

## 基于 SDN 的自组织网络路由框架及构建方法

董芳<sup>1,2</sup>, 胡宇翔<sup>3</sup>, 李鸥<sup>1</sup>

(1. 信息工程大学, 河南 郑州 450001; 2. 通信网信息传输与分发技术重点实验室, 河北 石家庄 050081;  
3. 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 节点能量受限与移动性及更加个性化的服务要求, 使自组织网络对定制化路由需求迫切。基于软件定义网络 (SDN) 的核心原理, 首先分析 SDN 下自组织网络控制架构和路由设计的全新思路。其次建立分层次路由模型, 提出基于服务路径的路由关键节点和关键链路集中式选择问题并设计其算法, 通过基于服务特征的节点映射, 以网络效能最大化为目标将用户定制的服务嵌入物理网络中。最后验证了基于 SDN 的自组织网络路由在功能、性能和网络整体效能方面的优势。实验证明, 网络节点耗能更均衡且网络整体效用比传统方法提高近 14%。

**关键词:** 软件定义网络; 自组织网络; 服务路径; 定制化路由; 网络效能

**中图分类号:** TP393.08

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019153

## Routing framework and creation algorithm in Ad Hoc based SDN

DONG Fang<sup>1,2</sup>, HU Yuxiang<sup>3</sup>, LI Ou<sup>1</sup>

1. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2. Science and Technology on Communication Networks Laboratory, Shijiazhuang 050081, china

3. National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China

**Abstract:** Node energy-limited and mobility, indeed, requirement of customized service, made Ad Hoc press for customization Routing. Based on the core principle of software defined networking (SDN), the control framework and the design of routing creation bran-new approach about Ad Hoc based SDN was analyzed firstly. Secondly, the hierarchical routing model was established, and the problem of routing key nodes and key link centralized selection based on service path was proposed and its algorithm was designed, which could embed customize service into physical networks via nodes mapping based network performance maximization. Finally, it corroborate the advantage of routing implement via SDN in function, performance and the whole networks utilization. Experiments show that the energy consumption of network nodes is more balanced and the overall utilization of the network is nearly 14% higher than the traditional method.

**Key words:** software defined networking, Ad Hoc, service path, customization routing, network utilization

### 1 引言

以传感网、物联网等泛在网络为典型表现形式的自组织网络既解决了无固定通信基础设施下移动通信联络的需求, 又可作为现有固定通信基础设施的延伸来实现广域覆盖, 是填补固定网络“空白”

的首选方式, 在工业监控、环境监测、医疗监护、智能家居、交通管理等诸多领域得到广泛应用。随着用户对网络体验的期望值越来越高, 自组织网络已不仅局限于传统意义上的信息获取功能, 更向着信息传输、处理, 甚至服务定制等更高层次发展。然而, 自组织网络鲜明的节点移动性特点, 使时延

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2019-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61601516); 通信网信息传输与分发技术重点实验室开放基金资助项目 (No.6142104180106)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of china (No.61601516), Open Foundation of Science and Technology on Communication Networks Laboratory (No.6142104180106)

带宽、吞吐量等参数的变化不可预测,导致数据传输可靠性降低甚至失效,进而无从保证网络服务的有效性。另外,能量受限制约着自组织网络节点提供服务的多样化和复杂程度,成为阻碍自组织网络整体服务质量提升的主要因素。

为了解决以上问题,研究者尝试将最新的网络技术用于新型自组织网络的设计中,与软件定义网络(SDN, software defined networking)结合的自组织网络研究就是其中热点之一。SDN 起源于校园网,发展于互联网,其初衷是把当今互联网垂直紧耦合的体系结构解耦,以模块化结构开放网络核心功能,为打破现有网络“结构决定应用”的僵局<sup>[1]</sup>提供可行方案。目前,SDN 向无线网络扩展,较为成熟的研究成果集中于网络核心网层面(如 5G 核心网等),但应对底层无线复杂环境仍显乏力。本文不回避无线接入的复杂性,在开放的控制平面内进行自由的网络功能创新,以显著增强自组织网络在功能路由、网络资源管理及规模化组网等方面的能力,其中定制化的路由设计是研究重点。

在自组织网络路由模型方面,面向 Ad Hoc 灵活 QoS 模型(FQMM, flexible quality of service model for mobile Ad Hoc network)是一种典型的无线移动自组织网络 QoS 模型<sup>[2]</sup>。该模型以区分服务模型控制数据流,以集成服务模型对相似节点进行分类,能够根据网络流量及网络特性自适应地调节数据业务量,但该模型受限于节点计算与容量状况,只适用于小规模网络。无状态自组织网络 QoS 服务模型(SWAN, stateless wireless Ad Hoc network)<sup>[3]</sup>采用分布式算法为数据业务提供 QoS 保障。和 FQMM 不同的是,该模型独立于路由协议,只需在源节点维护 QoS 状态。然而,SWAN 仅为实时业务和尽力而为业务提供服务,尚不能满足除此之外的其他用户应用需求。在支持服务质量的路由协议方面,研究人员从不同的路由策略如多径传输、带宽预留、跨层联合、负载均衡等出发提出了大量路由协议,这些协议各具特点,考虑的参数也不尽相同,但大多是在原有尽力而为路由协议的基础上进行改进与拓展<sup>[4-5]</sup>,难于提升网络整体效能。在 SDN 下的自组织网络功能革新方面,Gibb 等<sup>[6]</sup>提出了一种由外部特征提供商开发和部署的网络架构,该架构通过提供商之间的竞争促进网络功能创新。Mogul 等<sup>[7]</sup>设计了一种控制平面,用于支持控制器上应用程序的组合,实现模块组合和优化,该工作与本文研究的网络分属不同类型,SDN 下的自组织网络可借鉴其思

想。以上研究成果表明,自组织网络现有的路由设计存在诸多问题,引入 SDN 实现自组织网络的路由定制优势明显,但同样面临着配置复杂等问题,目前鲜有明确思路与可行方案能够圆满解决以上问题。本文从基于 SDN 的自组织网络全局系统出发,探讨 SDN 下自组织网络设计的新思路和新方法,并重点关注基于 SDN 的自组织网络路由设计框架及可行的构建方法。

SDN 下的网络功能组合是提高网络整体效能的主要方向之一<sup>[8]</sup>,其思想是将当前“僵化的”按层划分的网络功能重新抽象并分解为更细粒度的功能单元,然后按需组合为复合的功能集。在这一思想下,自组织网络设计发生了质的飞跃,即“网络结构主动适配上层应用”,如图 1 所示。首先,网络功能实现模块化。在网络节点上,网络功能软件化为基本单元,节点整体功能则体现为根据服务实时重构的基本功能单元集。其次,路由序列化。在端到端系统中,路由软件化为满足服务约束的节点和链路有序序列,在功能层面上也就体现为能够承载网络服务的有序节点和链路序列,称为服务路径(SP, service path)<sup>[9]</sup>,服务路径上的相邻节点在功能层面上互为下一跳节点,但这样的相邻节点往往不是物理网络的相邻节点。由此,SDN 下的路由是由服务路径及其服务路径上相邻有序节点间普通节点构成的矢量路径,这里的难点在于获取服务路径上的有序节点和链路,而有序节点间的路由可由现有路由协议完成。本文聚焦于 SDN 下基于服务路径的路由构建,明确 SDN 下自组织网络控制系统架构,并以此架构全面分析 SDN 自组织网络路由的本质特点和全新方式,提出一种基于服务特征的分层次路由方法,重点设计路由关键节点和关键链路的选择算法,以最优的方式将用户定制的服务嵌入基础物理网络中,这里最优方式是指能够让具体网络性能参数(如能耗、负载均衡、平均时延、网络效能等)达到一个最佳状态,从而构成业务数据传输的服务通道,为用户定制服务提供承载支撑。最后,依托 OpenFlow1.3 与 NS-3 实现原型系统,验证 SDN 下自组织网络路由实现的优势。

## 2 基于 SDN 的自组织网络控制系统架构

基于 SDN 的自组织网络相对成熟的应用场景是车联网(VANET, vehicular Ad Hoc network)<sup>[10]</sup>,如图 2(a)所示。VANET 将网络节点分为无线接入点(车辆)、路边接入单元和 SDN 控制器 3 类。无线

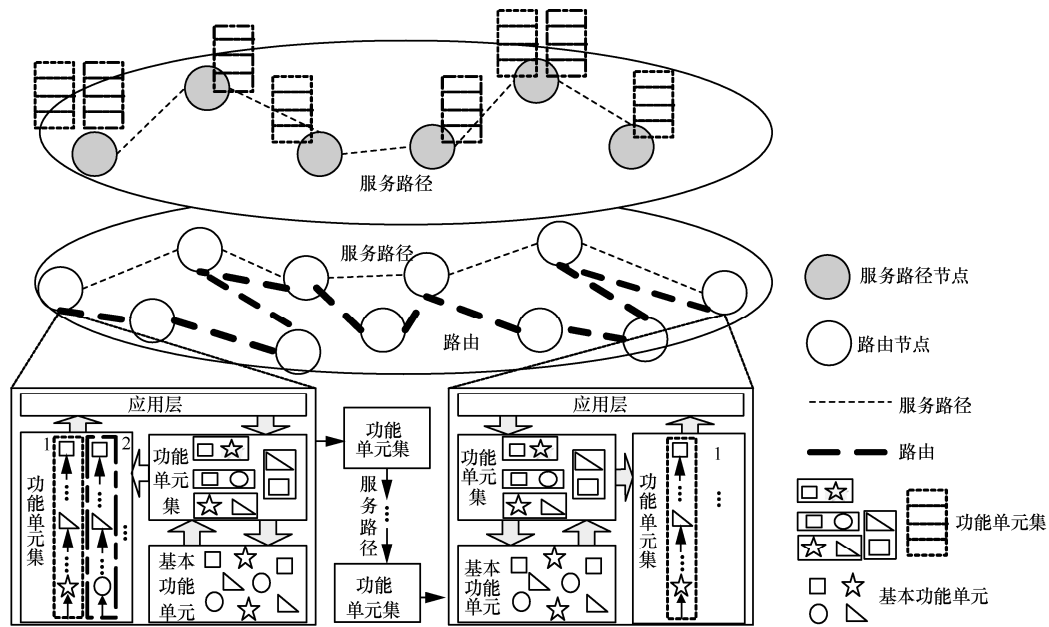


图 1 服务路径与路由示意

接入点在路边接入单元控制范围内，通过路边接入单元接受 SDN 控制器控制；在路边接入单元覆盖不到的地方，无线接入点完全以自组织的方式工作。SDN 控制器经由路边接入单元至无线接入点的控制流承载于控制范围较广的 LTE，无线接入点间的数据流则由高带宽的 Wi-Fi 承载。本文将 VANET 的结构抽象并扩展（如图 2(b)所示），作为基于 SDN 的自组织网络的基础控制架构。

如图 2(b)所示的基于 SDN 的自组织网络结构在集中式和分布式之间进行折中，是 SDN 下自组织网络的新型部署架构，可以概括为“物理上分布，逻辑上集中”网络控制方式<sup>[11]</sup>。“物理上分布”指网络节点所处的网络分级地位不同，从边缘网络到核心网络依次为独立节点、接入控制器和全局控制器；“逻辑上集中”指不同级别的控制器运行相应级别的 SDN 控制软件和应用配置，在同一级上拥有同样的控制能力和本地服务能力。全局控制器负责组建“流”的最高层分发系统，通过发布控制事件来同步各级控制器；接入控制器连接移动的独立节点并对其问询和管理。当独立节点进入或移出接入控制器控制范围时，接入控制器通过 SDN 北向接口重新配置独立节点，同时接入控制器还可以通过 SDN 东西向接口与相邻的活跃接入控制器建立连接。为了维护接入控制器面向独立节点的全局性和相对于全局控制器的本地化，接入控制器采用“发布/订阅”事件的方式完成状态更新。

### 3 基于 SDN 的自组织网络分级路由建模

定制化路由是自组织网络长远发展的必然要求。SDN 的设计理念开放了网络控制平面，从而为面向服务定制的路由提供了基础网络条件。同时，SDN 并不是具体技术（如 OSPF（open shortest path first）等），所以完成面向服务定制的路由需要现实的方法。基于 SDN 的自组织网络路由过程可以描述如下。首先，建立备选节点和链路集合。SDN 控制器将用户需求映射为具备用户服务特征的备选节点和链路的集合。其次，计算服务路径。SDN 控制器根据掌握的节点和链路状况（资源、网络效能等）视图，在备选节点和链路的集合中找出服务提供节点。以上提供服务的节点和链路是服务路径上的相邻节点，这些节点是定制化路由上必须存在的节点，本文将这些节点关键点和关键链路称为路由关键点和关键链路，由 SDN 控制器下发至网络相应节点。最后，实现定制化路由。路由关键点和关键链路按照本地路由协议完成数据在源节点和目的节点上的传输。

基于以上过程，从功能角度看，SDN 下的路由涵盖了服务路径，即服务路径上的节点和链路作为路由关键节点和关键链路是物理路由的组成部分；从实现角度看，SDN 下的路由仍是节点运行路由协议计算下一跳的过程，只是下一跳集合中除必须包含路由关键点和关键链路外，还可能存在其他

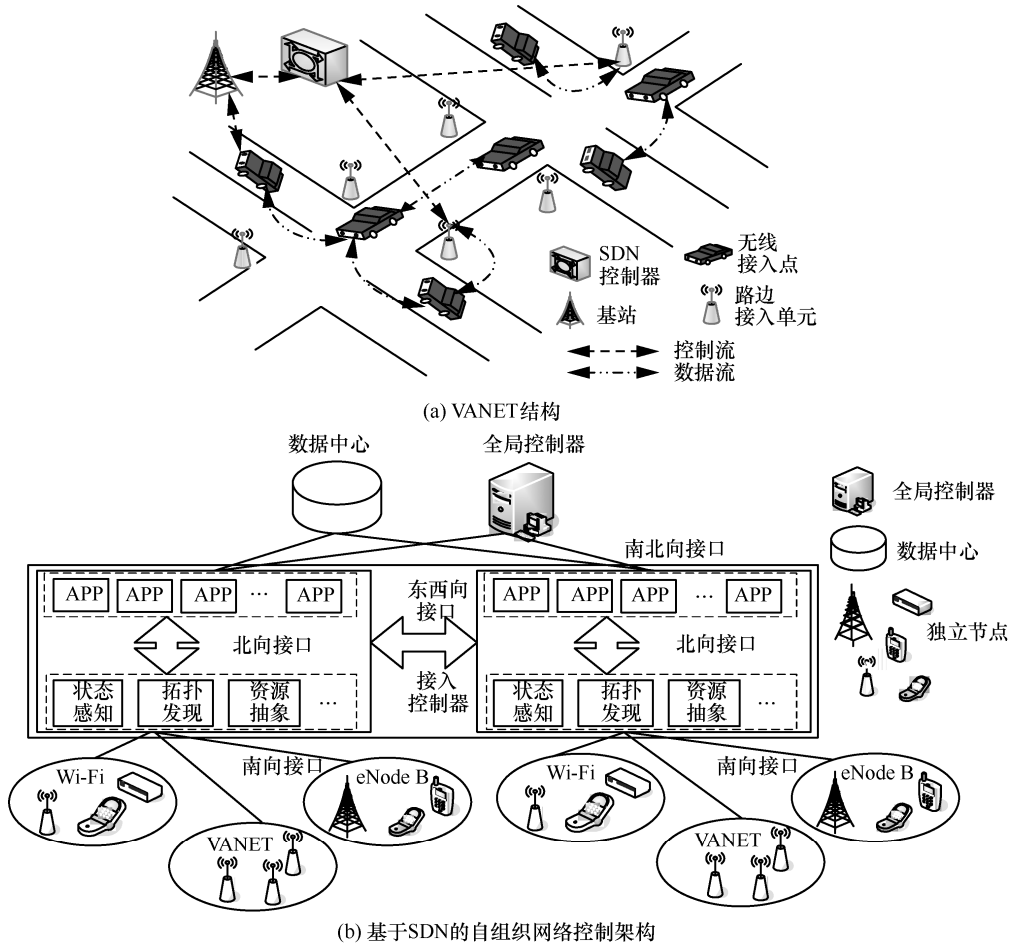


图2 VANET与基于SDN的自组织网络控制架构示意

中间节点。所以，SDN下的路由并不是颠覆路由的本质含义，而是基于服务路径的路由实现方法扩展，这一扩展最重要环节在于找到路由关键节点和关键链路。当然，一般情况下，SDN控制器能够掌握本控制域内节点状况，合理计算出定制路由。但由于自组织网络独立节点移动性、能量受限等不确定因素，不排除SDN控制器对移动节点信息更新的滞后性，因此存在移动节点不能胜任路由关键节点和关键链路的个别异常情况。此时，由移动节点将自身状况主动上报SDN服务器，请求重新计算服务路径和确定路由关键节点和关键链路，此时的服务路径不一定是最优的，但在路由上却是可实现的。

路由关键节点和关键链路在服务路径上是连续的，但在端到端的路由上却往往是离散的，受到自组织网络拓扑变化较快的制约，由SDN控制器计算出路由上的所有节点是不切实际的；同时，服务路径已能够完全呈现用户需求，由SDN控制

器计算出路由关键节点和关键链路间的其他节点也是没有必要的。基于以上分析，SDN下自组织网络的路由选择可以被建模成为一种带约束下的路由关键点和关键链路选择问题（RKNLSP, routing key node and link selected problem），这个问题的特殊性在于路由关键节点和关键链路的SDN控制器集中式选择，以及以上节点和链路间分布式路由计算要并行实现。RKNLSP优化目标为充分有效地利用网络的有限资源，为业务请求提供更优的服务。这里，路由关键点和路由关键链路间路由按网络常规路由协议配置。RKNLSP形式化描述如式(1)所示。

$$\begin{aligned}
 & \mathcal{P}(\text{Routing}) \quad \max_{u \in \xi} \text{RKNLSP}_{\xi} \\
 & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \forall n \in N^k : \text{Demand}(n) \leq \text{Remain}(n) \leq \text{Capability}(n) \\ \forall l \in L^k : \text{Demand}(l) \leq \text{Remain}(l) \leq \text{Capability}(l) \\ \forall n \in N : \text{Protocol}(\text{Next}(n)) \in \text{PROTOCOL} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中,  $u$  是 SDN 控制器计算的一种网络资源可行的配置,  $\zeta$  是网络资源全部可行配置的集合;  $N^k$  和  $L^k$  分别表示备选路由关键节点和链路的集合,  $N$  表示网络全部节点的集合, PROTOCOL 表示网络可配置路由协议的集合; Demand(\*)表示某业务要求关键节点或者链路能够提供的资源, Remain(\*)表示关键节点或者链路剩余的资源, Capability(\*)表示关键节点或者链路总的资源量。

网络架构是路由总体设计的主要依据, 结合图 2(b)所示的网络结构, 基于 SDN 的自组织网络路由规则也是分层次的, 即为接入控制器主导的独立节点间路由和全局控制器主导的接入控制器间的路由。对网络业务特点和网络自身特点的分析是进行路由协议设计的前提, 在接入控制器控制下由独立节点组成的接入层面, 网络业务表现为数据的采集与回传, 具有明显的方向性, 自组织方式是实现多跳信息传递和网络控制的手段, 能量集约化是路由设计的重要因素; 在接入控制器和全局控制器组成的核心平面, 网络业务表现为端到端的横向业务, 具有显著的用户服务特征, 如何保证服务有效性是路由设计的关键问题。所以, RKNLSP 又可分为面向服务的 2 个子优化问题, 即在网络接入层面的系统耗能最小化问题和在核心层面的网络效能最大化问题。

### 3.1 接入控制器域内路由能耗的建模

传统的自组织网络中, 每个独立节点只掌握局部网络拓扑信息, 优化的目标却是“多条传输路径的端到端总功耗”的全局目标, 而完成全局目标则要依赖源节点及中继节点对相邻节点的探测, 不断积累一跳外网络的拓扑信息。此时节点能耗由两部分组成: 用于探测拓扑信息部分的  $C_i^{INF}$  和用于通信部分的  $C_i^{COM}$ , 则节点能耗为  $C_i^{NODE}(R) = C_i^{COM}(R) + C_i^{INF}(r_i)$ 。系统能耗优化模型为  $\min_R C^{SYS} = \sum_{i \in V} (C_i^{COM} + C_i^{INF})$ 。假设节点  $i$  在  $r_i$  范围内以按需方式发送邻居探测消息, 收到包含目的节点位置信息的信息, 如果节点的探测范围  $r_i$  扩大, 则  $C_i^{INF}$  增加, 但由于可能选择到更优的路径,  $C_i^{COM}$  可能减少, 找到合适的  $r_i$ , 就使系统整体能耗最小化<sup>[12]</sup>。这个问题可以采用整数规划的方法解决, 但是复杂度偏高。

### 3.2 全局控制器域内系统服务效能的建模

作为支持自组织网络整体服务效能提升的一项关键技术, 全局控制器域内的路由设计已不能仅

考虑节点内简单的数据转发功能, 伴随着接入层面接入控制器节点性能的提升, 路由的构建不仅需要考虑节点转发能力, 而且还要考虑节点的服务部署情况、网络的总体效能等因素。由于满足某一服务的节点和链路不唯一且提供服务的节点性能和链路代价不相同, 路由计算将比现有网络路由多采用的距离矢量或链路状态算法更复杂。本文将全局控制器域内 RKNLSP 抽象成为最优化问题, 并建立与之相应的整数线性规划模型, 如式(2)~式(8)所示, 符号及其含义如表 1 所示, 旨在满足网络效能最大化目标条件下找到最优的路由<sup>[13]</sup>。节点和链路服务特征如式(3)~式(4)所示。式(5)是节点服务能力约束。式(6)是节点间链路能力约束。式(7)~式(8)约束针对某一服务, 全局控制器最终下发的路由策略中所包含路由由关键点和链路的唯一性。

$$NLSP \quad \max \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j \in IS_i^p} u_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j \in IS_i^p} q_{ij}^k x_{ij} \leq Q_k^{req}, \quad 1 \leq k \leq \tau, 1 \leq \tau < T \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j \in IS_i^p} q_{ij}^k x_{ij} \geq Q_k^{req}, \quad 1 + \tau \leq k \leq T \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N Rc_{ij}^N x_{ij} \leq Res_u^N, \quad \forall u \in N^s \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N Rc_{u,v}^L \delta_{u,v} \leq Res_{u,v}^L, \quad \forall u \in N^l \quad (6)$$

$$\sum_{j \in IS_i^p} x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N, j \in IS_i^p \quad (8)$$

表 1 式(2)~式(8)的符号及其含义

符号	含义
$u_{ij}$	节点或链路成为路由关键点或链路后产生的网络效能
$x_{ij}$	标识变量, 如果节点被全局控制器选择, 则 $x_{ij} = 1$ , 否则 $x_{ij} = 0$
$\delta_{u,v}$	标识变量, 如果链路被全局控制器选择, 则 $\delta_{u,v} = 1$ , 否则 $\delta_{u,v} = 0$
$Q_k^{req}$	服务路径要求的服务特征矢量
$Rc_{ij}^N$	当前服务需要的节点能力
$Res_u^N$	节点当前的剩余能力
$Rc_{u,v}^L$	当前服务需要的链路能力
$Res_{u,v}^L$	链路当前的剩余能力
$N^s$	满足服务要求的节点集合
$L^s$	满足服务要求的链路集合
$IS_i^p$	满足服务要求且决定自身成为路由关键点的节点集合

### 4 基于 SDN 的自组织网络路由设计与求解

基于以上论述可以看到, SDN 下自组织网络路由问题从总体上看仍可归结为一类典型的整数线性规划 (ILP, integer linear program) 问题, 通常情况下, 这一类问题属于 NP-hard 问题, 求解时复杂度较高。当问题中变量数较少时, 可以采用穷举算法遍历搜索空间的所有可行解, 以确定最优解。但是, 当模型中变量数增加时, 问题求解的复杂度是呈指数增加的, 难以再通过穷举遍历的方式进行求解。因此, 快速且优质地获得模型解的关键在于约减变量数目。路由关键节点体现为 2 种类型: 一种是服务要求节点本身能够提供某种功能服务; 另一种是服务路径要求两节点之间的某段功能链路。所以节点与链路约束可统一为约简为对节点的约束。另外, 从工程角度而言, 与获取网络全局信息相比, 获取网络关键信息 (节点和链路) 的过程更具确定性、结果更具针对性, 也可以进一步降低 ILP 的求解复杂度。

#### 4.1 基于节能的独立节点映射

SDN 下的自组织网络在接入层面, 独立节点能量受限, 节能成为此时服务特征的主要依据, 伴随着独立节点的移动性, 固化独立节点与接入控制器的信息交互行为是节能的关键。在接入控

制器控制范围内, 控制器管理多个与之直接相连的独立节点, 并通过间接查询等方式管理其他非直连的独立节点。接入控制器可以将所有的转发规则一次性写入独立节点转发流表, 从而使其在任何数据分组到达之前便知道所有可达地址。主动模式中, 接入控制器主动将流表进行更新和推送, 节点不能将失配的数据分组转发给接入控制器, 因此不能发起一个新建的数据流业务。被动模式中, 接入控制器不会主动地进行流表更新, 只有接收到底层的独立节点发送来的请求时, 才会向相应的独立节点下发流表更新信息。与传统的自组织网络由独立节点“探测式”节能路由设计不同, 接入控制器是这一层面路由决策者, 接入控制器对独立节点的“发布/订阅”式信息更新, 使独立节点不确定的探测过程固化为有限次分阶段的信息交互行为。节点能耗和系统能耗如图 3 所示。

从路由方面考虑的能量集约化有 2 种思路: 节能和能耗均衡。其中, 节能即通过寻找节能的路由, 减少路由建立和维护的控制开销或提高路由可靠性方法, 降低传输一定量的数据所需要的能量; 能量均衡即通过合理地从空间上调度能源, 使网络中节点能量均衡消耗减少, 从而延长网络寿命。首先, 接入控制器掌握所控独立节点状态, 由接入控制器

信息交互阶段	信息交互行为	节点能耗	符号及含义
阶段 1: 独立节点加入接入控制器控制域阶段	独立节点向接入控制器上报信息	$C_{ini}^{INF} = (E_{elec\_sent} + \beta d_{(i,C)}^\alpha) L_{ini}$	$E_{elec\_sent}$ : 发送端电路能耗
	独立节点接受独立控制器初始化配置	$C_{ini}^{COM} = (E_{elec\_receive} + \beta d_{(i,j)}^\alpha) L_{con\_ini}$	$E_{elec\_receive}$ : 接收端电路能耗 $L_{ini}$ : 独立节点上报信息长度
阶段 2: 网络相对稳定阶段	独立节点接收接入控制器周期性更新信息	$C_{com\_cyc}^{COM} = (E_{elec\_receive} + \beta d_{(i,j)}^\alpha) L_{com\_cyc} \frac{1}{T}$	$L_{con\_ini}$ : 接入控制器初始化信息长度 $L_{com\_cyc}$ : 接入控制器定期更新信息长度
阶段 3: 网络拓扑变化阶段	以能耗最小找到下一跳节点	$C_{change}^{INF} = (E_{elec\_sent} + \beta d_{(i,j)}^\alpha) L_{change}$	$L_{change}$ : 拓扑变换后独立节点上报信息长度
	独立节点接收接入控制器下发的全局能量均衡后的转发表, 更新信息产生的能耗	$C_{com\_change}^{COM} = (E_{elec\_receive} + \beta d_{(i,j)}^\alpha) L_{com\_change}$	$L_{com\_change}$ : 拓扑变换后独立控制器下发的更新信息长度
阶段 4: 中继业务阶段	独立节点转发信息能耗	$C_{relay}^{COM} = \left\{ \sum_{i \in I'} \beta d_{(i,j)}^\alpha + 2E_{elec} \right\} p$	$T$ : 接入控制器信息更新周期 $\beta$ : 距离衰减系数 $\alpha$ : 路径衰减因子 $p$ : 某业务的平均速率 $V$ : 网络所有节点的集合
系统能耗: $C^{SYS} = \sum_{i \in I'} (C_i^{COM} + C_i^{INF})$			$d_{(i,j)}$ : 独立节点 $i$ 到独立节点 $j$ 的距离, 这个值的变化依赖于节点移动或接入控制器能量均衡后选择的与目标节点的一跳节点距离 $d_{(i,C)}$ : 独立节点 $i$ 到接入控制器距离, 这个值的变化依赖于节点移动

图 3 网络接入层次节点能耗和系统能耗

以最小能耗路径（阶段1、阶段2和阶段3）<sup>[12]</sup>来引导节点间路由；其次，当节点被选为业务中继节点时（阶段4），一定是经过接入控制器完成控制范围内能量均衡工作的结果；最后，接入控制器有持续的能量供给，实现能量均衡算法的复杂度和能量消耗都可不计入以移动节点生存性为目的路由开销。所以，系统能耗最小化即每个节点能耗和最小化，从而使系统能耗由整数规划问题约减为线性求和问题，大大降低了问题求解复杂度。假设节点收发损耗相同为  $E_{elec}$  ( $E_{elec\_sent}=E_{elec\_receive}=E_{elec}$ )，交互信息长度相同为  $L$  ( $L_{int}=L_{con\_cyc}=L_{con\_ini}=L_{change}=L_{com\_charge}=L$ )，兼顾到节点移动性，接入控制器域内两节点的距离最大值  $D$  为控制器的控制范围，此时系统能耗存在最大值。另外，在接入层面上，选择合适的参数去抽象无线设备错综复杂，且某些参数因为实时性和复杂性无法被控制器动态配置，所以本层面路由关键点间的物理路由（即若干段点到点的物理链路）仍采用现有协议完成，如 AODV (Ad Hoc on-demand distance vector routing) 等。

综上所述，将本层面路由整体过程概括为算法1，具体步骤如下。

**算法1** 基于节能的独立节点映射路由算法

- 1) SDN 控制器计算控制域内节点能耗，周期性更新网络能量视图；
- 2) 若节点发出路由请求，转到步骤3)，否则转到步骤1)；
- 3) SDN 控制器以最小能耗路径引导路由，找到备选下一跳节点；
- 4) SDN 控制器通过能量均衡后确定下一跳节点；
- 5) 重复步骤1)~步骤3)。
- 6) 若找到最后一个路由关键点，转到步骤7)，否则，转到步骤3)；
- 7) SDN 控制器记录路由关键点并下发相应网络节点；
- 8) 若网络节点没有异议，转到步骤9)，否则，网络节点上报自身状况给SDN控制器，转到步骤2)；
- 9) 路由关键点运行普通路由协议；
- 10) return；

## 4.2 基于服务能力矩阵的节点（网络核心侧节点）映射

SDN 下的自组织网络在核心层面，以用户为导向的服务有效性成为网络服务能力的关键，此时路由的构建就是通过服务能力矩阵计算满足服务需

求服务路径，继而以网络效能最大化将服务路径上的节点映射为路由关键点集合。

### 4.2.1 效能函数

网络效能函数是以节点服务能力为变量的函数。服务能力与网络效用可能表现出相同的特性，即服务能力越大，效用越大，如节点能提供的带宽越大，效用就趋向增大；服务能力与网络效用也可能表现出相反的特性，即服务能力越大，效用越小，如节点耗能越大，效用就趋向减小。也就是说，一些服务能力越大，效能越优，另一些服务能力越小，效能越优，所以定义转化函数（如式(9)和式(10)所示）以取得基于所有能力变量的一致性优化结果<sup>[13]</sup>。

$$f^- : v_{ij} \rightarrow [0,1], v_{ij} \in \Omega^- \quad (9)$$

其中， $\Omega^- = \{q_{ij}^k | q_{ij}^k \in Q_k, 1 \leq k \leq \tau, 1 \leq \tau \leq T\}$ 。

$$f^+ : v_{ij} \rightarrow [0,1], v_{ij} \in \Omega^+ \quad (10)$$

其中， $\Omega^+ = \{q_{ij}^k | q_{ij}^k \in Q_k, 1 + \tau \leq k \leq T\}$ 。

不失一般性，本文将节点具备的服务能力归一化为  $[0,1]$ 。节点第  $k$  个服务能力矢量表示为  $V_i^k = \{v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{ij}^k, \dots, v_{iM}^k\}$ ，若  $v_{ki}^{\max}$  是  $V_i^k$  中的最大值且  $v_{ki}^{\max}$  为第  $j$  个元素的值，即  $v_{ki}^{\max} = \max_{v_{ij}^k \in V_i^k} v_{ij}^k$ 。引入

一个比值  $r_{ij}^k = \frac{v_{ij}^k}{v_{ij}^{\max}}$  归一化矢量  $V_i^k$ ，则得到  $\tilde{V}_i^k = \{r_{i1}^k, r_{i2}^k, \dots, r_{ij}^k, \dots, r_{iM}^k\}$ 。将  $r_{ki}^k$  简记为  $r$ ，转化函数可以分段如式(11)和式(12)定义，满足效能函数的归一化单调性要求。

$$\text{当 } 1 \leq k \leq \tau \text{ 时, } f^+(r) = \begin{cases} e^{-\frac{1-r}{r}}, & 0 \leq r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{当 } \tau < k \leq T \text{ 时, } f^-(r) = \begin{cases} e^{-\frac{r}{1-r}}, & 0 \leq r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases} \quad (12)$$

为此，效能函数可以定义为  $f^+$  和  $f^-$  的仿射组合如式(13)所示， $w_k \geq 0 (1 \leq k \leq t)$  为仿射系数且

$$\sum_{k=1}^T w_k = 1。$$

$$u_{ij} = \sum_{k=1}^m w_k f^-(r) + \sum_{k=m+1}^t w_k f^+(r) \quad (13)$$

### 4.2.2 服务能力矩阵与服务请求矩阵

基于网络图  $G^S = (N^S, L^S)$ ， $S^{pe} = \{p_e | e = 1, 2, \dots, E\}$  表示基本功能单元集合，那么节点  $N_n (N_n \in N^S, 1 \leq n \leq N)$  对应的所有服务而产生的网络效能为

$$c_{i,r} = u_{n_i}^N \delta_{n_i}^{p_e} \quad (14)$$

其中, 参数  $u_{n_i}^N$  是网络节点  $n_i$  某服务对应的网络效用值, 可由式(12)得到; 参数  $\delta_{n_i}^{p_e} \in \{0,1\}$  是二进制取值参数, 其指示节点  $n_i$  上能否提供某服务能力  $p_e$ ,  $\delta_{n_i}^{p_e}=1$  表示能够提供,  $\delta_{n_i}^{p_e}=0$  表示不能提供。那么, 节点集合  $N^S$  对应的服务能力矩阵为  $\mathbf{M}_{\text{pro}} = [c_{i,r}]_{N \times E}$ 。

满足服务路径需求  $C^{p_e} = \{p_e | e=1,2,\dots,E', E' \leq E\}$  的服务请求矩阵  $\mathbf{P}_{\text{req}} = [r_{q,q}]_{E \times E}$ ,  $\mathbf{P}_{\text{req}}$  是一个对角矩阵, 也就是其矩阵元素满足式(15), 即服务路径需求包含的基本功能单元所对应的  $q_{r,r} = 1$ , 其余  $q_{r,r} = 0$  [14]。

$$q_{r,r} = \begin{cases} 1, r=r \text{ 且 } C^{p_{E'}} = S^{p_{E'}} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

### 4.2.3 节点 (网络核心侧节点) 映射

基于服务能力矩阵和服务请求矩阵计算备选选择矩阵  $\mathbf{N}_{\text{sel}} = [s_{i,r}]_{N \times E}$ , 该矩阵包含服务路径需求  $C^{p_e}$  中所需的各类服务, 计算过程通过矩阵乘法得到, 如式(16)所示。

$$\mathbf{N}_{\text{sel}} = \mathbf{M}_{\text{pro}} \times \mathbf{P}_{\text{req}} \quad (16)$$

其中, 设矩阵  $\mathbf{N}_{\text{sel}}$  的各列向量为  $\mathbf{s}_r = (s_{1,r}, \dots, s_{N,r})^T$  ( $r=1,2,\dots,E$ ), 因此选择矩阵可简化表示为  $\mathbf{N}_{\text{sel}} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_E]$ 。如果  $\mathbf{s}_r = 0$ , 表示没有节点能够满足服务路径需求  $C^{p_e}$ ; 如果  $\mathbf{s}_r \neq 0$  且  $s_{i,r} \neq 0 (s_{i,r} \in \mathbf{s}_r)$ , 表示有网络节点  $n_i$  能够作为服务路径需求  $C^{p_e}$  的可选节点。

依据所得的选择矩阵  $\mathbf{N}_{\text{sel}}$ , 可选择出最优的网络节点用于服务路径需求  $C^{p_e}$  的服务路径构建。对于服务路径需求  $C^{p_e}$  的每一基本功能单元, 选择节点  $n_i$  中能提供最基本功能单元  $p_e$ , 且具有最大网络效能的节点  $n_i$  作为该基本功能单元的服务节点, 该过程可以形式化表示为

$$s_{i,r}^{\text{sel}} = \arg \max_i \{s_{i,r} | s_{i,r} \in \mathbf{s}_r, \mathbf{s}_r \neq 0\} \quad (17)$$

设定网络节点符号  $n_{i,r}^{\text{sel}}$  表示所选矩阵元素  $s_{i,r}^{\text{sel}}$  所对应的节点。最后, 将全部所选的服务节点构成路由关键点集合  $\Omega^N = \{s_{i,g}^{\text{sel}} | g=1,2,\dots,E\}$ 。

### 4.2.4 基于节点 (网络核心侧节点) 映射的路由算法

综上所述, 将基于节点映射的路由算法概括为

算法 2<sup>[15]</sup>, 具体介绍如下。

**算法 2** 基于节点 (网络核心侧节点) 映射的路由算法

- 1) 计算网络节点的服务能力矩阵  $\mathbf{M}_{\text{pro}}$ ;
- 2) 计算网络节点的服务请求矩阵  $\mathbf{P}_{\text{req}}$ ;
- 3) 计算备选选择矩阵  $\mathbf{N}_{\text{sel}}$ ; 式(15)
- 4) for each  $p_e$  exist in  $C^{p_e}$  do
- 5)  $s_{i,r}^{\text{sel}} = \text{Null}$ ; //初始化备选节点集合
- 6) for each  $P_e (e=1,\dots,E)$  do
- 7) if  $C^{p_e} == S^{p_e}$  and  $\mathbf{s}_r \neq 0$  then do
- 8) while ( $s_{i,r}^{\text{sel}} = \text{Null}$  and  $\mathbf{s}_r \neq \text{Null}$ )
- 9)  $s_{i,r}^{\text{sel}} = \arg \max_i \{s_{i,r} | s_{i,r} \in \mathbf{s}_r, \mathbf{s}_r \neq 0\}$ ;
- 10)  $n_i \mapsto s_{i,r}^{\text{sel}}$ ; //节点  $n_i$  被选为基本功能单元  $P_e$  的备用节点
- 11) if  $n_{i,g}^{\text{sel}}$  satisfies the constraints
- 式(16)
- 12)  $s_{i,r}^{\text{sel}} \mapsto s_r^{\text{sel}}$ ; //服务  $P_e$  的映射节点
- 13) else
- 14)  $\mathbf{s}_r = \mathbf{s}_r \setminus s_{i,r}^{\text{sel}}$ ; // 从向量  $\mathbf{s}_r$  中剔除元素  $s_{i,r}^{\text{sel}}$
- 15) end if
- 16) end while
- 17)  $s_r^{\text{sel}} \mapsto \Omega^N$ ; // 选定  $P_e$  的服务节点  $s_r^{\text{sel}}$  并加入集合  $\Omega^N$
- 18) else
- 19)  $s_r^{\text{sel}} \mapsto \Omega^N$ ;
- 20) end if
- 21) end for
- 22) end for
- 23) for each  $s_r^{\text{sel}}$  in  $\Omega^N$
- 24) if  $s_r^{\text{sel}} == \text{Null}$
- 25) Output key node failure; //输出路由关键点失败
- 26) end if
- 27) end for
- 28) return Output key node success result  $\Omega^N$  // 输出路由关键点成功
- 29)  $\Omega^N \mapsto \Omega^R$ ;
- 30) Protocol(Next( $s_r^{\text{sel}}$ ))  $\mapsto \Omega^R$ ;
- 31) sort( $\Omega^R$ );

32) return Output mapping success result  $\Omega^R$  // 输出路由结果

## 5 系统设计与验证

### 5.1 系统设计

综上, SDN 下的路由过程可概括为独立节点依照接入控制器给出的能耗优化路径, 将服务请求经接入控制器上报至全局控制器, 全局控制器接受服务请求后, 开始启动路由构建。路由构建经过 3 个过程: 首先, 全局控制器以网络效能最大化选择核心层路由关键节点; 然后, 接入控制器以能耗集约化选择接入层路由关键节点; 最后, 路由关键节点间路由构建。由于关键节点间路由采用现有的路由协议, 对于这些协议研究的相关实验参数已经相当丰富, 本文不再重点关注。以下实验以服务路径构建为主要参考依据。

为了证明本文算法的有效性, 设计并搭建了如图 4 所示的原型系统。基于 SUMO (simulation of urban mobility) 网络模型<sup>[16]</sup>, 利用 NS-3 模拟器在 1 000 m×1 000 m 区域内布设 5 个接入控制器, 每个接入控制器最多控制 30 个移动节点。该系统使用 ONOS 作为 SDN 控制器, 使用 OpenFlow 1.3 协议作为控制器与交换机之间的南向接口。ClickOS 是一种支持网络中间件服务的软件虚拟化服务实现平台, 因此原型系统利用其作为基本功能单元的运行平台。接入控制器在原型系统中具备双重功能, 既是面向全局服务器的 SDN 交换机, 也是面向独立节点的 SDN 控制器。

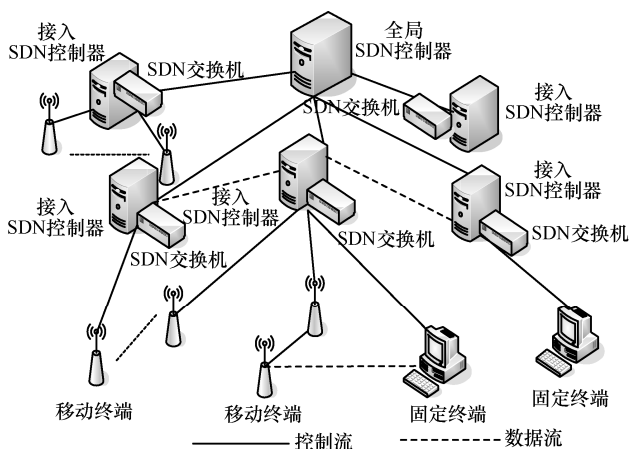


图 4 基于 SDN 的自组织网络原型系统

### 5.2 实验验证

区别于传统的自组织网络路由, SDN 下的自组

织网络路由是基于服务能力 (本文主要指能耗和网络效能) 分级实施的, 这样的路由不仅要适应自组织网络移动性的特点, 更要发挥 SDN 集中控制与服务定制化的优势。所以, 实验验证着力点在于: 首先, 接入层面评估各中路由方式下独立节点移动中的能耗优劣; 其次, 核心层面对比服务路径数目与网络效能的关系; 最后, 评估 SDN 控制器主导下的自组织网络路由的总体效果。

#### 5.2.1 接入级路由算法比较

节点移动性通常体现为节点移动速度; 用户业务流特性在接入层面体现为节点并发业务速率。为比较节点移动速度对路由能耗的影响, 采用随机路点模型<sup>[17]</sup>且业务流特性固定。基于图 4 系统的接入层面, 在单个接入控制器控制范围内完成通信过程, 每次通信的独立节点及其数据流由 NS-3 服务器/客户端轮询流序列产生, 在设定相同节点数量 (总节点数为 20 个, 活动节点数为 10 个) 且工作在速率 0.25 packet/s (低业务速率)、25 packet/s (高业务速率) 的情况下, 节点速度按每 3 m/s 的步长从 0 增加到 15 m/s。

图 5 每次配置参数的仿真持续时间 5 min, 共进行 10 次仿真, 取传输 1 bit 分组的端到端能耗平均值。从整体趋势上分析, 各路由方式在不同业务速率下能耗曲线平稳, 表明各路由方式对节点移动的适应性较强。其中, SDN 方式能耗均小于其他路由方式, 是由于接入控制器避免了不确定的探测过程且总能选择能耗最小的节点建立端到端路由。相对于图 5(a), 图 5(b) 的能耗曲线整体上移, 是由于业务速率提升后加大了发送电路能耗; 在能耗曲线整体上移的趋势下, 曲线间距离也增大, 尤其是 AODV 曲线上升更为明显, 说明能耗受业务特征影响是现实存在的, 需要在网络核心层面考虑业务特征因素。

图 6 每次配置参数的仿真持续时间 50 min, 共进行 3 次仿真, 获取各节点剩余能量平均值。可以看出, 节点剩余能量受业务特征影响, 高业务速率下耗能稍高。SDN 方式下各节点平均能耗剩余柱状图较为规整, 而其余路由方式节点平均能耗剩余柱状图呈锯齿状, 说明 SDN 方式下节点间能耗相对均衡, 原因是接入控制器始终以负载均衡选择关键点。

#### 5.2.2 核心层次网络效能评估

基于网络配置简便的目的, 朴素的手动配置方

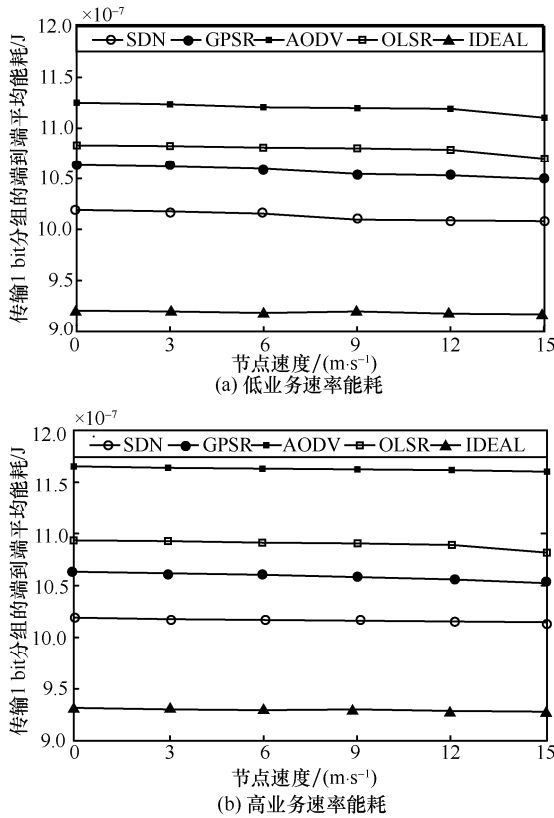


图 5 传输 1bit 分组的端到端平均能耗

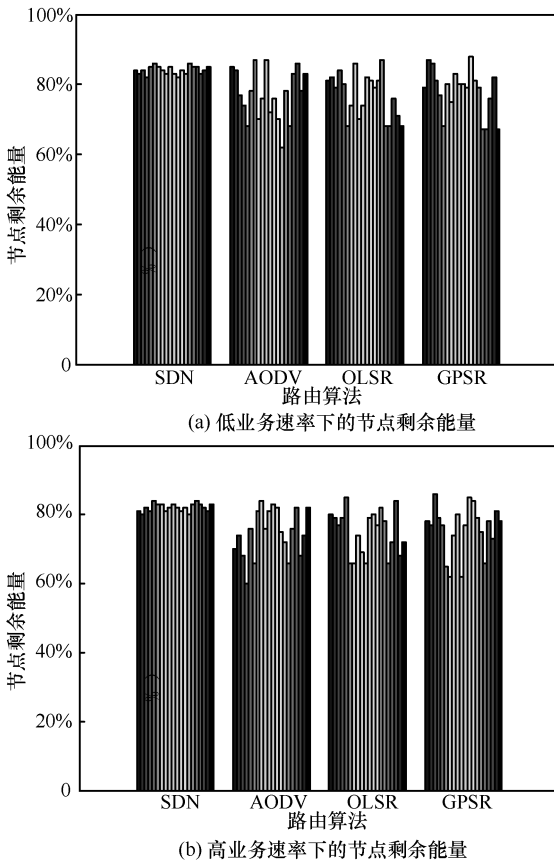


图 6 节点剩余能量

式是构建路由的常用方法，其主要思路是同样的服务尽可能地让一个关键点提供，当一个节点的资源耗尽后，开始部署下一个节点，依次连续部署下去。本文依据式(14)和式(18)计算了每个关键点上资源占用率 (ROR, resources occupied ratio) 和网络效用值的情况，并且将本文 RKNLSP 解决方法所得结果与基于手工配置方法所得结果进行比较。ROR 定义为提供基本功能单元时节点或链路上每一资源的已使用量 ( $res_{ki}^{occupied}$ ) 与该资源的总量 ( $res_{ki}^{Total}$ ) 的平均比值。其中， $k$  ( $k=1,2,\dots,K$ ) 是资源种类， $i$  ( $i=1,2,\dots,N^S+L^S$ ) 是网络节点或链路的编号， $N^S$  和  $L^S$  分别是网络中节点和链路的总数目， $\delta(R_i^k)=1$  表示节点或链  $i$  上有资源种类  $k$ ，否则  $\delta(R_i^k)=0$ 。

$$ROR = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N^S+L^S} \sum_{k=1}^K \delta(R_i^k)} \left( \sum_{i=1}^{N^S+L^S} \sum_{k=1}^K \frac{res_{ki}^{occupied} \delta(R_i^k)}{res_{ki}^{Total}} \right) \quad (18)$$

如图 7 所示，在路由数目分别为 10 和  $10^4$  的条件下，本文 RKNLSP 方法在不同服务路径长度下，网络节点的平均效用值分别约为 0.69 和 0.53，而相同条件下，手动方法的网络平均效用值约为 0.42 和 0.38。比较而言，本文所提出的 RKNLSP 解决方法的网络效能相比于手动配置方法整体提高约 14%，但在路由数目相对较少的情况下，RKNLSP 解决方法优势并不明显。分析原因是本文 RKNLSP 解决方法能够协同调配全网范围内的资源构建服务路径，使不同网络节点上的资源能够得到较为充分的利用。但当路由数目较少时，由于 RKNLSP 解决方法产生一定的计算开销，所以网络平均效用值相差不多。另外，RKNLSP 解决方法资源平均占有率低于手动配置方法，意味着 SDN 控制器参与下为同一基本功能单元所付出的资源量更少或者说节点间的资源占有量更均衡。当路由数目较少时，路由长度增加并不显著地增加资源占有率且 2 种方法资源占有率相差也不大；当路由数目激增时，随着路由长度增加手动配置方法资源平均占有率较 RKNLSP 方法增长迅速。这是因为 RKNLSP 的自适应性只有在网络服务数量规模下才能显现。

### 5.2.3 网络整体性能效能评估

基于图 4 原型系统建立一个独立节点间信息交

换场景，源节点和目的节点之间的业务流量需要获得一定的可靠性支持。实际实验中，利用 C#语言编写一个自动机来产生大量的服务能力参数，其中每一路由由分配有 1~5 个不同的基本功能单元数目。每次实验后，统计服务路径的构建时间（接入控制器计算时间与全局控制器计算时间之和）、OpenFlow 配置时间和流量在用户和服务器之间的传输时延。重复统计多次得到平均值如图 8 所示。

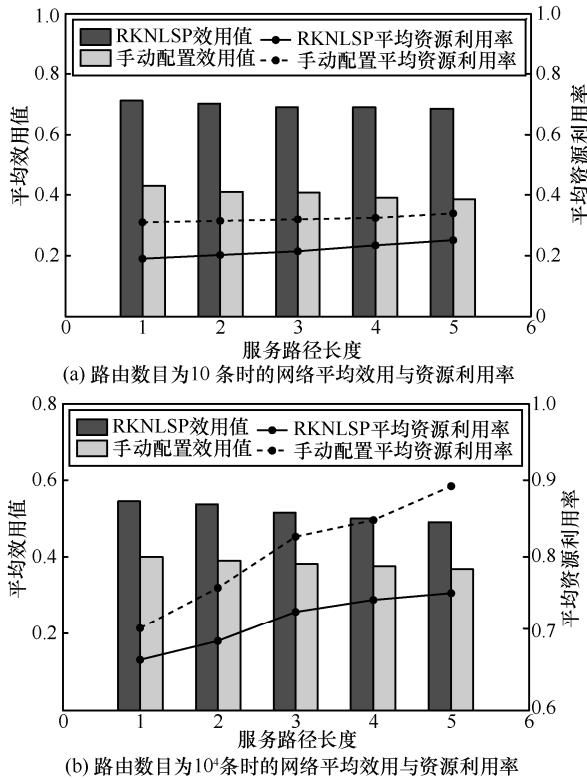


图 7 不同路由数目条件下的网络平均效用与资源利用率示意

比较图 8(a)和图 8(b)中的结果可以看出，服务路径的构建时间、OpenFlow 配置时间和传输时延都伴随服务路径数目的增加而增长，并与服务路径的长度增长趋势一致。统计结果也显示服务路径构建时间在服务路径的构建中占有重要的比例，并且该比例值随网络中路由数目的增加而提高。其原因是：一方面，当路由数目增加时，控制器需要处理更多的请求，从而使路由建立时间延长；另一方面，由于路由关键点的负载增加，从而需要更多的时间来完成服务处理。

同时，文献[18]在互联网环境下设计了一种集中调控的分布式路径选择算法，其中集中调控等价于本文中 SDN 控制器计算服务路径，分布式选择等价于路由关键点间的路由过程。图 8(a)和图 8(b)

中的结果与文献[18]结果具有一致性，即服务响应时延（OpenFlow 配置时间与服务路径计算时间之和）相对于其他算法普遍降低。

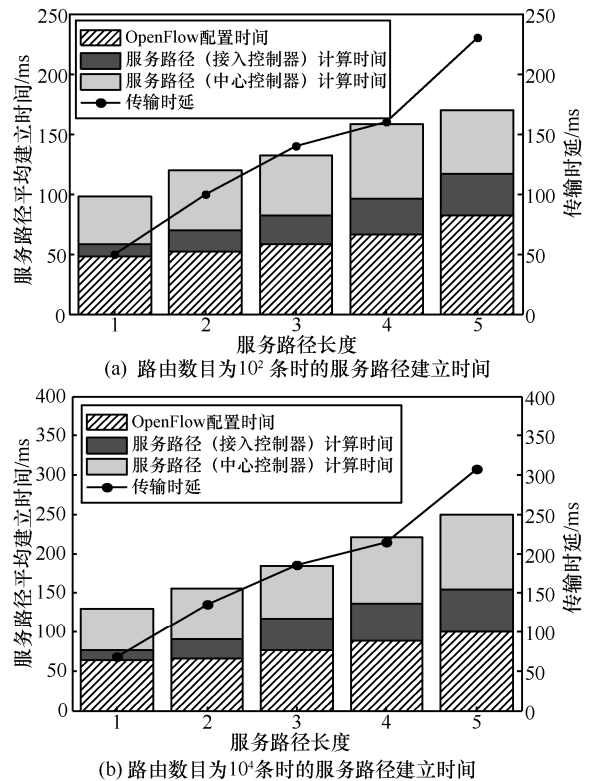


图 8 不同路由数目条件下的服务路径建立时间示意

## 6 结束语

当前，在 SDN 技术的推动下，新型网络体系结构的设计成为未来网络的研究热点之一，与 SDN 结合的自组织网络研究方兴未艾。节点能量受限与移动性是自组织网络的显著特点，也是未来自组织网络路由设计的制约因素，且定制化服务的更高要求使自组织网络在路由层面尤其是功能路由设计上进展乏力。SDN 将网络传统的垂直紧耦合的体系结构解耦，重新构造模块化的网络功能结构。基于此 SDN 下的自组织网络路由可以描述为逻辑上的服务路径和实现上的物理路由之叠加复合。首先，基于 SDN 优势进一步分析了 SDN 下自组织网络控制系统架构和全新的路由实现方式，建立了基于整数规划模的分级路由模型。其次，在接入控制器基于优化目标（最小能耗路径和能量均衡）引导路由的过程中固化了网络接入层面的信息交互流程，提出一种基于服务能力的分层次路由思想，重点设计了路由关键点和关键链路集中式选择问题的求解

算法（称为 RKNLSP 算法），该算法通过服务关键点的映射以最优的方式（节能和网络效能）将用户定制的服务嵌入基础物理网络中，为用户定制服务提供承载支撑。最后，在搭建的原型系统上验证了 RKNLSP 算法能够实现的功能，同时在网络接入层次评估了 SDN 下的 RKNLSP 方式路由相对于自组网传统路由算法的性能，在网络核心层次和网络全局层面验证了相对于手动配置方式实现“按需配置”服务的网络效能整体优势。

然而，在网络实际运行中，核心层面的网络拓扑变化一般慢于网络流量的动态变化，服务路径构建的输入可由原始网络拓扑简化为离线计算的经经验服务路径集合，当离线部署的服务路径产生的网络效能降低到一定门限后，再启动服务路径计算过程，从而降低算法实现复杂度。所以，作为对 SDN 下新型自组织网络的初步探讨，本文所提到路由思路、模型及算法仍值得进一步优化和完善。

#### 参考文献：

- [1] 兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 128-139.  
LAN J L, CHENG D N, HU Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. Journal on Communications, 2014,35(1):128-139.
- [2] XIAO H, SEAH W K G, LO A, et al. A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks[C]//The IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, 2000: 445-449.
- [3] AHN G S, CAMPBELL A T, VERES A, et al. Supporting service differentiation for real-time and best-effort traffic in stateless wireless ad hoc networks(SWAN)[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2002, 1(3):192-207.
- [4] VANJARA R T, CHIRAG K G. A survey based on quality of service(QoS) and multipath routing in mobile Ad Hoc networks [J]. International Journal for Scientific Research & Development, 2015, 2(11): 286-288.
- [5] 杨绪彬, 张文强. 移动自组织网络中服务质量路由协议的研究与展望[J]. 计算机应用, 2015, 35(S2): 11-13.  
YANG C B, ZHANG W Q. Research and prospect of quality of service routing protocols in mobile Ad Hoc network[J]. Journal of Computer Applications, 2015,35(A02):11-13.
- [6] GIBB G, ZENG H Y, MCKEOWN N. Outsourcing network function[C]//Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks.ACM, 2012: 73-78.
- [7] MOGUL J C, AU YOUNG A, BANERJEE S, et al. Corybantic: towards the modular composition of SDN control programs[C]//Twelfth ACM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM, 2013:1-7.
- [8] CHENG G Z, CHEN H C. How to make network nodes adaptive?[J] IEEE Communications Letters, 2014, 18(3):515-518.
- [9] CHENG G Z, CHEN H C, WANG Z M, et al. Towards adaptive network nodes via service chain construction[J]. IEEE Transactions on network and service management, 2015, 12(2): 248-262.
- [10] KU I, LU Y, GERLA M. Towards software-defined VANET: architecture and services[C]// 13th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop. IEEE, 2014: 80-85.
- [11] 路兆铭, 王鲁晗, 温向明. 软件定义的无线接入网络架构与关键技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2015:223-230.  
LU Z M, WANG L H, WEN X M. Software defined wireless access networking architecture and key technologies[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2015:223-230.
- [12] 于宏毅, 李鸥, 张效义, 等. 无线传感器网络理论、技术与实现[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010:161-167.  
YU H Y, LI O, ZHANG X Y. Wireless sensor networks theory, technique and implementation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010:161-167.
- [13] DONG F, LI O, RAN X M, et al. A dynamic protocol stack structure for diversified QoS requirements in Ad Hoc network[J]. China Communication Supplement Issue, 2016,13(1):43-53.
- [14] 熊钢, 胡宇翔, 段通, 等. 一种软件定义网络的安全服务路径动态组合机制[J]. 电子与信息学报, 2016,38(5):1234-1241.  
XIONG G, HU Y X, DUAN T, et al. A dynamic composition mechanism for the security service chain oriented software defined networking[J]. Journal of Electronics & Information Technology. 2016, 38(5): 1234-1241.
- [15] XIONG G, HU Y, LAN J, et al. A mechanism for configurable security service chaining and its implementation[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2016, 10(8):3701-3727.
- [16] 陈林, 石林祥, 孔亮亮. 车辆自组织网络的仿真研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2013, 30(1):6-11.  
CHEN L, SHI L X, KONG L L. Research on simulation of vehicular Ad Hoc networks[J]. Journal of Shanghai Polytechnic University. 2013, 30(1):6-11.
- [17] 叶亮, 李文昊, 陈德应, 等. NS-2 随机路点模型在松散网络中节点分布研究[J]. 科学技术与工程, 2011,11(25):6195-6197.  
YE L, LI W H, CHEN D Y. Study on node distribution of NS-2 random waypoint model in loose network[J]. Science Technology and Engineering. 2011,11(25):6195-6197.
- [18] 李丹, 兰巨龙, 王鹏, 等. 一种集中调控的分布式服务路径选择算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4):785-793.  
LI D, LAN J L, WANG P. Distributed service path selection algorithm under central control[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(4):785-793.

#### [作者简介]



董芳（1981—），女，河南开封人，信息工程大学副教授，主要研究方向为移动自组织网络、软件定义网络等。

胡宇翔（1982—），男，河南周口人，博士，国家数字交换系统工程技术研究中心副教授，主要研究方向为未来网络、软件定义网络等。

李鸥（1961—），男，河南郑州人，博士，信息工程大学教授，主要研究方向为自组织网络、传感网等。