

自然灾害场景下基于兴趣偏好与局部流行度的 NDN 缓存优化策略研究

聂 堰, 赵长名, 王 旨

(成都信息工程大学 计算机学院, 四川 成都 610225)

摘要: 针对传统的TCP/IP网络在处理重大自然灾害情况时存在缓存局部性能差和更新延迟的问题, 提出一种自然灾害下基于兴趣偏好与局部流行度的NDN缓存优化策略(BIPLP)。该策略采用命名数据网络(NDN)替代TCP/IP网络, 通过对用户兴趣偏好的分析, 确定用户对不同内容的需求程度, 并结合路由节点处的局部流行度和请求代价来计算缓存概率, 决定是否在路由节点进行缓存操作, 使用户感兴趣的内容能够更快被缓存。仿真实验结果显示, 相比NDN中常见的缓存策略, 该缓存优化策略在自然灾害背景下能针对不同内容进行有效的数据传输, 提高了缓存命中率, 减少了网络拥塞, 降低了网络延迟, 具有一定的可行性。

关键词: 命名数据网络; 缓存策略; 兴趣偏好; 局部流行度; 请求代价

DOI: 10.11907/rjtk.241322

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2025)006-0136-06



Research on NDN Cache Optimization Strategy Based on Interest Preferences and Local Popularity in Natural Disaster Scenarios

NIE Yan, ZHAO Changming, WANG Zhi

(School of Computer Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A NDN cache optimization strategy based on user interest preferences and local popularity (BIPLP) is proposed to address the issues of poor cache locality and cache update delay in traditional TCP/IP networks in handling natural disasters. This strategy replaces TCP/IP networks with Named Data Networks (NDNs). By analyzing user interests and preferences, the degree of user demand for different content is determined, and the caching probability is calculated based on the local popularity and request cost at the routing node to determine whether to perform caching operations at the routing node. This enables the content that users are interested in to be cached faster. The simulation experiment results show that compared with the common caching strategies in NDN, the proposed caching optimization strategy can effectively transmit data for different contents in the context of natural disasters, improve cache hit rate, reduce network congestion, and reduce network latency, which has certain feasibility.

Key Words: named data network; cache policy; interest preferences; local popularity; request cost

0 引言

随着近年来重大自然灾害的频发, 例如洪水、地震、泥石流等, 在灾害期间数据传输与缓存的可靠性和效率变得至关重要。在现代网络中, 缓存技术主要依赖于内容分发

网络(Content Delivery Network, CDN)技术^[1]。缓存的数据是基于IP地址, 而不是基于内容, 会导致缓存局部性能差, 难以有效适应用户兴趣的分布和内容的流行度变化。另外, 在自然灾害情况下, 用户对特定内容的需求可能会发生剧烈变化, 因而需要更快速地更新缓存。在TCP/IP网络中, 缓存管理方式十分简单, 导致缓存更新速度往往无法

收稿日期: 2024-03-29

扫描二维码阅读全文:

基金项目: 四川省科技计划项目(2023YFG0301)

作者简介: 聂堰(1998-), 女, 成都信息工程大学计算机学院硕士研究生, 研究方向为命名数据网络; 赵长名(1984-), 男, 成都信息工程大学计算机学院副教授、硕士生导师, 研究方向为分布式计算与移动计算系统、高性能计算与网络计算、智慧气象与数值天气计算; 王旨(1998-), 男, 成都信息工程大学计算机学院硕士研究生, 研究方向为知识图谱。



及时跟上用户兴趣的变化^[2]。在此背景下,信息中心网络(Information-Centric Networking, ICN)受到了广泛关注^[3]。不同于TCP/IP网络,该网络架构由端到端通信变为以内容为中心的通信,抛弃了地址的概念,只关注数据内容本身。其中,命名数据网络(Named Data Network, NDN)是ICN新的演变,十分具有代表性^[4]。

NDN作为一种新兴的网络架构,将数据视为网络的核心,通过数据的命名和请求获取数据,以更好地适应灾害期间网络的动态变化。同时,NDN中的每一个路由节点都可以缓存数据,使得用户请求不需要从服务器获取,而是可以直接通过路由节点返回,极大地提高了用户体验和传输效率。在此背景下,研究如何优化NDN网络的缓存策略,以提高数据命中率、减少网络拥塞和提高通信效率,对于改善网络在自然灾害期间的表现具有重要意义。

1 相关工作

命名数据网络的缓存策略包括缓存决策策略和缓存替换策略^[5]。前者用于决定返回的数据包缓存到路由节点的位置,后者用于决定当缓存空间已满时对缓存内容更新与替换所使用的替换策略。NDN除默认的LCE(Leave Copy Everywhere)策略^[6]外,常见的缓存决策策略还有LCD(Leave Copy Down)^[7]、Prob(Copy with Probability)^[8]等。LCE策略是将返回的数据包缓存在每一个经过的路由节点上,虽然缓存空间被充分利用,但会造成数据冗余的问题,给路由器带来很大压力;LCD策略是在发生缓存命中节点的下一位置进行缓存,缺点是会造成边缘节点压力过大;Prob策略中每个路由节点根据概率P决定是否缓存收到的数据包,缺点是缓存利用率低,没有考虑内容差别,随机性较强。

为了解决上述问题,许多学者对NDN缓存决策策略改进方法进行了研究。文献[9]提出ProbCache策略,通过加权概率的方式在路由节点上缓存内容,越靠近用户的节点被缓存的概率越大,可在一定程度上缓解缓存冗余,但会给边缘节点带来压力。文献[10]提出随机缓存策略,通过随机选择缓存位置以改善LCE策略带来的弊端。虽然可以缓解路由器的压力,但没有考虑数据内容的重要性,很有可能导致热点内容未被缓存。文献[11]提出节点介数中心性的概念,把数据包缓存在节点介数较大的路由节点上,从而有效减轻网络负担,减少网络数据冗余,但会导致频繁的缓存替换。文献[12]提出基于流行度和缓存能力的缓存决策策略,其中心思想是根据节点的缓存空间不断调整流行度的阈值。但该方法计算量很大,造成了很大的时间和人力开销,并且没有考虑不同节点的位置优势。

针对上述问题,本文以命名数据网络的缓存决策策略为出发点,考虑了自然灾害下数据内容的差异性和流行度,提出一种基于用户兴趣偏好与局部流行度的缓存决策

策略(Cache Decision Strategy Based on User Interest Preferences and Local Popularity, BIPLP)。该策略首先考虑了用户对于不同内容的请求频率,根据数据内容类别判断用户的兴趣偏好,然后结合路由节点处的局部流行度和请求代价来动态调整缓存策略,使每个用户感兴趣的数据包内容能够更快被缓存,从而提高缓存命中率,并降低网络延迟。实验结果表明,相比NDN网络中常见的LCE、LCD、Pro和RAND策略,BIPLP策略在多个性能指标上都具有一定优势,表明BIPLP策略在提高NDN缓存能力方面的有效性。

2 BIPLP策略

2.1 网络体系结构

如图1所示,在面对重大自然灾害时,TCP/IP网络的各层可能会受到以下影响:①由于网络中断或不稳定,用户可能无法访问或使用应用层提供的服务,导致信息传递受阻,影响紧急响应和救援操作效率;②自然灾害可能导致网络延迟增加、丢包率上升,从而降低传输的效率和可靠性;③灾害可能破坏网络基础设施,如路由器和传输线路,影响IP数据包的路由和转发;④自然灾害可能会导致网络中的物理设备受损或完全破坏,影响网络的物理连接,导致信号衰减或受到干扰,影响数据传输的质量和稳定性;⑤物理层的损坏往往导致数据链路层的链路中断,即网络中的节点无法通过受损的链路进行通信。

在NDN中,可将网络结构分为3个关键层次,即底层的物理链路层、中间层的内容层和顶层的应用层。内容层

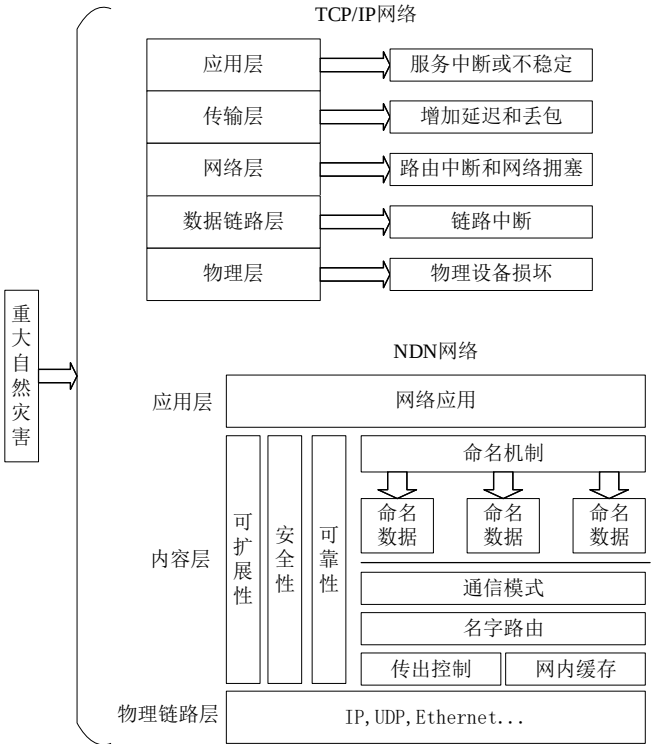


Fig. 1 Architecture of TCP/IP and NDN in natural disaster situations
图1 自然灾害情况下TCP/IP与NDN体系结构

围绕新兴的命名数据网络重新进行了设计,其基本理念是通过以数据内容为基础的命名机制对数据进行抽象,赋予其独一无二的标识作为数据名称。在通信模式方面,NDN采用请求与响应模式,通信过程可由数据的生产者或消费者发起。名字路由是指路由决策依赖于内容的名称,数据通过网络中的名称进行定位和传输。此外,网络中的缓存管理及全网的调度工作都起着至关重要的作用,用于作出合适的缓存决策。同时,传输控制负责监管网络的传输性能。NDN所秉承的面向内容的理念以及具体的5个内容层实现机制,为其面对自然灾害时提供了较强的可扩展性以及较高的安全性和可靠性^[13]。

缓存在NDN中扮演着重要角色,每个网络路由节点都具备缓存资源。当节点接收到数据包时,会根据特定策略决定是否将其缓存。用户不再需要担心数据存储的具体位置,只需专注于数据本身即可。当网络中广泛部署缓存系统时,任何网络中的请求都能快速地由最近的缓存节点响应,从而提高了数据获取效率。综上,相比TCP/IP网络,NDN更适用于处理自然灾害情况。BIPLP策略旨在通过优化NDN的缓存策略,进一步提高NDN网络在面对重大自然灾害时的抗灾能力和通信效率。

2.2 工作流程

BIPLP策略的大致流程如图2所示。其中心思想是用户对数据内容存在兴趣偏好,对不同数据内容的请求次数不一样。用户对某一数据内容越感兴趣,请求的次数则越频繁。因此,每个缓存节点处的局部内容流行度也是不断变化的。所以当数据包在返回的路径中经过路由节点时,路由节点会进行以下工作:首先会查询内容类别,计算用户对此内容的兴趣偏好,然后统计沿途经过的节点跳数作为请求代价,再计算数据内容在路由节点的局部流行度。由以上3个因素共同确定缓存概率,决定是否在该路由节点进行缓存。如果不需要进行缓存操作,则直接转发给下一个路由节点。

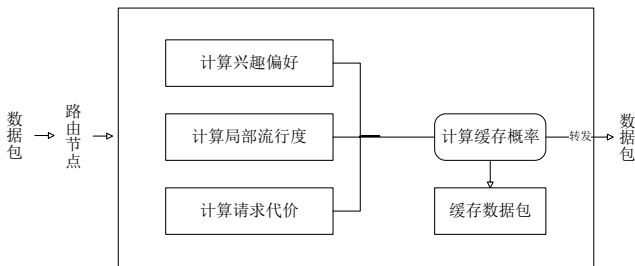


Fig. 2 Overall workflow

图2 整体工作流程

2.3 包格式扩展

如图3所示,为了区分不同内容的类别以及记录数据包请求代价,在原有数据包格式的基础上,增加了Category字段和RequestCost字段。其中,Category字段用来记录用户请求的内容类别,RequestCost字段用来记录数据包返回时从服务器端到路由节点的跳数,即请求代价。

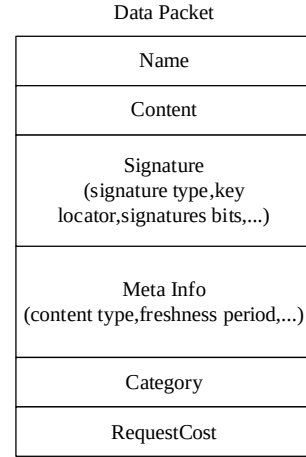


Fig. 3 Packet extension format

图3 数据包扩展格式

2.4 兴趣偏好

兴趣偏好是用户对不同内容类别数据的喜爱程度,在用户请求数据的过程中,用户越偏好某一内容,对该内容的请求频率则越高^[14]。确定用户的内容偏好需要先确定内容属性,命名数据网络对内容命名的方法是采用分层结构化机制,类似于URL机制^[15]。如图4所示,为了获取内容类别信息,在内容名字中添加字段表示内容类别:“/NDN/内容类别/具体内容.....”,以此表示新的NDN命名结构。将修改后的内容命名规则应用于兴趣包和数据包,路由节点通过解析包的内容名字,即可提取内容类别信息。

路由节点在传输过程中对请求的内容进行分析,并提取内容的类别信息,以记录用户对不同类别内容发起的请求数量,从而推断不同用户的兴趣偏好。具体计算方法如下:

$$UP_i = \frac{C_i}{I} \quad (1)$$

其中, UP_i 表示用户对内容类别*i*的兴趣偏好概率, C_i 表示内容类别*i*的请求总数, I 表示所有内容类别的请求总数。

2.5 局部内容流行度

在数据传输过程中,不同路由节点收到的数据请求次数各不相同。因此,每个节点局部内容的受欢迎程度也不尽相同。用户对特定内容感兴趣程度越高,其请求该内容的频率则会越高。因此,局部流行度可以很好地反映出不同内容在不同节点的受欢迎程度^[16]。但是,由于热点内容不是恒定的,会随时间不断变化,通过累计历史请求次数的方法并不能准确估计某个内容在当前的流行程度。因此,在考虑局部内容流行度时还需考虑不同热点内容的存在时间。如果在一段时间内,某个内容被请求的次数越多,则认为该内容的局部流行度也越高。设定某一内容的局部流行度为 $R_{i,j}(t)$,具体计算公式如下:

$$R_{i,j}(t) = \begin{cases} 1, & \text{第一次到达} \\ 1 + R_{i,j}(t) \cdot e^{-\lambda(t-t')}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $R_{i,j}(t)$ 表示在 t 时刻, 某个数据内容 i 在路由节点 j 处的局部流行度, t 代表数据内容 i 从发送请求到到达路由节点的时间, t' 则表示数据内容 i 上一次请求的到达时间。最初备受用户欢迎的热点内容会受到频繁请求, 然而, 随着时间的推移, 这些内容的热度将逐渐衰减, 从而转变为非热点内容。由此可推断, 当时间间隔 $t-t'$ 较短时, 某一内容在特定节点的受欢迎程度较高。 λ 是一个限制参数, 其取值范围为 $0 \sim 1$ 之间的连续数值。该参数设计的目的在于平衡请求次数与最近请求频率之间的关系, 并据此

推导出特定内容的局部流行度可在 $1 \sim \infty$ 范围内波动。

2.6 缓存决策算法设计

在 BIPLP 策略中, 路由节点收到数据包后的处理方式如图 4 所示。路由器会对其进行解析, 首先查询 Category 字段得到内容 i 的类别, 计算出用户对此内容的兴趣偏好。然后, 计算内容 i 在该路由节点的局部流行度, 最后查询 RequestCost 字段得到数据包在返回路径上经过的路由节点跳数, 将其记为请求代价, 并计算缓存概率 P , 决定是否进行缓存。

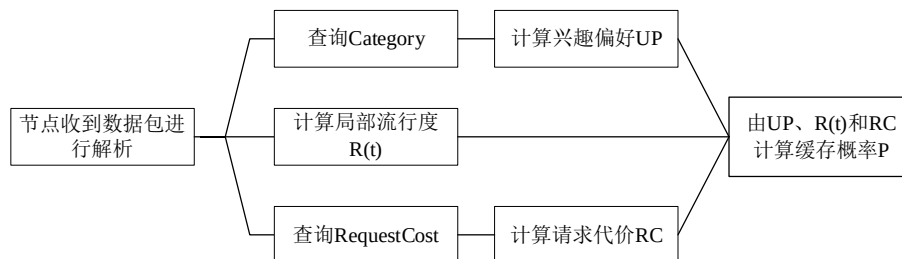


Fig. 4 Cache probability algorithm calculation

图4 缓存概率算法计算

缓存概率 P 计算公式如下:

$$P_{i,j} = \alpha \times UP_i + \beta \times R_{i,j}(t) + \gamma \times RC_{i,j} \quad (3)$$

式中, $P_{i,j}$ 表示每个不同内容 i 在路由节点 j 的缓存概率, UP_i 表示用户对内容类别 i 的兴趣偏好概率, $R_{i,j}(t)$ 表示 t 时刻的内容 i 在缓存节点 j 处的局部流行度, $RC_{i,j}$ 表示不同内容 i 在路由节点 j 返回路径中所经过的路由跳数, 记为请求代价。 α 、 β 、 γ 是权重因子, 三者之和为 1。

2.7 数据包处理流程

当路由节点收到数据包后, 具体处理流程如图 5 所示。

路由节点解析数据包, 首先获取数据包中的 Content-

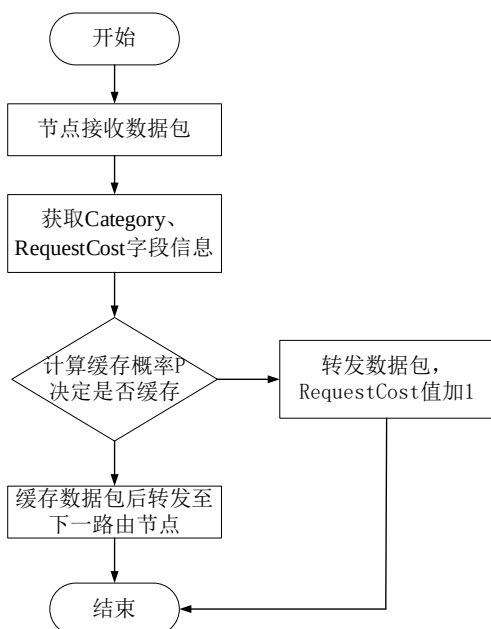


Fig. 5 Packet processing flow

图5 数据包处理流程

Category 和 RequestCost 字段, 计算出用户的兴趣偏好和请求代价, 然后计算该内容在此节点的局部流行度, 根据兴趣偏好、请求代价和局部流行度 3 个属性计算缓存概率, 决定是否在该节点进行缓存操作。若不进行缓存操作, 则继续转发数据包, 并且令 RequestCost 的值加 1; 否则, 在路由节点上缓存该数据包。

3 仿真实验与分析

为了验证面对自然灾害时 BIPLP 策略在 NDN 网络中的有效性, 在基于 NS-3 的 ndnSIM 仿真平台上通过修改源代码和编写相应脚本进行仿真实验^[17-18]。仿真实验的对照组选用常见的 LCE 策略、LCD 策略、Prob 策略和 RAND 策略, 设置 Prob 的缓存概率为 0.7。

3.1 实验参数配置

仿真实验采用的操作系统为 Ubuntu 18.04.64-bit, 内存为 4 GB, 处理器为四核 CPU, 硬盘为 40 GB, 采用外部导入的方式自定义网络拓扑, 模拟自然灾害情况下网络中的数据传输和通信。图 6 为实验拓扑为 6×6 的 Grid 网络拓扑模型, 所有节点都可以通信。自然灾害会导致网络拓扑发生变化, 如节点失效或连接断开, 在实验中通过随机移除一部分节点或连接来模拟该情况。在该拓扑模型中, 将第一行的 6 个节点设置为用户端, 最后一行的 6 个节点设置为源服务器端。

在用户端设定“prefix”作为请求兴趣包的前缀, 每秒向服务器端发送 20 个兴趣包。服务器端按照 Zipf 分布规律产生内容, Zipf 参数设置为 0.8, 并且链路带宽为 10 Mb/s^[19]。每个路由节点设置相同大小的缓存空间, 缓存数据包最大数量为 100 个。实验采用 NDN 网络默认的 LRU 缓存替换策略, 实验时长为 100 s。

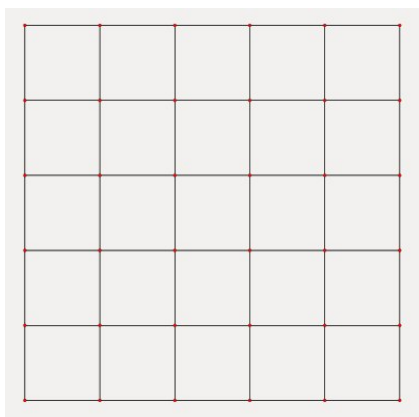


Fig. 6 6×6 topology model

图6 6×6拓扑模型

3.2 性能评价指标

为了测试在自然灾害情况下 BIPLP 策略对于 NDN 缓存能力的提升情况,选用平均缓存命中率和平均请求时延两个指标作为评判标准。

(1) 平均缓存命中率 (Average Cache Hit Rate, HR)。平均缓存命中率是指在实验期间路由节点缓存命中的兴趣包数量和各用户端发送兴趣包总数的比值,用于评价缓存策略的优劣^[20]。HR 计算公式如下:

$$HR = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad (4)$$

式中, N 表示从用户端发送的兴趣包总数, h_i 表示实验期间路由节点 i 缓存命中的兴趣包数量^[21]。该值越高,意味着更多数据可以在网络中就近被访问到,即使某些节点受到自然灾害的影响而无法通信,用户仍然可以通过缓存的数据获取所需信息,从而提高了数据的可用性。同时,该方式缩短了数据传输的路径和时间,提高了数据访问速度。因此,对于需要及时获取信息的应用场景,如自然灾害后的紧急救援等具有重要意义。

(2) 平均请求时延 (Average request latency, ARL)。平均请求时延是指用户端发送兴趣包给源服务器端到接收到数据包的时间^[20]。ARL 计算公式如下:

$$ARL = \frac{\sum_{i=1}^C s_i}{C} \quad (5)$$

式中, C 表示数据传输过程中用户发送的所有请求数, s_i 表示针对用户发送请求 i 的响应时延。平均请求时延降低意味着数据传输更加高效,减少了对网络带宽和资源的需求,降低了网络拥堵的可能性。特别是在发生自然灾害后网络资源受限的情况下,降低平均请求时延显得更为重要。其还可以加快救援人员获取信息的速度,从而提高救援响应速度,减少灾害造成的损失。

3.3 实验结果分析

实验结果如图 7 所示, BIPLP、LCE、LCD、Pro 和 RAND 5 种缓存决策策略在应对自然灾害情况下的效果各异。随着 CS 缓存容量的增加,不同策略的平均缓存命中率均呈

增长趋势。可以看到, 5 种策略的平均缓存命中率都随着 CS 缓存容量的增加而提升。BIPLP 策略不再只局限于考虑单一因素,而是考虑了用户兴趣偏好,并加上局部流行度和请求代价等属性,相比其他 4 种缓存决策策略能更好地提升缓存命中率,用户获取所需数据的几率更大。在自然灾害发生后,网络中某些节点可能受到影响或无法通信,通过缓存感兴趣的数据和流行的数据,可以提高这些数据的可用性。即使某些节点不可用,用户仍可以通过其他节点获取到所需数据。

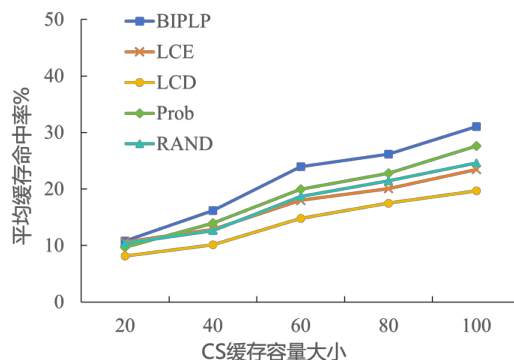


Fig. 7 Average cache hit rate varies with CS cache capacity

图7 平均缓存命中率随CS缓存容量变化情况

图 8 模拟了在自然灾害情况下, BIPLP、LCE、LCD、Pro 和 RAND 5 种缓存决策策略的平均请求时延随 CS 缓存容量的变化情况。整体来看,当 CS 缓存容量不断增加,不同缓存决策策略的平均请求时延也在不断下降,而 BIPLP 策略的平均请求时延相比其他 4 种策略下降更多,说明用户得到的反馈时间更短,体验更好。根据用户兴趣偏好和局部流行度进行缓存可以使数据更容易就近被访问到,减少了数据传输的路径和时间,从而降低了请求时延。特别是在自然灾害发生后,降低请求时延可以加快救援响应速度,提高灾后恢复效率。

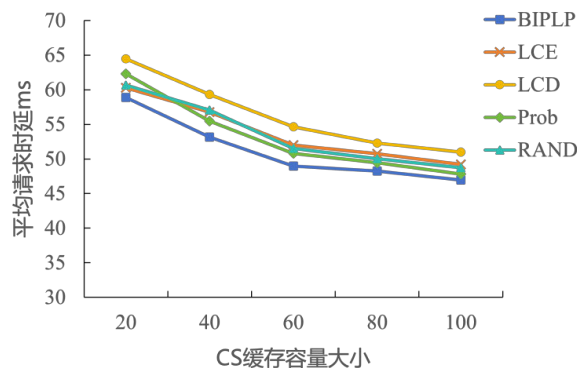


Fig. 8 Average request latency varies with CS cache capacity

图8 平均请求时延随CS缓存容量变化情况

4 结语

为了解决 TCP/IP 网络在处理重大自然灾害情况时存

在缓存局部性能差和更新延迟的问题,提出并实现了基于用户兴趣偏好与局部流行度的NDN缓存优化策略BIPLP。该策略通过计算用户兴趣偏好、内容局部流行度和请求代价来计算缓存概率,决定数据是否需要缓存,有效提高了缓存命中率,降低了网络延迟。实验结果表明,在自然灾害情况下,BIPLP策略在平均缓存命中率和平均请求时延两方面的表现优于其他4种策略。后续研究将在不同的网络拓扑上进行实验,考虑更多影响因素,并进行深度的数据分析,以更加贴近自然灾害情况下的实际网络情况。

参考文献:

- [1] MU R, ZHAO F. CDN and P2P network model based on HCDN technology[J]. Journal of Software Engineering, 2015, 9(3):469-486.
- [2] DEEPAK G C, LADAS A, SAMBO Y A, et al. An overview of post-disaster emergency communication systems in the future networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(6): 132-139.
- [3] ZHU D L, LIANG J, LI T, et al. A review of content center network security technology research[J]. Journal of Cyber Security, 2020, 5(5): 121-143.
朱大立, 梁杰, 李婷, 等. 内容中心网络安全技术研究综述[J]. 信息安全学报, 2020, 5(5):121-143.
- [4] MA H Q, YANG W Z, KANG P, et al. Survey of named data networking[J]. Computer Application, 2022, 42(10):3111-3123.
马红桥, 杨文忠, 康鹏, 等. 命名数据网络研究综述[J]. 计算机应用, 2022, 42(10):3111-3123.
- [5] NAEEM M, NOR S, HASSAN S, et al. Compound popular content caching strategy in named data networking[J]. Electronics, 2019, 8(7):771.
- [6] SAINO L, PSARAS I, PAVLOU G. Learus: a caching simulator for information centric networking (ICN)[C]//New York: Proceedings of International Conference on Simulation Tools & Techniques, 2014.
- [7] LAOUTARIS N, CHE H, STAVRAKAKIS I. The LCD interconnection of LRU caches and its analysis[J]. Performance Evaluation, 2006, 63(7): 609-634.
- [8] GARETTO M, LEONARDI E, MARTINA V. A unified approach to the performance analysis of caching systems[J]. ACM Transactions on Modeling & Performance Evaluation of Computing Systems, 2016(3):1-28.
- [9] LAOUTARIS N, SYNTILA S, STAVRAKAKIS I. Meta algorithms for hierarchical web caches[C]//IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications, 2004:445-452.
- [10] HU Q, WU M Q, GUO S, et al. A cache random placement strategy for content center networks[J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(6): 131-136, 187.
胡嵩, 武穆清, 郭嵩, 等. 一种用于内容中心网络的缓存随机放置策略[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(6):131-136, 187.
- [11] WEI K C, HE D, PSARAS I, et al. Cache "less for more" in information-centric networks (extended version)[J]. Computer Communications, 2013, 36(7):758-770.
- [12] GUO C, ZHENG Q, DING Y, et al. Cache strategy based on dynamic popularity and request cost in named data networking[J]. Computer Engineering, 2018, 44(2):46-50.
郭晨, 郑焱, 丁尧, 等. 基于动态流行度与请求代价的命名数据网络缓存策略[J]. 计算机工程, 2018, 44(2):46-50.
- [13] LU Q. Research on cache management scheme in ICN[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
卢琪. 信息中心网络缓存管理机制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2020.
- [14] WU L, ZHANG T, XU X, et al. Grey relational analysis based cross-layer caching for content centric networking[C]//2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, 2015:1-6.
- [15] HAN Q C. Research on efficient caching strategy in named data networking[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
韩奇辰. 命名数据网络中高效缓存策略的研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2019.
- [16] GOIAN H S, AI-JARRAH O Y, MUHAIDAT S, et al. Popularity-based video caching techniques for cache-enabled networks: a survey[J]. IEEE Access, 2019, 7:27699-27719.
- [17] CAMPANILE L, GRIBAUDO M, IACONO M, et al. Computer network simulation with NS-3: a systematic literature review[J]. Electronics, 2020, 9(2):272.
- [18] MASTORAKIS S, AFANASYEV A, MOISEENKO I, et al. ndnSIM 2.0: a new version of the NDN simulator for NS-3[EB/OL]. <https://named-data.net/techreport/ndn-0028-1-ndnsim-v2.pdf>.
- [19] CAI Y P, FAN X W, QIU Y, et al. Edge node potential-enhanced routing mechanism in content networking[J]. Mini-micro Systems, 2018, 39(11):2380-2385.
蔡岳平, 樊欣唯, 邱娅, 等. 内容中心网络边缘节点势能增强路由机制[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(11):2380-2385.
- [20] LI Q M, GAO Q L, WANG X H, et al. Research on cache optimization strategies in named data networks[J]. Computer and Digital Engineering, 2022, 50(9):1991-1997.
李庆敏, 高全力, 王西汉, 等. 命名数据网络中缓存优化策略的研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(9):1991-1997.
- [21] XU C B, WANG H. Popularity and betweenness based caching scheme in CCN[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(3): 100-103.
徐昌彪, 王华. CCN中基于内容流行度和节点重要度的缓存设计[J]. 电子技术应用, 2017, 43(3):100-103.

(责任编辑:黄 健)