properties [J]. Computer Communication Review, 1999, 29(4): 277 - 288.
- [9] AFEK Y, BREMLER-BARR A, SCHWARZ S. Improved BGP convergence via ghost flushing [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(10): 1933 - 1948.
- [10] RFC 4271, A border gateway protocol 4 (BGP-4) [S]. IETF, 2006.
- [11] RFC 2439, BGP route flap dampening [S]. IETF, 1998.
- [12] MAO Z M, GOVINDAN R, VARGHESE G, *et al.* Route flap damping exacerbates Internet routing convergence [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(4): 221 - 233.
- [13] ZHANG BEICHUAN, PEI DAN, ZHANG LIXIA, *et al.* Timer interaction in route flap damping [C]// ICDCS: Proceedings of 25th International Conference on Distributed Computing Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 393 - 403.
- [14] PEI DAN, ZHAO XIAOLIANG, WANG LAN, *et al.* Improving BGP convergence through consistency assertions [C]// Proceedings of INFOCOM. Washington, DC: IEEE, 2002: 902 - 911.
- [15] PEI DAN, AZUMA M, MASSEY D, *et al.* BGP-RCN: Improving BGP convergence through root cause notification [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 2005, 48(2): 175 - 194.
- [16] KUSHMAN N, KANDULA S, KATABI D, *et al.* R-BGP: Staying connected in a connected world [C]// NSDI'07: Proceedings of 4th USENIX Symposium on Networked Systems Design & Implementation. Berkeley: USENIX Association, 2007: 341 - 354.
- [17] GAO LIXIN, GRIFFIN G T, REXFORD J. Inherently safe backup routing with BGP [C]// Proceedings of INFOCOM. Washington, DC: IEEE, 2001: 547 - 556.
- [18] XU WEN, REXFORD J. MIRO: Multi-path interdomain routing [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 171 - 182.
- [19] BONAVENTURE O, FILSFI C, FRANCOIS P. Achieving sub-50 milliseconds recovery upon BGP peering link failures [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5): 1123 - 1135.
- [20] KATZ D, WARD D. Bidirectional forwarding detection [S/OL]. [2009 - 03 - 05]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-bfd-base-09.txt>.
- [21] SUBRAMANIAN L, CAESAR M, EE C T, *et al.* HLP: A next generation interdomain routing protocol [C]// Proceedings of the 2005 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM, 2005: 13 - 24.
- [22] RFC 4456, BGP route reflection: An alternative to full mesh Internal BGP (iBGP) [S]. IETF, 2006.
- [23] 薛建生,王光兴. BGP4 路由反射技术的分析与研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(9): 1480 - 1482.
- [24] BASU A, ONG C-H L, RASALA A, *et al.* Route oscillations in i-BGP with route reflection [C]// Proceedings of SIGCOMM. New York: ACM, 2002: 235 - 247.