

面向天地一体化内容分发业务的网内缓存机制研究

曹 洋¹, 朱玉峰¹, 吕俊锋¹, 江 涛¹, 高 鹏², 张冬晨²

(1.华中科技大学, 湖北 武汉 430074;

2.中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)

摘 要: 针对卫星移动性以及地面网络资源受限问题, 首先提出一种基于命名数据网络的地面网络内容预先放置策略; 然后, 充分考虑多个基站覆盖范围内内容局部请求分布的差异性, 提出一种基于公平的卫星网络内容分发策略。仿真实验结果表明, 在卫星网络内容注入方面, 所提内容预先放置策略是有效的; 在卫星网络内容分发方面, 所提出的基于公平的内容分发策略可以实现最大化内容满意度。

关键词: 天地一体化信息网络; 内容分发; 命名数据网络; 网内缓存

中图分类号: TN393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200207

Research on In-Network Caching Mechanisms for Space-Integrated-Ground Content Delivery Service

CAO Yang¹, ZHU Yufeng¹, LV Junfeng¹, JIANG Tao¹, GAO Peng², ZHANG Dongchen²

1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. China Mobile Group Design Institute Co. Ltd., Beijing 100080, China

Abstract: In view of the problem of satellite mobility and terrestrial network resource constraints, a pre-placement strategy for terrestrial network content based on named data networking was proposed; Then, local content requests under the coverage of multiple base stations was fully considered. Based on the difference in distribution, a content distribution strategy based on fairness in satellite networks was proposed. The numerical results showed that the proposed content pre-placement strategy was effective in terms of satellite network content injection. In addition, in terms of satellite network content distribution, the proposed fair-based content distribution strategy could maximized content satisfaction.

Keywords: space-integrated-ground information network, content delivery, named data networking, in-network caching

1 引言

互联网自诞生以来极大地改变了人们的生产及生活方式, 已经成为人们社会中不可或缺的元素。然而, 地面网络受区域经济、地理环境、自然灾害等因素的影响, 在服务的覆盖范围和可靠性等方面无法满足日益增长的各类应用需求^[1]。在这种背景下, 国内外研究机构与企业将关注的目光转移到卫星网络, 并产生了将地面网络与卫星网络融合成天地一体化信息网络 (Space-Ground Integration Network, SGIN) 的想法^[2]。首先, 卫星网络具有广域覆盖和宽带广播的特点, SGIN能够有效地消除区域经济和地理环境的影响, 为不发达地区、海洋岛屿等地区提供网络服务。其次, 卫星网络在抢险救

灾等特殊情况下能够提供信息保障, SGIN提升了网络的抗毁和应急保障能力^[3]。最后, 随着卫星的通信、计算和存储能力的提升, 卫星网络能够缓解地面网络面临的数据流量压力, SGIN可以更好地应对日益增长的数据流量挑战^[4]。因此, SGIN是互联网的发展趋势之一。

目前, SGIN内容分发的研究工作侧重于卫星网络内容分发, 而很少关注卫星网络内容注入。本文提出了一种卫星内容分发网络 (Satellite Content Delivery Network, SCDN), 不仅提出了基于公平的卫星网络内容分发策略, 还研究了基于命名数据网络 (Named Data Networking, NDN) 预缓存的卫星网络内容注入。本文的工作覆盖了卫星网络内容注入和卫星网络内容分发两

大部分，为SGIN内容分发提供了一个完整的解决方案。

2 天地一体化内容分发架构

内容分发网络（Content Delivery Network, CDN）的网络架构主要由3个部分组成：中心服务器、CDN服务器以及用户节点。中心服务器和CDN服务器构成CDN的层次化服务主体，用户节点构成CDN的请求主体。中心服务器主要负责集中式内容及网络管理、内容分发策略和控制以及全局负载均衡。CDN服务器主要负责本地负载均衡、高速缓存及本地存储。在本地负载均衡方面，CDN服务器根据特定策略转发用户的内容请求。在高速缓存及本地存储方面，CDN服务器从中心服务器请求、缓存、更新内容。在CDN中，涉及的关键技术主要有以下两个部分：内容分发与内容存储。将CDN从地面网络延伸到卫星网络，形成的卫星内容分发网络SGIN，是一种SGIN网内缓存机制的具体实现框架。

本文考虑如图1所示的SGIN内容分发场景。卫星网络由LEO卫星组成，地面网络的接入网包含基站和网关，且数量很多。作为内容源提供者，互联网服务提供商（Internet Service Provider, ISP）为用户提供内容服务。作为内容请求者，用户通过接入基站从SGIN获取内容。

为了提升用户体验，SGIN采用网内缓存机制。具体地，地面网络采用CDN，ISP将内容注入CDN服务器。卫星网络采用SCDN，ISP通过地面站将内容注入卫星。因为用户能够从CDN服务器和卫星就近获得内容，所以CDN和SCDN提升了SGIN内容分发的服务质量。

考虑到地面网络设备在计算、存储以及通信资源等方面明显优于卫星网络，SGIN内容分发架构采用以地面网络为主，卫星网络为辅的设计模式。当用户向基站发送内容请求时，基站检查本地缓存是否命中。如果本地缓存命中，基站直接向用户返回内容；否则，基站经地面网络向ISP转发内容请求。ISP将内容注入CDN服务器。此后，用户的请求将被CDN服务器就近满足。由于SGIN引入了卫星网络，SCDN能够分担地面网络链路负载，进一步提升网络内容分发的服务质量。

3 面向SGIN的内容注入与内容分发策略

基于全局内容新鲜度变化缓慢的特点，本文提出一种异步卫星网络内容分发策略。卫星网络内容分发的流程如图2所示。和地面CDN类似，卫星网络的内容分发技术有被动的Push^[5]和主动的Pull^[6]两种方式。当采用Push方式时，各基站统计用户请求内容行为，这些内容的种类比较少，数据总量比较小，请求热度在将来一段时间内不发生改变，它们共同构成全局内容。然后，各基站将用户请求内容行为转发给ISP，卫星被ISP经地面站注入全局内容。当采用Pull方式时，基站向卫星网络和ISP转发用户请求内容行为，卫星主动连接地面站，从ISP获取全局内容。当卫星获得全局内容后，卫星成为移动的服务节点，能够为不同地理位置的基站提供仅一跳的内容分发服务。

基于CDN这一概念，本文提出一种SCDN。CDN和SCDN的网络结构对比如图3所示。SCDN将位于太空中

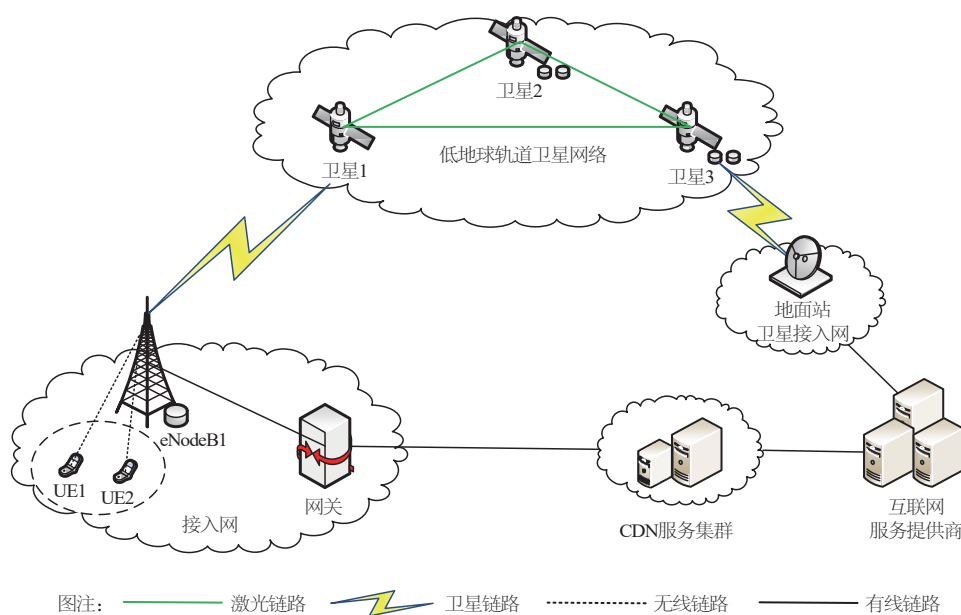


图1 SGIN内容分发场景

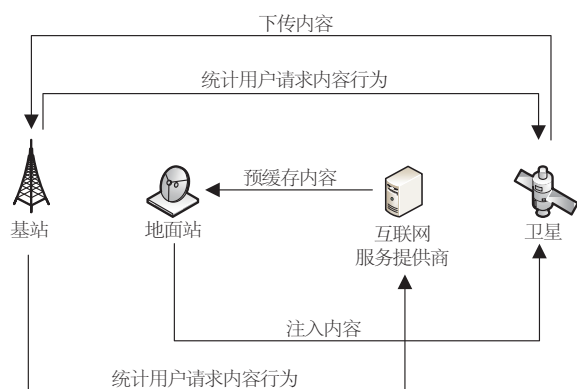


图2 卫星网络内容分发的流程

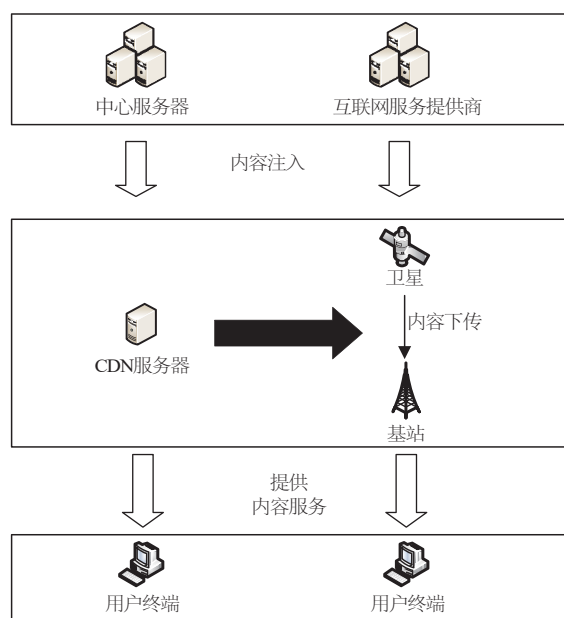


图3 CDN与SCDN的网络结构对比

的卫星网络，以及位于地面的用户接入节点（基站）组成二级CDN服务器，从而为地面用户提供高质量的内容分发服务。二级CDN服务器的内容注入过程可以被划分为卫星网络内容注入和卫星网络内容分发两个部分。

对于卫星网络内容注入，针对TCP/IP对卫星的移动性支持较差的问题，NDN充分利用全网泛在的存储资源，将内容与地址解耦，实现传输层功能下沉至网络层，以拉取式消息订阅方式为高度动态连接的卫星网络提供可靠而有弹性的内容分发服务。此时，卫星网络作为内容请求主体，将内容注入过程由被动转化为主动。当卫星移动而发生连接切换时，卫星作为内容请求主体，通过重新发送兴趣包，从网络中不间断地获得内容。因为没有建立连接的过程，NDN实现了无缝的卫

星移动性支持。在此基础上，考虑到卫星移动的规律性，预先将内容放置在地面网络节点的内容库（Content Store, CS）中，能够进一步提升卫星网络内容注入的效率。因此，本文将首先研究基于NDN预缓存的卫星网络内容注入。

对于卫星网络内容分发，针对各基站覆盖范围内内容的局部请求分布不尽相同的特点，本文将进一步研究基于公平的卫星网络内容分发。

3.1 基于NDN预缓存的卫星网络内容注入

如图4所示，地面网络包括NDN主干网和地面站。在NDN主干网中，ISP是生产者，能够提供所有内容。地面站和路由节点都是NDN路由节点，能够利用CS缓存内容。作为消费者，不同轨道上的卫星根据基站统计的用户请求内容行为，主动接入地面站，从地面网络获得所有需要被分发的全局内容，完成内容注入。

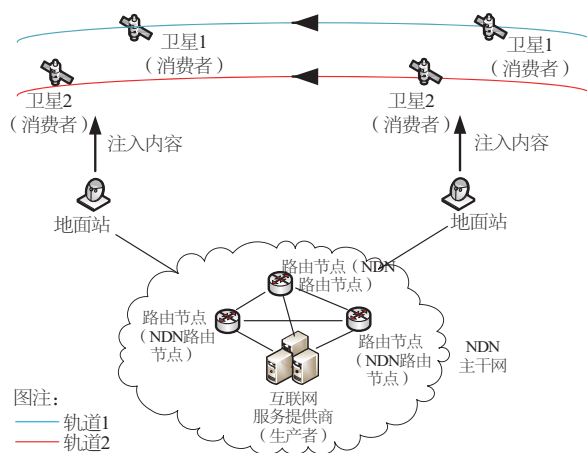


图4 基于NDN预缓存的卫星网络内容注入场景

考虑到卫星移动的规律性，本文通过预先将内容缓存存在地面站和路由节点的CS，减小NDN主干网链路负载，提高内容获取成功率，最终实现不同轨道上的任意一颗卫星均能在经过一个星下点轨迹周期后，完成内容注入。

图5展示了基于NDN预缓存的卫星网络内容注入的信息传递和交互流程。下面将详细介绍该处理流程。

(1) 作为消费者，卫星向地面站发送兴趣包。

(2) 当地面站的CS缓存命中时，地面站直接向卫星回传数据包。

(3) 如果地面站的CS缓存未命中，那么地面站将沿着到达ISP的最短路径转发兴趣包。

(4) 兴趣包沿途访问路由节点，并尝试命中路由节

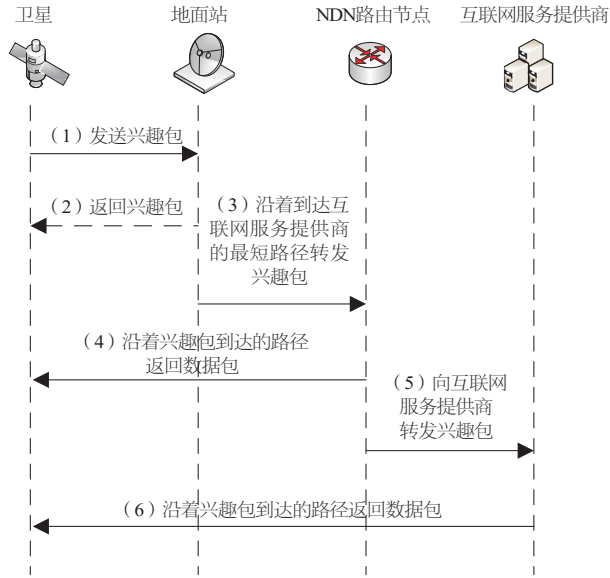


图5 基于NDN预缓存的卫星网络内容注入的信息传递和交互流程

点的CS缓存。如果缓存命中，那么该路由节点将返回数据包。数据包沿着兴趣包到达的路径，最终抵达卫星。

(5) 如果路由节点的CS均没有缓存命中，那么兴趣包将被转发到ISP。

(6) ISP向卫星回传数据包。数据包沿着兴趣包到达的路径，最终抵达卫星。

该过程可分为两个阶段：内容准备阶段和卫星网络内容注入阶段。

内容准备阶段：假设某个时刻，地面的所有基站统计用户请求内容行为后，形成全局的内容列表（CL），并将CL的信息发送给卫星网络和ISP。卫星之间通过星间链路共享CL的信息。ISP制定最优内容部署策略，将CL包含的全局内容提前部署在地面站和路由节点的CS。CL中各内容的请求分布符合齐普夫定律。假设内容总数为total，那么受欢迎程度排名第*i*的内容被请求的概率为

$$p_i = \frac{i^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^{\text{total}} k^{-\alpha}} \quad (1)$$

其中， α 为内容分布系数，是一个非负数。

卫星网络内容注入阶段：假设地面均匀部署了*A*个地面站，地面站集合为 $\mathcal{A}=\{1, \dots, A\}$ 。所有地面站的发送范围，在地面的投影是半径为*r*的圆。各地面站的发送范围互不重叠。卫星轨道个数为*B*，轨道集合为 $\mathcal{B}=\{1, \dots, B\}$ ，轨道*b*上卫星的数量为*S_b*，卫星轨道高度为*H*，最大窗口时间为*W*。由卫星星座可知，单颗卫星被分配到轨道*b*的概率为1/*B*，卫星沿着星下点轨迹向沿途的地面站请求内

容。当卫星的轨道确定后，其星下点轨迹经过的地面站也随之确定。

从地面站的角度看，各轨道的星下点通过地面站的时间是窗口时间。由于各轨道的高度相同，各窗口时间的大小不等但范围相同。本文对各窗口时间进行平均处理，认为各星下点经过地面站的平均时间为*W/2*。

在卫星节点和地面站部署完成后，用 r_{ab} 表示轨道*b*的星下点轨迹是否经过地面站*a*。如果轨道*b*的星下点轨迹经过地面站*a*，那么 r_{ab} 取值为1，否则 r_{ab} 取值为0。 R_{ib} 表示轨道*b*上的卫星是否能够获取到内容*i*。这里内容块大小为常数*s_{ck}*，可以得出地面站*a*可以向轨道*b*上的一颗卫星发送的最大内容块数量。进一步可以求出，轨道*b*上的一颗卫星从链路*l*获得的最大内容块数量 E_{lab}^{link} 。

由分析可知，如果内容被放置在地面站，那么卫星获取内容的代价最小；否则，卫星的兴趣包将被地面站向NDN主干网转发，然后被路由节点或者ISP响应并返回数据包。本文将内容放置代价系数表示为轨道*b*上的一颗卫星，从链路*l*获得一个内容块的等待时间与从地面站获得内容块等待时间的比值。

最优内容放置策略求解：最优内容放置策略通过预先将内容*i*放置在地面站和NDN主干网节点，实现各条轨道获取内容*i*的概率最大化。其最终目标是实现不同轨道上的任意一颗卫星，均能在经过一个星下点轨迹周期后，从地面网络获得所有需要被分发的全局内容。

最优内容放置策略的数学模型参数见表1，符号*Z*表示非负整数域。地面站、卫星、链路以及内容库的编号

表1 最优内容放置策略符号

符号名	含义
$\mathcal{A}=\{1, \dots, A\}$	地面站集合
$\mathcal{B}=\{1, \dots, B\}$	卫星轨道集合
$\mathcal{C}=\{1, \dots, C\}$	CS集合
$\mathcal{L}=\{1, \dots, L\}$	NDN主干网链路集合
$\text{CL}=\{1, \dots, J\}$	全局内容列表
$Q_c \in \mathbb{Z}$	内容库 <i>c</i> 存储内容的块数
$Q_c \in \mathbb{Z}$	内容库 <i>c</i> 的容量
$p_i \in [0, 1]$	内容 <i>i</i> 被请求的概率
$m_i \in \mathbb{Z}$	内容 <i>i</i> 的内容块数
$E_{ab}^{\text{spe}} \in \mathbb{Z}$	轨道 <i>b</i> 上的一颗卫星，从地面站 <i>a</i> 获取到的最大内容块数
$E_{lab}^{\text{link}} \in \mathbb{Z}$	轨道 <i>b</i> 上的一颗卫星，从链路 <i>l</i> 经地面站 <i>a</i> 获取到的最大内容块数
$g_{lab} > 1$	轨道 <i>b</i> 上的一颗卫星，从链路 <i>l</i> 经地面站 <i>a</i> 获取到一个内容块的代价
$R_{ib} \in \{0, 1\}$	轨道 <i>b</i> 上的卫星是否能够获取到内容 <i>i</i>
$U_{ab} \in \mathbb{Z}$	轨道 <i>b</i> 上的一颗卫星，直接从地面站 <i>a</i> 获取到内容的块数
$U_{lab} \in \mathbb{Z}$	轨道 <i>b</i> 上的一颗卫星，从链路 <i>l</i> 经地面站 <i>a</i> 获取到内容的块数

按集合内次序从1开始编号。此外,ISP作为生产者,它的网络编号是0。

最优内容放置策略的数学模型表示为

$$\max \frac{1}{B} \sum_{i \in \text{CL}} p_i \sum_{b \in \mathcal{B}} R_{ib} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \sum_{a \in \mathcal{A}} U_{abi} + \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{l \in \mathcal{L}} U_{labi} \geq R_{ib} \cdot m_i, \quad \forall i \in \text{CL}, \forall b \in \mathcal{B} \quad (3)$$

$$\sum_i U_{abi} + \sum_{l \in \text{sp}_{i0}} (U_{habi} \cdot g_{hab}) \leq E_{ab}^{\text{spe}}, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall b \in \mathcal{B} \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_{h \in \text{sp}_{h(i)0}} U_{habi} \leq E_{lab}^{\text{link}}, \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall b \in \mathcal{B}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (5)$$

$$U_{abi} \leq Q_{ia}, \quad \forall i \in \text{CL}, \forall a \in \mathcal{A}, \forall b \in \mathcal{B} \quad (6)$$

$$U_{labi} \leq Q_{le(l)}, \quad \forall i \in \text{CL}, \forall a \in \mathcal{A}, \forall b \in \mathcal{B}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (7)$$

$$\sum_i Q_{ic} \leq Q_c, \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (8)$$

$$U_{labi} = 0, \quad \forall i \in \text{CL}, \forall a \in \mathcal{A}, \forall b \in \mathcal{B}, \forall l \in \mathcal{L} : l \in \text{sp}_{i0} \quad (9)$$

$$U_{abi} \geq 0, U_{labi} \geq 0, Q_{ic} \geq 0, R_{ib} = \{0, 1\} \quad (10)$$

优化目标为最大化轨道**b**上的一颗卫星,获取地面所有需要被分发的全局内容的成功率。约束条件(3)表示,只有当卫星经过星下点轨迹覆盖的所有地面站后,卫星获取到内容*i*的内容块数量大于 m_i ,才能获得内容*i*。约束条件(4)表示卫星获取内容的最坏情况。当兴趣包被ISP响应,卫星从沿途各链路以及地面站获得的内容块数之和,不能超过地面站*a*所能发送的最大内容块数量。约束条件(5)表示,流经链路*l*的内容块数之和,不能超过链路*l*所能传输的最大内容块数量。约束条件(6)和(7)分别表示,卫星直接从地面站*a*和链路*l*获得内容*i*的内容块数量,不能超过地面站和*l*的CS中内容*i*的内容块数量。约束条件(8)表示,CS中所有内容的内容块总数,不能超过其容量。约束条件(9)表示,不属于地面站*a*与ISP的最短路径的链路*l*,不可能向卫星返回内容块。约束条件(10)表示了数学模型中一些变量的约束。

根据数学模型可知,最优内容放置策略是一个整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)问题。变量个数的数量级为 $O(L \cdot A \cdot B \cdot I + C \cdot I)$,约束条件的数量级为 $O(L \cdot A \cdot B \cdot I + C)$ 。本文使用MATLAB内置的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)求解函数intlinprog对最优内容放置策略进行求解^[7]。

3.2 基于公平的卫星网络内容分发

凭借地面网络的最优内容放置策略,卫星网络中任意一颗卫星,在经过一个星下点轨迹周期后,均能从地

面网络获得所有需要被分发的全局内容。在卫星拥有全局内容的基础上,考虑图6的卫星网络内容分发场景。从卫星网络中任选一颗卫星,其覆盖范围内包含多个基站。每个基站的覆盖范围内包含多个用户。用户向基站发送内容请求,基站再向卫星请求内容。由于地理分布不同,各基站的用户请求内容行为具有独立性。由于覆盖范围相对卫星较小,各基站的用户请求内容行为具有局部性。基站根据信道质量选择接入可见卫星,本文假设基站已完成选择卫星的过程,所有基站全部选择向图6中卫星请求内容。卫星网络内容分发的具体流程如图7所示。

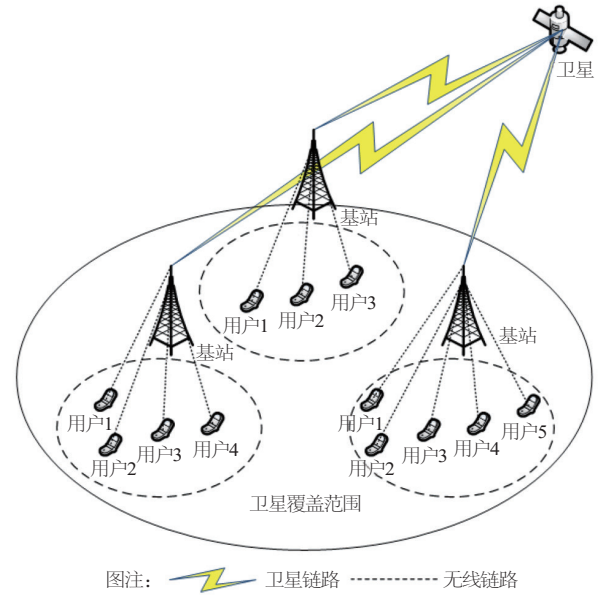


图6 卫星网络内容分发场景

- (1) 用户向基站发送内容请求。
- (2) 基站查看本地缓存是否命中。如果本地缓存命中,基站响应用户请求。
- (3) 否则,基站统计用户请求内容行为,并转发给卫星。
- (4) 卫星将基站划分成基站组,然后采用多播的方式,向基站分发内容。
- (5) 基站收到卫星下传的内容后,首先在本地保留内容副本,实现SCDN中的第二级缓存;然后,基站采用多播的方式,向用户分发内容。
- (6) 一段时间后,用户再次向基站发送内容请求。
- (7) 由于内容的新鲜度变化缓慢而且基站缓存了内容,基站可以直接为用户提供内容服务,提升了卫星网络内容分发的服务质量。

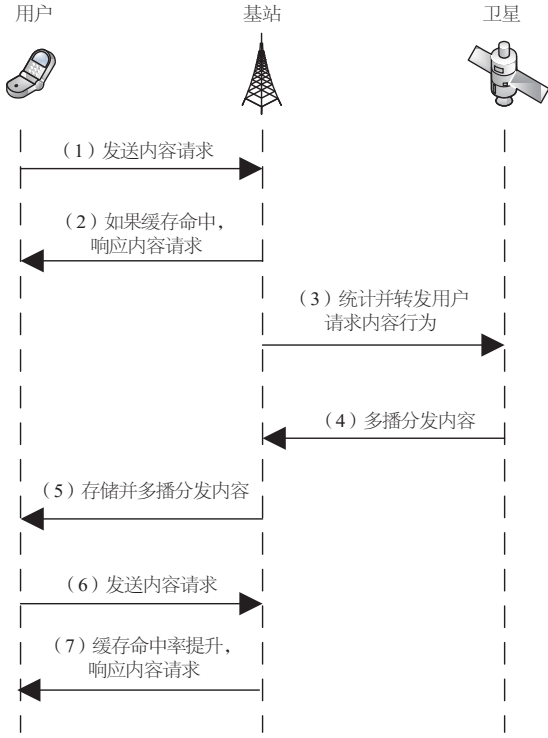


图7 卫星网络内容分发流程

在卫星网络内容分发过程中，有如下假设。首先，卫星网络内容分发初始化时，基站的缓存命中率为0。其次，所有用户的内容请求同时到达各基站，各基站转发的用户请求内容行为同时到达卫星。最后，卫星在一次内容分发的过程中与地面保持静止。

由于卫星的频谱宽度有限，卫星无法同时下发所有用户请求的全部内容。例如，地面用户请求的内容为 $M_u=\{m_1, m_2, m_3\}$ ，卫星分发的内容为 $M_s=\{m_1, m_2\}$ 。从卫星的角度看，本文定义卫星覆盖范围内，请求 m_1 和 m_2 的用户数与用户总数的比值为内容满意度。从基站的角度看，本章定义基站覆盖范围内，请求 m_1 和 m_2 的用户数与用户总数的比值为基站服务率。由于卫星的全局内容请求分布与各基站的局部内容请求分布往往不一致，内容满意度与基站服务率并不能同时达到最优，两者之间的关系是值得探究的。因此，需研究基于公平的卫星网络内容分发，实现卫星在一次内容分发过程中最大化内容满意度，并保障基站服务率。

基于公平的卫星网络内容分发策略的目标是最大化内容满意度，并保障基站服务率。因此，该问题的数学模型可表示为

$$\max \sum_{m=1}^M V_m y_m \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \sum_{m=1}^M y_m = D \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M S_{gm} y_m \geq F, \forall g \in \mathcal{G} \quad (13)$$

$$y_m \in \{0,1\}, x_{gm} \in \{0,1\} \quad (14)$$

目标函数(11)表示最大化内容满意度。约束条件(12)表示卫星下传内容的数量，不能超过其多播组的数量上限。根据优化目标，约束条件(12)取等号。约束条件(13)表示基站 g 的总服务率不得小于服务门限 F ， F 由SCDN设定。约束条件(14)表示了数学模型中一些变量的约束。

根据上述数学模型可知，基于公平的卫星网络内容分发策略是一个0~1线性规划问题，它是一个NP难问题。利用启发式遗传算法进行求解，该算法将 D 个内容的一个组合当作个体，所有组合当作群体。首先，初始化两个个体，并设置其适应性相同，以等可能地执行杂交操作或者突变操作，产生后代。然后，判断群体中是否有个体，同时满足基站服务率和局部最大的内容满意度。因为该个体可能是全局最优解，所以保留该个体。在下一代中，该个体不发生突变或者参与杂交，以免丢失全局最优解。最后，根据内容满意率修改各个个体的适应度。

4 仿真实验及结果分析

仿真实验方面，首先使用MATLAB获得内容放置方案，然后基于ndnSIM开展验证实验。在卫星网络方面，卫星参数见表2。

表2 卫星参数

卫星参数描述	参数值
卫星轨道数量 B /个	6
单轨道卫星数量 S_b /颗	12
卫星最大窗口时间 W /s	1 056.42
卫星轨道高度 H /km	1 000

地面网络采用树状拓扑，如图8所示。树的深度为4，第1层为地面站，第2层和第3层为路由节点，最后第4层为ISP。

地面网络参数见表3。其中，地面站发送的数据包采用第二代数字卫星视频广播标准^[8] (Digital Video Broadcast-Return Channel System 2, DVB-RCS2) 进行流封装，发送带宽为6 Mbit/s^[9]。

内容参数见表4。每个内容的块数相同，均为1 000块。内容总大小为250 MB。

最后，在星地链路方面，卫星发送功率和发射天线

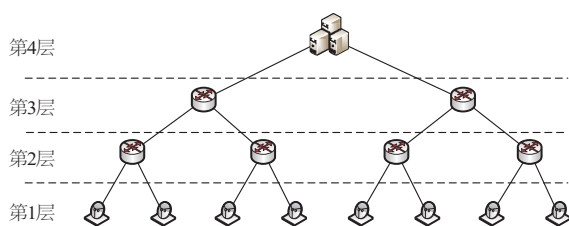


图8 地面网络的树状结构模型

表3 地面网络参数

地面网络参数描述	参数值
地面站数量 $A/\text{个}$	8
地面站发送范围的投影半径 r/km	3 884.29
地面站发送带宽 $D^{\text{sc}}/(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	6
内容库数量 $C/\text{块}$	14
NDN主干网链路数量 $L/\text{个}$	14
NDN主干网链路带宽 $D/(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	20
兴趣包和数据包转发处理时延 τ/ms	0.5

表4 内容参数

内容参数描述	参数值
内容列表长度 $N/\text{个}$	50
内容分布系数 α	1
CS容量 Q_c	1 000
内容的内容块数 $m/\text{块}$	1 000
内容块大小 s_k/byte	5 000

增益的乘积 $P_t G_t$ 为54.4 dBW，基站接收天线增益 G_r 为0。卫星的轨道高度 H 为1 000 km，工作频段为C波段4 GHz，工作波长 λ 为0.075 m，频谱宽度 B 为25 MHz，下行速率 R 为24 Mbit/s。基站的噪声温度 T 为290 K，对应的大气损耗 ω 为1.06 dB。卫星可以同时发送的内容数量 D 为30块。

4.1 内容获取成功率与内容库容量、内容列表长度和卫星窗口时间的关系

图9探究了 P_{suc} 与CS容量之间的关系。横坐标为CS容量的大小，纵坐标为 P_{suc} 。3条曲线分别为在图8树状网络拓扑第1层、第1层和第2层、前3层部署CS后， P_{suc} 随CS容量的变化情况。

首先，当前3层的CS容量为0时，由于NDN主干网的链路负载较大，卫星无法从ISP获取全部内容。当提升NDN主干网的缓存资源后， P_{suc} 也随之提升。由此，NDN的网内缓存机制利用存储资源补足了链路资源的短缺，提升了地面网络的性能。当只在第1层，即地面站

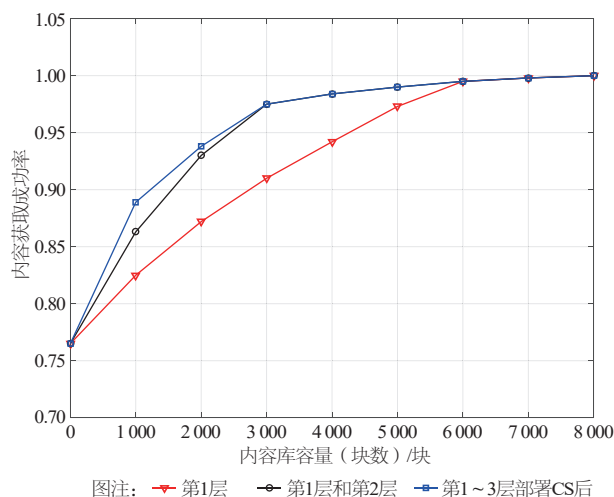


图9 内容获取成功率随内容库容量的变化情况

部署CS时， P_{suc} 的值是3种CS部署策略中最小的，这说明NDN主干网的缓存资源没有被充分利用。当CS容量大小超过7 000块后，3种CS部署策略的 P_{suc} 都等于1。这种现象有两点启发：一是，当CS容量超过一个值后，NDN主干网部署CS的节点数量对 P_{suc} 的影响很小，兴趣包基本上都会在地面站处被响应；二是， P_{suc} 为1意味着不同轨道上的卫星均能在经过一个星下点轨迹周期后，从地面网络获得所有需要被分发的全局内容。这说明最优内容放置策略是有效的。

其次，为了探究内容列表长度与 P_{suc} 之间的关系，固定CS部署策略为在图8树状网络拓扑前3层均部署CS，仿真结果如图10所示。从图10中可以看出，随着内容列表长度逐渐增大，不同CS容量下的 P_{suc} 均呈下降趋势。与没有网内缓存相比，当网络部署了容量大小为1 000块的CS后，对于不同内容列表， P_{suc} 的平均提升率为16.3%。此外，当固定内容列表长度后，CS的容量对 P_{suc} 的提升作用逐渐减小，这说明此时地面网络的性能瓶颈是地面站的发送带宽。

最后，通过调整卫星轨道高度，改变卫星经过地面站的窗口时间，探究在图8树状网络拓扑前3层部署CS时， P_{suc} 与卫星窗口时间的关系。在图11中，卫星轨道高度从1 000 km降至200 km，窗口时间分别为1 056.42 s、917.32 s、770.57 s、609.71 s、417.38 s。随着卫星窗口时间的不断减小， P_{suc} 逐渐下降。然而，当固定卫星轨道高度时，增大地面站和路由节点的CS容量，可以显著提升 P_{suc} 。此外，当卫星轨道高度减小到200 km，窗口时间减小到417.38 s后， P_{suc} 主要取决于窗口时间。例如，将CS容量从3 000块提升到5 000块， P_{suc} 并没有增大。当CS的

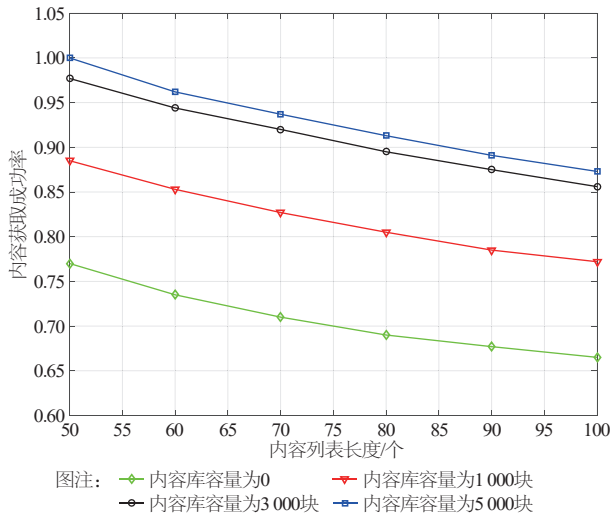


图10 内容获取成功率随内容库列表长度的变化情况

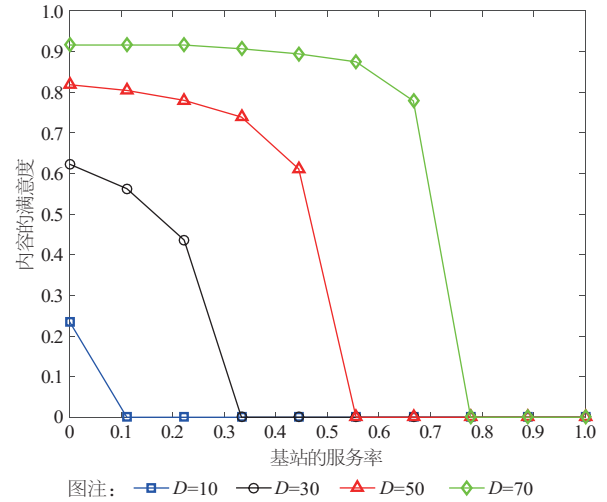


图12 内容满意度随基站服务率的变化情况

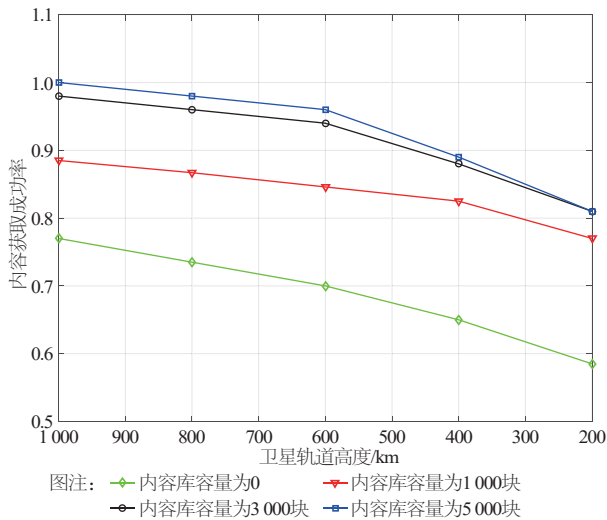


图11 内容获取成功率随卫星轨道高度的变化

容量提升至5 000块后，最优内容放置策略适用于轨道高度为400~1 000 km的LEO卫星网络，其 P_{suc} 均在90%以上。

4.2 内容满意度与基站服务率之间的关系

如图12所示，对于卫星的一次内容分发，在预设参数下，如果所有基站的服务率被设置为10%，那么内容满意度能够达到56%。如果继续提升基站服务率，那么内容满意度将呈下降趋势。此时，为了保障基站服务率，需要增大卫星能够同时下传的内容数量 D 。如果SCDN设置了最小内容满意度，增大卫星能够同时下传的内容数量可以提升基站服务率。因此，基于公平的卫星网络内容分发的关键指标是卫星能够同时下传的内容数量。

5 结束语

本文面向SGIN内容分发场景，提出了一种SCDN。首先将全局内容注入卫星网络，然后卫星成为移动的服务节点，为不同地理位置的地面用户提供一跳的内容分发服务。面向SCDN中在卫星处的第一级CDN缓存，针对卫星移动性问题，研究了基于NDN预缓存的卫星网络内容注入，提出了一种地面网络内容预先放置策略。面向SCDN中在基站处的第二级CDN缓存，针对各基站覆盖范围下内容的局部请求分布不尽相同的问题，提出了一种基于公平的卫星网络内容分发策略。仿真实验结果表明，在卫星网络内容注入方面，最优内容放置策略是有效的。本文的工作覆盖了卫星网络内容注入和卫星网络内容分发两大部分，为SGIN内容分发提供了一个完整的解决方案。

参考文献：

- [1] LIU J, SHI Y, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [2] BI Y, HAN G, XU S, et al. Software defined space-terrestrial integrated networks: Architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Network, 2019, 33(1):22-28.
- [3] WANG Y, XU Y, ZHANG Y, et al. Hybrid satellite-aerial-terrestrial networks in emergency scenarios: A survey[J]. China Communications, 2017,14(7): 1-13.
- [4] DU J, JIANG C, ZHANG H, et al. Auction design and analysis for SDN-based traffic offloading in hybrid satellite-terrestrial

networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(10):2202-2217.

- [5] ZHANG Y X, GAO C L, GUO Y Z, et al. Proactive video push for optimizing bandwidth consumption in hybrid CDN-P2P VoD systems[C]// IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018:2555-2563.
- [6] TADROUS J, ERYILMAZ A, GAMAL H E. Proactive content distribution for dynamic content[C]//Information Theory Proceedings (ISIT), 2013 IEEE International Symposium on. Piscataway: IEEE Press, 2013.
- [7] YANG W Y, CAO W W, CHUNG T S, et al. Applied numerical methods using MATLAB[Z]. 2005.
- [8] WILKUS S A, BAILE J D, BROWN D G, et al. Field measurements of a hybrid DVB-SH single frequency network with an inclined satellite orbit[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2010, 56(4):523-531.
- [9] VERVERIDIS C N, FRANGOUDIS P A, THOMAS Y, et al. Experimenting with services over an information-centric integrated satellite-terrestrial network[C]// Future Network & Mobile Summit. Piscataway: IEEE Press, 2014.

[作者简介]



曹洋（1987-），男，华中科技大学副教授，主要研究方向为5G蜂窝网络、物联网以及未来网络等。



朱玉峰（1997-），男，华中科技大学硕士生，主要研究方向为天地一体化信息网络协议。



吕俊锋（1994-），男，华中科技大学硕士研究生，主要研究方向为天地一体化信息网络协议。



江涛（1970-），男，华中科技大学二级教授、博士生导师，教育部“长江学者”特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者，国家“万人计划”科技创新领军人才，科技部“创新人才推进计划”中青年科技创新领军人才，长期从事宽带移动通信、天地一体化信息网络、深空与深海探测、信息与网络安全工作。



高鹏（1970-），男，中国移动通信集团设计院副院长。



张冬晨（1981-），男，中国移动通信集团设计院研发技术总监。