

基于 SDN 的无线网状网络缓存位置决策和操作分配方案

叶小琴¹ 任彦仰¹ 孙 挺² 合尼古力·吾买尔³

(四川省装备制造业机器人应用技术工程实验室 德阳 618000)¹

(西北大学可视化研究所 西安 710069)² (南京航空航天大学机电工程学院 南京 210016)³

摘 要 针对信息中心网络缓存管理效率较低的问题,提出一种旨在提高缓存管理效率的方法,且充分利用了无线网状网络(WMN)环境中软件定义网络(SDN)的概念。主要工作体现在 SDN 内容管理上,缓存位置决策考虑了网络拓扑位置、内容尺寸和缓存节点资源的位置。缓存操作考虑了请求客户端和缓存节点位置,且操作分为通过分支点的 off-path 缓存和通过缓存节点内容流的 on-path 缓存。控制器通过缓存内容表来确定工作的分配。实验在两种环境下进行:含有局部聚合客户端的小型网络和局部分布式客户端的大型网络。结果显示,所提方案仅利用每秒 5.13kb 的控制流量负荷即可将随机缓存位置方案的平均响应延迟减少 23.95%。相比于其他网络缓存方案,所提方案最大化了 WMN 的节点缓存效率,明显提升了内容缓存分配性能,且系统没有较大的额外开销。

关键词 软件定义网络,无线网状网络,操作分配,缓存,客户端,OpenFlow 协议

中图分类号 TP393.06 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.08.018

Cache Location Decision and Operating Allocation Schema Based on SDN in WMN

YE Xiao-qin¹ REN Yan-yang¹ SUN Ting² HENIGULI · Wumaier³

(Sichuan Equipment Manufacturing Industry Robot Application Technology Engineering Laboratory, Deyang 618000, China)¹

(Visualization Institute, Northwestern University, Xi'an 710069, China)²

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)³

Abstract For the issue that cache management efficiency of information center network is low, a method was proposed to improve cache management efficiency, and the concept of software defined network (SDN) in the environment of wireless mesh network (WMN) was taken full use of. The main work is reflected in the SDN content management, in which the location of network topology, content size and the location of cache node resource are considered for cache location decision. The request of clients and the position of cache nodes are considered for cache operation, and the operation is divided into off-path caching through the branch point and on-path caching through cache node content streams. The controller determines the distribution of the allocation work by the cached content table. Experiments are carried out in two kinds of environments, small network where the clients are locally converged and large network where the clients are locally distributed. The proposed schemes decrease the average response delay by 23.95% with only 5.13kb control traffic load per second in comparison to random cache location scheme. Compared with other in-network cache schemes, the efficiency of the node cache in WMN is maximized, and the content cache allocation performance is significantly enhanced, also the system does not have a large number of additional overhead.

Keywords Software defined network (SDN), Wireless mesh network, Operating allocation, Cache, Clients, OpenFlow protocol

1 引言

无线网状网络(Wireless Mesh Networks, WMN)^[1]在短时间内可以以较低的成本构建一个网络基础设施,在安装网络较为困难的采矿、建设等领域具有良好的应用效果,因此被当作下一代骨干网络^[2-3]。

WMN 对当前网络体系结构有明确的限制,大多数用户只想接收当前想要的信息,而对在哪里找到当前的信息并不

感兴趣。然而,当前网络中使用的基于目的地址的路由协议只关注当前位置;而且不论临近节点需求的内容如何,网络负载的增加都会导致通信效率的降低,尤其是在一个有多个用户请求相同内容的局域网更是如此^[4]。信息中心网络(Information Center Networks, ICN)^[5]是克服这些缺点的一种新方法,它的典型特征是使用内容中心传输代替服务器到客户端的连接。ICN 技术主要包括内容中心网络(Content-Centric Networking, CCN)和面向数据的网络体系结构(Data Orien-

到稿日期:2016-10-06 返修日期:2016-12-30 本文受河南省科技厅科技发展计划科技攻关项目(122400450356),河南省科技厅科技发展计划软科学项目(132400410927)资助。

叶小琴(1979-),女,硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络;任彦仰(1983-),男,硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络;孙 挺(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为算法设计;合尼古力·吾买尔(1976-),女,博士生,副教授,主要研究方向为计算机网络。

ted Network Architecture, DONA), 其共同的特征^[6]是采用网络缓存来获得高效的内容传输, 并使用基于名称的请求和分布协议。

已有一些学者对 WMN 进行了研究, 如文献^[7]提出了一种基于 WMN 的 OpenFlow 协议。OpenFlow 用以支持 WMN 中网状客户端的移动性, 每个网状节点都有控制数据流量的虚拟接口, 控制接口在监控服务器的控制下进行拓扑管理、客户端连接管理等, 同时, 数据接口通过 OpenFlow 控制服务器设置转发规则。然而, 该方案的结构可扩展性较低, 这是因为网状客户端需要支撑 OpenFlow 协议的流动性^[8], 且使用双控制器增加了控制的复杂性。

文献^[9]讨论了网内缓存技术, CCN 采用 Always 策略会造成较大冗余^[9], 仅考虑节点介数, 将网络节点介数和节点缓存内容更替速率作为缓存决策度量。文献^[10]利用包装器模块来支撑 CCN, 通过 OpenFlow 转换器^[11]中的重接网来协助 CCN, 这个模块将内容名称转换成域; 同时文中还介绍了基于内容流行度的缓存节点选择方案。文献^[12]提出了一种基于 OpenFlow 的 CCN 结构, 与文献^[10]类似, 该方案将内容名称通过散列法转换为可识别的域; 同时文中还主要分析了其散列技术和可靠性。本文提出了一种确定内容缓存位置的方法, 且该内容缓存位置考虑了 WMN 拓扑和链路层的特征。

ICN 需要网络实体的总体规划, 因此需要修正组成 ICN 的网络实体, 以支持网络缓存和基于名称的内容路由。此外, 将 ICN 内容路由的概念应用到 WMN 的特定领域并不合适, 原因如下:

- 1) 实际应用中, 网络路由节点都比较廉价实用, 其硬件性能并不高, 故利用这些路由节点处理大量内容缓存并不合理。
- 2) 相比有线链路, 无线链路的通信成本更高, 故应当谨慎决策影响内容路由效率的内容缓存位置。
- 3) WMN 中链路质量和拓扑结构的变化比有线网络更加频繁, 因此必须考虑网络的灵活性和可伸缩性^[13]。

为了克服上述限制, 本文提出了一种 WMN 缓存管理方案, 其支持透明的缓存机制。控制器使用一种集中的方法管理网络中的整个缓存, 并控制内容请求流、缓存流和分配流。

2 基于 SDN 的缓存管理方案

为了提高内容分布的缓存效率, 本文提出基于软件定义网络 (Software Defined Networks, SDN) 的缓存管理方案。提出的方案分为缓存决策、缓存操作和缓存分配, 其中, 缓存位置决策是考虑 WMN 特征的一种关键技术。

2.1 缓存决策

大多数内容传输技术都含有一种确定内容是否将被缓存的方法。提出的方案不缓存所有内容, 而是通过内容的流行度和尺寸来确定某个内容是否被缓存。此外, 通过 SDN 将缓存决策点集成到控制器, 因此在需要缓存决策的网络中, 通过适当的规则可以显著减少额外开销。

由于网状节点的缓存大小有限, 需同时考虑内容的流行度和尺寸。提出的方案使用两种缓存类型: 低容量节点缓存器和高容量缓存服务器, 因此, 可通过内容的流行度和尺寸确认缓存的位置。

2.2 缓存位置决策

决定缓存位置的主要目标是将已缓存的内容置于更接近

实际用户的位置。在网络方面, 接近用户的内容能够被有效地分配, 这是因为该内容可以通过小数量的跳跃传输, 而跳跃数较小的数据流不太可能引起网络拥塞。

2.2.1 网络拓扑的位置决策

如果所有缓存空间是空的, 则需要将缓存内容放置在与发送内容请求客户端相连的网状节点上。然而, 若客户端向远离缓存内容的网状节点发出其他请求, 则需要将分配到客户端的内容延迟发送。

就网络宽带效率而言, 该方法并不理想。解决该问题的合理方法是将缓存放置在位于网络中心的网状节点上。然而, 如果网络中的所有缓存尺寸增加, 将会加快耗尽最里面网络节点的剩余缓存空间; 同时, 节点附近的链路将变得非常拥挤。如此, 随着缓存分配延迟的增加, 缓存机制的效率将逐渐降低。因此, 考虑网络拓扑的缓存位置决策。

请求缓存内容的客户端可能与任何节点相连, 因此, 控制器采用一种策略来处理很多潜在请求, 且这些请求均来自于不同客户端相连的网状节点。若缓存节点附近的链路很拥挤, 则会降低缓存分配的效率, 故应考虑该链路的资源利用率。此外, 拓扑结构的缓存位置决策还应反映网络链路使用的数量和与每个网状节点相连的客户端数量。

考虑 N 个网状节点和 L 个网状链路组成的多接口多信道 (Multi-Interface Multi-Channel, MIMC) WMN。网状拓可利用无向图表示, 即 $G = \{N, L\}$, 其中, $N = \{1, 2, \dots, N\}$, $L = \{1, 2, \dots, L\}$ 。 δ 的最高传输率表示为:

$$\delta_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_{\max}}, k \in L \quad (1)$$

其中, γ_k 表示链路 k 的数据传输率。令 T 表示流量:

$$T_k = \frac{\tau_k}{\gamma_k}, k \in L \quad (2)$$

其中, τ_k 表示链路 k 的当前流量, $\bar{\gamma}_k$ 表示 τ_k 的吞吐量。设 λ 表示节点与节点之间的通信链路开销, 可得:

$$\lambda_{i,j} = \sum_{k \in \rho_{i,j}} \frac{1}{\delta_k(1-T_k)}, i, j \in N, k \in L, T_k < 1 \quad (3)$$

其中, $\rho_{i,j}$ 表示节点 i 与节点 j 之间利用网状路由协议定义的路径。节点权重 ω 的定义如下:

$$\rho_{i,\omega_i} = (|N_j^{di}| \times \lambda_{i,j}), i \neq j, i, j \in N, k \in L \quad (4)$$

其中, $|N_j^{di}|$ 表示与节点 j 相连接的客户端总数。

2.2.2 内容尺寸和缓存节点资源的位置决策

快速缓存分配是网络内容管理的一项关键技术。为了发送来自缓存节点的内容, 在加载了来自内存 (如果该节点使用缓存内容) 和闪存盘 (如果使用存储设备进行缓存) 的内容后, 该节点传播已缓存的内容。这种行为显然会使用 CPU 和磁盘 I/O。相比于缓存设备, 网状节点显然拥有低性能硬盘, 因此必须考虑资源不足的现象。

提出的缓存位置决策方法还考虑了缓存节点的资源。节点资源主要体现在运算资源上, 当节点的有用缓存足以缓存内容时, 提出的方案检查候选节点的当前资源; 若节点不能满足资源阈值, 则改变候选节点。在检查完所有网状节点后, 选择合适的缓存节点。此外, 若没有合适的节点进行缓存, 则将内容缓存到缓存服务器中。若内容尺寸足够大, 则直接选择缓存服务器。

2.2.3 位置决策算法

基于上述考虑, 设计了一种缓存位置决策算法。算法中

涉及的缓存仅限于之前缓存决策阶段的节点内缓存。其操作顺序如图 1 所示。

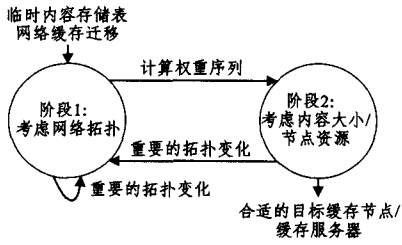


图 1 缓存位置决策的处理顺序

第 1 阶段中,当将要接收缓存的内容或需要移动某一缓存时,控制器开始计算合适的候选节点,该计算基于由控制器通过 OpenFlow 协议保存的全局网络视图。算法中第 2 行表示每个节点都可能是一个候选节点 N_{cnd} , N_{dst} 表示某一个终端节点。第 3 行是将 0 赋值给权重 ω_{cnd} 。第 4—7 行表示基于式(1),通过式(4)给出每个候选节点的权重,并根据权重随机表明节点的优先顺序。第 5 行表示将节点 N_{cnd} 到节点 N_{dst} 的开销赋值给 $\lambda_{cnd,dst}$ 。 $|N_{dst}^{cl}|$ 表示与节点 j 相连的客户端数量,则第 6 行表示候选节点权重 ω_{cnd} 自加 N_{cnd} 到节点 N_{dst} 的开销。第 8 行表示一个压栈操作,即将候选节点的权重 ω_{cnd} 压到权重栈 ω 中。

第 1 阶段:考虑网络拓扑的位置决策

1. 将 ω 设置为有限队列
2. for each $N_{cnd} \in N$ then
3. $\omega_{cnd} \leftarrow 0$
4. for each $N_{dst} \in N$, 满足 $N_{dst} \neq N_{cnd}$, do
5. $\lambda_{cnd,dst} \leftarrow \text{link_overhead}(N_{cnd}, N_{dst})$
6. $\omega_{cnd} += |N_{dst}^{cl}| \times \lambda_{cnd,dst}$
7. end
8. $\omega.\text{push}(\omega_{cnd})$
9. end

第 2 阶段考虑了内容大小和节点的资源。以 HTTP 200:OK¹⁾。算法第 3 行 $N_{cnd} \leftarrow \text{pop}(\omega)$ 表示一个出栈操作,即将权重赋给候选节点 N_{cnd} ,当满足当前节点 $N_{current}$ 的权重 $N_{current}^{\omega}$ 小于互选节点 N_{cnd} 的权重 N_{cnd}^{ω} 时,执行如下操作。第 4 行表示将缓存和缓存分配的总操作数赋给参数 N_{cnd}^{op} 。第 5 行表示对缓存节点数量进行求和,并将求和的值赋给参数 N_{cnd}^s , N_{cnd}^E 表示合适的缓存节点条件, τ_{IF} 表示合适的节点序号。第 6 行将候选节点的可用容量 N_{cnd}^{avail} 与内容大小 C_s 进行比较,若前者小于后者,则通过检测正在缓存或分配的内容量最终决定缓存位置。第 7 行为流传输,若内容大小 N_{cnd}^{op} 超过缓存大小的阈值 thres_{op} ,且在网络中没有合适的缓存节点(即合适的缓存数量不足, $N_{cnd}^s < \text{thres}_s$),则将内容缓存在缓存服务器中。

第 2 阶段:考虑内容尺寸和缓存节点资源的位置决策

1. $C_s \leftarrow$ 来自 HTTP 200:OK 的内容尺寸
2. if $C_s > \text{thres}_s$ then return cache_server
3. for each $N_{cnd} \leftarrow \text{pop}(\omega)$ 满足 $N_{cnd}^{\omega} > N_{current}^{\omega}$, do
4. $N_{cnd}^{op} \leftarrow$ 缓存和缓存分配的操作总数
5. $N_{cnd}^s \leftarrow \sum_{N_{cnd}^{IF}} \tau_{IF}$

6. if $C_s > N_{cnd}^{avail}$, then continue
7. if $N_{cnd}^{op} < \text{thres}_{op}$ & $N_{cnd}^s < \text{thres}_s$ then
8. return N_{cnd}
9. end
10. end
11. return cache_server

第 1 阶段算法的计算复杂度是 $O(|N|^2 * \text{avg}(|\rho|))$,第 2 阶段算法的计算复杂度是 $O(|N|)$ 。显然,第 1 阶段的复杂度较高。然而,在大规模 WMN 中采用本文方案时,若控制器将该网络当作多域网络,则会降低复杂度。此外,在缓存位置决策操作期间,网状拓扑结构可能会发生改变^[14]。

2.3 缓存操作

当内容从网络外的服务器中传送出来时,执行缓存操作。对于该路径,缓存操作可分为两类^[15]:1)通过分支点的 off-path 缓存;2)用以配置通过缓存节点内容流的 on-path 缓存。当缓存操作选择 off-path 缓存时,即当缓存节点与最初网状路径之间有一段距离时,利用 BP 将复制的内容流发送给缓存节点和网状入口节点。

off-path 和 on-path 缓存都有各自的优点和缺点。off-path 利用 BP 快速并行管理传递到请求客户端和当前缓存的内容。然而,因为数据包丢失可能出现在基于 WMN 的无线链路,且 TCP 会话的建立可能产生额外的开销,所以需要在 BP 和缓存节点之间建立 TCP 连接。由于被请求的内容在到达网络之前 BP 是指定的,因此当内容到达网络时,需要在 BP 和缓存节点之间提前建立 TCP 连接。不同于 off-path 缓存,on-path 缓存无需 TCP 连接,只需利用一个简单的网络控制来改变路径即可。然而,缓存节点远离请求客户端连接的入口节点,因此可能会配置低效率的路径,故宽带效率会降低。因此,选择这两种缓存操作时需要考虑请求客户端和缓存节点的位置。

2.4 缓存分配

客户端的内容请求信息通过包-IN 信息发送到控制器,同时,控制器提取 URL 并将其作为内容名称^[16]。接着,控制器通过参考它的缓存内容表来确定某个缓存是否存在于网络中。若该缓存存在于网络中,则命令持有缓存内容的节点或缓存服务器开启缓存发送。

请求内容之前,客户端事先与远程内容服务器建立 TCP 连接。相应地,用于分配缓存的节点实际上仅在节点端与请求客户端建立 TCP 会话,同时它将 TCP 状态设为“已建立”。控制器转发一条命令将已缓存的内容发送出去,该内容包括使用 HTTP GET 消息计算的 ACK,即该缓存节点参考 HTTP GET 来配置 TCP 状态,然后将已缓存的内容发送给请求客户端。

与请求客户端相连的入口网状节点从规则 $\{\text{src IP: NIP, src port: NPort, dst IP: CIP, dst port: CPort}\}$ 匹配的缓存节点中识别内容流,替换到达远程内容服务器的 IP 和端口的 NIP 和 NPort 后,该入口网状节点将识别的内容流向发送给客户端。因为 WMN 的节点通过 IP 地址和缓存节点及请求客

¹⁾ http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSFKSJ_8.0.0/com.ibm.mq.ref.dev.doc/q110850.htm

客户端的端口号识别内容流,所以控制器将某一确定的端口号指派给缓存节点。因此,启动缓存转移的指令必须包括URL, NPort, CIP, CPort 和 ACK, 必须将 NIP, NPort, CIP, CPort, SIP 和 Sport 发送到入口节点。

3 实验结果与分析

使用嵌入式软件设备进行实验。其中,所有网状节点使用定向天线,所有网络链路均基于 IEEE 802.11a,网状客户端连接到指定的网状节点。实验准备了 20 个 20MB 大小的文件和下载文件的客户端,由于每个节点配备有 100MB 的存储空间,因此每个节点最大能缓存 5 条内容。实验配置简要介绍如下:使用 Ubiquiti Router station Pro 作为硬件开发板,操作系统为 Linux(cent OS 5.5),使用 Mikrotik Groove A 52HPn 作为网卡,使用 OpenMUL 4.0.1 版本的软件定义网络控制器。

3.1 实验场景

基于缓存的位置、开销和效率,考虑了控制开销和分配性能;使用的策略假设至少使用两个请求之后再缓存相同的内容,实验重复进行 20 次。

为了反映多种网络状态,考虑两种实验场景,每种场景使用不同的实验拓扑。图 2 示出了含有 7 个网状节点和局部聚合网状客户端的小型网状网络拓扑。图 3 示出了含有局部分布式客户端的大型 WMN 拓扑。将拓扑信息、内容大小、节点资源、客户端数作为比较对象。

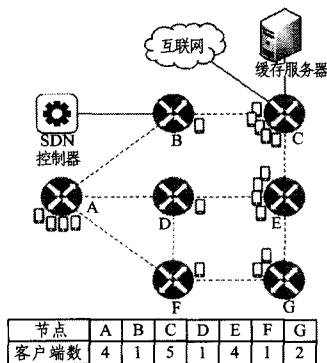


图 2 含有局部聚合客户端的小型 WMN 实验场景

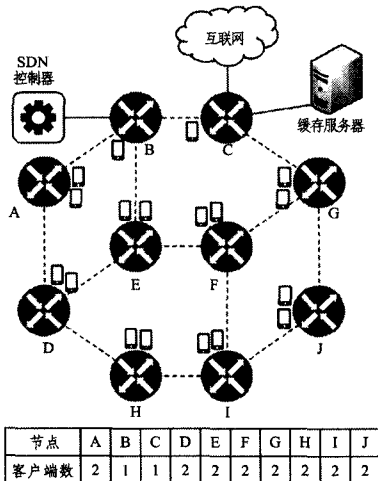


图 3 含有局部分布式客户端的大型 WMN 实验场景

3.2 场景 1:含有局部聚合客户端的小型网络

图 4 示出含有局部聚合客户端的 WMN 节点内缓存效率评估,实验随机决定节点的缓存位置。由图 4 可得,在多数情况下,当缓存等量地均布于 7 个网状节点时,其缓存分布性能比仅使用缓存服务器时的性能高 31.35%。当通过一个相对较小的跳跃进行缓存分配时,会缩短下载时间,这是因为短跳跃通信会降低瓶颈链路发生的概率。

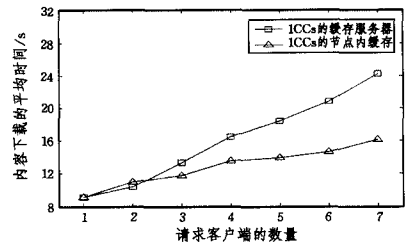


图 4 网络内节点和万维网中局部聚合客户端的使用效率

图 5 示出缓存位置决策的效率实验结果评估。请求客户端的数量配置为 1~7,实验对内容的平均下载时间进行比较。所有客户端试图接收来自远程客户端的确认内容(实际上,缓存节点将响应该请求)。利用随机位置执行 RND,文献[9]仅利用网络拓扑进行;文献[10]考虑了拓扑结构和客户端数;文献[12]考虑了缓存大小以及文献[10]考虑的因素。最后,为了评估提出的全特征缓存位置决策方案,执行提出的方案。无论何时增加新的考虑因素,都会减少平均下载时间,但随机缓存的结果显示,在网络的中心处,对节点的集中请求会导致严重的瓶颈链路。相比于随机缓存位置方案,提出的方案可将平均下载时间缩短 23.95%。

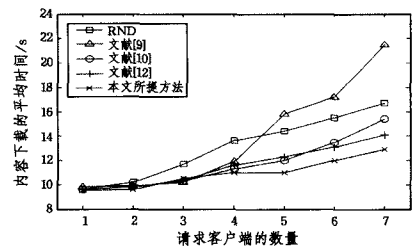


图 5 在含有局部聚合客户端 WMN 中缓存位置决策方案的影响

3.3 场景 2:含有局部均匀分布客户端的大型网络

图 6 示出了在含有局部分布式客户端的 WMN 中使用内缓存的效率。从图 6 可以看出,相比于在含有局部聚合客户端上进行的实验,该实验显著缩短了从服务器下载内容的平均时间,这是因为许多客户端与其他没有直接连接缓存服务器的网状节点直接相连,可直接下载网状节点提供的内容。

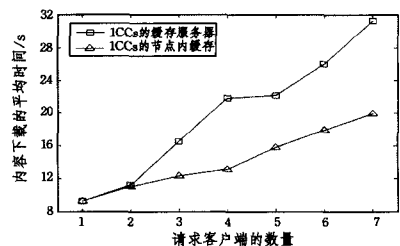


图 6 在含有局部分布式客户端的 WMN 中使用内缓存的效率

图 7 示出了在含有局部分布式客户端的 WMN 上进行缓存位置决策方案的实验结果。可以看出,相比于之前的实验

结果,该方案的下载操作需要花费更多的时间,这是因为含有分布式客户端的大型 WMN 含有更多的瓶颈链路,数据流可能会共享某一网状链路,容易造成网络拥塞,从而导致更多的下载时间。此外,由于客户端在整个网络是分布式的,因此考虑与每个网状节点相连的客户端数量的方案和考虑内容大小的方案的效率较低,缓存分配时间仅受节点资源的影响。相比于随机缓存位置,所提方案的平均下载时间会缩短 17.28%。

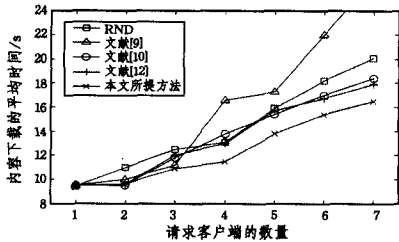
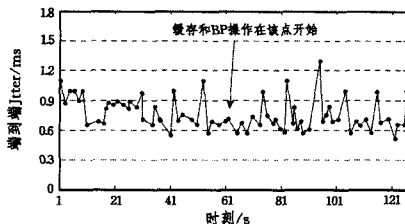


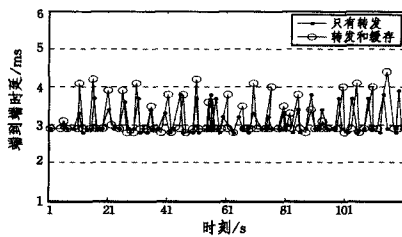
图 7 在含有局部分布式客户端的 WMN 中缓存决策方案的影响

3.4 缓存操作开销

图 8 示出了内容传输期间节点开销的影响,即在内容传输路径的中间节点处缓存和 BP 操作对传输性能的影响。本文的网状节点配置是为了在转发后进行缓存操作,从图 8 可以看出,额外的操作对内容传输没有明显的影响。



(a) 对内容传输性能的影响



(b) 对端到端延时的影响

图 8 转发节点中缓存操作对性能的影响

当在图 3 的拓扑结构上操作 7 个请求客户端时,使用 OpenFlow 协议的控制通讯负载如图 9 所示。每个网状节点报告自己的状态,如每秒钟的链路使用情况、客户端信息和缓存状态。同时,无论客户端何时发送内容请求消息,控制器都会将规则传递给相应的节点。在观察的 3min 内,平均通讯负载约为 5.13kbps,该值在网络正常运行时属于正常水平,表明提出的方案没有较大的额外开销。

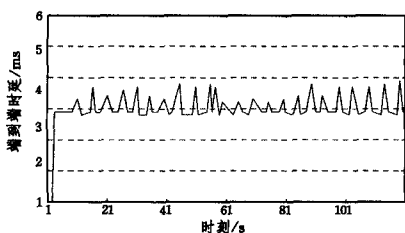


图 9 基于 OpenFlow 的控制通讯负载

结束语 为了最大化 WMN 的内节点缓存的效率,本文在缓存管理方案中引入了几个 SDN 概念,提出了基于 SDN 的缓存管理方案,有效地进行缓存位置决策、缓存分配和缓存操作。通过仿真实验表明,提出的方案可以明显提高内容缓存分配的性能,且无需较大的额外开销。

未来将进一步关注 SDN 和 ICN,计划将提出的方案扩展到有线网络。此外,还将研究其他的内容位置决策方案,从而进一步提高缓存的有效性。

参考文献

- [1] GUO C. The research of wireless mesh network multipath routing protocol and its security mechanism [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
郭婵. 无线网状网多径路由协议及其安全机制的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [2] AKYILDIZ I F, WANG X, WANG W. Wireless mesh networks: a survey [J]. Computer Networks & Isdn Systems, 2005, 47(4): 445-487.
- [3] QIU S W, YUAN L Y, LI Y Y. Data Rate Adaptive Routing Algorithm in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks [J]. Computer Science, 2015, 42(4): 94-100. (in Chinese)
邱树伟, 袁利永, 李琰琰. 能量捕获无线传感器网络中速率自适应路由算法 [J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 94-100.
- [4] LI Y X, YANG G. Multi-agent learning power allocation strategy in cross-layer cognitive wireless Mesh network [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(10): 3101-3103. (in Chinese)
李跃新, 杨岗. 跨层认知无线 Mesh 网络中多 agent 学习的功率分配策略 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(10): 3101-3103.
- [5] XU S W. The research of the information technology center network based on SDN [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
许世文. 基于 SDN 的信息中心网络的技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [6] JACOBSON V, SMETTERS D K, BRIGGS N H, et al. VoCCN: voice-over content-centric networks [C] // The Workshop on Re-Architecting the Internet. ACM, 2009: 1-6.
- [7] DELY P, KASSLER A, BAYER N. OpenFlow for wireless mesh networks [C] // Proceedings of IEEE ICCCN. 2011: 149-156.
- [8] WANG X L, ZHANG G M, HU C, et al. SDFAC: software defined flow access control mechanism [J]. Journal on Communications, 2015, 42(2): 137-143. (in Chinese)
王秀磊, 张国敏, 胡超, 等. SDFAC: 软件定义的流接入控制机制 [J]. 通信学报, 2015, 42(2): 137-143.
- [9] CUI X D, LIU J, HUANG T, et al. A caching strategies in the grid based on the node betweenness and replacement rate for content center network [J]. Journal of Electronics and Information, 2014, 36(1): 1-7. (in Chinese)
崔现东, 刘江, 黄韬, 等. 基于节点介数和替换率的内容中心网络网内缓存策略 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(1): 1-7.
- [10] NGUYEN X N, SAUCEZ D, TURLETTI T. Efficient caching in Content-Centric Networks using OpenFlow [J]. Proceedings-IEEE INFOCOM, 2013, 12(11): 67-68.

- [13] AHMED S, OSBORN S L. A system for risk awareness during role mining[C]//ACM Symposium on Access Control MODELS and Technologies. ACM, 2014:181-184.
- [14] LU H, VAIDYA J, ATLURI V. Optimal Boolean matrix decomposition: Application to role engineering[C]//IEEE International Conference on Data Engineering. IEEE Computer Society, 2008: 297-306.
- [15] LI R, LI H, WANG W, et al. RMiner: a tool set for role mining [C]//ACM Symposium on Access Control MODELS and Technologies. 2013:193-196.
- [16] COLANTONIO A, DI PIETRO R, OCELLO A, et al. A formal framework to elicit roles with business meaning in RBAC systems[C]//Proceedings of the 14th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies. 2009:85-94.
- [17] MA X P, LI R X, LU Z D. Role Mining Based on Weights[C]//Symposium on Access Control Models and Technologies. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2010:65-74.
- [18] WU M Y. Activities and Event-Driven-Based Role Engineering [C]//2012 Sixth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing (ICGEC). IEEE, 2012:550-553.
- [19] ZHANG L, ZHANG H L, HAN D J, et al. Theory and Algorithm for Roles Minimization Problem in RBAC Based on Concept Lattice[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(12): 2371-2378. (in Chinese)
张磊, 张宏莉, 韩道军, 等. 基于概念格的 RBAC 模型中角色最小化问题的理论与算法[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2371-2378.
- [20] YU Q Q. Role Hierarchy Mining For Role Based Access Control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
蔚清琴. RBAC 中分层角色挖掘算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [21] MI X M. Role Mining Algorithm Based on Evolutionary Algorithms[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
米秀明. 基于进化算法的角色挖掘算法[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [22] YE W. Role Mining and Logical Programming Model in Access Control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
叶威. 访问控制中的角色挖掘与逻辑编程模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [23] FENG D G, ZHANG M, LI H. Big Data Security and Privacy Protection[J]. Chinese Journal of Computer, 2014, 37(1): 246-257. (in Chinese)
冯登国, 张敏, 李昊. 大数据安全与隐私保护[J]. 计算机学报, 2014, 37(1): 246-257.
- [24] FANG B X, JIA Y, LI A P, et al. Privacy Preservation in Big Data: A Survey[J]. Big Data, 2016, 2(1): 1-18. (in Chinese)
方滨兴, 贾焰, 李爱平, 等. 大数据隐私保护技术综述[J]. 大数据, 2016, 2(1): 1-18.
- [25] 北京大学数学系几何与代数教研室代数小组. 高等代数(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社. 1988:6.
- [26] SYROPOULOS A. Mathematics of Multisets[M]// Multiset Processing. Spinger Berlin Heidelberg, 2000:347-358.
- [27] LOEB D. Sets with a negative number of elements[J]. Advances in Mathematics, 1992, 91(91): 64-74.
- [28] GANTER B, WILLE R. Formal concept analysis: Mathematical foundations[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [29] ZHANG D, RAMAMOCHANARAO K, ZHANG R. Synthetic data generation for study of role engineering[EB/OL]. <http://www.cs.mu.oz.au/~zhangd/roledata>. Limited-priority[J]. Computer Science, 2014, 41(8): 135-138. (in Chinese)
张挺, 李陶深, 葛志辉. 非强占有限优先权 M/M/n/m 模型的无线 Mesh 网络 QoS 研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(8): 135-138.

(上接第 99 页)

- [11] BARAKAT C, KALLA A, SAUCEZ D, et al. Minimizing bandwidth on peering links with deflection in named data networking [C]// Third International Conference on Communications and Information Technology. IEEE, 2013:88-92.
- [12] MA W, YAO Y, FAN H L, et al. A virtual network architecture for private cloud based on Openflow[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2015, 39(5): 15-21. (in Chinese)
马威, 姚远, 范慧莉, 等. 基于 Openflow 的私有云虚拟网络结构设计[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 15-21.
- [13] DAI D, WEI J, WANG L. Wireless Mesh Network Channel Assignment Scheme Based on SIR Conflict Graph and Maximal Independent Set[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2016, 38(2): 109-113. (in Chinese)
戴冬, 卫娟, 王磊. 基于 SIR 冲突图和最大独立集的无线 Mesh 网络信道分配方案[J]. 湘潭大学学报, 2016, 38(2): 109-113.
- [14] ZHANG T, LI T S, GE Z H. Research on Wireless Mesh Network QoS Based on M/M/n/m Model under Non-preemptive Limited-priority[J]. Computer Science, 2014, 41(8): 135-138. (in Chinese)
张挺, 李陶深, 葛志辉. 非强占有限优先权 M/M/n/m 模型的无线 Mesh 网络 QoS 研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(8): 135-138.
- [15] ZHAI H B, JIANG H, SUN Y, et al. A Node-Link Based Cache Deployment Algorithm for P2P Traffic in ISP Networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(1): 122-135. (in Chinese)
翟海滨, 蒋海, 孙毅, 等. 一种基于点路结合的骨干网 P2P 缓存部署方法[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 122-135.
- [16] HUANG C Y, RAMANATHAN P. Network Layer Support for Gigabit TCP Flows in Wireless Mesh Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(10): 2073-2085.
- [17] ZHENG Y, HE S B, ZHANG X Y, et al. A Game-based Channel assignment for Wireless Mesh Networks [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2013, 27(4): 90-95. (in Chinese)
郑鹏宇, 何世彪, 张馨月, 等. 一种基于博弈论的无线网状网络信道分配算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2013, 27(4): 90-95.