

第 5 章 内容中心网络

5.1 CCN 原理介绍

5.1.1 CCN 体系结构

CCN 体系结构的外形和当今 TCP/IP 网络很相似,都是沙漏模型,如图 5-1 所示,最大的不同是在“瘦腰”处用内容块(Content Chunk)代替了 IP。从网络的角度看,就是用对数据命名代替了对物理实体的命名。另外,网络中内建了存储功能,用来缓存经过的数据,用以缩短其他用户访问同样数据的响应时间,同时可大大减少网络中的流量。

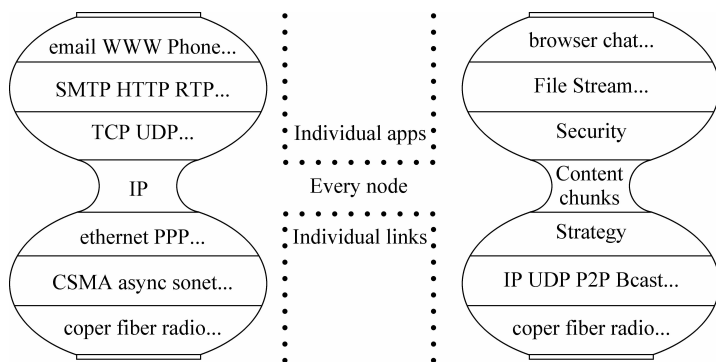


图 5-1 CCN 和 IP

5.1.2 CCN 设计目标和原则

上面介绍了 CCN 的体系结构,但是为什么要这样设计呢?这与 CCN 的设计目标和设计原则有关(当然也与技术现状有关)。设计目标和原则对一个系统的最终表现有巨大的影响。David D. Clark 等人在文献[1]中分析了端到端等原则在互联网设计中的重要作用,后来,又分析了设计目标对当今互联网形成产生的重要影响^[2]。

CCN 的主要设计目标是更好的支持当今的主要应用:内容存取。只这一个目标就决定了 CCN 的体系结构不会是一个会话模型,而应该是一个以信息为中心的模型(兼顾资源共享式的通信)。另外,美国研究机构 PARC 的 Van Jacobson 和美国加州大学洛杉矶分校(UCLA)的 Lixia Zhang 教授等提出了设计 CCN 的 6 个原则^[10],借鉴了很多在当今互联网上被证明是很成功的设计原则。这六个设计原则分别是:

(1) 保留沙漏模型。这种“瘦腰”特性保证了互联网的迅猛增长,因为它允许下层和上层不断革新变化。

(2) 考虑安全性。当今互联网的设计是没有考虑安全的,所有的安全都是事后增加的,这种修补式的安全,对互联网造成很大的负面影响。而 CCN 要把安全放在体系结构的设

计中。

(3) 保留端到端原则。端到端原则考虑系统性能和代价的均衡,一般分层系统设计都应该考虑,CCN 系统也继承了这一原则。

(4) 流量自调节。流量均衡对一个稳定的网络运行是必不可少的,应该是网络功能的一部分。但当今互联网的体系结构在起初设计时并没有考虑流量自调节,其流量调节要依靠端的传输协议,

(5) 保留了路由和转发平面的分离。该原则保证了最好的转发技术和路由技术并行发展。

(6) 保证体系结构的中立,使得用户选择和竞争尽可能简单^[13]。

5.1.3 CCN 工作机制

CCN 通信由内容消费者驱动,数据可以进行块级传输。CCN 有两个包类型: Interest 和 Data,如图 5-2 所示。Interest 包包含了内容消费者所请求内容的名字,Data 包包含了消费者所要的内容。为了请求所需内容,消费者广播 Interest 包,有三个关键数据结构完成转发,如图 5-3 所示,分别是: FIB、内容缓存(Content Store)、PIT。FIB 类似 IP 的 FIB,由路由协议生成,是转发 Interest 包的依据,但允许有一组出口,而限于是一个。内容缓存尽可能长时间地缓存已经转发的数据包,以供其他消费者使用,根据缓存策略决定缓存哪些内容。PIT 记录的条目是: 已经转发但尚未被响应的 Interest 包及其到达接口,目的是为了响应数据包能准确到达其请求者,当响应数据包利用某 PIT 条目转发后,或者某 PIT 条目超出时间阈值,该条目被擦除。

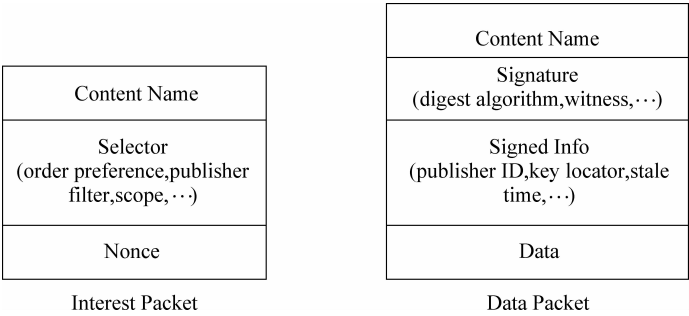


图 5-2 CCN 包类型

当一个 Interest 包到达,路由器根据 Interest 中的 Content Name,首先查找内容缓存,如果缓存中有被请求的内容,则响应该请求,并丢弃该 Interest 包;如果内容缓存中没有被请求的内容,则查找 PIT,如果 PIT 中有 Content Name 条目,则在该 Content Name 条目中增加 Face,并丢弃该 Interest 包;如果 PIT 中没有该 Content Name 条目,则查找 FIB,如果在 FIB 中找到,则按照查找到的所有 Face 口转发 Interest,并在 PIT 中记录。如果 FIB 中也没有该 Content Name 条目,则丢弃该 Interest 包。

路由器对 Data 包的处理相对简单,当数据包到达时,根据数据包的 Content Name 字段,首先在内容缓存中查找,如果有,则丢弃该 Data 包;如果没找到,则在 PIT 中查找,如果有,则根据查找的 Face 口转发出去,然后缓存在内容缓存中;如果在 PIT 中也没有匹配,则

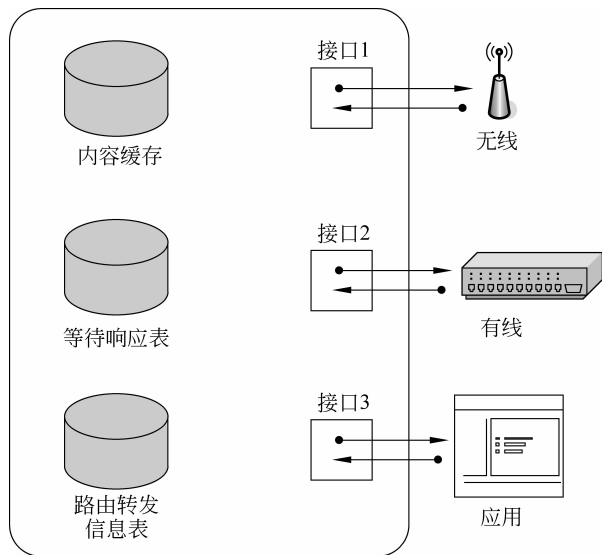


图 5-3 转发引擎模型

丢弃该 Data 包。

CCN 网络中,用户请求的内容和位置无关,因为 Interest 包中没有位置信息,中间节点和内容提供者都可以响应内容请求。

CCN 网络天然支持多播,因为在一个路由器内,如果有一个 Interest 包请求某内容,则其他经过该路由器,且对同一内容感兴趣的消费者可以共享该请求。当相应的内容响应时,可以同时响应所有请求。

CCN 的数据包强制实行签名机制,保证了内容的安全,根据签名,可以验证内容的可信性、完整性和不可否认性。

CCN 网络中,内容名字是复杂的,CCN 中采用分级的命名结构,而且内容的名字可以动态生成,用来实现类似于现在的动态 Web 的应用。

5.1.4 CCN 比较优势

1. 安全

安全是 CCN 体系结构的一部分,其中数据签名为未来互联网提供了必不可少的安全性,比如完整性检验和数据出处验证,当一个请求者接收到一个所需要的内容,他可以验证签名,从而知道他是否收到的是真实发布者提供的内容的复制。另外,CCN 网络不存在数据通道的安全,因为数据没有固定的通道,可以从任意缓存处取得,这样对许多 DOS 攻击有天然的防御能力,最后 CCN 有专门的安全层,可以对数据加密或设计其他安全措施。

2. 性能

CCN 天生支持内容分发和多播功能,相对于今天的 IP 网络,具有明显的优势。另外,CCN 在动态内容、点对点通信上也具有和 IP 网络相当的性能,并具有比 IP 更高的灵活性、安全性和健壮性^[11,12]。

3. 绿色

绿色和环保是当前学术界和工业界研究的热点,在性能提高的同时,更要权衡能量的有

效性。尤其是当今互联网消耗着人类巨大的能量,能量有效性对服务提供商或者对整个个人类都是有益的。阿尔卡特-朗讯的贝尔实验室的 Uichin Lee 等人分析了不同的内容散布策略,包括 CDN、P2P 和 CCN,证实了 CCN 的能量使用比 P2P 和 CDN 更有效^[24]。

4. 简化应用的部署

当今互联网上的很多应用都需要很复杂的中间件,进行 IP 地址和应用所关心的内容之间的映射,而 CCN 可以大大简化应用的部署和开发。

5. 流量调节

作为一个网络,本应具备流量均衡调节的功能,当今互联网在设计之初并没有考虑网络中的流量拥塞和控制问题,导致互联网几近崩溃。而 CCN 具有自然的流量调节能力,在数据转发时,可以根据链路状况,选择转发策略,从而均衡整个网络流量。

5.1.5 CCN 可行性分析

CCN 的体系结构已基本成型,其原型系统也已基本实现,其优势已有很多人进行研究和论证,但当前技术和现实是否已具备了部署 CCN 的各方面条件呢?比如,CCN 的部署需要软硬件支持高速的基于名字的数据转发和包级别的缓存能力,今天的路由器技术是否具备支持向 CCN 演化的能力呢?阿尔卡特-朗讯贝尔实验室的 Diego Perino 等人系统评估了今天的软硬件技术对 CCN 的支持程度,分析了 CCN 路由器各成分对软硬件的要求,指出今天的技术只支持 CCN 在 CDN 和 ISP 规模的网络上部署,还不能支持在整个互联网规模上部署^[22]。

5.1.6 CCN 面临的竞争和挑战

CCN 由于自身可能存在的缺点,以及其他未来网络或改良方案的竞争,也面临着很大的挑战。例如:CCN 是消费者驱动的,没有基于推的动作,即信息没有推到终端的功能。既然以信息为中心,那么从信息流动的角度讲,或者从终端用户对信息的使用讲,有时是为了获取信息变化自己,有时是为了主动发送信息驱动某对象。网络中很多控制信息都是基于推的(但设计成消费者驱动也可能是出于安全的考虑,因为信息的消费者,可以理解为资源的消费者,那么资源提供什么服务或者提供什么控制,都可由消费者发送 Interest 获取,但 Interest 不带数据内容,所以控制者的信息又是资源主动请求的,这样可以提高安全性);另外 CCN 采用分级的命名方案,这种方案在安全上不如扁平的命名方案^[3];最后,CCN 也有一些没有考虑到的问题,比如体系结构的可演化问题等。下面是一些主要的竞争技术。

1. 开放式可演化网络模式

CCN 以内容为中心,对内容分发等有明显优势,但目前是否可以判断这种应用模式是肯定代表未来,或者内容的标识可以承载并灵活区分处理其他实体对象?否则是否应该开放式好些呢?当前可演化的网络体系结构主要有 openflow^[21]和 XIA^[5]。

2. 改良方案

CCN 的目标是解决当前互联网上存在的问题,而不是以正确的科学理论为指导而设计。因此对问题的解决还可以有其他不同的方案,现在出现的每一种问题,都有基于 IP 的改良方案正在研究,这些方案的性能也在不断改善。比如基于 IP 的 CDN,互联网安全的源地址验证、IPSec,各种移动方案等。

5.2 CCN 研究热点

1. 路由器：路由、转发

为了显示 CCN 能够实现全球规模的部署,首先要解决的问题是可扩展的路由和线速的转发引擎。域内路由协议为节点发现和描述它们的本地连通性提供一种方式,因为 IP 和 CCN 的转发非常相似,所以用来创建 IP FIB 的分布式路由机制也可以用来创建 CCN FIB。但是 CCN 前缀是不同于 IP 前缀的,幸好 IS-IS 和 OSPF 协议都具有非常普遍的 TLV(类型标签值)方案,这是非常适合于分发 CCN 内容前缀的。然而路由设计要解决的问题主要还有两个:①如何用有限的状态路由无限的命名空间;②多路径转发策略。NDN 工程组建议最初的部署,可以使用扩展的 OSPF 和 BGP,用来支持名字前缀和多路径转发。至于转发平面,主要问题是:①可变长的分级名字的最长前缀匹配;②当路由协议重新计算或 Interest/Data 包到达后,FIB、PIT 和内容存储的快速更新。

2. 路由器：缓存策略和存储管理

S. Arianfar 等人第一个研究了内容路由器的设计问题^[23],他们分析了怎样扩展今天的路由器,以支持包级别的 Cache 问题。在 CCN 中,Cache 的使用是区别于 IP 网络的一个重要的特征,Cache 命中意味着减少了带宽的使用,同时也减少了数据源服务的负载,使用合适的 Cache 策略,CCN 在传输静态内容时要远远优于 IP,并且在处理动态内容时,不比 IP 差。在这方面,主要有四个问题有待研究:①Cache 替换策略,比如最近最少使用(LRU)替换策略或最少使用频率替换策略。②如何处理过期数据,比如发布者对每一份数据表明一个 TTL。③Cache 污染攻击,路由器需要验证数据签名,如何设计最快的验证方案。④应对 Cache 的 DDoS 攻击。

另外一个 Cache 的使用方案是把 Cache 作为一种服务,提供给内容服务提供商,像带宽一样对外租用,其使用策略由租用者自己决定。路由器只简单的根据某协议字段判断是否存储,而该协议字段的初值由内容提供商决定,因为既然他购买了部分存储,他即有权决定如何存储内容。

3. CCN 的策略传输

CCN 分组是在不可靠分组传递服务的顶部传输的,比如移动和普适计算的高动态连通性,这样的不可靠传输基础使得 Interest 和 Data 可能丢失或损坏,也可能使得被请求数据暂时无法得到。因此,为了提供可靠的、适应性强的传递服务,那些不被满足的 CCN Interest 就需要重新被转发。和 TCP 不同,CCN 发送者是无状态的,其接受者(即发起 Interest 的应用)负责维护未被满足的 Interest 一段时间,也负责重新发送 Interest,接受者的策略层来负责重新转发。策略层也负责选择那些通信接口来发送 Interest,也负责多少个未被满足的 Interest 可以被允许,以及不同 Interest 的优先级。策略层主要解决的问题是有效性、可靠性和流量控制等问题。

G. Rossini 和 D. Rossi 等^[12]对缓存性能进行了深入分析,以真实的网络拓扑欧洲教育科研网络 GEANT 和 4×4 的规则 Torus 网络为对象,用 YouTube 的所有视频编目,大概有 1 亿多个视频文件,文件大小为几何分布的平均大小 10MB,总共 1PB 数据,将 CCN 路由器的缓存设为 10GB,每个缓存依然只能存放所有的文件的十万分之一。通过开发的

ccnsim 仿真器仿真分析,对比不同缓存策略的影响。仿真过程考察了策略层机制影响,设计了 2 种简单策略层机制:①最短路径至最近内容源(Repo)。②分别沿最短路径到最近多个内容源(Repo)。并假设不考虑本地接入网,因此没有广播接口,路由器之间均为点到点链路。仿真结果表明沿着并行的路径同时多源并取同一份内容将改善用户的体验,但可能会增加路由器的负载,并对其路由器的缓存造成污染,从而影响这些路由器服务的其他的 CCN 用户的体验。

4. 基于 CCN 的应用研究

要推进 CCN 的部署,必须要有基于 CCN 的重要的、优于当今互联网的应用存在,所以开发 CCN 的上层应用,并验证 CCN 对当前应用和新一代应用的可行性和有效性是 CCN 领域的一个研究热点。CCN 应用研究的目标主要有:①促进 CCN 体系结构的部署。②促进和测试 CCN 网络的原型实现。③在关键领域证明 CCN 的优势。④证明在 CCN 上开发应用的简单性、安全性以及开发和部署应用的低代价。支持大众的应用,得到大多数人的支持,这是 CCN 是否能成功的关键,目前在这方面的研究机构主要有 PARC、UCLA 和清华大学。

5. 安全和隐私

虽然 CCN 体系结构本身就带有安全考虑,而且每个数据包都捆绑一个签名,提供数据的完整性和数据源认证,但这并不能解决所有的安全问题。并且这样的设计也带来了两个挑战:①代价有效性,如何设计一个计算和带宽都有效的签名方案?②可用的信任管理基础设施。另外,内容中心网络也带来了内容消费者获取内容的隐私问题;最后,也有一些新的安全威胁和解决方案需要研究。

6. 测量评价技术

主要研究定性和定量的测量技术,用来评估 CCN 支持已有应用或新应用的能力、性能、扩展性和健壮性。这方面的研究机构主要是欧洲的 CONNECT 项目组^[19]。最近,贝尔实验室的 Giovanna Carofiglio 开发了一个分析模型,用来评估在有限资源下,带宽和缓存分配的权衡对网络的性能(平均内容传送时间)影响,用以指导协议的优化设计^[25]。

7. 理论研究

香农的信息论,讲信息的价值,可以增加确定性,适合于传输通信。但信息应该还有使用价值,比如经典文学、经典电影等,当一个经典电影看到第 8 遍的时候,可能更多的是使用价值在起作用,信息的使用价值属于带记忆的信息论,适合于存储传输。假设使用价值可以定义为信息的热度,则 CCN 的缓存机制就是要存储使用价值高的信息。

5.3 CCNx 协议实现

CCNx^[4]是 CCN 架构的一个开源实现。可以从 <http://www.ccnx.org/> 网站免费下载。CCNx 协议提供独立于位置的命名数据包传输服务,这个服务包括:多跳转发、流控制、使用缓存透明自动的多播传递、无循环的多路径转发、内容完整性验证、携带任意应用数据。

应用运行 CCNx 协议传输分组。CCNx 对底层服务没有要求,可以是一个物理传输、另一个网络或传输协议。

CCNx 支持广泛的网络应用,天然考虑了存储内容的应用,比如视频和文件的分发,而且 CCNx 模型也支持实时通信和发现协议,通常足以携带会话在 tcp 连接的主机间。下面

给出 CCNx 中的几个术语定义：

node：完成转发和缓存的 CCNx 网络实体。

party：使用 CCNx 协议通信的任何网络实体，包括应用。

message：指的是 CCNx 分组。使用 message 而非 packet 是为了避免和底层分组混淆。比如一个 udp 分组也许包含多个 CCNx message。

CCNx 协议使用“名字”完成内容传输，而与相关机器的位置无关。CCNx 的内容名字是分级结构的，包含许多成分，这种分级结构很像 IP，但 CCNx 的名字及其名字成分具有随意的长度。可以方便的使用 URL 作为一个 CCNx 名字。

CCNx 协议中用到的 message 类型，即 Interest 包和 Data 包分别定义如下。

1. Interest

```
Interest ::= Name
           MinSuffixComponents?
           MaxSuffixComponents?
           PublisherPublicKeyDigest?
           Exclude?
           ChildSelector?
           AnswerOriginKind?
           Scope?
           InterestLifetime?
           Nonce?
```

2. ContentObject

```
ContentObject ::= Signature
                Name
                SignedInfo
                Content
```

Interest 用来请求数据，它可以提供名字前缀和其他限制条件，用来限制被接受的数据。ContentObject 用来供给数据。一个 ContentObject 不仅仅包含一个数据负载，而且还带有名字信息和数据发布者的签名信息。CCNx 协议要求签名是必须的，这样所有的数据都是可验证的。CCNx 的任何 party 都可以对接受到的 ContentObject 消息验证这个签名，验证可能需要公钥，公钥分发不是 CCNx 协议的一部分。验证失败的 Content Object message 必须被丢弃。

对 Interest 和 Content Object 的处理可以参考 1.3 节。

5.4 CCN 使用举例

5.4.1 实时通话应用

为了验证 CCN 网络不只是能较好的支持内容分发应用，也能支持实时会话等当前 IP 上使用的其他应用，Van Jacobson 在文献[11]中实现了一个基于 CCN 的实时会话应用——VoCCN。发现它和 VoIP 在性能和功能上是相当的，但更简单、更安全、更可扩展。

但其原型系统的环境是在局域网环境的概念证明系统(Proof of Concept),实际应用还需进一步验证。

5.4.2 音频会议工具

为了推进 CCN 网络的全球部署, Van Jacobson 等人正在努力开发基于 CCN 网络的应用,在继 VoCCN 之后又开发了基于 CCN 的音频会议工具(ACT)^[12], ACT 采用基于命名数据的方法发现正在进行的会议和每个会议演讲者,并且从各自演讲者处取得声音数据。该设计是完全分布式的,取代了当今的集中式音频会议,具有更强的健壮性和可扩展性。

5.4.3 应用的安全设计

为了进一步理解 CCN 中通过数据安全而实现应用安全的设计思想,作者又在文献[20]中为 ACT 设计了一个安全机制。该机制用一个基本的密码方案有效地实现了会议的控制信息和声音数据的安全。该设计主要是为 CCN 的应用开发者提供一个设计案例,显示怎样只需用一个简单的方法,就可实现 CCN 上应用的安全部署。

5.4.4 全媒体交互(Omedia-CCN)

清华大学网络安全实验室一直从事覆盖网络的研究,开发了非结构化的 P2P 覆盖网 CORS 系统(Cooperatively Overlay Routing Service)^[27],能支持大规模网络节点,并在 Planet-lab 上进行了交互多媒体通信加速试验。同时开发了基于 CORS 系统的 P2P 流媒体系统 CORS TV^[28],对比研究了普通 P2P 流媒体系统和基于网络编码的 P2P 流媒体系统,研究基于网络编码的 P2P 流媒体数据传输过程,调度算法以及通过降低系统的数据包冗余率,以改善播放质量和播放时延等性能。

目前清华大学网络安全实验室正在积极开展内容中心网络的研究,已经搭建了 CCN 实验环境,并迁移正在开发的面向社交媒体、交互媒体和流媒体的三媒一体 Omedia 全媒体通信系统^[29]到基于 CCN 网络的环境,实验环境如图 5-4 所示。实验环境中用三台运行 ccnd 服务的 Linux 系统作为 CCN 的网络节点,提供路由、转发和内容缓存功能。下一步将利用若干终端设备发布和订阅全媒体资源,以验证 CCN 的各方面性能。

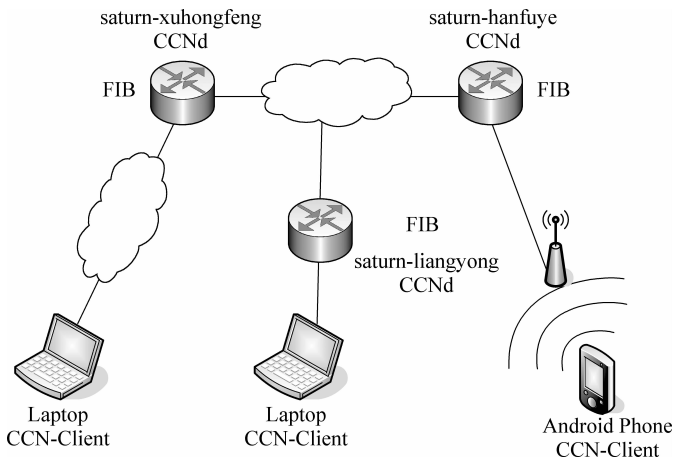


图 5-4 基于 CCN 传输的全媒体交互实验环境

5.5 结 论

事实上很显然,当前互联网的设计是以支持端到端通信为主,这种网络模式对当今的许多网络应用是一个限制因素,因此最近出现了很多关于未来网络的研究,本文主要对信息中心网络领域的 CCN 进行了综述,因为 CCN 既是当前的研究热点,也有开源的原型系统实现。本文描述了 CCN 的最重要的方面:包括 CCN 的工作机制、CCN 的性能和可行性分析、CCN 的研究热点及其挑战,最后通过我们开发的 Omedia-CCN 系统对其进行了实验验证。

CCN 的核心部分在本质上仍然是一个通信网络,仅仅是完成信息传播的任务,而不管信息的处理和存储,其路由缓存的设计只是为了更好地信息传播,而不是为了存储。至于信息的处理和存储则是计算机网络的任务,而信息最终施加影响的是社会网络,因为只有社会网络的节点具有自我意识。社会网络、计算机网络和通信网络构成了信息流的三层体系。本文介绍的是一种信息传播网络(通信网络)的设计方法。纵观所有的通信网络,可以考虑一个通信网络到底应该具有什么基本功能,才能满足各种信息技术对通信网络的自然要求,才是正确的网络,而不再被“革命”。如果现在尚没有真正的网络理论,那么就要很好的应用端到端原则^[1],思考好各层次功能,尤其是核心层的基本功能。是否随着物联网的不断发展,网络的设计又要改变,网络节点要增加更常用的信息处理功能,使用最近的计算资源来更有效的满足逐渐增多的终端的计算要求?所以网络的核心本质还有待于研究,合理的设计目标和原则还有待研究。

参 考 文 献

- [1] Saltzer JH, Reed D P, Clark D D. End-To-End Arguments in System Design[J]. ACM TOCS, 1984(2): 277-288.
- [2] David D Clark. The Design Philosophy of the DARPA Internet Protocols [C]. ACM SIGCOMM 1988.
- [3] A Ghodsi, T Koponen, J Rajahalme, et al. Naming in Content-Oriented Architectures[C]. In Proc of SIGCOMM Workshop on ICN, 2011.
- [4] CCNx project. <https://www.ccnx.org/>.
- [5] A Anand, F Dogar, D Han, et al. XIA: An Architecture for an Evolvable and Trustworthy Internet [R]. Technical Report CMU-CS-11-100, CMU, 2011.
- [6] B Ahlgren, C Dannewitz, C Imbrenda, et al. A Survey of Information-Centric Networking (Draft) [Z]. In Information-Centric Networking, number 10492 in Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Germany, 2011.
- [7] Dirk Trossen, Mikko Sarela, Karen Sollins. Arguments for an information-centric internetworking architecture[J]. ACM Computer Communications Review, 40:26-33, April 2010.
- [8] Ali Ghodsi, Teemu Koponen, Barath Raghavan, et al. Information-Centric Networking: Seeing the Forest for the Trees[C]. Hotnets'11, 2011: 14-15.
- [9] Van Jacobson, Diana K Smetters, James D Thornton, et al. Networking Named Content [C], CoNext, Rome, Italy, 2009.
- [10] L Zhang, et al. Named data networking (ndn) project[R]. Technical Report NDN-0001, 2010.

- [11] Van Jacobson, Diana K Smetters, Nicholas H Briggs, et al. Voccn: Voice-over content centric networks[C]. 2009; 1-6.
- [12] Z Zhu, S Wang, X Yang, et al. Act: An audio conference tool over named data networking[C]. ACM Sigcomm workshop ICN'11, August 2011.
- [13] David D Clark, John Wroclawski, Karen R Sollins, et al. Tussle in cyberspace: defining tomorrow's internet[C]. In SIGCOMM'02: Proceedings of the 2002 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, New York, NY, USA, 2002; 347-356.
- [14] United State NSF Future Internet Architecture project. <http://www.nets-fia.net/>.
- [15] NDN project. <http://anr-connect.org/>.
- [16] MobilityFirst project. <http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/>.
- [17] NEBULA project. <http://nebula.cis.upenn.edu/>.
- [18] XIA project. <http://www.cs.cmu.edu/~xia/>.
- [19] CONNECT project <http://anr-connect.org/>.
- [20] Zhenkai Zhu, et al. A New Approach to Securing Audio Conference Tools[C]. AINTEC'11, 2011.
- [21] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks[C]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008.
- [22] Diego Perino, Matteo Varvello. A Reality Check for Content Centric Networking[C]. ICN'11, 2011.
- [23] S Arianfar, P Nikander, J Ott. On content-centric router design and implications [C]. In ReARCH'10, Philadelphia, PA, USA, 2010.
- [24] U Lee, I Rimac, V Hilt. Greening the internet with content-centric networking. in Proc[C]. Of ACM E-Energy, 2010.
- [25] G Carofiglio, M Gallo, L Muscariello. Bandwidth and storage sharing performance in information centric networking [C]. in ACM Sigcomm Workshop on Information-Centric Networking ICN, 2011.
- [26] Teemu Koponen. A Data-Oriented (and Beyond) Network Architecture-dona [C], ACM Sigcomm, 2007.
- [27] Li Tang, Zhen Chen, Hao Yin, et al. CORS: A Cooperative Overlay Routing Service to Enhance Interactive Multimedia Communications [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2010, 21(2): 107-119.
- [28] Zhiming Zhang, Jin Zhou, Zhen Chen, et al. Research on Modeling and Algorithm for Network Coding Based P2P Streaming [Z]. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software.
- [29] Yuqian Li, Yang Liu, Zhi-fang Liu, et al. LiveS Cube: An Experiment for Mobile Social Network [C]. Proc. International Conference on Networking and Distributed Computing (ICNDC), 2011.