

内容中心网络 CCN 研究进展¹

闵二龙, 陈震, 许宏峰, 梁勇

清华大学 计算机系
信息技术研究院 网络安全实验室,
信息国家实验室,
北京 100084
e-mail: min.erlong@gmail.com

摘要-当前以信息中心网络(ICN)为代表的未来网络的研究发展迅速, 并越来越得到研究人员的关注。本文综述了内容中心网络(CCN)的相关研究, CCN 网络是 ICN 研究热点之一, CCN 网络在内容分发效率, 网络安全和部署方面具有显著的优势。本文首先给出了 CCN 的相关研究背景, 介绍了 CCN 的工作机制, 并调研了当前 CCN 的研究热点问题及其挑战, 分析了 CCN 主要比较优势与存在的问题, 最后通过实验测试床验证了 CCN 的工作模式。CCN 网络是 ICN 的主要架构之一, 是现有 TCP/IP 网络体系架构的强有力的竞争者, 在未来网络的演化中将发挥更大的作用。

关键词: 网络体系结构, 信息中心网络, 内容中心网络, 内容分发, 网络安全, 物联网

一, CCN 研究背景

随着互联网上应用的不断发展变化, 基于 TCP/IP 的现有互联网也逐渐暴露出许多的不适应, 当前互联网上暴露出的问题主要有: 安全性差, 不支持移动, 不可靠, 缺乏灵活性, 有效性限制², 对新应用僵化等问题。针对这些问题, 当前国内外研究机构主要有“改良”和“革命”两种解决思路, 简单的讲, 凡不改变互联网 IP 的主体地位, 则属于“改良”, 而想要替代 IP 的主体地位的网络就叫“革命”。目前国际上有很多研究机构, 进行未来网络的设计研究。2010 年, 美国 NSF 就资助了 4 个未来互联网体系结构 FIA (Future Internet Architecture)研究项目【14】, 分别是: NDN (Named Data Networking) 【15】、MobilityFirst 【16】、NEBULA 【17】、XIA (eXpressive Internet Architecture) 【18】, 资助时间是 3 年。

这四个项目都宣称能解决当前互联网的主要问题, 但其侧重点各不相同:

NDN 项目的主要思想来源于对当今互联网上背景和应用需求改变的观察。当今互联网在设计之初, 主要的应用需求是计算资源共享, 而经过 50 多年的发展, 互联网的使用已发生了巨大的变化, 现在互联网的主要使用需求是内容的获取和分发。虽然应用发生了这么大的变化, 但互联网的体系结构仍然是 host-to-host 通信模式, 对于以发布和获取信息为主的互联网, host-to-host 通信模式存在明显的不足, 比如每次存取内容, 都要间接映射到内容

¹ 本文受国家 973 项目 (编号: No.2011CD302600, No.2011CB302805, No.2012CB315800) 和国家自然科学基金 A3 重点基金项目 (编号: No.61161140320) 资助

² 内容分发作为主要互联网应用并没有得到体系架构支持

作者简介: 闵二龙 (1978-), 男, 陕西, 硕士; 陈震 (1976-), 男, 浙江, 副研究员, 工学博士; 许宏峰, 男, 广东; 梁勇, 男, 安徽。

[键入文字]

所在的设备。为了解决这个问题，NDN 从 UC-Berkeley 的 Scott Shenker 教授等提出的 DONA 体系结构【26】出发，采用名字路由，通过路由器来缓存内容，从而使数据传输更快，并能提高内容的检索效率。NDN 的具体实现例子是施乐公司的帕洛阿托研究中心(PARC)的 Van Jacobson 等提出的内容中心网络，简称 CCN(Content-centric networking)。

MobilityFirst 项目主要针对移动问题，以终端移动为正常，而非例外，该体系结构使用普遍的延时可容忍网络 DTN (delay-tolerant networking) 提供鲁棒性，再结合自认证公钥的使用，就可提供一个具有天然可信任属性的网络。把移动作为第一属性，使得环境和位置感知服务自然的适合于该网络，该项目集中在移动、可扩展性和公平使用网络资源之间的权衡，实现移动终端间的有效通信。

NEBULA 项目针对当前更多的存储、计算和应用都迁移到了“云”上这个事实，它把云计算的数据中心作为主要的数据仓库和主要的计算场所，数据中心被高速的、可靠的和安全的骨干网连接，该项目集中在部署云计算网络服务，使新的可信数据、控制和核心网络支持一直可用，从而实现一个可以快速提供计算服务的计算基础设施。

XIA 项目主要针对的问题是：网络使用的多样化、可信通信的需求以及同时提供网络服务的利益相关者在不断增长，XIA 是一个可信的并可演化的体系结构。XIA 天生支持多个第一类责任者(x-centric)，也支持未出现的应用模式，即 XIA 的体系结构可以随着网络背景和变化的变化而演化，XIA 创建了一个单一网络，在当前主要的通信主体(主机、内容、服务以及未来不可知的应用)之间提供固有的通信支持【5】。

本文主要介绍的网络是 NDN 项目，该项目的前身是 PARC 的 CCN。主要针对当前 TCP/IP 协议互联网的可扩展性和有效的内容分发问题，该问题前今年已经引起了覆盖网(Overlay Network)和内容分发网络(Content Delivery Network)的研究热潮。最近发现，经过多年的研究，P2P 和 CDN 在解决内容分发问题时仍存在一些不足【6】。因此，现在又提出了信息中心网络(ICN, Information Centric Networking)的解决方案，不同的是，该方案针对的是整个网络体系结构，其目标不只是解决内容分发问题，而是要解决当今互联网存在的所有问题。已有研究证明了信息中心网络能够更好的解决当今互联网中存在的各种问题【7】。而 CCN 就属于信息中心网络范畴，是目前较为主流的研究热潮，

所谓的信息中心网络，就是网络中的一切都可以看做是信息，可以说是一个信息互联的网络，而非主机互联，其核心对象是信息，通过信息的名字进行标识每一个信息。对网络来说，其中流动的都是有名字的信息，网络能区别每一个信息，但具体信息意义，网络并不知道，靠信息的生产者和消费者的上层应用解释。整个网络及其终端就在各种信息的驱动下运行起来了，而网络的作用就是管理所有信息的流动和缓存，并用正确的信息快速响应信息的请求者。用户或应用可以只关注信息本身，而不关心信息块的其他属性，比如信息的所有者属性。当今信息中心网络体系结构的研究机构和项目主要在欧洲(PSIRP/PURSUIT, 4WARD, and SAIL)和美国(CCN 和 DONA)【7】。近来，加州伯克利大学的 Scott Shenker 等研究了各种信息中心网络的共性和区别，发现各种信息中心网络的设计本质很相似，但各自的术语却十分不同，比如在 CCN 中采用的术语 register、interest 等，在本质上相当于发布和订阅术语【8】。

在众多的信息中心网络中，施乐公司的帕洛阿托研究中心(PARC)的内容中心网络 CCN 具有更多的优势，也是目前研究较多体系结构，并且有开源的原型实现【4】支持。NDN 项目便是在 CCN 基础上进行研究的。PARC 先后发明过以太网、鼠标和激光打印机，并在 IPv6 上做出贡献，而 CCN 则是 PARC 的又一里程碑式的技术。另外欧洲的 CONNECT【19】项目也正在为完善 CCN 做出贡献，CONNECT 主要研究 CCN 的流量控制、命名、路由和转发，并思考 CCN 的部署策略。CONNECT 项目也通过一些网络服务和应用的案例，力求从经济上说明 CCN 取代当前互联网的不可抗拒的优势，另外 CONNECT 项目也开发一些模拟和仿真工具，用来测试和证明新的 CCN 协议的有效性。

二，CCN 原理介绍

2.1 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（图 2.1），最大的不同是在“瘦腰”处用内容块（Contentchunk）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。

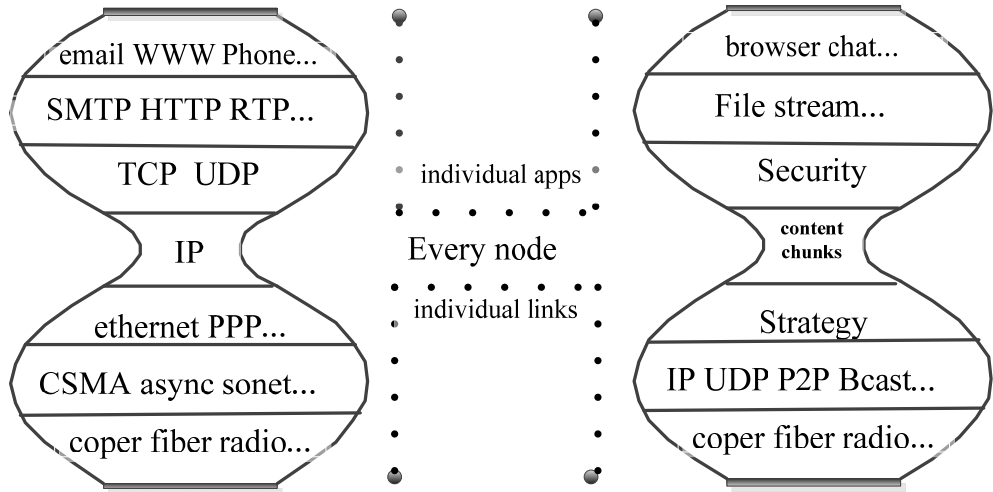


图2.1： CCN和IP的比较

2.2 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【1】中分析了端到端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，PARC的Van Jacobson和UCLA的Lixia Zhang教授等提出了设计CCN的6个原则【10】。这些原则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，因为他允许下层和上层不断革新变化，在CCN设计中也保留了这一模型。
- 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】。

2.3 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（图 2.2）。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（图 2.3），分别是：FIB、内容缓存（Content Store）、PIT。FIB 类似 IP 的 FIB，但允许有一组出口，而限于是一个。内容缓存可以尽可能长时间的缓存已经转发的数据包，以供其他消费者使用。PIT 记录已经转发但尚未被响应的 Interest 包及其到达接口，目的是为了让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。

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 中有该 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 中没有匹配，则丢弃该 Data 包。

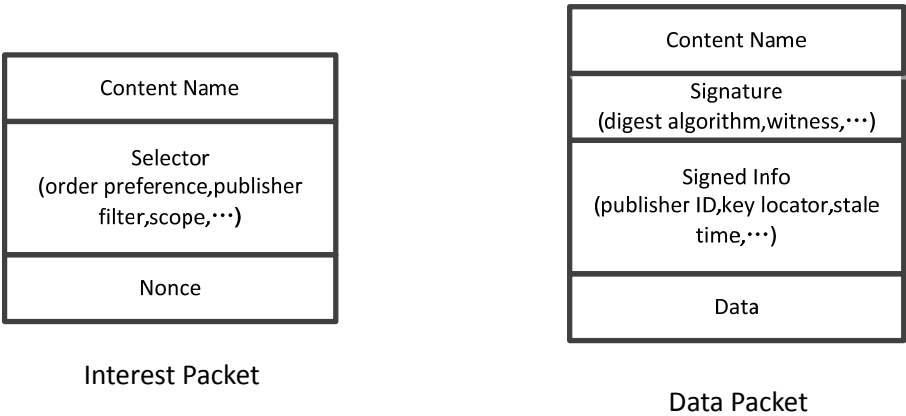


图2.2: CCN包类型

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，不可否认性。

[键入文字]

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。

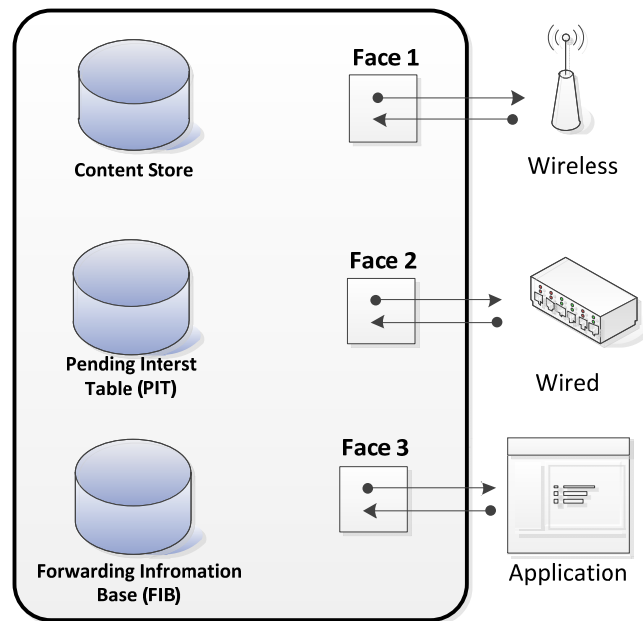


图2.3: 转发引擎模型

2.4 CCN 比较优势

- 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。比如当一个请求者接受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。最后，CCN 对许多 DOS 攻击有天生的防御能力。

- 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、安全性和鲁棒性【11，12】。

- 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】。

- 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。

- 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时并没有考虑网

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。

2.5 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 CCN 演化的能力。阿尔卡特-朗讯的贝尔实验室的 Diego Perino 等人系统的评估了今天的软硬件技术支持 CCN 的适合性，通过分析 CCN 路由器各成分对软硬件的要求，指出今天的技術只支持 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】。

2.6 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，即我不接受的信息，是不会被收到的）；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：

- 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点，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】。

- 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。

三，CCN 研究热点

- 路由器：路由、转发和缓存

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。路由设计要解决的问题主要有两个：（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。

[键入文字]

(3) cache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。

- **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。

- **安全和隐私**

虽然CCN体系结构本身就带有安全考虑，每个数据包都要捆绑一个签名，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。

- **测量评价技术**

主要研究定性和定量的测量技术，以评估 CCN 支持以存在的应用或新应用的能力和性能及其扩展性和鲁棒性。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】。

四，CCN 使用举例

- **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 上使用的其他普遍的功能，Van Jacobson 在【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。但是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。

- **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，具有更强的鲁棒性和可扩展性。

- **应用的安全设计**

为了进一步理解CCN中通过数据的安全而实现应用的安全的设计思想，作者又在【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。

- **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

[键入文字]

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 2.4。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。

CCNx-thu-riit 子网

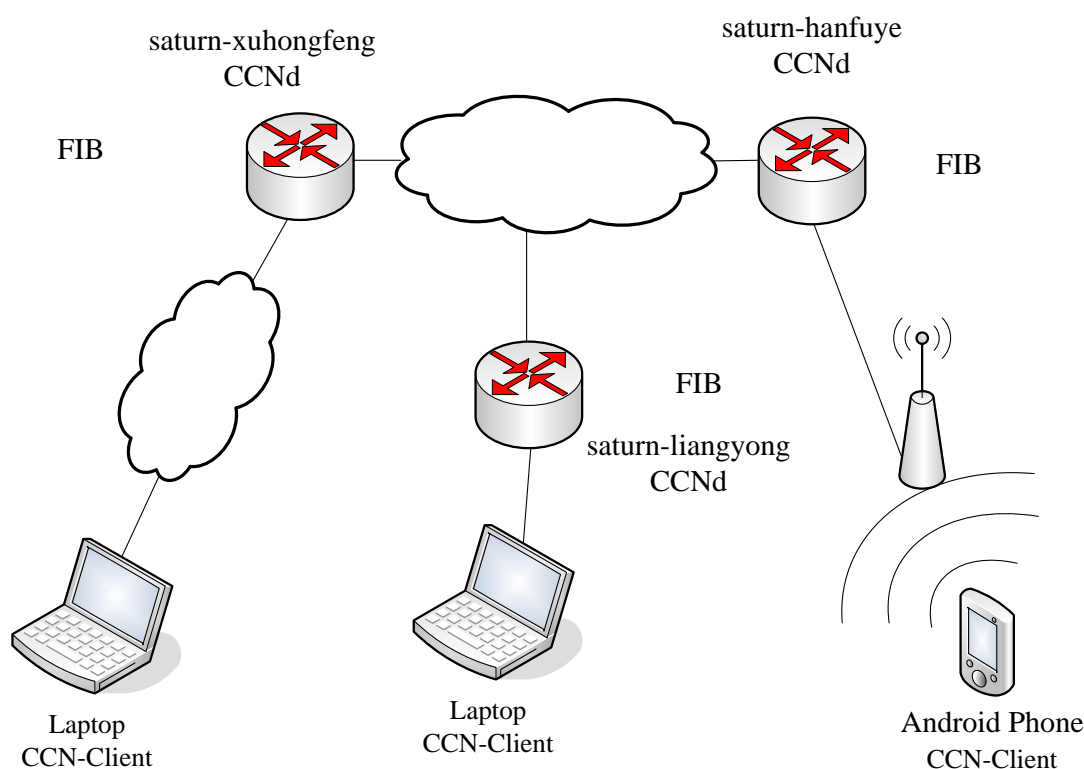


图 2.4：基于 CCN 传输的全媒体交互实验环境

五，结论

事实上很显然，当前互联网的设计是以支持 host-to-host 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的实现。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 的热点研究问题及其挑战，最后通过我们开发的 Omedia-CCN 系统对其进行了实验验证。

CCN 本质上仍然是一个通信网络，只是完成信息传递的任务，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的信息传递。那么，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

[键入文字]

是核心层的基本功能。起初，为了资源共享和一般通信，设计出会话式的通信网络，该网络的基本功能是尽力而为的传输信息到目的主机(其他功能，能放到终端的，都放到端去实现)；现在，人们大多使用网络获取信息，因此设计出了内容分发式的通信网络(NDN)及其基本实现 CCN，该网络的基本功能是传送信息到以内容名字命名的对象，以及为了性能和代价的均衡而增加的信息缓存功能。以后随着物联网的不断发展，很可能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，合理的目标和原则还有待研究，主体对象命名承载的实体语意及其如何区分处理还有待于研究。

参考文献

- 【1】 Saltzer, J.H., Reed, D.P., Clark, D.D. 1984. End-To-End Arguments in System Design[J], ACM TOCS, Vol 2, Number 4, November 1984, pp. 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, P. Sarolahti, and S. Shenker. 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, B. Li, H. Lim, M. Machadoy, W. Wu, A. Akella, D. Andersen, J. Byers, S. Seshan, and P. Steenkiste. XIA: An Architecture for an Evolvable and Trustworthy Internet[R]. Technical Report CMU-CS-11-100, CMU, February 2011
- 【6】 B. Ahlgren, C. Dannewitz, C. Imbrenda, D. Kutscher, and B. Ohlman. A Survey of Information-Centric Networking (Draft) [Z]. In B. Ahlgren, H. Karl, D. Kutscher, B. Ohlman, S. Oueslati, and I. Solis, editors, Information-Centric Networking, number 10492 in Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Germany, 2011.
- 【7】 Dirk Trossen, Mikko Sarela, and 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, Scott Shenker, Ankit Singla, James Wilcox. Information-Centric Networking: Seeing the Forest for the Trees[C]. Hotnets '11, November 14–15, 2011
- 【9】 Van Jacobson, Diana K. Smetters, James D. Thornton, Michael F. Plass, Nicholas H. Briggs, Rebecca L. Braynard, Networking Named Content[C], CoNext, Rome, Italy, 2009.
- 【10】 L. Zhang et al. Named data networking (ndn) project[R]. Technical Report NDN-0001, October 2010.
- 【11】 Van Jacobson, Diana K. Smetters, Nicholas H. Briggs, Michael F. Plass, Paul Stewart James D. Thornton, and Rebecca L. Braynard, Voccn: Voice-over content centric networks[C]. Pages 1–6, 2009.
- 【12】 Z. Zhu, S. Wang, X. Yang, V. Jacobson, and L. Zhang. 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, and Robert Braden. 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, pages 347–356, New York, NY, USA, 2002. ACM

- 【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, November 9–11, 2011.
- 【21】 MCKEOWN, N., ANDERSON, T., BALAKRISHNAN, H., PARULKAR, G., PETERSON, L., REXFORD, J., SHENKER, S., AND TURNER, J. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks[C]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review 38, 2 (April 2008).
- 【22】 Diego Perino, Matteo Varvello. A Reality Check for Content Centric Networking[C]. ICN'11, August 19, 2011.
- 【23】 S. Arianfar, P. Nikander, and J. Ott. On content-centric router design and implications[C]. In ReARCH'10, Philadelphia, PA, USA, Dec. 2010.
- 【24】 U. Lee, I. Rimać, and V. Hilt, "Greening the internet with content-centric networking," in Proc[C]. Of ACM E-Energy, 2010.
- 【25】 G. Carofiglio, M. Gallo, and L. Muscariello, Bandwidth and storage sharing performance in information centric networking[C], in ACM Sigcomm Workshop on Information-Centric Networking ICN, Aug. 2011.
- 【26】 Teemu Koponen, A Data-Oriented (and Beyond) Network Architecture-dona[C], ACM Sigcomm 2007.
- 【27】 Li Tang, Zhen Chen, Hao Yin, Jun Li and Yanda Li. CORS: A Cooperative Overlay Routing Service to Enhance Interactive Multimedia Communications [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, pp107-119, Vol.21, No.2, 2010.
- 【28】 Zhiming Zhang, Jin Zhou, Zhen Chen and Jun Li. 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, Chao Liu, Zhao-nan Li, Fuye Han, Jun Li, Ming Xu, Xin Guan, Zhen Chen. LiveS Cube: An Experiment for Mobile Social Network[C]. Proc. International Conference on Networking and Distributed Computing (ICNDC), 2011.
- 【30】 Dave Clark, Bill Lehr, Steve Bauer, Peyman Faratin, Rahul Sami, John Wroclawski. "Overlay Networks and the Future of Internet," COMMUNICATIONS & STRATEGIES, Vol. 63, No. 3. (2006)
- 【31】 CLARK David, William LEHR, Steve BAUER, Peyman FARATIN, Rahul SAMI & John WROCLAWSKI (2005): "The Growth of Internet Overlay Networks: Implications for Architecture, Industry Structure and Policy", 33rd Telecommunications Policy Research Conference, September.