

一种面向智慧协同网络的自适应路由策略研究

张明川^{1,2},许长桥³,关建峰³,朱军龙³,郑瑞娟¹,张宏科²

(1.河南科技大学信息工程学院,河南洛阳 471023; 2.北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044;
3.北京邮电大学网络技术研究院,北京 100876)

摘要: 现有互联网网络体系和机制相对“静态”和“僵化”,缺乏支持智慧网络的有效机制.要从根本上解决现有互联网存在的严重弊端,必须创建新的网络理论体系.本文在智慧协同网络“三层”、“两域”体系结构下,针对“网络组件层”的路由自适应问题展开研究,提出基于生物启发的转发网络族群自适应路由策略,实现族群内路由组件之间的智慧协调、动态重构和优化决策,有效解决现有路由策略的静态、僵化等问题.通过数学分析证明:如果设定模型参数 $\mu \in (0,1)$,提出的自适应路由策略可以始终保持稳定性.最后,通过原型系统验证了提出自适应路由策略是切实可行的,能够提高网络的承载业务数量和提升用户体验.

关键词: 智慧协同; 生物启发; 自适应; 路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)07-1249-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.001

Adaptive Allocation Routing Scheme for Smart and Cooperative Networks

ZHANG Ming-chuan^{1,2}, XU Chang-qiao³, GUAN Jian-feng³, ZHU Jun-long³,
ZHENG Rui-juan¹, ZHANG Hong-ke²

(1. Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. Institute of Network Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The architecture and mechanism of current Internet are relatively static and rigid, which makes it difficult for the Internet to support smart communications. To overcome the serious shortcomings of the Internet, it is necessary to establish new network architecture and its related theories. Oriented to the adaptive allocation routing of network component layer, we proposed a bio-inspired adaptive allocation routing scheme for retransmission network family based on the smart and cooperative network architecture with three layers and two realms. The scheme can achieve smart cooperation, dynamic reconfiguration and optimizing decision among router components, and solve the static and rigid problems for current routing schemes. Setting $\mu \in (0,1)$, the proposed schemes can achieve stability consistently. Finally, we designed a prototype system to verify the feasibility of the proposed scheme.

Key words: smart and cooperation; bio-inspired; adaptive allocation; routing

1 引言

经过40多年的发展,Internet已经从最初的科研网络演变成一个广阔的商业平台,成为人民生活、工作、经济运作和社会发展不可或缺的一部分.时至今日,Internet面临的挑战层出不穷,这些挑战严重制约了互联网进一步的应用和发展.比如,在资源利用率方面,美国普林斯顿大学的Fisher教授等在2010年ACM SIGCOMM国际会议上指出,现有网络的骨干网链路利用率

仅在30%~40%^[1];西班牙电信的Goma等在2011年ACM SIGCOMM国际会议上指出,现有网络的接入网链路利用率不到10%^[2].

导致这些弊端的根源在于现有互联网的原始设计思想存在不足.具体来说,现有互联网具有“三重绑定”的特征,即:服务的“资源和位置绑定”、网络的“控制和数据绑定”及“身份与位置绑定”.这种“静态”、“僵化”的原始设计无法从根本上满足信息网络“高速”、“高效”、“灵活”、“多变”的通信需求,难以实现网络资源的

自主适配.

近年来,未来互联网体系与机制的研究受到国内外学者的广泛关注.思科公司的 Farinacci 等提出了 LISP (The Locator/ID Separation Protocol) 协议,将网络分为边缘网络和核心网络,通过分离 IP 地址的位置和身份提高路由扩展性和移动性^[3].美国 UCLA 大学的 Lixia Zhang 教授等提出了 NDN(Named Data Networking),NDN 采用名字路由,利用路由器缓存转发的数据,从而提高内容检索效率、加快数据传输^[4].美国罗格斯大学 Raychaudhuri 教授等研究的 MobilityFirst 项目面向移动问题,采用延时可容忍网络 DTN(Delay Tolerant Networking) 提供鲁棒性,使环境和位置感知服务自然地适合于该网络,结合自认证公钥,实现移动终端间的有效通信^[5].斯坦福大学的 Mckeown 教授等提出了软件定义网络 SDN(Software Defined Network),把 IP 网络中决定报文转发的控制逻辑从路由器等设备中分离出来,通过软件编程实现对数据转发的控制,达到对网络流量的自主调配^[6].

我国也非常重视对未来网络的研究.国家 973 计划^[7]、863 计划^[8]先后启动了“新一代互联网体系结构和协议基础研究”、“智慧协同网络理论基础研究”、“身份与位置分离的新型路由关键技术及实验系统”等项目.其中,智慧协同网络理论基础研究提出了“三层”、“两域”的智慧协同网络体系结构模型,通过资源和位置分离、控制和数据分离、身份与位置分离以及智慧适配等方案,有效解决网络的可扩展性、移动性、安全性问题,大幅提高网络利用率和能耗^[9].

由于路由在网络中的重要地位,这些未来网络体系的研究中,关于未来网络的新型智慧路由技术是一个研究重点. Jacobson 等人面向内容中心网络 CCN(Content-Centric Networking),提出通过对网络中的内容直接进行命名和路由寻址,实现以内容为中心的分发和提取^[10]. Cheng 等人提出在命名数据网络中,通过观测感兴趣的双向流量和数据包,使得在数据转发过程能够发现网络存在的问题,并开拓新的多条备选路由^[11]. Chai 等人提出在内容中心互联网中,内容分发路径通过接受者驱动方式进行^[12].然而,这些关于未来新型路由技术的研究仍处于初步阶段,对理论研究成果的验证大都是通过仿真实验或试验床进行.

在智慧协同网络体系下,文献^[13]提出了基于身份与位置分离的路由优化机制,将 IP 地址只作为节点的位置标识,引入端点标识作为通信双方的身份标识,并利用封装在 IPv6 报头中的路由更新选项、路由确认选项和路由删除选项进行路由优化.文献^[14]提出了基于连接标识的映射通信方法,将数据发送模式由对端地址变为基于连接标识,从而提升网络连接的可控可管

性.

本文在智慧协同网络体系结构下^[9,15,16],基于多头绒泡菌(Physarum Polycephalum)的觅食原理研究智慧协同网络的路由自适应策略. Physarum 是由管状形体和流动在管状形体中的液体组成.这些流动的液体为 Physarum 各部分运送营养和传送信号,同时也调节管状形体发生改变. Tero 等人利用连接食物源管状体的距离、流通性和流体压差等参数给出了 Physarum 觅食过程的数学描述^[17,18],作者结合无线网络的特征,将该模型引入到无线网络领域,提出了 Physarum 启发的路由模型^[19-21].本文通过将 Physarum 觅食模型引入智慧协同网络,构建的自适应路由策略能够根据服务需求和网络状态,对路由进行自主适配,显著提升网络性能和用户体验.

2 智慧协同网络结构

文献^[9,15,16]中提出了“三层”、“两域”的智慧协同网络体系结构模型及其工作原理,如图 1 所示.

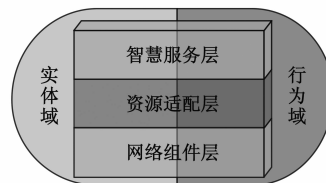


图1 智慧协同网络的“三层”、“两域”体系结构模型

“三层”是指智慧服务层、资源适配层和网络组件层。“智慧服务层”主要负责服务的标识与描述、服务的智慧查找与动态匹配等。“资源适配层”通过感知服务需求与网络状态,动态地适配网络资源并构建网络族群,提高网络资源利用率.这里网络族群是指完成网络中一定物理或逻辑功能的组件模块集合。“网络组件层”主要负责数据的存储与传输、网络组件的行为感知与聚类等。“两域”是指实体域和行为域。“实体域”使用服务标识来标记一次智慧服务,实现服务的“资源和位置分离”;使用族群标识来标记一个族群功能模块,使用组件标识来标记一个网络组件设备,实现网络的“控制和数据分离”及“身份与位置分离”。“行为域”使用服务行为描述、族群行为描述和组件行为描述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^[9].

在智慧协同网络中,智慧服务层和资源适配层之间使用行为匹配机制:在行为域中根据服务需求行为描述和族群功能行为描述形成一次映射,为智慧服务寻求最佳的族群功能模块搭配组合;然后根据实体域的族群间协作机制,控制指定的族群功能模块进行协同工作,从而实现服务标识到族群标识的映射过程.资

源适配层和网络组件层之间使用行为聚类机制:在行为域中根据族群行为描述和组件行为描述形成另一次映射,为族群功能模块判定最合理的网络组件构成;然后根据实体域的族群内联动机制,在族群功能模块内的网络组件之间建立相互联动关系,完成族群功能模块的整体功能,实现由族群标识到组件标识的映射过程^[9].

3 自适配路由策略

3.1 基于 Physarum 启发的自适配模型

在智慧协同网络中,网络组件层的路由组件构建成分发网络族群后,还需要组件之间的自主协调以完成数据转发任务.本文将 Physarum 觅食模型引入智慧协同网络,解决转发网络族群的自适配问题.传统的群体智能优化模型,如蚁群算法、遗传算法,一般通过生物的行为反馈,对目标进行优化.而 Physarum 觅食模型能够主动地优化发现的路径,获取最优的路由.因此,Physarum 觅食模型能够更快、更优地实现路由的自适配^[17~21].Physarum 的觅食模型可以用式(1)、(2)表示^[17]

$$Q_{ij} = \frac{\pi r_{ij}^4 (P_i - P_j)}{8 \eta L_{ij}} = \frac{D_{ij} (P_i - P_j)}{L_{ij}} = \frac{D_{ij} \cdot \Delta P_{ij}}{L_{ij}} \quad (1)$$

其中, Q_{ij} 是单位时间内通过管状体 ij 的流体通量, $\Delta P_{ij} = P_i - P_j$ 是 Physarum 的管状体两端流体的压差, r_{ij} 是管状体的半径, η 是管状体内流体的粘度, $D_{ij} = \pi r_{ij}^4 / 8 \eta$ 是管状体的流通性, L_{ij} 是管状体的长度.

由于 Physarum 体内流体的总量保持不变,它通过调节身体的形状寻找食物,调节模型为

$$\frac{d}{dt} D_{ij} = \varphi(|Q_{ij}|) - \delta D_{ij} \quad (2)$$

其中, δ 是管状体的衰减率, $\varphi(\cdot)$ 是单调递增函数且满足 $\varphi(0) = 0$. 式(2)表明管状体的流通性会随着通过它流体量的减小而减小.

式(1)和(2)中变量的物理含义来自流体力学,本文将 Physarum 觅食模型引入到网络领域,需要将式(1)和(2)中变量的物理含义和网络中物理量相结合.下面采用无量纲分析方法,将式(1)和(2)迁移到网络领域.

首先, D_{ij} 是管状体的流通性,是表示管状体对流体输送能力的物理参数.类似地,网络中需要考虑链路数据传输能力.因此,可以用带宽 B_{ij} 替代 D_{ij} ,表示组件 i 和组件 j 之间链路的传输能力.其次, L_{ij} 表示管状体的长度,其值越大,对流体输送越不利.在有线网络中,源和目的之间的距离对数据传送的影响微乎其微.由于路由转发时需要进行分析处理,中转次数对数据传送有重要影响.因此,可以用中转次数(或跳数) H_{ij} 替代 L_{ij} ,表示从源到目的经过转发的跳数.最后, ΔP_{ij} 表示管状体两端流体的压力,压力越大,对流体输送越有利.

在网络中,中继节点中的等待任务数目越少,对数据传输越有利.因此,可以用从源到目的之间待处理任务总数的倒数 $1/T_{ij}$ 替代 ΔP_{ij} . 则,式(1)可以转化为(3).

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij} \cdot \Delta P_{ij}}{L_{ij}} = \frac{B_{ij}}{H_{ij} \cdot T_{ij}} \quad (3)$$

其中, Q_{ij} 是单位时间内可以通过链路 ij 的通信量.式(3)说明一条链路的虚拟通信量与该链路的带宽成正比,与该链路的跳数、链路中转发组件最长等待任务队列成反比.

在 Physarum 模型中,由于 D_{ij} 随着流体在管状体中流动而变化,因此,通过 $D_{ij}(t)$ 的进化实现 Physarum 的自适应调节.在网络中, B_{ij} 随着网络中业务量的变化而变化,因此,可以通过 $B_{ij}(t)$ 的进化实现路由决策的自适应调节.假设单调递增函数 $\varphi(Q) = Q^\alpha$,可以得到

$$\frac{d}{dt} B_{ij} = \varphi(|Q_{ij}|) - \delta B_{ij} = \left(\frac{B_{ij}}{H_{ij} \cdot T_{ij}} \right)^\alpha - \delta B_{ij} \quad (4)$$

其中, δ 是链路带宽的使用率.式(4)表明链路的可用带宽会随着链路带宽使用的增加而减少.因此,利用式(4)对转发网络族群进行自适配路由选择.即,根据链路的可用带宽、跳数和最长等待队列的长度综合衡量链路的可用性能,然后与应用需求进行匹配,完成路由选择.

3.2 智慧协同网络的路由自适配算法

在智慧协同网络中,当用户申请网络服务时,由“网络服务层”完成服务需求和服务提供的匹配,由“资源适配层”动态地构建能够满足用户需求的网络族群,由“网络组件层”完成数据的转发与存储,最终实现用户申请的服务.本文提出的自适配路由策略解决网络组件层的数据转发问题,即当构建能够满足用户需求的网络族群后,如何利用族群内的网络组件进行自适配的路由选择.下面结合图2所示场景介绍提出的自适配路由策略.

假设客户端 C_1 、 C_2 和 C_3 提出了服务请求,经过资源适配解析服务系统的智慧匹配,得到服务网络族群 S_1 、 S_2 和 S_3 分别可以为 C_1 、 C_2 和 C_3 提供服务.根据智慧协同

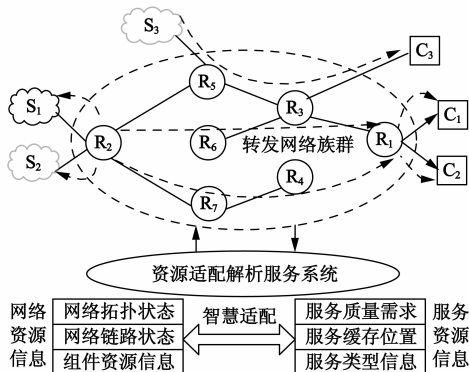


图2 自适配路由策略举例

网络工作原理,资源适配解析服务系统构建相应的网络族群实现这三个服务.假设为 (S_1, C_1) 、 (S_2, C_2) 和 (S_3, C_3) 构建的网络族群分别为 $[C_1, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, S_1]$ 、 $[C_2, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, S_2]$ 和 $[C_3, R_5, R_3, S_3]$ (如图2所示),其中, (S_1, C_1) 和 (S_2, C_2) 共用转发网络族群 $[R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7]$, (S_3, C_3) 使用转发网络族群 $[R_3, R_5]$.则提出的路由策略根据网络资源和服务资源信息实现数据在族群内的自适应传输,具体算法介绍如下.

第1步:资源适配解析系统经过资源适配,向一组网络组件发送命令,构建转发网络族群.

第2步:如果转发网络族群接收到 $m(m > 0)$ 个数据转发任务,则继续;如果转发网络族群任务完成,则转向第7步;否则,转发网络族群休眠.

第3步:从资源适配解析系统获取网络状态信息,如转发网络族群拓扑、链路状态、组件资源等.根据获取的网络状态信息计算从转发网络族群入口 i 到出口 j 的可用带宽 B_{ij} 、待处理任务数量 T_{ij} 和中转跳数 H_{ij} .为了更好的衡量链路 ij , B_{ij} 用链路 ij 中可用带宽最小的一段链路的可用带宽表示, T_{ij} 用链路 ij 中组件待处理任务队列最大的任务数表示.

第4步:根据式(4)计算转发网络族群内每一条可用链路的 $\text{d}B_{ij}/\text{d}t$.这里,如果 $\text{d}B_{ij}/\text{d}t \geq 0$,则表示链路可以承载新的任务;否则表示所选链路不能承载新的任务.如果存在 $k(k \geq m)$ 条 $\text{d}B_{ij}/\text{d}t \geq 0$ 的链路,则转向第5步;否则,转向第6步.

第5步:从资源适配解析系统获取服务资源信息,如带宽需求、延时需求等.将服务资源需求信息与 k 条可用链路进行匹配,为每一个任务分配一条合适路由进行传输,然后转向第2步.

第6步:通知资源适配解析服务系统收回本转发网络族群中所有资源,将当前正在传输的 n 个任务与待处理的 m 个任务一起重新适配,转向第3步.

第7步:资源适配解析系统发送命令,解散转发网络族群.

通过上述算法,自适应路由策略会根据族群内组件负载、链路负载以及任务的QoS需求,自适应的选择一条从入口到出口的路由,实现转发网络族群内路由的自适应构建.

分析上面的算法,可知影响一次路由自适应过程

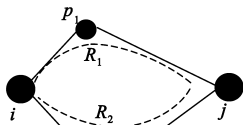


图3 路由由自适应举例

的主要因素是算法的第4步和第5步.这两步都需要重复 k 次计算,因此,整个算法的复杂度是 $O(k)$.

4 自适应路由的稳定性分析

下面结合图3所示的例子讨论3.1所述自适应路由模型的稳定性.在图3中,组件 i 到组件 j 有两条路由 $R_1:[i, p_1, j]$ 和 $R_2:[i, p_2, p_3, j]$.为了简化表示,与路由 R_1 相关的量用下标1表示,与路由 R_2 相关的量用下标2表示.如果从组件 i 到组件 j 存在多个任务,为了均衡网络负载,路由 R_1 和 R_2 应该承载的通信负载可表示为式(5).

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{B_1/H_1 T_1}{B_1/H_1 T_1 + B_2/H_2 T_2} \\ Q_2 = \frac{B_2/H_2 T_2}{B_1/H_1 T_1 + B_2/H_2 T_2} \end{cases} \quad (5)$$

由于 Q_1 和 Q_2 非负,式(4)转化为

$$\begin{cases} \frac{\text{d}}{\text{d}t}(B_1) = \varphi(Q_1) - \delta \cdot B_1 \\ \frac{\text{d}}{\text{d}t}(B_2) = \varphi(Q_2) - \delta \cdot B_2 \end{cases} \quad (6)$$

令 $\varphi(Q) = Q^\mu$,令 $\frac{\text{d}}{\text{d}t}(B_1) = 0$, $\frac{\text{d}}{\text{d}t}(B_2) = 0$,得

$$\begin{cases} \left(\frac{B_1/H_1 T_1}{B_1/H_1 T_1 + B_2/H_2 T_2} \right)^\mu = \delta \cdot B_1 \\ \left(\frac{B_2/H_2 T_2}{B_1/H_1 T_1 + B_2/H_2 T_2} \right)^\mu = \delta \cdot B_2 \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可以得出

$$\begin{cases} B_1 = \frac{1}{\delta} \left[\frac{1}{(1 + (H_1 T_1/H_2 T_2)^{\frac{1}{1-\mu}})} \right]^\mu \\ B_2 = \frac{1}{\delta} \left[\frac{1}{(1 + (H_2 T_2/H_1 T_1)^{\frac{1}{1-\mu}})} \right]^\mu \end{cases} \quad (8)$$

也就是说,只要给定合适的参数 (δ, μ) 和变量的取值 (H_1, T_1, H_2, T_2) ,就可以得到每条路由带宽分配的均衡点 $E:(B_1, B_2)$.在多路由由协议中,按照获得均衡点参数分配每条链路的带宽负载,可以使网络路由快速收敛至最优,并稳定持续下去.在单路由由协议中,按照获得均衡点参数和时间顺序分配每条链路的带宽负载,可以使网络路由快速收敛,并基本稳定持续下去.

下面分析这个均衡点 E 的稳定性,式(6)右边的雅各比矩阵为

$$J = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中,

$$J_{11} = \frac{\mu Q_1^{\mu-1} B_2/H_2 T_2}{H_1 T_1 (B_1/H_1 T_1 + B_2/H_2 T_2)^2} - \delta \quad (10)$$

$$J_{12} = \frac{-\mu Q_1^{*-1} B_1 / H_1 T_1}{H_2 T_2 (B_1 / H_1 T_1 + B_2 / H_2 T_2)^2} \quad (11)$$

$$J_{21} = \frac{-\mu Q_2^{*-1} B_2 / H_2 T_2}{H_1 T_1 (B_1 / H_1 T_1 + \Delta P_2 / H_2 T_2)^2} \quad (12)$$

$$J_{22} = \frac{\mu Q_2^{*-1} B_1 / H_1 T_1}{H_2 T_2 (B_1 / H_1 T_1 + B_2 / H_2 T_2)^2} - \delta \quad (13)$$

在均衡点处的雅各比矩阵为

$$J(E) = \delta \cdot \begin{pmatrix} \mu Q_2^* - 1 & -\mu \frac{H_1 T_1}{H_2 T_2} Q_1^* \\ -\mu \frac{H_2 T_2}{H_1 T_1} Q_2^* & \mu Q_1^* - 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中, Q_1^* 和 Q_2^* 是在均衡点 E 处分别沿路由 R_1 和 R_2 的通信量. 假设 $Q_1^* + Q_2^* = I$, 可以得到 $\det J(E) = \delta(1 - \mu I)$ 和 $\text{tr} J(E) = \delta(\mu I - 2)$. 其中 I 表示需要传输的通信总量. 这里 δ 是链路带宽的使用率, 且 $\delta > 0$. 设 $I = 1$, 则

当 $\mu > 1$ 时, $\det J(E) < 0$;

当 $0 < \mu < 1$ 时, $\det J(E) > 0$, $\text{tr} J(E) < 0$.

因此, 在智慧协同网络的自适配路由中, 如果令 $\mu \in (0, 1)$, 则可以得到一种始终稳定自适配路由策略.

5 原型验证

5.1 原型系统介绍

为了验证提出的自适配路由策略, 构建的原型系统及限制介绍如下:

(1) 系统拓扑结构

原型验证系统拓扑结构如图 4 所示, 包括 4 个服务器、3 个客户端和 7 个路由器.

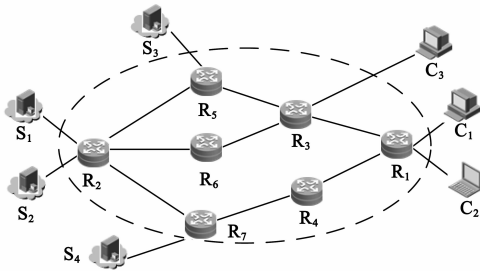


图4 原型验证系统拓扑结构

(2) 组成部分介绍

① $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 和 R_7 : 具有感知、协作能力的路由器, 能够感知邻接路由器的状态并协同工作. 其中, $F_1: [R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7]$ 和 $F_2: [R_3, R_5]$ 分别构成转发网络族群.

② C_1, C_2 和 C_3 : 服务请求终端, 根据应用需要提出服务请求.

③ S_1, S_2 和 S_3 : 服务器, 分别为 C_1, C_2 和 C_3 提供服务. 在智慧协同网络中, 如何选取适合用户需求的服务网

络族群需要经过资源适配层的博弈决策. 本文为了简化原型系统设计, 在保证问题模型不变的前提下, 用服务提供终端 S_1, S_2 和 S_3 替代博弈决策获得的服务网络族群.

④ S_4 : 资源适配解析服务系统, 提供网络状态信息和服务资源信息. 此外, 为了直观了解原型系统运行情况, 设计了网络态势可视化显示程序, 实时显示网络拓扑、数据流等信息, 运行在 S_4 中.

(3) 服务需求场景

系统验证过程按下面顺序提出服务请求:

① 客户端 C_1 请求服务器 S_1 提供的服务, 用 (S_1, C_1) 表示.

② 客户端 C_2 请求服务器 S_2 提供的服务, 用 (S_2, C_2) 表示.

③ 客户端 C_3 请求服务器 S_3 提供的服务, 用 (S_3, C_3) 表示.

(4) 链路带宽限制

为了更好地体现路由自适配策略, 除去维护系统正常运行需要的信息感知、信息交互等必要带宽需求外, 系统限制路由器 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 和 R_7 之间链路的可用带宽为刚好能够满足一种服务数据在其上传输.

按照上述设置, 分别使用本文提出的自适配路由策略和互联网常用的 OSPF (Open Shortest Path First) 路由协议^[22]介绍系统运行情况.

5.2 采用自适配路由效果

采用 5.1 节所述原型系统及服务需求场景, 可以得到与智慧协同网络中如何进行自适配路由选择相同的场景. 这样可以忽略相对于自适配路由选择的次要因素, 讨论转发网络族群内路由组件的自适配策略.

(1) 启动原型系统

原型系统启动后, 没有任何组件提出服务请求, 只有维护原型系统正常运行的必要数据流, 比如路由器之间的交互、资源适配解析服务系统获取网络状态信息、网络态势可视化显示模块获取网络态势信息的数

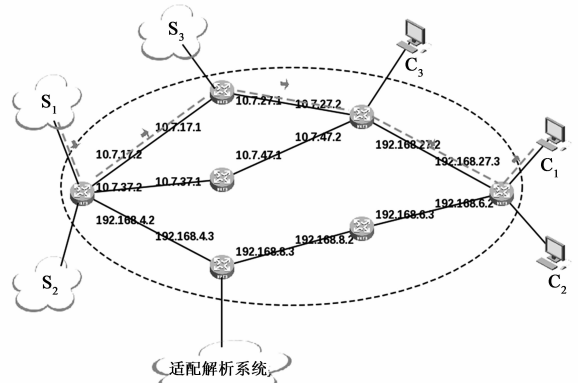


图5 存在一种服务的网络态势

据流等,没有业务数据流.

(2)客户端 C_1 请求服务器 S_1 提供的服务

当客户端 C_1 向服务器 S_1 发出请求后, S_1 需要通过转发网络族群 F_1 向 C_1 提供服务.通过自适应路由算法,选出路由 $L_1:[R_2, R_5, R_3, R_1]$ 完成服务(S_1, C_1).网络态势可视化显示界面如图 5 所示.

(3)客户端 C_2 请求服务器 S_2 提供的服务

当客户端 C_2 向服务器 S_2 发出请求后, S_2 需要通过转发网络族群 F_1 向 C_2 提供服务.通过自适应路由算法,选出路由 $L_2:[R_2, R_7, R_4, R_1]$ 完成服务(S_2, C_2).在此网络状态下,根据链路带宽限制条件,由于 $[R_3, R_1]$ 已占用,只能选择路由 L_2 为(S_2, C_2)提供服务.网络态势可视化显示界面如图 6 所示.

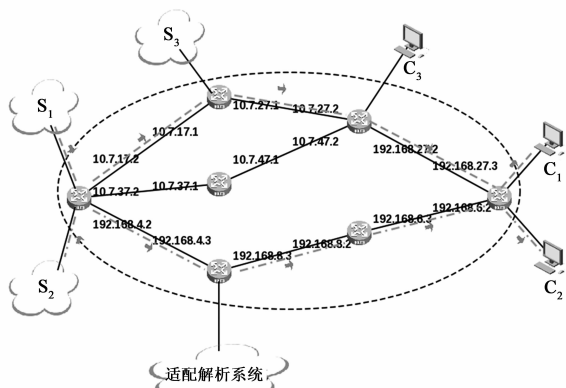


图6 存在二种服务的网络态势

(4)客户端 C_3 请求服务器 S_3 提供的服务

当客户端 C_3 向服务器 S_3 发出请求后, S_3 需要通过转发网络族群 F_2 向 C_3 提供服务.通过自适应路由算法,没有合适的路由能够为(S_3, C_3)提供服务.因此,通知资源适配解析系统收回所有转发网络族群 F_1 可用的资源,将正在传送和待传送的任务一起重新进行路由适配.通过自适应路由算法重新计算,选出路由 $L_3:[R_2, R_6, R_3, R_1]$ 、路由 L_2 和路由 $L_4:[R_5, R_3]$ 分别完成服务(S_1, C_1)、(S_2, C_2)和(S_3, C_3).网络态势可视化显示界面如图 7 所示.

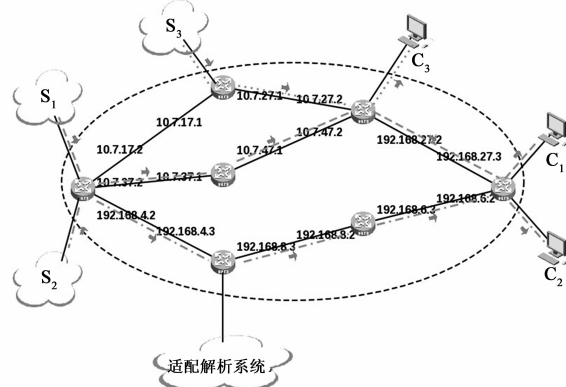


图7 存在三种服务的网络态势

5.3 采用 OSPF 路由效果

下面采用 OSPF 协议替代自适应路由完成服务(S_1, C_1)、(S_2, C_2)和(S_3, C_3).

(1)启动原型系统

原型系统启动后,此时没有任何服务请求,没有业务数据流.

(2)客户端 C_1 请求服务器 S_1 提供的服务

当客户端 C_1 向服务器 S_1 发出请求后,由于 S_1 到 C_1 的路由均为 4 跳,因此,可用路由与 OSPF 路由建立的先后关系及设备开启的顺序有关.调整路由器开机顺序,可以选择路由 L_1 为(S_1, C_1)提供服务.则此时网络态势与图 5 所示相同.

(3)客户端 C_2 请求服务器 S_2 提供的服务

当客户端 C_2 向服务器 S_2 发出请求后,OSPF 同样选择路由 L_1 为(S_2, C_2)提供服务,网络态势可视化显示界面如图 8 所示.此时,路由 L_1 同时承载服务(S_1, C_1)和(S_2, C_2),用户体验下降.

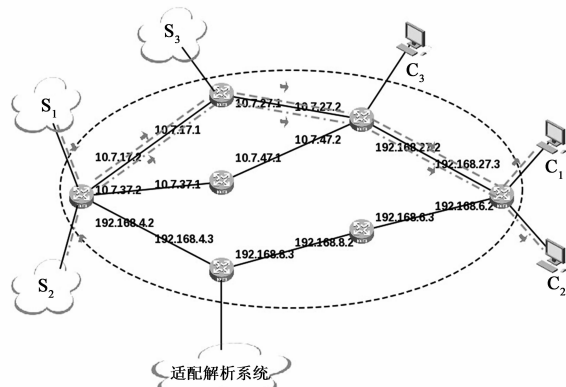


图8 OSPF存在二种服务的网络态势

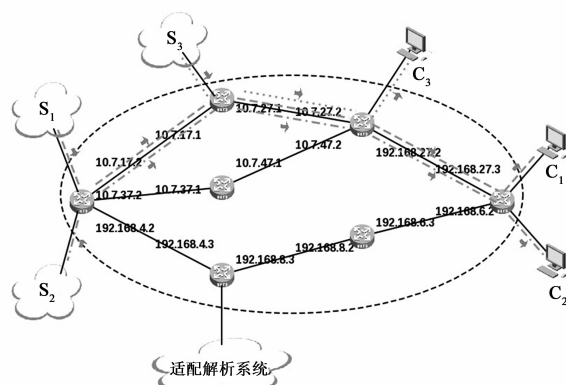


图9 OSPF存在三种服务的网络态势

(4)客户端 C_3 请求服务器 S_3 提供的服务

当客户端 C_3 向 S_3 发出请求后,OSPF 选择路由 L_4 为(S_3, C_3)提供服务,网络态势可视化显示如图 9 所示.此时,路由 L_4 同时承载服务(S_1, C_1)、(S_2, C_2)和(S_3, C_3),服务质量无法保证,用户体验明显下降.

从以上原型实验可以看出,与传统路由策略相比,自适配路由策略可以根据网络状态,自主调节转发网络族群的路由,有效解决现有路由策略的静态、僵化问题。

6 结论与展望

本文在智慧协同网络“三层”、“两域”总体结构模型下,面向“三层”中的“网络组件层”,提出基于生物启发的路由自适配策略。该策略将 Physarum 的觅食模型迁移到网络领域,将路由组件看作食物节点,将 Physarum 觅食模型中需要调节的参数(节点间距离、管状体流通性和节点间压差)映射到网络领域的相应参数(路由跳数、可用带宽和待处理任务数),获得能够自主调节的路由自适配模型。利用该自适配模型,实现转发网络族群内路由组件间的智慧协调、动态重构和优化决策,有效解决现有路由策略的静态、僵化问题。最后,开发了原型系统,对转发网络族群内组件的自适配问题进行验证,证明了提出的自适配路由策略是切实可行的,并能显著提升网络承载业务数量和用户体验。

本文仅对智慧协同网络自适配路由策略进行研究,通过原型系统初步验证了策略的可行性,下一步工作针对以下方面进行研究:

(1)多个网络族群间协作的机制与方法;

(2)网络族群与资源适配解析系统的交互、反馈机制与方法;

(3)大规模扩展原型验证系统,从通信建立、时延、吞吐量、能耗等方面分析、比较自适配路由的性能。

参考文献

[1] W Fisher, M Suchara, J Rexford. Greening backbone networks: Reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking[C]. New Delhi, India: ACM, 2010. 29 – 34.

[2] E Goma, M Canini, A Lopez, et al. Insomnia in the access[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM[C]. Toronto, Canada: ACM, 2011. 338 – 349.

[3] D Farinacci, V Fuller, D Meyer, et al. The Locator/ID Separation Protocol (LISP) [OL]. <http://tools.ietf.org/html/rfc6830>. 2013-12-03.

[4] L Zhang, D Estrin, et al. Named Data Networking (NDN) Project NDN-0001[R]. Palo Alto Research Center, 2010.

[5] D Raychaudhuri, K Nagaraja, A Venkataramani. Mobility First: A robust and trustworthy mobility-centric architecture for the future internet[J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2012, 16(3): 2 – 13.

[6] N Mckeown, T Anderson, H Balakrishnan, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM

Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69 – 75.

[7] 973 Program[OL]. <http://www.973.gov.cn>.

[8] 863 Program[OL]. <http://www.863.gov.cn>.

[9] 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)

[10] V Jacobson, D K Smetters, J D Thornton, et al. Networking named content[A]. Proceedings of the ACM CoNEXT[C]. Rome, Italy: ACM, 2009. 1 – 12.

[11] C Yi, A Afanasyev, L Wang, et al. Adaptive forwarding in named data networking [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(3): 62 – 67.

[12] W K Chai, N Wang, I Psaras, et al. CURLING: Content-ubiquitous resolution and delivery infrastructure for next-generation services[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 112 – 120.

[13] 杨水根, 秦雅娟, 周华春, 张宏科. 基于身份与位置分离的嵌套移动网络路由优化机制[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1261 – 1267.

Yang Shui-gen, Qin Ya-juan, Zhou Hua-chun, Zhang Hong-ke. Route optimization mechanism based on identifier/locator split for nested mobile network[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1261 – 1267. (in Chinese)

[14] 刘畅, 宋飞, 孙亮, 张思东. 基于连接标识的映射通信[J]. 电子学报, 2012, 40(10): 1920 – 1926.

Liu Chang, Song Fei, Sun Liang, Zhang Si-dong. A mapping communication mode based on connection identify [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(10): 1920 – 1926. (in Chinese)

[15] 苏伟, 陈佳, 周华春, 张宏科. 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, Zhang Hong-ke. Research on the service mechanisms in smart and cooperative networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1255 – 1260. (in Chinese)

[16] 郝帅, 王洪超, 王凯, 张宏科. 智慧网络组件协同机制研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1261 – 1267.

Gao Shuai, Wang Hong-chao, Wang Kai, Zhang Hong-ke. Research on cooperation mechanisms of smart network components [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1261 – 1267. (in Chinese)

[17] A Tero, R Kobayashi, T Nakagaki. A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold [J]. Journal of Theoretical Biology, 2007, 244(4): 553 – 564.

[18] A Tero, S Takagi, T Saigusa, et al. Rules for biologically inspired adaptive network design [J]. Science, 2010, 327(5964): 439 – 442.

[19] M Zhang, C Xu, J Guan, et al. P-iRP: Physarum-inspired rout-

ing protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the VTC[C]. Las Vegas, USA: IEEE, 2013. 1 – 6.

- [20] M Zhang, C Xu, J Guan, et al. A novel physarum-inspired routing protocol for wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013(Article ID 483581): 1 – 12.

- [21] M Zhang, C Xu, J Guan, et al. A novel bio-inspired trusted routing protocol for mobile wireless sensor networks[J]. KSII Transactions on Internet and Information systems, 2014, 8(1): 74 – 90.

- [22] OSPF Hybrid Broadcast and Point-to-Multipoint Interface Type[OL]. <http://tools.ietf.org/html/rfc6845>.

作者简介



张明川 男, 1977年5月出生, 河南汝州人, 副教授. 2000年、2005年和2011年分别在洛阳理工学院、哈尔滨工程大学和北京邮电大学获工学学士、工学硕士和工学博士学位. 现为河南科技大学信息工程学院教师, 主要从事下一代网络、智慧路由方面的研究.

E-mail: zhang_mch@163.com



许长桥 男, 1977年3月出生, 江西吉安人, 副教授、博士生导师. 1999年、2002年和2009年分别获江西师范大学和中科院获工学学士、工学硕士和工学博士学位. 现为北京邮电大学网络技术研究院下一代互联网技术研究中心副主任, 主要从事智慧互联网、多媒体通信、移动无线网络方面的研究.

E-mail: cqxu@bupt.edu.cn