



命名数据网络内容分发机制研究与探讨^{*}

雷 凯,袁 杰

(北京大学深圳研究生院深圳市云计算关键技术与应用重点实验室(SPCCTA) 深圳 518055)

摘 要:未来互联网体系架构研究是科技发展的重大战略需求,命名数据网络(NDN)作为目前最为活跃的前沿建议方案,得到了国内外研究学者的重点关注。NDN 体系架构颠覆了当前互联网的基础,仍有很多问题亟待解决。NDN 内容分发机制是推动 NDN 实际发展的关键,但仍有很多研究问题尚未解决。重点介绍了 NDN 在内容分发方面的概念和模型;分析了 NDN 内容分发机制在转发策略、冗余控制、拥塞控制和访问控制 4 个方面面临的问题和当前国内外的研究进展,并针对上述问题提出思考。

关键词:命名数据网络;信息中心网络;NDN 转发策略;访问控制;拥塞控制

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.09.005

Content Distribution Mechanisms of Named Data Networking

Lei Kai, Yuan Jie

(Shenzhen Key Lab for Cloud Computing Technology and Applications,
Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Future internet architecture research is one of the major strategic needs of science and technology development. As a promising design, named data networking (NDN) has drawn the extensive attentions of researchers and industry. Since NDN architecture evolves the internet from today's host-based packet delivery towards directly retrieving named objects, there are still a lot of issues have yet to be studied. Its content distribution mechanisms are the key to promote the development and deployment. The concepts and characteristics of NDN content distribution were introduced. The current advances in the aspect of forwarding strategy, redundant control, congestion control and access control were emphasized. Aimed at the faced problems, some discussions and analysis were also presented.

Key words: named data networking, information-centric networking, NDN forwarding strategy, access control, congestion control

1 引言

近年来,世界各国都在重点关注如何设计全新的未来互联网体系架构,信息中心网络(information-centric networking, ICN)成为主流研究方向之一。目前国外学术界

关于信息中心网络体系的研究项目有很多,主要包括美国伯克利大学 RAD 实验室提出的“面向数据的网络体系架构(DONA)^[1]”、欧洲 4WARD 提出的“信息网络工程 NetInf^[2]”、芬兰赫尔辛基科技大学和赫尔辛基信息技术研究院提出的“发布、订阅式互联网路由范例(PSIRP)^[3]”以及美国

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61103027),国家发展和改革委员会项目(发改办高技[2013]1309号),深圳市科技计划基础研究项目(No.JCYJ20130331144541058)



UCLA 大学计算机系与 PARC 研究所联合提出的“命名数据网络(named data networking, NDN)^[4]”。NDN 项目经过不断的创新和发展,逐渐脱颖而出,成为目前最被看好的建议方案之一。NDN 的诞生和演变是一种集大成者,是全球各地网络研究工作者共同积累的成果。

NDN 项目于 2010 年获得美国 NSF FIND 基金近 800 万美元支持,共有 12 个美国高校和研究机构联合参加。该项目于 2014 年得到新一轮美国 NSF 基金资助,主要目标在于进一步开发、测试和部署这一新的网络体系结构。CCN^[5]是 PARC 研究所在 NDN 项目立项之前的项目简称,实现的开源 CCNx 库也是 NDN 项目的一个重要研究基础。NDN 项目旨在通过建立全新的 ICN 网络架构体系,争取逐步替代主宰互联网半个世纪的 TCP/IP。项目不考虑内容存储所在的物理位置(where),直接建立命名数据(what)网络体系。NDN 项目主要致力于研究路由可扩展性、内容快速转发、信任模型、网络安全、内容保护和隐私以及支持这一设计的基础通信原理等关键问题。

NDN 力求从协议架构设计上彻底解决 TCP/IP 设计上的很多不适应性,保留了细腰沙漏模型,主要特点集中体现在多样灵活的转发策略选择和基于数据本身的安全机制上。对象命名分层组织在字典有序树中,每个内部节点代表内容对象集合的公共前缀。使用这种命名树时,NDN 支持动态管理的内容,可以通过授权用户提出请求创建一个尚未创建的内容,允许发布者根据需求生产内容。

NDN 项目组成员张丽霞等人在参考文献[4]中指出,NDN 协议需要重点研究如下几个方面。

- 路由机制的研究:如何限制路由表的增长规模;如何智能地支持多路径路由。
- 转发策略的优化:如何快速进行数据名字查找与匹配;如何设计更加智能的数据转发规则;如何实现高效的缓存策略和存储管理机制。
- 相关驱动程序的部署设计:开发实现并测试 NDN 体系结构;在关键领域进行 NDN 性能测试和功能优势论证;开发关键领域中基于 NDN 协议的应用原型等。
- 安全机制:高效签名算法的研究;可用信任管理机制的设计;网络的安全与防御。
- 数据隐私保护:缓存隐私保护;数据命名隐私保护;数据签名的隐私保护等。

总的来看,现阶段在 NDN 领域主要存在两种研究思

路:一种是通过理论分析和模拟仿真实验的方法,探讨协议的具体细节,致力于完善和改进 NDN 协议本身;另一种则主要关注 NDN 上的相关程序实现及部署,从实际应用出发,通过真实运行收集的数据发现、研究和解决问题。

TCP/IP 网络是一种通信网络(communication network),主要目的在于将物理上位于不同位置的主机连接起来满足计算资源共享和消息传递的需求,而 NDN 是一种分发网络(distribution network),目的在于高效地实现对内容的分发与获取。当今互联网的主要功能是满足高效率、大规模、安全的内容获取与分发,作为一种以内容分发为主要目标的网络架构,NDN 的内容分发能力和通信效率需要进行深入的探究。本文分别从 NDN 的转发策略、冗余控制、拥塞控制和访问控制 4 个方面,阐述与 NDN 内容分发有关的基本概念和研究进展,并对相关问题提出思考。

2 NDN 内容分发

NDN 通信基于两类传输分组,即 Interest(兴趣)分组和 Data(内容)分组,两者根据完整或相对的名字进行匹配。通信过程完全由数据消费者驱动,通过向网络中广播 Interest 分组,以数据命名为纽带,通过拉(pull)的方式请求 Data 分组。网络中收到这个 Interest 分组的中间节点,如果本地没有目标的 Data 分组,将根据转发策略选择性地转发到其邻居节点,直到找到拥有该数据的节点。在 Interest 遍历的路由路径上任何缓存的 Data 副本都可以用来满足该 Interest 请求。由于 NDN 中集成了数据传输和基于命名的路由,因此不存在额外的数据传输开销,带宽的利用率更加充分。值得注意的是,网络中交互的数据分组粒度比较高,大多传输单一的数据分组,一般较大的数据对象(如一个整体的视频文件)都将被细分为更小的数据块。

NDN 的路由机制保留了类似 IP 路由的 FIB(forwarding information base,转发路由表),增加了 PIT(pending interest table,待处理请求表)和 CS(content store,数据分组缓存)数据结构。图 1 描述了 NDN 节点的功能部件。FIB 用来找到合适的转发接口;CS 是基于 LRU 等算法的缓存,用于缓存转发的 Data 分组;PIT 保留所接收的 Interest 分组,当和 PIT 中某个 Interest 分组对应的 Data 分组发回时,将被传递到相应的接口。

NDN 使用和 IP 类似的基于存储在 FIB 和 PIT 中的信息最长前缀匹配的转发。数据消费者想要获取数据时,首先发出一个 Interest 分组(包含所需数据的 name),路由器

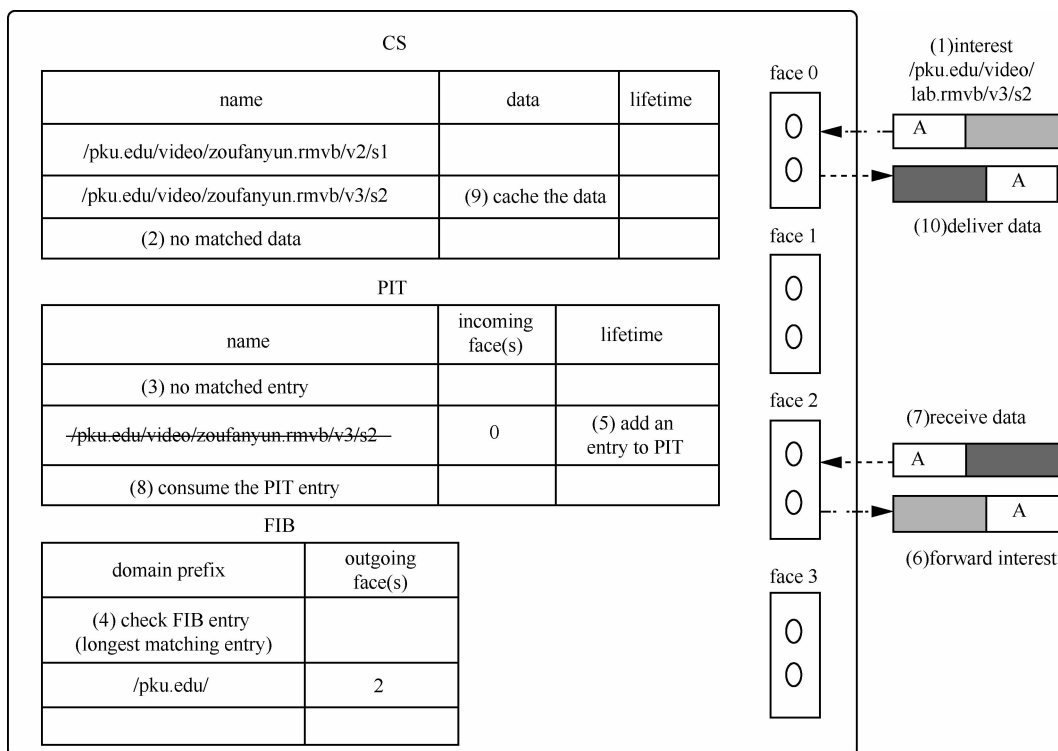


图 1 NDN 转发模型

接收到这个 Interest 分组后,首先在其本地 CS 中查找是否有与当前 name 匹配的内容,如果有则直接将匹配的 Data 分组返回给发起请求的节点;如果没有,路由器会在 PIT 中记录下当前 name 对应的 Interest 分组是从哪个接口进入,同时路由器在 FIB 中查找与当前 name 匹配的记录,以确定从哪些接口把这个 Interest 分组发出去。当某个节点拥有与 name 匹配的数据时,它就会返回 Data 分组以满足该请求。路由器接收到 Data 分组时,会根据这个分组的 name 在 PIT 中查询匹配的记录,将这个分组从所有匹配的接口发出。这样,所有之前请求过相同数据的节点都可以得到所需的数据,而 PIT 中匹配的记录都将被删除。

路由信息和用户请求过的内容都保存在中间路由器中,这种方式最大限度地挖掘了路由器的存储能力。NDN 的这种内置缓存功能可以较大地提高网络,尤其是动态网络的内容分发能力。首先,TCP/IP 网络下面向应用层的缓存方法往往需要缓存整个数据对象而不是数据片段,这种方法在网络拓扑动态变化和不可预测的条件下的工作效率极低。例如,一个大容量的图像或视频文件往往需要通过获取多个网络数据分组才能得到完整有效的内容,而在动态变化的通信环境下,在还没有取得全部所需文件的条件下,网络拓扑和通信环境很有可能已经都发生了变化,

从而导致已经获取的数据分组变成无效内容;在 NDN 下,由于每个数据分组是独立的,对于某一个应用数据的不同数据分组被不同的中间路由器进行随机缓存,从而加快了对请求内容的响应。其次,NDN 的缓存功能有利于提高无线通信等有噪声通信条件下的性能。如果链路发生故障或在传输过程中产生了分组丢失,重新请求的内容可以从中间节点的缓存中得到,而不需要转发到原始数据提供者,从而可减少时延和带宽消耗,提高内容分发的效率^[6]。

NDN 天然地支持数据消费者的移动,在 IP 网络下支持数据消费者的移动是一个很麻烦的问题。由于 TCP/IP 通信模型的主机对主机特性,当数据消费者发生移动时,必须先重新获得一个 IP 地址,然后重新建立连接和会话,最后才能进行新的通信;NDN 消费者驱动通信模型使得它可以很直接地支持数据消费者移动而不用做任何修改。一个数据消费者可以不需要分配 IP 地址也不需要建立连接,便可以发出 Interest 分组请求数据,由于请求的数据是通过 Interest 到达的路径原路返回,整个路径的生命周期很短,一旦请求的数据返回给请求方,整个通信路径自动消失。由于并没有固定一个特定的通信路径,即使数据消费者在移动也并不需要任何一个通信节点进行额外的操作,而只需要消费者自身重新开始一个新的通信过程



请求数据便可,这极大地增强了NDN对移动通信和自组织网络的内容分发能力。

NDN还能够支持数据生产者的移动。可以为每个移动的数据生产者分配一个命名空间,生产者在这个命名空间下发布数据而不用管它的具体位置,这个命名空间可以作为移动节点的静态标识(identifier);另一方面,名字(即接入网的名字前缀)也可以作为指定该移动节点所在位置的“定位器”(locator)。静态标识与定位器之间的映射可以通过广播或者类似于DNS服务器的中间节点实现。当多个消费者对同一个数据感兴趣时,只需要广播一个Interest分组便可以让所有感兴趣的节点收到描述移动节点位置的数据分组。在一个无线局域网内,只需要进行一次Interest-Data过程,整个网络内的任意节点都可以获得其感兴趣的内容。当广播的方法行不通时,可以采用类似于DNS的方法来存储移动节点的名字空间和它当前所在位置的映射关系,从而实现NDN对数据生产者移动性的支持。

NDN能有策略地获取数据,以满足不同应用在不同场景下对内容分发能力的不同要求。对数据获取的性能要求与具体的应用有关。例如,某些应用可能需要可靠的数据分发,某些应用可能希望在移动或断电时仍然可以获取数据,而有的用户可能希望使用最优的通信接口进行网络通信等。NDN灵活的转发策略决定了哪些路径、哪些接口将被用来传输数据,这很好地适应了不同应用对数据获取能力的不同。例如,为了探测多个接口,某种策略可能从多个接口中发出Interest分组,通过统计不同接口的往返时延来决定使用哪个接口进行通信;或者,为了更加合理充分地利用所有网络通信接口,从不同的接口发出不同的Interest分组,并根据探测到的时延和代价决定如何分配接口的使用情况。

NDN中的数据分组是独立的,与它从哪里来和它将被转发到哪里没有关系,不依赖类似TCP的连接控制,传输过程中也不需要状态信息(stateless)。一个Interest分组经过每一跳都有可能得到匹配的Data分组,不一定要到达数据源的终点,从而实现了hop-by-hop流平衡。NDN的路由策略非常灵活,可以同时自动支持不同场景的应用需求,包括内容分发(许多用户在不同的时间请求相同的数据)、多播(很多用户在同一时间请求相同的数据)、移动性(用户从不同的地点持续请求数据)、延迟容错网络(用户之间间歇性通信)等。NDN不仅从原理上避免网络冲突和拥塞,摆脱传输对端到端连接的依赖,彻底实现了多路径转发,同时基于网络内

缓存实现了就近获取、负载均衡和容断能力,从而大大提升了对大规模内容分发的可靠性、性能和效率。

3 NDN转发策略

在NDN的细腰沙漏模型中,转发策略层是NDN中提出的一个新概念。不像IP网络中数据分组的传输过程那样,仅查看事先建立好的路由表便直接进行转发,NDN的转发过程除了基于FIB外,还根据路由节点当前所在网络环境和当前节点可用通信接口等因素进行综合考虑。NDN这种基于路由表和数据面板观测结果作为双重输入的转发策略,从根本上改变了网络层,使得路由节点可以实时地决定使用哪一个最优的接口或哪一种最优的转发方式进行网络通信,而且能够抵抗路由前缀劫持和提供流量控制等。IP网络是“聪明的路由,笨拙地转发”,而NDN却是“聪明地转发”。

NDN的FIB中有排好序的接口,即可选下一跳地址在NDN的FIB中可能存在多个表项。对于每一个名字前缀,一个FIB表项包含该节点所有接口的有序列表。由于Interest分组中包含nonce值,使得Interest分组和Data分组都不会在网络中形成回路,因此NDN具有同时选择多个通信接口进行网络通信的性质。NDN的这种多路径转发性质和连接无关性使得NDN通信网络独立于不同的通信技术,使得通信节点可以使用任何可用的通信接口收发数据,即一个通信节点可以同时接入多个网络(如同时接入Wi-Fi网络和3G网络),实现无缝地转发数据分组,消除IP网络下由于不同通信技术导致的网络切换时延。因此,在NDN中既不需要进行不同网络间的垂直切换,又可以灵活地设计网络层的转发策略,实现针对不同应用和不同场景配置不同的转发策略。通过观察Interest分组/Data分组的双向流量,路由器还可以检测到链路失效、网络拥塞、前缀劫持等问题,然后利用NDN的多路径转发性质避免这些有问题的链路。

拥塞控制是NDN转发策略的另一个方面,只不过对于拥塞控制而言,转发策略控制的是一个节点转发Interest分组的速率而不是决定从哪个接口转发。由于NDN的接收方驱动、点对点和多路径转发等特点,NDN下的拥塞控制与TCP/IP网络存在较大不同,有研究表明,NDN具有对拥塞反应更加迅速、调整发送率更加准确、多路径利用更加充分等优势^[7],关于拥塞控制在NDN内容分发方面的内容将在后文详细介绍。

3.1 研究现状

基于名字的数据分组的转发代表着 NDN 架构的核心特征。基于名字的转发必须支持变长地查询无长度限制的关键词,且数据的命名空间实际上大于当前互联网使用的全局地址前缀规则集。为提高基于名字转发的性能,研究者提出了基于指纹的解决方案^[8]。该方法基于名字转发框架,提高了基数树的查询性能,而提出的基于散列表的设计被证明可以在使用较少内存且拥有较快查询速度的情况下支持大规模基于名字的转发。

参考文献[4]中提到了 2 种转发策略:依次选择一个接口进行转发,如果某个接口没有收到对应 Interest 分组的数据分组,则重新选择一个新的接口进行转发;一次选择所有的接口进行转发,最先接收到 Data 分组的接口作为下一次优先选择的目标。随机转发策略是指路由节点随机选择 Interest 分组对应前缀的 FIB 表项的某一个接口进行转发。参考文献[9]提出了一种 NDN 下基于蚁群优化算法的蚁群转发策略,主要工作原理是通过发送嗅探数据分组,从路由节点 FIB 表的多个接口中找出一个最优接口(fast-face)来转发 Interest 分组,从而使得从该接口获取数据时的性能最优。

张丽霞等在参考文献[7]中提出了一个根据转发接口状态进行动态自适应转发的转发策略,将接口按照“获取 Data 分组”的能力分为 3 类,即绿色、黄色和红色,使用接口排名(interface ranking)选择最优的接口进行数据转发。解释了 NDN 转发层的初始化设计,并且评估了它在各种情况下的数据转发性能,结果显示,该转发层可以成功避免前缀劫持、链路失效并可以使用多路径来减轻拥塞等。最后与基于 IP 网络的解决方案进行性能比较,体现了动态转发层的优势,具有启发意义。

华为北美研究院的 Ravindran R 等人在参考文献[10]中提出了一个基于概率的自适应转发策略。使用蚁群优化算法在动态 NDN 环境下计算转发接口的选择概率,并使用了一个统计模型来计算 NDN 重传机制的超时参数。基于概率的自适应转发策略同时针对不同的网络场景为网络管理员提供了一系列参数可以调节,模拟实验证明,基于概率的自适应转发策略实现了网络的负载均衡并且对动态的网络状况有很好的适应性。

参考文献[11]部署了真实的基于 NDN 的车联网通信系统。系统中的每个车辆节点都可以同时接入多个网络,采用一种贪心转发策略(greedy forwarding strategy),使

得距离数据消费者最远的节点转发 Interest 分组来尽量加快 Interest 分组的传播。实验结果表明,该系统能充分利用 NDN 天然的多路径转发和多网络接入(multi-homing)能力,使得车辆在通过 Ad Hoc Wi-Fi 模式与其他车辆进行通信时,还能通过 3G、4G、Wi-Fi 等有线的方法与远端服务器进行数据传输。

3.2 存在的问题

转发策略的设计,已处于基础策略设计完成的阶段,但针对万千的特定场景,依然有着广阔的设计空间,期待国内外研究人员共同完善。比如,对于 NDN 的多路径转发性质,必须通过实验和数据回答什么时候使用多路径以及怎样选择最优路径;对于移动终端而言,一般的转发策略可能在高动态的通信环境下难以实现快速实时的通信,可以考虑在移动端设计具有数据预取功能的转发策略等;对于手机等智能设备,NDN 带来的多网络接入性质使得设备能同时接入多个通信网络,但考虑到设备能耗、网络计费等因素,需要设计某种多网络接入策略,使得既能实现多网接入,又不会产生较大的能耗(电源)和通信费用等。对于很难根据路由协议建立 FIB 来完成数据转发的网络通信环境,如车联网等高度动态变化的移动通信网络,或没有用于分发名字前缀和拓扑信息的路由协议的局域网,其转发策略值得深入探讨。

4 NDN 冗余控制

NDN 在进行网络通信时不必事先建立连接,也不需要指定特定的接口进行数据传输,这使得 NDN 下的通信节点可以同时使用多个通信接口(如 3G 和 Wi-Fi)获取数据。此外,由于 NDN 提供的转发策略层能实现针对 Interest 分组的灵活转发(例如,有开发者基于 ndnSIM 模拟器实现了一种 Top Two 转发策略,同时选取可用的两个接口转发),这种网络多路径转发机制能有效地利用空闲路径,合理地将网络流量分布到更广泛的网络上,进行均衡网络负载,有助于解决网络拥塞等问题,改善数据分发,提高网络数据传输效率。但是,由于在 NDN 架构下,一个 Interest 分组最终只会返回一个 Data 分组,这种多路径转发机制使得部分 Data 分组被中途丢弃,从而导致了数据传输过程中的流量浪费。

如图 2 所示,假如文件分块存储,Repo1 和 Repo2 与中间路由节点的两个接口直接相连且都有文件分块。当用户请求 C1、C2 数据块时,用户发送第一个 Interest 分组请

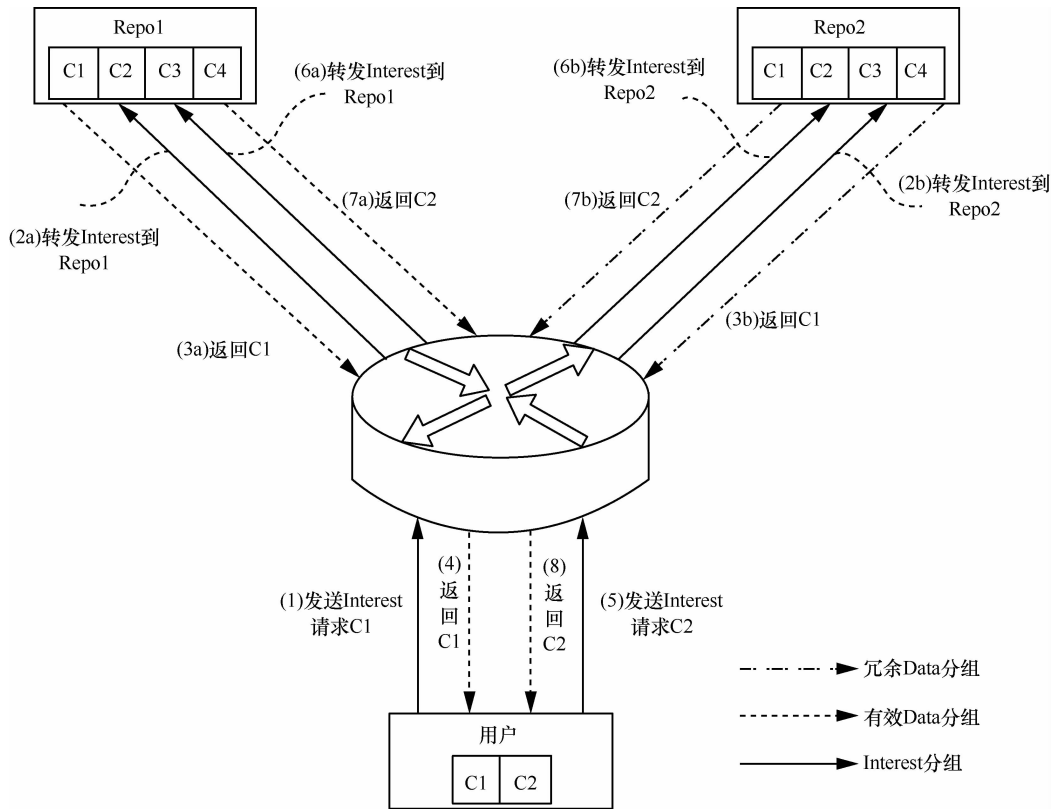


图2 NDN多路径转发请求数据流程

求 C1, 在使用基于 Top Two 的多路径转发时, 中间路由节点可能会同时向 Repo1、Repo2 转发 Interest 分组, Repo1 和 Repo2 最先返回的 Data 分组将会被返回给用户。用户发送第二个 Interest 分组请求 C2, 经历同样的过程。在一次完整的数据请求过程中, 从 Repo 到路由节点这一段被请求的数据块完整地传输两次, 但有效的数据传输只有一次, 如图 2 中 (3b) 和 (7b) 传输的流量均浪费。当路径数目较多或请求的路径较长时, 流量浪费将更为明显。

如何提升网络吞吐量、降低多路径路由带来的带宽浪费是 NDN 中需要解决的问题。网络编码是一种面向内容、可以逼近网络容量传输理论极限的有效方法。使用网络编码后, 通信的中间节点不再直接转发数据分组, 而是对收到的一些分组编码后再进行转发, 对目的节点进行解码得到原始数据。通过这样的方式, 可以增加网络传输的信息量, 提高网络吞吐率, 网络编码在以内容为中心的方式中已经得到良好应用。在应用网络编码方面, 通常采用最简单的随机线性网络编码。随机线性网络编码在 TCP 网络中通过启用多路径和多网络接入^[12,13]来改进有损耗的无线网络中的数据传输。在多路径中使用网络编码已经被成功用于包括商业方面的视频分发和手持设备的网络中。

4.1 研究现状

在 NDN 中引入网络编码的方法除了具有上述 IP 网络下的功能外, 还可降低 NDN 多路径转发机制带来的流量浪费和网络拥塞, 同时 CS 中缓存的编码后的数据还能有效提高缓存命中率。

2012 年, MIT 和华为的研究人员在参考文献[14]中首次提出, 将网络编码应用于 CCN 能提高 CCN 的传输效率。在 Interest 分组的 selector 字段插入一格 flag 标志位标识采用网络编码, 在 Data 分组的 signed info 字段携带编码系数。在 NDN 中采用网络编码后, 路由节点 R 收到的是两个线性组合的 Data 分组; 当第二次收到请求对应内容的 Interest 分组时, 路由节点将直接返回其中一个上次接收到的网络编码后的 Data 分组。在这种情况下, 总共消耗的带宽资源相比上文所述情形要少, 而且由于是在中间节点的缓存中直接获得数据, 整个通信过程的时延也有所降低。此外, 2013 年 SIGCOMM 一篇论文^[15]提出了“Coding Cache”的概念, 指出添加网络编码后 CS 缓存命中率可以提升到 60%, 通过在 Interest 和 Data 分组中添加两个新的域: network coding 域和 Coef 域, network coding 域用来判断是否采用网络编码, Interest 的 Coef 域存放已有分组的编码

系数,在每个中间路由节点均有编码操作。

4.2 存在的问题

NDN 中内置的中间节点“缓存”功能,很大程度上减少了网络中冗余内容的重复传输。多路径转发性质是 NDN 区别于 TCP/IP 网络的重要特征之一,但由此带来的流量浪费也是一个值得关注的问题。参考文献[14]只是提出了有关思想,并没有给出完整的融合网络编码的框架和设计思路。而参考文献[15]在 SIGCOMM 会上被指出其“中间路由节点添加网络编码”的思想违背 NDN 的安全思想,同时实验部分的模拟不够充分,只对缓存命中率进行简单对比,没能体现出网络编码在提高网络整体吞吐量方面的优势。此外,由于 NDN 采用的是“拉”的通信模式,很多情况下不得不使用广播的方式进行消息传递,这种大量广播的 Interest 分组也会导致网络中的内容冗余现象,如何在合理使用 Interest 分组进行通信的同时,有效地控制 NDN 中 Interest 分组的数量,也是一个值得研究的课题。

5 NDN 拥塞控制

流量均衡的数据转发对于稳定网络操作来说非常重要,因此网络流量必须能自我调节。NDN 的 Interest 分组可以实现和 TCP 一样的流量控制和顺序控制功能。一个 Interest 分组最多只能获取一个 Data 分组,这一基本原则确保了 NDN 中的流量平衡。和 TCP 一样,NDN 的 Interest 分组和 Data 分组也可以重叠。在 NDN 中,请求者可以一次发送多个 Interest 分组,而不必等待前一个 Interest 分组收到响应 Data 分组,因此 Interest 分组起到了 TCP 中滑动窗口的作用。而在 NDN 中,请求者可以通过改变 Interest 分组的发送速率来调节“窗口”大小。

和传统 TCP/IP 不同的是,如果一个 Interest 分组或者 Data 分组丢失,Interest 流并不会暂停,因为各个 Interest 分组之间是相对独立命名的。NDN 路由器可以通过控制其 PIT 的大小(等待的未被满足的 Interest 数量)来控制传入的数据分组的速率,进而控制流量负载。如果一个路由器发现来自某个特定邻居节点的传入流量超负荷,那么它可以简单地放慢甚至停止发送 Interest 分组到该邻居节点。这也意味着 NDN 协议中,路由器可以参与进行拥塞控制,从而消除对终端主机执行拥塞控制的依赖。NDN 内置的多路径转发功能和对称路由机制(即发送一个 Interest 分组,会从相同的路径收到一个 Data 分组),允许路由器通过维护每个接口的统计值来监控该路径的性能,并相应地

做出自己的选择,改变转发路径(转发接口)。

5.1 研究现状

参考文献[16]中首次提到了关于 NDN 传输协议的设计与研究。基于 TCP 拥塞窗口的原则,初步设计了一种 NDN 的传输协议。但与 TCP 的不同之处在于,NDN 传输协议使用 Data 分组作为增加或者减小拥塞窗口的指示,通过特定的算法控制由于接收到过多的 Data 分组而造成 NDN 路由器拥塞的情况。

参考文献[17]中,基于马尔可夫链对 NDN 协议的缓存策略进行了建模和评估,并首次提到逐跳的控制策略。虽然 NDN 协议的拥塞控制机制当时尚未被深入研究,但该论文的作者认为逐跳的控制策略能够增强 NDN 协议的性能。

近两年越来越多的研究学者开始注意到 NDN 拥塞的问题,并陆续提出了一些拥塞控制方案。参考文献[7]提出了一种最简单的控制算法。该算法首次利用 NDN 协议 Interest 分组驱动的通信方式,通过调整 Interest 分组的速率,使得响应 Data 分组的速率等于反向链路的容量与预先设定的系数(介于 0 和 1 之间)的乘积。

参考文献[18]在此基础上提出了一种更复杂的调整 Interest 分组发送速率的算法。首先描述了 NDN 中可能发生拥塞的情况,并对拥塞控制问题进行了讨论。接着,基于 NDN 中一个 Interest 分组只能获取一个 Data 分组的特点,设计了一种基于速率的拥塞控制机制。该算法通过计算瞬时队列长度和可用于发送 Data 分组的剩余链路带宽,从而动态地调整经过该节点的 Interest 分组的发送速率,进而动态调整 Data 分组的传输速率。同时,对其设计的拥塞控制机制进行了收敛性证明,并在 NS-2 模拟器中对算法进行了整体性能的评估实验。

参考文献[19]中提出,有必要在 NDN 协议中补充一种让每个流公平共享网络带宽的机制。为了确保会话和流媒体流量的低时延以及在弹性流之间达到令人满意的带宽共享效果,进行流量控制是非常必要的。讨论了由端系统和路由器共同参与实现的策略。该策略的具体工作原理是如果请求端发送的 Interest 分组超过了路由器维护的公平份额,超过公平份额的部分就会被丢弃。同时,路由器需要发送 NACK 分组通知源端拥塞情况。源端使用简单的 AIMD(additive increase multiplicative decrease,和式增加积式减少)方法调整 Interest 分组的发送速率,模拟实验证实了提出的流量控制机制的有效性。

Wang Y 等人在参考文献[20]中介绍了一种改进的逐



跳的 Interest Shaping 方法。Interest Shaping 利用 NDN 协议严格的接收端驱动的流量模式和对称的双向转发模式来控制数据的返回速率。文章指出,Interest 分组和 Data 分组都能够导致拥塞,任何一种 Interest Shaping 算法都必须将这两者之间相互依存的关系考虑在内。首先将网络利用率最大化问题视为数学上的一个最优化问题,目标是获得最佳的整形速率(shaping rate);然后,提出了一种 Interest Shaping 算法,实现了较高的链路利用率和零数据丢失。在注意到 NDN 中流量差异化的复杂情况后,设计了与流量无关的方案。借助 ndnSIM 模拟器,证明了逐跳的 Interest Shaper 能够与 AIMD 配合使用。最后的研究结果表明,提出的 Shaping 算法能够有效地控制拥塞,达到近乎最佳的吞吐量。

此外,还有一些 NDN 拥塞控制方案,同样只是简单地利用接收端驱动,并没有采用逐跳的 Interest 调整方案,不能为请求端提供正确、及时的网络状态信息(比如参考文献[21~24])。

5.2 存在的问题

目前 NDN 协议的拥塞控制方案存在以下两个问题。

一方面,大多是基于传统 TCP 拥塞控制机制的 AIMD 算法,再针对 NDN 协议接收端驱动的通信方式进行相应修改设计而成。然而,单独依靠接收端超时驱动的拥塞控制方案并不适用于 NDN 协议,主要原因在于 NDN 中数据所在的物理位置存在不可预测性^[25]。

另一方面,无法获得正确及时的网络状态信息。由于在 NDN 中,数据源可能存储在多个终端,也可能缓存在中间路由器节点,即使在一个流的传输过程中,数据源都可能频繁地发生变化,这给超时(time out)值的设定带来了极大的困难。由于无法根据 RTT 估计值来设置一个合理的超时值,因此传统的基于隐式反馈的协议无法在 NDN 中达到很好的效果。

6 NDN 访问控制

访问控制的功能主要包括:防止非法的主题进入受保护的网路资源;允许合法用户访问受保护的网路资源;防止合法的用户对受保护的网路资源进行非授权的访问。在以内容为中心的 NDN 中,虽然有签名可以保证内容的完整性、出处和可信赖性,但内容发布者希望对于敏感或有价值的内容进行细粒度的访问限制,内容消费者想要通过不公开获取内容信息的方式来维护自身的隐私,因此,

NDN 需要拥有一种访问控制机制对网络中的内容进行有效的访问管理。

由于 NDN 消费者更可能从网络节点的缓存中而不是从原始的内容发布者那里获得请求的内容,内容的隐私性不能直接依赖于实体(hosting cache)来实施访问控制策略。因此,NDN 应采用类似基于内容的方法来实现访问控制,首选的办法就是对内容进行加密。加密是端到端的,由应用程序或库来控制,而且极大程度上是对网络层透明的。

NDN 中的访问控制情况多种多样,具体使用哪种方法要视具体情况而定。每个应用要面对不同的应用场景、不同权限的内容,因而,应用程序应视自己的情况来设计和使用特定的访问控制机制。

6.1 研究现状

在 NDN 项目第一篇技术报告“Named Data Networking (NDN) Project 2010”中,提出了有关 NDN 访问控制机制的一些设计要点:只要选择合适的命名机制和密钥的数据表示方式,通过加密方式来保护内容的大多数方法都可以被 NDN 采用。

张丽霞等人在参考文献[26]中指出了如何初步设计访问控制机制,并在 CCNx 的 Java API 说明书中进行了实现。提供了一种通用的框架让访问控制机制可以即插即用,这种机制能够自动分发加密内容的密钥;设计了一种通用的访问控制模型,提供了一些通用的机制将一种访问控制机制与某个命名空间更容易地联系起来,当内容被读取时,使用这种访问控制机制自动提供加密和解密内容的密钥;在上述通用访问控制模型的基础上,还描述了 CCNx 中实现的一种基于群组(group-based)的访问控制模型。这个模型支持其控制下的用户是单个用户或一个群组,并可以将权限赋予某个群组或直接赋给某个用户。

Hamdane B 等人在参考文献[27]中通过内容修改攻击和写回攻击的例子指出了 CCNx 访问控制说明书的缺点,提出将 PKI(public key infrastructure)和 HIBC(hierarchical identify-based cryptography)加入说明书提出的方法中,并用非对称密钥代替对称的节点密钥。提出了一种新的访问控制机制,基本方法类似于 PRAC 的访问控制说明书,都包含群组、读写权限和 ACL,不同点在于密钥回收和管理方面做出了一些改进;还提出在密钥管理中使用关键字(keyword)控制用户获得密钥和取消密钥的使用,这对于密钥管理有一定作用。

参考文献[28]提出了一种基于加密和密码锁机制的访

访问控制模型,并采用了ACL管理访问权限。但并没有将其应用到具体的应用场景中,也没有NDN下的应用真正实现这种访问控制模型,同时也没有在用户注册、密钥交换和系统性能方面做任何的工作。

6.2 存在的问题

既然NDN以内容为中心,就必须要有机制对内容进行保护,主要的作用就是控制合法用户能够访问某内容,而非法用户无法访问该内容。具体问题包括以下几个方面:

- 什么样的内容需要进行访问控制,比如网络中个人或公司的隐私信息需要得到控制,使得没有权限的用户无法获得或者无法访问;
- 如何界定内容的访问控制级别,比如有些内容可以缓存在网络中,但没有权限的用户无法访问,而有些内容甚至不能缓存在网络中;
- 用户的权限如何确定,用户通过什么样的信息向信息发布者申请对某些内容的访问权限;
- 如何控制、通过什么方式控制对内容的访问,比如通过对内容本身进行加密,可以解密的用户能够访问内容,不能对内容解密的用户即使获得了内容的数据分组,也无法对内容进行查看;或者通过路由对内容传输路径的控制或者不响应特定用户请求的方式,以及通过什么样的机制组织大量需要进行访问控制的内容等。

这一系列问题都是NDN中的访问控制需要详细讨论的问题。

NDN中的内容是以树型的命名空间来组织的,因此,NDN中的访问控制机制也应该在命名空间的概念下设计。但这种对内容的树型组织方式对于访问控制机制有什么样的影响,会使得设计出的访问控制策略具有哪些特性,都需要进一步探究。PARC提出基于加密(encryption-based)的方式控制对内容的访问,这其中就有许多需要研究的问题,如内容进行加密的密钥具有什么样的特性、通过什么方式产生以及效率如何、通过什么方式分发给有权限的用户并保证其安全性、大量的密钥如何进行管理、NDN中如何设计一套有效的密钥管理基础框架(key management infrastructure)等。

7 结束语

互联网用户数量的急速膨胀以及用户需求结构的变化,导致现有网络体系已经表现出各种弊端。用户使用

网络的目的不再只是寻找某些特定的计算机,而是通过网络获取感兴趣的内容,网络应用已经从以地址为中心发展成以内容为中心的体系架构。NDN作为一种以高效内容分发为主要目标的以内容为中心的未来互联网体系架构,其内容分发机制与效率关系到该体系架构的推广和实施。本文从与NDN内容分发有关的转发策略、冗余控制、拥塞控制和访问控制4个方面出发,阐述了相关内容与研究进展,并针对有关问题提出了新的思考。关于NDN的研究还处于初期阶段,在内容分发、路由转发、实际部署以及安全隐私等方面均有待进一步研究。

参考文献

- 1 Koponen T, Chawala M, Byung-Gon C, *et al.* A data-oriented (and beyond) network architecture. Proceedings of ACM SIGCOMM 2007 Conference on Computer Communications, Kyoto, Japan, 2007:181~192
- 2 Ahlgren B, D'Ambrosio M, Dannewitz C, *et al.* Design considerations for a network of information. Proceedings of ACM CoNEXT Conference (4th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies), Madrid, Spain, 2008
- 3 Jokela P, Zahemszky A, Rothenberg C E, *et al.* LIPSIN: line speed publish/subscribe inter-networking. Proceedings of the ACM SIGCOMM 2009 Conference on Data Communication, Barcelona, Spain, 2009:195~206
- 4 Zhang L X, Estrin D, Burke J, *et al.* Named Data Networking (NDN) Project. Tech Rep, 2010
- 5 Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, *et al.* Networking named content. Proceedings of 2009 ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT'09), Rome, Italy, 2009: 1~12
- 6 Zhu Z K, Afanasyev A, Zhang L X. A New Perspective on Mobility Support. Named-Data Networking Project, Tech Rep, 2013
- 7 Yi C, Afanasyev A, Moiseenko I, *et al.* A case for stateful forwarding plane. Computer Communications: Information-Centric Networking Special Issue, 2013(1)
- 8 Yuan H, Crowley P. Scalable pending interest table design: from principles to practice. Proceedings of IEEE INFOCOM 2014 (IEEE Conference on Computer Communications), Toronto, Canada, 2014: 2049~2057
- 9 Shanbhag S, Schwan N, Rimac I, *et al.* SoCCeR: services over content-centric routing. Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Toronto, Canada, 2011:62~67



- 10 Qian H Y, Ravindran R, Wang G Q, *et al.* Probability-based adaptive forwarding strategy in named data networking. Proceedings of Integrated Network Management, Belgium, 2013
- 11 Grassi G, Pesavento D, Pau G, *et al.* VANET via named data networking. Proceedings of IEEE INFOCOM Workshop on Name Oriented Mobility (NOM), Toronto, Canada, 2014
- 12 Kulkarni A, Heindlmaier M, Traskov D, *et al.* Network Coding with Association Policies in Heterogeneous Networks. NC-Pro 2001, May 2011
- 13 Sundararajan J K, Shah D, Médard M, *et al.* Network coding meets TCP: theory and implementation. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(3)
- 14 Marie-Jose M, Westphal C, Trossen D. Network coding meets information-centric networking: an architectural case for information dispersion through native network coding. Proceedings of the 1st ACM Workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications, 2012: 31~36
- 15 Wu Q H, Li Z Y, Xie G G. CodingCache: multipath-aware CCN cache with network coding NDN. Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Hong Kong, China, 2013:41~42
- 16 Arianfar S, Ott J, Eggert L, *et al.* A transport protocol for content-centric networks. Proceedings of 18th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'10), Kyoto, Japan, 2010
- 17 Psaras I, Clegg R G, Landa R, *et al.* Modelling and evaluation of CCN-caching trees. Proceedings of NETWORKING 2011, Springer, Valencia, Spain, 2011
- 18 Rozhnova N, Fdida S. An effective hop-by-hop interest shaping mechanism for CCN communications. Proceedings of 2012 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Orlando, Florida, USA, 2012: 322~327
- 19 Oueslati S, Roberts J, Shihi N. Flow-aware traffic control for a content-centric network. Proceedings of INFOCOM 2012, Orlando, Florida, USA, 2012: 2417~2425
- 20 Wang Y G, Rozhnova N, Narayanan A, *et al.* An improved hop-by-hop interest shaper for congestion control in named data networking. Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Hong Kong, China, 2013: 55~60
- 21 Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L. Joint hop-by-hop and receiver-driven interest control protocol for content-centric networks. Proceedings of the Second Edition of the ICN Workshop on Information-Centric Networking, Hong Kong, China, 2012: 37~42
- 22 Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L. ICP: design and evaluation of an interest control protocol for content-centric networking. Proceedings of 2012 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Orlando, Florida, USA, 2012: 304~309
- 23 Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L, *et al.* Multipath congestion control in content-centric networks. IEEE NOMEN, 2013(13)
- 24 Saino L, Cocora C, Pavlou G. Cctep: a scalable receiver-driven congestion control protocol for content centric networking. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, Hungary, 2013: 3775~3780
- 25 Braun S, Monti M, Sifalakis M, *et al.* An empirical study of receiver-based AIMD flow-control strategies for CCN. Proceedings of 22nd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Nassau, Bahamas, 2013:1~8
- 26 Smetters D, Golle P, Thornton J. CCNx Access Control Specifications. Technical Report, PARC, 2010
- 27 Hamdane B, Serhrouchni A, Fatmi S G E. Access control enforcement in named data networking. Proceedings of 8th International Conference on Information Science and Technology (ICIST), Tangier, Morocco, 2013: 576~581
- 28 Hamdane B, Msahli M, Serhrouchni A, *et al.* Data-based access control in named data networking. Proceedings of 9th International Conference on Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing (Collaboratecom), Austin, Texas, USA, 2013: 531~536

[作者简介]



雷凯,男,北京大学副研究员、硕士生导师,北京大学互联网信息工程研发中心常务副主任、信息工程学院院长助理, YOCSEF 深圳学术委员, 主要研究方向为计算机网络、命名数据网络、搜索引擎、大数据处理技术等。



袁杰,男,北京大学硕士生,主要研究方向为命名数据网络、车联网等。

(收稿日期:2014-07-25)