

播存网络体系结构普适模型及实现模式

杨 鹏, 李幼平

(1. 东南大学计算机科学与工程学院, 江苏南京 210096; 2. 计算机网络和信息集成教育部重点实验室(东南大学), 江苏南京 210096)

摘 要: 针对互联网主流应用范型向公共内容服务的转变, 采用基于物理变革和二元网络思维的研究思路, 主张为现有互联网体系结构增添充当次级结构的播存网络. 介绍了播存网络的设计理念、主要特色及关键实现机制, 给出了播存网络体系结构的普适模型及其数学描述. 在此基础上, 重点研究了播存网络体系结构的主要实现模式, 包括标准实现模式、中继实现模式、并合实现模式和 UCL Only 模式等. 为播存网络体系结构的严格定义及规范描述奠定了理论基础.

关键词: 未来互联网; 播存网络; 以内容为中心; 实现模式; 统一内容标签

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)05-0974-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.05.021

General Architecture Model of Broadcast-Storage Network and its Realization Patterns

YANG Peng, LI You-ping

(1. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 2. Key Laboratory of Computer Network and Information Integration (Southeast University), Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Focusing on Internet's emerging paradigm of ubiquitous content sharing, this paper emphasizes on a physically revolutionary and dual-structural approach to the future Internet architecture, which insists on complementing the current Internet architecture with a secondary structure, the broadcast-storage network. By analyzing the concepts, features and key mechanisms of the broadcast-storage network, a general architecture model of broadcast-storage network and its mathematical description are presented. Based on these foundations, some principal realization patterns of the broadcast-storage network architecture are addressed and discussed, including Standard Pattern, Relay Pattern, Consolidation Pattern and UCL Only Pattern. Findings of this paper provide theoretical supports for further study on the strict definition and specification of the broadcast-storage network architecture.

Key words: future Internet; broadcast-storage network; content-centric; realization pattern; uniform content label

1 引言

近年来, 互联网体系结构与现实应用需求之间的不适应性日益显现^[1]. 为此, 研究界提出多种未来互联网体系结构研究思路和解决方案^[2, 3]. 概括起来, 主要的研究观点有两种, 即演进 (evolution) 和重构 (clean-slate). 前者主张对现有互联网体系结构进行渐进式改良、功能补充和完善, 从而实现向未来互联网的平滑演进; 后者则强调撇开现有互联网体系结构, 针对未来互联网的应用和发展需要, 从头开始设计 (design it from scratch)^[4] 全新的未来互联网体系结构. 两种观点本质立场对立相反, 一直处于激烈的学术争鸣之中^[5].

处于发展困境中的互联网, 在演进与重构的两难迷局中踟躇前行. 我们认为, 研究未来互联网体系结构的合理途径, 应该从互联网发展困境的根源出发, 抓住互联网体系结构与主流应用范型的关键失配之处, 通过化解主要矛盾寻求尽可能简单和有效的解决方案. 照此思路, 我们提出变革未来互联网体系结构的播存网络 (broadcast-storage network) 方案. 其创意基础在于: 当前互联网 90% 以上的流量来自于内容分发^[6], 互联网已经演化为服从幂律的无标度 (scale-free) 网络^[7], 互联网主流应用范型正在向“以内容为中心”的信息共享发生深刻改变. 然而, 互联网的设计初衷却是为了端到端通信. 因此, 关于未来互联网体系结构的经济、可行出路, 是为

现有互联网体系结构增添一种以“广播辐射传输 + 泛在内容存储”为特征的辅助网络,这种次级结构(secondary structure)网络称为播存网络。

已有许多文献^[8~11]从不同角度对播存网络相关概念进行了研究和论述,如文献[8]较早提出通过整合互联网和广播网营造全民低成本共享内容的第二类信息网络;文献[9]对 UCL 概念形成初期的信息标引与传输机制等进行了研究;文献[10]通过对用户兴趣二分网络进行统计特性分析,论证了用户行为的无标度特征和聚集特点;文献[11]比较了典型信息共享方式的优缺点,并在清华大学校园网实证了基于播存结构的非对称信息共享网络的有效性。近年来,在未来互联网研究受到空前关注的大背景下,播存网络概念不断有新的发展和阐释。为反映这方面研究的最新进展,本文将在概括播存网络设计理念和特色的基础上,建立播存网络体系结构的普适模型,并重点研究播存网络体系结构的若干重要实现模式。

2 播存网络特色及相关研究比较

播存网络的特色在于,它是一种基于多种网络(互联网、电信网和广播网等)优势互补的物理变革思路 and 主、次结构共轭的二元网络思维而提出的未来互联网创新方案。其突出优势表现在,它作为未来互联网体系结构的次级辅助结构,与现有互联网 TCP/IP 主结构(primary structure)既功能协同又逻辑解耦,并且不妨碍各种针对互联网主结构的演进或重构方案,包括 IPv6、软件定义网络 SDN^[12]和信息中心网络 ICN(Information-Centric Networking)^[13]等。

作为一类未来互联网体系结构研究方案,信息中心网络 ICN 因为概念新颖而广受关注,代表性的研究工作如 TRIAD^[14]、DONA^[15]、CCN^[16]、NDN^[17]、PURSUIT^[18]、SAIL^[19]、CONVERGENCE^[20]、以及智慧协同标识网络^[21]和 SOFIA^[22]等。其中 TRIAD 较早地由互联网内容分发特性提出了基于名字的路由方案;DONA 设计了面向数据的互联网命名与名字解析新方案;NDN 在 CCN 研究基础上发展而来,它强调采用命名数据(named data)代替命名主机(host addresses),建立以内容本身为第一要素(first citizen)的新型网络体系结构;PURSUIT 主张以信息为核心建立基于 Pub/Sub 路由范型的全新网络;SAIL 倡导基于不与位置绑定的信息对象标识(Object Identifiers)建立面向信息的新范型;CONVERGENCE 采用 VDI(Versatile Digital Item)来包容各种数据,它在一些具体技术上与 NDN 颇为类似;智慧协同标识网络以服务标识、族群标识和组件标识为基础建立了三层、两域的新型标识网络;SOFIA 通过将服务处理和数据传输解耦而形成服务层和网络层,建立了面向服

务的未来互联网体系结构。

总的来说,播存网络与 ICN 研究有一些相似之处,如它们都强调网络关注的重点从位置(where)转向内容本身(what),都注重提出新的面向内容的标识,都更加依赖于网络中的缓存等。但播存网络与 ICN 也存在明显的差异,如通常在 ICN 研究中突出强调的路由与转发功能,由于物理广播天然具有无介质和带宽约束的辐射分发特性,因此在播存网络中被极大地弱化。另外,多数 ICN 研究方案都强调采用“clean-slate”指导思想,往往难以协调好新方案与现有互联网体系结构之间的关系,而这又反过来成为其推广的阻碍。从这个意义上讲,SDN 对现有互联网体系结构的革新要比 ICN 缓和得多,因此其现实接受度也好于 ICN。相比之下,播存网络以成本高效(cost-efficient)作为未来互联网体系结构的核心准则,不囿于非此即彼的一元化思维束缚,既承认现有互联网体系结构的主体地位,同时又引入次级辅助结构弥补它与互联网主流应用范型的显著失配,从而化解试图再造全新网络的现实阻力,为未来互联网体系结构研究提供具有最小演进代价的创新解决思路。

3 播存网络体系结构普适模型

顾名思义,支持点到面辐射传输的物理广播和与之配合的泛在化内容存储,是构成播存网络物理架构的两大关键要素。播存网络利用广播传输方式天然的一对多能力,可以保证内容一次分发、不限规模(scale-free)用户接收,实现内容在空间上的无限量复制,从基本物理传输模型上满足内容共享类应用的“点到多点”辐射型分发需求。同时,播存网络在内容接收环节引入泛在化存储(广泛配置在各种内容接收端之中),可以使广播内容的发送与接收解耦,保证任何接收者都能灵活地接收并缓存广播源发送的内容信息,实现内容在时间上的无限量复制,从而有效支持用户对内容的异步个性化访问需求。

播存网络充分体现了“以内容为中心”的设计理念,对内容的标识、分发、缓存、导航和适配等都基于统一内容标签 UCL(Uniform Content Label)进行。简而言之,UCL 可表示为二元组 $\langle UCL_Code, UCL_Properties \rangle$,其中 UCL_Code 是结构固定的 UCL 标识码,而 $UCL_Properties$ 是灵活可变长的内容属性描述。UCL 不同于目前 WWW 所采用的基于 URL 将信息空间“按地址定位”的方法,同时也有别于 NDN^[17]和 LISP^[23]等研究中单纯用“名字”来标引内容信息的方法,它能更加全面地描述关于内容的丰富语义信息,紧密关联内容的读者、作者和管理者,并为基于内容的安全(content-based security)提供基石。广播分发与泛在化存储的有机结合,以及在二者之间充当桥梁的 UCL,共同构成播存网络体系结构的创意基元。播存

网络体系结构的普适模型如图 1 所示.

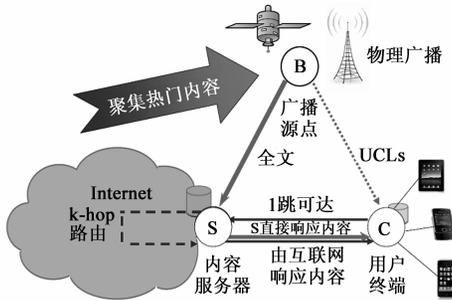


图1 播存网络体系结构普适模型

一个播存网络系统可抽象表示为 $Sys = (Node, Chan)$, 其中 $Node$ 是 Sys 中所有结点的集合, $Chan$ 是结点之间数据传输路径(称为通道)的集合. 播存网络系统中的结点从物理上分为三类, 它们属于 3 个集合, 即广播源点集合 (N_B)、内容服务器集合 (N_S) 和用户终端集合 (N_C), 并且满足 $Node = N_B \cup N_S \cup N_C$. 这些结点所司职的功能可抽象为 4 种角色, 即 $Role = \{R_{brd}, R_{srv}, R_{clt}, R_{tly}\}$. 其中, 角色 R_{brd} 负责聚集互联网中高热内容, 并为每份内容生成对应 UCL, 然后将内容全文和 UCL 进行广播推送. 角色 R_{srv} 负责接收并缓存由广播分发的热门内容全文, 同时响应角色 R_{clt} 对内容全文的请求. 角色 R_{clt} 负责接收和选择浏览 UCL, 并向角色 R_{srv} 请求其感兴趣的内容全文. 此外, 有时为提高广播信号渗透能力或进行制式转换, 需要由中继角色 R_{tly} (一般由内容服务器司职) 对广播数据进行中转. 角色 R_{tly} 负责接收由角色 R_{brd} 所广播的数据 (UCL 和/或内容全文), 并将这些数据在其覆盖区域内进行中继分发.

通道是对播存网络系统中物理传输信道的逻辑抽象. 通道具有方向性, 一条通道可抽象表示为 $c = (R, K) \in Chan$, 其中 $R \subseteq Node \wedge K \subseteq Node$, R, K 分别是通道 c 的源结点集合和宿结点集合. 称只有一个源结点的通道为基本通道, 它满足 $((|R| = 1) \wedge (|K| \geq 1) \wedge (R \cap K = \emptyset))$, 代表播存网络系统中最基本的点到多点通信模型. 一对一的双向通信, 可以用两条 $|K| = 1$ 的基本通道来刻画. 为简便计, 限定 $Chan$ 中的元素都是简单通道, 并限定本文中所有集合均为有限集 (其合理性在于, 信号源发射的能量物理上终归有限, 因而信号接收者数量的上界必然也是有限的). 以下描述中, 用 $P(A)$ 表示集合 A 的幂集. 令函数 $t: Node \rightarrow P(Role)$, $T: \{N_B, N_S, N_C\} \rightarrow P(Role)$, $src: Chan \rightarrow P(Node)$, $snk: Chan \rightarrow P(Node)$, 且满足:

$$\forall n \in Node, \text{有 } t(n) \begin{cases} = \{R_{brd}\}, & \text{if } n \in N_B; \\ \subseteq \{R_{srv}, R_{tly}\}, & \text{if } n \in N_S; \\ \subseteq \{R_{srv}, R_{clt}\}, & \text{if } n \in N_C. \end{cases}$$

$$\forall N_X \in \{N_B, N_S, N_C\}, \text{有 } T(N_X) = \bigcup_{n \in N_X} t(n).$$

$$\forall c = (R, K) \in Chan, \text{有 } \begin{cases} src(c) = R; \\ snk(c) = K. \end{cases}$$

称 $t(n)$ 为结点 n 扮演的角色集 (简称 n 的角色集), 则上述 $T(N_X)$ 为结点集 N_X 中所有结点的角色集的并集 (简称 N_X 的角色集). 若对于结点集 $N_X \in \{N_B, N_S, N_C\}$, 有 $(\forall n_1 \forall n_2 ((n_1 \in N_X) \wedge (n_2 \in N_X) \rightarrow (t(n_1) = t(n_2))))$, 则称 N_X 中的所有结点是角色一致的 (简称 N_X 角色一致), 此时对 $\forall n_x \in N_X$, 必有 $T(N_X) = t(n_x)$. 若一个播存网络系统只有一个广播源点, 且各结点集均角色一致, 则称之为简单播存网络系统. 一般地, 一个简单播存网络系统满足如下约束:

- ① $((|Node| \geq 2) \wedge (|Chan| \geq 1)) \wedge (Chan \subseteq P(Node) \times P(Node));$
- ② $(|N_B| = 1) \wedge (|N_C| \geq 1) \wedge (\{R_{brd}, R_{clt}\} \subseteq \bigcup_{n \in Node} t(n));$
- ③ $\exists c ((c \in Chan) \wedge (src(c) \subseteq N_C) \wedge (snk(c) \subseteq N_C));$
- ④ 若 $|N_S| = 0$, 则:
 - (a) $(N_B \cap N_C = \emptyset) \wedge (Node = N_B \cup N_C);$
 - (b) $\exists ! c ((c \in Chan) \wedge (src(c) = N_B) \wedge (snk(c) = N_C));$
- ⑤ 若 $|N_S| \neq 0$, 则:
 - (a) $(N_B \cap N_S = \emptyset) \wedge (N_B \cap N_C = \emptyset) \wedge (N_S \cap N_C = \emptyset) \wedge (Node = N_B \cup N_S \cup N_C);$
 - (b) $\exists ! c ((c \in Chan) \wedge (src(c) = N_B) \wedge (snk(c) = N_S));$
 - (c) $((R_{tly} \notin T(N_S)) \rightarrow \exists ! c ((c \in Chan) \wedge (src(c) = N_B) \wedge (snk(c) = N_C)) \vee ((R_{tly} \in T(N_S)) \rightarrow \forall n_c \exists n_s \exists c ((n_c \in N_C) \wedge (n_s \in N_S) \wedge (c \in Chan) \rightarrow (src(c) = \{n_s\}) \wedge (snk(c) = \{n_c\}))).$

上述诸式刻画了简单播存网络系统的结点构成、角色种类、通道性质等基本属性. 下文中提到的播存网络系统, 如无特别说明, 均指简单播存网络系统.

4 播存网络体系结构的实现模式

按照实际应用场景的不同, 播存网络体系结构普适模型有多种具体实现形式, 依据这些实现形式各自的结构特征共性, 本文将它们归纳为 4 种典型实现模式, 即标准实现模式 (Standard Pattern, SP)、中继实现模式 (Relay Pattern, RP)、并合实现模式 (Consolidation Pattern, CP) 和 UCL Only 模式 (UCL Only Pattern, UOP). 播存网络体系结构的典型实现模式如图 2 所示.

4.1 标准实现模式 (SP)

播存网络体系结构的实现模式如图 2(a) 所

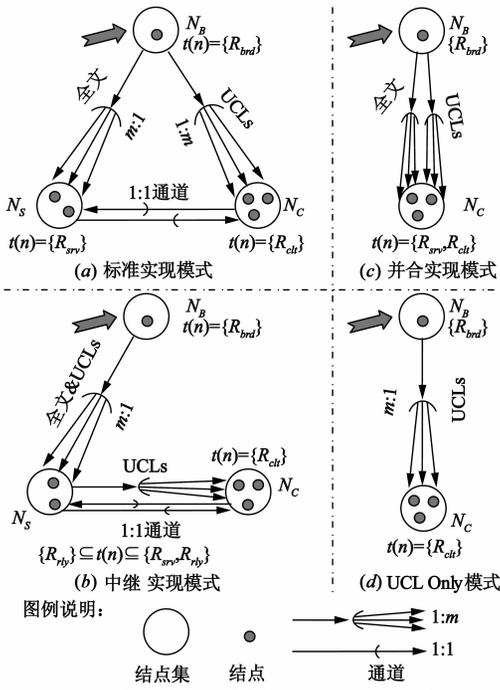


图2 播存网络体系结构的典型实现模式

示.其特征表现为:播存网络系统中同时包含广播源点、内容服务器和用户终端三类结点,即 $\pi = \{N_B, N_S, N_C\}$ 正好构成集合 $Node$ 的一个划分,并且满足 $T(N_B) = \{R_{bnd}\}$, $T(N_S) = \{R_{srv}\}$, $T(N_C) = \{R_{cli}\}$. 此时 N_B 中的广播源点角色 R_{bnd} , N_S 中各内容服务器角色 R_{srv} , N_C 中各用户终端角色 R_{cli} . 在标准实现模式中,广播源点聚类集结互联网中的高热度内容,并分别向所有内容服务器和用户终端广播推送内容全文及其对应 UCL,而用户一方面可以对 UCL 按自己的喜好进行个性化取舍和快览,另一方面可以通过众多的内容服务器,就近获取自己感兴趣的内容全文.

基于标准实现模式的播存网络系统,广播源点通常采用两个独立的物理信道进行内容分发,即通过全文广播信道向所有内容服务器分发热门内容全文,同时通过 UCL 广播信道向所有用户终端(如智能手机、平板等)推送 UCL,这两个通道由第 3 节中的⑤式所刻画.互联网每天产生的主流热门内容(新闻类文本信息及短视频等)总量通常不超过 300G,将这些内容全部广播推送到所有内容服务器,理论上只需信道数据传输能力大于 30Mbps 即可满足.当前多种广播网(如 DTMB/CMMB/DVB-S/DVB-C 等)已具备这种能力.同时,广播源点只需使用一个 100Kbps 的可靠低速率广播信道,每天即可推送多达 1G 的 UCL 信息到所有用户终端(约 100 万条 UCL),而中国每天新产生的所有网页总数也只有约 300 万个,其中只有极少部分会引起大众兴趣.

4.2 中继实现模式(RP)

播存网络体系结构的中继实现模式如图 2(b)所示.与标准实现模式类似,系统中的 N_B, N_S 和 N_C 三个结点集均不为 \emptyset ,即 $\pi = \{N_B, N_S, N_C\}$ 正好构成集合 $Node$ 的一个划分.但与标准实现模式不同的是,该模式要求 $\{R_{ty}\} \subseteq T(N_S) \subseteq \{R_{srv}, R_{ty}\}$. 在中继实现模式中,内容服务器不但接收来自广播源点的热门内容全文,同时还接收由广播源点推送的所有 UCL,并且负责把这些 UCL 分发给其关联局域内的用户终端.在这一过程中,用户终端不直接从广播源点接收 UCL,内容服务器充当广播分发 UCL 的中继(relay).

理论上,标准实现模式可从物理实现上使 UCL 的分发和内容全文的分发完全解耦.借助广播源点信号的广域覆盖性,能够更好地保证用户终端的泛在性.但标准实现模式要求所有用户终端必须能够直接接收 UCL 广播信号,目前只有少部分特定类型的终端具有接收特定制式广播信号的能力(如已有部分智能手机内置 CMMB 接收芯片,但不普及).因此,采用标准实现模式,意味着针对多种用户终端的普遍技术改造.此外,广播源点信号虽然覆盖范围广,但往往渗透能力较差,室内信号接收效果大打折扣.而中继实现模式则能有效克服上述不足,借助 WiFi、3G、4G 等已有无线通信技术,用户终端可以与充当内容中继的内容服务器直接通信,从而避免对多种用户终端进行较大的硬件升级.

中继实现模式赋予播存网络系统更多的灵活性,尤其对现有移动互联网技术有良好的兼容能力,是实现局域(如家庭域)信息中心网络的理想模式,代表应用实例如北京歌华的“飞视”业务^[24]等.播存网络体系结构中中继实现模式的一种特殊情况是,内容服务器退化成一个单纯的广播信号中继,此时 $T(N_S) = \{R_{ty}\}$. 例如,在一些应用中,为增强广播源信号的渗透能力,可以在房屋的窗户外放置具有一定存储能力的广播信号接收转发中继设备,从而保证室内用户终端的信号接收质量.

4.3 并合实现模式(CP)

播存网络体系结构的并合实现模式如图 2(c)所示.其特征表现为:系统中只有广播源点和用户终端两类结点,即 $N_S = \emptyset$ 且 $\pi = \{N_B, N_C\}$ 构成集合 $Node$ 的一个划分,并满足 $T(N_B) = \{R_{bnd}\}$, $T(N_C) = \{R_{srv}, R_{cli}\}$. 并合实现模式相当于将标准实现模式中的用户终端和内容服务器合而为一.这时,广播源点从逻辑上采用两个通道分别向用户终端分发 UCL 和内容全文,而在具体实现这两个逻辑通道时,可以采用两个独立的物理信道,或者复用同一个物理信道.在并合实现模式中,用户终端虽然也扮演 R_{srv} 角色,但由于内容全文缓存在本

地,因此 R_{src} 角色一般只为本客户端进行全文服务.

并合实现模式的一个代表应用实例是中广传播集团推出的“睛彩”内容业务^[25],该业务依托 CMMB 移动多媒体广播技术,能够在每天凌晨用 4 组时隙推送 6 种报纸和 60 种杂志.装有 CMMB 接收芯片的“睛彩”内容业务订阅者,都可以通过 UCL 来定制下载自己感兴趣的读物,形成用户随身内容库.并合实现模式原理虽然简单,但其实现效果常常受用户终端的广播信号接收能力制约.尤其是用户终端需要通过高速率数据信道接收内容全文,这往往会限制内容共享类应用的服务时间(受限于终端续航能力)和泛在性(受限于信号的覆盖渗透能力),进而影响到实际播存网络系统及应用的规模和价值.

4.4 UCL Only 模式(UOP)

播存网络体系结构的 UCL Only 模式如图 2(d)所示.从系统构成上看,它与并合实现模式非常相似,系统中只有广播源点和用户终端两类结点, $N_S = \emptyset$ 且 $\pi = \{N_B, N_C\}$ 构成集合 *Node* 的一个划分.但与并合实现模式不同的是,本模式中 $T(N_C) = \{R_{cu}\}$,即 N_C 中各用户终端只司角色 R_{cu} ,它们只是全部或者部分地接收广播源点推送的 UCL.基于 UCL Only 模式实现的播存网络系统,通常不广播内容的全文,而只广播内容所对应的 UCL(也可理解为只广播 UCL 格式的内容).该模式的合理性在于,UCL 是语义完整的内容元数据(metadata),其格式中含有标题、关键词、要义等信息,因此本身就是一种可读的短文件.

播存网络系统通过集结并广播 UCL,可以形成引领众多媒体的超级媒体,实现对互联网中浩如烟海的内容大数据的深度去冗.同时,由于 UCL 通常比内容全文要短小很多,因此 UCL Only 模式只需用一个低速率的广播信道,就足以承载多元共享内容面向全民的普适化泛在服务.实现 UCL Only 模式的关键是,需要提供一种能够将 UCL 迅即推送到所有终端的物理广播机制.

另一种较为常见的情况是,在互联网主结构的边缘部署多个内容服务器,但它们并不从广播源点接收内容全文,而广播源点只向所有的终端发送 UCL.这种情形也可视为一种广义的 UCL Only 模式.此时,播存网络无需为分发内容全文提供高速广播信道,而内容服务器中所缓存的内容全文,可以通过互联网中的任意内容分发和缓存技术(如 CDN、P2P 和 Web Cache 等)获得.除能够支持一般的内容元数据共享类应用外,UCL Only 模式的突出优势还在于,它能够支持短数据内容的无限规模泛在分发和迅即到达.因此,该模式特别适合于应急广播、灾情预警、紧急避险等特殊应用场合,尤其是互联网主结构可能因不可抗因素(地震、洪水、暴雨等自然灾害或战争)而遭受破坏的情况.

4.5 更复杂的实现模式

前述 4 种典型实现模式,是简单播存网络系统的基本实现模式.在实际应用中,有时可能单一的某种基本实现模式并不能完全满足需求,这时往往需要混合使用多种基本实现模式,或者对某一基本实现模式进行拓展,以支持复杂多样的应用场景.例如,一个播存网络系统为了兼顾用户终端的异构性,可能会部分采用标准实现模式(SP),部分采用中继实现模式(RP).又如一个分级(hierarchical)播存网络系统,可能第一级广播源点与第二级广播源点之间采用并合实现模式(CP),同时第二级广播源点与用户终端之间采用标准实现模式(SP).再比如一个基于中继卫星实现的全球广域播存网络系统,可能需要将中继实现模式(RP)拓展到多跳中继的情形.

5 结束语

未来互联网体系结构研究意义重大,以内容为中心的设计理念已逐渐成为研究界的共识.互联网主流应用范型已经从提供端到端数据传输服务,转变为面向大众提供公共内容服务.从端到端对流传输模型与互联网主流应用范型的显著失配入手,主张为现有互联网体系结构增添基于“辐射-复制”模型的次级结构播存网络.介绍了播存网络的设计理念和特色,阐释了播存网络中的异步广播、泛在化存储、统一内容标签(UCL)等概念和关键实现机制.在此基础上,以集合论和数理逻辑等为基础,给出了播存网络体系结构普适模型及其形式化建模方法.最后,归纳分析了播存网络体系结构的实现模式,重点讨论了标准实现模式、中继实现模式、并合实现模式和 UCL Only 模式等四种典型模式,分析了这些模式的具体配置、适用场景及代表应用等.为更细粒度地解构播存网络体系结构、深入研究播存网络与双结构未来互联网、以及指导构建播存网络系统奠定了坚实基础.

参考文献

- [1] Conti M, Chong S, Fdida S, et al. Research challenges towards the future Internet [J]. *Computer Communications*, 2011, 34(18): 2115-2134.
- [2] Paul S, Pan J, Jain R. Architectures for the future networks and the next generation Internet: a survey [J]. *Computer Communications*, 2011, 34(15): 2-42.
- [3] Pan J, Paul S, Jain R. A survey of the research on future Internet architectures [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(7): 26-36.
- [4] NSF NeTS FIND Initiative [DB/OL]. <http://www.nets-find.net/>, 2013-07-20.

- [5] Rexford J, Dovrolis C. Future Internet architecture: clean-slate versus evolutionary research [J]. Communications of the ACM, 2010, 53(9): 36 – 40.
- [6] Cisco visual networking index: forecast and methodology: 2013-2018 [DB/OL]. <http://www.cisco.com/>, 2014-06-10.
- [7] Wang X F, Chen G. Complex networks: small-world, scale-free, and beyond [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2003, 3(1): 6 – 20.
- [8] 李幼平. 共享信息的第二类网络 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(8): 8 – 11.
Li Youping. The secondary web of knowledge embodiment [J]. Engineering Science, 2002, 4(8): 8 – 11. (in Chinese)
- [9] 马建国, 邢玲, 李幼平, 等. 数据广播中的 UCL 标引与传输机制 [J]. 电子学报, 2004, 32(10): 1621 – 1624.
MAJianguo, XING Ling, LI Youping, et al. UCL indexing and transmission scheme in data broadcasting [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(10): 1621 – 1624. (in Chinese)
- [10] 马卫东, 李幼平, 马建国, 等. 面向 Web 网页的区域用户行为实证研究 [J]. 计算机学报, 2008, 31(6): 960 – 967.
Ma Weidong, Li Youping, Ma Jianguo, et al. Empirical study of region user behaviors for Web pages [J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(6): 960 – 967. (in Chinese)
- [11] 任勇, 许晨敏, 王磊, 等. 一种非对称广域覆盖的信息共享网络结构 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1017 – 1021.
Ren Yong, Xu Chenmin, Wang Lei, et al. A new asymmetric network architecture for ubiquitous information sharing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(5): 1017 – 1021. (in Chinese)
- [12] Open network foundation (ONF). Software-defined networking: the new norm for networks [DB/OL]. <http://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>, 2012-04-13.
- [13] Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, et al. A survey of information-centric networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26 – 36.
- [14] Gritter M, Cheriton D R. An architecture for content routing support in the Internet [A]. The 3rd conference on USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems [C]. San Francisco, USA, 2001. 37 – 48.
- [15] Koponen T, Chawla M, Chun B, et al. A data-oriented (and beyond) network architecture [A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'07 [C]. Kyoto, Japan, 2007. 181 – 192.
- [16] Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content [A]. Proceedings of ACM CoNEXT'09 [C]. New York, USA, 2009. 1 – 12.
- [17] Zhang L, Estrin D, Burke J, et al. Named data networking (NDN) project, NDN-0001 [DB/OL]. <http://named-data.net/ndn-proj.pdf>, 2010-10-31.
- [18] Fotiou N, Nikander P, et al. Developing information networking further: from PSIRP to PURSUIT [A]. The 7th International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems [C]. Athens, Greece. 1 – 13.
- [19] SAIL EU FP7 Project. The network of information: architecture and applications (D-B. 1) [DB/OL]. http://www.sail-project.eu/wp-content/uploads/2011/08/SAIL_DB1_v1_0_final-Public.pdf, 2011-07-31.
- [20] The CONVERGENCE Project [DB/OL]. <http://www.ict-convergence.eu/>, 2013-05-31.
- [21] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同标识网络基础研究 [J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249 – 1254.
Zhang Hongke, Luo Hongbin. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249 – 1254. (in Chinese)
- [22] Wu Q, Li Z, Zhou J, et al. SOFIA: toward service-oriented information centric networking [J]. IEEE Network, May/June, 2014: 12 – 18.
- [23] Farinacci D, Fuller V, Meyer D, et al. Locator/ID separation protocol (LISP) [EB/OL]. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6830.txt>, 2013-01.
- [24] 北京歌华飞视 (FlyTV) [EB/OL]. <http://58.30.229.98:8083/index.html>, 2014-12-19.
- [25] 中广传播精彩报纸和杂志 [EB/OL]. <http://gd.cbc.cn/newsmore.php?id=1106&1109>, 2013-07-20.

作者简介



E-mail: pengyang@seu.edu.cn

杨 鹏 男, 1975 年 9 月出生, 四川南充人, 东南大学计算机科学与工程学院副教授, 硕士生导师, 东南大学未来网络研究中心科研骨干, 新华社统一内容标签标准工作组副组长. 2006 年毕业于东南大学计算机科学与工程学院, 获计算机应用技术专业工学博士学位, 2007 年至 2009 年间, 赴欧洲核子物理研究中心 (CERN), 参加由诺贝尔奖得主丁肇中教授领导的大型国际合作太空物理实验 AMS 02 项目. 主要研究方向包括双结构未来互联网、播网络体系结构、形式化理论与技术等.



E-mail: liyp@cae.cn

李幼平 男, 1935 年 5 月出生, 福建泉州人, 中国工程院院士, 东南大学未来网络研究中心主任. 曾获国家科技进步一等奖、国家发明二等奖、国防科技一、二等奖多项. 1988 年国家人事部授予“有突出贡献专家”称号, 1999 年获香港何梁何利基金技术科学奖. 1999 年当选为中国工程院院士. 近年来一直致力于研究播存结构理论与双结构未来新型网络, 对互联网体系结构进行物理变革和内容单元创新.