

# 基于 SDN 的内容中心网络研究综述

杨仁宇 韩毅刚 章帆 冯飞

(南开大学电子信息与光学工程学院天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室 天津 300350)

**摘要** 内容中心网络(Content Centric Network,CCN)在实际部署过程中面临诸多挑战,而近年来软件定义网络(Software Defined Networking,SDN)发展迅速,开放可编程与集中化控制等特性为 CCN 的部署带来了新的方向,基于 SDN 实现 CCN 的方案逐渐受到关注。首先概述了相关背景,归纳出结合 SDN 的 CCN 部署中的关键问题,由此分析二者融合的优势及困难;然后介绍国内外的研究现状,将现阶段各种融合网络方案归纳为纯集中式方案和半集中式方案两类,并对有代表性的设计方案进行了介绍与评价,对比总结了各类型方案的特点;最后展望了未来的研究方向。

**关键词** 内容中心网络,软件定义网络,命名数据网络,OpenFlow

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.01.003

## Survey of Content Centric Network Based on SDN

YANG Ren-yu HAN Yi-gang ZHANG Fan FENG Fei

(Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology,College of Electronic Information and Optical Engineering,Nankai University,Tianjin 300350,China)

**Abstract** The practical deployment of Content Centric Network (CCN) is confronted with numerous challenges. On the other hand,Software Defined Networking (SDN) has been developing rapidly and its features of open,programmable and centralized control bring a new direction for CCN. Accordingly,the realization of CCN based on SDN has gradually attracted attention. This paper summarized the background knowledge,concluded the key issues in the deployment of SDN-based CCN, and analyzed the advantages and difficulties of their integration. Then, this paper introduced the research status ,divided the existing integrated network schemes into purely centralized schemes and semi-centralized schemes,evaluated the representative design of the scheme,and summed up the characteristics of each kind of schemes by comparison. Finally,this paper presented the topics for future researches.

**Keywords** Content centric network,Software defined networking,NDN,OpenFlow

## 1 引言

TCP/IP 的设计简单可靠,但随着网络规模的发展以及多媒体业务的流行,网络流量开始快速增长,传统互联网的瓶颈逐渐显现,人们的需求难以得到满足,需要探求未来网络的革新<sup>[1]</sup>。

SDN 和 CCN 是未来网络的两大研究重点,从不同的角度给出了网络革新的方案。SDN 的重点是提升底层网络的可编程能力,利用分层的思想将数据平面与控制平面分离。CCN 的重点是改变网络的通信模式,用命名内容取代命名主机,引入网络内存。

相比擅长端到端通信的 TCP/IP 网络,CCN 在内容分发、以内容为中心的安全、流量控制等方面具有天然的优势<sup>[2]</sup>,但目前仍停留在理论研究和软件仿真阶段,难以应用于实际。这一方面是因为 CCN 引入的名字路由、缓存等特性在

现有网络软硬件条件下尚没有良好的解决方案;另一方面是因为 CCN 的架构具有颠覆性,不兼容现有的网络基础设施,实际部署困难。反观 SDN 网络技术已基本成熟,在数据中心等场景下得到了大量应用,极大地提升了网络的可扩展性并降低了网络管理的复杂性,能有效支持新型业务的部署<sup>[3]</sup>。

在这样的背景下,将二者结合,利用 SDN 的特性促进 CCN 的部署,或许是实现 TCP/IP 向 CCN 平稳过渡的重要途径。这主要是基于以下两方面原因:SDN 的数据平面可编程能力能够在一定程度上支持 CCN 数据包的解析、处理和转发功能;全网视图以及集中式的网络管理能力为解决 CCN 的技术难点(如名字路由、缓存管理)提供了新的方法。

自 2012 年开始,针对如何利用 SDN 的特性来部署 CCN 的问题,国内外已经进行了相关的初步研究,截至 2017 年,已有 20 多项设计方案被提出,SDN 下 CCN 的路由、缓存技术也得到了一定的研究。分析已发表文献发现,目前该方向鲜

到稿日期:2018-01-16 返修日期:2018-04-11

杨仁宇(1994—),男,硕士生,主要研究方向为软件定义网络、内容中心网络,E-mail:renyu\_nku@163.com;韩毅刚(1963—),男,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机网络、通信网络,E-mail:hanyg@nankai.edu.cn(通信作者);章帆(1995—),男,硕士生,主要研究方向为计算机网络;冯飞(1993—),男,硕士生,主要研究方向为计算机网络、内容中心网络。

有总结性的综述,Rowshanrad等<sup>[4]</sup>在2016年的综述中介绍了8项方案,但仅分析了融合SDN和CCN在应用上的优势;Jmal于2017年发表的综述<sup>[5]</sup>对研究背景介绍得较为详尽,对选择的8项实现方案进行了横向对比;同年,美国ARL实验室发布的研究报告<sup>[6]</sup>中对该方向进行了简单的概述,但仅介绍了6项方案且缺乏代表性。

现有的综述缺乏对部署中关键问题的分析,列举并对比了部分方案,但未能抽象出整体设计思路进行归纳总结。除此之外,要全面探讨基于SDN的CCN网络架构,应该在分析优势的同时看到融合方案中存在的困难与矛盾。因此,本文将对SDN和CCN融合网络实现中的关键问题进行归纳,并综合更多已有的融合网络设计方案,根据实现思路的不同分类进行讨论,归纳总结各种方案的优势与劣势;最后基于研究现状展望未来的研究方向,为后续研究提供参考。

## 2 相关概念

### 2.1 SDN

传统网络设备由于使用专用硬件,导致底层硬件与上层应用紧密耦合,缺乏灵活性,严重阻碍了网络领域的创新<sup>[7]</sup>。SDN架构分离了数据平面与控制平面,数据平面的SDN交换机仅仅进行简单的数据转发,转发规则由控制平面的SDN控制器集中下发,两个平面之间通过开放的统一接口交互<sup>[8]</sup>。这样仅需要通过软件对控制器编程即可实现对整个网络的配置管理,极大地提升了网络的灵活性。

2008年提出的OpenFlow协议<sup>[9]</sup>是应用最为广泛的数据平面与控制平面间的接口(南向协议)。OpenFlow协议通过下发流表来控制交换机的数据处理逻辑,即具有一定的数据平面可编程能力。此外,完全可编程南向协议是SDN未来值得关注的发展方向之一,其改进了OpenFlow等南向协议无法实现软件控制网络协议解析的缺陷,进一步增强了对新型网络协议的支持能力。典型协议包括2013年华为提出的POF协议<sup>[10]</sup>和2014年SDN创始人Nick教授团队提出的P4语言<sup>[11]</sup>。

SDN交换机可以采用硬件和软件两种转发方式。使用专用的硬件芯片时具有速度快、成本低等优势,但难以实现复杂的转发规则,因此需要使用CPU及NP(网络处理器)进行软件处理,以解决硬件设备灵活性差、存储空间受限等问题<sup>[12]</sup>。

### 2.2 CCN

目前互联网的主要使用需求已经从端到端通信转变为内容的获取和分发,以主机为中心的通信模式并不能很好地满足新的需求<sup>[13]</sup>。研究人员由此提出了以信息为中心的网络(ICN)研究<sup>[14]</sup>,CCN是其中最具代表性的研究项目之一,各种信息中心网络的设计本质是相似的。

CCN在网络中用对数据命名的方式代替了对物理实体的命名,另外内建了存储功能缓存数据包,以在加快用户访问速度的同时减少网络流量。其设计目标是彻底替代TCP/IP体系架构,架构上借鉴了IP网络架构的瘦腰模型,用内容块取代IP数据包。

CCN中的通信是“请求-响应”的模式,通过交换兴趣包

和数据包来驱动。消费者把目标数据名放入兴趣包发送出去,路由器根据内容名路由向数据生产者转发兴趣包;一旦兴趣包到达拥有请求数据的节点,节点将返回包含名字和内容的数据包;数据包沿着兴趣包到达的相反路径返回给请求的消费者。为了实现兴趣包和数据包的转发,CCN路由器需要维护3个数据结构:内容缓存表(CS)、待定兴趣表(PIT)、转发信息表(FIB)。

PARC研究中心于2009年发布了CCNx项目,开发了CCN仿真平台代码库CCNx。2010年,美国国家科学基金会资助了NDN(命名数据网络)项目<sup>[15-16]</sup>。NDN项目遵循了CCN的体系架构设计,2013年从CCNx的代码库被分支出来并快速发展更新,随后开发了NDN Platform实验平台。CCNx项目和NDN项目遵循同一架构,可以将其统称为“CCN/NDN体系架构”。

CCN的实际部署面临诸多问题<sup>[17]</sup>,归根结底是由现有软硬件技术的局限性造成的。Varvello等<sup>[18]</sup>指出,现有软硬件技术还不能支持大规模的CCN网络部署,其中高效的内容名路由以及大容量缓存很难实现。CCN相关的软件仿真中底层还主要通过使用UDP等协议基于TCP/IP作覆盖网来实现<sup>[19]</sup>。

## 3 关键问题

融合不同的两类网络架构不是一蹴而就的,结合SDN能为CCN的部署带来极大便利,但二者结合并不意味着CCN部署的既有问题就不复存在。另一方面,SDN的可编程能力有限,并且SDN数控分离、集中控制的架构与CCN数据驱动、分布式的架构之间存在矛盾,这些因素都引入了新的问题。主要问题存在于网络底层的包解析、转发逻辑以及网络上层的路由策略、缓存实现与管理等方面。

### 3.1 包解析

现有网络设备在支持CCN包解析方面面临困难:IP网络中只需要解析固定长度的IP地址,而CCN使用可变长的分级名字,这意味着路由器需要解析可变长字段,难以直接通过硬件高速处理;标准的CCN/NDN数据包采用了嵌套的TLV格式<sup>[20]</sup>,解析复杂度更高,需要支持状态的记录。

借助SDN的数据平面可编程能力能在一定程度上满足上述需求,但未能完全解决问题。目前SDN支持的数据平面的可编程能力有限,以支持OpenFlow协议的交换机为例,其仍无法直接解析CCN包,因为OpenFlow协议标准中仅支持匹配TCP/IP协议中的一些字段,仍须通过映射、扩展、覆盖网等方法实现“兼容”。

### 3.2 转发逻辑

NDN项目计划中对路由器转发引擎提出了极高的要求:支持线速的操作,包括可变长内容名的快速表查询,存储几百万到几十亿名字的高效数据结构,快速包处理能力<sup>[16]</sup>。CCN网络架构中路由节点的转发逻辑比IP网络中的更复杂,涉及到3个表项的存储、查询和更新,对处理性能要求非常高,主要有以下3个突出问题。

1)表存储。IP地址的寻址空间是有限的,而分级名字的空间是无限的,CCN路由节点很可能需要记录大量的包含内

容名的表项,超过传统 IP 路由表的数量。在 SDN 中一般使用流表技术存储转发规则,而 SDN 交换机中可用于高速流表匹配的 TCAM 存储器资源十分有限,大量的内容名存储存在问题<sup>[21]</sup>,缺乏可行的解决方案,阻碍了实际部署。

2)表查询。传统路由器维护的 IP 路由表等表项格式固定,变更不频繁。而在 CCN 路由器中,分级名字格式复杂,表项数量更多,尤其是 FIB 要求实现高速的对于名字的最长前缀匹配是一大技术难题,需要使用高效的数据结构与算法<sup>[22]</sup>。

3)表更新。IP 地址信息相对稳定,而含有内容名的表项面临频繁的更新<sup>[23]</sup>。按照 SDN 网络集中式控制的原则,交换机更为“轻量”,CS, PIT, FIB 等表项应该由控制器下发。这一点与 CCN 数据驱动的设计相违背,由此带来的控制器和交换机之间的通信开销将导致表项更新和包转发的延迟,在网络规模较大时控制器将承受较大负载,并且增加了转发流程的复杂性。该问题在 PIT 表的维护上最为突出,如果收到兴趣包后等待控制器下发对应的流表,将影响转发效率。

### 3.3 路由策略

CCN 网络中的路由比 IP 网络中的路由更复杂开放,内容名与主机不再是一一对应的关系,再加上多径转发、网络内缓存等因素,在不同环境下实现简单高效的路由策略并不容易。相对而言,在 SDN 下实现名字路由策略具有天然的优势:使用传统的分布式路由,路由器可能需要支持复杂的路由协议;在 SDN 下可以使用集中式的名字路由,通过维护全网的路由信息,能有效实现 CCN 的路由策略。

具体的路由协议不是本文关注的重点,文献<sup>[24-25]</sup>提出的 CRoS 和文献<sup>[26-27]</sup>提出的 SRSC 机制专门探讨了基于 SDN 的 CCN 网络中的集中式路由协议。

### 3.4 缓存的实现与管理

与传统网络设备一样,SDN 交换机完全不具备 CCN 网络所需的缓存功能,要支持包级别的缓存,需要大容量的缓存空间,涉及硬件成本问题,更重要的是较高的数据读写和处理能力。网络设备与主机不同,处理器性能有限且需要高速转发网络流量,引入网络内缓存后进行缓存管理并保持转发性能是一个巨大的挑战<sup>[28]</sup>。在缓存空间有限的情况下,还应设计高效的缓存放置策略、缓存替换算法、缓存储存方式,以提升缓存命中率<sup>[29]</sup>。如何结合 SDN 网络的特性来引入 CCN 缓存功能,是值得研究的问题。

### 3.5 其他

除了上述 4 个问题外,实际部署中还需要考虑以内容为中心的安全、传输层功能(可靠性与拥塞控制等)实现、与现有应用层软件的兼容性问题,这些功能不会直接影响底层网络的 CCN 转发功能的实现,但对于 CCN 网络的未来部署至关重要。互联网发展到今天,已经与 TCP/IP 诞生初期大不相同,新型网络部署时需要满足更复杂的需求。

## 4 研究现状

基于 SDN 的内容中心网络架构方案有很多,设计思路 and 实现方法各有差异,目前尚无准确的分类标准。文献<sup>[5]</sup>提出根据是否修改 OpenFlow 协议将现有方案分为扩展 SDN 和

传统 SDN 两类,这是一种可行的分类方法,但选择的标准未深入本质,参考价值有限。本节将根据实现 SDN 和 CCN 融合网络的集中化程度的不同,将部署方案分为纯集中式方案、半集中式方案两类(纯分布式方案失去了引入 SDN 的优势,相关研究较少,不单独分类讨论)。根据具体实现方法的不同,又可以将集中式方案分为原生 OpenFlow 方法与扩展 OpenFlow 方法两类;将半集中式方案分为基于覆盖网的方法和基于完全可编程南向协议的方法两类。本节将侧重从包解析、转发流程、路由与缓存实现的角度分析有代表性的已有研究成果。

### 4.1 纯集中式方案

纯集中式方案的关键是完全利用 SDN 实现 CCN 功能,抛弃了 CCN 设计中每个路由节点自行维护 CS, PIT, FIB 3 个表的分布式架构,交换机只需实现简单的转发及相关处理功能,核心功能均通过控制器实现。目前该类方案的研究绝大部分基于 OpenFlow 协议实现,故可根据是否扩展 OpenFlow 协议的匹配域(Match Fields)与动作(Actions)再细分为原生 OpenFlow 方法和扩展 OpenFlow 方法。

#### 4.1.1 原生 OpenFlow 方法

OpenFlow 的设计仍然是针对 TCP/IP 协议栈的,支持 CCN 数据包的解析较为困难,OpenFlow v1.0 版本中仅支持匹配 12 个 TCP/IP 协议下的字段,OpenFlow v1.2 版本之后通过引入 OXM(OpenFlow eXtensible Match)匹配方式增强了对于自定义协议的可扩展性,但标准协议中支持的字段仍是 TCP/IP 协议下的,并且变长字段的处理问题依然是难题。

要解决交换机无法解析 CCN 包的问题,在不扩展 OpenFlow 协议的基础上,可以考虑修改 CCN 包格式,将内容名等信息映射到 TCP/IP 首部的字段,在具备 CCN 处理功能的控制器的控制下,间接实现 OpenFlow 交换机对 CCN 包的转发,也可以称作基于映射的方法。一种典型的原生 OpenFlow 方法的架构示意图如图 1 所示。

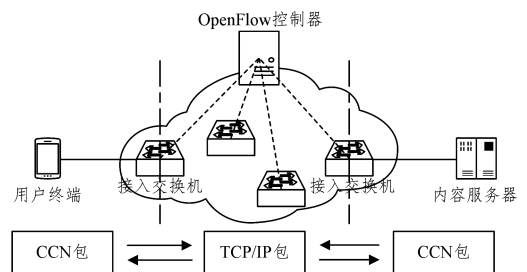


图 1 原生 OpenFlow 方法的架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of architecture for native OpenFlow method

1) CONET<sup>[30]</sup>是 2011 年由 Detti 等意大利研究者提出的渐进式部署 CCN 的网络架构,为实现渐进部署,重点考虑了在不支持 CONET 的网络中使用非 CONET 方式进行域间通信。2012—2013 年,该研究小组进一步结合 SDN 设计了 CONET 部署方案<sup>[31-33]</sup>,其关键是在网络中加入 NRS(名字解析服务),由控制器来实现,集中了一个系统中所有的名字路由项。在实际部署中,CONET CCN 设计了长期和短期两种方案,其中短期方案使用了 OpenFlow 1.0 协议,封装 CONET 包时映射到了 TCP/IP 中的一些字段,包括用 IP 协议字段标

识 CONET 包,用 IP 选项字段存放内容名,选择 UDP 的特殊端口号作为标签。基于 SDN 的 CONET 的设计非常实际,短期方案可以直接使用 SDN 的现有架构部署,其作为最早提出的 SDN、CCN 融合网络完整架构,为后续的相关研究提供了思路。早期方案中文献[34]提出的架构同样比较具有影响力,也是基于映射来实现(将标识符映射至以太网首部)的,其研究的是 PSIRP 网络架构,采用发布/订阅的机制,后续研究较少。

2)ContentFlow<sup>[35-36]</sup>是由 Chanda 等于 2013 年提出的一种结合 SDN 实现网络内缓存的方案。其思路与 CONET 的 NRS 类似,由控制器进行全网范围内的缓存管理,维护内容名与 IP 地址的映射表;引入代理网关,用于拦截用户发起的 HTTP 请求,提取其中的内容名和目标服务器,向控制器请求缓存位置后代为请求内容,无缓存项时代理网关则直接与源服务器建立连接。需要缓存时,控制器下发流表将下行的内容引导到选定的缓存节点,并记录至缓存映射表。严格而言,ContentFlow 并不遵循内容中心网络的架构,不需要进行映射,其借鉴了信息中心网络的思想,实现上只是借助 SDN 在 TCP/IP 网络上做的改进。

3)I. C. N. P<sup>[37]</sup>是由 Vahlenkamp 等于 2013 年提出的一种基于 SDN 使用 IP 网络构建 ICN 的方案。I. C. N. P 的含义是 ICN prefix,即在每个域中用一个特殊的 IP 前缀来标识信息中心网络的包,将转发 ICN 包所需的信息映射到 IP 地址和端口号,以兼容 OpenFlow 协议以及传统 IP 网络。用户发送兴趣包时将目的 IP 地址设为 I. C. N. P,接入交换机收到后转发给控制器,维护着全网缓存信息的控制器完成解析、记录、映射、路由等操作。返回数据包时,映射操作由缓存服务器完成(或也先交给控制器),然后按流表原路返回。当一个“请求-响应”过程结束后,用户端的接入交换机通知控制器清除状态。该方案中,控制器处理、维护所有 ICN 相关状态,可以解决 CONET 中的一些问题。

4)C-flow<sup>[38]</sup>是由 Dukhyun 等于 2014 年提出的基于 OpenFlow 的内容分发网络架构。接入交换机收到 CCN 包后将其转发到控制器,控制器通过 DPI 从 HTTP 请求中提取内容名并直接映射为一个 IP 地址,同样由控制器维护全网的内容名—IP 地址映射表,控制器计算出路由后就在沿途下发流表。接入交换机要实现类似网关的功能,完成 IP 映射,对于用户和服务器而言,直接通过 HTTP 协议通信即可。值得一提的是,文中提及了两种缓存方式,一种是通过副本服务器做外置的缓存,另一种是利用交换机内存做缓存。

早期研究多集中于原生 OpenFlow 方法,提出了不同的将 CCN 数据包相关信息映射到 TCP/IP 协议的具体方法,其共同特征是无需修改 OpenFlow 协议,通过接入交换机、控制器或网关将进入网络的 CCN 包转换为 OpenFlow 可处理的类型即可,从而使网络中的 SDN 交换机仍可匹配 TCP/IP 中的字段完成转发。这类方法在实际部署中的可行性较强,并且能够良好地兼容现有的 SDN 网络软硬件,实现渐进式部署。其缺陷是:为兼容 OpenFlow 协议,仅控制器具有 CCN 处理功能,需要承担较多的负载;引入映射步骤将导致转发过程复杂,且功能具有局限性,难以完全支持 CCN 的特性。

#### 4.1.2 扩展 OpenFlow 方法

基于原生 OpenFlow 的方法需要进行映射,属于间接的方法,协议本身仍无法解析匹配 CCN 包并完成相关动作,可以通过扩展 OpenFlow 协议以及 OpenFlow 交换机与控制器的方法,使其能够直接支持 CCN 网络功能,因此无需在网络接入时进行映射步骤。

该类方法的典型方案即基于 SDN 的 CONET 的长期部署方案,与 4.1.1 节中提到的短期方案不同的是,该方案扩展了 OpenFlow 协议,在 Open vSwitch 虚拟交换机加入了名字路由、内容缓存、标签、安全 4 个方面的操作,能够在 SDN 下较为完整地实现 CCN 的相关处理。

扩展 OpenFlow 的方法可以理解为在 SDN 下设计了一套基于 SDN 实现 CCN 网络功能的新型架构,一切遵从 SDN 的集中式控制方案。理论上,该类方法比原生 OpenFlow 方法的功能更加完善,能够进一步使 SDN 交换机直接支持 CCN 下的缓存和安全等特性,并省去了映射步骤所引入的开销。但实现对 CCN 网络完全的集中控制具有极高的复杂度,控制器需要直接管理包解析、转发逻辑、路由、缓存、安全等各项事务,在网络规模较大时难以保证较低的时延,对 OpenFlow 协议的扩展处理也较为复杂,难以标准化,故该类方法的研究较少。

#### 4.2 半集中式方案

遵循 SDN 架构的纯集中式方案可被看作修改 CCN 架构以适应 SDN 架构,另一方面可以考虑在 SDN 架构和 CCN 架构之间取得平衡,关键是为 SDN 交换机添加更多 CCN 包处理能力,控制器仅集中完成路由策略、缓存策略等“高层”决策,从而在一定程度上实现 CCN 的分布式架构。该类方案比较灵活,主流的方案根据实现方法的不同可细分为基于覆盖网的方法和基于完全可编程南向协议的方法。

##### 4.2.1 基于覆盖网的方法

由于 CCN 代码库较为成熟且能够兼容不同的下层网络,因此采用覆盖网的 SDN 和 CCN 融合方案得到了较多的关注。该类方法中 SDN 仅完成底层的转发工作,CS, PIT, FIB 等处理过程由 CCN 层完成(一般方案中 FIB 表仍集中控制),引入中间层或隧道技术完成适配,以尽可能地保持 SDN 和 CCN 的原有架构。一种典型的基于覆盖网方法的架构示意图如图 2 所示。

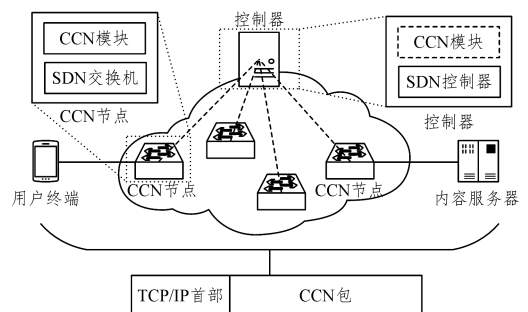


图 2 覆盖网方法的架构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of architecture for overlay network method

1)Wrapper<sup>[39]</sup>由 Xuan 等于 2013 年提出,思路是不修改 OpenFlow 和 CCN,直接使用 CCNx 进程做转发,在 CCNx 和

OpenFlow 之间建立中间层,称为 Wrapper。由于交换机的处理能力有限,该方案中 Wrapper 和 CCNx 进程运行在外部的主机上,主机连接至 OpenFlow 交换机。交换机在收到其他端口的数据包后,首先会转发给 Wrapper 处理。交换机需要将入端口号放入 ToS 字段,Wrapper 向上提供虚拟端口,通过解析、设置 ToS 字段来与物理端口对应。Wrapper 向下映射内容名,方法是将内容名哈希后放在 IP 数据包 OpenFlow 可识别的字段(如 IP 地址)中,使交换机能够感知内容名,从而实现转发与监控,这一点与基于映射的方法相同。

2) NDNFlow<sup>[40]</sup> 由 Adrichem 于 2015 年等提出。NDN-Flow 对覆盖网的实现很简单,使用了隧道技术。具体方法是在交换机和控制器上添加扩展后的 CCNx 转发模块,二者之间使用专用的通信信道进行通信,不影响 TCP/IP 数据的处理。支持 ICN 的交换机接入后,会向控制器通告自己的状态,控制器维护全网视图,包括交换机是否支持 ICN 的信息。两个支持 ICN 的交换机之间的通信穿越了传统网络设备,需要建立 IP 隧道,因此控制器的 ICN 模块计算 ICN 流的路径后,先沿途下发 ICN 网络路由规则,再下发传统网络 IP 隧道包转发规则,以实现转发。

3) OFAM-CCN<sup>[41]</sup> 由 Jmal 等于 2016 年提出的基于 OpenFlow 的 CCN 缓存策略,其关键思想是集中式缓存存储。与 Wrapper 一样,OFAM-CCN 引入中间层完成 CCNx 和 OpenFlow 的适配。接入交换机收到兴趣包后直接转发给控制器,每个控制器连接一个缓存管理器,有对应缓存项则直接返回数据包,没有缓存项则由控制器再转发兴趣包,按 CCN 方法向 CCN 服务器请求数据,若仍没有响应则向其他域控制器请求。缓存管理器通过与控制器交互内容流行度信息进行缓存替换。该缓存方案并不是处处缓存,而是每个域做一份缓存。集中式缓存存储的思路值得借鉴,但方案中控制器不仅完成控制层任务,而且直接完成数据层转发,负载高,不满足 SDN 数控分离原则,合理性有待商榷。

引入覆盖网的方案的灵活性强,可以直接使用现有的 SDN 软硬件以及 CCN 代码库,能完整发挥 CCN 的优势,二者独立运行,避免了因协议版本升级带来的维护工作。其缺陷是引入了额外的中间转化或隧道封装过程,降低了转发效率;需要 SDN 交换机具有较强的软件处理能力,或增加额外的处理设备以支持 CCN 层处理,增加了部署难度且性能低;管理时需要同时管理 SDN 和 CCN 两个网络,复杂性高。以上缺陷与目前直接的 CCN 覆盖网方案的缺陷类似,相比之下,引入 SDN 可以降低覆盖网络管理的复杂度,同时在一定程度上解决了路由等难点,更具可行性。

#### 4.2.2 基于完全可编程南向协议的方法

由于完全可编程南向协议的发展时间较短,基于其实现 CCN 的研究目前较少。相比 OpenFlow 协议,完全可编程南向协议的数据平面可编程能力更强,在一定程度上支持了对数据解析逻辑的编程以及简单的状态机,即提升了 SDN 交换机的处理能力。该方法中使用支持完全可编程南向协议的交换机替代了 OpenFlow 交换机,能够以更原生的方式支持 CCN 包的转发。

目前完全可编程南向协议的功能仍具有局限性,难以完

全实现 CCN 功能,须添加 CCN 处理模块或设备进行辅助。其与覆盖网方法的主要区别是可直接使用 CCN 协议,不再需要中间层或隧道技术等完成 TCP/IP 适配,SDN 层可以直接解析自定义协议类型。

完全可编程南向协议技术主要有 POF 和 P4。华为的 POF 技术意为协议无感知转发,可视为 OpenFlow 的升级版,基于“偏移量+长度”实现匹配域和动作,可以进行更复杂的包处理。斯坦福 Nick 教授团队的 P4 语言是描述网络设备转发平面的通用编程语言,目前已发展到 P4-16 版本,其突出优点是具有自定义协议首部格式、控制流的能力,并且具有可移植性。

1) CCN 下的 SITM<sup>[42]</sup> 是 Sun 等于 2014 年提出的基于 SDN 的 CCN 流量管理方案,交换机使用了研究者团队之前的成果 PindSwitch<sup>[43]</sup>——一种进行了扩展以支持协议无关包的识别和转发的 OpenFlow 交换机,并支持流量管理,相当于使用一种自定义的完全可编程南向协议。方案中为交换机和控制器添加了 CCN 处理模块以进行 CCN 包处理,能直接识别 CCN 数据包,无须使用隧道技术。

2) POF-CCN<sup>[44]</sup> 是由 Wang 等于 2015 年提出的一种 POF 环境下的内容中心网络架构。该方案的特点是引入了 POF 技术,支持自定义格式的 CCN 包转发,交换机仅仅实现转发,路由和缓存逻辑由外接主机实现;特别是引入了分布式的路由策略,通过在包格式中加入栈结构实现了导向路由,路由过程类似深度优先搜索。该方案的特殊之处是仅利用 POF 协议来解析 CCN 包,尽可能地保留了 CCN 分布式的设计,未引入 SDN 的集中控制,严格意义上应归为纯分布式方案。

3) SDCCN<sup>[45]</sup> 是 Charpinel 等提出的基于 SDN 实现 CCN 的方案,同样使用了 POF 技术来实现对 CCN 包的直接解析。SDCCN 的实现扩展了交换机的功能,使 POF 交换机能够自行维护 PIT 表与缓存,路由和缓存策略由控制器集中控制。收到兴趣包时,如果 CS, PIT, FIB 均无匹配项,则转发至控制器,由控制器下发 FIB 表项。缓存的控制方法是下发 CRT 表,其中存放要缓存的内容名。收到 CCN 数据包时若 CRT 有对应项则进行缓存,缓存满时由交换机通知控制器申请调整缓存内容。该方案深度融合了 SDN 与 CCN,在保持 CCN 架构的同时引入了 SDN 对路由和缓存的集中控制,在架构设计上较为合理,相当有借鉴意义;但其与其他扩展方法一样存在硬件部署的难题。

4) NDN. p4<sup>[46]</sup> 是由 Signorello 于 2016 年实现的一种基于 P4 语言的 NDN 路由节点原型,在不进行任何额外扩展的情况下实现了原生的 NDN 包解析和转发功能,并在虚拟 P4 交换机上通过了测试。该原型能够使 P4 交换机解析标准的 NDN 的 TLV 格式包,并由收到的兴趣包自行生成 PIT 表,不依赖于控制器或外置处理设备。这一实例展现出了 SDN 数据平面的可编程能力在支持新协议上的潜力,但仅实现了路由节点原型,路由策略、缓存等问题未进行讨论。

完全可编程南向协议如 P4 和 POF 大大提升了数据平面的可编程能力,能够更好地支持 CCN 等新型网络的网络协议。即便如此,目前仅能解决包解析方面的问题,距完全支持

CCN 路由器的功能仍有很长的距离,名字解析和转发逻辑的直接实现存在困难,缓存等问题也并未有相应的解决方案,仍需要进行进一步的研究。更遗憾的是,完全可编程南向协议本身也处于研究初期,相关产品并不成熟,距实际投入使用还有一定距离。

### 4.3 方案对比

各方案的总体对比如表 1 所列。从集中式方案到半集中式方案,核心是 CCN 功能的“下放”,即数据平面和控制平面的

分工调整,将更多 CCN 处理工作由控制器转移到交换机上。

包处理与转发的实现可分为间接方法与直接方法,方法的选取将影响实际部署的可行性。兼容 OpenFlow 等现有 SDN 交换机标准协议的方式是间接方法,会引入额外的映射开销,转发步骤复杂,但易于在目前的网络环境中部署;扩展 OpenFlow 或使用完全可编程南向协议的方法是直接方法,利用 SDN 数据平面可编程的特性,使交换机具备 CCN 解析处理的能力,但在目前的硬件条件下难以实际应用。

表 1 方案架构的对比

Table 1 Comparison of architectures for different schemes

方案	集中程度	包处理与转发	特点	主要优势	主要缺陷
原生 OpenFlow 方法	高	间接,映射后当 IP 包处理	CCN 包进入网络映射至 TCP/IP	兼容现有 SDN 网络设备	控制器负载高;存在映射开销;功能受限
扩展 OpenFlow 方法	高	直接	新增 OpenFlow 匹配域、动作	考虑了 SDN 长期发展,功能更完善	控制器管理复杂;扩展难以标准化
覆盖网方法	低	间接,转交 CCN 层处理	交换机增加 CCN 处理模块	直接使用 CCN 代码库,灵活性强	硬件要求高;存在映射开销;需管理两层网络
完全可编程南向协议方法	低	直接	完全可编程南向协议解析 CCN 包	原生方法实现 CCN 包处理与转发	完全可编程南向协议目前功能有限

大多数路由与缓存方案都选择了集中控制的方法,并且在具体实现上不同研究项目有所区别,故未进行对比。集中式内容路由策略以及集中式缓存管理策略是相关研究的热点,可以有效解决 CCN 网络管理中的技术难点。其中在缓存的实现方面,考虑到交换机的计算性能和缓存容量有限,各方案基本都采用了外置缓存服务器的方案。

总体而言,纯集中式方案都存在中心节点(控制器)负载过大、转发逻辑复杂的严重缺陷,这是由于 CCN 网络“不收敛”的特性导致的。传统 TCP/IP 网络在拓扑固定的情况下存在相对稳定的状态,IP 路由策略是固定的,故引入 SDN 架构后,控制器仅在网络初始化阶段需要处理较多的流表未命中数据包,后续 SDN 交换机即可依照流表自行完成大部分包转发任务;CCN 网络则经常处于动态变化之中,本地缓存、内容更新、网络内缓存、移动性等多种因素都将导致路由节点转发规则的变化,引入 SDN 后需要由控制器进行处理。因此,SDN 的数控分离、集中控制架构能有效适用于 TCP/IP 网络,但直接应用于 CCN 会产生数据面、控制面频繁通信以及中心节点负载过高的问题。

相比纯集中式方案,半集中式方案增大了 SDN 交换机承担功能的比例,可以更好地实现 CCN 下的“数控分离”,控制器不必过多处理包解析、转发的底层流程,架构层次更为合理,但也带来了硬件部署困难的问题。

## 5 未来的研究方向

尽管基于 SDN 的内容中心网络已经提出了一些初步的设计方案,理论上也能够取得较好的效果,但总体研究仍处于初级阶段,未来还有许多问题值得研究。

1)进一步设计完整可行的整体方案。就目前的研究进展而言,各种基于 SDN 的 CCN 网络设计或多或少都存在缺陷,没有一种被普遍认同的标准方案,仍需要进一步探究。在设计时,必须综合考虑名字解析与匹配、转发逻辑、路由策略、缓

存实现与管理等各方面的问题,转发流程明确可靠。针对 SDN 和 CCN 不“兼容”的部分,需要做好妥协,合理地进行适配。设计时不能仅考虑可行性,还需要同时兼顾高效率与低成本,性能低下的设计无实际应用的意义,复杂架构导致的高昂部署成本也会阻碍方案的实施。

2)在实际应用场景下深入测试理论架构的性能。网络的设计是复杂的,需要实际的应用场景来验证与完善。从产业界的角度而言,仿真实验并不具有充足的说服力,只有在实际应用中定量地证明基于 SDN 的 CCN 网络具有比传统 TCP/IP 网络更优秀的网络性能,并且收益大于替换成本,才有可能真正推动 CCN 的落地。在这一点上,SDN 发展初期谷歌公司的应用案例 B4<sup>[47]</sup>就是很好的证明,其以真实数据获取了业界对 SDN 的广泛关注。如何将可行的 SDN 和 CCN 融合网络设计并部署到数据中心、校园网、企业网等实际场景中并发挥其优势,是未来的重要研究工作。

3)实现对现有网络应用的兼容与渐进式部署。在 TCP/IP 已经成为互联网通用架构的今天,通过替换全部网络设备、用户终端、网络应用以适应新型网络架构的可行性较低,因此方案设计应对当前网络具有兼容性,可以逐步进行改进与推广,这也是将 CCN 与 SDN 结合的原因。可以考虑引入网关、代理、外置处理设备、缓存服务器等技术,实现在对现有网络改动较少的情况下逐渐支持 CCN 的功能。基于 SDN 设备而非专用硬件,有望实现 TCP/IP 与 CCN 双协议栈的共存,各自处理适合的业务形式,这或成为未来的网络架构。

4)尝试将新的软硬件技术应用到融合网络架构中。完全实现 CCN 的部署还需要有更强的网络软硬件技术支持,新技术可能会为解决研究中的关键问题带来可能。支持 CCN 等新型网络部署过程中存在的困难也反映出目前 SDN 的不足。随着 SDN 的发展,未来很可能会出现更开放和灵活的数据平面编程方式以及更高性能的可编程网络硬件,这对于 CCN 的落地是一个有益的消息。值得关注的研究方向之一是提升基

于通用平台(如 x86)的可编程虚拟路由器<sup>[48]</sup>的处理性能,如文献[49]引入 Linux 内核的网络过滤器 eBPF 技术实现了 OpenFlow 交换机对 CCN 内容名的高速解析,未来相关的硬件加速技术有望进一步提升性能;另一个方向是由于 SDN 的发展而得到广泛关注的网络虚拟化<sup>[50]</sup>技术,目前已经有了很多商业部署的案例,在虚拟网络中部署 CCN,或许是可行的发展方向。

**结束语** 基于 SDN 实现 CCN 的部署是未来网络架构研究的一个新方向,对促进网络革新有着重要意义。本文介绍了这一研究方向的背景,并客观分析和归纳了基于 SDN 实现 CCN 的一些关键问题,对国内外有代表性的设计方案进行了分类探讨,最后总结了未来的研究方向。SDN 和 CCN 对网络革新的侧重点、体系架构不同,而且目前 SDN 的可编程能力不能完全满足 CCN 部署的要求,将二者相结合的研究尚处于初级阶段。随着 SDN 技术的进一步发展和 CCN 理论研究的深入,相信这一方向的研究会得到更多关注。

### 参 考 文 献

- [1] XIE G G, ZHANG Y J, LI Z Y, et al. A Survey on Future Internet Architecture [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6):1109. (in Chinese)  
谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(6):1109-1119.
- [2] MIN E L, CHEN Z, XU H F, et al. Research Progress of Content Center Network[J]. Netinfo Security, 2012(2):6-10. (in Chinese)  
闵二龙, 陈震, 许宏峰, 等. 内容中心网络 CCN 研究进展探析[J]. 信息安全, 2012(2):6-10.
- [3] 杨泽卫, 李呈. 重构网络:SDN 架构与实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2017:10-15.
- [4] ROWSHANRAD S, PARSAEI M R, KESHTGARI M. Implementing NDN Using Sdn: A Review on Methods and Applications[J]. IIUM Engineering Journal, 2016, 17(2):11-20.
- [5] JMAL R, FOURATI L C. Content-Centric Networking Management based-on Software Defined Networks: Survey[J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2017, PP(99):1-14.
- [6] MISHRA V. Coexistence of Named Data Networking ( NDN ) and Software Defined Networking ( SDN ) [R]. US Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground United States, 2017.
- [7] KREUTZ D, RAMOS F M V, ESTEVES VERISSIMO P, et al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1):10-13.
- [8] ZHANG C K, CUI Y, TANG H Y, et al. State-of-the-Art Survey on Software-Defined Networking(SDN)[J]. Journal of Software, 2015, 26(1):62-81. (in Chinese)  
张朝昆, 崔勇, 唐嵩祎, 等. 软件定义网络(SDN)研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(1):62-81.
- [9] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow:enabling innovation in campus networks[J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2008, 38(2):69-74.
- [10] SONG H. Protocol-oblivious forwarding:unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane[C]// ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined NETWORKING. ACM, 2013:127-132.
- [11] BOSSHART P, DALY D, IZZARD M, et al. P4:programming protocol-independent packet processors[J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2014, 44(3):87-95.
- [12] BOSSHART P, GIBB G, KIM H S, et al. Forwarding metamorphosis:fast programmable match-action processing in hardware for SDN [C] // ACM SIGCOMM 2013 Conference on SIGCOMM. ACM, 2013:99-110.
- [13] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking named content[C]// International Conference on Emerging NETWORKING Experiments and Technologies. ACM, 2009:1-12.
- [14] XYLOMENOS G, VERVERIDIS C N, SIRIS V A, et al. A Survey of Information-Centric Networking Research [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2):1024-1049.
- [15] ZHANG L, ESTRIN D, BURKE J, et al. Named Data Networking (NDN) Project[R]. Relatório Técnico NDN-0001, Xerox Palo Alto Re-search Center-PARC, 2010.
- [16] ZHANG L X, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3):66-73.
- [17] SAXENA D, RAYCHOUDHURY V, SURI N, et al. Named Data Networking: A survey[J]. Computer Science Review, 2016, 19:15-55.
- [18] PERINO D, VARVELLO M. A reality check for content centric networking[C]// ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric NETWORKING. ACM, 2011:44-49.
- [19] FENG F, HAN Y G, FU Q Y, et al. The Implementation of CCN Routing Node Based on Ethernet[J]. Computer Applications & Software, 2017, 34(7):91-96. (in Chinese)  
冯飞, 韩毅刚, 傅秋宇, 等. 基于以太网的 CCN 路由由节点实现[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(7):91-96.
- [20] NSF. NDN Packet Format Specification documentation (Version 2. 2-2)[EB/OL]. named-data. net/doc/ndn-tlv.
- [21] YUAN H, CROWLEY P. Reliably scalable name prefix lookup [C]// Eleventh Acm/ieee Symposium on Architectures for Networking & Communications Systems. IEEE, 2015:111-121.
- [22] DAI H C. Research on Key Techniques in Content Router[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)  
戴惠辰. 内容中心网络中路由器关键模块的研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [23] YUAN H, CROWLEY P. Scalable Pending Interest Table design:From principles to practice[C]// IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2014:2049-2057.
- [24] TORRES J, FERRAZ L, DUARTE O. Controller-based routing scheme for Named Data Network[R]. Electrical Engineering Program, COPPE/UFRJ, 2012.

- [25] TORRES J V, DUARTE O C M. Cros-ndn: Controller-based routing strategy for named data networking[R/OL]. <https://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/TBD16a.pdf>.
- [26] AUBRY E, SILVERSTON T, CHRISMENT I. SRSC: SDN-based routing scheme for CCN[C] // Network Softwarization. IEEE, 2015: 1-5.
- [27] AUBRY E, SILVERSTON T, CHRISMENT I. Implementation and Evaluation of a Controller-Based Forwarding Scheme for NDN[C] // IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. IEEE, 2017: 144-151.
- [28] MANSILHA R B, SAINO L, BARCELLOS M P, et al. Hierarchical Content Stores in High-Speed ICN Routers: Emulation and Prototype Implementation[C] // ACM Conference on Information-Centric Networking. ACM, 2015: 59-68.
- [29] ZHANG G, LI Y, LIN T. Caching in information centric networking: A survey[J]. Computer Networks, 2013, 57(16): 3128-3141.
- [30] DETTI A, MELAZZI N B, SALSANO S, et al. CONET: a content centric inter-networking architecture [C] // ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking. ACM, 2011: 50-55.
- [31] MELAZZI N B, DETTI A, MAZZA G, et al. An OpenFlow-based testbed for information centric networking[C] // Future Network & Mobile Summit. IEEE, 2012: 1-9.
- [32] VELTRI L, MORABITO G, SALSANO S, et al. Supporting information-centric functionality in software defined networks[C] // IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2012: 6645-6650.
- [33] SALSANO S, BLEFARI-MELAZZI N, DETTI A, et al. Information centric networking over SDN and OpenFlow: Architectural aspects and experiments on the OFELIA testbed[J]. Computer Networks, 2013, 57(16): 3207-3221.
- [34] SYRIVELIS D, PARISIS G, TROSSEN D, et al. Pursuing a Software Defined Information-centric Network[C] // European Workshop on Software Defined NETWORKING. IEEE Computer Society, 2012: 103-108.
- [35] CHANDA A, WESTPHAL C, RAYCHAUDHURI D. Content based traffic engineering in software defined information centric networks[C] // Computer Communications Workshops. IEEE, 2013: 357-362.
- [36] CHANDA A, WESTPHAL C. ContentFlow: Mapping Content to Flows in Software Defined Networks[J]. Computer Science, arXiv: 1302.1493, 2013.
- [37] VAHLENKAMP M, SCHNEIDER F, KUTSCHER D, et al. Enabling Information Centric Networking in IP Networks Using SDN[C] // Future Networks and Services. IEEE, 2013: 1-6.
- [38] CHANG D, KWAK M, CHOI N, et al. C-flow: An efficient content delivery framework with OpenFlow[C] // The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN2014). IEEE, 2014.
- [39] XUAN N N, SAUCEZ D, TURLETTI T. Providing CCN functionalities over OpenFlow switches[EB/OL]. <https://hal.inria.fr/hal-00920554>.
- [40] ADRICHEM N L M V, KUIPERS F A. NDNFlow: Software-defined Named Data Networking[C] // Network Softwarization. IEEE, 2015: 1-5.
- [41] JMAL R, FOURATI L C. An OpenFlow Architecture for Managing Content-Centric-Network (OFAM-CCN) based on popularity caching strategy[M]. Elsevier Science Publishers B. V., 2017.
- [42] SUN Q, WANG W, HU Y, et al. SDN-based autonomic CCN traffic management [C] // GLOBECOM Workshops. IEEE, 2014: 183-187.
- [43] ZHOU T, GONG X, HU Y, et al. PindSwitch: A SDN-based protocol-independent autonomic flow processing platform[C] // GLOBECOM Workshops. IEEE, 2014: 842-847.
- [44] WANG Z F, WANG L, GAO X, et al. An Architecture of Content-Centric Networking over Protocol-Oblivious Forwarding [C] // IEEE GLOBECOM Workshops. IEEE, 2015: 1-5.
- [45] CHARPINEL S, SANTOS C A S, VIEIRA A B, et al. SDCCN: A Novel Software Defined Content-Centric Networking Approach[C] // IEEE International Conference on Advanced Information NETWORKING and Applications. IEEE, 2016: 87-94.
- [46] SIGNORELLO S, STATE R, FRANÇOIS J, et al. NDN.p4: Programming information-centric data-planes[C] // Netsoft Conference and Workshops. IEEE, 2016: 384-389.
- [47] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: experience with a globally-deployed software defined wan [C] // ACM Sigcomm 2013 Conference on Sigcomm. ACM, 2013: 3-14.
- [48] LUO L Y, HE P, GUAN H T, et al. Key Technologies and Prototype Systems of Programmable Virtual Routers[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7): 1349-1363. (in Chinese)  
罗腊咏, 贺鹏, 关洪涛, 等. 可编程虚拟路由器关键技术与原型系统[J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1349-1363.
- [49] ZURANIEWSKI P, ADRICHEM N V, RAVESTEIJN D, et al. Facilitating ICN deployment with an extended openflow protocol [C] // Proceedings of the 4th ACM Conference on Information-Centric Networking. ACM, 2017: 123-133.
- [50] CHOWDHURY N M M K, BOUTABA R. A survey of network virtualization[J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862-876.