

主动网络中基于多代理系统的流量均衡*

徐武平¹, 晏蒲柳², 夏德麟², 吴明², 江浩², 周小平²

(1. 武汉大学 计算机学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 主动网络流量均衡控制 ATEC 是一种在主动网络环境中, 基于多代理 MA 系统的网络性能控制机制。该方法将多路径路由和资源分配相结合, 利用非线性规划启发式算法——多路径等性能策略, 实现网络流量和带宽资源的均衡配置, 从而避免或减少网络拥塞的发生, 达到提高网络性能的目的。着重介绍了 ATEC 的多代理 MA 系统实现, 包括基本算法、一般模型、代理设计和合作模型的设计, 并给出了仿真结果。

关键词: 流量均衡; 多代理系统; 主动网络

中图法分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1001-3695(2005)05-0227-06

Traffic Equilibrium Based on Multi-Agents System in Active Network

XU Wu-ping¹, YAN Pu-liu², XIA De-lin², WU Ming², JIANG Hao², ZHOU Xiao-ping²

(1. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China; 2. School of Electronic & Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract: ATEC (Active Traffic Equilibrium Control) is a mechanism which control network performance based on multi-agents system in active network. ATEC combines multi-path routing with resource allocation, and based on equilateral performance strategy, realizes balance of network traffic and bandwidth resource, so that congestion can be avoided or reduced, and network performance can be improved. In this paper, implementation frame is introduced, including arithmetic, general model, design of agents and cooperating model. Finally, a result of simulation is given.

Key words: Traffic Equilibrium; Multi-Agents System(MAS); Active Network

1 引言

拥塞控制是网络性能管理的一个重要方面, 其根本原因是需求大于供给。但是, 文献[1]中指出, 即使在网络中增加资源也不能解决拥塞, 甚至会加重拥塞的程度。从流量工程的角度来看[RFC 3272], 实现网络流量的均匀分布是解决拥塞的有效方法。传统网络中按照目的地址选路, 路由的核心在于寻找最优/最短路径。目的地址相同的数据包在被转发时, 选择的下一跳也相同, 到达某目的地的路径只有一条(除非有多条成本相同的路径存在)。这样, 网络中可用的其他链路就无法被利用起来, 流量分布很难预测, 实现均衡更不可能, 其结果是导致流量过度集中于最优路径, 使得拥塞不可避免。

许多研究表明采用多路径路由发送数据包, 或采用多备份路径可以平衡网络负荷^[2-6]。文献[3]中, 基于多路径策略, 根据网络拥塞可能性的概率统计值, 计算流量在各个可选路径上的分配比例, 并按照计算的比例决定数据包的传输路径。本文所介绍的流量均衡策略借鉴了类似的多路径路由思想, 并通过相邻节点之间的协作来实现网络流量的均衡分布。

Internet 遵循端到端的原则^[7], 虽然 20 多年的实践证明这种结构是非常成功的, 但由于网络中的节点设备——路由器仅仅执行存储转发功能, 不参与网络管理、资源分配和流量控制, 使得网络性能的优化变得越来越困难。主要表现在: 依靠端系

统进行流量控制, 如 TCP 拥塞控制机制, 当网络规模扩大时, 反馈时间延长, 无法及时作出反应, 造成网络拥塞加重; 资源分配通常在网络边缘进行预分配, 随着网络规模的增大, 资源分配的准确性和合理性难以保证, 并且一旦分配后, 不能随网络状态的变化而变化, 往往造成资源利用率下降。在这种背景下, 新的网络体系结构的研究成为必要, 主动网络(Active Network)^[8,9]是目前已知的一种方向。主动网络的概念在 1994 年由 DARPA 首先提出, 他将传统的存储-转发网络转变为存储-计算-转发网络。在主动网络中, 网络中间节点参与计算, 使得传统网络中一些困难的问题, 尤其是大规模计算问题在主动网络中变得容易解决, 网络节点与节点之间的协作也容易进行。因此, 我们利用了主动网络提供的高效可编程底层环境, 依靠相邻节点之间的协作, 通过分布式计算来实施流量均衡策略, 称为主动流量均衡控制(Active Traffic Equilibrium Control, ATEC)。

ATEC 将带宽资源分配与多路径路由结合起来。一般的多路径路由只根据网络当前的状态, 从多条路径中选择一条或将当前负荷分配到多条路径上去, 缺乏引导网络资源利用的机制。而在 ATEC 中, 引入供给带宽(Supply Bandwidth)的概念, 通过供给带宽的动态分配, 使得网络带宽资源会随着网络负荷的变化而改变, 即当某输入链路流向某目的节点的流量上升时, 带宽利用率也上升, 则增加其供给带宽, 以适应网络需求的增加; 当供给带宽利用率下降时, 表明输入链路流向目的节点的流量减少, 带宽资源相对过剩, 可以减少带宽资源的分配比例。这样, 当出现突发流量时可以使带宽资源得到充分利用。

ATEC 是通过主动路由器中的主动应用(Active Applica-

tion, AA) 来实现的。根据 DARPA 的主动网络体系结构^[10], ATEC 中的主动应用要求具有访问路由器, 获取从队列级到报文头部信息在内的数据的权限, 以及为特定的数据流设置发送过滤器的能力, 并且相邻路由器中的主动应用还需要提供相互合作。为了方便合作, 我们利用多代理技术构建 ATEC 中主动应用的体系结构——一个多代理协作系统 (Multi- Agents System, MAS), 其中每个主动应用都是一个软件代理 (Software Agent, SA)。MAS 能有效地支持分布式计算环境下的协同工作, 特别适合于需要多个不同的问题求解实体相互合作来共同求解某个共同问题的领域。在 ATEC 中, 各个主动节点独立分配本地流量负荷, 它们的共同目标则是优化网络性能, 通过带宽分配来相互合作, 以实现优化网络性能的目的。

2 ATEC 流量均衡的基本算法

网络中流量不均衡通常是由于资源分布的不均衡引起的流量过度汇集而导致的, 这种情况往往发生在两种可能的地方^[13], 即由于链路带宽不均衡而造成的瓶颈链路和由于流量分布不均衡而形成的汇集点。为了减弱和消除这种汇集可能性, 可以采用分配供给带宽的方法, 即让输入链路的总带宽等于当前节点的输出总带宽, 我们把以输出流量为基准, 规定输入链路发送流量的最大能力称为输入链路的供给带宽。

分配供给带宽虽然可以平衡流量, 但是以牺牲吞吐量为代价的。既要平衡流量又不降低吞吐量, 必须提供更多的网络资源, 这就是采用多路径路由的原因。多路径路由使得节点中流向某目的节点的输入路径和输出路径都会出现多条, 这导致两个问题需要解决: 输入总流量如何分配到各输出路径上才能使网络性能最优; 如何分配带宽资源才能使得网络资源的利用更充分, 性能更优? 针对以上两个问题, 我们提出了多路径流量分配算法和供给带宽分配算法:

(1) 多路径流量分配算法, 以本地节点各输出链路的排队延时代表各路径的性能, 采用非线性规划启发式算法, 基于等排队延时 (等费用) 策略, 计算待选路径各输出链路承担的负荷比例。在这种策略中, 我们认为使得各个输出链路的排队延时相等的分配比例是一组近似最优解的解, 此时局部网络性能近似最优。需要说明的是, 为了使流量的分配既具有动态性又具有稳定的特点, 我们采取了周期分配的方法。在每个周期中, 流量分配比例保持不变, 而在前后不同的周期内, 分配比例又随网络状态的变化而变化。

(2) 供给带宽分配算法包括两个阶段, 在初始化时, 进行供给带宽的预分配, 根据输出带宽规定输入带宽。在各周期中, 根据上一周期的供给带宽利用率分配当前周期的各输入链路的供给带宽, 使带宽分配随网络流量的变化而动态改变, 称为动态分配阶段。动态分配的目标是使本周期供给带宽利用率达到或高于上一周期的平均水平, 对于上周期带宽利用率高于平均水平的链路, 在本周期将获得更多的供给带宽; 而利用率低于平均水平的链路, 将减少供给带宽的分配。经过动态分配之后, 仍然可能出现流量汇集, 这主要是由于到达某个目的节点的输入供给带宽可能大于输出供给带宽。大量实验表明, 并不是只要输入大于输出就一定导致拥塞, 相反, 输入在一定程度上大于输出有利于提高带宽资源的利用。只有在严重时才会导致流量聚集, 出现拥塞。此时, 可以利用拥塞抑制机制对供给带宽的分配进行必要的调整。

(3) 拥塞抑制算法, 通过计算相邻节点之间的相对拥塞系

数 μ 来进行拥塞控制的一种机制, 相对拥塞系数被定义为输出队列平均排队延时与输入队列平均排队延时的比值。由于计算输出与输入队列平均排队延时的时候, 使用了刚才分配的供给带宽作为参数, 实际上是对下一周期可能出现的排队延时的估计值。因此相对拥塞系数也是对未来拥塞状态的一个估计。根据相对拥塞系数判断拥塞可能出现在相邻节点中的哪一个, 当情况严重时, 对带宽的动态分配结果进行调整, 达到拥塞抑制的目的。完整的 ATEC 算法如图 1 所示。

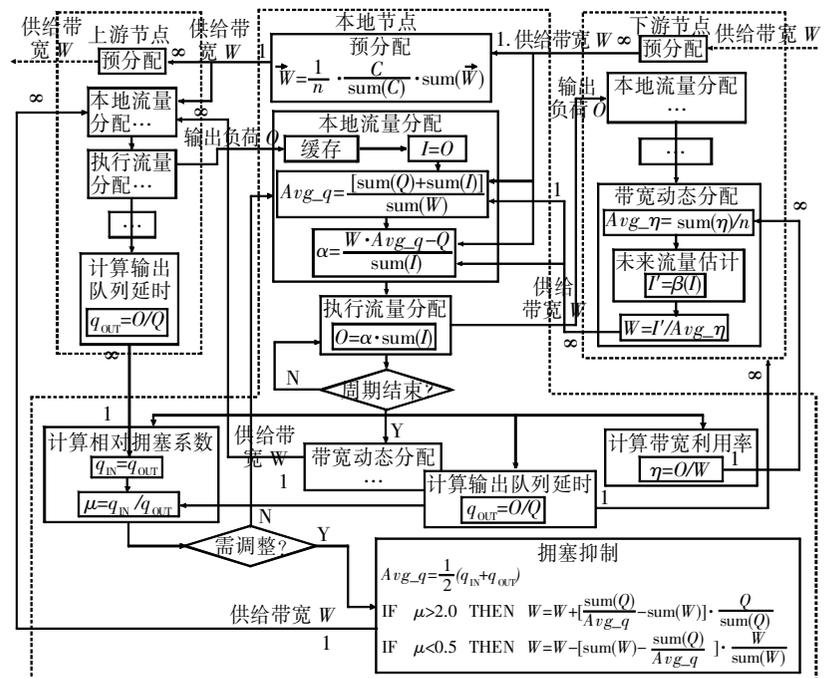


图 1 ATEC 的算法描述

图中主要参数说明: W 为下游节点分配给本地节点各输出链路的供给带宽; I 为各输入链路的输入流量; O 为各输出链路的输出流量; Q 为本地节点各输出链路的队列长度; Avg_q 为本地节点平均排队延时; α 为本地节点各输出链路承担的负荷占总负荷的比例; n 为上游节点个数; C 为链路容量。

3 多代理系统模型

3.1 系统分析——一般模型

ATEC 旨在通过分布式计算来实施流量均衡, 涉及带宽资源分配和流量负荷分配两个方面。为了完成流量均衡的目标, 将输入流量划分为流 (Flow)。这里, 将流定义为经过某网络节点, 具有相同目的节点 (Internet 中就是具有相同的 IP 前缀) 的一系列数据报, 流是主动节点路由器进行流量均衡的基本单位。每一流的流量均衡是通过多路径流量分配、供给带宽分配和拥塞抑制三者协同工作而完成的。因此在 ATEC 的 MA 系统中参与协同的 SA 有三种, 分别是:

(1) 流量分配代理 (Traffic Distribution Agent, TDA)。TDA 主要在本节点根据下游节点分配的供给带宽管理流量的分配。另外, TDA 还协助 CRA 完成拥塞抑制, 并为 SBAA 提供输出带宽信息。

(2) 供给带宽分配代理 (Supply Bandwidth Allocation Agent, SBAA)。根据上游节点提供的带宽利用率和本地 TDA 提供的总输出带宽, SBAA 完成带宽的动态分配, 并将供给带宽的分配结果返回上游节点。此外, SBAA 还为本地 CRA 提供信息。

(3) 拥塞抑制再分配代理 (Congestion Restrain Agent, CRA)。根据上游和本地 TDA 提供的队列信息以及本地 SBAA 提供的带宽分配信息, CRA 执行拥塞抑制过程。

在每个主动节点中存在多个流, 每个流都被三个分别属于以上三种类型的代理管理控制。ATEC 的多代理参考模型如图 2 所示。ATEC 流量均衡按周期进行, 每个周期内各 SA 完成一次协同, 由本地 SBAA 根据上游节点提供的资源利用情况, 为上游节点的 TDA 分配带宽资源, 然后再由本地 CRA 根据本地节点与上游节点的相对拥塞程度调整带宽资源分配, 防止出现拥塞趋势; 最后各节点中的 TDA 根据下游节点分配的供给带宽和各输出路径当前的排队延时分配输入流量负荷, 确定各路径所承担负荷的比例。

3.2 代理设计

ATEC 中的 SA 主要通过合作完成网络流量的均衡分布, 因此 ATEC 的多代理系统中主要是合作型代理。我们基于英国伦敦大学研制的合作型 Agent 体系结构 ARCHON^[11] 设计 ATEC 的各种 SA。ARCHON 体系结构分为两个层次, 即合作和控制层、领域层(图 3)。

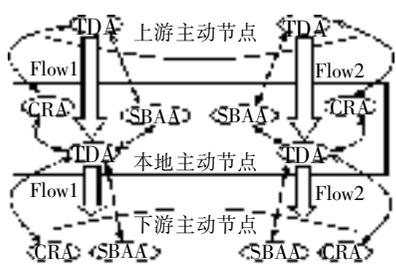


图 2 ATEC 的 MAS 参考模型

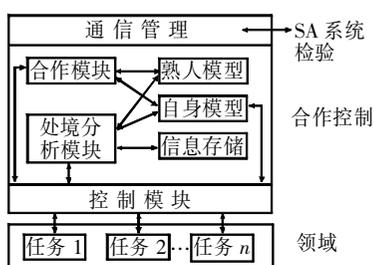


图 3 ARCHON 体系结构

领域层用于执行应用领域的具体任务(如获取链路输出队列长度、设置流的发送过滤器等), 可以是预先存在或特别设计的; 合作控制层可视为操作于领域层之上的元级控制器, 以确保一个 SA 的本地领域层活动于整个 MA 系统中其他 SA 协调一致。元级控制包括: 决定什么任务应在本地执行; 决定何时、如何与其他 SA 合作; 接收来自其他 SA 的合作请求等。

合作控制层有三个主要的处理模块: 控制、处境分析和合作。包含于这些模块中的规则是通用的(独立与应用域)知识, 适用于在大范围真实应用中控制合作活动。控制模块作为与领域层的接口; 处境分析模块制定影响合作模块和控制模块的决策; 合作模块负责管理本地 SA 的社交活动, 以满足处境分析模块提出的请求和为处境模块的决策提供依据。

其他部件提供支持功能。信息存储是一个支持处境分析的参考信息库, 记载领域层任务产生的结果以及本地 SA 关注的协同工作进展状况和中间结果。在 ATEC 中就是一个 SA 的本地知识库 LKB。熟人模型和自身模型是对一个 MA 系统中其他 SA 和本地 SA 的抽象描述, 构成决定 SA 个体行为的应用域特有知识。熟人模型描述熟人(其他 SA)的技能、当前状态和工作负载等, 形成多 SA 协同工作的上下文刻画, 是协调合作活动所必需的基础; 自身模型描述本地 SA 自身拥有的技能, 以及这些技能的结构化行为。

鉴于 ARCHON 的合作和控制层的三个处理模块是通用的, 独立与应用领域的推理知识, ATEC 中代理的设计主要是建立自身模型和熟人模型, 以获取决定各 SA 个体行为的应用域特有知识。

3.2.1 TDA 的设计

(1) TDA 的自身模型

TDA 扮演的角色是在本地节点根据下游节点分配的供给带宽管理流量的分配, 并需要下游 SBAA 提供到达目的节点的供给带宽以及从领域层获取当前周期内流向目的节点的输入流量、多路径路由的输出链路队列状态(排队延时)等数据。

另外, TDA 还协助 CRA 完成拥塞抑制, 并为 SBAA 提供输出带宽信息。基于这些分析, TDA 具有以下技能:

DEAL_WITH_TRAFFIC_EQUILIBRIUM。在每个周期开始时, 接收系统请求, 建立对某个流的流量管理模型, 并实施均衡策略。

DEAL_WITH_DOWNSTREAM_SBAA。向多路径路由所指示的各下游 SBAA 发送当前周期内输出链路的资源利用情况, 请求其分配下一周期的供给带宽。

DEAL_WITH_LOCAL_SBAA。接收本地 SBAA 的请求, 计算所管理的流的输出总供给带宽, 返回给本地 SBAA。

DEAL_WITH_DOWNSTREAM_CRA。通过提供输出链路的供给带宽和队列长度, 请求下游 CRA 再调整供给带宽的分配, 并等待返回结果。

DEAL_WITH_LOCAL_CRA。接收本地 CRA 的请求, 提供输出链路的供给带宽和队列长度。

GET_NODE_DATA。从本地路由器获取当前周期内流向目的节点的输入流量、多路径路由的输出链路队列状态(排队延时)等数据。

COMPUTE_DISTRIBUTE_PROPORTION。根据多路径流量分配算法在每周期开始前实现流量分配。

SET_SENT_FILTER。根据下游 SBAA 提供的供给带宽, 设置所管理流在各输出链路中的子队列的输出带宽(发送速率)。

DISTRIBUTE_TRAFFIC。按照计算所得的分配比例, 将对象流的输入流量分配到多路径路由所指示的输出链路的子队列上去。

自身模型定义了 TDA 本地问题的求解活动, 包括定义各技能的结构化行为知识和将技能加入自身模型。图 4 展示了技能 DEAL_WITH_TRAFFIC_EQUILIBRIUM 行为的结构化表示(技能分支按从左到右的排列决定其选用优先级, 同一分支中的计划按自上而下的顺序执行)。

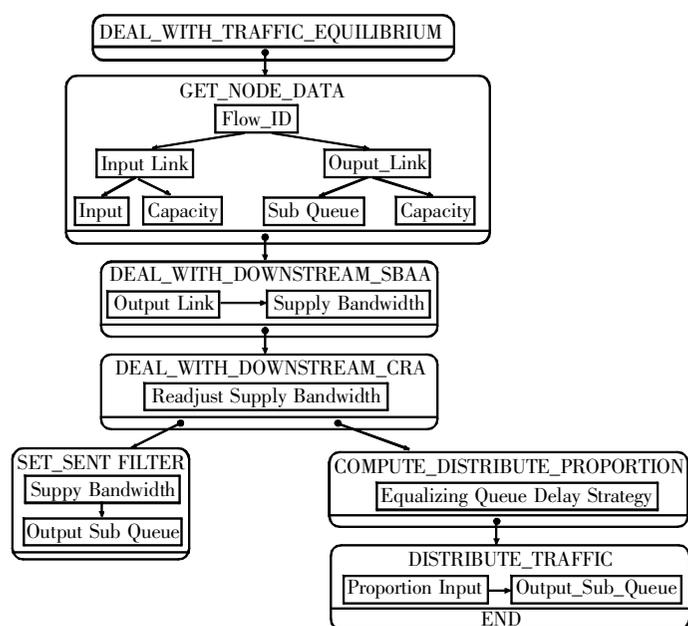


图 4 技能 DEAL_WITH_TRAFFIC_EQUILIBRIUM

(2) TDA 的熟人模型

TDA 的熟人模型中涉及的其他 SA 包括本地的 SBAA, CRA 和下游节点的 SBAA, CRA。主要有以下三种:

提供信息给 LOCAL_SBAA, 提供 SBAA 带宽分配的待分配带宽参考总额。

Name: SUPPLY_BANDWIDTH_INTEREST_FOR_SBAA

Data_Name: SUPPLY_BANDWIDTH

Condition: NIL

提供信息给 LOCAL/DOWNSTREAM_CRA, 为 CRA 提供计算 AVERAGE_QUEUE_DELAY_OUT 和 AVERAGE_QUEUE_DELAY_IN 的依据。

Name: QUEUE_LENGTH_INTEREST_FOR_SBAA

Data_Name: QUEUE_LENGTH

Condition: NIL

Name: SUPPLY_BANDWIDTH_INTEREST_FOR_SBAA

Data_Name: SUPPLY_BANDWIDTH

Condition: NIL

提供信息给 DOWNSTREAM_SBAA, 帮助其计算平均供给带宽利用率——AVERAGE_BANDWIDTH_UTILITY。

Name: THROUGHPUT_INTEREST_FOR_SBAA

Data_Name: THROUGHPUT

Condition: NIL

Name: SUPPLY_BANDWIDTH_INTEREST_FOR_SBAA

Data_Name: SUPPLY_BANDWIDTH

Condition: NIL

3.2.2 SBAA 的设计

(1) SBAA 的自身模型

SBAA 扮演的角色是根据上游节点 TDA 提供的供给带宽利用率(吞吐量、供给带宽), 结合本地 TDA 从下游 SBAA 那里分配到的总输出带宽, 本地 SBAA 完成带宽的动态分配, 并将供给带宽的分配结果返回给上游 TDA。此外, SBAA 还为本地 CRA 提供信息。基于这些分析, SBAA 具有以下技能:

DEAL_WITH_BANDWIDTH_ALLOCATION。接收到上游 TDA(应该是所有的上游 TDA, 如未接到所有的请求, 应启动 QUERY_UPSTREAM_TDA) 要求分配带宽资源的请求后, 建立对某个流的本地资源管理模型, 并实施供给带宽的分配。

QUERY_UPSTREAM_TDA。询问没有及时发出分配带宽资源请求的上游 TDA 是否参加本次资源分配, 如参加请及时发送相关数据。

DEAL_WITH_LOCAL_TDA。向本地管理该报文流的 TDA 请求当前周期内的可用输出供给带宽资源, 如本地 TDA 还未得到下游 SBAA 分配的带宽资源则等待; 如本地 TDA 还未启动 DEAL_WITH_DOWNSTREAM_SBAA 计划, 则请求启动并等待, 直到得到可用输出供给带宽数据。

GET_LINK_DATA。获得某个流的输入、输出链路信息。

DYNAMIC_ALLOCATION。根据供给带宽分配算法在每周开始前实现供给带宽的动态分配。

FEEDBACK_SUPPLY_BANDWIDTH。将 DYNAMIC_ALLOCATION 分配的结果返回给某报文流的所有上游 TDA。

图 5 展示了技能 DEAL_WITH_BANDWIDTH_ALLOCATION 结构化表示。

(2) SBAA 的熟人模型

SBAA 的熟人模型中涉及的其他 SA 包括本地的 TDA 和上游节点的 TDA。为了建立带宽资源分配模型, SBAA 需要知道本地 TDA 有多少带宽资源可供分配, 以及上一周期中上游节点 TDA 管理的各输出链路的吞吐量和供给带宽的统计值。SBAA 的熟人模型中应该有对 TDA 相关技能的信息:

Name: DEAL_WITH_LOCAL_SBAA

Input: FLOW_ID

Results: A set of SUPPLY_BANDWIDTH

Name: DEAL_WITH_DOWNSTREAM_SBAA

Input: FLOW_ID

Results: A set of SUPPLY_BANDWIDTH and THROUGHPUT

3.2.3 CRA 的设计

(1) CRA 的自身模型

CRA 扮演的角色是接收上游节点 TDA 再调整带宽的请求, 通过计算相对拥塞系数 RELATIVE_CONGESTION_COEFFICIENT 来描述所管理的报文流在上游节点和本地节点的拥塞趋势, 并根据相对拥塞系数的值对上游 TDA 的供给带宽进行调整, 是可能出现的拥塞趋势得到抑制。基于这些分析, CRA 具有以下技能:

DEAL_WITH_SUPPLY_BANDWIDTH_READJUST。接收到上游 TDA(应该是所有的上游 TDA, 如未接到所有的请求, 应启动 QUERY_UPSTREAM_TDA) 要求调整带宽资源的请求后, 建立对某个流的相邻节点资源管理模型, 并实施供给带宽的调整, 达到抑制拥塞的作用。

QUERY_UPSTREAM_TDA。询问没有及时发出调整带宽资源请求的上游 TDA 是否参加本次资源调整, 如参加请及时发送相关数据(供给带宽、队列长度)。

GET_LINK_DATA。获得某个流的输入、输出链路信息。

COMPUTE_RELATIVE_CONGESTION_COEFFICIENT。根据定义计算本周期的相对拥塞系数。

READJUST_SUPPLY_BANDWIDTH。根据拥塞抑制算法调整供给带宽的分配。

FEEDBACK_SUPPLY_BANDWIDTH。将调整的结果返回给某报文流的所有上游 TDA。

图 6 展示了 CRA 的技能 DEAL_WITH_SUPPLY_BANDWIDTH_READJUST 行为的结构化表示。

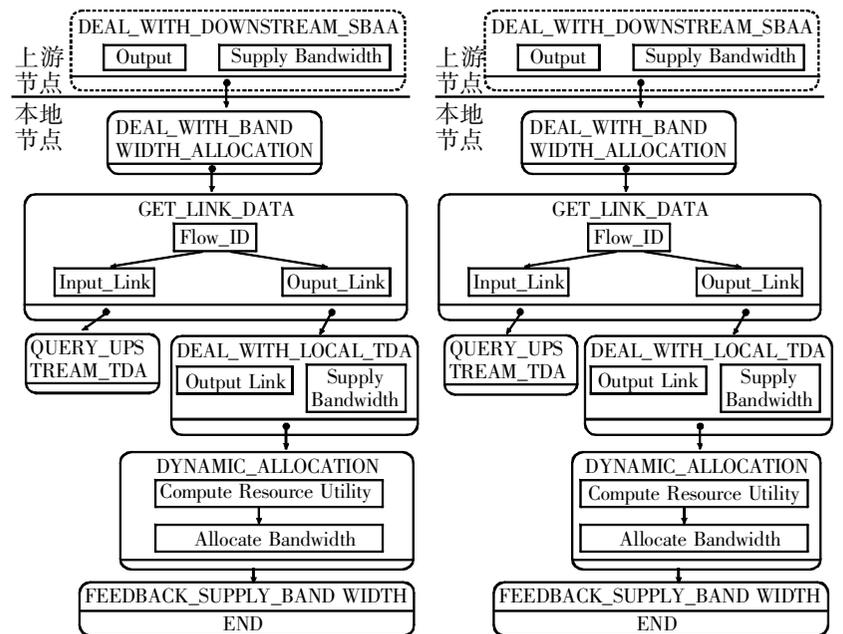


图 5 技能 DEAL_WITH_BANDWIDTH_ALLOCATION 结构化表示

图 6 技能 DEAL_WITH_SUPPLY_BANDWIDTH_READJUST 的结构化表示

(2) CRA 的熟人模型

CRA 的熟人模型中涉及的其他 SA 包括本地的 TDA 和上游节点的 TDA。为了计算相对拥塞系数, CRA 需要知道本地 TDA 各输出队列的长度和供给带宽, 以及上游 TDA 管理的各输出队列的长度和供给带宽。CRA 的熟人模型中应该有关于 TDA 相关技能的信息:

Name: DEAL_WITH_LOCAL_CRA

Input: FLOW_ID

Results: A set of SUPPLY_BANDWIDTH and QUEUE_LENGTH

Name: DEAL_WITH_DOWNSTREAM_CRA

Input: FLOW_ID

Results: A set of SUPPLY_BANDWIDTH and QUEUE_LENGTH

3.3 合作模型

在真实的应用环境中, MA 系统面临的巨大挑战是如何协调多个 SA 的行动以达到协同工作的紧凑一致性。合作的协调要求每个 SA 都确保在合适的时间做正确的事情。然而, 在复杂、动态、环境状态不可预测以及资源受限的情况下实现合作的协调是困难的。因此, 建立合作问题求解的模型是必要的, 合作模型主要描述合作过程正常进展时 SA 如何举止, 以及说明意外事件发生时应如何处理。

3.3.1 TDA 的合作模型

(1) DEAL_WITH_DOWNSTREAM_SBAA。在 TDA 的技能 DEAL_WITH_DOWNSTREAM_SBAA 中, 需要与下游的 SBAA 合作, 完成供给带宽的分配。该合作模型结合了 FIPA 的 Request Interaction 和 Query Interaction 协议模型, 如图 7 所示。

(2) DEAL_WITH_DOWNSTREAM_CRA。与 DEAL_WITH_DOWNSTREAM_SBAA 的合作模型类似, 也采用 FIPA 的 Request Interaction 和 Query Interaction 协议模型相结合。

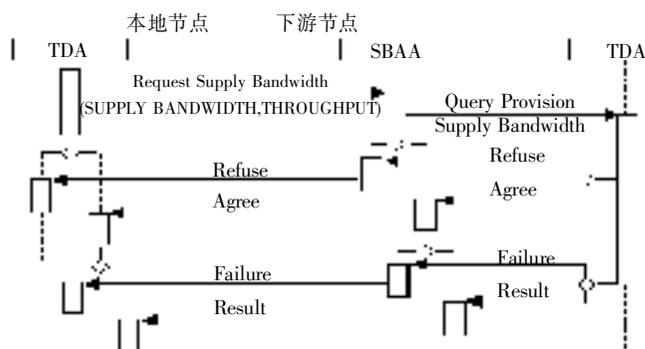


图 7 合作模型 DEAL_WITH_DOWNSTREAM_SBAA

3.3.2 SBAA 的合作模型

(1) QUERY_UPSTREAM_TDA

在 SBAA 在进行供给带宽的分配之前, 需要了解还未发出请求的上游 TDA 是否已经准备就绪, 该合作模型采用了 FIPA 的 Query Interaction 协议模型, 如图 8 所示。

3.3.3 CRA 的合作模型

QUERY_UPSTREAM_TDA。在 CRA 通过供给带宽调整实现拥塞抑制之前, 需要了解还未发出请求的上游 TDA 是否已经准备就绪, 该合作模型也基于 FIPA 的 Query Interaction 协议模型。

4 仿真实验

4.1 基本配置

仿真实验通过对比 RIP 和 ATEC 在网络流量均衡和资源利用两方面的表现, 说明基于 MA 系统的 ATEC 在优化网络性能方面具有相当优势。需要说明的是, 仿真试验摒弃了真实应用实现中的诸多细节。

性能比较主要包括三个方面: 链路的排队延时用来说明网络局部性能的指标; 路径的端到端延时(简单起见, 端到端延时等于路径所经过的各链路排队延时之和, 而不包括链路传播延时和节点的处理时间)是网络总体性能的指标; 整个网络的资源利用率用来说明资源利用情况。图 9 是仿真试验依据的网络拓扑结构图。根据文献[12]中对未来主动 IP 网络的描述, 其中既有传统被动节点又有主动节点, 因此, 在仿真网络环境中, 既配置了 RIP 节点又包含 ATEC 主动节点。简单起

见, 网络中所有节点之间的链路的容量均为 1Mbps, 输入链路为 10Mbps。

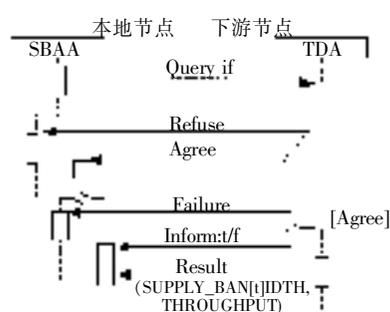


图 8 QUERY_UPSTREAM_TDA 的合作模型

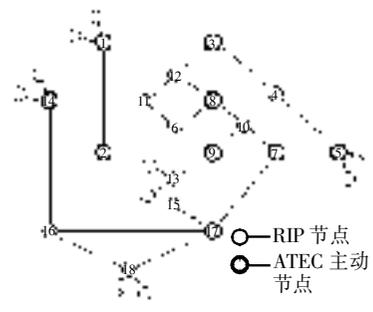


图 9 仿真网络拓扑图

4.2 实验结果

模拟实验中, 我们首先将该拓扑中所有节点全部配制成 RIP 协议, 以一定的负载进行仿真试验, 得到如图 10(a) 所示的各链路排队延时是曲线图, 图中只画出了一些性能较差的链路 (R3 -> R1, R1 -> R2, R14 -> R16, R5 -> R7), 然后再将拓扑中的某些节点配制成具有 ATEC 流量调节能力的主动节点, 输入相同的负载得到的结果如图 10(b) 所示。仍然以上面的链路为例, 可以看出大多数链路的性能明显得到改善, 主要表现在以下几个方面: ATEC 延时峰值 (5.7s) 小于 RIP (7.24s); ATEC 的波峰持续时间小于 RIP, ATEC 各链路在 250s 之后都回落到稳定水平 (1s 左右), 而 RIP 在 400s 之后还有部分链路未回落到稳定水平。

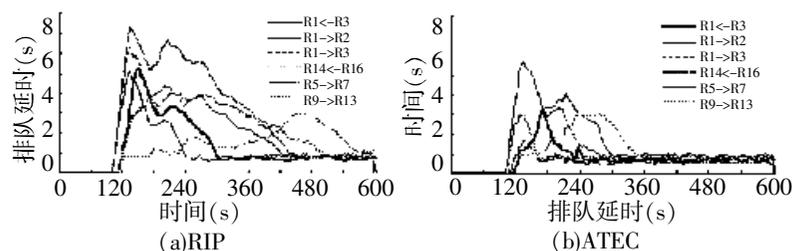


图 10 无流量控制(a)与 ATEC(b)的链路性能对比

再来比较一下两者的端到端性能。由于端到端路径较多, 无法一一示例, 这里仅仅比较一条典型路径 R5 -> R14 的性能。按照 RIP 跳数最少原则, R5 -> R14 的路由为 R5 -> R7 -> R17 -> R16 -> R14。这条路径的端延时曲线如图 11(a) 所示时, 峰值为 11.9s 左右, 波峰持续时间为 100s ~ 400s 之间。

而在 ATEC 中, R5 -> R14 的路径有多条, 我们从中选取了四条跳数较少(比最短路径的跳数多 1 ~ 2 跳)的路径, 它们分别是:

R5 -> R14_1: R5 -> R7 -> R17 -> R16 -> R14

R5 -> R14_2: R5 -> R4 -> R3 -> R12 -> R11 -> R14

R5 -> R14_3: R5 -> R7 -> R10 -> R8 -> R6 -> R11 -> R14

R5 -> R14_4: R5 -> R7 -> R10 -> R8 -> R12 -> R11 -> R14

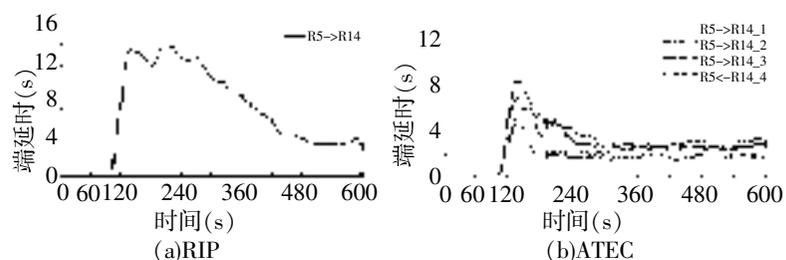


图 11 无流量控制(a)与 ATEC(b)端性能对比

模拟实验结果如图 11(b) 所示, 其中最大峰值端延时为 8.28s 左右, 波峰持续时间从 100s ~ 280s, 之后回落到稳定水平。很明显就 R5 -> R14 的端延时性能而言, ATEC 明显优于

RIP。需要说明的是 R5 - > R14 这条路径的性能改善是最显著的,与此类似的路径还有 R5 - > R13 和 R5 - > R18,其他路径的端延时性能或好于 RIP 或与之相当。

通过上述性能比较,我们可以得出初步结论,具有 ATEC 流量均衡控制的网络性能优于传统的 RIP 的网络性能。

提高资源利用率是 ATEC 的另一目标。在仿真实验中资源利用情况采用网络平均带宽利用率来衡量,平均带宽利用率定义为

$$\bar{U} = \frac{\sum_{e \in E} U(e)}{|E|}$$

式中, e 为网络拓扑中链路(单向链路), E 表示所有链路的集合, $U(e)$ 为链路带宽利用率, $N(e)$ 为链路总数目。

图 12 为 RIP 和 ATEC 模拟实验中各周期的平均带宽资源利用率曲线图。其中 ATEC 的最高利用率为 54.4%, RIP 的最高利用率为 48.2%;此外,ATEC 的带宽利用率在各周期中都比 RIP 高出 6% ~8%。可见 ATEC 的资源利用率得到了一定的提高。

4.3 分析与经验

以上模拟仿真实验中,流量负荷加载到节点 1, 5, 13, 14, 18(图 9)。其中每个输入节点的流量中分别包含以其他输入节点为目的节点的流量负荷,如节点 1 的输入流量分别包含流向 5, 13, 14, 18 的流。输入负荷在 100s ~150s 和 180s ~250s 之间出现两次突发流量,之后在端系统流量控制机制(TCP)下输入负荷减小,稳定在 1.5Mbps ~2.0Mbps 左右,如图 13 所示。

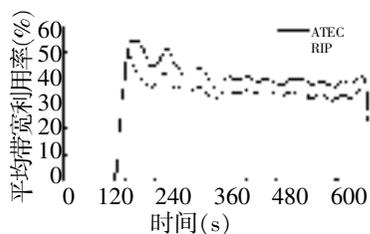


图 12 RIP 与 ATEC 的带宽资源利用率对比

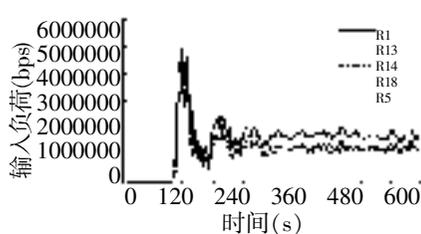


图 13 模拟输入流量负荷

虽然突发流量持续时间很短,并且第二次突发流量很小,但是由于 RIP 按最短路径原则路由,使得各节点的发送能力受到限制,流量只能在路由标指示的输出队列中排队等待,形成流量聚集,表现为链路的排队延时长时间居高不下,网络性能降低。而在 ATEC 的流量均衡机制下,由于采取多路径路由策略,到达同一目的节点的路由不是一个而是多个,因此,流量不是在队列中排队等待,而是在 ATEC 流量均衡分配的机制下分散到各个可能的链路上去,以最快的速度下目的地转发。这样使得链路的排队延时控制在一定范围之内,迅速回落,网络性能得到优化。通过模拟仿真实验,有以下几点体会:

(1) 多路径路由的路径发现很关键。在模拟实验中并不涉及这方面的内容,而是手工设置多路径路由表。我们发现多路径路由表的配置不合理会引起新的汇集点,为了避免这种情况的发生,应给尽量避免多对源—目的路径中链路重叠。

(2) 主动节点的分布也很关键。一般情况下,主动节点应该主要分布在网络中心流量汇集的地方比较合适,另外,在网络边缘输入流量较大的地方(如图 9 中的节点 1 和 5)也应辅助配置一些主动节点。主动节点的分布应该尽量连接成片,方便相互协作,形成一个控制突发流量的缓冲区。

(3) 端到端的流量控制必不可少。从以上分析可以看出,

不管是链路延时还是端到端延时,都必须依靠端系统减少输入负荷,才能得到最终控制。只不过采取在网络中间节点上配置主动应用来平衡流量负荷能够更加迅速地进行反映,避免由于端系统反映不及时而导致严重的拥塞情况的出现。这对于大型网络是很重要的。

5 结束语

本文关注于通过多路径路由和资源分配相结合的方法实现网络流量和带宽资源的均衡配置,从而避免或减少网络拥塞或性能下降的发生,提高网络性能。我们首先说明了流量均衡的基本算法,然后描述了在主动网络中,该方法基于多代理系统的模型结构,最后通过模拟实验分析了 ATEC 对网络性能的影响。虽然,我们的工作才刚刚开始,许多研究还有待深入,但我们认为,ATEC 采用分布式、本地计算模式符合网络技术的发展潮流,具有通信代价小、实现简单、效率较高的优点,在未来主动网络环境中,是很具潜力的流量控制方法。

参考文献:

- [1] aj Jain. Congestion Control in Computer Networks: Issues and Trends[J]. IEEE Network Magazine, 1990: 24-30.
- [2] Nelakuditi S, Zhi-Li Zhang, Tsang R P. Adaptive Proportional Routing: A Localized QoS Routing Approach[C]. Tel-Aviv, Israel: INFOCOM, 2000. 1566-1575.
- [3] Qingming Ma, Peter Steenkiste, Hui Zhang. Routing High-bandwidth Traffic in Max-Min Fair Share Networks[C]. Stanford, California, USA: Proceedings of ACM SIGCOMM 96, 1996. 206-217.
- [4] Peter B Key, Graham A Cope. Distributed Dynamic Routing Schemes [J]. IEEE Communication Magazine, 1990, 54-64.
- [5] Israel Cidon, Raphael Rom. Multi-path Routing Combined with Resource Reservation[C]. Kobe, Japan: INFOCOM 97, 1997. 92-100.
- [6] Guoliang Xue. Optimal, Multi-path End-to-End Data Transmission in Networks[C]. Antibes, France: ISCC 00, 2000.
- [7] J Saltzer, D Reed, D Clark. End-to-End Arguments in System Design [J]. ACM Transactions on Computer Systems, 1984, 2(4): 195-206.
- [8] D L Tennenhouse, et al. A Survey of Active Network Research[J]. IEEE Communication Magazine, 1997, 80-86.
- [9] Jonathan M Smith, Kenneth L Calvert, et al. Activating Networks: A Progress Report[J]. Computer, 1999, 32-41.
- [10] Larry Peterson, Yitzchak Gottlieb, et al. An OS Interface for Active Routers[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 19(3).
- [11] T Wittig, N R Jentings, et al. ARCHON-A Framework for Intelligent Cooperation[J]. IEE-BCS Intelligent Systems Engineering, 1994, 3(3): 168-179.
- [12] Spyros Denazis, Alex Galis. Overview FAIN Programmable Network and Management Architecture-Draft[C]. 2000-2003 FAIN Consortium, 2003.
- [13] Raj Jain. Congestion Control in Computer Networks: Issues and Trends[J]. IEEE Network Magazine, 1990, 24-30.

作者简介:

徐武平(1970-),男,讲师,博士生,从事网络通信、性能管理和信息系统和数据库等方面的研究与开发;晏蒲柳,女,教授,博士生导师,从事网络通信研究;夏德麟,男,教授,从事人工智能、网络与通信、信息系统等方面的研究;吴明、江浩、周小平,博士生,主要从事网络通信、信息系统方面的研究与开发。