



## 天地一体化智能网络节点静态处理与缓存策略

石怀峰<sup>1,2</sup>, 王成功<sup>1</sup>, 蔡睿妍<sup>1</sup>, 魏德宾<sup>1,2</sup>

(1. 大连大学 通信与网络重点实验室, 辽宁 大连 116622; 2. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

**摘 要:** 天地一体化智能网络中的卫星节点具有计算、存储和传输能力, 将内容副本缓存至传输路径上的卫星节点可提高网络缓存收益。针对卫星节点移动导致的路径改变问题, 设计基于虚拟位置的卫星节点静态处理机制, 先设定卫星的虚拟位置节点, 再将内容副本提前向虚拟位置节点同一轨道的后方卫星节点进行缓存。在此基础上, 提出基于ProbCache的轻量级分组缓存策略PBP, 对路径节点进行分组并划分组内缓存区域, 同时按照内容副本流行度阈值实现缓存位置迁移, 使得流行度高的内容副本缓存至离请求节点近的区域。实验结果表明, 与ProbCache、LCE和LCD等策略相比, PBP策略能有效降低缓存开销及提高内容副本的缓存命中率, 具有更好的卫星网络传输性能。

**关键词:** 天地一体化智能网络; 节点静态处理; 内容缓存; 缓存策略; 缓存性能

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 石怀峰, 王成功, 蔡睿妍, 等. 天地一体化智能网络节点静态处理与缓存策略[J]. 计算机工程, 2021, 47(1): 30-36.

**英文引用格式:** SHI Huaifeng, WANG Chenggong, CAI Ruiyan, et al. Node static processing and caching strategy in space-ground integrated intelligent network[J]. Computer Engineering, 2021, 47(1): 30-36.

## Node Static Processing and Caching Strategy in Space-Ground Integrated Intelligent Network

SHI Huaifeng<sup>1,2</sup>, WANG Chenggong<sup>1</sup>, CAI Ruiyan<sup>1</sup>, WEI Debin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Communication and Network, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China;

2. College of Automation, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

**[Abstract]** The satellite nodes in space-ground integrated intelligent network have computing, storage and transmission capabilities, so network caching can be improved by storing the content copies on the satellite nodes in the transmission path. To address the path changes caused by the moving satellite nodes, this paper proposes a static processing mechanism for satellite nodes based on virtual location. The mechanism sets the virtual location nodes of satellites, and then caches the content copies to the rear satellite nodes in the same orbit of the virtual location nodes in advance. On this basis, a lightweight grouped caching strategy, PBP, is proposed based on ProbCache to group the nodes in the transmission path and divide the storage area in a group. At the same time, the migration of the storage location are determined according to the threshold of the content copies popularity to make the content copies with high popularity cached to the area nearer to the request node. Experimental results show that compared with ProbCache, LCE, LCD and other strategies, the proposed PBP strategy can effectively reduce the caching cost and increase the cache hit rate of content copies, improving the transmission performance of satellite network.

**[Key words]** space-ground integrated intelligent network; node static processing; content caching; caching strategy; caching performance

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0056554

### 0 概述

天地一体化网络是按照“天基组网、地网跨代、

天地互联”的思路, 以地面网络为基础、以天基网络为延伸, 覆盖太空、空中、陆地、海洋等自然空间, 为天基、陆基、海基等各类用户活动提供信息保障的基

基金项目: 国家自然科学基金(61722105, 61801073)。

作者简介: 石怀峰(1989—), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向为空间信息网络、无线通信; 王成功, 硕士研究生; 蔡睿妍, 副教授、博士; 魏德宾, 副教授、博士研究生。

收稿日期: 2019-11-10 修回日期: 2019-12-20 E-mail: 2321957121@qq.com

基础设施<sup>[1]</sup>。随着网络中节点计算、存储和通信转发能力的大幅提升,天地一体化网络向天地一体化智能网络方向不断演进。

天地一体化智能网络借鉴信息中心网络(Information Centric Network, ICN)的通信模式,使得内容传输由发送者驱动的端到端通信模式向接收者驱动的海量内容获取模式转变,减小了信息传输时延,但同时存在以下两方面的问题。一方面,卫星节点移动性使得传输路径中的返回路径进行调整,进而导致待处理的兴趣表(Pending Interest Table, PIT)与转发信息库(Forward Information Base, FIB)的信息有误,内容包找不到请求节点,同时路径改变会使内容副本缓存的位置发生变化,从而降低缓存收益;另一方面,ICN网络上的传统缓存策略的缓存收益低,而新型缓存策略开销大,均不适用于卫星节点传输。本文利用卫星节点运动的规律性设定虚拟位置,采用提前向后方进行内容缓存的方式解决卫星移动导致的传输路径改变问题,提出一种基于ProbCache的缓存策略,在组的层面上进行分区,并按照内容副本流行度阈值进行存储位置迁移,使得流行度高的内容副本存储至离请求节点近的位置,以提高网络缓存收益。

## 1 相关工作

在ICN网络上的缓存策略大致分为传统缓存策略与新型缓存策略两类。传统缓存策略主要包括LCE<sup>[2]</sup>、LCD<sup>[3]</sup>、MCD<sup>[4]</sup>和ProbCache<sup>[5]</sup>等。LCE是在内容传输的路径节点上进行缓存,但物理节点存储空间有限,限制了所有内容副本的存储。LCD随着请求次数的增加,内容副本的放置位置会单跳地向请求节点移动,且不删除节点的内容副本,但因为节点存储空间有限,所以最终将导致网络中的内容副本差异较小。MCD与LCD的主要区别在于当存储下一跳内容副本时,会将节点内的缓存副本进行删除,MCD的冗余度比LCD低,但当某节点的中心度<sup>[6]</sup>很高时,其无法将内容副本流行度高的内容存储于该节点。同时,MCD与LCD都是以单跳为单位进行内容副本移动,当传输路径经过节点的数量太多时,内容副本的缓存收益会很低。在ProbCache缓存策略中,节点以加权概率缓存收到的包,加权概率与当前节点到请求节点的距离成反比,即当前节点离请求节点越近时,缓存内容副本的概率越大,但在该过程中并没有体现出内容副本的流行度。可以看出,传统缓存策略的内容副本缓存收益<sup>[7]</sup>较低。

在传统缓存策略的基础上,一些新型缓存策略相继被提出。文献[8]对路径访问代价和节点替换代价进行综合考虑,并将代价总量作为内容副本缓存的决策依据。文献[9]提出SatCache缓存方案,该方案基于简单的用户模型,通过聚合大量用户生成

的内容请求,并利用卫星通信媒介的广播特性,创建用户偏好表,估计用户对于给定内容的潜在兴趣。文献[10]构建一种内容交付的双层模型,其中放置于地面站的缓存构成第一层缓存,部署在卫星上的缓存构成第二层缓存,并且提出基于遗传算法的高速缓存策略,从而降低上行和下行链路的卫星消耗带宽。文献[11]通过将缓存决策提前至请求转发阶段,将下游节点的缓存决策信息及内容统计信息逐级反馈给上游节点,辅助上游节点完成缓存决策。文献[12]根据内容传播规律将内容分为早期传播与晚期传播,然后计算出内容副本在不同时期的缓存概率。文献[13]提出一种基于动态流行度与请求代价的命名数据网络缓存策略DPCP,在该策略中所有节点都对每个内容副本进行动态流行度和请求代价的计算,并根据计算结果进行内容替换和缓存节点的选择。文献[14]在多层卫星网络中部署网络内的缓存策略,并提出基于缓存容量和内容流行度的概率缓存策略。文献[15]利用卫星节点对内容的高敏感性和可选择性等特点,将SDN和ICN相结合,提出一种ContentSDSN架构,减小了内容获取时延。文献[16]提出一种APDR新型缓存策略,该策略中的兴趣包除了携带对内容的请求外,还收集沿途各节点对该内容的潜在需求、缓存开销等信息,使得兴趣包的汇聚和目的节点可据此计算出一个缓存方案,并将该方案附加在内容包上,通知返程途中的某些节点缓存该内容包并设置指定的缓存时间。APDR缓存策略的缓存开销小,但是内容潜在需求是指瞬时潜在需求,并未准确反映内容流行度,缓存收益还有上升空间。缓存开销是指将内容副本缓存于传输路径上造成的网络资源开销。可以看出,新型缓存策略由于缓存复杂度高,缓存开销较大,因此不适用于天地一体化智能网络,尤其是卫星网络。

## 2 卫星节点静态处理机制

在卫星路由算法的研究中,对于卫星节点的静态处理通常采用虚拟节点策略。假设卫星的位置与地球表面的固定位置相对应,则该卫星节点就是虚拟节点<sup>[17]</sup>。当使用虚拟节点替换物理卫星节点时,卫星间只传输路由信息,但该策略仅适用于小规模数据传输,而非内容副本传输。基于此,本文设计基于虚拟位置的卫星节点静态处理机制BVL,具体步骤为:

**步骤1** 确定卫星节点的虚拟位置。卫星节点虚拟位置的确定与传统路由中虚拟节点的位置确定方法<sup>[17]</sup>一致。

**步骤2** 定义缓存区域半径的基本单位。将同一卫星轨道相邻两个卫星节点的距离定义为 $R$ 。

**步骤3** 确定缓存区域,如图1所示。设定内容副本流行度阈值 $S$ ,缓存半径 $R_s$ 和 $R_d$ ,高流行度的内

容( $S \sim 1$ )对应的缓存区域为( $0 \sim R_d$ ),低流行度的内容( $0 \sim S$ )对应的缓存区域为( $R_d \sim R_b$ ),具体表示如式(1)所示:

$$\begin{cases} (S \sim 1) \sim (0 \sim R_d) \\ (0 \sim S) \sim (R_d \sim R_b) \end{cases} \quad (1)$$

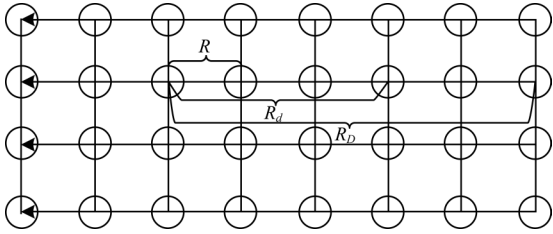


图1 缓存区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of caching area

**步骤4** 确定卫星节点的缓存替换策略。卫星节点采用最近最少使用(Least Recently Used, LRU)策略,当内容副本被替换时,告知虚拟位置的卫星节点。

按照卫星节点静态处理机制对位于虚拟位置的卫星节点内的CS表进行修改,如表1所示。在修改完成后,当虚拟位置节点由下一个物理卫星节点进行替换时,位于虚拟位置的卫星将CS表、FIB表和PIT表移交给下一个卫星节点,并将CS表中的跳数字段数减1。

表1 CS表  
Table 1 CS table

命名	内容	内容在节点内的地址	内容缓存节点离虚拟位置节点的跳数
/soul.com/musics	...	address1	2
/parc.com/videos/WidgeLA.mpg/v3/s0	...	address2	4
⋮	⋮	⋮	⋮

### 3 基于ProbCache的分组缓存策略

#### 3.1 PBP算法设计

在BVL卫星节点静态处理机制的基础上,借鉴APDR中缓存开销较小的通信模式,对ProbCache缓存策略进行改进,提出一种缓存收益大且缓存开销小的缓存策略PBP。PBP实现原理为:随着请求频率的增加,内容副本会在组的层级上跳跃式地接近请求节点,从而快速挑选出流行度高的内容副本缓存在离请求节点较近的区域。

PBP算法具体步骤如下:

**步骤1** 兴趣包到达目的节点时,目的节点依据兴趣包携带的沿途节点存储信息和路径传输时间信息,对传输路径中存储空间和传输时间相似的节点进行分组。

**步骤2** 分组后按照 ProbCache 策略计算每个

分组内缓存内容副本的概率,并将该分组信息通过内容包传输至路径节点。

**步骤3** 设定组内节点的内容副本流行度阈值  $S_1$  和  $S_2$ 。若每个分组以概率  $P(x_b)$  进行内容副本缓存,则随机缓存组内节点并更新组内所有节点的PIT表;若下一次相同内容再次到来,则继续判断内容副本流行度是否达到阈值  $S_1$ ,若达到,则将此数据包复制并存储到内容副本流行度高的区域;若内容副本流行度达到阈值  $S_2$ ,则进行存储位置的组间更改。

**步骤4** 若节点内有该内容包对应的分组,则节点无视内容包携带的分组信息;若节点内没有该内容包对应的分组,则在PIT表内增加分组信息。

本文假设某个请求节点发送兴趣包,且网络中某些节点存在内容包,将请求节点发送的兴趣包命中的节点称为目的节点,而路径中某个节点属于哪个分组由该节点的PIT表决定。

#### 算法1 网络信息传输算法

输入 兴趣包,网络中的各个节点及路径

输出 内容包的缓存位置

- 1.If(兴趣包到达目的节点)
- 2.目的节点通过兴趣包收集到路径节点的存储空间信息和传输时间信息进行决策分组;
- 3.目的节点依据ProbCache策略计算每个分组缓存内容副本的概率  $P(x_b)$ ;
- 4.目的节点发送内容包及携带的分组表告知路径各个节点属于哪一个分组;
- 5.Else
- 6.兴趣包沿途收集经过各个节点的传输时间和处理时间信息,并收集节点剩余存储空间信息,同时向下一个节点进行传输;
- 7.建立PIT表中该内容对应的条目,若PIT表中有对应的内容请求记录,则更新节点的内容请求次数表

#### 算法2 缓存内容副本节点处理算法

输入 兴趣包请求次数,网络中的各个节点

输出 内容包的迁移位置

- 1.根据兴趣包的请求次数,更新节点的内容请求次数表;
- 2.If内容副本流行度阈值为  $S_2 \sim 1$ ,Then进行内容副本的组间存储位置迁移;
- 3.When组间迁移有相同内容,Then丢弃重复的内容包;
- 4.Else If内容副本流行度阈值为  $S_1 \sim S_2$ ,Then进行内容副本的组内存储位置迁移;
- 5.Else不进行内容副本的组内存储位置迁移

缓存策略的传输实例如图2所示。在图2(a)中,请求节点  $Q_1$  发送兴趣包,兴趣包沿途收集路径节点的存储空间信息和节点间的传输时间等信息,当找到位于目的节点  $D$  的内容包后,目的节点会原路返回内容包,并利用兴趣包携带的信息,依据节点相似性对路径节点进行分组,如椭圆实线所示。在图2(b)中,当请求节点  $Q_1$  多次请求达到组内存储区域阈值  $S_1$  和  $S_2$  时,进行存储位置的组内迁移。在图2(c)中,当请求节点  $Q_2$  对内容副本进行请求时,会将内容副本存储在非原路径的第一个节点上,并



依据目的节点划分的分组对本路径剩余的节点进行分组,如椭圆虚线所示。

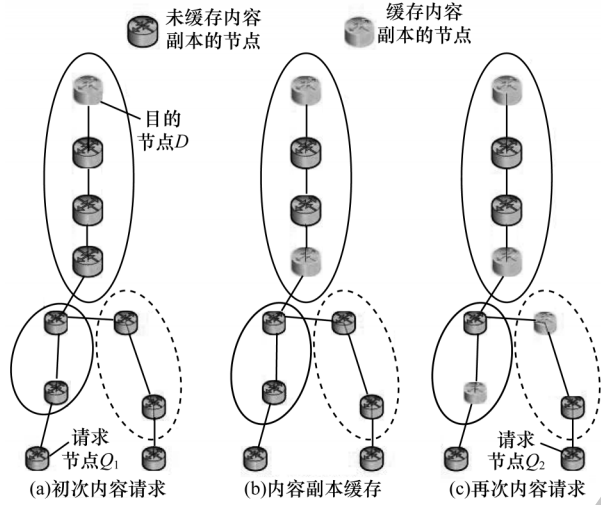


图2 缓存策略的传输实例

Fig.2 Transmission example of caching strategy

将PIT表更改为如表2所示,计算组内缓存的概率 $P(x_B)$ 。

表2 PIT表  
Table 2 PIT table

命名	请求端口	请求次数统计	分组表
/parc.com/videos/WidgeLA.mpg/v3/s1	0,1,2	f1	j1
/soul.com/musics	0,1	f2	j2
⋮	⋮	⋮	⋮

在分组后,存储空间和距离决定了分组 $B$ 的缓存概率 $P(x_B)$ :

$$P(x_B) = \text{TimesIn}(x_B) \times \text{CacheWeight}(x_B) \quad (2)$$

$$\text{TimesIn}(x_B) = \frac{\sum_{i=1}^{c_B - (x_B - 1)} N_i^B}{T_{tw}^B N^B} \quad (3)$$

$$\text{CacheWeight}(x_B) = \frac{x_B}{c_B} \quad (4)$$

其中: $x_B$ 表示当前分组 $B$ 内各个节点离请求节点的平均跳数; $c_B$ 表示从目的节点到请求节点的总传输跳数; $T_{tw}^B$ 表示路径的目标窗口时间; $N^B$ 表示路径中所有分组的平均存储空间大小; $N_i^B$ 表示第 $i$ 个分组的存储空间大小; $\text{TimesIn}(x_B)$ 表示当前分组离请求节点的平均存储空间占路径目标窗口时间所需存储空间的权重,反映了剩余路径的存储能力; $\text{CacheWeight}(x_B)$ 表示当前分组中各个节点到请求节点的平均距离与请求节点到目的节点的距离之比。

### 3.2 PBP策略分析

本文主要分析通过组内缓存分区得到内容传输的减少时间,而一次路径传输中的组内缓存分区如图3所示,其中,分组 $B$ 为路径上的一个分组,组内共有 $j$ 个节点,开始节点为 $i$ ,节点 $u$ 到上一个节点的传输时间为 $T_u$ 。为便于分析,假设组内每个节点缓存的内容副本总量一致且组内存储空间已满。

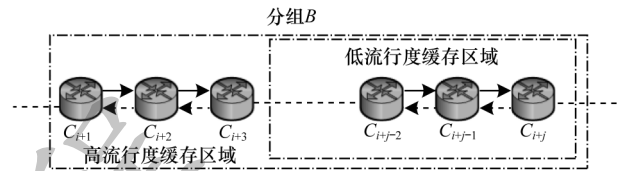


图3 组内缓存分区示意图

Fig.3 Schematic diagram of caching partition within a group

假设不进行组内存储区域划分,则当前分组中所有内容副本到请求节点的平均传输时间为:

$$T_1 = \frac{\sum_{n=1}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j} \quad (5)$$

其中, $n(n=1,2,\dots,j)$ 表示当前分组中的节点数量。

当内容副本进行组内区域迁移时,假设请求频率高的内容所占比例为 $\delta$ ,则请求频率低的内容所占比例为 $1-\delta$ 。按照存储空间大小,将其划分为内容副本流行度低与内容副本流行度高两个区域,按照相同假设可推算出分别有 $\sum_{u=1}^j C_{i+u} \times \delta$ 和 $\sum_{u=1}^j C_{i+u} \times (1-\delta)$ 的存储空间属于内容副本流行度低和内容副本流行度高的区域。由于假设内容副本离请求节点的距离与卫星节点与请求节点的距离相对应,因此 $\sum_{u=1}^j C_{i+u} \times \delta$ 的存储空间对应组内 $j \times \delta$ 个节点,则流行度高的节点与请求节点的平均传输时间为:

$$T_2 = \frac{\sum_{n=1}^{j \times \delta} \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j \times \delta} \quad (6)$$

流行度高的内容传输减少时间为:

$$T_3 = \frac{\sum_{n=1}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j} - \frac{\sum_{n=1}^{j \times \delta} \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j \times \delta} = \left( \frac{\sum_{n=j \times (1-\delta)}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j \times (1-\delta)} - \frac{\sum_{n=1}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j} \right) \times \frac{1-\delta}{\delta} \quad (7)$$

因为 $\frac{\sum_{n=1}^{j \times \delta} \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j \times \delta}$ 和 $\frac{\sum_{n=j \times (1-\delta)}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j \times (1-\delta)}$ 中有一项必定大于

$\frac{\sum_{n=1}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j}$ , 而另一项小于  $\frac{\sum_{n=1}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j}$ , 又因为流行度高的节点到请求节点的传输时间按从小到大排列, 所以

$$\frac{\sum_{n=1}^{j \times \delta} \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j \times \delta} < \frac{\sum_{n=1}^j \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j},$$

从而得出内容传输的减少时间  $T_3 > 0$ 。

当内容副本进行组间迁移时:

$$T_4 = \frac{\sum_{n=1}^{j \times \delta} \sum_{u=1}^{i+n} T_u}{j \times \delta} - T_U \quad (8)$$

其中,  $T_U$  表示相邻组间的平均传输时间。

本文策略的优势在于: 1) 与传统策略相比, 该策略以组的形式向请求节点移动, 缓解了路径拥塞; 2) 阈值设置使得节点能更准确地将流行度高的内容副本向请求节点移动, 解决了 ProbCache 和 APDR 策略中无法兼顾内容副本流行度的问题; 3) 将组内节点到请求节点的平均传输时间作为分组时间, 据此确定组内缓存概率, 使得概率计算更加准确; 4) 分组能考虑网络拓扑对节点中心度的影响, 使得中心度<sup>[7]</sup>高的节点隶属于不同分组, 增大了该节点缓存内容副本的概率; 5) 与传输缓存策略相比, 该策略使用兴趣包携带路径信息的方法来缓存决策, 节点间协作次数少且缓存开销小, 更加适用于天地一体化智能网络。

由理论分析可得, 在现有天地一体化网络中, 当进行星地信息传输时, 由于卫星节点存储空间和传输时延的限制, 因此内容副本会大量存储到地面网络中。然而, 本文策略通过网络缓存内容副本的分布位置优化, 可降低请求内容的传输时延, 并提升用户满意度。

#### 4 仿真与结果分析

在天地一体化智能网络中节点数量较多, 且节点类型与网络拓扑结构复杂。本文使用基于 NS-3<sup>[18]</sup> 环境的开源仿真工具 NDNsim<sup>[19]</sup> 对 PBP 策略进行实现。实验环境设置为 Ubuntu16.04, 内存为 4 GB, CPU 为 Intel Core i7 16 GHz, 版本为 NDNsim-v2.6。为与实际情况相符, 搭建卫星节点静态化后的天地一体化智能网络传输模型, 模型中的节点总数为 35, 其中的 2 个普通节点没有存储能力, 所有节点的存储总量和节点间的传输时间如图 4 所示。在天地一体化智能网络中, 天基骨干网、天基接入网、地基骨干网、地面互联网和移动通信网节点的缓存总量为 40M、20M、200M、100M 和 100M, 相邻节点之间的传输时延为 300 ms、100 ms、1 ms、0.5 ms 和 0.5 ms, 地基骨干网和移动通信网与地面互联网节点之间的传输时延均为 1 ms。

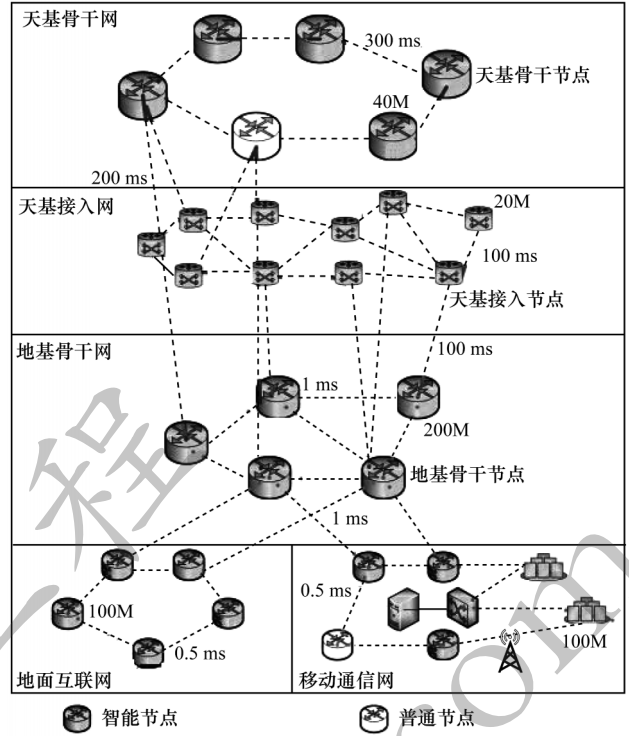


图 4 天地一体化智能网络传输模型

Fig.4 Transmission model of space-ground integrated intelligent network

每个节点都产生内容请求, 并且对内容块的请求模式遵循 Zipf 分布<sup>[20]</sup>。节点产生的访问速率模型服从  $\lambda$  泊松分布。实验参数设置如表 3 所示。在本文 PBP 策略中按照节点相似性和节点数量进行分组, 由于地面节点较多, 因此会以较大的概率存储内容副本并进行频繁的内容副本复制与移动。实验过程共持续 180 s, 其中初始化时间为 60 s。

表 3 实验参数设置

Table 3 Setting of experimental parameters

参数名	默认值	变化范围
Zipf 分布参数 $a$	1.0	0.7~1.3
内容总量/slot	50 000	20 000~80 000
请求速率/(request·s <sup>-1</sup> )	20	5~35

##### 4.1 性能指标

为反映服务质量, 定义平均跳数和缓存命中率两个指标, 这两个指标反映了路径中的节点缓存收益。平均跳数的计算公式为:

$$P' = \frac{\sum_{\alpha=1}^A C(\alpha)}{\sum_{\alpha=1}^A C'(\alpha)} \quad (9)$$

其中,  $C(\alpha)$  表示使用路径节点缓存时获取内容所需跳数,  $C'(\alpha)$  表示不使用路径节点缓存时获取内容所需跳数,  $A$  表示网络中共收到的请求次数,  $\alpha$  表示第  $\alpha$  次请求。

缓存命中率的计算公式为:

$$P^m = \frac{\sum_{\beta=1}^B D(\beta)}{\sum_{\beta=1}^B D'(\beta)} \quad (10)$$

其中,  $D(\beta)$  为一段时间内节点  $\beta$  命中请求的次数,  $D'(\beta)$  为一段时间内节点  $\beta$  收到的数据请求总次数,  $B$  为网络中的节点总数。

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 Zipf分布参数分析

本节主要研究 Zipf 分布参数对缓存性能的影响。从图 5 可看出, Zipf 分布参数从 0.7 增加到 1.3 时, 缓存性能逐渐改善, 这主要是因为 Zipf 分布参数增加使得内容局部性增强, 节点对同一内容副本的请求概率增加, 所以平均跳数降低, 缓存命中率整体提高, 而 PBP 策略性能表现最佳, 相比 ProbCache 策略平均跳数减少 22%, 平均缓存命中率提高 97%。

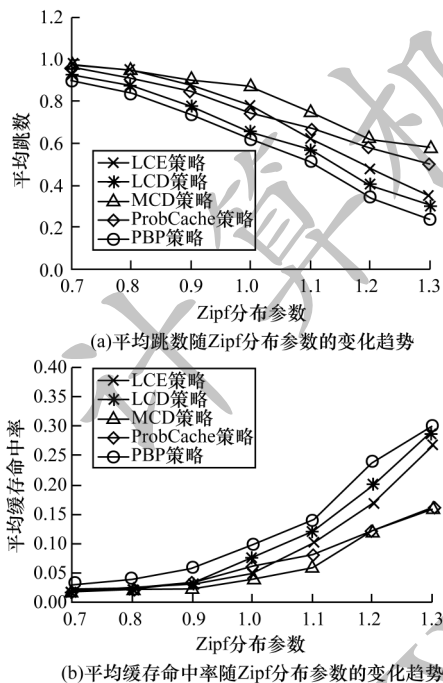


图5 Zipf分布参数对缓存策略的影响

Fig.5 The impact of Zipf distribution parameter on caching strategy

### 4.2.2 内容总量分析

本节主要研究内容总量对缓存性能的影响。从图 6 可看出, 传统缓存策略除 LCD 策略外, 随着网络内容总量的增加, 平均跳数呈上升趋势, 缓存命中率逐渐降低, 这主要是因为内容总量变化较大导致内容局部性降低。LCD 策略的平均跳数和缓存命中率基本不变, 这主要是因为其本身就是反映内容的需求次数, 而与内容总量无关。同时, PBP 策略具有最佳性能表现, 在内容总量为 50 000 slot 时, PBP 策略的平均跳数比 ProbCache 策略减少 20%, 平均缓存命中率提高 51%。

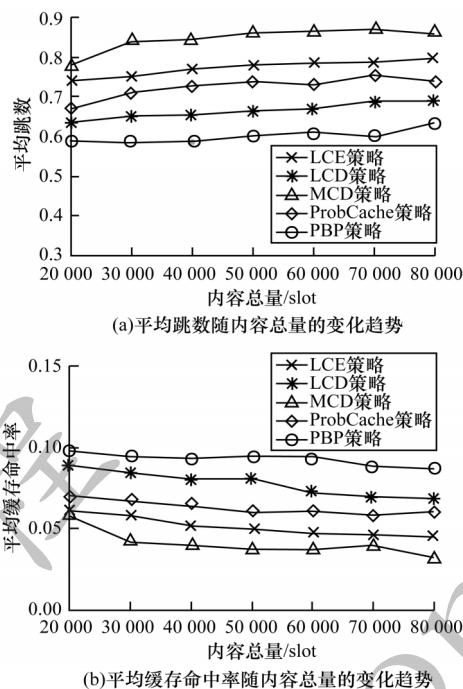


图6 内容总量对缓存策略的影响

Fig.6 The impact of total content on caching strategy

### 4.2.3 请求速率分析

本节主要研究请求速率对缓存性能的影响。从图 7 可看出, 随着请求速率的变化, 各种缓存策略的性能指标并没有明显变化, 这表明当前请求速率在节点能力范围内。PBP 策略随着用户请求速率的增加, 平均跳数和平均缓存命中率没有明显变化, 但总体性能表现仍为最佳, 相比 ProbCache 策略平均跳数减少 14%, 平均缓存命中率提高 48%。

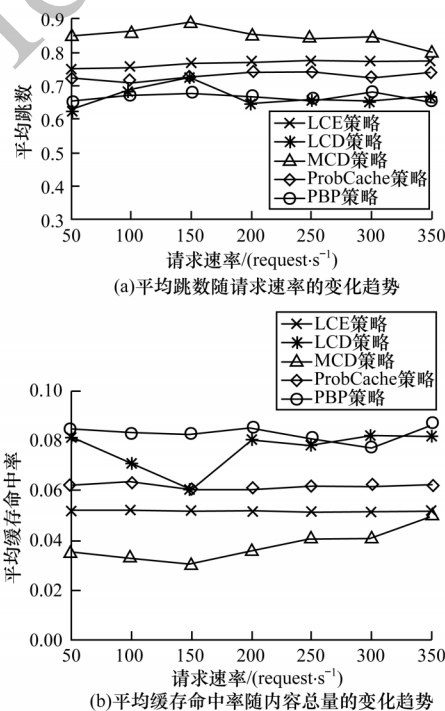


图7 请求速率对缓存策略的影响

Fig.7 The impact of request rate on caching strategy



## 5 结束语

本文针对天地一体化智能网络中卫星节点移动导致的缓存路径改变问题,提出基于虚拟位置与提前缓存的卫星节点静态处理机制与基于ProbCache的轻量级分组缓存策略,将天地一体化智能网络中的路径节点进行分组并划分组内缓存区域,使得缓存空间更加符合内容副本流行度的特点,从而筛选出流行度高的内容副本缓存至离请求节点较近的区域。实验结果表明,与ProbCache、LCE和LCD等策略相比,本文策略能有效减少缓存开销,并提高路径节点的内容副本缓存收益,更适用于天地一体化智能网络。后续将对卫星节点静态处理规则进行优化,使其能适用于更多类型的网络拓扑结构,进一步扩大应用范围。

## 参考文献

- [1] The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation. China Electronics Technology Group Corporation knits the "space-ground integrated information network"[EB/OL]. [2019-09-09]. [https://www.sohu.com/a/192285971\\_706518.html](https://www.sohu.com/a/192285971_706518.html). (in Chinese)  
中国电子科技集团公司第五十四研究所. 中国电科编织“天地一体化信息网”[EB/OL]. [2019-09-09]. [https://www.sohu.com/a/192285971\\_706518.html](https://www.sohu.com/a/192285971_706518.html).
- [2] LAOUTARIS N, SYNTILA S, STAVRAKAKIS I. Meta algorithms for hierarchical Web caches[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Performance. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005: 445-452.
- [3] BERNARDINI C, SILVERSTON T, FESTOR O. A comparison of caching strategies for content centric networking [C]//Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [4] ZHANG Guoqiang, LI Yang, LIN Tao. Caching in information centric networking: a survey[J]. Computer Networks, 2013, 57(16): 3128-3141.
- [5] PSARAS I, CHAI W K, PAVLOU G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks[C]//Proceedings of the 2nd ICN Workshop on Information-centric Networking. New York, USA: ACM Press, 2012: 55-60.
- [6] RUI Lanlan, PENG Hao, HUANG Haoqiu, et al. Information center network caching strategy based on content popularity and node centrality matching [J]. Journal of Electronics and Information, 2016, 38(2): 75-81. (in Chinese)  
芮兰兰, 彭昊, 黄豪球, 等. 基于内容流行度和节点中心度匹配的信息中心网络缓存策略[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 75-81.
- [7] CHEN Long, TANG Hongbo, LUO Xingguo, et al. Information center network caching mechanism based on revenue perception [J]. Journal of Communications, 2016, 37(5): 134-146. (in Chinese)  
陈龙, 汤红波, 罗兴国, 等. 基于收益感知的信息中心网络缓存机制[J]. 通信学报, 2016, 37(5): 134-146.
- [8] CAI Ling, WANG Jinkuan, WANG Xingwei. Path cost and node cost based caching strategy for information-centric network[EB/OL]. [2019-09-09]. [http://www.en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-XXWX201711007.htm](http://www.en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-XXWX201711007.htm).
- [9] D'ORO S, GALLUCCIO L, MORABITO G, et al. SatCache: a profile-aware caching strategy for information-centric satellite networks[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014, 25(4): 436-444.
- [10] WU Hao, LI Jian, LU Hancheng, et al. A two-layer caching model for content delivery services in satellite-terrestrial networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 1-8.
- [11] ZHI Jiang, LI Jun, WU Haibo, et al. Edge first based ICN cache collaboration strategy [J]. Journal of Communications, 2017, 38(3): 53-64. (in Chinese)  
智江, 李俊, 吴海博, 等. 基于边缘优先的ICN缓存协作策略[J]. 通信学报, 2017, 38(3): 53-64.
- [12] LIU Waixi, YU Shunzheng, HU Xiao, et al. Research on selective caching mechanism in CCN [J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(2): 19-32. (in Chinese)  
刘外喜, 余顺争, 胡晓, 等. CCN中选择性缓存机制的研究[J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 19-32.
- [13] GUO Chen, ZHENG Quan, DING Yao, et al. Cache strategy based on dynamic popularity and request cost in named data networking [J]. Computer Engineering, 2018, 44(2): 46-50. (in Chinese)  
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.
- [14] XU Ji, SONG Tian, YANG Yating, et al. Research on data caching technology for multilayer satellite network [J]. Manned Space, 2019, 25(4): 461-467. (in Chinese)  
徐冀, 嵩天, 杨雅婷, 等. 多层卫星网络数据缓存技术研究[J]. 载人航天, 2019, 25(4): 461-467.
- [15] LIU Zhiguo, ZHU Jie, PAN Chengsheng, et al. Satellite network architecture design based on SDN and ICN technology [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 124-131.
- [16] LIU Waixi, YU Shunzheng, CAI Jun, et al. A cooperative caching mechanism in ICN[J]. Journal of Software, 2013, 24(8): 257-272. (in Chinese)  
刘外喜, 余顺争, 蔡君, 等. ICN中的一种协作缓存机制[J]. 软件学报, 2013, 24(8): 257-272.
- [17] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 9(2): 137-147.
- [18] HENDERSON T R, et al. NS-3 project goals [C]//Proceedings of 2006 Workshop on NS-2; the IP Network Simulator. New York, USA: ACM Press, 2006: 1-7.
- [19] AFANASYEV A, MOISEENKO I, ZHANG L. NDNSim: NDN simulator for NS-3; NDN-0005[R]. [S. l.]: NDN, 2012: 1-7.
- [20] YAMAKAMI T. A Zipf-like distribution of popularity and hits in the mobile Web pages with short life time [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 240-243.

编辑 陆燕菲