B5GPC预测2030年网络流量需求将在现有基础上增加5-10倍，且网络中流量有一大部分比重是asynchronously但repeatedly的。边缘缓存技术可以减轻核心网的压力，而且结合卫星网络广覆盖的特点可以进一步提高缓存效率。但是，卫星设备本身能力有限，而不同地区对内容具有不同喜好，反复的传输会导致大量的资源浪费，而卫星本身又不具备充足的存储容量。如何根据差异化的地面内容喜好，来动态调整内容缓存的placement，使得卫星网络能耗降低的同时最大化满足用户对内容的需求将是本研究需要解决的关键问题。

利用MEC服务器的存储能力，移动边缘缓存作为一种很有前途的解决方案，备受关注，有助于减少用户[15]的内容检索延迟。由于流行内容可能会被多个用户频繁地请求，因此从MEC服务器而不是从远程云中缓存和检索这些流行内容的效率更高。但是，与不断增加的数据流量相比，MEC服务器的缓存大小通常是有限的。因此，需要精心设计MEC服务器上的缓存策略，以优化网络[16]、[17]的内容服务能力。

考虑到地面 BS 的覆盖范围有限，一些热门内容可能需要缓存在多个 BS 中以服务于来自不同 UE 的请求，这会导致缓存资源利用率低，非热门内容的回传延迟增加。

为了解决上述问题，星地一体化网络（STIN）是具有扩展无线网络覆盖范围的前瞻性解决方案。具体而言，与BS相比，启用缓存的低地球轨道（LEO）卫星可以提供更大的覆盖范围，支持多个用户同时进行内容交付，从而有效提高缓存资源利用率。

然而，由于地形和成本对基础设施建设的影响，地面蜂窝网络只能覆盖人口稠密地区[[**1**](https://www.mdpi.com/2072-4292/13/11/2230/htm#B2-remotesensing-13-02230)]，无法为山地、海洋和空中地区提供通信服务。卫星通信具有覆盖范围广、抗破坏能力强、对地形因素不敏感等优点，可以弥补地面移动通信网络的局限性。

此外，借助卫星提供的额外通信资源，内容交付的资源分配可以更加灵活。启用缓存的 STIN 可以有效提高缓存资源利用率并减少内容交付延迟。

一般来说，LEO卫星系统具有动态拓扑结构，导致地面终端和卫星之间频繁切换[7]。遗憾的是，频繁的切换不仅使得低轨卫星系统难以保证用户的服务质量（QoS），还导致了无线电资源的浪费。

卫星-卫星：卫星传输能耗

卫星缓存文件：存储能耗

**System Model：**

我们建立的网络模型类似于沃克星低地球轨道卫星星座。这个卫星星座由个均匀分布的卫星组成，个卫星均匀分布在个圆形LEO轨道上。深入研究细节，卫星网络图可以表示为，其中是LEO卫星集合，，连接这些卫星的星间链路集合用表示，是边的集合。对于每条边，表示卫星和由ISL连接，而表示卫星和之间没有连接。在卫星配置方面，每颗LEO卫星配备4个收发器，其中两个与轨道间卫星建立两个连接，另外一对与最近的相邻轨道上的卫星建立连接。网络接入选择的复杂编排是一个多方面的领域，涉及到通道状态、仰角角度等各种关键因素。为了保持一个广阔的视角，我们继续假设，用户显示出对访问以最短的视线距离为特征的LEO卫星的偏好，用户集表示为，每个LEO卫星覆盖区域不重叠，并且每个区域的用户设备可直接连接的LEO卫星只有一颗。然后，内容数据通过卫星间缓存和转发。由于低轨卫星的快速移动，每颗卫星都可以在一定时间内为地面用户提供服务。缓存服务周期表示为，，我们假设每个服务周期内的网络拓扑是固定的，在下一个服务周期卫星网络拓扑发生改变，随之LEO卫星网络缓存部署也发生变化，而在每个服务周期内，我们将这个服务周期划分为个时隙，每个时隙长度为，表示为，我们假设每个区域的用户可以同时由多颗卫星提供服务。我们这里考虑每个LEO卫星的缓存容量有限，用来表示。我们将流行内容的目录定义为，其中是流行内容种类的总数。

**Content Placement Model：**

存储中的编码已经成为系统的关键问题，许多研究人员对存储编码进行了研究。这些文件被拆分为个片段，将这些片段编码为个数据块，然后存储在多个节点中。当需要恢复原始数据时，可以从这些节点中获得所有数据块中随机的个数据块，通过使用个数据块进行解码操作，可以恢复原始数据。在实际应用中，它可以通过最大距离可分离（MDS）代码[55]-[57]来实现。本文将表示为个大小不同的内容的集合,单位为bit。集合中的每个内容都被分成一些大小相等的原始块，每个块大小为。因此每个内容可以划分为个原始块, 如果最后一个块的大小小于，则需要填充到长度为。将这些原始块编码成编码块缓存，编码块的数量至少应该是原始块的数量，也可以选择设置更多的编码块来提供额外的冗余和容错能力。在本文中，我们假设编码块的数量和原始快的数量是相同的，当接收到的块数大于或等于原始文件的块数（）时，可以在接收到的用户终端上恢复原始文件。我们使用来表示LEO卫星在区域中分配给文件的缓存策略，LEO卫星在文件中选择其中块进行缓存，这里对于每一个LEO卫星必须满足

因为LEO卫星不会浪费缓存资源来保存同一块两次。LEO卫星缓存的缓存块数不大于相应缓存容量，表示为：

**Request Model：**

人们发现，对于真实网络中的视频内容的受欢迎程度服从Zipf分布。我们用来表示每个区域内的内容请求集合。时刻用户请求文件的概率可以被定义为：

Zipf区域类型同这里的SA(Serving Area)，即为区域编号。是区域的文件流行分布系数，通常介于0.5到2之间。是区域中文件的流行程度。举个例子，当= 1时代表文件是区域中最受欢迎的文件。在每个集群中请求文件的概率之和为1。

我们假设同一区域的每个用户请求文件具有相同的流行分布概率，即。

我们利用泊松过程来建模用户向LEO卫星发送文件请求的过程，每个用户独立地根据Zipf分布请求文件，而卫星接收到的总请求次数遵循泊松分布。用户请求是独立的，且在任何给定的时间间隔内请求发生的概率是恒定的。并考虑到不同区域的人口密度，将定义为区域的用户请求率。那么在时隙 *t* 内某个文件f的请求次数的期望值可以表示为：

假设卫星覆盖区域内有个用户，每个用户请求文件的概率遵循相同的Zipf分布。那么，对于特定文件f，在覆盖区域内所有用户中的总请求概率可以表示为所有用户请求这个文件概率的和，即：

这个总概率 可以视为泊松分布中的平均请求率，因为它代表了在该覆盖区域内预期收到的对特定文件的请求次数。然后，我们可以使用泊松分布的概率质量函数来计算在给定时间内LEO卫星接收到对特定文件 *f*的 *k* 次请求的概率：

因此，在区域中的LEO卫星在一定时间内至少收到对一个文件请求的概率被描述为。

**Energy Model：**

我们使用一个二进制指示变量表示内容是否通过LEO卫星链路从卫星传输到卫星在时隙。其中意味着内容通过LEO卫星链路从卫星传输到卫星在时隙；其他情况。因此：

在本文中，我们优化了缓存策略，以最小化内容更新，传输过程中的总传输成本。然而，文件传递也是一个重要而复杂的研究方向。因此，我们引入了一种基于广度优先搜索（BFS）的机制来衡量传输的预期，下面也称为缓存效率。由于其广度优先的缩放，BFS非常适合遍历该卫星网络的图形结构。这种效率对于寻找最短路径和广度相关信息特别有用。在卫星网络中，BFS从起始节点收集所有可到达卫星节点的数据，从而在整个卫星网络中建立连接路径。因此我们可以通过BFS来确定当前内容缓存的卫星和内容更新传输到另一颗卫星之间的连接路径。

给定一个路径，我们可以将其表示为一系列相邻卫星对的集合：，这里，是路径的起点和是路径的终点，而是路径上的中继卫星，并且和是相邻卫星。因我们使用表示链路中的任意一条相邻卫星对之间的链路，即。相应的只有当时，，，表示为通过链路传输文件，除此之外。

链路速率是用来表示LEO卫星星间链路（ISL）的传输能力的，可以表示为：

其中，自由空间损失为：

这里，和是链路的卫星传输功率（𝑊）和卫星发射天线增益。卫星的接收天线增益表示为。此外，和是玻尔兹曼常数（）和总系统的噪声温度（in K）。（）是每比特接收能量与噪声密度的需求比率。𝑀是链接裕量，它表示超过链接预算[1]所需的最小额外收益。此外，𝑐为光速（以km/s为单位），𝑓表示链路的通信中心频率（in Hz）。表示倾斜范围（in km）。因此，链路在一个时间隙中可以达到的最大数据量：

因此，链路上传输的数据量不能超过链路容量

我们假设两个LEO卫星在一个时间段内通过ISL传输的数据块数不能超过ISL链路所能同时传输数据块的最大值，也就是说：

**缓存：**

能量消耗的部分只考虑LEO卫星缓存文件消耗的能量和文件通过卫星ISL传输更新内容消耗的能量以及用户需求内容下行传输消耗的能量。在该模型中，功耗由内容缓存、内容传输组成。LEO卫星缓存内容消耗的能量表示为：

这里是每个卫星缓存每比特文件的功率，以瓦特为单位计算。而内容传输的能量消耗在系统中有两部分组成，一部分是内容更新阶段的能量消耗，另一部分是LEO卫星下行传输内容到用户的能量消耗。

**内容更新：**

我们不考虑用户接收需求内容的下行传输时延约束和缓存内容的实验约束。当卫星网络拓扑发生改变时，文件需要在LEO卫星网络中传输，传输链路包括多跳ISL，这种情况下，缓存文件到卫星网络的延迟为传播时延和传输时延的和，LEO卫星为每个内容请求发送数据，那么能量消耗和时延应该与该内容被请求的次数成正比。我们已经有了内容在时间内的平均请求率。因此，不同卫星不同内容块在内容更新时缓存的时延可以表示为：

其中，表示内容在卫星和卫星间传输内容的跳数，表示卫星和卫星之间的距离，表示光速，值为 km/s。

缓存内容分发的能耗为通过ISLs传输文件产生的通信能耗，卫星ISL传输消耗的能量表示为：

这里为卫星之间的传输功率。

**LEO卫星传输：**

对于卫星通信链路，国际电联建议按照建议ITU-R P.618-13 [15]中提供的准则应用大气衰减模型。本文考虑了雨衰减，因此卫星对用户的通道可以看作是Weibull 信道[16]。由于信道衰落而导致的卫星对用户链路的功率衰减表示为：

式中，为载波波长，和分别为LEO卫星和用户的天线增益。是LEO卫星的高度，是遵循Weibull分布后的雨衰减。因此，我们利用Shannon容量计算卫星到用户的下行传输速率如下：

式中，为卫星的传输功率，为卫星分配给用户的带宽，为信道噪声功率。

LEO卫星下行传输内容到用户的能量消耗表示为：

这里为LEO卫星的发射功率。

文件缓存消耗的总能量消耗为：

**Problem formulation：**

**Design of Optimization Problem：**

C1：

C2：

C3：

C4：

C5：

C6：

C7：

C8：

C9：接受到的文件数大于块数

**Modeling Dynamic SFC Orchestration as the MDP：**

为了有效地捕获服务提供期间网络状态之间的动态转换，我们使用了MDP建模内容缓存的转换。具体来说，我们使用元组来表示MDP，其中表示缓存部署确定过程中的状态，由LEO卫星网络状态信息和当前文件需求组成。表示当前状态下的可用动作空间，表示每个动作和状态转换的奖励函数。SFC编排的奖励功能评估并提供对代理在给定状态下的行为的定量反馈，表明它们是否与任务目标相一致。在强化学习中起着至关重要的作用，它描述了代理在采取特定行动时从一种状态过渡到另一种状态的可能性。它对环境中的动态变化进行建模，使代理能够预测未来的状态并优化其行为。详情如下所示。

1)状态表示：状态空间表示缓存确定过程中的状态。具体来说，状态空间由当前用户的请求概率和卫星节点q的缓存决策信息合并组成矩阵。因此，状态空间在时间t表示为：

2)动作定义：动作空间为所有可缓存文件的索引，其输入为actor网络输出的概率分布矩阵。然后，智能体根据LEO卫星网络的当前状态输出每个缓存文件传递链路的最佳选择。在这个系统中，智能体需要根据上述策略网路输出的概率来决定将卫星网络中已经部署的文件传递到其它卫星上所经过的ISL，与此同时要满足LEO卫星的容量约束，因此，动作空间在时间t表示为：

其中的块矩阵是卫星间链路的决策矩阵，表示为：

为了使算法不会陷入局部最优解，我们使用贪婪策略来权衡算法的探索和利用，公式表示为：

这里的是随机选择动作的概率，是一个动态衰减值。

3)奖励描述： 奖励表示每个时刻LEO卫星根据当前状态缓存文件后得到的即时奖励，也就是说选择不同的文件缓存会对应不同的奖励。智能体根据策略在当前选择，环境对这些动作做出评价产生奖励。考虑到卫星缓存容量的限制，在一个卫星中缓存所有文件是不现实的。为了满足用户的内容要求，文件必须从其他卫星传输相同的文件，从而给网络带来流量。因此，在时间t的奖励可以表示为：

**预期仿真图：**

energy consumption：

变量：文件大小；Zipf系数；缓存容量；文件数量；区域数；每个区域的用户数

平均时延

变量：文件大小；Zipf系数；缓存容量；文件数量；区域数；每个区域的用户数

收敛效果：

变量：迭代数