



# 数据驱动的网络多媒体边缘内容分发

朱文武<sup>1\*</sup>, 王智<sup>2</sup>

1. 清华大学计算机系, 北京 100086

2. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055

\* 通信作者. E-mail: wwzhu@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2020-02-03; 修回日期: 2020-03-15; 接受日期: 2020-04-22; 网络出版日期: 2021-03-02

国家自然科学基金面上项目 (批准号: 61872215) 和国家自然科学基金重大项目 (批准号: U1611461) 资助

**摘要** 近年来, 网络多媒体迅猛发展. 相较于传统固定网络多媒体内容服务, 兴起的移动化多媒体服务中的用户行为发生了根本变化. 传统内容分发架构依靠中心化基础设施、全局流行度趋势, 无法有效感知和服务移动多媒体内容. 利用边缘网络架构结合数据驱动策略服务动态移动多媒体内容, 提升服务质量成为一种新的选择. 通过数据驱动与跨域协同的研究方法, 本文深入研究移动多媒体内容服务规律、系统架构、策略设计等. 本文首先探讨数据驱动的大规模移动多媒体内容分发模式挖掘与网络性能分析, 揭示边缘多媒体内容分发与传统内容分发的本质区别; 进一步, 本文给出一般性的边缘多媒体网络与内容分发的研究方法, 包括数据驱动与跨域协同的多媒体边缘网络内容分发研究框架. 最后, 本文给出几种代表性框架, 包括基于社交媒体传播预测进行内容部署的 SocialCDN, 基于内容提供商智能的 CPCDN, 基于边缘网络设备进行移动多媒体内容分发的 EdgeCDN, 以及基于用户众筹资源的 CrowdCDN.

**关键词** 多媒体网络, 大规模内容分发, 数据驱动策略, 边缘计算, 资源分配

## 1 引言

### 1.1 多媒体内容分发的社交化与移动化趋势

大规模网络多媒体是异构网络环境下大规模用户与海量媒体内容交互、传播、演化形成的媒体形态, 用以满足高动态、高并发的多模态信息访问需求, 已成为数字内容产业、宽带信息服务、公共安全等国家重大战略需求的重要共性支撑. 大规模网络多媒体本质是一个由内容、网络 and 用户 3 个域相互耦合所形成的复杂系统. 传统网络多媒体分发理论与方法一直受限于 3 个域相互独立的简化假设, 在单一域割裂地对网络资源进行局部优化配置, 导致有限的网络资源与用户高动态高并发媒体需求之间产生难以逾越的鸿沟. 而用户对媒体信息的访问频率及交互方式等行为数据已经成为内容分发的重要

**引用格式:** 朱文武, 王智. 数据驱动的网络多媒体边缘内容分发. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 468-504, doi: 10.1360/SSI-2020-0008  
Zhu W W, Wang Z. Data-driven multimedia edge network and content delivery (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 468-504, doi: 10.1360/SSI-2020-0008

驱动要素. 如何揭示媒体内容、网络拓扑和用户行为的内在相互作用机理, 发展大规模多媒体的资源跨域协同计算理论与方法, 突破信源 – 网络 – 终端独立假设的局限, 实现系统性跨域协同的资源优化配置, 是国际学术界共同关注的前沿课题.

传统的多媒体内容分发主要通过优化网络性能, 向日益增长的用户提供多媒体下载及流媒体服务. 然而, 社交网络与多媒体内容分发网络的相互渗透, 使得在线多媒体内容的分发越来越多受到社交网络的影响, 给传统多媒体内容分发系统带来巨大冲击. 传统多媒体内容分发系统由于仅被动地从内容访问角度出发, 无法主动感知用户个体行为借助社交关系相互影响产生的在线多媒体传播规律和趋势, 现有依赖多媒体内容流行度进行内容分发的方法针对社交视频内容不再完全有效, 无法适应社交化多媒体内容分发同时受到用户属性、内容属性和传播属性等影响的新特性. 传统方法网络域独立的资源分配, 因此无法突破静态规划、结构固化, 以及单向被动的局限性.

为满足社交化多媒体服务中用户区域化分布、内容动态生成与传播, 以及异构化内容处理的要求, 需要灵活、可配置的网络结构和网络资源分配策略, 根据社交关系、用户行为、内容传播制定的内容部署策略, 以及计算、存储、带宽资源优化的社交多媒体服务部署策略. 本文通过数据驱动方法, 从内容、用户、传播角度研究多媒体内容边缘分发的关键策略.

## 1.2 多媒体网络与内容分发架构的边缘化趋势

网络和存储基础设施的边缘化是近年来内容分发技术发展的趋势, 逐渐形成基于边缘网络基础设施的内容分发形态, 并推动了基于共享资源的边缘内容服务新模式. 在边缘内容分发中, 内容提供商将内容数据从距离用户较远的传统数据中心服务器推送到距离用户近得多的小基站、智能路由、机顶盒等边缘设备, 向用户提供近距离内容服务. 近年来, 这一新的内容服务模式在工业界得到验证, 以谷歌边缘网络 (Google edge network)、英特尔边缘虚拟化 (Intel network edge virtualization)、迅雷水晶、优酷路由宝等为代表的服务验证其内容分发效率, 数百万分散用户共享存储带宽资源, 参与边缘内容分发, 缓解骨干网络压力, 同时提升服务质量.

与中心化内容分发模式相比, 边缘网络设备分散导致存储和网络资源分配策略局部化, 内容分发策略受用户移动和内容交互行为影响动态化, 使得传统内容分发策略效率低. 基于边缘网络资源的内容分发给网络部署、内容放置、资源分配、数据传输等带来新的挑战. 与传统内容分发相比, 边缘内容分发同时受网络部署、内容放置、用户行为等影响, 具有以下新变化.

首先, 边缘网络和边缘设备通常分散部署, 具有网络拓扑多变和资源分布不规律的特点. 由于大量的自发部署, 边缘网络呈现资源的分布不均匀与网络的多样性. 一方面, 小型基站等蜂窝网络资源以及机顶盒、宽带网关、家庭智能路由器等用户资源采用按需逐步迭代式部署, 无法进行细致规划, 用户家庭资源主要受商业推广或者用户实际需求自主安装等模式驱动, 边缘网络资源呈现出分布不规则、不均匀等特征; 另一方面, 不同链路中的拥塞程度不同, 不同时间段网络状态也动态变化, 边缘网络资源呈现高度动态性. 如何高效地对边缘资源进行优化配置是边缘内容分发的前提.

用户行为、偏好、小群体特性, 以及内容局部流行度特征共同影响边缘内容分发策略. 与中心化内容分发相比, 边缘内容传输还受用户行为影响. 一方面, 用户行为呈现区域偏好差异: 由于不同区域的属性不同, 对应用户的偏好呈现出异构性. 基于全局流行度部署和复制内容的方法忽略了区域偏好差异, 将大大降低边缘内容分发效率; 另一方面, 用户在网络边缘呈现小群体特性: 相对于中心内容服务器而言, 边缘设备所服务的用户数量远远少于内容服务器的用户数量, 造成在边缘网络所看到的用户请求、用户行为等数据更加稀疏, 随机性大, 离群体统计显著. 传统的基于全局流行度的内容分发策略利用宏观用户群体特性不再实用. 刻画用户行为、理解内容交互规律、掌握小群体用户特征、实时预

测局部内容流行度是边缘内容分发的基础。

### 1.3 边缘多媒体分发面临的主要挑战

边缘内容分发设备容量小、用户群体变化大、内容更新快,造成边缘内容分发策略动态变化。由于用户行为的动态性,在边缘内容分发中策略的性能反馈也常常具有动态特性。(1) 用户移动使得边缘设备的群体随时变化;(2) 在线内容流行度随时空变化强度高;(3) 不同设备受各自用户群体、局部内容等影响呈现差异化,使得内容分发策略具有很强的异构性。边缘内容分发主要面临的挑战如下。

**用户生成内容的可扩展性。**未来多媒体内容分发的首要挑战来自海量的用户生成内容。社交多媒体产生量远远超过传统内容提供商所生产的内容量。庞大的用户生成内容数量,给传统内容分发网络的体系结构,以及存储、带宽资源分配带来巨大挑战:首先,这些数据需要从用户上传到社交多媒体服务系统,消耗大量上传带宽,传统内容分发网络面向用户下载的非对称带宽分配方式不适应用户生成内容;其次,由于用户生成内容数量大,传统内容分发系统的基于热点内容的分发策略在保证所有内容的可用性上面临挑战;最后,由于用户的全球化分布,依赖于多区域数据中心的网络支持,用户生成内容的海量使得多媒体数据在不同数据中心间的迁移带来巨大代价。

**内容传播的动态性。**大规模多媒体内容通过社交关系链进行传播,并直接影响受众产生对多媒体内容的访问。内容的传播由于同时受到社交关系拓扑、用户行为、内容属性等影响,具有很强的动态性特征<sup>[1]</sup>,用户属性和内容属性可以同时影响内容的传播强度。在传统内容分发中,缺少对内容传播的分析,尤其是传播受内容属性、用户行为影响的分析,难以把握在社交网络环境下内容访问的模式。

**社交多媒体内容流行度的扁平化。**由于用户关系与用户行为影响,传统内容分发系统的流行度分布在社交网络中发生了变化,其显著特性在于流行度分布的扁平化。在传统内容分发系统中,内容流行度分布具有明显热点化的特性,使得基于热点缓存的内容部署策略能够有效服务大部分用户。而社交多媒体的内容流行度,由于受用户行为影响,大量内容在小圈子中分享,呈扁平化分布,使得传统内容部署策略无法达到预期目标。

**内容处理与内容分发的融合。**新型多媒体服务系统提供大量开放接口为开发者提供了利用各种社交网络信息的能力,涌现出不同目的的社交多媒体应用,这些应用通常需要不同的内容处理方式,包括内容分析、编辑、增强等。而由于社交多媒体内容生成、传播、分发的时效性,内容处理需要与内容分发联合调度,才能即时满足用户对动态社交多媒体应用的需求。在传统内容服务中,内容分发网络通常作为一个管道,在给定模式下,简单地将内容从内容提供商传输到用户端;而在社交网络背景下,除了用户生成内容之外,由于人们对动态内容的需求,大量的内容处理在分发的路径中出现,与内容分发紧密相连。

**内容场景自身的边缘化。**社交网络开始流行之后,内容如何到达用户已经不受中心内容提供商影响:边缘用户生成内容、上传内容,并且在用户间直接分享内容,使内容分发变成一种边缘到边缘的模式。这一分发模式改变带来的挑战一方面体现在,由于不受中心内容提供商的控制,用户行为将直接影响内容访问,传统的网络资源分配策略无法及时响应内容访问受用户影响而具有的随机性和动态性;另一方面,边缘化内容分发大大增加了非流行内容的分发成本,由于系统中存在大量这类用户生成内容,给传统内容分发方法带来巨大部署代价。

**边缘网络部署复杂多样。**如何挖掘影响边缘内容分发性能的网络、用户、内容因素及其影响规律,预测用户的移动、用户-内容交互,以及内容局部流行度规律,从而对边缘网络态势的测量和深度感知是边缘内容分发的基础。而对边缘网络进行大规模测量覆盖影响存储、计算、网络资源分配策略的用户线上和线下行为等。随着边缘网络部署规模的增大,边缘内容分发节点的可信性问题日益明显且

对多媒体分发性能具有显著影响, Wang 等<sup>[2]</sup>分析了大量视频浏览历史被非可信节点获得而带来的隐私问题.

## 2 研究现状与相关工作

### 2.1 用户域与多媒体内容分发

社交媒体的理念在于用户在系统中生成内容,同时对内容进行传播,使得用户可以通过好友等社交关系,获得需要的内容<sup>[3]</sup>.在社交媒体背景下,视频内容的访问特性发生巨大的变化,下面综述社交网络自身特性及其对用户访问视频内容的影响.

#### 2.1.1 社交化多媒体内容访问与用户兴趣特性

**社交化多媒体内容访问.**在线社交网络与在线视频网络分别代表了互联网上人的网络和多媒体内容的网络,它们的流量占据着整个互联网流量的最大比例.在线视频网络与在线社交网络融合,使得工业界和学术界都开始关注社交化多媒体服务.在 Web 2.0 时代,视频服务开始越来越关注由在线社交网络引起的社会效应,Cha 等<sup>[4]</sup>研究了以 YouTube 为代表的基于用户生成内容 (user-generated content, UGC) 视频分享系统中内容的流行度、访问模式,以及针对用户生成内容的视频服务系统的设计原则.Li 等<sup>[5]</sup>研究了面向在线社交网络的视频分享,给出了内容流行度的变化规律以及用户行为数量的幂律分布,由于个性化的用户行为的广泛引入,社交网络中内容之间形成了以用户行为为纽带的关联性.Cheng 等<sup>[6]</sup>进一步研究在基于用户生成内容的视频分享系统中形成的内容之间的这种关联,他们给出,在社交化用户生成视频系统中,由于用户行为导致内容关联形成的网络,也具有类似社交网络的网络特性,如小世界特性等.由于社交网络提供了各种用户交互,Benevenuto 等<sup>[7]</sup>研究了在社交化多媒体访问中用户的交互式行为及其特点,指出在社交化多媒体系统中,用户行为有时会出现一定随机性.Lemlouma 等<sup>[8]</sup>则从用户使用社交网络的上下文角度,研究了用户行为的动态性对内容分发中资源分配的影响.Li 等<sup>[9]</sup>研究发现,由于用户设备、网络性能的差异,用户生成的视频版本也存在巨大差异,影响视频内容的分发,例如,手机上传的视频质量低,需要传输的带宽资源也相对较少.Bakshy 等<sup>[10]</sup>研究了在线社交网络中用户的影响力模型,给出在社交网络中存在拥有巨大影响力的个体,决定内容在社交网络中的传播结论.

用户偏好决定了用户对视频内容的选择,带来视频请求模式的差异,并最终影响视频分发系统的设计与性能.用户使用社交化多媒体内容时,具有一定的偏好动态性<sup>[11]</sup>,即偏好随时间、上下文不断发生变化.在社交化多媒体内容分发背景下,社交网络不但拥有用户间社交关系,同时还记录了用户的行为,可以用来学习用户的偏好模型.Debnath 等<sup>[12]</sup>指出,可以通过社交网络中用户关系推测用户对不同在线内容的偏好.然而,不同的社交关系实际上对用户偏好的反映是不同的,针对这个问题,Walter 等<sup>[13]</sup>研究了利用用户间的信任等级来过滤用户访问内容中的无关信息,从而有效利用了社交网络中的高质量社交关系,发现用户感偏好的内容.由于社交关系反映了重要的用户隐私,在这一方面,Isaacman 等<sup>[14]</sup>提出一种分布式的矩阵分解方法,只在相关用户间进行社交关系信息的交换,在保证用户隐私前提下,对用户偏好进行分析.

#### 2.1.2 在线社交网络对多媒体内容分发的影响

传统内容分发网络结构与内容部署,没有考虑社交网络中人的影响力对视频分发的影响,因此,传统网络结构与内容部署策略在在线社交网络背景下的社交化多媒体分发中,通常无法获得理想的网络

表 1 不同内容分发网络结构对社交化多媒体内容分发的能力  
 Table 1 Impact of different network topologies on social multimedia content distribution

	Scalability	Distributed	Processing capability	Stability	Cost
Centralized ([21, 22])	Normal	Weak	Weak	High	High
Peer-to-Peer ([23~25])	Strong	Strong	Weak	Low	Low
CCN ([26~29])	Strong	Normal	Weak	High	High
Cloud-based ([33~35])	Strong	Normal	Strong	High	Low
Edge-based ([30~32])	Strong	Strong	Normal	High	Low

性能与用户体验. Saxena 等<sup>[15]</sup>发现,在某些用户区域,用户进行 YouTube 视频播放时平均启动延迟超过 6.5 s,严重影响用户体验. Ager 等<sup>[16]</sup>研究指出,由于社交网络带来的内容分发模式的改变,传统的内容分发系统已经无法满足今天多样化的社交化多媒体内容分发需求.而这些性能问题,主要由网络结构与视频内容部署策略造成<sup>[17]</sup>.例如,内容在不同区域的部署和带宽分配无法适应用户访问规模的迅速变化.在社交网络视频分享背景下,社交网络记录了社交关系和用户行为的重要信息.这些信息可以用来对整个社会中的各种现象进行描述.研究者提出不同模型用于视频内容流行度预测,包括基于线性回归模型<sup>[18]</sup>和机器学习模型<sup>[19]</sup>两大类.从网络拓扑角度,社交网络的结构同样对社交化多媒体内容分发产生影响, Xu 等<sup>[20]</sup>发现了社群结构对提升移动对等网络传输的作用.

### 2.1.3 面向社交化多媒体的内容分发网络结构

在社交网络系统中,一方面,用户基数大,例如, Facebook 可以给任何一个社交媒体应用提供数十亿潜在用户;另一方面,用户分布广,不同的用户处于不同的区域、时间等.因此,内容分发系统结构需要适应基于社交网络的社交化多媒体应用的自身规模的动态扩大.在表 1<sup>[21~35]</sup>中,对不同内容分发网络结构进行了对比:在集中式 CDN (content delivery network) 中<sup>[21, 22]</sup>,内容分发节点部署在少量数据中心,以增加中心节点、带宽的方式提高服务能力,缺点主要是集中性强、成本高,且不具有内容处理的计算能力;基于 P2P 的视频分发<sup>[23~25]</sup>,尽管价格低廉,但是由于节点本身稳定差,用户友好度低(如需要安装特定程序),在高质量视频服务中存在有缺陷;近年来,内容为中心的网络 (content-centric network, CCN) 得到广泛关注,在内容为中心的网络中<sup>[26~29]</sup>,内容本身可以直接作为路由的查询目标<sup>[27]</sup>,在视频服务方面,内容为中心的网络已经在原型视频系统中得到验证<sup>[28]</sup>; Xu 等<sup>[26]</sup>进一步验证其在 5G 环境下的优势,对边缘计算未来发展具有参考意义;然而,目前内容中心网络的部署规模有限,基于云计算的内容分发平台<sup>[33~35]</sup>,由于网络、计算资源的多区域、灵活按需分配,可以有效满足社交化多媒体服务的基本需求,其主要局限是对小内容提供商的成本压力.随着基础设施的边缘化,一系列边缘内容分发策略被提出<sup>[30~32]</sup>,为解决前述挑战提供了新的思路.

### 2.1.4 社交化多媒体内容分发基本策略

传统的内容分发策略主要考虑内容本身的流行度,并根据历史流行度分配存储与带宽资源<sup>[36]</sup>.2005 年之后,用户生成内容的诞生使得海量内容由用户生成.爆炸式的内容增长使得大量冷门内容出现,这些冷门内容无法通过流行度进行差异性部署和传输. Cheng 等<sup>[37]</sup>提出利用内容之间的相关性,有效地将不同内容连接起来,指导内容预取等策略.然而,近年来兴起的社交网络,改变了传统内容分发模式<sup>[38]</sup>,例如,内容分发从“中心 → 边缘”的模式转移到“边缘 → 边缘”的方式,导致社交化多媒体内容的流行度出现扁平化.为了更好地服务这类社会化内容,出现了一些基于社交网络信息的内容

部署策略,包括基于利用用户生成内容模式进行传输策略设计.

由于在线社交网络被人们广泛用来访问视频内容,对社交关系和用户行为的研究可以帮忙人们理解以下问题:一个视频内容被不同用户分享之后,如何利用社交网络信息得知该内容会被哪些其他用户使用. Li 等<sup>[39]</sup>研究了在线视频内容在社交网络的传播特性,以及通过一个 Branching 模型,对内容传播的刻画,从而以模型的形式给出视频内容在社交网络中与用户关联的过程. 基于传播, Li 等<sup>[40]</sup>提出一种利用对等网络进行内容部署的策略,通过挖掘用户兴趣相似性和社交关系进行内容有效部署. Nguyen 等<sup>[41]</sup>研究了如何在服务器出现故障的情况下的系统恢复问题,提出利用社交关系局部性对数据进行备份,从而达到容灾目的. 在内容预取方面, Wang 等<sup>[42]</sup>也研究了高效的社交化多媒体预提策略,利用用户间的社交关系和偏好历史记录,对即将观看的视频内容的最关键数据块进行预取,降低视频播放时的启动延迟,提高用户体验. 从本节的综述可以看到,传统工作将用户与内容分离考虑,然而,在社交网络中,内容如何在用户之间传播,同时受到用户社交关系、用户行为,以及内容本身的综合影响. 为了解决这一问题,本文作者在社交媒体传输中的相关工作<sup>[32]</sup>中,提出一种基于传播的社交感知的社交化多媒体内容传输机制. 这一机制一方面通过数据驱动方法,理解传播模型;另一方面,基于对传播的理解,给出多媒体内容在社交网络中传播参数的预测,从而直接指导带宽资源分配、缓存替换等策略设计.

## 2.2 网络域与多媒体内容分发

### 2.2.1 多媒体内容分发中计算与网络资源优化

近年来,随着云计算平台和技术的发展,一种基于云计算的内容分发模式逐渐成为人们解决视频分发问题的新选择. 在这种视频内容分发模式中,存储、带宽等资源根据用户规模,动态地在不同的区域进行分配,从而经济地满足来自不同区域的用户的请求<sup>[43,44]</sup>. 在云计算模式下,硬件和软件资源通过虚拟化技术<sup>[31]</sup>,被抽象为服务提供给用户<sup>[45]</sup>. 不同的云计算提供商,向用户提供不同类型的服务<sup>[46]</sup>,包括基础设施即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS),以及软件即服务(SaaS)模式. 云计算服务类型之间也存在灵活的转换现象, Chohan 等<sup>[47]</sup>研究发现,通过模式扩展可以在分布式的物理平台上,获得一种平台即服务的效果. 云计算平台的弹性资源已经被小型在线应用提供商广泛使用,满足他们动态增长的资源需求<sup>[48]</sup>. Agarwal 等<sup>[49]</sup>研究了在云计算框架下,数据如何有效自动部署,提高用户访问性能. 工业界的相关实践还发现,同时使用多个云计算提供商,多种云计算服务,可以有效地满足应用的不同资源需求. 在利用多个云计算服务的研究中, Li 等<sup>[50]</sup>提出了一种云计算服务的对比方法,用于为云计算用户根据价格、服务质量等指标选择不同的云提供商. Rehman 等<sup>[51]</sup>进一步扩展了这些指标的使用方法,提出了一种多目标的云计算服务选择策略,满足更加复杂的用户需求. 在传统的文件下载<sup>[52]</sup>、Web 服务<sup>[53]</sup>方面,云计算平台已经展示了其高效性和经济性. 而在本文关注的视频服务中,云计算的弹性资源分配也逐渐在视频内容分发中展示出其有效性. 从 2010 年起,视频公司 Netflix 就开始在基于 Amazon 的云计算平台上部署视频服务. 一方面, Amazon 的云存储服务 S3 为视频内容提供了可扩展的存储资源,另一方面,部署在各地的 EC2 提供了不同区域用户的带宽资源. Netflix 的成功经历,验证了云计算平台可以提供进行大规模视频服务所需的存储、网络资源. 由于云计算资源的灵活配置特性, Cervino 等<sup>[24]</sup>进一步研究了一种利用云计算服务器节点与对等网节点结合的视频传输框架. Wang 等<sup>[54]</sup>研究了如何在用户对视频内容动态访问条件下,利用云计算服务支持直播类视频应用. 社交网络催生大量社交化多媒体应用,这些应用增长迅速,需要动态化、多区域网络和计算资源. 基于云计算的内容分发网络结构与资源分配模式为这一新的趋势提供了资源保障.

## 2.2.2 边缘基础架构与多媒体内容分发

急速增长的网络流量与缓慢升级的底层网络硬件设施的沟壑越来越大, 同时用户对服务质量的期望越来越高. 传统集中式内容传送方式面临着如下问题: (1) 用户所请求的内容需要跨越整个网络从原始服务器获取, 导致用户体验到的服务延迟大; (2) 原始服务器负载大, 网络中间链路拥塞状态动态变化, 造成整个服务可靠性差; (3) 原始服务器的出口带宽决定着可以服务的请求数, 系统可扩展性差. 针对这些问题, 边缘内容分发逐渐被研究者关注. 工业界和学术界开始重新思考, 探索内容分发架构. 5G 系统提出把内容推送到更靠近用户的地方, 追求将端到端延迟减少到 1 ms 以内 [55]. 分散在网络边缘靠近用户的廉价闲置资源作为潜在的可利用资源受到工业界和学术界的极大关注. 与在骨干网络部署内容分发网络节点不同, 新的研究开始着眼于收集离散的海量边缘资源, 在网络边缘进行内容分发. 这种分发模式能够减少用户感知的服务延迟, 同时缓解骨干网络的流量压力.

为了应对移动流量的爆炸增长, 移动网络运营商探索通过部署更多的小型蜂窝基站, 并在小基站上缓存内容减少高峰期骨干网络负载 [56]. 一些研究工作围绕着蜂窝网络缓存效率优化展开. 文献 [57] 综合考虑基站覆盖范围以及基站的带宽大小形式化定义路由和缓存联合优化问题, 提出最大化内容请求被小区基站服务的内容放置算法. 文献 [58] 在考虑路由、缓存的基础上, 进一步设计协同蜂窝网络中的频道分配策略, 最大化整个系统的吞吐率. 文献 [59] 从内容提供商的角度出发, 提出在多个蜂窝网络间在线协同缓存算法, 最小化内容提供商用户流失以及存储开销. 文献 [60] 采用迁移学习框架预测内容流行度, 指导在异质蜂窝网络 (基站/小基站混合) 中的内容缓存.

Li 等 [61] 针对发展中国家, 网络带宽低、服务质量不稳定等问题, 设计出网络中间件, 通过联合基于云主机以及基于智能路由器的下载方法, 实现更好的离线下载体验, 即中间件提前下载用户请求的内容; 下载完成后, 用户就可以高速获取该内容. Chen 等 [62] 利用分散在用户家庭的智能路由器的闲散带宽资源和存储资源, 开发出基于众包的内容分发模式, 并通过实际部署测量该系统的性能. Ma 等 [63] 从逆向工程的角度, 通过大规模的数据测量分析, 推断优酷利用路由宝进行内容分发时所采用的内容放置以及资源调度策略. Zhang 等 [29] 提出在网络中间协同缓存策略, 缓存算法基于底层的网络拓扑以及对等网络节点特性决策是否缓存, 实现减少内容重复缓存的目的. Gharaibeh 等 [59] 从内容提供商的角度出发, 提出在多个蜂窝网络间在线 (online) 协同缓存算法, 最小化内容提供商用户流失以及存储开销.

## 3 研究方法: 数据驱动与跨域协同的边缘内容分发框架

本文提出跨域协同与数据驱动的边缘多媒体分发的一般框架: 通过内容域、用户域、网络域数据挖掘, 研究用户域与网络域对内容分发的影响规律, 进而通过跨域协同的方法对内容分发进行指导.

### 3.1 数据驱动的大规模多媒体内容分发数据挖掘

通过数据驱动的研究方法, 本文从内容、用户、传播角度揭示社交化多媒体内容分发特性. 在研究中, 利用在线社交网络与在线多媒体内容网络中的真实数据, 对社交化多媒体内容生成、传播和传输特性进行测量. 本文将揭示社交化多媒体内容分发与传统内容分发的本质区别, 包括社交关系、用户行为对社交化多媒体内容分发的影响; 多媒体内容在社交网络中分发的边缘化、小圈子化, 以及流行度的扁平化; 用户兴趣的异构性以及社交关系对用户兴趣的反映; 以及内容传播的动态性、差异性和影响局部性.



### 3.2 用户域 + 内容域: 基于传播模式的边缘网络资源分配

解决社交化多媒体内容分发问题的关键在于理解用户域与内容分发的关联和规律,并设计相应的网络资源分配和内容部署策略.本文给出下面的研究路径,首先,通过数据驱动的大规模测量,研究在线社交网络多媒体内容传播模式,并设计基于传播模式的传播预测模型,以及通过传播预测指导社交化多媒体内容进行部署;进一步,给出基于内容和用户智能的内容部署,通过研究基于上下文信息的内容复制方法和基于用户信息的内容流行度分析方法,指导提高内容在传统内容提供商 CDN 中的部署,提升用户内容服务质量.

### 3.3 网络域 + 内容域: 基于内容访问预测的多媒体内容边缘部署

使用一种边缘基础设施进行内容分发可以有效满足社交化多媒体应用的用户全局化、规模动态增长的需求.本文给出下面的研究路径.首先,研究基于用户行为的边缘网络内容部署,通过数据驱动的方法对边缘化内容服务模式和移动视频流中的用户行为进行研究,揭示边缘内容服务中的内容请求时空模式,以及用户移动行为和地理迁移行为对边缘内容分发的影响;同时,本文给出基于众筹资源的边缘内容分发,通过对大规模边缘 CDN 的边缘设备的组织和边缘内容部署策略进行反向分析,验证边缘分发架构改善内容分发大生态的潜力.

### 3.4 本文使用的数据集描述

#### 3.4.1 社交媒体与视频网络数据集

在本文研究中,使用了以下数据集.在社交网络方面,使用了腾讯微博数据,包括原始的微博记录以及用户间社交关系.在视频内容方面,使用了多家在线视频网络中的视频数据,研究社交视频内容的分发方法.在腾讯微博中,同时允许基于关注好友和基于关注两种社交关系.通过腾讯微博技术团队,本文获得宝贵的数据资源,包括用户发表、转发和评论的微博数据,包括用户发布的每条微博记录,对应着微博的 ID、用户,以及用户的 IP 地址等信息.通过这些数据,可以研究用户在社交网络中的行为,以及视频内容在社交网络中的传播.除此之外,微博还提供了用户之间的社交关系,包括用户关注的其他用户的 ID 列表,基于此可以构建微博的社交关系拓扑.

由于本文主要研究视频内容的分发问题,在这些数据中,将主要关心其中视频内容的微博和对应用户记录,为此,本文通过不同视频网站中的视频内容对微博数据进行了过滤.腾讯微博中用户间分享的视频内容来自优酷等多个视频网站,使得腾讯微博成为了众多在线视频网站的内容汇集入口.在本文研究中,使用了其中最重要的 5 家视频网站,包括优酷、酷 6、土豆、迅雷和腾讯视频.从这些视频网站,本文采集了 350860 个视频内容信息,这些视频分散在目前流行的 14 个视频种类中,包括“娱乐”、“原创”、“音乐”等.基于以上视频集合的一个采样子集(包括 2000 多个采样视频),本文设计一种视频流行度爬虫,对该子集内的视频内容进行了以小时为时间间隔的视频播放数量爬取.

#### 3.4.2 移动视频与边缘热点数据集

移动视频数据集.这部分数据集来自合作方爱奇艺,由北京市 180 万用户两周内的视频观看记录组成,包含用户观看 40 万个视频产生的 590 万条会话记录.每条记录包含以下字段:(1) 设备 ID,可以用来跟踪每个用户的视频观看记录;(2) 用户开始观看视频的時刻;(3) 用户观看视频的地理位置信息(经、纬度信息):视频播放器通过设备 GPS 定位功能或者通过获取附近蜂窝基站位置汇报给视频服务器;(4) 视频标题.利用这个数据集,可以分析用户在不同区域的视频观看模式以及偏好.而爱奇



艺作为中国视频行业的领头公司, 对其用户数据集的分析, 具有普适效果, 能一定程度代表所有用户的观看模式以及偏好。

Wi-Fi 热点分布数据集. 这部分数据集来自另一合作方腾讯公司, 包含腾讯手机管家在北京市探测到无线热点的地理分布信息. 重要字段信息包括: (1) 硬件基本服务集标识符 (basic service set identifier, BSSID), 唯一标识一台无线热点设备; (2) 无线热点的位置信息, 即经度、纬度信息. 这部分数据集作为所有无线热点的一个采样, 为研究北京市边缘资源的分布提供了重要依据。

### 3.5 代表工作简介

下面, 本文给出几个代表性的研究工作, 对以上研究思路进行验证。

- SocialCDN: 基于传播预测的社交化多媒体内容部署. 通过测量揭示了在线社交网络视频传播模式, 设计基于传播模式的传播预测模型, 有效指导社交化多媒体内容进行部署. 这部分给出了一种基于数据驱动的视频内容部署框架, 通过预测社交化多媒体的传播规模影响区域和小圈子分享模式, 指导内容在云计算节点的复制策略和在节点间的缓存策略, 满足不同分享类型的视频内容的有效传输。

- CPCDN: 基于内容和用户智能的内容部署. 内容提供商 (content provider, CP) 构建自身内容分发网络 (CDN) 进行差异化内容分发成为今天重要的内容分发模式. 与传统内容分发网络提供商相比, 内容提供商可以利用重要的 CP 层信息, 设计智能的网络结构和内容分发策略. 这部分工作研究通过测量驱动的方法, 揭示内容提供商支持的内容分发网络 (CPCDN) 的潜在性能提升空间, 以及如何构建高性能 CPCDN 策略. 研究提出两种 CPCDN 中的内容分发策略: 基于上下文信息的内容复制方法和基于用户信息的内容流行度分析方法. 这两类方法在 Web 和社交内容分发中有效提高内容复制以及流行度预测的准确率, 提升用户内容服务质量。

- EdgeCDN: 基于用户行为的边缘网络内容部署. 当今的互联网见证了移动视频流的普及. 从区域 CDN 服务器到对等 CDN 服务器 (例如, 用户家中的智能路由器) 的边缘网络分发基础结构, 缓存内容并为用户提供附近的存储和网络资源. 在边缘网络内容缓存范例中, Wi-Fi 接入点缓存和蜂窝基站缓存已成为两种主流解决方案. 因此了解现有解决方案对于实现高性能大规模移动视频分发至关重要. 然而, 在实际的无线网络中, 移动视频流的特性和请求模式尚不清楚. 本文第 6 节使用了真实数据集对中国代表性城市内容请求模式和移动视频流中的用户行为进行研究. 为了了解用于移动视频流的边缘内容缓存的性能, 将首先介绍边缘 CDN 视角下视频请求的时空模式, 然后使用频域和熵分析方法分析它们对缓存性能的影响. 本文同时研究移动视频的用户行为, 包括其移动性和地理迁移行为对边缘内容分发的影响。

- CrowdCDN: 基于众筹资源的边缘内容分发. 针对互联网视频流量激增的现状, 视频提供商开始利用数百万边缘设备的存储和网络资源构建一种新型内容分发框架 —— 边缘视频 CDN, 通过将流行内容预部署到用户边缘, 达到减少用户内容访问延迟以及缓解 CDN 服务器和骨干网流量负载的目标. 通过对大规模边缘 CDN 的关键策略 (如边缘设备的组织管理、边缘内容部署策略) 进行分析, 这部分验证了边缘分发架构改善分发生态的潜力, 同时揭示了现有系统的缺陷. 针对现有系统基于全局流行度的中心控制推送策略未考虑边缘用户兴趣差异以及就近请求路由导致系统负载失衡的缺陷, 这部分提出基于内容聚合的存储资源协同分发的负载均衡调度策略, 有效提升边缘网络的用户请求服务率。

## 4 SocialCDN: 基于传播预测的社交化多媒体内容部署策略

近年来, 在线社交网络成为互联网上最重要的服务, 涌现出一大批在线社交网络应用, 包括基于

好友关系的 Facebook、基于关注关系的 Twitter、基于职业关系的 LinkedIn, 以及国内的人人网、新浪微博等. 在社交网络系统中, 人们不但可以维护与他人的社交关系 (包括朋友关系、关注关系等), 还可以直接获取到各种各样的多媒体内容. 其中在线视频是重要的组成部分, 其流量占互联网流量总量的 80% 以上. 在线社交网络与在线视频服务系统密切相连: 用户可以将在线视频服务系统中的内容引入到在线社交网络中, 并且通过社交关系进行传播. 这一模式带动了视频内容的社交化, 社交化视频服务从根本上改变了人们获取视频内容的方式: 在线社交网络成为人们访问视频内容的入口, 而用户间内容分享为人们提供了多样化的视频内容选择. 这些改变, 深刻影响着视频内容分发系统的策略设计.

在社交化多媒体内容服务中, 用户参与内容的产生、分发及消费全过程, 社会化视频内容服务, 已经成为互联网视频内容应用的发展趋势. 根据 ForeSee 的报道, 超过 18% 的用户在选择在线视频观看时, 会直接受到社交网络的影响. 这带来一个新的研究问题, 即如何有效地在前一节给出的网络结构、用户划分和网络资源分配基础上, 有效地进行社交化多媒体内容部署, 实现高质量社交化多媒体内容服务. 用户在不同区域的分布, 以及用户对不同区域服务器资源的偏好, 决定了网络资源的分配策略; 而用户对内容的生成、偏好、传播、访问模式则决定了内容在网络资源上的部署策略. 与传统的中心式内容共享系统相比, 在线社交网络中的内容传播特性使得社交化多媒体内容有着特殊的生成、访问模式: 第一, 内容本身不再由少量集中式的内容提供商提供, 而是由全体用户共同产生; 第二, 内容的推广也不再由内容提供商完成, 用户之间的社会关系以及用户的社交活动决定了内容在用户间的传播. 在这一背景下, 社交化多媒体内容部署面临以下挑战.

**大规模社交化多媒体内容生成.** 由于在社交化多媒体服务中用户成为视频内容的生产者, 每个人都能贡献视频, 使得社交化多媒体系统中出现大量内容. 庞大的视频内容基数, 以及随着移动设备、无线网络发展而迅速增长的用户生成速度, 给传统内容部署策略带来巨大压力.

**用户兴趣时效性.** 在社交网络中, 新生成的视频往往是吸引最大用户群的内容, 但是, 由于缺少历史访问信息, 无法对这些内容的真实流行度进行估计, 从而很难对这些内容进行提前部署<sup>[64]</sup>.

**小众内容影响.** 在社交化多媒体内容分享中, 个性化内容是人们分享的重要内容形式, 而这些个性化内容, 通常只在很小的圈子内流行, 例如, 在家庭成员之间, 这些内容无法很好地被今天流行的内容分发架构处理.

第 1 个挑战使得早期经典的全量内容部署模式不适用, 因为海量内容的全量化部署将带来巨大的存储和网络资源开销, 一种有效的解决方法是将社交化多媒体内容按传播和访问特性, 有差异地部署到不同的服务区域, 充分利用分布式的网络和存储资源进行内容的异构化服务, 在分布式网络结构和网络资源分配环境下, 不同内容可以动态地被全球各地的服务器存储、服务, 一方面分散了大规模内容数量的压力, 另一方面提高具有不同内容偏好用户的服务质量. 第 2 个和第 3 个挑战使得传统内容分发网络中的基于流行度的内容部署不能有效发挥作用. 由于社交网络环境下内容流行度差异的急剧变化, 在线社交网络中内容无法根据历史流行度得到有效部署. Mislove<sup>[65]</sup> 已经观察到, 在社交化多媒体内容缓存中, 利用流行度的部署方法, 会带来巨大的缓存命中率下降: 基于传统缓存策略, 将有高达 68% 的请求无法在缓存中命中. 基于数据驱动的测量, 本文发现与传统内容访问不同, 社交化多媒体内容的访问不是一种随机的模式, 相反, 内容沿着人与人之间的社交网络拓扑, 根据一系列规则传播.

在线社交网络获得的统计信息, 可以用于指导社交化多媒体内容部署, 本文进行了大规模的测量研究, 探索内容传播和内容部署之间的联系, 发现了社交化多媒体内容的传播模式, 包括社交关系局部性 (内容在传播中在社交关系上传播距离有限)、空间局部性 (内容在社交网络传播中的地域集中特性), 以及时间局部性 (内容在社交网络传播中的短时效特性).

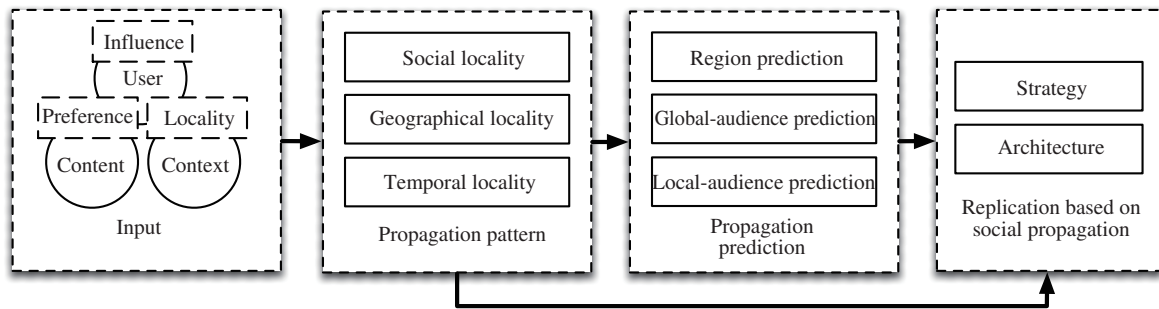


图 1 逻辑框架

Figure 1 Research framework

基于社交化视频的传播模式, 本文设计了多媒体内容在社交网络中传播的预测模型, 包括传播区域预测、全局用户预测, 以及局部用户预测. 该模型回答了以下问题: 对于一个视频内容, 是否需要将它部署到边缘云服务器? 如果需要, 应该选择哪些边缘云服务器? 对于部署某一内容的服务器, 应该保留多少带宽资源用于内容的传输? 哪些视频内容需要对等网中节点的资源协作内容传输? 进一步, 本文给出了一种基于传播的社会化内容分发框架. 该框架利用了边缘云计算服务器和对等网络中节点资源共同完成视频内容分发, 基于传播预测, 内容被部署到不同地理位置的边缘云服务器和对等网节点: 一方面, 根据传播区域预测与全局用户预测, 设计一种基于边缘云的内容部署策略, 确定该地区内容复制方法; 另一方面, 本文设计节点协作机制, 根据局部用户的兴趣, 决定视频内容在对等网节点上的缓存替换策略.

#### 4.1 基于传播特性的社交化多媒体内容部署框架

基于微博中视频传播及用户社交关系, 本小节将首先给出社交化多媒体传播中与内容部署最密切相关的特性, 然后, 将设计基于传播特性的内容部署策略. 图 1 给出了本小节的研究框架. 以下按逻辑流程进行分析介绍.

**输入.** 用户、内容信息是框架设计的主要输入部分. 具体来说, 在用户方面, 可以得到用户间的社会关系和影响力, 以及用户对不同视频内容的偏好; 在内容方面, 可以得到内容特性, 以及内容本身流行度信息; 同时, 本文还使用了不同云计算服务器和用户的空间 (区域) 分布信息, 以及用户对不同服务器区域的偏好, 例如从不同内容分发网络服务器获得不同下载质量.

**传播模式.** 由于社交网络中内容传播决定了内容最终访问规模和用户分布, 对视频内容传播模式的研究将决定内容的部署策略. 基于输入信息, 本文研究视频内容在社交网络中的传播模式. 我们发现内容在传播中具有社交关系局部性、空间局部性, 以及时间局部性, 这部分内容将在下文中详细给出.

**传播预测.** 传播模式定性地分析了视频内容在社交关系上传播具有的特性, 为了决定内容的复制和缓存策略, 还需要进一步得到传播的定量分析. 本文基于传播模式, 提出一组传播量的预测模型, 包括传播区域预测 (即内容在传播中影响到的用户所在的区域)、全局用户的预测 (即内容在传播中, 影响到的用户规模), 以及局部用户预测 (即内容在小圈子传播时在好友间的分享比例).

**基于传播的内容部署.** 以传播模式为基础, 本文提出一种结合边缘云服务器和对等网络节点资源对社交化多媒体内容进行复制和缓存的方法. 基于传播预测, 本文分别设计边缘云节点的内容复制策略以及节点的缓存策略.

## 4.2 社交化多媒体传播对内容部署影响

**(1) 社交关系局部性.** 在社交网络中, 视频内容的引入和传播形成一棵以引入用户为根节点的传播树. 每一个参与视频内容转发的用户都会成为这棵树的节点. 因为一个视频内容发布之后, 在不同的时间点, 会被不同的用户分别引入到社交网络中, 形成不同的传播树. 以下给出对大量传播树研究之后, 得到的传播树形态特性.

**传播树规模.** 见参考文献 [32] 中的图 6, 图中给出了 5 种不同类型的视频内容在社交网络中的传播树规模的分布情况: 其中, 每个样本代表了该传播树规模 ( $X$  轴) 对应的传播树的个数 ( $Y$  轴). 可以看到, 只有少量的传播树的规模比较大, 而绝大多数的传播树的规模都非常小. 根据统计, 超过 90% 的传播树的规模小于 100.

**传播树高度.** 进一步, 本文研究了传播树的高度. 一个传播树的高度定义为该视频内容在社交关系链上, 所有节点与根节点之间的平均距离 (即社交关系的平均跳数). 参考文献 [32] 中的图 7 给出了这 5 种类型的视频的传播树高度分布. 与图 6 类似, 图中每个样本代表了视频的传播树的高度 ( $X$  轴) 与传播树的数量 ( $Y$  轴). 可以看到, 绝大部分的传播树的高度非常小. 通过统计本文得到, 绝大部分传播的社交关系链不超过 10 跳 (hop).

综上所述, 从传播树形态上分析, 绝大多数的视频形成了规模很小的传播树; 而即使是流行的视频, 它们通常也不会形成很高的树, 即传播关系链长, 而是一系列形状低矮粗壮的传播树, 即传播树种节点与根节点社交关系很近. 这些研究结果给社交化多媒体内容部署带来以下启示: (i) 绝大多数社交化多媒体内容的传播具有明确的特定社会圈子和范围, 为了有效传输这些内容, 需要研究传播圈子的大小和空间 (区域) 分布; (ii) 在社交网络中, 存在大量的传播规模小、社交关系紧密相连的视频传播圈子, 传统内容分发网络技术无法有效处理这些小众内容, 一种节点之间相互协作的策略是解决这些内容传输的有效手段.

**(2) 空间局部性.** 本文利用用户的社交关系、用户位置属性信息, 进一步研究视频内容传播在空间区域上的特性. 研究传播在空间上的特性对视频内容的部署具有重要意义, 例如, 当内容提供商进行内容迁移和复制时, 需要决定内容在哪些区域服务. 由于不同的用户从不同的服务器区域获得的服务质量存在差异, 研究内容传播时的区域特性可以提高内容部署效率, 进而提高用户体验. 下面, 从内容传播过程中影响到的区域数量角度进行分析.

通过研究视频内容在传播中用户的区域分布, 可以推测内容部署时需要复制的区域情况, 因为通常用户偏向于从本地服务器或节点获取数据, 从而达到好的内容服务质量. 图 2 给出了腾讯社交化多媒体内容传播中, 所有用户所处的区域数量统计. 图中每个样本代表了一个视频内容在微博传播到的区域个数 ( $Y$  轴), 样本按传播区域个数降序排序 ( $X$  轴). 可以观察到, 对于绝大部分视频内容, 在传播过程中, 加入的用户所处的区域数量非常少. 通过统计, 超过 90% 的内容都只在 5 个区域内传播. 这部分研究表明, 在社交化多媒体内容部署中, 绝大部分视频内容在小圈子分享, 需要被部署到的区域数量很少.

**(3) 时间局部性.** 为了有效随时间变化进行内容部署策略的调整, 本文进一步研究了社交化多媒体内容在时间上的传播特性. 在本文统计中, 总体而言, 最近引入的社交化多媒体内容, 更容易引起更多用户的转发行为. 文献 [66] 的图 3.2 给出这一现象, 其中每个样本给出内容在特定的时间段内被用户转发的数量 ( $Y$  轴), 与转发发生的时间与内容被引入的时间差 ( $X$  轴) 之间的关系. 可以看到, 绝大部分的转发都发生在内容引入的最近几个小时内. 经过统计, 超过 95% 的社交化多媒体内容转发行为发生在内容引入的最初 24 个小时以内. 转发数量与时间间隔的关系, 可以用一个 Zipf 分布近似给出

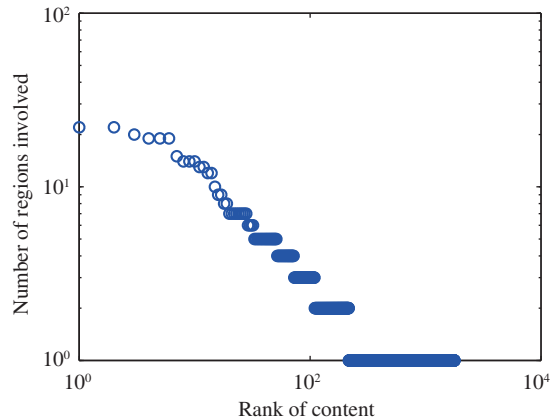


图 2 (网络版彩图) 社交化多媒体内容传播区域数量

Figure 2 (Color online) Number of regions involved in propagation versus the rank of content

(时间以小时为间隔做离散化). 在这组数据中, 参数为  $s = 1.5070$  的 Zipf 分布给出一个最佳拟合. 这一结果表明, 用户对社交化多媒体内容的转发行为具有高度的时间聚集性. 对内容部署的影响是: 大量的社交化多媒体内容观看行为会发生在一个很小的时间段内, 而之后, 这些内容通常会变成冷门内容. 在后文的设计中, 将利用这一特性指导内容部署.

不同研究者还对其他代表性社交网络中内容传播进行了研究, 验证以上传播特性的一般性. 首先, 针对具有单向社交关系 (如“关注 (follow)”) 的社交网络, 本文已经对微博进行了大规模数据测量, 发现了传播树高度的类幂律分布, 即大量传播树高度低. 而与本文最接近的针对单向社交关系的工作中, Ye 等<sup>[67]</sup> 对 Twitter 进行了测量, 发现了类似的传播时间规律, 验证了传播的“时间局部性”, 并最终会导致大量高度低的传播树. 其次, 针对具有双向关系 (如“好友”) 的社交网络, 作者对其他设计网络的测量工作进行了跟进, Li 等<sup>[39]</sup> 对具有双向关系的“人人网”内容传播进行了大规模测量, 发现了传播树高度呈类韦伯分布 (Weibull), 趋势与本文结果也类似.

#### 4.3 边缘云与对等网结合的内容部署框架

基于社交化多媒体内容传播模式, 本文给出社交化多媒体内容部署框架. 为了有效地同时传输社交化多媒体应用中的流行内容与非流行内容, 在前文基于多云提供商的分布式网络结构 (简称边缘云结构) 基础上, 本文提出一种扩展方法, 即使用边缘云与对等网结合的内容部署结构, 对两类视频内容有效部署. 在边缘云上, 内容可以按照用户请求, 在不同的区域得到部署并且分配网络资源; 而在对等网节点上, 处于相同圈子的用户之间可以相互协助. 由于处于相同社会圈子的用户通常不但具有更近的物理距离, 还具有更好的网络连接 (如高带宽), 能够有效进行节点间协作并进行数据传输.

图 3 给出了这一体系结构的概念图. 可以看到, 在这个设计中, 存在处于不同逻辑层面的两种覆盖网络.

**社交网络.** 这个覆盖网络基于社交关系, 决定了内容在好友间的传播. 而通过上文中的传播特性, 本文将设计一系列基于该覆盖网络的传播预测方法.

**传输网络.** 这个覆盖网络是基于云平台与用户节点的, 决定了内容如何部署和传输. 本文给出的这一内容部署架构, 可以利用边缘云服务器稳定性和资源扩展性, 向处于不同区域的用户进行流行视频内容服务; 而在对等网中, 节点资源则提供了对非流行内容的有效存储和服务能力, 在小范围内, 用

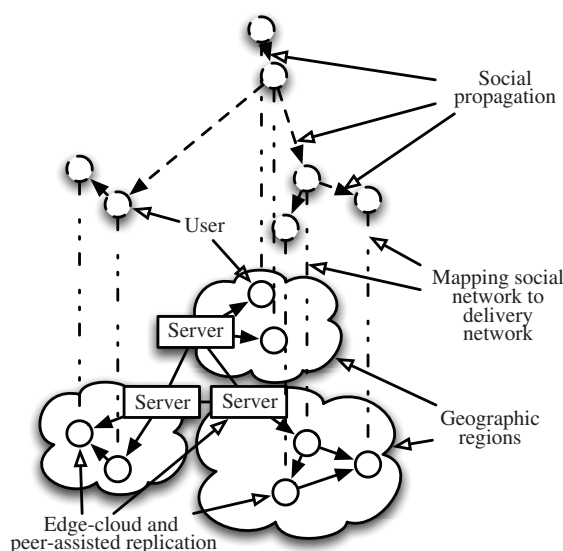


图 3 基于传播的内容部署策略

Figure 3 Propagation-based content deployment

户可以利用节点间的优质网络质量相互获取视频内容。

### (1) 边缘云内容复制策略

**目标.** 在边缘云服务器的内容部署上, 视频内容一般需要被复制到多个区域. 内容在不同区域复制的主要目标在于, 使得位于不同区域的用户在下载视频内容时, 可以从离他们网络距离近的边缘云服务器获得数据, 从而达到好的视频服务体验.

**设计原则.** 在传统基于流行度的内容部署模式中, 边缘云服务器根据内容的流行度以及服务器负载情况, 将内容复制到不同的区域. 传统设计原则的缺点在于, 社交网络中视频内容流行度具有短时特性 (即时间局部性, 见第 4.2 小节), 对绝大部分社交化多媒体内容, 历史流行度无法反映未来用户访问该内容情况. 为了解决这一问题, 本文设计一种基于传播的内容复制方法. 该方法依靠社交网络中的用户和传播信息, 包括用户的空间分布及社交关系, 预测内容传播区域和传播量, 从而决定视频在边缘云的部署.

### (2) 节点内容缓存策略

**目标.** 使用对等网中节点的资源进行社交化多媒体内容部署, 目标有以下两层: 第一, 用户生成大量视频内容, 这些内容完全依赖边缘云节点进行分发需要消耗大量服务器资源, 给社交化多媒体应用提供商带来很大部署成本, 使用节点内容部署可以节省中心服务器资源, 扩展社交化多媒体系统分发能力; 第二, 大部分社会化视频内容只在小圈子中传播, 当内容在这些小圈子中分享时, 用户具有紧密的社交关系, 这通常意味着他们具有更近的物理距离和网络距离<sup>[68]</sup>, 例如, 这些用户可能处于相同的小区网络或家庭网络环境, 当这些用户进行相互协作时, 可以获得很好的网络质量<sup>[69]</sup>, 提高视频服务性能.

**设计原则.** 在传统的对等网视频分发中, 节点的缓存策略通常基于最久使用替换算法 (least recently used, LRU) 以及最近最少使用替换算法 (least frequently used, LFU) 等常规方法. 这些策略与前文边缘云策略遇到的问题相似, 它们也依赖于历史流行度的准确性. 而由于社交化多媒体内容的动态性, 需要设计新的缓存机制.



**复杂性分析.** 本文提出一种基于局部传播预测的缓存替换机制. 对局部用户访问社交化多媒体的预测, 依赖于用户对好友节点的兴趣的了解. 在社交网络中, 社交关系、用户行为等信息正好提供了获得这种偏好的能力. 本文设计除了提高缓存的命中率, 还同时考虑节点的负载. 本文通过让节点缓存服务网络资源稀缺的小圈子内容, 达到平衡整个对等网节点负载的目的. 在实际系统的复杂性方面, 在不同的区域得到部署并且分配网络资源部分的复杂度主要由全局的用户分配 (用户与边缘服务节点的关联指派) 造成. 由于用户与边缘服务器之间同样存在“距离”关系 (如基于带宽), 用户分配问题可以转化为容量限制的 Voronoi 划分, 而寻找其最优解是 NP 完全问题<sup>[70]</sup>. 传统的 Voronoi 划分需要提前指定若干个称为“种子”的节点, 然后以这些点为中心分割区域. 本文给出了一种性能优化的算法, 无需提前知道小区域的个数以及每个小区域的中心点, 因此称为类 Voronoi 区域划分策略, 具体见第 6.3.5 小节. 第二, 处于相同圈子的用户之间可以相互协助, 在每个划分的圈子内部, 传输通常依赖传统的对等网络协议; 在系统实现中已经存在一系列高效的节点发现算法, 包括中心化的方法<sup>[29]</sup>和基于分布哈希表的分布式方法<sup>[71]</sup>.

## 5 CPCDN: 内容提供商信息支持的内容分发网络

大型多媒体内容提供商 (CP) 正在建立和定制自己的内容分发网络以向其用户提供内容服务, 形成了基于内容提供商的内容分发网络的新趋势 (在本文中, 我们将术语 CPCDN 称为由内容提供商智能提供支持的内容分发网络). 作为内容提供商, 尽管有潜力提高各种内容提供商的内容分发质量, 但尚未对此类 CPCDN 中的分发策略进行深入研究. 本文将重点放在 CPCDN 允许的设计空间上, 并提出可以提高内容分发质量的代表性分发策略.

今天的互联网见证了这类定制化的内容分发网络的迅速兴起, 例如, YouTube 长期以来一直使用其 Google Global Cache 来交付视频. Netflix 通过使用自己的内容交付框架——OpenConnect 与 Internet 服务提供商 (Internet service provider, ISP) 直接协作来分发流数据. Facebook 正在开放计算项目 Open Computing 中增强其边缘网络. 基于边缘云服务提供商 (如 Amazon CloudFront) 提供的弹性存储和网络资源, 即使是小型的内容提供商也可以自定义自己的 CDN<sup>[43]</sup>. 内容分发的以下新特征和趋势推动了内容分发网络向 CPCDN 的迁移, 这些新特征和趋势对传统的内容分发提出了挑战.

首先, 对于内容提供商而言, 以实时方式为不同的自定义上下文“生产”内容正变得越来越普遍, 例如, 针对不同的用户设备和网络条件动态处理图像和视频. 由于针对不同上下文的这种内容产生是在线和实时方式进行的, 而 CP 和 CDN 之间固有的去耦使得传统的 CDN 不适合确保良好的用户体验. 相比之下, CPCDN 知道消费内容的确切上下文, 便能够利用上下文智能捕获在不同上下文中如何动态处理和合成内容, 从而优化用户体验和内容交付过程中的服务质量.

其次, 在内容生态系统中, 用户不再只是消费者, 而是已经成为内容生成和分发中必不可少的参与者<sup>[72]</sup>. 由于不考虑用户的参与, 对传统 CDN 来说很难利用固有的用户内容偏好模式和用户-用户社会影响力来优化用户体验和服务质量. 利用用户智能捕获内容如何在社交网络用户之间动态共享和分发, CPCDN 可以将内容分发效率和用户体验提升到一个新的水平.

为了研究 CP 级智能如何给内容分发带来性能提升, 本文对代表性内容提供商腾讯的热门在线多媒体服务进行测量研究. 其内容分发的新特征如下. (1) 投放环境. 本文研究给出, 内容不再单独分发, 而是通过各种上下文进行. (2) 群体模式. 本文研究给出, 即使在内容组件级别, 也存在有规律的内容群组模式, 即特定的用户群对特定的内容组的固有偏好. (3) 社会影响力. 本文的测量研究还显示, 在线社交网络用户社交行为对内容是否会变得流行具有重大影响.



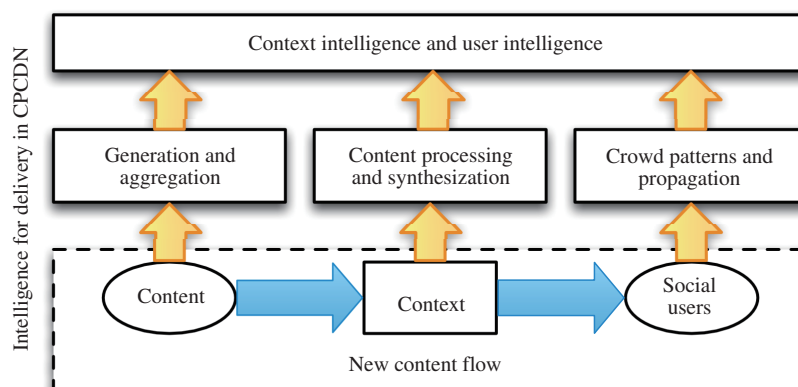


图 4 (网络版彩图) 通过内容数据流驱动的 CPCDN 设计  
Figure 4 (Color online) CPCDN based on data-driven strategies

为了了解 CP 级别的智能如何帮助内容分发并挖掘其潜力, 本文系统地探索了 CPCDN 的设计空间, 并提出了使用“上下文智能”和“用户智能”来应对出现的新挑战的体系结构和算法。(1) 利用内容在不同上下文中具有不同重要性的事实, 本文建议通过机会性地选择对等服务器并排队请求, 根据上下文感知的内容重要性对内容分发进行优先级排序。(2) 基于人群模式, 本文根据兴趣组主动复制内容, 以便用户可以从附近的 CPCDN 服务器获取他们感兴趣的内容。(3) 基于内容分发的社会影响, 本文设计了一种利用用户的社会关系和用户社会活动的新的流行度推断策略, 以指导带宽预留。

### 5.1 研究背景与框架

在传统的内容传递中, 内容由内容提供者产生后, 将通过 CDN 直接传递给一组用户。而该 CDN 充当了连接“管道”, 忽略了消费内容的上下文和用户行为。CDN 无法获得用户的行为反馈信息。

然而, 今天的内容分发路径如图 4 所示, 用户生成的内容<sup>[4]</sup>通过一定的内容分发上下文<sup>[72]</sup>, 最终达到内容消费者用户<sup>[73]</sup>。这一变化挑战了传统的内容分发范式。具体来说, 内容分发受到分发上下文和用户行为的影响。

- **内容分发具有一定的上下文:** 在内容提供商或用户生成内容之后, 与其他内容组件 (文本、图片等) 组合, 最终将在给定上下文中提供给其他用户。后文的测量将表明, 内容组件将以不同的上下文进行组合。

- **内容分发是用户行为敏感的:** 用户已成为重要的内容生产者和传播者<sup>[4,64]</sup>, 而不仅仅是内容的被动接收者。用户活动和社交传播已极大地改变了人们消费内容的方式<sup>[32]</sup>: 用户参与了从内容生成到内容分发的内容传递。

CPCDN 的想法可以极大地改善用于上下文感知和社交内容传递的常规 CDN。如果 CDN 可以从 CP 收集有关用户和上下文的信息, 则他们也将能够执行本文中提出的改善内容分发的策略。但是, 由于用户和上下文信息通常受 CP 保护, 因此这种合并有时是不够的。因此, 本文仅关注 CP 和 CDN 紧密耦合的 CPCDN 框架, 在该框架中可以实时使用用户和上下文信息。

由于大多数上下文和用户信息仅对内容流中的内容提供者可用, 因此 CP 可以从大量数据中开发出智能策略, 从而指导内容分发。CP 可以利用的资源包括: 内容是如何生成和聚合的, 在不同上下文中如何处理和合成内容, 以及社交网络用户之间的内容传播方式。因此, CPCDN 能够利用上下文和用户智能来避免简单管道式内容分发: 它不仅优化了底层内容分发策略, 而且还提高了对上层内容特

性的理解. CPCDN 系统架构的设计仍然需要解决以下新出现挑战: (1) 如何定义分发上下文并加以利用; (2) 如何衡量用户对内容分发的影响, 以及 (3) 如何利用在线社交网络中的信息来改善内容分发. 特别是, 必须解决了以下研究问题才能在大规模、动态发展的系统中实现 CPCDN: 挖掘内容分发上下文, 根据用户 - 内容关联的群体模式来改善内容的分发, 利用社交影响力更好地进行社交/社交化内容分发.

为了解决这些问题, 本文提出了基于上下文和用户智能的 CPCDN 分发策略. 一方面, 本文通过了解内容在不同上下文中分发时的重要性设计内容复制和用户请求计划策略. 另一方面, 本文让 CPCDN 预测社交网络用户之间共享的内容的流行度, 以便更好地分配网络资源.

## 5.2 大规模 CPCDN 测量研究

为了对当前加入 CPCDN 的动机有具体的了解, 本文对中国最大的内容提供商之一腾讯提供的大规模服务进行评估研究. 该公司提供包括网络服务在内的流行在线内容服务、在线社交网络服务和在线视频流.

### 5.2.1 内容分发相关的代表性系统

本文使用以下代表性的内容服务来进行 CPCDN 的度量研究.

**WWW 服务.** WWW 的巨大成功使 Web 对象成为内容分发的主要形式, 并且动态生成网页已成为一种新趋势<sup>[74]</sup>, 即相同的内容组件 (简称组件) 可以组成不同的网页, 而一个网页最多可以包含数百个多媒体组件. 这些组件是在不同的上下文中动态组织和分发的.

**在线社交网络服务.** 在一个在线社交网络中, 内容由用户生成并通过社交连接<sup>[75]</sup> 传播. 从某种意义上说, 它改变了内容的分发方式, 即社交关系和用户行为将影响哪些内容将由哪些用户查看.

**在线视频流.** 在线视频服务的流量仍然占据着互联网的大部分带宽, 是重要的多媒体在线服务和应用. 在视频流服务中, CDN 将视频用作“块”进行分发. 如何有效处理上下文和社交属性是当今 CDN 的一大挑战.

### 5.2.2 数据驱动的测量

本文在腾讯 CPCDN 中针对上述内容服务进行了数据驱动的测量研究, 在研究期间, 该 CPCDN 服务已在中国电信、中国联通和中国移动等国内主要 ISP 以及数家海外 ISP 上部署了数以万计的服务器.

▷ 为了研究内容分发中的上下文智能, 本文使用了来自腾讯公司 WWW 服务的数据测量日志. 特别地, 本文从腾讯门户网站收集了数据, 该网站为网页提供了各种经常更新的多媒体内容. 本文的踪迹包含这些网页在不同时间的内容结构 (即网页是如何由不同的内容组件组成的). 此外, 为了研究内容上下文, 本文从部署于不同区域的对等服务器收集了超过 3.39 亿条 TCP 连接记录. 这些 TCP 连接记录包含用户下载内容的大小、速度等信息.

▷ 为了研究用户在内容分发方面的情况, 本文从腾讯微博获得了用户行为数据, 包括用户对内容的共享和传播行为.

### 5.2.3 动态内容分发上下文

向用户提供快速的网页浏览体验非常重要, 而用户体验取决于用户请求网页的时间与用户的浏览器成功呈现网页的时间之间的延迟. 今天大部分网页包含数百个内容组件, 包括基本的 HTML 代码,

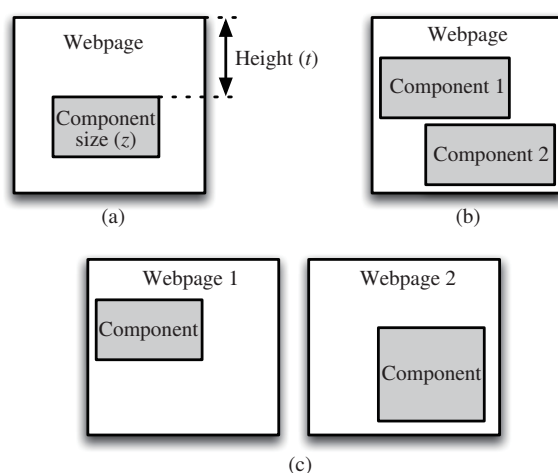


图 5 网页中内容组件的重要性

Figure 5 Importance of content elements in web content distribution

以及图像等多媒体对象. 这些组件需要花费一定时间下载. 内容提供商将动态组件动态地组合成高度自定义的内容上下文. 例如, 根据个人的设备、偏好、时间和地理位置信息为个人动态生成的门户网站. 因此, 可以考虑内容组件的语义信息、实时性、互连性和其他影响因素来推断特定应用场景的组件重要性. 对于传统的 CDN 来说, 由于不知道内容组件的上下文, 难以进行有效的组件优先级划分.

(1) 内容“组件”重要性差异. 本文研究了在不同情况下组件的重要性. 在本文的研究中, 使用一种上下文是根据内容组件的大小和在网页中的位置来推断的, 这是一种简单而有效的上下文推断. 网页  $w$  中组件  $c$  的重要性级别计算如下:  $I(c, w) = z(c, w) \times t(c, w)$ , 其中  $z(c, w)$  是网页  $w$  中组件  $c$  的归一化大小, 而  $t(c, w)$  是网页  $w$  中组件  $c$  的归一化高度, 如图 5(a) 所示.

基于以下内容组件的重要性假设: 如果组件对内容提供者和查看者在视觉上更重要, 则该组件具有较大的重要性级别. 尽管本文的方法不限于此定义, 但本文介绍基于此简单计算得出初步结论: (1) 同一网页中的组件具有不同的重要性级别. 其中只有少数内容组件具有非常重的重要性级别, 而它们的分发性能则决定了网页查看的整体体验. (2) 同一内容组件在不同的网页上下文中重要性级别差异很大, 这意味着其分发对于不同的上下文具有动态的优先级.

(2) 内容“组件”优先级分析. 由于组件是及时生成的, 因此能够事先知道分发上下文的 CPCDN 可以通过优先安排不同组件的内容分发, 通过组件的优先级排序使 CPCDN 允许用户从更快的内容服务器下载更加重要的内容. 本文对 CDN 服务器的 TCP 连接进行测量, 衡量用户下载网页中不同组件的时间开销. 在参考文献 [76] 的图 3 中, 两条曲线分别是头部 30% 内容组件的全部完成下载的时间 (用于近似页面开始渲染的时间) 和头部 30% 个组件的下载速度. 本文观察到开始渲染时间比页面中前 30% 个组件的平均下载时间大 2~10 倍. 由于缺少一些未下载的组件 (例如框架 HTML、CSS 样式文件和关键的多媒体内容), 浏览器无法开始渲染页面. 该观察表明可以通过优先安排重要内容的分发减少页面渲染时间.

在 CDN 系统中, 服务器部署在不同的地理位置和不同的 ISP 中. 针对特定网络接入的用户, 从不同服务器获得的网络性能可能会有所不同. 表 2 说明了同一组用户在一天之内的从 CPCDN 中 7 个 CDN 网站下载的平均下载速度 (Kbps). 可以看到, 当用户从部署在不同站点中的服务器下载时平均下载速度在 250 Kbps 到 500 Kbps 之间变化. 服务器的性能对于用户而言是异构的, 从不同服务器下

表 2 典型 ISP 区域下载速度 (2013 年 5 月 4 日) (Kbps)

	Beijing	Zhejiang	Guangxi	Shaanxi
China Telecom	366.8	281.4	338.7	249.4
China Unicom	512.2	-	462.8	-
China Mobile	-	491.8	-	-

载内容时分发延迟会发生很大变化。

进一步根据服务器的 TCP 连接日志, 本文比较了在相同时段内从不同的对等服务器下载文件的大约 150 用户的下载速度. 在参考文献 [76] 的图 4 中, 每个样本都是在同一 ISP 中从上海部署的内容服务器下载的用户平均下载速度, 与从深圳的内容服务器下载的相同用户的平均下载速度. 可以看到, 对于超过 79% 的用户, 当它们从位于不同区域的服务器下载时, 其下载速度相差 2 倍以上, 这表明用户对等服务器的偏好是显著的。

总而言之, 本文观察到以网页为代表的分发具有以下上下文特性: (1) 组件在动态上下文中分发, 并且在不同上下文中组合时对用户具有不同的重要性; (2) 用户对 CDN 中内容服务器的偏好不同, 即他们从不同服务器获得差异巨大的服务质量; (3) 由于组件可以实时地组合到不同的上下文中, 因此知道上下文信息并控制用户重定向的 CPCDN 可以主动优化组件分发的优先级。

#### 5.2.4 内容分发受用户行为影响分析

(1) **群体聚集效应.** 常规的 CDN 以被动方式提供内容, 对于当今流行度快速变化的内容分发效率不高. 在当今的内容分发中, 在一组用户和一组内容之间存在特定的群体模式. 为了说明群体模式及其在内容分发中的潜在效用, 本文对用户如何在社交媒体上共享视频进行了研究. 本文将用户 - 内容活动信息汇总为一个用户 - 内容矩阵, 其中条目 1 表示相应的内容已由用户共享. 本文将共同聚类算法 [77] 应用于随机选择的 500 用户和这些用户所共享的内容形成的矩阵. 聚类结果显示在文献 [76] 的图 5 中. 每个浅色样本表示内容已由特定用户共享. 图中深色样本是相同的 500 用户在 1 日之后的聚集情况. 本文观察到存在多个用户内容集群, 同一用户集群中的用户倾向于使用相应内容集群中的内容. 该观察结果表明, 即使不知道具体用户和内容信息, 也可以将用户分为具有相似兴趣的群组. 由于 CPCDN 知道用户对内容的活动, 便能够通过挖掘这些活动预测用户的偏好, 以进行有效的内容部署。

(2) **CPCDN 中内容传播的特性.** 文献 [1] 的图 2(b) 说明了当内容由不同用户共享时的情况. 在此实验中, 同一视频可以由不同的人不时分享到在线社交网络. 此图中的每个样本都代表了吸引共享的人数与最初共享内容的用户之间的关系. 可以看到当相同的内容由不同的用户共享时, 接收者的数量也会有很大变化. 实际上, 在传统的 CDN 中感知内容的流行不再容易. 传统策略的有效性是基于这样的假设: 即内容的流行度会持续较长时间. 但是, 这种假设不再成立, 社交化的内容的寿命很短, 在线社交网络中的人动态影响其流行度. 接下来, 本文提出可以利用社交影响力 (例如, 当用户在在线社交网络中共享特定内容时可以吸引多少观众) 来学习社交内容的流行度。

**影响力与社交联系.** 本文首先研究用户的社会影响力与其社交关系之间的相关性. 图 6 说明了用户吸引的所有转发数量与其关注者数量. 本文观察到, 一般趋势是, 在对关注者人数大于 50 的用户进行抽样时, 拥有更多关注者的用户能够吸引更多的转发。

**全局影响力与本地影响力.** 可以从其本地影响力 (即仅受社会传播吸引的直接关注者/朋友的数量) 推断出全局影响力 (即吸引加入特定内容传播的直接和间接关注者/朋友的数量). 图 7 说明了从

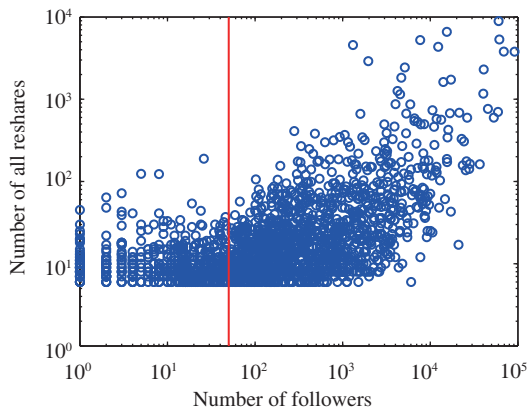


图 6 (网络版彩图) 内容传播的转发数量与用户关注者数量关系

**Figure 6** (Color online) Number of all reshares versus number of followers

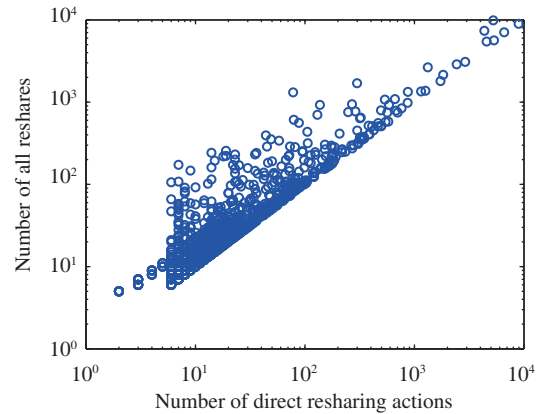


图 7 (网络版彩图) 全局参与的转发数量与本地参与的转发数量关系

**Figure 7** (Color online) Number of all resharing actions versus number of direct resharing actions

微博跟踪中随机选择的 1226 个有影响力用户的总体影响与局部影响. 此图中的每个样本代表用户的整体影响力与用户的局部影响力. 本文观察到两个影响之间的相对较强的相关性, 表明局部影响可以很好地估计内容的整体影响.

以上基于 CPCDN 的数据智能可以有效提升边缘多媒体分发性能, 目前已经广泛被边缘内容分发系统应用.

## 6 EdgeCDN: 用户偏好与行为联合驱动的内容分发策略

### 6.1 理解边缘内容分发模式

为了使用新的边缘网络解决方案为用户提供良好的体验质量, 需要回答以下问题: (1) 移动视频流中的视频请求模式是什么? 用户在当今的移动视频系统中的行为有何新特征? (2) 移动视频会话中的用户体验质量如何? (3) 当今的移动网络基础设施能否适当满足移动视频流传输的需求? (4) 可以采用什么策略来最好地支持移动视频内容分发?

首先, 本文使用真实数据集研究现实世界中的移动视频流系统中的用户行为, 涵盖了将近五千万次服务会话. 使用频域和熵分析<sup>[78,79]</sup>, 本文显示出移动视频请求独特的时空模式, 这些模式会显著影响边缘网络中内容缓存策略的性能. (1) 本文发现移动视频系统中的地理请求分布偏斜, 并且请求的数量受用户的常规移动方式的影响很大. 例如, 火车站的请求数量远远大于住宅区的请求数量. (2) 本文发现, 人气较低的视频的请求位置分布更均匀, 而人气较高的视频的请求位置分布偏斜. (3) 在频域分析中, 随着时间的流逝, 具有不同功能的位置的请求数量具有 3 个主要时段规律.

其次, 本文进一步研究用户行为如何确定上述请求模式. 本文发现, 用户的移动性和地理迁移行为都可以显著影响移动视频请求. 特别是, 用户的移动性行为是异构的. 对于地理迁移行为, 本文发现用户具有有规律的通勤行为, 涉及他们经常要求移动视频的 2~3 经常访问的位置. 这些观察结果表明, 在多个位置执行联合缓存策略可以提高缓存性能.

最后, 本文比较了 Wi-Fi 和基于蜂窝的边缘网络缓存解决方案的有效性, 并讨论了移动视频流到当今无线网络的潜在改进. 本文研究了传统的缓存策略, 包括最近最少使用 (LRU) 和最不常用 (LFU),

进行边缘网络移动视频分发. 本文首先显示, 当今大多数 Wi-Fi 和蜂窝部署都足够接近不同位置用户的移动请求. 但是, 尽管 Wi-Fi 和蜂窝网络具有不同的部署策略, 它们都不能很好地为不同类别的移动视频用户提供服务. 其次, 本文显示出许多因素, 包括用户移动性、内容流行度、缓存容量和缓存策略, 都会影响 Wi-Fi 和移动视频分发的蜂窝缓存的缓存性能.

## 6.2 移动行为对内容分发影响分析

### 6.2.1 行为强度分析

在本文的实验中, 本文仅研究移动活跃用户的行为, 该行为在本文的两周跟踪中每天至少请求 10 个视频. 在近一万名活跃用户中, 有 30% 多位置用户和 70% 单一位置用户.

(1) **用户移动位置统计.** 本文首先研究多位置用户的移动强度. 在文献 [80] 的图 9(a) 中绘制了用户的比例与在不同位置内容请求数量之间的关系. 可以看到, 移动次数通常在 [1, 30] 范围内, 而 [2, 3] 范围内的用户比例最大. 而工作日和周末结果非常相似. 在文献 [80] 的图 9(b) 中, 条形图是用户的比例与一天中请求视频的位置数的关系. 如图所示, 多达 50% 的多位置用户仅在 2 个位置发布了视频请求, 而 80% 的用户从少于 4 个位置请求了视频. 这些结果表明多位置用户从不同位置请求视频很普遍, 但是位置数量 (每位用户) 非常有限.

(2) **移动距离分析.** 本文进一步测量以不同时间间隔连续访问的位置之间的距离的累积分布. 文献 [80] 的图 10(a) 绘制了用户连续请求移动视频的位置之间距离的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF). 我们选择 3 个间隔将用户划分为相同的顺序: [0, 10] min, [10, 60] min 和 [60,  $\infty$ ] min. 小的时间间隔表示用户经常在不同位置之间移动. 本文发现当间隔短于 10 min 时, 移动的距离远短于其他间隔; 但是随着间隔时间的增加, 距离并不总是线性变大. 因此可以推断大多数用户在较小的时间间隔内在 2 或 3 个位置之间移动.

本文还研究了连续的移动视频请求之间的间隔. 在文献 [80] 的图 10(b) 中绘制了具有不同移动速度的用户连续请求之间的间隔. 本文选择两个参考速度: 步行的平均速度 (即 5.6 km/h) 和地铁的平均速度 (即 40 km/h). 如图所示, 当速度低于 5.6 km/h 时, 大多数请求间隔很小. 例如, 在 1.5 小时内产生了 80% 的请求间隔, 而对于 [5.6, 40) km/h 的移动速度, 仅在 1.5 小时内产生 40% 的请求间隔. 这些观察结果表明用户的移动速度也影响请求模式.

### 6.2.2 移动迁移模式

对于在不同位置请求视频的多位置用户, 本文研究了他们的迁移模式, 即他们如何在不同位置之间移动.

(1) **位置迁移分析.** 文献 [80] 的图 11 绘制了在不同位置共享相同迁移模式的用户比例, 包括最流行的 7 种迁移模式, 这些迁移贡献了位置之间所有迁移中的 70%. 本文发现, 在两个特定位置之间的往返几乎构成了所有迁移行为的 50%. 这些结果为本文提供了在不同位置之间建立连接以实现缓存协作策略的基本特征.

(2) **地理熟悉迁移分析.** 本文研究了不同区域功能之间的迁移. 根据位置的 PoI 信息, 本文计算了用户从一种位置功能迁移到另一种位置功能的迁移次数. 如表 3 所示, 每个条目都是两周内的迁移次数, 例如, 从医院区域到商业区域的迁移量为 2223. 可以看到, 用户在具有相同 PoI 类型的位置之间移动是普遍的, 并且在某些特定位置功能对之间存在较大的迁移次数.



表 3 迁移矩阵

Table 3 Mobility migration matrix

From/To	Business	Hospital	Residence	Campus	Attraction	Shoppingmall	Hotel
Business	4908	2205	5114	1379	595	1082	657
Hospital	2223	1741	3479	802	394	698	360
Residence	5145	3425	9994	1787	995	1727	907
Campus	1369	797	1743	843	230	367	222
Attraction	596	399	984	215	183	187	123
Shoppingmall	1101	692	1671	358	234	494	169
Hotel	616	367	928	214	114	202	213

### 6.3 大规模边缘访问点中的无线缓存

网络边缘缓存内容成为当前应对网络视频流量激增的主要手段, 本文通过大规模数据测量分析, 挖掘用户区域性视频偏好差异以及无线热点的地理分布特性, 探索基于无线热点构建边缘 CDN 视频分发节点的可能性. 在此框架下, 每个无线热点通过缓存内容扮演边缘 CDN 节点的角色. 为了实现该架构, 本文提出资源按需部署策略、资源全局调度策略和内容协同部署策略, 在网络边缘分流骨干网络流量, 实现削减网络峰值流量的同时, 提升终端用户体验.

大量专用移动视频软件以及高消耗带宽的在线服务 (高清视频、虚拟现实等) 的出现, 促使在线视频应用发展成为互联网的“杀手级”服务. 据估计到 2021 年, 移动视频流量将占整个互联网移动流量的 78%. 为了应对移动流量爆炸性增长, 缓存技术由于以下优势备受关注: (1) 内容缓存技术高效支持媒体应用; (2) 内容缓存能够减少穿越互联网的流量, 有效降低骨干网络负载; (3) 内容缓存可以就近服务用户请求, 减少用户体验到的服务延迟, 提升服务体验; (4) 采用服务器主动复制的缓存模式可以分流峰值负载, 减少预留带宽开销. 这种把内容推向更靠近用户的地方已经成为内容分发领域的主流. 例如, CDN 服务提供商引入毫微微蜂窝 (Femtocell) 和小基站, 把服务设施部署到更靠近用户的地方, 实现在蜂窝网络边缘缓存内容. 带有大存储空间智能路由器的出现, 进一步成为工业界、学术界的研究热点. 例如, 中国最大的在线视频内容提供商之一, 优酷开发并部署路由宝到用户家里, 通过统筹调度, 辅助核心 CDN 节点进行内容分发. 与传统路由器用来进行数据转发、分配网络地址相比, 智能路由器具有独立操作系统, 并配备了多达 1 TB 的存储空间. 这些部署在“最后一跳”的家用智能路由器中成为实现边缘存储的潜在资源.

但是, 目前很少有研究工作对基于智能路由器的边缘视频 CDN 系统性能以及设计空间进行探索. 本文对北京市 180 万用户的视频观看记录进行测量分析, 揭示边缘用户区域视频兴趣差异性, 验证了部署靠近用户的网络架构进行个性化内容分发的必要性. 如文献 [81] 的图 8 所示, 本文提出了边缘网络视频内容分发新架构. 在这种新型架构下, 用户家里所部署的智能路由器, 扮演着小型内容分发节点的角色, 通过缓存内容服务邻近用户请求, 提升用户体验. 该系统具体工作流程如下:

▷ 分散在用户家里的边缘无线热点收集用户视频观看记录 (文献 [81] 的图 8 中第 ① 步), 并且周期性将这些记录上报给中心调度服务器 (文献 [81] 的图 8 中第 ② 步).

▷ 中心调度服务器根据无线热点汇报的日志信息, 决策最优的无线热点组织、调度策略, 即无线热点区域划分策略, 同时预测每个内容在不同区域的流行度 (文献 [81] 的图 8 中第 ③ 步).

▷ 中心内容分发服务器根据预测的区域内容流行度, 决策最优的协同内容 - 区域放置策略, 即决策内容推送到某个区域 (文献 [81] 的图 8 中第 ④ 步) 或者如果当前该区域资源不够时, 先推送到其邻



居区域, 然后再由邻居区域复制给该区域 (文献 [81] 的图 8 中第 ⑤ 步).

▷ 当用户请求内容时, 首先检查附近的无线热点是否已经缓存, 如果已经缓存, 则直接从无线热点获取内容 (参考文献 [81] 的图 8 中第 ⑥ 步); 如果没有缓存或者当前无线热点上传带宽不够, 则需要向中心 CDN 节点请求内容.

然而, 目前大部分用户家庭依旧使用的是传统的家用路由器, 如何在有限预算的前提下, 选择把部分传统路由器升级为智能路由器充满挑战. 为了探索该问题, 本文收集了分散在北京市的 100 万个无线热点的地理位置信息. 通过分析这些热点的地域分布, 了解智能路由器升级的可能位置, 指导后续升级策略的设计.

进一步, 在完成智能路由器升级部署工作后, 本文感兴趣的研究点在于如何统一组织、调度这些边缘资源进行内容分发, 即哪些内容应该复制到哪些智能路由器上; 如何进行内容复制操作. 这里涉及到一个权衡问题: 一方面, 如果尽可能细粒度的管理路由器, 同时尽可能多的从服务器复制内容到边缘路由器上, 用户的大部分请求能够被边缘路由器服务, 达到服务时延短、带宽高、整体用户体验好的效果; 另一方面, 所有从服务器复制到边缘路由器的内容会带来额外的流量开销, 边缘路由器调度粒度太细, 会导致重复的内容复制到多个路由器上, 增大网络负载. 本文基于实际用户视频访问模式, 以及边缘资源分布特征, 提出边缘路由器划分的资源全局调度策略以及区域间协同的内容复制算法.

### 6.3.1 边缘资源可用性验证

本小节探索利用边缘无线热点实现边缘视频分发的可能性. 文献 [81] 中图 1(a) 和 (b) 分别给出北京市某一普通区域用户请求与边缘资源分布. 图中数据点分别表示用户请求的地理位置以及无线热点的地理位置. 可以发现, 用户请求位置与已经部署的无线热点的位置有一定的匹配性. 文献 [81] 中图 5 给出把北京市分割为  $128 \times 128$  个小区域的粒度下 (每个小区域面积为  $1600 \times 700$  平方米), 每个小区域的无线热点个数分布. 可以发现, 超过 72% 的小区域至少有一个无线热点, 最多的小区域有多达 10000 个无线热点. 这个结果验证了边缘资源的海量性, 同时揭示了区域资源的异质性, 表明对边缘资源的管理方式需要根据不同区域的特性进行设计. 进一步, 文献 [81] 中图 6 给出用户请求位置与最近热点距离的累积分布. 可以发现, 70% 的请求能够在 100 m 以内找到至少一个无线热点, 90% 的请求可以在 286.6 m 找到无线热点. 文献 [81] 中图 7 从另一个角度, 即每个请求附近 300 m 以内的无线热点个数, 探索边缘资源的可用性. 可以发现, 在请求 300 m 以内可以发现的热点数量分布在 1 到 1000 个之间. 这些结果进一步验证了利用边缘无线热点分发视频的可行性.

### 6.3.2 基于用户请求分布的资源部署策略

将无线热点升级为带有大存储空间智能路由器, 就近服务用户, 对低带宽、网络连接不稳定以及 ISP 间互联质量低的场景, 提升用户体验质量尤为重要<sup>[61]</sup>. 但是如何在预算有限的前提下, 合理选择需要升级的路由器节点, 影响着边缘内容分发系统是否能够大规模部署. 综合考虑升级成本与用户体验, 本文将热点升级问题形式化表示为优化问题, 并提出启发式算法进行求解. 最后通过实际数据驱动的实验, 对热点升级策略进行评测.

### 6.3.3 问题定义

**符号定义.** 令  $\mathcal{A} = \{1, 2, \dots, A\}$  表示传统家庭路由器集合.  $\mathcal{A}^* \subseteq \mathcal{A}$  表示最终选择进行升级的路由器节点. 升级之后的智能路由器  $a \in \mathcal{A}^*$  的存储空间为  $o_a$ , 上传带宽为  $u_a$ , 对应的升级成本为  $f_a$ . 令  $\mathcal{E} = \{1, 2, \dots, E\}$  表示用户请求集合, 用户  $e$  与无线热点  $a$  的距离  $d_{ea}$  表示用户请求分配开销. 为了

表 4 本文的重要符号表  
Table 4 Important notations in this paper

Notation	Definition
$\mathcal{A}$	Set of candidate edge devices
$\mathcal{A}^*$	Set of edge devices for content distribution
$\mathcal{R}$	Set of regions
$\mathcal{E} = \{1, 2, \dots, E\}$	Set of user requests
$\mathcal{U}$	Set of users
$\mathcal{V}$	Set of content items
$\mathcal{P}$	User partition
$W(r) \rightarrow v$	Mapping from request $r \in \mathcal{E}$ to content $v \in \mathcal{V}$
$E_a$	Number of aggregated requests $a \in \mathcal{A}^*$
$f_{ij}$	Number of requests redirected from edge device $i$ to $j$
$o_a, u_a$	Storage and bandwidth capacity of device $a$
$f_a$	Upgrade cost for device $a$
$d_{ea}$	Distance between user $e$ and edge device $a$
$s_a \in \{0, 1\}$	Decision variable for device $a$
$x_{ea} \in \{0, 1\}$	Decision variable for device $a$ to serve user $e$
$\lambda \in [0, 1]$	Optimization weight
$w_e$	Preference for request $e$ to be redirected
$\alpha, \beta, \gamma$	Control parameters

方便表示, 假设任一视频  $\forall v \in \mathcal{V}$  的大小为单位视频大小. 该假设的合理性是: 一个视频可以被分为多个大小相等的分块, 而每个分块可以作为这里的单位视频. 本文的具体符号表见表 4.

**优化问题.** 由于有限的预算不能对所有的传统无线热点升级, 需要从传统热点集合  $\mathcal{A}$  中选取子集  $\mathcal{A}^* \subseteq \mathcal{A}$  进行升级. 该过程涉及到一个权衡: 一方面, 升级的热点个数越多则边缘缓存的内容越多, 用户请求被附近热点服务的概率越大, 用户请求分配开销 (例如, 服务延迟) 越小; 另一方面, 升级的热点个数越多需要更多的资本投入. 为了取得用户体验与系统成本的平衡, 本小节将路由器升级选择问题形式化表示为设施放置优化问题 (facility location problem):

$$\min \lambda \sum_{a \in \mathcal{A}} f_a s_a + \sum_{e \in \mathcal{E}} x_{ea} d_{ea}, \quad (S)$$

使得

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} x_{ea} = 1, \quad \forall e \in \mathcal{E}, \quad (1)$$

$$\sum_{e \in \mathcal{E}} x_{ea} \leq s_a, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \quad (2)$$

$$\sum_{e \in \mathcal{E}} x_{ea} \leq u_a s_a, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \quad (3)$$

$$s_a, x_{ea} \in \{0, 1\}, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall e \in \mathcal{E}, \quad (4)$$

其中,  $s_a$  和  $x_{ea}$  都是二值变量, 前者取值为 1 表示选择升级热点  $a$ , 后者取值为 1 表示用户请求  $e$  被重定向给热点  $a$ .  $\lambda$  是权重参数, 调整升级成本与用户体验的权重, 其取值越大, 表明升级成本更受重

视, 倾向于升级较少的无线热点. 约束条件 (1) 保证每个用户请求都能够被一个热点服务. 约束条件 (2) 保证用户请求  $e$  被热点  $a$  服务的前提是该热点已经被升级. 约束条件 (3) 保证所有分配给某个热点的请求量不能超过该热点的带宽上限. 优化的目标是决策最优的解  $(s_a, x_{ea})$ , 使得在当前权重  $\lambda$  下, 实现系统成本的投入降低和用户体验的提升.

### 6.3.4 启发式热点部署策略

由于设施放置问题是一个 NP-hard 问题, 本文基于工作 [82] 提出适用于本问题的近似解决方案. 具体过程分为以下 3 步:

第 1 步, 松弛原问题 (S) 的整数约束, 将原问题转化为一个线性规划问题. 该问题的对偶问题为

$$\max \sum_{e \in \mathcal{E}} w_e - \sum_{a \in \mathcal{A}} z_a, \quad (\text{D})$$

使得

$$w_e \leq d_{ea} + \beta'_{ea} + \gamma'_a, \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall a \in \mathcal{A}, \quad (5)$$

$$\sum_{e \in \mathcal{E}} \beta'_{ea} \leq \lambda f_a + z_a - u_a \gamma'_a, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \quad (6)$$

$$w_e, \beta'_{ea}, \gamma'_a, z_a \geq 0, \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall a \in \mathcal{A}, \quad (7)$$

此对偶问题的最优解为  $(w_e, \beta'_{ea}, \gamma'_a, z_a)$ . 其中,  $w_e$  表示请求  $e$  希望被重定向给某个热点的意愿. 本文使用 GLPK 工具<sup>1)</sup> 求解原问题以及对偶问题, 获取原问题的解  $(s_a, x_{ea})$ .  $w_e$  的值在下一步进行求解.

第 2 步, 将原问题中解  $s_a > 0$  的无线热点划分为围绕用户请求  $e$  的类, 每个类的中心点为用户请求  $e$ , 围绕该请求的无线热点集为  $N_e$ . 具体划分过程为: 令  $O$  为目前聚类中心, 初始值为空集; 对每个不属于聚类中心的用户请求  $e \notin O$ , 计算剩余未被划分, 同时距离用户请求  $e$  比已有中心更近的无线热点集合  $B_e$ . 从候选的中心点集合  $S$  里, 重复选择某个用户请求  $e$  使得最终形成的无线热点类  $N_e$  的  $w_e$  值最小. 其中被每个类包含的热点集合服务的用户请求为  $\sum_{a \in N_e} \sum_e x_{ea}$ ,  $S$  的初始值为  $S = \{e \in \mathcal{E} : \sum_{a \in B_e} x_{ea} \geq 1/2\}$ .

第 3 步, 决策每个热点是否被升级为无线热点. 具体过程为: 对于聚类后的无线热点  $a$ , 如果  $s_a = 1$ , 则升级该热点为智能路由器; 将每个类中剩下的无线热点看成一个整体, 同时将这些热点服务的用户请求集合  $D_{\mathcal{E}'} = \sum_{a \in N_e: s_a < 1} \sum_e x_{ea}$  都虚拟为来自该类中心点; 对所有热点按照升级此热点的成本  $f_a/u_a + d_{ea}$  增序排序, 依次将  $\min(u_a, D_{\mathcal{E}'})$  的请求重定向给已排序的无线热点  $a$ , 并将此请求移出待重定向集合  $D_{\mathcal{E}'}$ , 即  $D_{\mathcal{E}'} = D_{\mathcal{E}'} - \min(u_a, D_{\mathcal{E}'})$ , 直到所有请求都被分配完成  $D_{\mathcal{E}'} = 0$ .

### 6.3.5 类 Voronoi 区域划分策略

容量限制的 Voronoi 划分是 NP-hard 问题 [70], 本小节综合考虑用户视频偏好差异以及选择升级的无线热点分布, 提出一种类 Voronoi 的启发式分割方法. 传统的 Voronoi 划分 [83] 算法需要提前指定若干个称为“种子”的点, 然后以这些点为中心分割区域. 无需提前知道小区域的个数以及每个小区域的中心点, 因此称为类 Voronoi 区域划分策略. 通过对区域进行划分, 每个区域的无线热点被看成一个整体, 一方面, 实现资源的整体调度; 另一方面, 减少从 CDN 节点向边缘无线热点复制重复内容带来的冗余流量开销. 类 Voronoi 区域划分策略过程如下:

1) <https://www.gnu.org/software/glpk/>.

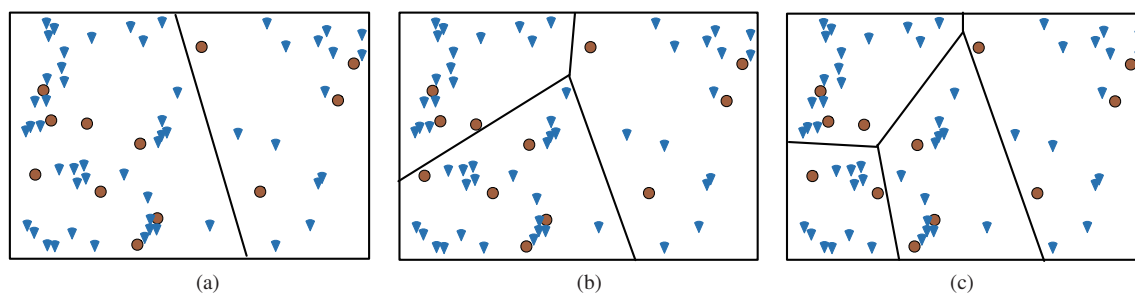


图 8 (网络版彩图) 类 Voronoi 算法分割过程示例, (a)~(c) 为划分结果: 将原始区域划分为 2, 3, 4 个子区域  
**Figure 8** (Color online) Voronoi-based region segmentation: (a)~(c) show the segmentation results, where the original region is divided into sub-region 2, 3 and 4

(1) 令最初整个区域以及用户集合分别为  $\mathcal{R}_0$  和  $\mathcal{U}_0$ , 划分方式  $\mathbf{P}$  初始值为  $\{(\mathcal{R}_0, \mathcal{U}_0)\}$ . 调节参数  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  作为算法输入参数.

(2) 根据在区域  $i$  中用户实际请求日志的视频信息以及地理位置信息, 生成划分  $\mathbf{P}$  中的样本点,  $(\mathcal{R}_i, \mathcal{U}_i) \in \mathbf{P}$ .

(3) 对每个 (子) 区域采用 K-means 聚类, 其中  $k = 2$ , 即每个样本点根据其地理位置之间的距离聚成两类. 令区域  $(\mathcal{R}_i, \mathcal{U}_i)$  经过聚类划分后为  $(\mathcal{R}_i^1, \mathcal{U}_i^1)$  和  $(\mathcal{R}_i^2, \mathcal{U}_i^2)$ . 如图 8(a) 所示, 蓝色三角形符号表示用户请求, 红色圆形符号表示无线热点.

(4) 在所有区域都被预划分为两个子区域以后, 选取所有预划分中能够最大化划分增益的那种划分方式进行划分 (图 8(b) 左半部分划分方式), 其他预划分操作取消. 划分增益  $\Delta g_i = g(\bigcup_{j=1}^2 \{(\mathcal{R}_i^j, \mathcal{U}_i^j)\}) - g(\{(\mathcal{R}_i, \mathcal{U}_i)\})$ . 该式第 1 项为划分两个子区域后的效用函数值, 第 2 项为划分前的效用函数值.

(5) 将上一步中新划分的两个子区域添加到目前划分集合  $\mathbf{P}$  中, 反复迭代执行第 (3) 和 (4) 步 (图 8(c) 所示), 直到增益不再增加. 可以引入一个大于 0 的阈值参数判断增益是否增加, 控制迭代次数.

本小节提出了基于用户请求分布的边缘热点资源部署, 基于区域划分的无线热点资源全局调度以及峰值负载转移的协同内容复制策略. 通过测量, 本文观察到边缘用户视频偏好的差异性, 揭示了在网络边缘进行更加个性化的视频分发的必要性. 在此基础上, 通过对无线热点地理位置与用户请求位置的分析, 在考虑无线热点升级成本的前提下, 本文设计了最优的资源部署策略. 进一步, 为了方便统一规划, 调度边缘无线热点资源, 同时减少服务器向边缘进行内容复制的成本, 本文对不同区域的无线热点进行划分, 将相同区域的无线热点看作一个整体.

## 7 CrowdCDN: 利用用户贡献资源的内容分发新模式

视频流已经成为最大的互联网流量类别. 为了满足急剧增长的数据密集型视频流的带宽需求, 视频内容提供商花费大量成本购买 CDN 基础设施服务. 而近年来出现了一种新兴的经济型视频分发模式: 基于家庭智能路由器的视频内容分发网络, 即边缘视频 CDN. 该模式由部署在用户家中的智能路由器构建边缘 CDN “内容热点” 协助视频分发. 视频提供商通过低额的金钱奖励刺激用户贡献其智能路由器的存储和网络资源进行视频分发服务. 其中最典型的代表, ChinaCache (中国最大的 CDN 提供商之一) 和优酷 (中国最大的视频提供商之一) 于 2015 年宣布合作, 创建一个基于家庭智能路由器的大规模商用边缘视频.

不同于构建在用户设备上缺乏可控性的传统 P2P 边缘网络, 边缘视频 CDN 中的数百万边缘设备稳定在线, 并由视频提供商进行集中式的统一调度. 内容提供商可调度边缘视频 CDN 中的边缘路由器主动预取视频内容, 并重定向用户请求到特定的智能路由器获取服务. 这种内容交付范式可以从根本上改变内容服务, 应用程序部署, 甚至用户在系统中扮演的角色, 例如, 用户不仅可以成为内容发布者, 而且可以成为他自己产生内容的托管方. 这些可能的优势激励本文测量分析目前的大规模边缘视频 CDN, 获取其系统架构、使用策略以及策略局限性等内部信息.

因此本节的第一个目标是探索基于优酷路由器的边缘视频 CDN, 通过设计主动和被动的测量实验获得有效的设备工作流量, 逆向分析其系统架构以及所用策略, 发现全局可控的内容部署策略对边缘视频 CDN 至关重要, 这种系统天然形成用于端到端 QoS 监控的有效子模块, 有潜力进行细粒度的用户请求重定向和内容复制, 以及目前系统的策略缺陷明显, 依据滞后的全局内容流行度进行边缘视频部署.

进一步, 通过用户实际的视频观看分布数据, 本文发现在这种服务架构中, 用户到边缘内容热点的请求路由策略对用户体验至关重要, 问题的特别性在于: 一方面, 边缘内容热点的带宽容量是有限的, 受用户动态分布的影响, 位于人群拥挤区域的边缘内容热点在服务附近的用户请求时容易出现负载过重的情况, 而位于人群稀疏区域的内容热点不能被很好地利用; 另一方面, 边缘内容热点覆盖的小区区域体现出用户内容偏好差异性大的特征, 导致传统 CDN 中仅考虑用户请求的负载均衡策略低效. 针对现有系统的缺陷, 本文提出基于负载均衡和内容聚合的内容热点协同分发策略, 实现在不带来过多内容复制开销的情况下均衡调度用户请求. 本节贡献总结如下:

▷ 对真实世界中基于家庭智能路由器的边缘视频 CDN 进行测量研究, 涵盖了 182k 个视频, 132 个 CDN 服务器和 4 M 个用户, 逆向破解了系统结构、网络协议、路由器组织方式以及内容部署策略, 看到了控制平台灵活调控路由器内容缓存的潜力, 揭示了全局一致的内容部署策略, 同时发现现有策略有忽视区域流行度以及对内容流行度变化响应速度慢的缺陷.

▷ 收集 18 M 用户观看 59 M 视频时的地理位置请求数据, 通过对服务这些视频请求的智能路由器调度行为进行测量, 发现: (1) 临近内容热点覆盖区域的用户分布密度差异性大, 使得跨内容热点协作的用户请求均衡成为可能; (2) 临近区域用户的内容偏好可能会有很大的不同, 使内容部署成为决定请求重定向的重要因素.

▷ 将边缘视频 CDN 中的用户请求重定向和内容部署形式化表示为最小成本最大流 (minimum cost maximum flow, MCMF) 的网络流问题, 并提出了一种联合考虑请求均衡和内容聚合 (request-balancing and content-aggregation, RBCAer) 的边缘内容热点协同分发算法. 该算法促使内容偏好相似的内容热点之间进行用户请求流量重定向, 实现跨内容热点的负载均衡, 并控制负载均衡带来的内容部署开销.

▷ 设计广泛的数据驱动模拟实验验证本文解决方案的有效性和效率, 可证明本文的设计优于传统的内容分发请求重定向解决方案, 例如, 与就近/随机等常用策略相比, RBCAer 可以提高边缘热点的请求服务率, 将内容访问延迟降低 42%, 并将 CDN 服务器负载减少 20%.

## 7.1 系统模型和问题建模

对于边缘视频 CDN 来说, 通过将内容推送到网络边缘, 降低用户的内容访问延迟以及 CDN 服务器的负载是最重要的目标, 另外考虑到边缘内容热点的存储资源租用成本, 本文考虑内容访问延迟和内容部署开销两方面因素来定义用户请求重定向问题. 为使问题易于建模, 本文做了如下的说明和假设:

▷ 在用户视频会话期间, 视频请求和内容热点之间的连接不会更改, 并且一个请求仅由一个热点或原始 CDN 服务器提供.

▷ 若每个用户请求需要单独进行路由决策, 那么过于庞大的用户请求数量 (与内容热点的数量相比) 将导致决策低效, 因此将它们聚合到最近的内容热点, 并在热点之间进行协作, 将各自接收的用户请求进行热点间请求重定向以实现负载均衡.

▷ 假设每个视频具有相同的大小, 即单位 1 (如果不是, 原始视频可以被分成固定大小的视频片段), 并且每个用户请求的需求同为单位 1.

▷ 文件的流行度分布变化缓慢<sup>[84]</sup>, 可以通过一些流行度预测算法学习 (如回归模型 ARIMA<sup>[85]</sup>). 在获得用户重定向和内容部署决策之后, 热点将内容预取到本地缓存以服务用户的视频请求.

### 7.1.1 系统模型

假设边缘视频 CDN 提供商在网络中的固定位置拥有内容热点集合  $\mathcal{A}^*$ ,  $h \in \mathcal{A}^*$ , 并且所有热点通过网络相互连接. 根据每个热点  $a$  在一个时隙内可以处理的请求数量和缓存的内容个数, 将热点  $a$  的服务容量定义为  $o_a$ , 存储容量定义为  $u_a$ . 这些内容热点与原始 CDN 服务器协同工作, 并从全局视频库  $\mathcal{V}$  中选出流行内容进行缓存. 为了便于表达,  $\mathcal{V}$  中每个视频  $v \in \mathcal{V}$  的大小是 1 个单位.

在每个时隙  $t$  中, 假设有用户请求集合  $\mathcal{E}$ . 令函数  $W(r) = v$  表示用户请求  $r \in \mathcal{E}$  和请求视频  $v \in \mathcal{V}$  之间的映射. 用户首先向调度服务器发起内容请求, 若请求的视频  $v$  出现在合适的内容热点中, 则该请求被立即服务; 若内容  $v$  未出现在合适的热点中, 则调度服务器会将请求转发给原始 CDN 服务器. 为方便统一建模, 设置 CDN 原始服务器为一个容量的特殊内容热点  $S$ .  $d_{ra}$  表示将请求  $r$  重定向到热点  $a$  所引起的内容访问延迟.

直观上, 系统中有两个二元决策变量:

- 用户请求重定向策略表示为  $\|\mathcal{E}\| \times \|\mathcal{A}^*\|$  维的 0-1 矩阵  $\mathcal{X}$ , 变量  $x_{ra}$  表示用户请求  $r$  是否被重定向到热点  $a$ , 若是, 则  $x_{ra} = 1$ , 否则  $x_{ra} = 0$ . 如果没有热点可服务请求  $r$ , 它将被重定向到原始 CDN 服务器  $S$ , 即  $x_{rS} = 1$ .

- 内容部署策略表示为  $\|\mathcal{V}\| \times \|\mathcal{A}^*\|$  维的 0-1 矩阵  $\mathcal{Y}$ , 变量  $y_{va}$  表示视频  $v$  是否被分配给热点  $a$ , 若是则  $y_{va} = 1$ , 否则  $y_{va} = 0$ . 假设原始 CDN 服务器缓存有所有的视频.

### 7.1.2 问题定义

本文在用户重定向问题中考虑最小化内容访问延迟和内容部署开销.

**累计内容访问延迟.** 部署边缘视频 CDN 的最关键目标是缩短内容热点与用户请求之间的距离, 从而使用户体验低内容访问延迟 (同时降低 CDN 和骨干网的负载). 这个因素可以计算如下:

$$\Omega_1 = \sum_{r \in \mathcal{E}} \sum_{h \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} x_{rh} d_{va}. \quad (8)$$

**内容部署开销.** 在边缘视频 CDN 中, 大量的内容热点将带来大量边缘缓存空间的租用成本, 并且对 CDN 服务器产生了不可忽略的压力<sup>[63, 86]</sup>. 因此, 内容部署开销也是一个重要因素, 计算如下:

$$\Omega_2 = \sum_{v \in \mathcal{V}, \sum_{h \in \mathcal{A}^*} y_{va}} y_{va}. \quad (9)$$

因此用户请求重定向和内容部署的联合优化问题可以形式化表示为以下优化函数 (U):

$$\min_{\mathcal{X}, \mathcal{Y}} \alpha \Omega_1 + \beta \Omega_2, \quad (\text{U})$$

同时,

$$\sum_{a \in \mathcal{A}^*} x_{ra} + x_{rS} = 1, \quad (10)$$

$$x_{ra} \leq y_{W(r)a}, \quad \forall r, h, \quad (11)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{E}} x_{ra} \leq s_a, \quad (12)$$

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} y_{va} \leq c_a, \quad (13)$$

其中  $\alpha, \beta$  是用于调整目标函数的权重因子; 式 (10) 确保每个请求都被服务, 或者内容热点, 或者原始 CDN 服务器; 式 (11) 确保如果请求  $r$  被调度给热点  $a$ , 则  $r$  所请求的视频  $W(r)$  必须放置在热点  $a$  上; 式 (12) 保证请求需求不超过热点服务容量; 式 (13) 保证热点缓存内容不超过存储容量。

显然, 问题 (U) 很难以最优策略解决. Poularakis 等<sup>[57]</sup> 证明了仅使内容访问延迟最小化的联合用户重定向和内容放置问题 (joint user redirection and content placement problem, JUR-CP) 可多项式时间归约到“请求不可分裂且容量确定的设施放置位置选取 (unsplittable hard-capacitated metric facility location, UHCMFL)” NP 难问题. 很容易看出, 解决问题 (U) 的一个实例相当于在工作 [57] 中解决一个 JUR-CP 问题的实例, 因此问题 (U) 也是 NP 难的。

### 7.1.3 问题转化

本文将用户请求聚合到最近的热点进行问题简化, 在每个时间段  $t$  中,  $E_a$  表示为汇总到热点  $a \in \mathcal{A}^*$  中的请求总量,  $E_{av}$  为聚合到热点  $a$  中对视频  $v$  的请求数量, 并且  $E_a = \sum_{v \in \mathcal{V}} E_{av}$ . CDN 服务器表示为  $S$ , 初始情况下  $E_S = 0$ . 假设用户请求被最近内容热点服务时, 内容访问延迟可忽略, 此时  $d_{vh} = 0$ . 考虑到用户的分布密度随时间和地区的变化均有所不同, 因此不同热点汇聚的用户请求可能会有很大差异, 某些热点可能会超载, 而其他热点则可能未得到充分利用. 由于所有内容热点在网络中彼此可达, 每个内容热点可以将其一部分视频请求流量重定向到另一个热点, 因此基于网络流图对问题进行模型转换:  $f_{ij}$  和  $f_{iS}$  表示从热点  $i$  分别重定向到热点  $j$  ( $i \neq j$ ) 和 CDN 服务器  $S$  的用户请求量, 重写式 (8) 对系统内容访问延迟重新建模:

$$\theta = \sum_{i \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} \sum_{j \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} d_{ij} \cdot \max\{f_{ij}, 0\}. \quad (14)$$

就网络流图中的流量特性而言, 对  $f_{ij}$  有以下限制:

$$f_{ij} = \begin{cases} -f_{ji}, & \text{if } i \neq j, \\ 0, & \text{if } i = j, \end{cases} \quad \forall i, j \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}, \quad (15)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} \sum_{j \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} f_{ij} = 0, \quad (16)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} \max\{f_{ij}, 0\} \leq E_i, \quad \forall i \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}, \quad (17)$$



$$E_i - \sum_{j \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} \max\{f_{ij}, 0\} + \sum_{j \in \mathcal{A}^* \cup \{S\}} \max\{f_{ji}, 0\} \leq s_i, \forall i \in \mathcal{A}^*. \quad (18)$$

式 (15) 确保对于任何两个内容热点  $i$  和  $j$  来说, 从热点  $i$  导向热点  $j$  的用户请求量负向于从热点  $j$  导向热点  $i$  的用户请求量; 由于任何给定热点  $i$  流回自身的请求量都是零, 因此有  $f_{ii} = 0$ ; 式 (17) 保证所有的用户请求不被丢失; 最后, 式 (17) 保证从热点  $i$  传出的请求总量不大于传入热点  $i$  的请求总量  $E_i$ ; 式 (18) 保证热点  $i$  最终服务的请求量不会大于其服务能力  $s_i$ .

## 7.2 边缘存储资源协同分发

实际来说, 由于本文问题是针对大量用户和广泛内容热点进行的优化, 因此可扩展性是一个至关重要的问题. 本小节提出了一种请求均衡和内容聚合联合优化的资源协同多项式时间算法, 简称为 RBCAer, 这是一种新颖的服务负载调度机制, 利用不同内容热点的工作负载、热点间延迟, 以及区域内容偏好来准确地服务用户请求. 首先, 将边缘存储资源协同分发的用户请求均衡视为最小费用最大流网络 (MCMF) 的求解问题; 进一步, 将内容聚合到框架中, 以控制热点间协同负载均衡引起的额外内容部署开销.

### 7.2.1 基于网络流的负载均衡模型

用户请求调度机制按一定的时间间隔 (例如, 1 小时) 进行决策. RBCAer 使用可感知用户分布负载的 MCMF 模型开始算法设计. 首先, 为了尽量减少内容访问的累积延迟, 用户请求应尽可能被最近的热点服务. 此后, 将延迟作为 MCMF 模型中的成本, 将过载热点的超额用户请求重定向到低负载的内容热点. 过载热点集合表示为  $\mathcal{A}_s^* = \{i | i \in \mathcal{A}^*, E_i > s_i\}$ , 利用率不足的热点集合表示为  $\mathcal{A}_t^* = \{i | i \in \mathcal{A}^*, E_i < s_i\}$ . 根据服务容量  $s_i$  确定每个内容热点  $i$  的传出流量和传入流量  $\phi_i$  的上限, 即  $\phi_i = |s_i - E_i|$ . 则可以从  $\mathcal{A}_s^*$  分流到  $\mathcal{A}_t^*$  的用户请求总量为  $\maxflow = \min\{\sum_{i \in \mathcal{A}_s^*} \phi_i, \sum_{j \in \mathcal{A}_t^*} \phi_j\}$ .

随后, 以最小化系统累积网络延迟为目标, 具体确定从热点  $i \in \mathcal{A}_s^*$  重定向到热点  $j \in \mathcal{A}_t^*$  的请求量  $f_{ij}$ . 文献 [87] 的图 4(a) 构建了一个网络流图  $G_d = (V, E)$ , 其中顶点集合  $V$  包含一组过载热点  $\mathcal{A}_s^*$  和一组利用率不足的热点  $\mathcal{A}_t^*$ , 以及一个源点 source 和一个汇点 sink. 对于 source 和过载热点  $i \in \mathcal{A}_s^*$  之间的每条边, 容量设置为  $\phi_i$ , 成本设置为 0. 同样, 将  $j \in \mathcal{A}_t^*$  和 sink 之间边的容量和成本分别设置为  $\phi_j$  和 0.

为给  $G_d = (V, E)$  中  $i \in \mathcal{A}_s^*$  和  $j \in \mathcal{A}_t^*$  之间添加边, 同时考虑网络流图的简化和算法的效率, 本文给出一个阈值  $\theta$ , 只有在  $d_{ij} < \theta$  时添加边  $\langle i, j \rangle$ . 对于  $\mathcal{A}_s^*$  和  $\mathcal{A}_t^*$  之间的每条边  $\langle i, j \rangle$ , 其服务容量设置为  $\phi_{ij} = \min\{\phi_i, \phi_j\}$ , 并且它们的成本被设置为延迟  $d_{ij}$ . 最终的网络流图  $G_d(V, E)$  如文献 [87] 的图 4(a) 所示.

对给定的网络流图  $G_d(V, E)$ , 可以通过寻找 source 到 sink 的最小费用最大流确定  $f_{ij}$ . 但是,  $G_d(V, E)$  还无法捕获用户请求调度中与区域内容偏好相关的因素. 因此第 7.2.2 小节将把  $G_d(V, E)$  修改为一个感知内容部署偏好的网络流图.

### 7.2.2 感知内容偏好的网络流模型

为了控制用户请求从过载热点重定向到低利用率热点时导致的内容部署开销, 本文将  $G_d(V, E)$  更新为考虑内容聚合的网络流图  $G_c(V, E)$ . 基本想法是贪心地敦促一组内容相似性较高的超载热点将其请求转移到一个低利用率的热点. 首先, 使用层次聚类算法, 根据热点对之间的内容感知距离  $J_d(i, j)$

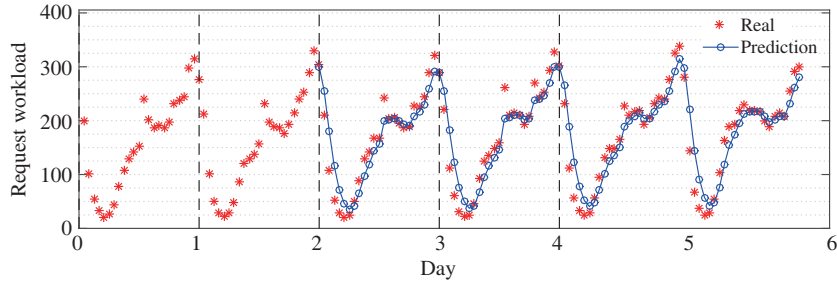


图 9 (网络版彩图) 内容热点负载预测

Figure 9 (Color online) Load prediction for content hotspots

对热点进行聚类分组:

$$J_d(i, j) = 1 - \text{Jaccard}(V_i, V_j), \quad (19)$$

其中  $\text{Jaccard}(V_i, V_j)$  为 Jaccard 距离. 通过限制同组任意两个热点之间的内容距离  $J_d(i, j)$  低于 0.5 (实验表明 0.5 最适用于本文的热点聚类), 可将热点划分为  $K$  个组  $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_K\}$ ,  $\mathcal{P}$  中的任意两项不相交.

接下来, 根据热点聚类结果构造文献 [87] 的图 4(b) 中的  $G_c(V, E)$ . 最初, 令  $G_c(V, E) = G_d(V, E)$ . 为了引导内容偏好相似的热点进行协同内容分发, 本文基于热点聚类结果将导流节点插入到  $G_c(V, E)$ . 定义函数  $\text{SourcetoSink}(\cdot)$  为连接过载热点  $i$  的低利用率热点集合,  $\text{SourcetoSink}(i) = \{j | \langle i, j \rangle \in E\}$ , 相应地, 定义函数  $\text{SinktoSource}(\cdot)$  为连接低利用率热点  $j$  的过载热点集合,  $\text{SinktoSource}(j) = \{i | \langle i, j \rangle \in E\}$ . 定义集合  $\mathcal{A}_{jk}^* = \{i | i \in \text{SinktoSource}(j), i \in P_k\}$ .

对于每个低利用率热点  $j$  和每个热点类型  $P_k$ , 如果  $\sum_{i \in \mathcal{A}_{jk}^*} \phi_{ij} \geq 1/2\phi_j$  或过载热点  $\mathcal{A}_{jk}^*$  与热点  $j$  属于同一类, 将为  $G_c(V, E)$  添加一个导流节点  $n_{kj}$ . 这个设置可以保证导流节点可有效促使过载热点  $i \in \mathcal{A}_{jk}^*$  将其用户请求负载分流到热点  $j$ . 针对导流节点  $n_{kj}$ , 需修改  $G_c(V, E)$  中如下的边: (1) 在重载热点  $i \in \mathcal{A}_{jk}^*$  和导流节点  $n_{kj}$  中间加边, 且容量为  $\phi_{ij}$ , 成本为 0; (2) 在导流节点  $n_{kj}$  和低利用率热点  $j$  之间添加容量为  $\min(\sum_{i \in \mathcal{A}_{jk}^*} \phi_{ij}, \phi_j)$  和成本  $\frac{\sum_{i \in \mathcal{A}_{jk}^*} d_{ij}}{\|\mathcal{A}_{jk}^*\|}$ ; (3) 删除边  $\langle i, j \rangle (i \in \mathcal{A}_{jk}^*)$ . 到目前为止, 可从文献 [87] 的图 4(a) 派生出文献 [87] 的图 4(b) 的网络流图  $G_c(N, E)$ .

### 7.2.3 基于用户分布预测的负载迁移决策

为及时获取各内容热点  $i$  的可转移请求量  $\phi_i$  并更新流图  $G_c(N, E)$ , 本小节首先预测各边缘内容热点的负载. 图 9 展示了某住宅区的周期性用户请求量 (见红色采样点), 并采用 ARIMA [88] 模型预测这一变化 (见蓝色曲线). 具体计算公式如下:

$$\Phi(R^s)\phi(R)\nabla_s^D\nabla^d X_t = \theta(R)\Theta(R^s)\varepsilon_t, \quad (20)$$

其中,  $\Phi(\phi)$  表示周期 (非周期) 自回归项,  $\Theta(\theta)$  表示移动平均项.  $\varepsilon_t$  为随机误差,  $R$  为滞后操作, 即  $R^d X_t = X_{t-d}$ .  $\nabla$  为差分运算符, 即  $\nabla X_t = X_t - X_{t-1}$ .  $D(d)$  是差分的阶数,  $s$  为周期长度. 经训练, 本文得到以周期长度  $s = 24$  的预测模型  $(0, 1, 1) \times (0, 1, 1)_{24}$ . 从图 9 可看出此模型能够对边缘热点负载进行准确预测. 下面具体介绍基于流图  $G_c(N, E)$  的用户重定向 RBCAer 算法.

### 7.2.4 负载迁移与内容部署

根据用户请求的重定向结果  $f_{ij}$ , 开始执行具体的用户请求和内容部署调度. 为了将具有类似内

容集合的请求从超载热点重定向到同类型低利用率的热点, 本文设计了 3 个有效性指数: (1) 重定向效用指数  $e_f(i, v, j)$  表示可以从热点  $i$  重定向到热点  $j$  的视频  $v$  的请求量; (2) 内容部署效用指数  $e_u(v, j)$  表示可以从超载热点集合  $i \in \text{SinktoSource}(j)$  重定向到  $j$  的视频  $v$  的请求总量, 即  $e_u(v, j) \leftarrow \sum_{i \in \text{SinktoSource}(j)} e_f(i, v, j)$ ; (3) 分流效用指数  $e_l(v, i)$  表示热点  $i$  中视频  $v$  的请求量.

为了减少用户请求从超载热点分流到低利用率热点所引起的内容部署开销, 需根据排序的内容部署效用  $e_u(v, j)$  确定哪些视频的请求应该从哪些超载热点重定向到哪些低利用率的热点. 调度一直持续到找到一个可行的解决方案来达到  $f_{ij}$ . 对于最终的内容部署, 内容预取将持续到所有缓存都被填充或者服务器负载达到峰值流量  $B_{\text{peak}}$ . 最后, RBCAer 返回内容部署决策  $y_{vj}$ .

## 8 结论

大规模网络多媒体是异构网络环境下大规模用户与海量媒体内容交互、传播、演化形成的媒体形态, 用以满足高动态、高并发的多模态信息访问需求, 已成为数字内容产业、宽带信息服务、公共安全等国家重大战略需求的重要共性支撑. 大规模网络多媒体本质是一个由内容、网络 and 用户 3 个域相互耦合所形成的复杂系统. 传统网络多媒体分发理论与方法一直受限于 3 个域相互独立的简化假设, 在单一域割裂地对网络资源进行局部优化配置, 导致有限的网络资源与用户高动态高并发媒体需求之间产生难以逾越的鸿沟. 本文综述了现有多媒体边缘内容分发的现有工作, 包括数据驱动的多媒体内容分发网络测量、边缘网络资源优化, 以及内容部署方法. 探讨了数据驱动与跨域协同的大规模移动多媒体内容分发模式挖掘与网络性能分析, 揭示边缘多媒体内容分发与传统内容分发的本质区别. 本文提供了一般性的边缘多媒体网络与内容分发的研究方法, 包括跨域协同与数据驱动的多媒体边缘网络内容分发研究框架. 基于该框架, 对集中典型的边缘多媒体内容分发研究进行了介绍, 包括基于社交媒体传播预测进行内容部署的 SocialCDN, 基于内容提供商智能的 CPCDN, 基于边缘网络设备进行移动多媒体内容分发的 EdgeCDN, 以及基于用户众筹资源的 CrowdCDN.

未来研究方向的展望: 传统内容分发架构依靠中心化基础设施, 全局流行度趋势, 无法有效感知和服务移动多媒体内容; 而利用边缘网络架构服务动态移动多媒体内容, 提升服务质量成为一种新的选择. 本文展望, 未来多媒体内容分发研究中, 面向移动多媒体分发表现、端-边-云联合的内容分析与分发架构, 以及数据驱动与在线学习融合的策略设计等将会迎来新的发展.

## 参考文献

- 1 Wang Z, Li B, Sun L, et al. Cloud-based social application deployment using local processing and global distribution. In: Proceedings of ACM International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT), 2012
- 2 Wang M, Xu C, Chen X, et al. Differential privacy oriented distributed online learning for mobile social video prefetching. IEEE Trans Multimedia, 2019, 21: 636-651
- 3 Kaplan A M, Haenlein M. Users of the world, unite! The challenges and opportunities of social media. Business Horizons, 2010, 53: 59-68
- 4 Cha M, Kwak H, Rodriguez P, et al. I tube, you tube, everybody tubes: analyzing the world's largest user generated content video system. In: Proceedings of the 7th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement, 2007. 1-14
- 5 Li H, Wang H, Liu J. Video sharing in online social network: measurement and analysis. In: Proceedings of ACM Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV), 2012
- 6 Cheng X, Dale C, Liu J. Statistics and social network of YouTube videos. In: Proceedings of IEEE International Workshop on Quality of Service (IWQoS), 2008

- 7 Benevenuto F, Rodrigues T, Almeida V, et al. Video interactions in online video social networks. *ACM Trans Multimedia Comput Commun Appl*, 2009, 5: 1–25
- 8 Lemlouma T, Layaïda N. Context-aware adaptation for mobile devices. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Data Management*, 2004
- 9 Li Z, Huang Y, Liu G, et al. Cloud transcoder: bridging the format and resolution gap between Internet videos and mobile devices. In: *Proceedings of ACM Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV)*, 2012
- 10 Bakshy E, Hofman J, Mason W, et al. Everyone’s an influencer: quantifying influence on Twitter. In: *Proceedings of ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM)*, 2011
- 11 Davidson J, Liebald B, Liu J, et al. The YouTube video recommendation system. In: *Proceedings of ACM Recommender Systems*, 2010
- 12 Debnath S, Ganguly N, Mitra P. Feature weighting in content based recommendation system using social network analysis. In: *Proceedings of ACM International Conference on World Wide Web (WWW)*, 2008
- 13 Walter F E, Battiston S, Schweitzer F. A model of a trust-based recommendation system on a social network. *Auton Agent Multi-Agent Syst*, 2008, 16: 57–74
- 14 Isaacman S, Ioannidis S, Chaintreau A, et al. Distributed rating prediction in user generated content streams. In: *Proceedings of ACM Recommender Systems*, 2011
- 15 Saxena M, Sharan U, Fahmy S. Analyzing video services in Web 2.0: a global perspective. In: *Proceedings of ACM Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV)*, 2008
- 16 Ager B, Mühlbauer W, Smaragdakis G, et al. Web content cartography. In: *Proceedings of ACM Internet Measurement Conference (IMC)*, 2011
- 17 Adhikari V, Jain S, Chen Y, et al. Reverse engineering the YouTube video delivery cloud. In: *Proceedings of IEEE Hot Topics in Media Delivery Workshop*, 2011
- 18 Myers R, Montgomery D, Vining G, et al. *Generalized Linear Models*. Hoboken: Wiley, 2010
- 19 Witten I, Frank E, Hall M. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2011
- 20 Xu C, Jia S, Zhong L, et al. Socially aware mobile peer-to-peer communications for community multimedia streaming services. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 150–156
- 21 Nygren E, Sitaraman R, Sun J. The Akamai network: a platform for high-performance internet applications. *ACM SIGOPS Oper Syst Rev*, 2010, 44: 2–19
- 22 Frank B, Poese I, Lin Y, et al. Pushing CDN-ISP collaboration to the limit. *SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2013, 43: 34–44
- 23 Carlsson N, Dán G, Eager D, et al. Tradeoffs in cloud and peer-assisted content delivery systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P)*, 2012
- 24 Cervino J, Rodriguez P, Trajkovska I, et al. Testing a cloud provider network for hybrid P2P and cloud streaming architectures. In: *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Cloud Computing*, 2011
- 25 Jin X, Kwok Y. Network aware P2P multimedia streaming: capacity or locality? In: *Proceedings of IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P)*, 2011. 54–63
- 26 Xu C, Wang M, Chen X, et al. Optimal information centric caching in 5G device-to-device communications. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2018, 17: 2114–2126
- 27 Jacobson V, Mosko M, Smetters D, et al. *Content-centric networking*. Whitepaper, Palo Alto Research Center, 2007. 2–4
- 28 Lederer S, Mueller C, Rainer B, et al. An experimental analysis of dynamic adaptive streaming over http in content centric networks. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2013
- 29 Zhang X, Wang N, Vassilakis V G, et al. A distributed in-network caching scheme for P2P-like content chunk delivery. *Comput Netw*, 2015, 91: 577–592
- 30 Ma M, Wang Z, Su K, et al. Understanding content placement strategies in smarthtrouter-based peer video CDN.

- In: Proceedings of ACM SIGMM Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV), 2016
- 31 Davis A, Parikh J, Weihl W. Edgecomputing: extending enterprise applications to the edge of the Internet. In: Proceedings of ACM International Conference on World Wide Web (WWW), 2004
  - 32 Wang Z, Sun L, Chen X, et al. Propagation-based social-aware replication for social video contents. In: Proceedings of ACM International Conference on Multimedia (Multimedia), 2012
  - 33 Wu Y, Wu C, Li B, et al. Scaling social media applications into geo-distributed clouds. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (INFOCOM), 2012
  - 34 Xu D, Kulkarni S S, Rosenberg C, et al. Analysis of a CDN-P2P hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution. *Multimedia Syst*, 2006, 11: 383–399
  - 35 Adhikari V K, Guo Y, Hao F, et al. Unreeling Netflix: understanding and improving multi-CDN movie delivery. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (INFOCOM), 2012
  - 36 Kangasharju J, Roberts J, Ross K W. Object replication strategies in content distribution networks. *Comput Commun*, 2002, 25: 376–383
  - 37 Cheng X, Liu J. NetTube: exploring social networks for peer-to-peer short video sharing. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (INFOCOM), 2009
  - 38 Benevenuto F, Rodrigues T, Cha M, et al. Characterizing user behavior in online social networks. In: Proceedings of ACM Internet Measurement Conference (IMC), 2009
  - 39 Li H, Liu J, Xu K, et al. Understanding video propagation in online social networks. In: Proceedings of IEEE International Workshop on Quality of Service (IWQoS), 2012
  - 40 Li Z, Shen H, Wang H, et al. Socialtube: P2P-assisted video sharing in online social networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (INFOCOM), 2012
  - 41 Nguyen K, Pham C, Tran D, et al. Preserving social locality in data replication for social networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) Workshop on Simplifying Complex Networks for Practitioners, 2011
  - 42 Wang Z, Sun L, Yang S, et al. Prefetching strategy in peer-assisted social video streaming. In: Proceedings of ACM International Conference on Multimedia (Multimedia), 2011
  - 43 Chen F, Guo K, Lin J, et al. Intra-cloud lightning: building CDNs in the cloud. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (INFOCOM), 2012
  - 44 Liu F M, Sun Y, Li B, et al. FS2You: peer-assisted semipersistent online hosting at a large scale. *IEEE Trans Parallel Distrib Syst*, 2010, 21: 1442–1457
  - 45 Furht B, Escalante A. *Handbook of Cloud Computing*. New York: Springer-Verlag, 2010
  - 46 Rimal B, Choi E, Lumb I. A taxonomy and survey of cloud computing systems. In: Proceedings of IEEE International Joint Conference on INC, IMS and IDC, 2009
  - 47 Chohan N, Bunch C, Pang S, et al. AppScale: scalable and open AppEngine application development and deployment. *Cloud Comput*, 2010, 34: 57–70
  - 48 Hofmann P, Woods D. Cloud computing: the limits of public clouds for business applications. *IEEE Internet Comput*, 2010, 14: 90–93
  - 49 Agarwal S, Dunagan J, Jain N, et al. Volley: automated data placement for geo-distributed cloud services. In: Proceedings of the 7th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, 2010
  - 50 Li A, Yang X, Kandula S, et al. CloudCmp: comparing public cloud providers. In: Proceedings of ACM Internet Measurement Conference (IMC), 2010
  - 51 Rehman Z, Hussain F, Hussain O. Towards multi-criteria cloud service selection. In: Proceedings of IEEE International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, 2011
  - 52 Huang Y, Li Z, Liu G, et al. Cloud download: using cloud utilities to achieve high-quality content distribution for unpopular videos. In: Proceedings of ACM International Conference on Multimedia (Multimedia), 2011
  - 53 Miller M. *Cloud Computing: Web-Based Applications That Change the Way You Work and Collaborate Online*.

- Hoboken: Que Publishing, 2008
- 54 Wang F, Liu J, Chen M. CALMS: cloud-assisted live media streaming for globalized demands with time/region diversities. In: Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (INFOCOM), 2012
- 55 Wang X, Chen M, Taleb T, et al. Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 131–139
- 56 Bastug E, Bennis M, Debbah M. Living on the edge: the role of proactive caching in 5G wireless networks. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 82–89
- 57 Poularakis K, Iosifidis G, Tassiulas L. Approximation algorithms for mobile data caching in small cell networks. *IEEE Trans Commun*, 2014, 62: 3665–3677
- 58 Khreishah A, Chakareski J, Gharaibeh A. Joint caching, routing, and channel assignment for collaborative small-cell cellular networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2016, 34: 2275–2284
- 59 Gharaibeh A, Khreishah A, Ji B, et al. A provably efficient online collaborative caching algorithm for multicell-coordinated systems. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2016, 15: 1863–1876
- 60 Bharath B N, Nagananda K G, Poor H V. A learning-based approach to caching in heterogenous small cell networks. *IEEE Trans Commun*, 2016, 64: 1674–1686
- 61 Li Z, Wilson C, Xu T, et al. Offline downloading in China: a comparative study. In: Proceedings of the 2015 ACM Conference on Internet Measurement Conference, 2015. 473–486
- 62 Chen L, Zhou Y, Jing M, et al. Thunder crystal: a novel crowdsourcing-based content distribution platform. In: Proceedings of the 25th ACM Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video, 2015. 43–48
- 63 Ma M, Wang Z, Su K, et al. Understanding content placement strategies in smarthrouter-based peer video CDN. In: Proceedings of the 26th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video, 2016. 7
- 64 Cha M, Mislove A, Gummadi K. A measurement-driven analysis of information propagation in the flickr social network. In: Proceedings of ACM International Conference on World Wide Web (WWW), 2009
- 65 Mislove A. Rethinking web content distribution in the social media era. In: Proceedings of NSF Workshop on Social Networks and Mobility in the Cloud, 2012
- 66 Wang Z, Liu J, Zhu W. *Social Video Content Delivery*. Berlin: Springer, 2016
- 67 Ye S, Wu F. Measuring message propagation and social influence on Twitter.com. *Int J Commun Netw Distrib Syst*, 2013, 11: 59–76
- 68 Scellato S, Mascolo C, Musolesi M, et al. Distance matters: geo-social metrics for online social networks. In: Proceedings of USENIX Conference on Online Social Networks, 2010
- 69 Huffaker B, Fomenkov M, Plummer D, et al. Distance metrics in the Internet. In: Proceedings of IEEE International Telecommunications Symposium, 2002
- 70 Yang K S, Shekhar A H, Oliver D, et al. Capacity-constrained network-voironoi diagram. *IEEE Trans Knowl Data Eng*, 2015, 27: 2919–2932
- 71 Kaashoek M F, Karger D R. Koorde: a simple degree-optimal distributed hash table. In: Proceedings of International Workshop on Peer-to-Peer Systems. Berlin: Springer, 2003. 98–107
- 72 O'reilly T. What is web 2.0. In: O'Reilly Radar Report, O'Reilly Media, Inc., 2009
- 73 Scellato S, Mascolo C, Musolesi M, et al. Track globally, deliver locally: improving content delivery networks by tracking geographic social cascades. In: Proceedings of ACM International Conference on Multimedia (Multimedia), 2011
- 74 Brewington B, Cybenko G. How dynamic is the web? *Comput Netw*, 2000, 33: 257–276
- 75 Kwak H, Lee C, Park H, et al. What is Twitter, a social network or a news media? In: Proceedings of ACM International Conference on World Wide Web (WWW), 2010
- 76 Wang Z, Zhu W, Chen M, et al. CPCDN: content delivery powered by context and user intelligence. *IEEE Trans Multimedia*, 2015, 17: 92–103

- 77 Dhillon I. Co-clustering documents and words using bipartite spectral graph partitioning. In: Proceedings of ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), 2001
- 78 Brodersen A, Scellato S, Wattenhofer M. YouTube around the world: geographic popularity of videos. In: Proceedings of ACM International Conference on World Wide Web (WWW), 2012
- 79 Wang H, Xu F, Li Y, et al. Understanding mobile traffic patterns of large scale cellular towers in urban environment. In: Proceedings of the 2015 ACM Conference on Internet Measurement Conference, 2015. 225–238
- 80 Ma G, Wang Z, Zhang M, et al. Understanding performance of edge content caching for mobile video streaming. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2017, 35: 1076–1089
- 81 Hu W, Wang Z, Ma M, et al. Edge video CDN: a Wi-Fi content hotspot solution. *J Comput Sci Technol*, 2016, 31: 1072–1086
- 82 Levi R, Shmoys D B, Swamy C. LP-based approximation algorithms for capacitated facility location. In: Proceedings of International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization. Berlin: Springer, 2004. 206–218
- 83 Gavet Y, Pinoli J C. A geometric dissimilarity criterion between Jordan spatial mosaics. theoretical aspects and application to segmentation evaluation. *J Math Imag Vis*, 2012, 42: 25–49
- 84 Li Z, Lin J, Akodjenou M I, et al. Watching videos from everywhere: a study of the PPTV mobile VOD system. In: Proceedings of the 2012 ACM Conference on Internet Measurement Conference, 2012. 185–198
- 85 Zhang G P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, 2003, 50: 159–175
- 86 Dán G, Carlsson N. Dynamic content allocation for cloud-assisted service of periodic workloads. In: Proceedings of IEEE INFOCOM 2014–IEEE Conference on Computer Communications, 2014. 853–861
- 87 Ma M, Wang Z, Yi K, et al. Joint request balancing and content aggregation in crowdsourced CDN. In: Proceedings of 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2017. 1178–1188
- 88 Mills T. *Time Series Techniques for Economists*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991

## Data-driven multimedia edge network and content delivery

Wenwu ZHU<sup>1\*</sup> & Zhi WANG<sup>2</sup>

1. *Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100086, China;*

2. *Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China*

\* Corresponding author. E-mail: wwzhu@tsinghua.edu.cn

**Abstract** Recently, network multimedia has undergone rapid developments. Compared with traditional end-to-end multimedia content services, user behaviors in emerging mobile multimedia services have experienced fundamental changes. For efficient mobile multimedia content services, the conventional content distribution architecture relies on a centralized infrastructure, in which global popularity trends cannot be effectively obtained. The use of edge network architecture combined with data-driven strategies to aid the dynamic mobile multimedia content has become a new choice for improved service quality. Using data-driven and cross-domain collaboration methods, this paper reveals a set of principles of mobile multimedia content service and system architecture design. This paper first discusses data-driven behavior patterns and network performance analysis. It shows the essential difference between edge multimedia content distribution and traditional content distribution. Further, this paper presents general edge multimedia research methodologies, including a framework of multimedia edge network content distribution using data-driven and cross-domain collaboration methods. Finally, this paper provides several representative frameworks, including SocialCDN, which uses social information for content distribution, CPCDN, in which a content-provider-based content delivery framework is proposed, EdgeCDN, which is an edge content delivery framework, and finally CrowdCDN, which uses user-based crowdfunding resources for efficient content distribution.

**Keywords** multimedia network, large-scale content delivery, data-driven strategies, edge computing, resource allocation





**Wenwu ZHU** is currently a professor in the Department of Computer Science and Technology at Tsinghua University. He received his Ph.D. degree from New York University in 1996 in Electrical and Computer Engineering. His current research interests include the area of cyber-physical-human big data computing and cross-media big data and intelligence.



**Zhi WANG** is currently an associate professor at the Tsinghua Shenzhen International Graduate School. He received his Ph.D. degree in 2014 from Tsinghua University under the guidance of Prof. Shiqiang YANG and Prof. Wenwu ZHU from the Lab of Multimedia and Networking and his B.E. degree in 2008 from Tsinghua University. His research areas include multimedia networks, mobile cloud computing, and large-scale machine learning systems.