

一种智慧协同网络多参数的多路径路由算法

苗春浇, 苏 伟, 张宏科, 周华春

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 多路径路由技术采用多条路径同时传输, 作为优化资源配置和负载均衡的重要技术, 在路由可靠性、QoS 路由、传输效率等多方面比单路径传输具有优势. 现有互联网网络资源配置和路由机制相对静态和僵化, 导致多路径技术的发展存在发展的局限性. 现有多路径技术考虑在路由层面不利于多路径路由选择和计算, 难以保证传输性能, 降低网络传输效率. 智慧协同网络能够动态感知网络需求, 灵活适配网络资源, 更好的支持路由可扩展性. 本文在智慧协同网络架构下提出了一种智慧协同网络多参数的多路径路由算法. 该算法制定了智慧协同网络多参数的多路径路由协议, 对网络性能参数 CPU 占用率、往返时延 (RTT)、带宽进行加权计算得到路径权重值, 根据权重值进行流量分配. 采用图论理论对网络流量分配及模型进行了分析. 并在 Mini-Net 平台上进行了开发和实验, 结果表明, 该算法能够优化网络配置, 减小往返时延, 提高网络吞吐量, 从而提高网络性能, 实现负载均衡.

关键词: 智慧协同网络; 多路径; 多参数; 路由协议; 流量分配

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)10-1881-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.001

A Multi-Parameter Multipath Routing Algorithm of Smart and Cooperative Networks

MIAO Chun-jiao, SU Wei, ZHANG Hong-ke, ZHOU Hua-chun

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: As an important technology to optimize the allocation of resources and load balancing, multipath routing has advantage of reliability in routing, QoS routing, transmission efficiency and other aspects than single path. The current Internet architecture and mechanisms have a low resource utilization, poor network security, poor scalability, and high-energy consumption, which is not conducive to the advancement of multipath. Meanwhile, the disadvantage of the current multipath techniques was the path selection and calculation. Multipath algorithm only chose the path considering the network performance and parameters limitedly, which may choose the congestion path. In this paper, we proposed a multi-parameter multipath routing protocol of smart and cooperative networks, and analyzed the flow distribution by the graph theory. We distributed the flow by the path weight, and the weight was determined by CPU utilization, RTT and bandwidth. We developed and experimented the algorithm on the Mini-Net, and the simulations revealed that the algorithm could achieve wisdom together the multipath data transmission function of the network, and ensure transmission performance of the chosen flow distribution. In addition, it was easy to implement, effective to save the network resources and optimized the network configuration, improved the efficiency of network transmission.

Key words: smart and cooperation network; multipath; multi-parameter; routing protocol; traffic assignment

1 引言

多路径技术采用多条路径同时传输, 可在一定程度上提高负载均衡和优化资源配置, 在路由可靠性、QoS 路由、传输效率等多方面都具有优势. 然而现有多路径技术考虑的网络性能参数存在局限性, 在路由层面不利于多路径路由选择和计算, 存在选择网络拥塞路径的

可能, 难以保证选择路径的传输性能, 降低了网络传输效率.

现有互联网采用“沙漏模型”的设计思想, 将“资源和位置”、“控制和数据”和“身份和位置”进行三重绑定, 缺乏支持智慧网络的有效机制^[1-5], 存在资源利用率低、网络安全性和可扩展性差、能耗高等弊端. IP 网、内容中心网络^[9]等, 不能自动感知业务的需求, 也不能根

据网络状态智能选择路由,在路由层面不利于多路径路由由选择和计算,多路径路由由算法考虑的网络性能参数存在局限性,存在选择网络拥塞路径的可能,难以保证选择路径的传输性能,降低网络传输效率.同时在地址管理上需要全局协调机制,不便于部署新的网络.

智慧协同网络采用“三层”、“两域”的设计思想,是满足未来网络“高速”、“高效”、“海量”、“泛在”等通信需求的网络体系结构;通过动态感知网络状态、智能匹配服务需求选择合理的网络族群及其内部组件来提供智慧化的服务,并通过引入行为匹配、行为聚类、网络复杂行为博弈决策等机制来实现资源的动态适配和协同调度,大幅度提高网络资源利用率,降低网络能耗等,显著提升了用户体验,克服了现有互联网的弊端^[2-5].目前,智慧协同网络架构中仍缺乏一种有效支持多路径路由的机制.智慧协同网络采用标识化的体系结构,层次化的网络结构有助于多路径路由算法的实现.

本文针对智慧协同网络的特点提出了一种智慧协同网络多参数的多路径路由算法,该算法制定了智慧协同网络多参数的多路径路由协议,通过路由注册通告消息描述网络拓扑结构和路径参数,生成多路径路由表,对网络性能参数 CPU 占用率、往返时延(RTT)、带宽进行加权计算得到路径权重值,根据权重值进行流量分配,并采用图论理论对网络流量分配及模型进行了分析. Mini - Net 平台上进行了开发和实验,仿真实验结果表明,该算法能够实现智慧协同网络数据的多路径传输功能,根据往返时延 RTT、带宽和 CPU 占用率网络性能参数动态分配流量,优化网络配置,减小智慧协同网络的往返时延,提高网络吞吐量,从而提高网络性能,实现负载均衡.

2 多路径技术和智慧协同网络

2.1 多路径路由技术

相对于单路径路由而言,多路径技术^[6-8]能够有效节省网络资源,优化网络配置,提高网络传输效率.多路径连接具有自修复能力,同时使用多条路径进行数据传输,路径间建立一种互为备份关系,某条链路发生故障时,能够使用其它路径继续发送数据,而连接不会中断.多路径传输的主要优势就是带宽聚合,满足人们对数据业务下载速率和网络带宽的需求.

现有典型的多路径路由技术有 WCMP^[10] 和 ECMP^[10]、策略路由^[11] 和多拓扑路由^[12] 等技术,这些技术在现有路由协议基础上是根据链路来分配流量的. WCMP 技术根据路径状态信息加权分配多路径数据流量,流量分配灵活; ECMP 技术为等比例分配多路径数据流量.策略路由技术是在路由器转发数据报文时,根

据配置规则对报文进行过滤,匹配成功则按照转发策略进行转发,增加了路由选择的灵活性.多拓扑路由由技术是一种按照拓扑结构进行流量分配的多路径技术.

2.2 智慧协同网络

智慧协同网络^[2-4] 结构模型如图 1 所示.采用“三层”、“两域”的总体架构,实现资源的动态适配,以有效解决网络可扩展性、移动性和安全性.三层即智慧服务层、资源适配层和网络组件层;两域即实体域和行为域.

“实体域”使用服务标识 SID(Service ID)来标记一次智慧服务,使用族群标识 FID(Family ID)来标记一个族群功能模块,使用组件标识 NID(Node ID)来标记一个网络组件设备;“行为域”使用服务行为描述 SBD(Service Behavior Description)、族群行为描述 FBD(Family Behavior Description)和组件行为描述 NBD(Node Behavior Description)来分别描述实体域中服务标识、族群标识和组件标识的行为特征.

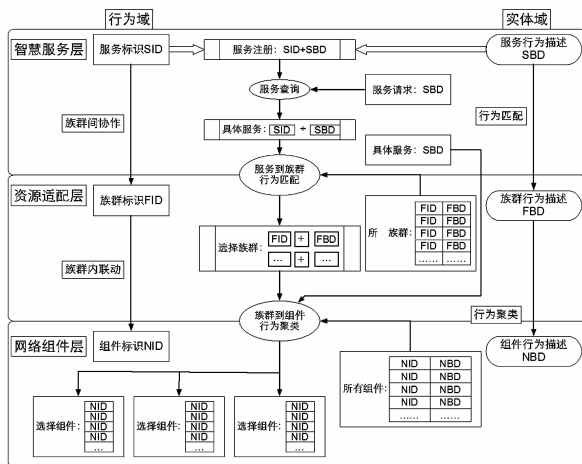


图 1 智慧协同网络结构模型

典型的智慧协同网络服务存储机理如图 2 所示,包括控制层面和数据层面.控制层面包括记忆子模块和控制子模块,其中记忆子模块用来对网络的状态信息进行认知,存储网络的可达性信息、路径状态信息、路径可靠性信息、组件自身性能信息等,并从数据层面提取服务标识和服务行为描述信息,进行存储;控制子模块则根据记忆子模块的信息,对数据层面的转发行为进行控制.数据层面包括数据层记忆模块和转发模块,数据层记忆模块用来对服务的内容进行存储,转发模块用于转发数据.当数据流经转发模块时,数据层记忆模块可以根据控制层面的要求,存储相应的服务内容,并进一步将该服务的服务标识和服务行为描述信息通告给控制层面.当相同的服务再次被请求时,网络可以根据控制层面的信息,从数据层记忆模块提取数据,就

近为用户提供所需服务,从而避免从远端获取服务导致的能耗高、延时大等问题,进而在有效提升用户体验的同时,实现网络的节能。

服务请求者向服务提供者请求服务过程:首先服务请求者根据路由表和映射关系查询服务提供者的 SID 和 NID,再发送 GET(内容请求)包请求某种服务,在相关路由器上记录 GET 包来时的路径并存储在 PGT (Pending Get Table);服务提供者接受到 GET 包后,经过处理,返回 DATA(内容响应)包,DATA 包的返回路径根据路由器上记录 GET 包的路径逆向返回,并删除相应的 GET 包的 PGT 条目。

3 智慧协同网络多参数的多路径路由算法

3.1 路由协议

智慧协同网络多参数的多路径路由服务拓扑如图 3 所示。A 和 B 为两个客户端;R1-R16 为智慧协同网络中的路由设备;S1-S3 为提供网络服务的服务器;SID1-SID5 是网络中提供的五种服务的标识,分别存储在 S1-S3 三个服务器中;Path1-Path9 为客户端到三个服务器的路径,这些路径是根据网络中的路由可达信息得到的。

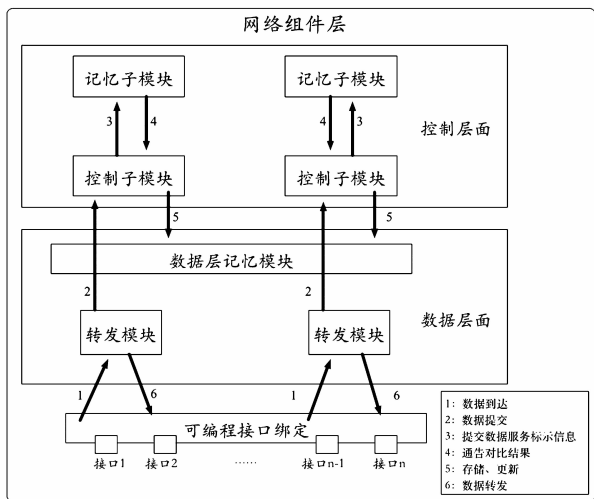


图2 智慧协同网络服务存储机理

当 A 请求内容标识为 SID1 的服务时,先向网络发送请求 SID1 服务的 GET 包,路由器经过服务查询、服务到族群行为匹配、族群到组件行为聚类过程,通过查询服务标识和组件标识映射表得到 SID1 服务存储在 S1 和 S3 上,再查询 S1 和 S3 的 NID,根据路由表查询到 Path1, Path2 和 Path4 三条路径,按照路由表下一跳路径进行转发.路由表中的优先级是根据计算出的路径权重值 C 来判定, C 越大标识路径开销越大,优先级越低。

智慧协同网络多参数的多路径路由协议交互过程

如下:

- (1)路由器之间发送 hello 报文建立邻接;
- (2)邻接路由器间发送路由注册通告消息,并广播至全网;
- (3)各路由器根据路由注册通告消息获得网络拓扑信息,计算路径权重值,得到多路径路由,生成多路径路由表。

路由注册通告消息格式如图 4 所示。

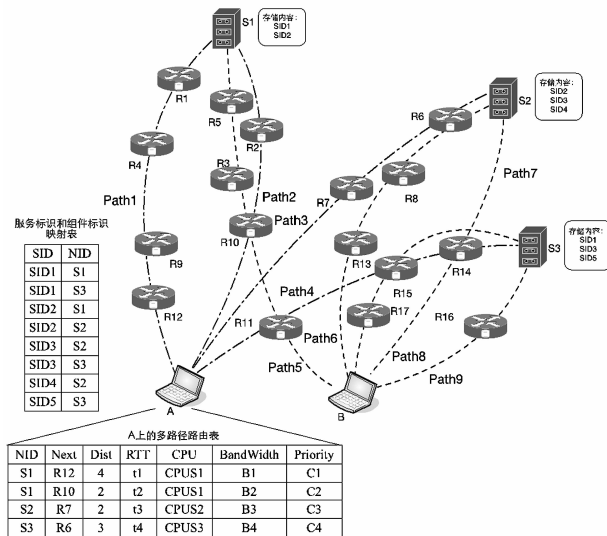


图3 智慧协同网络多参数的多路径路由服务拓扑

Age	Options	Type
Advertising Router		
Sequence Number		
Checksum	Length	
NID		
{SID}		
Information		

图4 路由注册通告消息包头格式

Age:路由注册通告消息的生存时间,最大生存时间为 3600s,刷新时间为 1800s,超过了 3600s 就会被从数据库中删除;Options:与 hello 包的 Option 相同;Type:路由注册通告消息的类型;Advertising Router:路由注册通告消息起点路由器的 NID;Sequence Number:一个连续的序列号,用于检测旧的或者副本路由注册通告消息,最大为 0x7FFFFFFF,最小为 0x80000001,0x80000000 被保留;Checksum:路由注册通告消息校验和,在泛洪或缓存时路由注册通告消息可能损坏,通过校验和来校验其可靠性;NID:节点标识,用于标识节点的地址;SID:服务标识,用于标识节点提供的服务,是路由器可提供的服务标识的集合;Information:链路基本信息,包括 CPU 占

用率、链路往返时延迟和带宽等信息。

智慧协同网络多参数的多路径路由协议,将反映链路状态的路由注册通告消息传递给一个族群内的所有路由器,每个路由器都存有的全网拓扑结构和链路参数,以此计算多路径路由。与计算距离矢量的路由协议不同,计算距离矢量路由协议的路由器是将部分或全部的路由表传递给相邻的路由器,易出现路由环路,不易于多路径路由计算。

智慧协同网络多参数的多路径路由协议采用路由注册通告消息来反应链路状态,通过统一的多路径路由协议交互路由信息的族群。族群中的路由器都维护一个相同的描述该族群拓扑结构的数据库,数据库中存放相应链路的状态信息,通过数据库来计算多路径路由表。

3.2 路径权重值

多路径路由算法考虑了 CPU 占用率、往返时延(RTT)和带宽 3 个性能参数。若链路被使用并可达,路由器可测量得到其链路的性能参数,通过路由注册通告消息中的 Information 选项扩散到整个族群,存储在路由器维护的数据库中。脚标 i 用于标记路径的序号,脚标 j 用于标记链路的序号,第 i 条路径的第 j 条链路性能参数为 CPU_j 、 RTT_j 和 B_j , CPU_j 表示平均 CPU 占用率, RTT_j 表示往返时延, B_j 表示整条路径的带宽。若每条链路的 CPU_j 、 RTT_j 和 B_j 是已知的,则 t 时刻的第 i 条路径的第 j 条链路的权重值 C_{ij} 为

$$C_{ij}(t) = L_{CPU_j, RTT_j, B_j}(t) \quad (1)$$

$$= \lambda L_{CPU_j}(t) + \mu L_{RTT_j}(t) + \gamma L_{B_j}(t) + \epsilon_{ij}^2$$

公式(1)中, L_{CPU} 、 L_{RTT} 和 L_{B_j} 分别为关于 CPU 占用率、往返时延和带宽的函数, λ 、 μ 和 γ 分别其影响因子, ϵ_{ij}^2 为第 i 条路径的第 j 条链路的松弛因子。由于网络状态是随时变化的,所有该函数是关于时刻 t 的函数。这些参数由内容请求的服务标识选项中携带,根据具体服务需求改变其参数值。

q_i 表示第 i 条路径的链路总数,则 t 时刻第 i 条路径的权重值 C_i 可表示为

$$C_i(t) = \sum_{j=1}^{q_i} C_{ij}(t) \quad (2)$$

计算出的参数 C_{ij} 通过路由注册通告消息中的 Information 选项扩散至整个族群路由器,路由器再根据 C_{ij} 计算出 C_i , 存放在路由表中。

3.3 路由算法

用有向图 $G = (V, E)$ 来描述一个智慧协同网络拓扑, V 表示网络节点集合, $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, $v_r \in V$; E 表示网络链路的合集, $E = \{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3, \dots, \vec{e}_m, \overleftarrow{e}_1, \overleftarrow{e}_2, \overleftarrow{e}_3, \dots, \overleftarrow{e}_m\}$, $e_j \in E$, 其中 n 表示总节点个数, m 表示总

无向链路个数。向量 C 表示链路权重值的集合。

假设初始状态下有向图 G 中所有节点间的路径均未生成,多路径路由算法是选择某个节点 v 为起始节点,采用深度搜索优先算法^[13]依次从 v 的邻接节点遍历图 G ,直至生成节点 v 至所有节点的路径;若有节点尚未被作为起始节点,则选择该节点作为起始点,重复上述过程,直至所有节点都被作为起始节点为止。在遍历图 G 时,每调用一次深度搜索优先算法的 DFS 函数^[13],就将一个节点标识为已访问节点,不再从该节点出发进行搜索路径。因此,遍历图 G 的过程实质上是查询对每个节点的邻接节点的过程,其耗费的时间取决于采用的存储结构。采用二维数组表示相邻节点的存储结构,其时间复杂度为 $o(n^2)$ 。多路径路由算法伪代码如表 1 所示。

3.4 流量分配及模型分析

从 A 到 S 一共有 N_{load} 条路径,其各个路径的权重值向量集为 C , A 向 S 请求内容的总流量为 F , 则第 i 条路径分配流量 f_i 为

$$f_i = F \times \frac{1}{C_i \times \sum_{i=1}^{N_{load}} \frac{1}{C_i}} \quad (3)$$

α 、 s 分别表示网络中服务请求和服务提供的两个节点, 则 $\alpha, s \in V$ 。

表 1 多路径路由算法伪代码

节点 v_x 多路径生成算法伪代码

- 1: 节点 v_x 接收所有注册通告消息
- 2: 根据路由注册通告消息形成链路状态数据库, 获得网络拓扑信息和各个链路权重值 C_{ij} , 并生成链路权重值的向量 C
- 3: 生成拓扑, 并生成有向图 $G(V, E)$
- 4: 深度优先遍历图 G 中节点
- 5: 计算出节点 v_x 到节点 v_y 的所有路径, 生成路径参考矩阵 P_{xy} , $P_{xy} \times E$ 即为节点 v_x 到节点 v_y 的路径集合, 并将下一跳信息填入路由表; $C \times P_{xy}$ 表示节点 v_x 到节点 v_y 的所有路径权重值的集合, 并将权重值填入路由表。
- 6: 生成多路径路由表

设定其中节点 v_x 和节点 v_y 是图 G 的两个邻接节点。网络流经过每个链路 $e = xy$ 是有方向性的。正整数 k 和 (v_x, v_y) 共同表示 k 单位流量通过链路 e 的流量方向是从节点 v_x 到节点 v_y , 则 $-k$ 和 (v_x, v_y) 共同表示 k 单位流量通过链路 e 的流量方向是从节点 v_y 到节点 v_x , 得出流量方向函数 $f: V^2 \rightarrow Z$ 得出 $f(v_x, v_y) = -f(v_y, v_x)$, 则有

$$\vec{E} = \{(e, v_x, v_y) | e \in E; v_x, v_y \in V, e = v_x v_y\} \quad (4)$$

通常情况下,网络将只有少数节点进入或离开网络。除节点 s 和节点 a 外,其他节点流量的流入总量等于流出

总量,则节点流量函数 $f(v_x, v_y)$ 满足基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律^[15]:

$$\sum_{y \in N(x)} f(v_x, v_y) \quad (5)$$

对于图 $G(V, E)$, 则有网络容量 $c: \vec{E} \rightarrow \mathbb{R}$, 组元 $N: (G, a, s, c)$, c 与路径权重值有关. $f: \vec{E} \rightarrow \mathbb{R}$ 表示 a 到 s 中的一个路径上的流量的映射, 且满足:

- (1) 当 $(e, v, v_y) \in \vec{E}$ 且 $v_x \neq v_y$, 有 $f(e, v_x, v_y) = -f(e, v_y, v_x)$;
- (2) 当 $v \in V \setminus \{s, a\}$, 有 $f(v, V) = 0$;
- (3) 当 $\vec{e} \in \vec{E}$, 有 $f(\vec{e}) \leq c(\vec{e})$.

F 是满足条件 N 的路径上所有流量的集合, 设 $S \subseteq V, s \in S$ 且 $a \in \bar{S}$. (S, \bar{S}) 为 N 的割集, $c(S, \bar{S})$ 是 S 为网络提供服务的容量.

定义有向序列 $f_1, f_2, f_3 \dots$ 是网络中从 a 到 s 的分量流, 且严格按照式(6)排序

$$f_1 < f_2 < f_3 < \dots \quad (6)$$

根据最大流最小割定理^[15], 最大流小于最小割, 可定性的分析出网络最大流量小于网络最小容量, 而网络容量是与路径权重值有关的函数.

本文提出的算法灵活, 在现有网络以及以 ICN 为代表的未来网络中仍可适用, 但是由于这些网络本身存在的“三重”绑定弊端, 使得该算法在应用和性能上存在极大的局限性.

4 实验与结果分析

4.1 实验环境及参数设置

本文采用 Mini-Net 实验平台, 设计了智慧协同网络多参数的多路径路由算法, 实现了路由协议交互和根据权重值分配路径流量的功能.

Mini-Net 是由斯坦福大学 Nick McKeown 的研究小组基于 Linux Container 架构, 开发出的一套进程虚拟化的仿真测试平台. 利用 Mini-Net, 可轻松搭建任意拓扑的网络环境, 可以完成基于 Openflow、ccnx、Open vSwitch 等各种协议进行开发实验, 灵活的进行相关测试, 并测得网络数据进行验证. 其编辑代码可无缝迁移到真实的硬件环境中, 使得学术界和产业界进行无缝切换. 可以仿真每个用户的具体行为, 在网络性能上接近真实网络.

实验网络如图 5 所示, 包括 6 个智慧协同网络路由器 R1-R6, 服务请求者 A 和服务提供者 S, 每条链路权重值 C_{ij} 标识在图中标识.

根据图 5 可计算出路径权重值 C , 如表 2 所示. path1 的路径权重值 $C_i = C_{A-R1} + C_{R1-R3} + C_{R3-R6} + C_{R6-R1} = 2 + 2 + 6 + 2 = 12$, 按照相同的方法可以得到 path2、path3 和 path4 的路径权重值分别为 $C_2 = 11$ 、 $C_3 =$

8 和 $C_4 = 15$. 根据公式(3) path1、path2、path3 和 path4 四条路径分配的流量比为 110:120:165:88.

链路性能参数在 Mini-Net 的配置文件中设定. CPU 占用率初始值设置如表 3 所示, 链路带宽和链路时延初始值设置如表 4 所示.

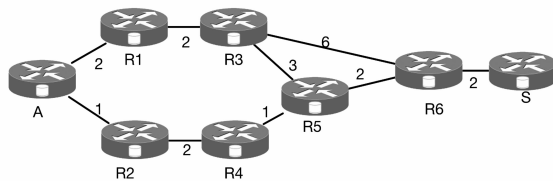


图 5 实验网络拓扑图

表 2 路径权重值表

path	Routers							C
path1	A	R1	R3	R6	S			12
path2	A	R1	R3	R5	R6	S		11
path3	A	R2	R4	R5	R6	S		8
path4	A	R2	R4	R5	R3	R6	S	15

表 3 CPU 占用率初始值设置

节点	A	R1	R2	R3	R4	R5	R6	S
CPU 占用率 (%)	10	14	13	40	23	3	5	20

根据表 4, path1 的时延理论值 145ms, 带宽理论值 5Mbps; path2 的时延理论值 85ms, 带宽理论值 30Mbps; path3 的时延理论值 70ms, 带宽理论值 30Mbps; path4 的时延理论值 170ms, 带宽理论值 5s.

4.2 实验结果与分析

在智慧协同网络体系架构下, 经过仿真实验测得单路径 path1-path4 和多参数的多路径算法的往返时延和吞吐量分别如图 6(a)和(b)所示. 可以看出, 多参数的多路径算法可以减小智慧协同网络的往返时延, 提高网络吞吐量, 从而提高网络性能, 达到负载均衡.

智慧协同网络多参数的多路径算法能够根据网络参数动态分配流量实验如下.

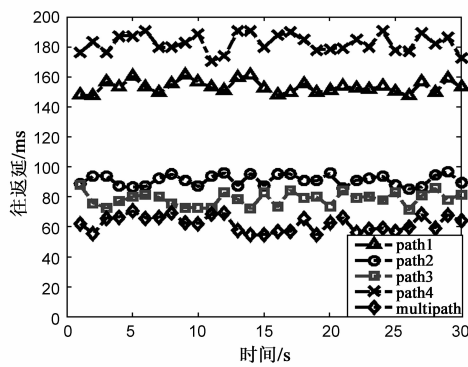
实验一: 测试时间为 90s, 0-30s 时, 设置网络参数为初始值. 30s 时断开 R3 与 R6 之间链路, path1 和 path4 失效, path2 和 path3 流量比为 8:11. 60s 时连接 R3 与 R6 链路, 将链路时延设定为 20ms, 此时链路 R3-R6 的权重值为 4, path1 和 path4 的权重值分别为 10 和 13, path1、path2、path3 和 path4 四条路径分配的流量比为 572:520:715:440. 测得流量百分比如图 7(a)所示.

实验二: 测试时间为 90s, 0-30s 时, 设置网络参数为初始值. 30s 时断开 R3 与 R6 之间链路, path1 和 path4 失效, path2 和 path3 流量比为 8:11. 60s 时连接 R3 与 R6 链路, 将链路带宽设定为 2Mbps, 此时链路 R3-R6 的权

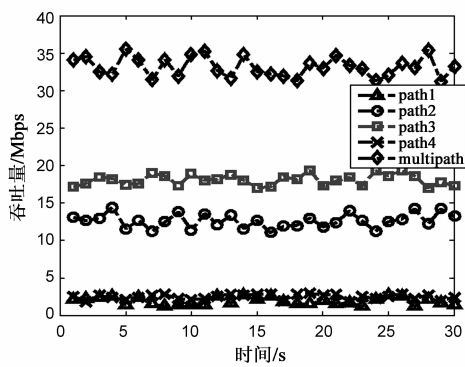
重值为 7, path1 和 path4 的权重值分别为 13 和 16, path1、path2、path3 和 path4 四条路径分配的流量比为 176:286:

表 4 链路带宽和链路时延初始值设置

链路	A - R1	A - R2	R1 - R3	R2 - R4	R3 - R5	R3 - R6	R4 - R5	R5 - R6	R6 - S
时延(ms)	10	5	10	15	20	100	5	20	25
带宽(Mbps)	100	30	50	100	50	5	50	30	100

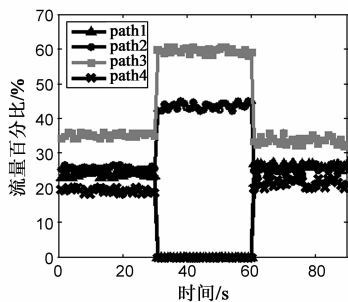


(a) 往返时延

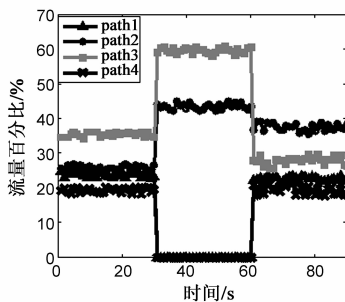


(b) 吞吐量

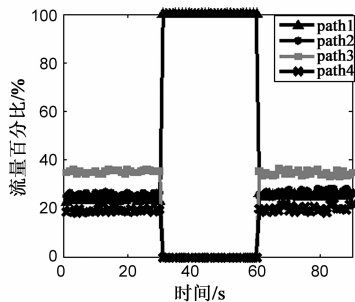
图 6 往返时延和吞吐量



(a) 实验一



(b) 实验二



(c) 实验三

图 7 智慧协同网络多路径路由流量分配图

实验三:测试时间为 90s, 0 - 30s, 设置网络参数为初始值. 30s 时, R5 失效, 只有 path1 工作; 60s 时, R5 恢复工作, 并将 CPU 占用率设定为 50%, path2、path3 和 path4 的权重值分别为 12、9 和 16, path1、path2、path3 和 path4 四条路径分配的流量比为 12:12:16:9. 测得流量百分比如图 7(c) 所示.

从图 7 可以看出, 智慧协同网络多参数的多路径算法能够根据往返时延 RTT、带宽和 CPU 占用率网络参数动态分配流量, 优化网络配置, 提高网络利用率, 实现负载均衡.

5 结论

本文在对智慧协同网络和多路径技术分析的基础上, 针对智慧协同网络的特点制定了路由协议, 提出了一种多参数的多路径路由算法, 并采用图论理论对网络流量分配及模型进行了分析. Mini-Net 平台上进行了

开发和实验, 仿真实验结果表明, 该算法能够实现智慧协同网络数据的多路径传输功能, 根据往返时延 RTT、带宽和 CPU 占用率网络性能参数动态分配流量, 优化网络配置, 减小智慧协同网络的往返时延, 提高网络吞吐量, 从而提高网络性能, 实现负载均衡.

参考文献

- [1] 中国互联网信息中心. 第 33 次中国互联网发展状况统计报告[OL]. <http://www.cnnic.net.cn>, 2014. China Internet Network Information Center. Thirty-third China Internet Development Statistics Report[OL]. <http://www.cnnic.net.cn>, 2014. (in Chinese)
- [2] 郜帅, 王洪超, 王凯, 等. 智慧网络组件协同机制研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1261 - 1267. Gao S, Wang H C, Wang K, et al. Research on Cooperation Mechanisms of Smart Network Components[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1261 - 1267. (in Chinese)

- [3] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249 – 1254.
ZHANG Hong-ke, LUO Hong-bin. Fundamental Research on Theories of Smart and Cooperative Networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249 – 1254. (in Chinese)
- [4] 苏伟, 陈佳, 周华春, 等. 智慧协同网络中的服务机理研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1255 – 1260.
SU Wei, CHEN Jia, ZHOU Hua-chun, et al. Research on the Service Mechanisms in Smart and Cooperative Networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1255 – 1260. (in Chinese)
- [5] H. Luo, Z. Chen, J. Cui, H. Zhang, M. Zukerman, and C. Qiao, CoLoR: An information-centric Internet architecture for innovation[J], submitted to IEEE Network Magazine.
- [6] Cominetti R, Guzmán C. Network congestion control with Markovian multipath routing[J]. Mathematical Programming, 2014, 147: 231 – 251. DOI: 10.1007/s10107 – 013 – 0719 – z.
- [7] ZHAO Z, SHU Y, ZHANG L, et al. Flow-Level Multipath Load Balancing in MPLS Network[J]. IEICE Transactions on Communications, 2015, E88 – B(5).
- [8] Sonkoly B, Nemeth F, Csikor L, et al. SDN based testbeds for evaluating and promoting multipath TCP[A]. Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on. IEEE [C], Hilton Sydney, 2014. 3044 – 3050.
- [9] Named Data Networking [OL]. <http://www.named-data.net/>.
- [10] Zhou J, Tewari M, Zhu M, et al. WCMP: weighted cost multipathing for improved fairness in data centers[A]. Proceedings of the Ninth European Conference on Computer Systems[C]. ACM, 2014: 5.
- [11] Tangmunarunkit H, Govindan R, Shenker S, et al. The impact of routing policy on internet paths [A]. INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. Proceedings. IEEE. IEEE, 2001, 2: 736 – 742.
- [12] Brose M A, Hauge M, Voldhaug J E, et al. Multi-Topology Routing[OL]. 2013, http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/mtr/configuration/guide/12_2sr/mtr_12_sr_book/multi_top_rtnng.pdf.
- [13] Tarjan R. Depth-first search and linear graph algorithms[J]. SIAM Journal on Computing, 1972, 1(2): 146 – 160.

- [14] Rossini G, Rossi D. Evaluating ccn multi-path interest forwarding strategies[J]. Computer Communications, 2013, 36(7): 771 – 778.
- [15] Bondy J A, Murty U S R. Graph theory with applications [M]. London: Macmillan, 1976.

作者简介



苗春浇 女, 1986年10月出生于天津, 现为北京交通大学在读博士生, 主要从事新一代信息网络安全理论与技术的研究工作。
E-mail: 09111042@bjtu.edu.cn



苏伟 男, 1978年出生于河北省景县, 博士, 北京交通大学副教授, 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术, 主要或参与多项国家自然科学基金、863、973项目。
E-mail: wsu@bjtu.edu.cn



张宏科 男, 1957年9月出生于山西省大同, 北京交通大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代信息网络关键理论与技术, 作为首席科学家主持国家973项目“智慧协同网络理论基础研究”的研究工作。
E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn



周华春 男, 1965年8月生于安徽, 博士, 教授, 北京交通大学电子信息工程学院副院长, 主要研究方向为移动互联网、网络与信息安全等, 主持国家科技重大专项等多项科研项目。
E-mail: hczhou@bjtu.edu.cn