

# 低轨小卫星网络中基于编码缓存的协同传输机制研究

李 健<sup>1</sup>, 薛开平<sup>1</sup>, 卢汉成<sup>2</sup>

(1.中国科学技术大学网络空间安全学院, 安徽 合肥 230027;

2.中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:** 随着低轨小卫星网络的快速发展, 地面用户将可以借助密集部署的低轨卫星网络享受到全球覆盖的内容传输服务。由于星地通信链路往往具有长时延特性, 再加上星上有限的通信和能量资源, 卫星在提供内容传输服务的同时面临着传输开销的压力。因此, 针对低轨小卫星网络, 提出一种基于编码缓存的协同传输机制以实现高效的内容分发。通过采用细粒度的编码缓存方案, 可以使得地面用户在请求内容数据时, 同时接收来自多个低轨卫星节点缓存的编码数据, 实现回程链路开销的降低与缓存效率的提升。仿真结果表明, 在部署星上缓存后, 可以降低39%以上的传输开销; 当采用基于编码缓存的传输方案时, 随着协同卫星数量的增加, 可以进一步降低9%~42%的传输开销。

**关键词:** 低轨小卫星网络; 编码缓存; 协同传输; 内容分发

**中图分类号:** TN927

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.2021016

## Research on Coded Caching-Enabled Cooperative Transmission Mechanism in LEO Small Satellite Network

LI Jian<sup>1</sup>, XUE Kaiping<sup>1</sup>, LU Hancheng<sup>2</sup>

1.School of Cyber Security, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

2.Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

**Abstract:** Along with the rapid development of low earth orbit (LEO) small satellite network, users can access content retrieval service through dense-deployed LEO satellite networks in the future. Due to the long propagation delay of satellite-to-terrestrial link, and also the constraint of limited communication resource and energy resource, it is difficult for satellites to provide efficient content transmission service when facing the pressure of onboard overhead. A coded caching-based cooperative transmission mechanism was proposed in dense-deployed LEO small satellite network to achieve efficient content distribution. By adopting fine-grained coded caching scheme, users could simultaneously receive cached packets from multiple LEO satellites to mitigated the cost of satellite backhaul link and improved the caching efficiency. The simulation results showed that, after deploying onboard caching, the cost of content transmission could be reduced at least 39%. When coded caching-based transmission scheme was adopted, the cost of content transmission could be further reduced by 9%-42% with the increase of satellites providing cooperative transmission.

**Keywords:** low earth orbit small satellite network, coded caching, cooperative transmission, content distribution

## 1 引言

由于卫星网络具有全球覆盖、无缝接入和无须基础设施等特点, 在诸如全球漫游、偏远地区覆盖、应急通信、数据广播等应用场景下有着天然优势, 因此其被广泛地认为是当前地面移动通信网络的一种有力补充<sup>[1-2]</sup>。

相较于传统的中高轨道卫星, 低轨卫星具有更低的时延、更低的信号衰减和更少的运维成本等优良特性<sup>[3-5]</sup>。目前, 以SpaceX为代表的国内外公司或机构已经开始计划发射成千上万的低轨卫星用于提供全球化数据接入服务<sup>[4-5]</sup>。可以预见, 在未来的数十年内, 新一代的低轨卫

**收稿日期:** 2021-01-18; **修回日期:** 2021-03-10

**通信作者:** 薛开平, kpxue@ustc.edu.cn

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (No. 61972371); 中科院青年创新促进会优秀会员支持项目 (No. Y202093)

**Foundation Items:** National Natural Science Foundation of China(No. 61972371), Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences(No. Y202093)

星网络将成为一种可靠的无线接入系统，具有广泛的发展潜力。

相较于传统的地面网络，卫星网络的数据接入面临着两个方面的挑战。一方面，由于星地通信链路的长时延和有限带宽，卫星网络提供的数据传输服务往往具有较差的性能，进而会对服务质量和用户体验产生严重影响；另一方面，由于星上资源受限的环境，面对大量的数据传输需求时，卫星在能耗和通信资源方面会承担较大的压力，严重限制了卫星数据通信时间和服务质量的提升。考虑到地面用户日益增长的数据服务需求，如何实现高效的数据传输是未来低轨小卫星网络所需要克服的重要问题之一。

为了解决卫星网络在内容分发时所面临的挑战，研究者开始考虑采用星上缓存来弥补卫星在传输时存在的短板。首先，当用户的内容请求已经被缓存时，通过缓存内容的及时响应可以有效减少卫星对于回程链路的依赖，进而缩短数据的回传时延；其次，通过减少在回程链路上的星间/星地传输次数，可以有效缓解卫星在能耗和通信资源方面的压力，延长卫星的服务时间和使用寿命。在一些研究<sup>[5-8]</sup>中，开始考虑在卫星网络中引入缓存，例如采用信息中心网络中的网内缓存思想，通过在星上存储用户偏好的热门内容数据，采用优化后的缓存策略，来提升卫星在不同场景下的传输性能。进一步地，为了提升缓存效率，近年来有一些研究开始考虑采用细粒度的编码缓存<sup>[10-11]</sup>方案，并通过细粒度的缓存决策实现在卫星网络中更高效的内容分发。

随着低轨卫星网络的迅速发展，未来卫星网络的部署与建设将呈现密集化趋势，对于同一地面用户，将可以同时享受到多颗卫星节点的覆盖。因此，地面用户可以通过潜在的多点协同传输来实现类似地面网络中带宽聚合、稳健性增强等传输特性<sup>[12-15]</sup>。考虑到之前所提到的星上缓存所带来的好处，可以预见，如果能够实现星上缓存与卫星多点协同传输的结合，将能够带来显著的性能提升。遗憾的是，目前尚未有工作考虑在低轨卫星网络中对二者进行结合。

本文将考虑针对密集低轨卫星网络，设计一种基于编码缓存的协同传输方案。通过将内容文件细粒度切分，并采用线性编码方案去除数据之间的传输相关性，使得地面用户可以在多颗卫星节点覆盖时，得到与接入节点数量相关的传输增益，从而帮助低轨卫星系统实现高效的内容分发。

## 2 系统模型

本节首先探讨有关低轨小卫星网络中的传输特性，

以及编码缓存的实现方式和协同多点传输的基本思想，最后通过数学建模，建立在卫星网络中基于编码缓存的缓存决策问题。

### 2.1 文件请求模型

在5G系统的标准化设计方案<sup>[2]</sup>中，以卫星接入为代表的新型数据接入方式主要用于增强型移动宽带（enhanced Mobile Broadband, eMBB）场景。因此，本文主要关注占据当前互联网流量开销首位的内容分发应用。考虑到当前互联网中文件内容的请求往往呈现出少量热门内容占据大部分流量的情况。因此，在网络中的所有文件内容，本文假设其流行度分布遵从齐普夫（Zipf）分布。对于文件*i*而言，其流行度可以用式(1)计算得到<sup>[10]</sup>

$$P_i = \frac{1/i^\theta}{\sum_{n=1}^N 1/n^\theta} \quad (1)$$

其中，*n*代表其在所有文件中的流行度排名，*N*代表总的文件数，*θ*代表Zipf分布中的指数参数。在此，对于地面用户对各个文件的请求，本文假设其等同于各个文件的流行度。

### 2.2 编码缓存

在许多相关的研究工作中，已经证实了在网络中部署缓存可以帮助实现更高效的传输方案并减少网络开销。在低轨小卫星网络中，由于低轨卫星自身相对地面做高速运动（典型相对地面运动速度可达7.9 km/s），因此，地面用户将周期性接入不同卫星节点享受数据服务。此时，如果在卫星节点上部署传统缓存方案，当用户内容请求命中时，虽然依旧可以减少回程链路上的数据传输，降低网络开销和传输时延，但是为了使得地面用户可以随时随地地享受到缓存命中带来的服务，必须在所有卫星节点上都缓存相同的内容数据，这样一来将大大降低缓存效率。

与传统缓存方案相比，编码缓存是结合了网络编码的一种高效缓存方案，其原理示意如图1所示。假设总的文件内容数量为*N*，并用*F*表示所有文件集合，每个卫星节点的缓存空间大小为*ML*个比特，每个文件均具有相同大小，且每个文件被切分为*K*份等长的数据块，每份数据块大小为*L*。每个文件切分后的*K*份等长的数据块，可以通过指定的编码方式得到任意多的编码数据块，并被保存到卫星节点中。

通过上述文件内容的切分以及编码操作，卫星节点在向地面用户进行下行数据传输时，为了得到自身请求的源文件内容，地面用户需要从一个或多个卫星节点处

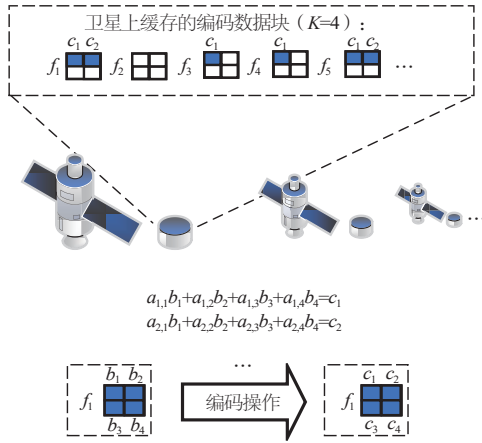


图1 星上编码缓存原理示意

接收至少 $K$ 份线性无关的编码数据块，并通过本地解码操作还原出大小为 $KL$ 的源文件内容。在这里，对于同一文件内容，如果能够保证卫星节点上缓存的所有编码数据块内容彼此之间线性无关，则能够保证地面用户每次可以从 $K$ 份编码数据块中解码得到源文件内容。实际应用中，可采用随机线性网络编码（Random Linear Network Coding, RLNC）或者最大距离可分（Maximum-Distance Separable, MDS）编码<sup>[5, 11, 16]</sup>实现上述编码过程。通过这种编码缓存操作，既可以做到对源文件内容的细粒度切分，增加缓存决策时的灵活性；又可以去除细粒度数据块之间的相关性，使每个卫星节点可以缓存任意数量的编码数据块。

这里需要说明的是，如果希望采用一种细粒度的传输缓存方案，只是单纯将源内容文件进行切分而不进行编码操作，则会面临传输相关性的问题。例如，地面用户在请求文件 $i$ 时，用户必须从不同节点处获取关于文件 $i$ 上下关联的子数据块才能恢复出源文件。一旦获取的子数据块相互重复，则这种细粒度的缓存将无法带来缓存收益。因此，这种方案往往只适用于网络拓扑相对固定的场景，对于具有高度移动性的星地接入场景不适用。

### 2.3 协同传输方案

由于未来低轨小卫星部署呈现密集化特点，地面用户在同一时间往往处在多颗低轨卫星的覆盖范围内，因此可以采用多颗卫星协同传输的方案来实现高效的下行内容数据分发。本文所提出的基于编码缓存的协同传输方案如图2所示，假设网络中所有低轨卫星节点均采用图1中的编码缓存策略。其具体的通信过程可以分为两个阶段，即通信建立阶段和数据传输阶段。具体过程如下。

（1）通信建立阶段：在地面用户接入低轨卫星网络之前，用户的卫星通信终端需要搜索由低轨卫星发出的

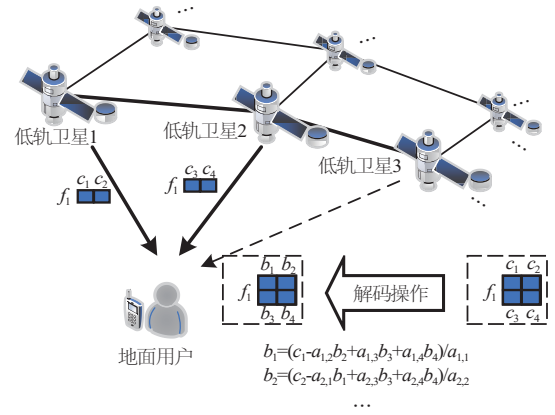


图2 基于编码缓存的协同传输方案

周期性广播信号。一旦用户终端接收到来自低轨卫星的广播信号，终端将进一步向卫星节点发送包含认证信息的接入请求。当认证完成后，卫星网络侧将根据当前卫星覆盖状况和实时负载情况，为地面用户分配相应的通信资源，包括接入信道、IP地址等，同时允许最多 $R$ 个低轨卫星用于用户的下行数据传输。

（2）数据传输阶段：当地面用户希望对内容文件进行请求时，假设请求的是文件 $f_i$ ，用户终端将广播发送请求数据包；处于覆盖范围内的所有低轨卫星在接收到请求后，首先检查自身的缓存空间，如果缓存命中，则直接返回自身已缓存的关于文件 $f_i$ 的编码数据块。如图2所示，此时用户终端在一个传输时隙内将同时接收低轨卫星1和低轨卫星2所发送的内容数据 $c_1, c_2$ 和 $c_3, c_4$ 。接收完成后，再通过线性解码操作，还原得到内容文件 $f_i$ 对应的原始数据块 $b_1, b_2, b_3, b_4$ 。如果缓存没有命中，请求将通过回程链路，经过 $H$ 跳星间/星地链路将请求转发至地面站，从而取回原始文件 $f_i$ 。

### 2.4 缓存决策问题

考虑到资源受限的星上环境，本文希望采用星上缓存来帮助低轨小卫星网络降低网络开销。在卫星提供下行内容分发服务的同时，尽可能减少对于星间/星地链路的开销，并在此基础上降低用户的内容获取时延。因此，本文将建立一个通过优化星上缓存决策来同时最小化卫星链路开销和内容传输时延的效用问题。

假设地面用户的内容请求数据在没有缓存情况下，需要经过 $H+1$ 跳星间/星地链路转发才能取回，且每个地面用户最多可以接入 $R$ 颗低轨卫星节点。本文采用 $m_i$ 表示星上对于文件 $i$ 的缓存决策变量。根据之前关于协同传输机制的描述，关于最小化卫星链路开销和内容传输时延的效用问题可以建模成如下形式

$$\min U = \sum_{m_i} p_i [\alpha HL(K - \min\{Rm_i, K\}) + \beta Ht(1 - \text{sgn}(Rm_i - K))] \quad (\text{P1})$$

s.t.

$$\sum_i m_i L \leq ML \quad (\text{C1})$$

$$\sum p_i = 1 \quad (\text{C2})$$

$$m_i \in [0, K], m_i \in N^+ \quad (\text{C3})$$

其中, 系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别代表星地链路需要传输的总数据量和传输时延在效用函数中的权重,  $t$ 代表星间/星地链路一跳的传输时延。函数 $\min[x, y]$ 用来取 $x$ 、 $y$ 中最小的值; 函数 $\text{sgn}(x)$ 代表阶跃函数, 当 $x \geq 0$ 时, 为1, 否则为0。对于内容文件的时延, 由于只有当全部内容数据完成解码后, 才可以视为内容成功到达地面用户, 因此, 采用阶跃函数来刻画时延代价。约束(C1)代表低轨卫星节点上的缓存大小限制, 约束(C2)代表总的流行度之和, 约束(C3)表示缓存变量 $m_i$ 作为整数变量的取值范围。

由于函数 $\min[x, y]$ 和 $\text{sgn}(x)$ 的存在, 可以看出原问题(P1)是一个典型的整数非线性规划问题, 难以直接进行求解。因此, 下面将首先分析这一问题所具有的性质, 并尝试设计一个多项式时间内的决策算法来得出最优缓存策略。

### 3 问题分析和求解

#### 3.1 问题性质分析

为了对原问题(P1)进行求解, 下面分析原问题所具有的一些性质, 并基于这些性质设计相应的求解算法。

引理1. 对于同一文件 $i$ , 当 $m_i \leq K/R$ 时, 原问题(P1)中的目标函数值随着 $m_i$ 的增加而单调递减。

证明: 令 $a < b \leq K/R$ 且 $a, b \in N^+$ 。将相应的缓存策略代入目标函数时, 可得

$$U(m_i=a) = p_i H(\alpha LK + \beta t) - p_i H(\alpha L \min\{Ra, K\} + \beta t \text{sgn}(Ra - K)) \quad (2)$$

以及

$$U(m_i=b) = p_i H(\alpha LK + \beta t) - p_i H(\alpha L \min\{Rb, K\} + \beta t \text{sgn}(Rb - K)) \quad (3)$$

如果比较两者的大小, 可以得到

$$U(m_i=a) - U(m_i=b) = p_i H(\alpha L \min\{Rb, K\} + \beta t \text{sgn}(Rb - K)) - p_i H(\alpha L \min\{Ra, K\} + \beta t \text{sgn}(Ra - K)) \quad (4)$$

由于 $\min\{Rb, K\} - \min\{Ra, K\} = R(b-a) > 0$ 且 $\text{sgn}(Rb - K) - \text{sgn}(Ra - K) \geq 0$ , 因此式(4)在满足 $a < b \leq K/R$ 时必然大于零, 故而得证。

引理2. 如果对于文件 $i$ 和文件 $j$ , 满足 $p_i \geq p_j$ , 那么, 当 $x_i \geq x_j$ 时定有 $U(x_i) \geq U(x_j)$ 成立。

证明: 在此利用反证法进行证明。假设两个文件 $f_1$ 和 $f_2$ , 其流行度为 $p_1 \geq p_2$ , 同时令 $a \leq b$ 且 $a, b \in N^+$ 。假设

$m^* = \{m_1=a, m_2=b\}$ 为最优缓存策略, 那么相应的, 可以得到另一个次优缓存策略 $m' = \{m_1=b, m_2=a\}$ 。根据上述假设, 将两种缓存策略带入目标函数中, 可以分别得到

$$U(m^*) = [(p_1 + p_2)H(\alpha LK + \beta t) - p_1 H(\alpha L \min\{Ra, K\} + \beta t \text{sgn}(Ra - K)) - p_2 H(\alpha L \min\{Rb, K\} + \beta t \text{sgn}(Rb - K))] \quad (5)$$

以及

$$U(m') = [(p_1 + p_2)H(\alpha LK + \beta t) - p_1 H(\alpha L \min\{Rb, K\} + \beta t \text{sgn}(Rb - K)) - p_2 H(\alpha L \min\{Ra, K\} + \beta t \text{sgn}(Ra - K))] \quad (6)$$

如果比较两者值的大小, 可以得到

$$U(m^*) - U(m') = [-p_1 H(\alpha L \min\{Ra, K\} + \beta t \text{sgn}(Ra - K)) - p_2 H(\alpha L \min\{Rb, K\} + \beta t \text{sgn}(Rb - K)) + p_1 H(\alpha L \min\{Rb, K\} + \beta t \text{sgn}(Rb - K)) + p_2 H(\alpha L \min\{Ra, K\} + \beta t \text{sgn}(Ra - K))] \quad (7)$$

此时 $U(m^*) - U(m')$ 的值与 $a$ 和 $b$ 的取值有关, 接下来分3种情况讨论。

(1) 当 $a \geq K/R$ 时, 由于 $a \leq b$ ,  $\min\{Ra, K\} = K$ , 并且 $\text{sgn}(Ra - K) = 1$ , 因此有

$$U(m^*) - U(m') = 0 \quad (8)$$

此时,  $m^*$ 和 $m'$ 均是最优缓存策略。

(2) 当 $b < K/R$ , 由于 $a \leq b$ ,  $p_1 \geq p_2$ ,  $\min\{Ra, K\} = Ra$ , 并且 $\text{sgn}(Ra - K) = 0$ , 因此有

$$U(m^*) - U(m') = \alpha HL[-p_1(Ra) - p_2(Rb) + p_1(Rb) + p_2(Ra)] = \alpha HLR(a-b)(p_2 - p_1) > 0 \quad (9)$$

此时,  $m^*$ 显然不是最优缓存策略。

(3) 当 $b \geq K/R$ 且 $a < K/R$ 时, 由于 $a \leq b$ ,  $p_1 \geq p_2$ ,  $\min(Ra, K) = Ra$ ,  $\min(Rb, K) = K$ ,  $\text{sgn}(Ra - K) = 0$ , 并且 $\text{sgn}(Rb - K) = 1$ , 因此有

$$U(m^*) - U(m') = \alpha HL[-p_1(Ra) - p_2(K) + p_1(K) + p_2(Ra)] + \beta t(p_1 - p_2) = \alpha HLR[p_1(K - Ra) + p_2(Ra - K)] + \beta t(p_1 - p_2) = \alpha HLR(K - Ra)(p_1 - p_2) + \beta t(p_1 - p_2) > 0 \quad (10)$$

此时,  $m^*$ 显然不是最优缓存策略。

因此,  $U(m^*) - U(m') \geq 0$ , 缓存策略 $m'$ 可以实现至少与缓存策略 $m^*$ 相等的性能。这与之前的假设, 即 $m^*$ 最优缓存策略相违背, 从而得证。

#### 3.2 问题求解

通过3.1小节中所证明的两个引理可知, 原问题(P1)的最优缓存策略满足流行度优先的原则, 即流行度较高的文件应缓存的数据块数量不低于流行度较低的文件。因此, 可以根据这一性质, 按照文件的流行度从高到低设计一种类似注水的缓存决策算法, 具体流程如算法1所示。算法首先根据流行度大小对各个文件按照降序进行排序操作, 初始时从流行度最高的文件开始, 每次检查多缓存一个编码数据块所带来的增益, 并添加相应的缓存策略, 直到其增益小于缓存下一个文件所带来的增益为止。算法照此依



次进行,当缓存的编码数据块数量已经占满缓存空间或者检查完最后的文件后,算法跳出循环并结束。

算法1. 编码缓存决策算法

输入: 文件数量 $N$ , 数据块数量 $K$

输出: 缓存策略 $m_i, i \in [1, N]$

```

1. 初始化: 按照流行度对文件进行降序排序;
2. while true
3.   if  $i \geq N || \text{sum}(m_i) \geq M$ 
4.     break;
5.   end
6.   if  $U(m_i+1) < U(m_{i+1}+1)$ 
7.     if  $m_i+1 \leq K/R \ \& \ m_i+1 \leq m_{\max}$ 
8.        $m_i = m_i+1$ ;
9.     else
10.       $i = i+1$ ;
11.    end
12.  else
13.    if  $m_i \leq m_{\max}$ 
14.       $m_{\max} = m_i$ ;
15.    end
16.     $i = i+1$ ;
17.  end
18.  if  $m_i \geq K$ ;
19.     $i = i+1$ ;
20.  end
21. end

```

上述算法1的时间复杂度主要分为对文件排序和缓存增益检查两部分,假设文件总数为 $N$ ,按照流行度对文件进行排序时,复杂度为 $O(N \log(N))$ ;在缓存决策搜索过程中,其最差情况下会遍历 $N$ 个文件和其相应的 $K$ 编码数据块,复杂度为 $O(NK)$ 。因此总的复杂度为 $O(N \log(N) + NK)$ 。

## 4 仿真与分析

### 4.1 仿真设置

为了验证本文所提的基于编码缓存的协同传输方案的有效性,本小节将借助数值仿真的方式对方案性能进行验证。为了对比与传统方案的性能差异,本文在仿真中采用了3种对比方案,分别为:

(1) 流行度优先缓存:传统基于流行度优先缓存策略的单点传输方案,此方案按照流行度缓存最热门内容文件,且每次缓存完整文件内容,即 $K$ 个数据块,地面用户的请求被任意一个缓存命中的卫星节点进行服务;

(2) 随机编码缓存:基于随机编码缓存策略的协同传输方案,此方案随机选取内容文件进行缓存,地面用户

可以同时接入 $R$ 个卫星节点获取星上已缓存的内容数据;

(3) 无缓存:无缓存情况下的传输策略,地面用户的内容请求将被直接转发至地面站用于获取相应内容文件数据。

在仿真中假设每颗卫星配置相同的缓存大小。为了在效用函数中同时考虑带宽开销与时延开销的影响,对函数中的系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 采用归一化参数,即 $\alpha=1/(HKL)$ 和 $\beta=1/(Ht)$ ,星间/星地数据传播时延 $t$ 采用距离与传播速率的比值。具体的仿真参数见表1。

表1 仿真参数

| 参数名称          | 参数值    |
|---------------|--------|
| 卫星轨道高度        | 550 km |
| 星间/星地一跳传输时延   | 1.8 ms |
| 回程链路跳数 $H$ /跳 | 1      |
| 文件数量/个        | $10^3$ |

### 4.2 仿真结果

协同传输方案在不同缓存空间大小下的性能对比如图3所示。可以看到,在采用星上缓存后,通过多点协同传输,可以有效减少内容分发时星上回程链路的带宽开销和时延开销,但需要采用合适的编码缓存策略。对于基于流行度优先的传统缓存策略,随着缓存空间的增加,可以实现39%~66%的开销降低。而采用随机编码缓存的方案,则可以在此基础上进一步减少9%左右的开销,效果十分显著。同时,随着缓存空间的增加,星上缓存所带来的增益在逐步下降,这是由于文件内容流行度的指数下降特性所导致的边际效用递减现象。因此,在实际部署时,往往需要权衡缓存成本与缓存收益。

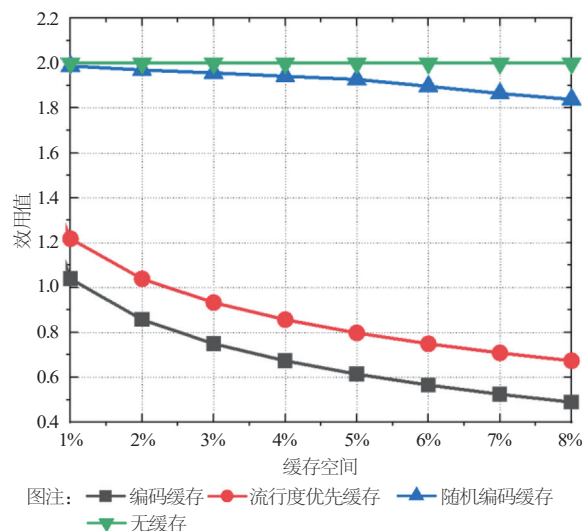


图3 不同缓存空间大小的性能对比 ( $\theta=1, K=8, R=2$ )

协同传输方案在不同Zipf分布下的性能对比如图4所示。根据Zipf分布的特性,参数 $\theta$ 越小,代表文件内容流行度趋向于平均分布,热门内容与冷门内容之间的流行度差异越小;而当参数 $\theta$ 越大,代表文件内容流行度趋向于高度集中,热门内容与冷门内容之间的流行度差异越大。因此,从图4中可以看到,随着参数 $\theta$ 的增加,在固定缓存空间大小的情况下,基于流行度的传统缓存策略和基于协同传输的随机编码缓存策略的传输开销会有显著下降,并且两种方案之间的性能差距将变小,从初始的7.5%下降至最终的2.7%。

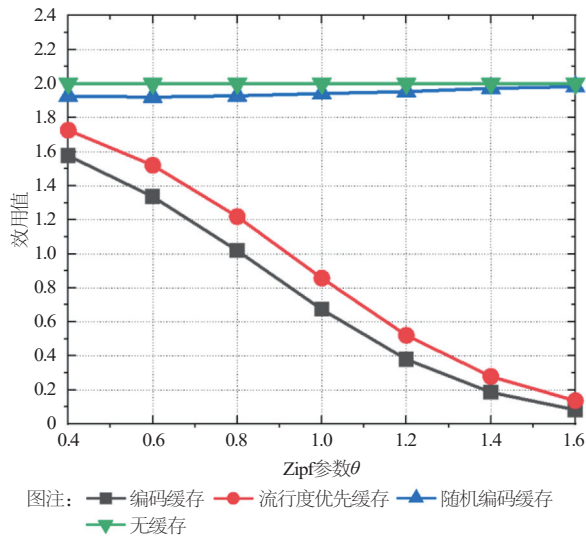


图4 不同Zipf分布下的性能对比 ( $M=4\%$ ,  $K=8$ ,  $R=2$ )

协同传输方案在不同接入节点数量下的性能对比如图5所示。在此,为了使得更多的接入节点能够带来相应的增益,将数据块切片数 $K$ 与允许接入的节点数 $R$ 保持一致。可以看到,由于使用编码缓存解耦了数据块之间的传输相关性,当允许接入卫星节点数量增加时,每个卫星节点上对于同一个热门文件可以缓存更少数量的编码数据块,同时仍旧保持在一个时隙内满足用户服务的需求。因此,本文所提协同传输方案可以随着接入节点数量的增加,缓存更多的内容文件,进而帮助减少传输开销。相比传统的基于流行度优先的缓存和单点传输方案,本文所提的基于编码缓存的协同传输方案可以进一步实现最多42%的开销降低,具有显著的性能提升。即便是采用随机缓存策略,随着接入节点数量的增加,其性能也可以超过传统的基于单点传输的方案。

最后,本文将探讨关于编码缓存的额外开销情况。由于编码缓存需要采用RLNC等方案对原始数据块进行线性编码,因此需要在产生的编码数据块的包头附上编码系数,以便于用户接收端进行后续的线性解码操作。在实际中,为了保证编码操作的有效性,往往需要从Galois域中随机选取线

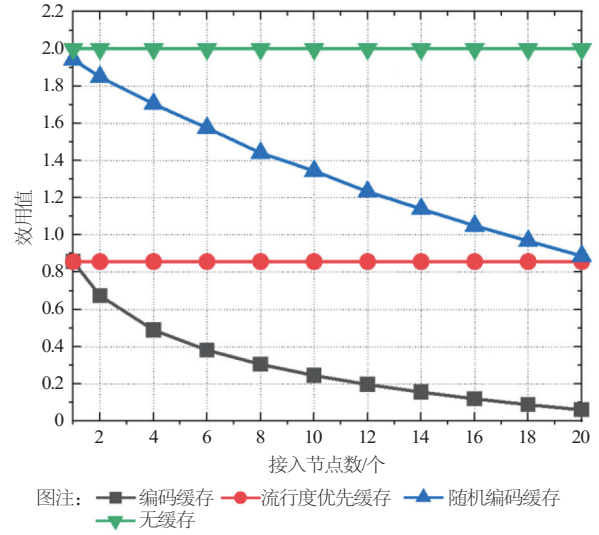


图5 不同接入卫星节点数量下的性能对比 ( $M=4\%$ ,  $\theta=1$ ,  $K=R$ )

性无关的编码系数<sup>[17-18]</sup>。Galois域选取得越大,随机选取的编码系数之间线性无关的概率越大,但同时编码系数所占用的比特位数也越多,从而导致更大的编码开销。

图6展示了在不同编码数据块数量情况下的编码开销,图例中分别给出了文件总大小和单个编码系数大小,编码开销的计算方式是用编码系数的比特数除以文件总大小。可以看到,随着编码数据块数量的增加,编码开销将急剧上升,特别是在文件自身大小较小的情况下。在实际情况中,由于用户接入卫星数量的限制,并不会出现图6中所示的极端情况。如图6所示,在编码数据块数量 $K<8$ 块时,不同情况下的编码开销均小于0.5%。显然,相较于图3~图5所展示的显著性能增益,由于线性编码操作所带来的额外编码开

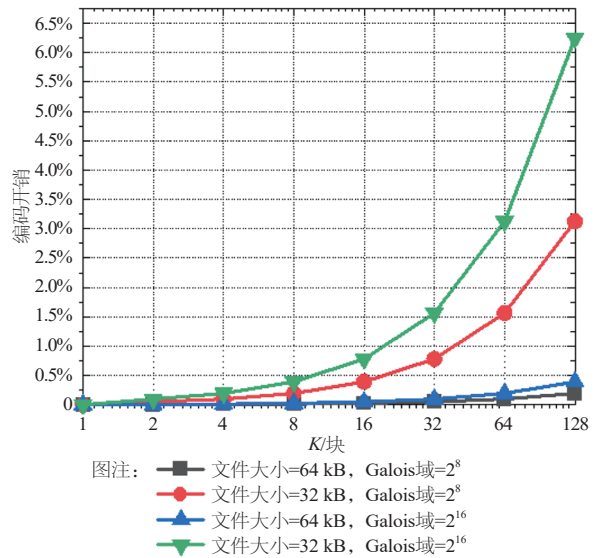


图6 不同编码数据块数量 $K$ 情况下的编码缓存开销

销并不会对所提方案的有效性产生影响。

为了进一步验证所提编码缓存决策算法得到的解与最优解之间的差距,图7展示了所提编码缓存决策算法与最优缓存性能对比。可以看出,在小规模情况(文件数量 $N=10$ )下,所提算法的性能与最优解是一致的。同时,图7中蓝色虚线代表了传统非编码缓存方案(缓存空间固定为可以缓存一个完整文件)在暴力搜索算法下所得到的最优解。如图7所示,由于设置允许接入的节点数 $R=2$ ,因此,当缓存空间 $M>4\%$ 时,编码缓存方案(即协同传输方案)所得到的性能便可以优于传统缓存方案(即单点传输方案),这验证了之前所得到的结论。

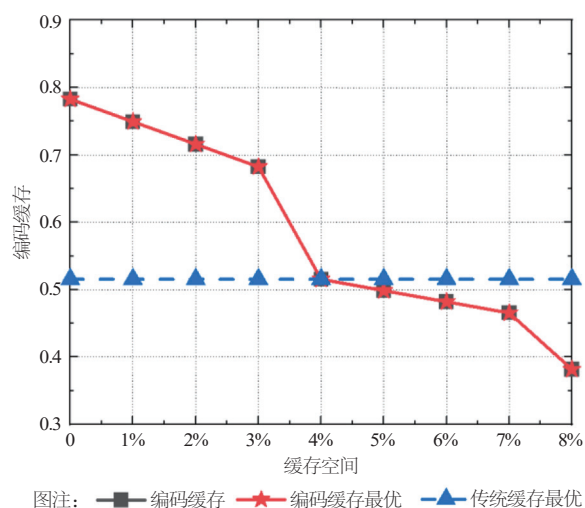


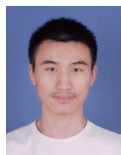
图7 所提编码缓存决策算法与最优缓存性能对比  
( $N=10$ ,  $\theta=1$ ,  $K=8$ ,  $R=2$ )

## 参考文献:

- [1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.  
WU W. Survey on the development of space-ground integration information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [2] ZHU X, JIANG C, YIN L, et al. Cooperative multigroup multicast transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 981-992.
- [3] JIA X, LV T, HE F, et al. Collaborative data downloading by using inter-satellite links in LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1523-1532.
- [4] LI J, LU H, XUE K, et al. Temporal netgrid model-based dynamic routing in large-scale small satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 6009-6021.
- [5] LI J, XUE K, WEI D S, et al. Energy efficiency and traffic offloading optimization in integrated satellite/terrestrial radio access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(4): 2367-2381.
- [6] 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.
- [7] LIU S, HU X, WANG Y, et al. Distributed caching based on matching game in LEO satellite constellation networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 22(2): 300-303.
- [8] WU H, LI J, LU H, et al. A two-layer caching model for content delivery services in satellite-terrestrial networks[C]//2016 IEEE global communications conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [9] GALLUCCIO L, MORABITO G, PALAZZO S. Caching in information-centric satellite networks[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 3306-3310.
- [10] LI J, XUE K, LIU J, et al. An ICN/SDN-based network architecture and efficient content retrieval for future satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2019, 34(1): 188-195.
- [11] XU X, TAO M. Modeling, analysis, and optimization of coded caching in small-cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(8): 3415-3428.
- [12] LIU L, GARCIA V, TIAN L, et al. Joint clustering and inter-cell resource allocation for CoMP in ultra dense cellular networks[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 2560-2564.
- [13] ZHAO G, CHEN S, ZHAO L, et al. Joint energy-spectral-efficiency optimization of CoMP and BS deployment in dense large-scale cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(7): 4832-4847.
- [14] LIU L, ZHANG S, ZHANG R. CoMP in the sky: UAV placement and movement optimization for multi-user communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(8): 5645-5658.
- [15] TANG J, SHOJAEIFARD A, SO D K C, et al. Energy efficiency optimization for CoMP-SWIPT heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(12): 6368-6383.
- [16] BIOGLIO V, GABRY F, LAND I. Optimizing MDS codes for caching at the edge[C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [17] TRULLOLS C O, BARCELO O J M, FIORE M. Exact decoding probability under random linear network coding[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 15(1): 67-69.

- [18] SU R, SUN Q T, ZHANG Z. Delay-complexity trade-off of random linear network coding in wireless broadcast[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(9): 5606-5618.

#### [作者简介]



**李健**（1992-），中国科学技术大学网络空间安全学院博士后，主要研究方向为天地一体化信息网络和未来网络架构。



**薛开平**（1980-），中国科学技术大学网络空间安全学院教授，博士生导师，主要研究方向为未来网络体系架构和网络安全。



**卢汉成**（1977-），中国科学技术大学电子工程与信息科学系副教授，主要研究方向为多媒体通信与网络、无线异构网络中的资源优化等。