面向低轨卫星网络的星上分布式Sketch测量框架

张妍[1]，潘恬[1,2]，郑奘[1]，刘江[1,2]，黄韬[1,2]
（1.紫金山实验室，江苏 南京 211111；2.北京邮电大学信息与通信工程学院，北京 100876）

摘要：针对低轨卫星网络星地链路频繁切换导致流量跨星分散、难以追踪与汇聚的问题，提出一种星上分布式Sketch测量框架。该框架利用分布式哈希表动态记录跨星长流经过的卫星轨迹，在查询时先定位轨迹序列，再聚合各接入卫星上的流量片段。采用卫星数据平面与地面控制平面协同架构：卫星端部署Sketch进行本地统计，并利用布隆过滤器与分布式哈希表实现首包检测与轨迹记录；地面端负责按需查询、结果聚合与参数配置，借助Sketch的线性可加性高效汇聚分散片段。理论分析与仿真实验表明，在792颗卫星Walker星座、跨3颗测量卫星和1 200条跨星长流的典型场景下，所提测量方案的平均端到端查询时延为128 ms，单星存储开销低于100 KB。

关键词：低轨卫星网络；流量测量；Sketch；分布式哈希表；布隆过滤器
中图分类号：TP393
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.1000–436x.TXXB260286

On-board distributed Sketch measurement framework for LEO satellite networks

Zhang Yan[1], Pan Tian[1,2], Zheng Yan[1], Liu Jiang[1,2], Huang Tao[1,2]
1. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China
2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Frequent handovers in low earth orbit (LEO) satellite networks fragment traffic and complicate the tracking and aggregation of long flows. To address this issue, a distributed Sketch-based measurement framework was proposed. The framework employed a distributed hash table to record the satellite trajectory of each long flow. During a query, it first located the trajectory sequence and then aggregated the traffic fragments collected from the access satellites. A cooperative architecture consisting of a satellite data plane and a ground control plane was designed. The satellite side deployed Sketch for local traffic counting and used a Bloom filter together with a distributed hash table to detect the first packet and record trajectory information. The ground side supported on-demand queries, result aggregation, and parameter configuration, and it exploited the linearity of Sketch to efficiently merge distributed traffic fragments. Experimental results demonstrate that, in a typical scenario of a 792-satellite Walker constellation with 3 measurement satellites traversed and 1 200 cross-satellite long flows, the proposed scheme achieves an average end-to-end query latency of 128 ms and a per-satellite storage overhead of less than 100 KB.

Key words: LEO satellite network, traffic measurement, Sketch, distributed hash table, Bloom filter

收稿日期：2026–05–19；修回日期：2026–07–26
通信作者：潘恬，pan@bupt.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.62372053）
Foundation Item：The National Natural Science Foundation of China (No.62372053)

0 引言

近年来，以Starlink[1]、OneWeb[2]为代表的大规模低轨（low earth orbit，LEO）卫星星座迅猛发展，其凭借全球无缝覆盖、低传输时延、高带宽容量以及部署灵活等优势，正成为全球天地一体化信息网络的重要组成部分[3]。随着星载处理能力的提升和星间链路技术的成熟，卫星已经演变为具备路由交换能力的网络节点。同时，卫星网络承载着越来越多的终端业务，如应急公共服务、智慧远洋航运、偏远地区宽带接入、高级辅助驾驶与无人驾驶、物联网与资产追踪等，导致卫星网络流量急剧增长。因此，随着大规模LEO卫星网络的业务越来越广泛，网络运维与管理对高精度的流级别测量提出了更高的需求，例如要求统计卫星网络中每条流的字节数与持续时长、识别出“大象流/大流”等。流量测量不仅关系到用户计费和安全审计等功能，而且对负载均衡、拥塞控制和网络调度等流量工程也至关重要。网络测量作为获取流量特征、保障服务质量的关键手段，亟须适应卫星网络的独特环境。

现有测量工作可归纳为地面网络、卫星链路级与卫星流级3个方面。地面网络的流量测量已形成较为成熟的技术体系。例如，NetFlow[4]和sFlow[5]通过采样或全量记录流状态实现流级测量，Sketch等方案[6-10]以极低的时空开销完成流量统计，此外，各类基于Sketch的流式摘要方案可在多个观测节点上分别维护并在中心侧通过线性汇聚实现全局近似统计[11-13]。这些方法大多默认在固定节点持续观测，获取地面流量的完整数据结构信息。在卫星网络测量方面，多数研究为链路级测量，侧重于端到端时延、丢包率等性能指标。文献[14]针对卫星接入网络的单向、往返时延等性能进行了全面测量与分析，文献[15]对Starlink网络的全球性能、实时应用支撑能力和内部网络运行机制进行了多维度分析，文献[16-17]针对星座动态拓扑特性提出了星上带内全网遥测方案。在卫星流级测量方面，近年来，研究者也开始关注面向卫星网络的流量测量统计方案。文献[18]针对软件定义低轨卫星网络，构建了一个自适应的流量状态采集与预测框架，降低了控制平面的信令开销；文献[19]提出了一个卫星全网测量框架，解决了负载均衡带来的内存膨胀和哈希冲突问题。然而，这些研究通常默认基于星历预配置，缺乏对“星地切换”这一卫星网络固有特性的建模：星地切换可能导致同一条长流信息分散在不同卫星上，导致流量信息找不到、聚不齐。

在上述需求背景下，Sketch凭借其高效的空间利用率和计算机制，以及可进行有效分布式测量的优势，成为卫星网络流量测量的优选。传统地面网络中，Sketch通常部署在流量汇聚节点，例如网关、核心路由器等，这些节点能够通过聚合感知流量的完整信息。受此启发，在LEO卫星网络中，接入卫星（即直接与地面终端通信的卫星）作为地面终端与卫星网络的第一跳，是天然的流量汇聚点，将Sketch分布式部署在各颗接入卫星上，作为“测量卫星”，可以捕获用户上行/下行流量，实现实时流量测量。

然而，Sketch直接应用于LEO卫星网络面临着严峻的挑战。不同于地面网络的静态路由拓扑，卫星网络具有动态拓扑特性[20]，卫星围绕地球高速运动，导致星地链路频繁切换，地面站或用户终端上方经过的接入卫星会随时间变化，单颗卫星对某一地面区域的覆盖时间仅为几分钟至十几分钟。对于短流（如Web请求、小文件传输），其持续时间短于星地链路驻留时间，此时单颗接入卫星即可完整记录该流信息；对于长流（如大文件传输、视频流、云备份），在其生命周期内，可能因星地切换而被分割到多颗不同的接入卫星上进行传输，即“跨星长流”，其流量统计信息被分散记录在沿途多个卫星的Sketch中。此时，地面控制中心缺乏星上全局流轨迹信息，当需要查询某条跨星长流的总字节数、包数等统计数据时，无法定位其分散存储的卫星节点。针对这种轨迹难追踪、统计难汇聚的问题，若是直接在星上应用Sketch测量，或是要求卫星全量回传所有流信息，或是需要广播来获取所需流信息，都会给宝贵的星上资源和星地带宽带来巨大的压力。

因此，如何在星上资源受限、拓扑动态变化的条件下，解决流量片段分散存储位置的定位问题，实现对“跨星分散流”的完整统计，是当前亟待解决的问题。为此，本文提出了一种面向LEO卫星网络的星上分布式Sketch测量框架，主要贡献如下。

（1）针对卫星网络中跨星长流统计信息分散存储、难以定位的问题，提出一种基于分布式哈希表

与布隆过滤器的轨迹记录机制，建立流标识与接入卫星轨迹之间的分布式映射关系，实现跨星长流的可追踪定位。

（2）提出一种卫星数据平面与地面控制平面协同的分布式Sketch测量框架。卫星端执行轻量化在线统计与轨迹维护，地面端负责按需查询、结果聚合与参数管理，利用Sketch的线性可加性完成跨星流量片段汇聚。

（3）面向星上资源受限场景，设计大流阈值筛选、周期重置与轨迹老化等优化机制，在保证测量完整性和可查询性的同时，降低存储、计算和通信开销。

（4）构建了LEO卫星网络流量测量仿真环境，并进行了全面的实验验证。实验结果表明，本文方案实现了低时延、低开销和高精度的流量测量。

1　研究背景与挑战

1.1　研究背景

现有相关研究可大致分为以下三大类。

第一类是面向地面网络的测量方法。NetFlow、sFlow以及各类Sketch流量测量方法，如Count-Min Sketch（CM-Sketch）[6]、Count Sketch[7]、CU Sketch[8]、SketchVisor[9]、Elastic Sketch[10]等，已在地面高性能交换机、数据中心和骨干网场景中得到广泛应用，重点解决高吞吐量条件下的流量统计精度与空间效率问题。然而，这类方法通常默认地面静态或弱动态网络，网络拓扑相对稳定，观测节点位置相对固定，难以直接适配低轨卫星网络中因接入卫星频繁切换而引发的流状态跨节点迁移问题。此外，相对于地面设备，星上存储、能耗、处理能力等资源有限，无法维持海量数据的精确状态；星地链路带宽有限，若导出大量流记录，将会挤占用户数据带宽。

第二类是面向LEO卫星网络的链路级测量方法。现有卫星网络测量方案大多侧重于网络性能和链路质量的测量，如星地/星间链路的时延、抖动、丢包率、链路带宽利用率和链路可达性等。这些工作通常采用主动探测[14-15]、链路层/物理层遥测[16-17]、路由协议或控制平面的统计信息[21-22]等来评估网络的可用性和服务质量。然而，此类链路/节点级测量手段难以直接满足细粒度流量测量的需求。

第三类是面向LEO卫星网络的流级测量方法。卫星网络的流级统计，例如，ATS-CP[18]在显著减少数据采集量的前提下预测全局流量状态，但其解决的核心问题是控制平面信令开销，而非流轨迹追踪；CountingStars[19]构建数字孪生系统预测拓扑，获得准确的单流大小，实现了单设备/单交换节点上的测量数据结构优化，但该方法依赖地面数字孪生进行集中式预配置，当预测与实际拓扑存在偏差时，测量精度会明显下降。此外，这类方法通常依据预期的星地连通时间窗口进行工作，缺少对LEO卫星星座特有的星地切换场景的支持。

Sketch作为流量测量的有效方案，内存消耗小、处理速度快且具备线性可加性，能够实现高精度的流量统计。其中，Sketch处理数据包仅需要常数级别的时间复杂度，支持真正的在线处理，计算开销极低。Sketch的线性可合并特性有助于分布式部署，适配卫星网络环境：多个卫星可以独立运行Sketch实例，然后将测量结果合并，不仅克服了集中式部署存在的单点故障和性能瓶颈，而且不需要传输原始数据，显著降低了卫星传输负担。因此，可以通过研究多卫星协同的Sketch测量机制，充分利用Sketch的可合并性，实现高效的分布式流量测量。

1.2　挑战分析

LEO卫星星座中，与地面站或用户终端（如手机、物联网设备、车载站等）直接连接的卫星被称为接入卫星或服务卫星。接入卫星位于网络边缘，直接与地面进行双向通信，是流量的必经之路。因此，本文将分布式Sketch部署在各颗接入卫星之上，作为“测量卫星”。然而，在LEO卫星网络中部署分布式Sketch测量系统面临以下核心挑战。

（1）星地切换造成的流量跨星分散问题

地面网络路径相对稳定，一条流只要经过网关，通过固定的长时间采集，其完整的生命周期就能被持续统计。然而，LEO卫星处于持续高速运动中，地面站或地面终端上方的接入卫星也在不断变化。这一动态特性使同一条流可能先后经过多颗“测量卫星”，其流量信息被分散存储在多颗卫星节点的Sketch测量结构中。当地面需要查询某条流的总流量时，面临轨迹难寻的困境，难以从分散的卫星节点中汇聚完整信息。如图1所示，流Flow x先后经过S_1、S_2、S_3这3颗测量卫星，与地面用户站

A进行通信。每颗测量卫星的本地Sketch仅记录其自身服务时段内的流量片段。因此，Flow x的完整信息被分散存储在3个不同的卫星Sketch实例中。当需要查询Flow x的总流量时，地面节点（如地面站A）需要从所有可能存储了Flow x片段的卫星上获取局部计数并求和。然而，地面节点无法预知Flow x的具体经过的测量卫星轨迹，导致不能进行有效聚合，形成测量盲区。

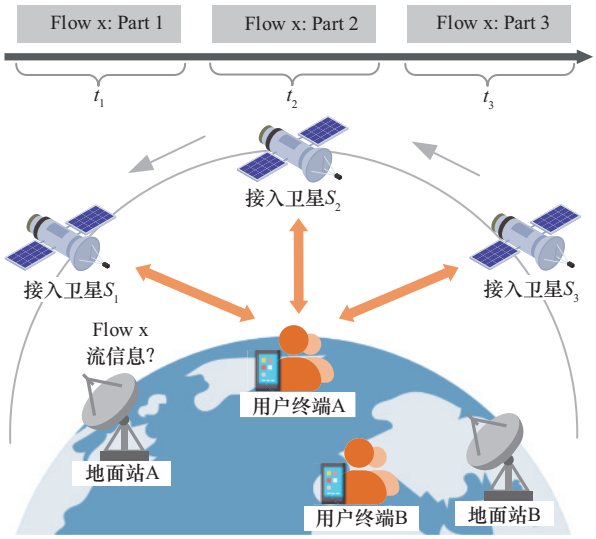


图1　流量跨星分散场景

（2）卫星资源受限造成的开销困境

虽然LEO卫星星座相比传统卫星星座在覆盖范围和传输时延等方面具有显著优势，但是与地面网络充足的计算能力、存储空间及带宽资源相比，星上资源仍面临严峻约束。卫星平台受体积、重量、功耗的严格限制，星上内存容量有限，计算能力远弱于地面服务器，难以承载大量的数据存储和复杂的计算任务。此外，星间与星地通信带宽有限、成本高昂，星座规模庞大、卫星数量众多，若采用广播方案查询所有卫星来获取流量片段信息，通信开销巨大且时延高；若采用集中式方案，周期性地将所有卫星的原始测量数据回传地面，则受限于星地链路带宽及可用星地窗口，可行性小且效率低下。

面对上述挑战，星上Sketch测量的研究需要结合卫星网络特性，在动态星座环境下实现跨星长流的完整轨迹追踪与高效片段汇聚，既要保证测量精度和线速处理能力，又要降低资源开销与系统复杂度，实现星上测量功能的轻量化。

2　问题建模与系统架构

2.1　问题建模

考虑由多颗卫星构成的LEO星座网络，设卫星集合为$S=\{S_1,S_2,\cdots,S_N\}$，其中一部分卫星在任意时刻承担对地接入任务，记为接入卫星（即本任务中的“测量卫星”）集合S_{A}，其余卫星主要负责星间转发。卫星之间通过星间链路形成互联网络，地面站通过星地链路与当前可见接入卫星通信。

设流集合为$F=\{f_1,f_2,\cdots\}$，每条流由其流标识（Flow ID）唯一确定，Flow ID可由五元组（源IP、目的IP、源端口、目的端口、协议类型）构成。对于F中的任意流，若其持续时间长于单颗卫星对地覆盖时间，则记为跨星长流，否则记为短流。一条跨星长流在其传输过程中可能被分割为多个由不同测量卫星承载的流量片段。对于长流f，其在生命周期内依次经过的测量卫星轨迹可表示为$L(f)=\{(S_{i1},t_1),(S_{i2},t_2),\cdots,(S_{il},t_l)\}$，其中，$S_{ij}$表示第$j$个承载该流片段的测量卫星，$t_j$表示该流首次进入该卫星的时间，$l$表示该流跨越的测量卫星数量。

设卫星S_{ij}上流f的本地流量值为$v_{ij}(f)$，则该流的总流量为：

$$V(f)=\sum_{j=1}^{l}v_{ij}(f) \tag{1}$$

记卫星侧对流量片段的近似估计为$\hat{v}_{ij}(f)$，则目标是以尽量小的星上处理开销和尽量低的星地通信代价得到：

$$\hat{V}(f)=\sum_{j=1}^{l}\hat{v}_{ij}(f) \tag{2}$$

2.2　系统架构

本文提出一种卫星数据平面与地面控制平面协同的Sketch测量框架，整体架构如图2所示。卫星端承载基础的实时测量和轨迹上报与存储任务，地面端承担查询协调、结果聚合、参数配置和优化等复杂逻辑，星地之间通过轻量级消息进行交互。此设计将复杂功能向资源充裕的地面倾斜，兼顾了星上功能的可实现性和系统的可扩展性，在保证系统整体功能的同时，控制了测量开销和带宽占用。

基本设计思想为：在不同接入卫星上部署Sketch，作为“测量卫星”，记录跨星长流的流量片段。同时，为每条跨星长流建立一个Flow ID与

测量卫星轨迹的映射关系；当地面需要查询该流时，先依据轨迹索引定位其曾经过的测量卫星，再从这些卫星中拉取局部估计值并进行聚合。为此，本文引入以下机制：采用分布式哈希表（distributed hash table，DHT）[23]记录流轨迹，卫星节点维护“Flow ID−测量卫星轨迹列表”的对应关系；通过布隆过滤器（bloom filter，BF）[24]执行首包检测，判断流是否首次进入当前卫星，仅在首次出现时触发轨迹记录，避免重复上报；地面按需查询与聚合，通过DHT定位目标卫星集合，利用Sketch的线性可加性进行片段合并，从而恢复该流的全局统计结果。

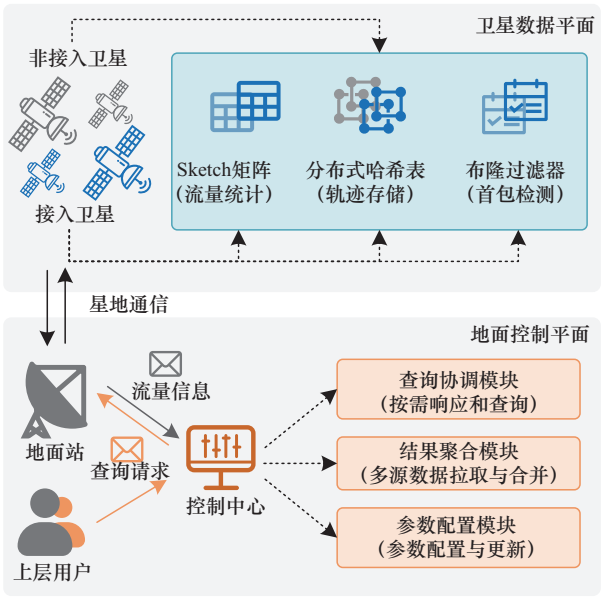


图2　系统架构

2.2.1　卫星数据平面设计

卫星数据平面部署于所有卫星节点。鉴于接入卫星和非接入卫星的功能不同，本文采用差异化的部署策略：接入卫星直接处理用户流量，作为“测量卫星”，利用Sketch部署实时流量测量功能，并利用DHT和BF实现轨迹管理功能；非接入卫星不直接处理地面接入业务，作为“非测量卫星”，仅利用DHT专注于分布式索引存储。此策略实现了测量与索引功能解耦，有助于降低全局资源成本，为未来扩展新的测量结构或算法预留升级空间。卫星数据平面核心数据结构如图3所示，3种数据结构详情介绍如下。

（1）Sketch流量统计

Sketch是一种基于哈希映射的轻量级数据结构，核心原理是通过多个哈希函数将流量键映射到计数器数组，再通过共享计数器的方式，以较小的内存开销实现流量的近似估计。在每颗测量卫星上部署CM-Sketch，对本卫星承载的数据流进行在线统计。CM-Sketch的内存占用固定、更新时间复杂度低，适合部署在星上资源受限的环境中。CM-Sketch由d行、w列计数器构成。每当数据包到达时，提取其Flow ID作为输入，并通过d个哈希函数分别映射到每一行的一个计数器中，对应计数器累加该数据包的字节数或包计数。对于流f，其在当前卫星上的估计值为：

$$\hat{v}(f)=\min_{1\leqslant r\leqslant d}\boldsymbol{M}_{\text{sketch}}[r][h_r(f)] \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{M}_{\text{sketch}}$为存储流统计数据的二维计数矩阵，$h_r$为第$r$行对应的哈希函数。该估计值具有单边正偏差，在适当参数配置下误差可控。为避免长期运行导致误差累积和计数器饱和，Sketch矩阵需定期重置。

（2）BF首包检测

为避免同一跨星长流在同一卫星上被重复触发轨迹记录，本文在每颗测量卫星上部署BF进行“首包检测”。BF由长度为m的位数组和k个独立哈希函数构成，能够快速判断一个元素是否属于集合[25]。当数据包到达时，卫星获取其Flow ID进行查询，若BF未命中，则说明这是该流经过本卫星的首包，将Flow ID写入BF，并触发轨迹记录流程；若BF命中，则判断此流已存在，不再触发轨迹记录。BF通过较低存储代价实现近似成员检测，可有效避免对同一流频繁发送轨迹更新消息，从而降低信令开销。BF存在一定的误报可能，其长期运行会导致数组“1”过载，引起假阳性率过高。通过增大m、合理选择k、采用周期重置等策略，可将其影响控制在较低水平。

（3）DHT轨迹记录

采用DHT对流轨迹进行分布式管理，避免集中索引带来的单点压力，同时支持轨迹查询的按需定位。流轨迹DHT的构建基于一致性哈希算法[26]。

① 定义一个哈希空间，将每颗卫星的ID（Sat ID）经哈希函数映射到空间中的一个点，再将需要记录轨迹的流Flow ID同样映射到空间中的一个点。

② 哈希空间中，Flow ID映射点顺时针（或按某种顺序）遇到的第一个Sat ID映射点，即其“后继节点”，对应的卫星为该流的“负责卫星”。负责

卫星需要存储该流的轨迹列表，结构为<Flow_ID, List<Sat_ID, Timestamp>>，其中，Sat_ID为该流经过的测量卫星，Timestamp为时间戳。每条流的轨迹只存储在一颗卫星上（即其负责卫星）；一颗卫星可能同时是多个流的负责卫星。

③ 每颗卫星维护一个路由表（如Kademlia的k-bucket[27]），记录已知的其他卫星节点信息（Sat ID、星间链路地址），形成可路由的覆盖网络，支持在$O(\text{lb}\ N)$跳内定位目标卫星，其中N为卫星节点数。由于卫星运动具有周期性规律，可以利用星历预知未来一段时间内其他卫星的相对位置，从而更新路由表，降低路由维护开销。

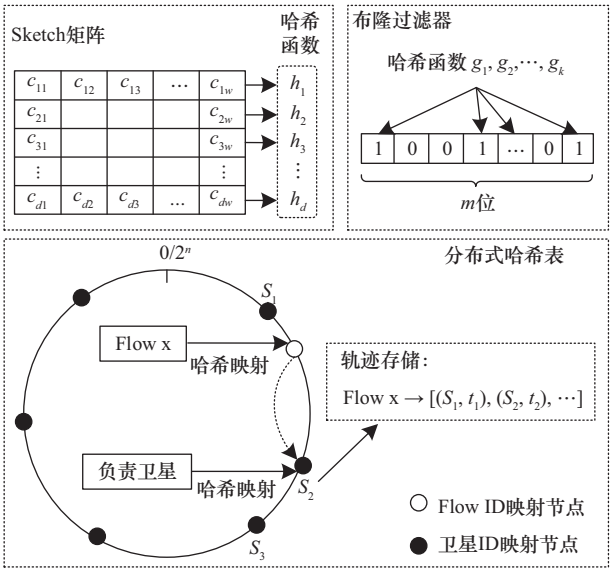


图3　卫星数据平面核心数据结构

2.2.2　地面控制平面设计

地面控制平面通常部署于地面站、地面主控站或数据中心等，主要负责协同多星进行流量查询、分布式数据的拉取与聚合、利用数学特性进行精准还原以及全局测量任务的配置与优化等。其核心功能模块如下。

（1）查询协调模块。作为用户与测量系统之间的接口，该模块负责按需查询与响应，处理来自网络管理员或上层应用的查询请求。该模块的主要功能有：单流查询，查询指定Flow ID的总流量（包数/字节数）；历史回溯，查询某一历史时间窗口内特定流的统计信息。查询协调模块接收到请求后，首先解析查询参数（Flow ID、时间范围等），然后将查询请求通过地面站上行发送至当前接入卫星，根据DHT定位机制找到该流轨迹记录的负责卫星，从而获得该流所经过的测量卫星轨迹信息。

（2）结果聚合模块。该模块负责对从多颗卫星拉取的局部计数进行合并，生成最终的查询统计结果。聚合过程中需实现以下功能：多源数据合并功能，CM-Sketch具备线性同构可加性，对于跨星长流，将从轨迹列表中各卫星处获得的估计值求和，若不同卫星的Sketch采用不同哈希函数（为降低冲突风险，各卫星可独立随机化哈希函数），需完成计数器的对齐；误差校正功能，CM-Sketch的估计值为各哈希行计数器的最小值，存在正向误差，合并多个卫星的估计值后，误差可能累加，因此，采用“先取最小值后求和”的策略得到总流量估计值，单星内取哈希行计数器的最小值，最大程度抵消单星哈希冲突误差，再通过线性求和完成多星片段聚合，既避免了传输大量数据，又保持了误差的可控性；时间窗口对齐功能，查询可能涉及特定时间窗口（如过去1 h），由于各卫星的Sketch按周期重置，需要根据数据包的时间戳筛选落于窗口内的计数，通过在数据包处理时记录时间窗口标签实现。

（3）参数配置模块。该模块负责向卫星数据平面下发配置参数，确保各卫星的测量行为一致且适应网络状态变化。地面控制平面可以定期接收星上轻量级状态报告，根据状态信息评估系统负载，动态调整参数，通过星地链路广播完成参数配置与更新，卫星收到后缓存并应用于下一个周期。可配置的主要参数包括：Sketch参数，如哈希函数个数、计数器宽度，影响估计精度；BF参数，如哈希函数个数、位数组大小，影响误报率与内存占用的平衡；上报阈值，即触发轨迹记录的流大小阈值，该阈值影响上报流量与长流覆盖率之间的权衡，可根据历史流量分布自适应调整；周期长度，如Sketch的统计周期、BF清理周期和DHT轨迹老化周期等，可根据星上内存占用和测量精度进行调整。

3　工作流程

3.1　星上实时处理流程

星上实时处理流程是测量系统的数据入口，运行于每颗测量卫星之上，以数据包粒度执行轻量级操作。该流程的核心目标是：在资源受限的星上环境中完成本地流量统计，精准识别跨星长流首包并

按需上报轨迹记录，具体流程如图4所示。当测量卫星接收到数据包时，其具体步骤如下。

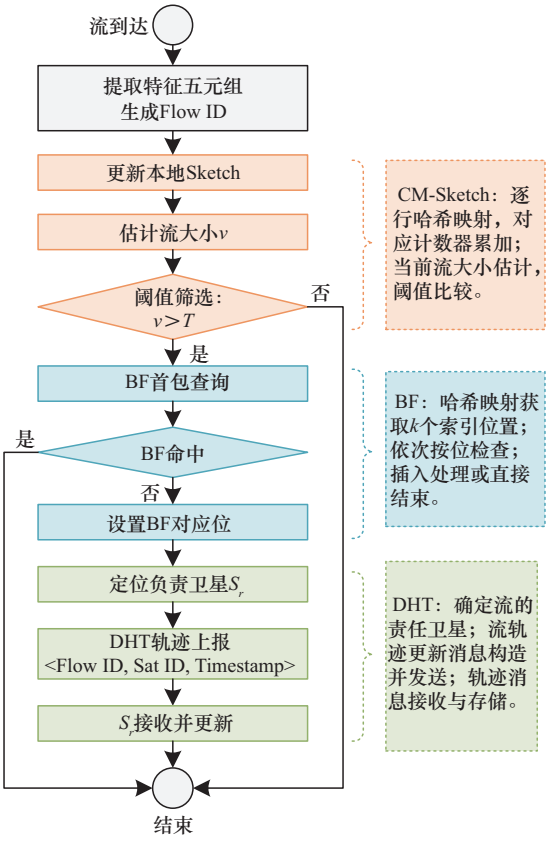


图4　星上数据包实时处理流程

（1）数据包特征提取。当数据包到达测量卫星时，解析其头部，提取五元组信息。通过哈希函数将五元组映射为固定长度的Flow ID，作为该流的唯一标识。

（2）Sketch本地更新。对于当前数据包的Flow ID，使用d个哈希函数分别计算各行的桶索引，找到每行相应的计数器，将对应计数器累加包长，随后将数据包的长度（字节数）更新至卫星本地的CM-Sketch矩阵中。此操作时间复杂度为$O(d)$，d通常取4~8，开销极低。

（3）流大小估计与阈值筛选。为避免海量小流占用宝贵的内存空间和通信带宽，引入阈值筛选机制。从Sketch矩阵中读取当前流的估计大小，仅当估计值大于预设阈值T（可根据链路带宽和星座规模进行配置），即该流被识别为潜在大流时，才会触发后续检测与轨迹上报流程。这一设计将上报范围限定于大流，可减少大量小流的轨迹上报消息。

（4）BF首包检测。将Flow ID输入本地BF中，判断该流是否在本周期内已经经过本卫星。使用预设的k个独立哈希函数分别计算位数组中的k个索引位置，依次查询这k个位置的值：若所有位置的值均为1，则返回查询结果“命中”（True），说明该流此前可能已经被本卫星记录过，不再重复上报轨迹；若任意一个位置的值为0，则返回查询结果“未命中”（False），说明这是该流首次经过本卫星（可能是新流建立，也可能是星地切换后首次切入）。此时，将该Flow ID插入BF（将对应的k个位置全部置1），并触发轨迹上报流程。

（5）DHT轨迹上报。当BF返回“未命中”后，本地测量卫星S_m确认需要为该流上报轨迹，其具体轨迹上报操作如下。

① 确定负责卫星。对Flow ID应用哈希映射得到其在哈希环上的位置P_f，在本地DHT路由表中查找哈希环上顺时针距离P_f最近的卫星节点，即该流的负责卫星S_r。

② 构造轨迹更新消息并发送。生成轨迹更新消息，格式为<Flow_ID, S_m_ID, Timestamp>。若S_r恰为本卫星，则不需要发送，直接本地存储；否则，卫星S_m通过星间链路将消息发送至S_r。若S_m本地路由表中没有直达S_r的路由，则通过DHT逐跳查找。查找过程遵循Kademlia协议，通过维护的k-bucket逐跳逼近，最终定位S_r的星间链路地址。

③ 消息接收与存储。S_r收到消息后，根据Flow ID在其本地轨迹存储区中查找对应条目，若条目信息不存在，则新建条目<Flow_ID, List<S_m_ID, Timestamp>>；若已存在，则将该条记录追加至列表末尾的List<Sat_ID, Timestamp>中，为避免重复添加同一卫星的相同时间戳记录，可通过检查最后一条记录进行去重。

上述流程中，阈值筛选与首包检测构成了两级过滤机制：第一级过滤小流，第二级过滤已上报的重复包。通过两级过滤，星上实际产生的上报消息数量被控制在可接受范围之内。

3.2　地面查询与聚合流程

地面查询与聚合流程运行于地面控制平面，在收到用户查询请求后进行星地通信，通过获取的局部计数数据进行聚合，完成按需查询与响应。该流程的核心目标是：在已知Flow ID的情况下，准确定位该流经过的所有测量卫星，并高效聚合各卫星上的局部Sketch计数，得到全生命周期的总流量估

计。具体流程如图5所示，详细步骤如下。

（1）查询发起与传输。地面上层用户通过控制平面接口发起查询请求QUERY(Flow_ID, Timewindow)，包含目标Flow ID及可选的查询时间窗口。控制中心（如地面数据中心）将查询请求发送至当前可用的地面站，该地面站将查询请求通过星地链路上行发送至其上的接入卫星S_a。

（2）定位负责卫星。接入卫星S_a收到查询请求后，通过查询本地DHT，根据一致性哈希规则，定位存储该流轨迹的“负责卫星”S_r。若S_r为当前卫星S_a，则直接拉取本地DHT中存储的该流的轨迹信息列表；否则，本地卫星S_a通过星间链路将查询请求消息发送至卫星S_r。

（3）获取流轨迹列表。在接收到卫星S_a发送的轨迹获取请求GET_TRACE(Flow_ID)之后，负责卫星S_r通过查询本地DHT轨迹存储区，获取该流的轨迹列表，并将此列表返回至S_a。其中轨迹列表包含该流经过的测量卫星ID，以及该流首次到达该卫星的时间戳。若指定了查询时间窗口，可根据时间戳筛选出落于窗口内的卫星片段。

（4）并行拉取局部计数。根据轨迹列表中的卫星ID，接入卫星S_a向其中的各颗卫星并行发送获取计数请求GET_COUNT(Flow_ID)。每颗目标卫星收到请求后，从本地CM-Sketch矩阵中提取该流的估计值（取各哈希行计数器的最小值），并返回给S_a。此过程仅传输单个或少量数值，通信开销极低。若某颗卫星无法响应（如链路中断），可根据DHT路由尝试通过其他卫星转发，或标记为缺失并继续处理。

（5）数据聚合与返回。S_a收到所有测量卫星返回的局部估计值后，将其通过星地链路下行传输至地面站，再由地面站传输至控制中心，进行求和、误差校正等工作，最后将得到的总流量估计值返回给用户。

3.3　优化机制

为保障系统在长期运行中的稳定性和资源可控性，本节针对若干关键优化点和边界条件设计处理机制。

（1）大流筛选优化。阈值筛选机制是控制开销的有效手段，其将上报范围限定于大流，并将占比高达80%~90%的小流直接拦截，大大减少了通信消息。该机制基于Sketch估计值判断流的大小，仅当估计值超过阈值T时才触发轨迹上报。T的选择直接影响系统行为：当T过小时，长流覆盖率提高，但上报消息增多，通信和存储开销增大；当T过大时，上报消息减少，但部分长流可能被遗漏。因此，合理设置T值十分重要，可采用动态阈值调整策略：地面控制平面根据当前星地链路可用带宽、卫星内存占用率、上报消息频率等因素，周期性地下发新的阈值参数。初始阈值可设为经验值（如100 KB），后续根据流量分布进行自适应调整。此外，可在流大小估计时进行优化：当包数累积到一

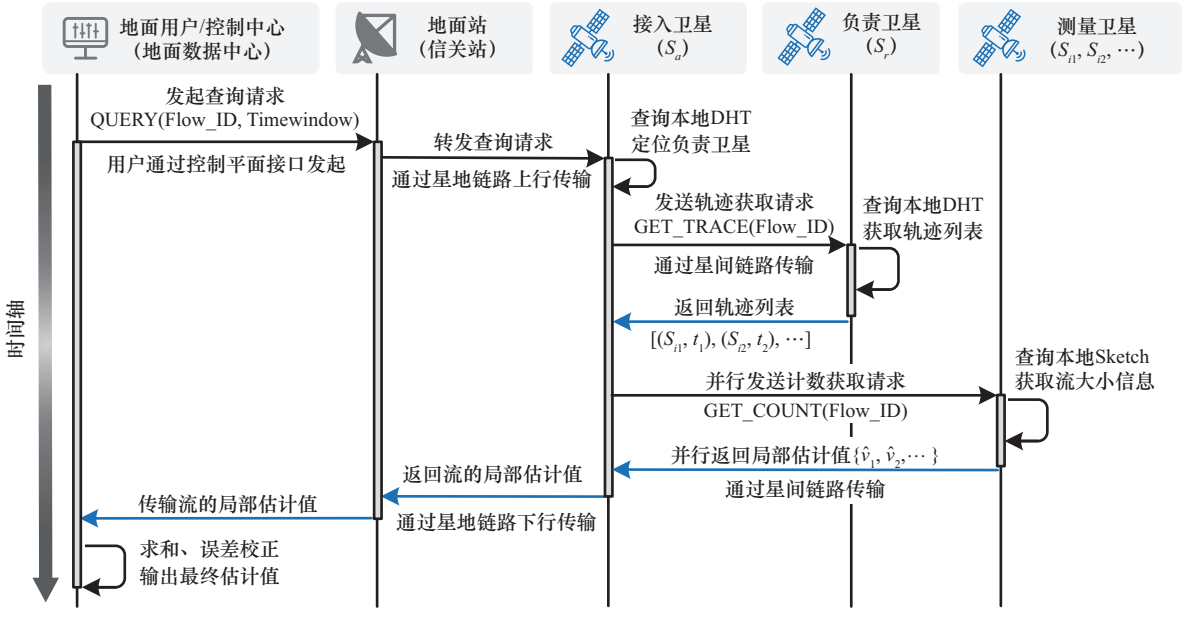


图5　地面查询与聚合流程

定数量后再进行阈值判断，而非仅依据首包信息立即判断，以免长流在初期估计值偏低而导致漏报。

（2）周期重置与边界处理。卫星内存有限，BF 和 Sketch 矩阵若无限累积将导致内存溢出、精度降低。本文采用周期重置机制进行周期划分（如一个轨道周期），每个周期开始时，卫星清空本地 BF 并重置 Sketch 矩阵。若一条流跨越多个周期，则其流量片段将被记录在多个周期的 Sketch 中。DHT 中存储的时间戳信息可精确标识各片段所属周期，查询时控制平面根据时间窗口筛选并聚合，确保跨周期流的完整性。当周期结束时，卫星可将当前周期内所有大流的摘要信息（如 Flow ID 与估计值）压缩上报至地面，作为历史数据存档，便于后续离线分析。

（3）DHT 轨迹老化与存储管理。DHT 中的轨迹信息随时间累积，若不清理将占用大量存储空间，因此本文引入老化机制。每条轨迹记录关联时间戳，设定一个存储有效期（如 24 h），超过有效期的记录被标记为“过期”。每颗卫星定期扫描本地轨迹存储区，删除过期记录，释放内存空间。清理周期与系统负载相关，通常设为数小时。对于被频繁查询的流（如热点内容），控制平面可下发保活指令，延长其轨迹保留时间，避免重复上报。

（4）星地链路中断处理。LEO 卫星网络中，星地链路可能因卫星运动或天气影响短暂中断。为此，本文设计以下容错机制：上报缓存，卫星在星地链路中断期间，将待上报的轨迹消息缓存于本地，链路恢复后，按序发送，确保轨迹记录不丢失；查询重试，当地面查询时，若某目标卫星不可达，控制平面可尝试通过其他卫星转发查询请求或等待链路恢复后重试；冗余存储，对于关键轨迹（如特大流的记录），可在一致性哈希环的后继卫星上存储备份，提升可靠性。

4　理论分析

4.1　星上复杂度分析

本节主要分析星上测量复杂度和查询复杂度。已知卫星网络节点总数为 N，则 DHT 网络规模为 N，记 CM-Sketch 矩阵为 d 行、w 列，BF 为 m 位、k 个哈希函数，轨迹上报触发概率为 ρ，一条流的轨迹列表长度为 l。

星上测量复杂度指测量卫星实时处理数据包时所需的计算开销。对于每个到达的数据包，测量卫星执行以下操作：流标识 Flow ID 的提取，时间复杂度为 $O(1)$；Sketch 更新，执行 d 次哈希映射并更新对应计数器，时间复杂度为 $O(d)$；流量大小估计与阈值判断，当判断为大流时，进行 BF 查询，执行 k 次哈希并检查对应比特位，若需插入，则再执行 k 次置位操作，时间复杂度为 $O(k)$；可选的 DHT 轨迹上报，定位负责卫星需经一致性哈希查找，基于 Kademlia 协议，轨迹定位与上报的时间复杂度为 $O(\rho \text{ lb } N)$。综上，每个数据包的平均处理复杂度可表示为 $O(d + k + \rho \text{ lb } N)$。实际轨迹上报概率通常远小于 1，且 d 和 k 通常为常数，因此，单包处理复杂度保持常数级，具备线速处理能力。

星上查询复杂度指卫星在作为查询代理或数据源时，处理来自地面控制平面或其他卫星的查询请求的复杂度，通常为卫星之间完成一次查询而转发的消息总量。在定位阶段，从起点卫星 S_{start} 到应答卫星 S_{resp} 平均经过 $O(\text{lb } N)$ 跳，每跳转发一条请求消息，消息量为 $O(\text{lb } N)$；在轨迹拉取阶段，S_{start} 与 S_{resp} 之间经过一次请求与响应交互，消息量为 $O(1)$；在计数拉取阶段，S_{start} 向 l 颗数据源卫星各发送一条请求，并收到 l 条响应，消息量为 $O(l)$。综上，单次查询产生的星间总消息量仅为 $O(\text{lb } N + l)$。

以星座规模 N=720 为例，DHT 查找的平均跳数为 lb 720≈9.5，即一次轨迹定位通常在 10 跳以内完成，轨迹列表长度 l 通常为 2~6（单星覆盖时长约 10 min，长流持续时长通常为 20~60 min），因此，单次查询的总星间通信跳数为 12~16 跳。若每跳星间传播时延约为 5 ms（星间链路距离为 1 000~3 000 km），则星上查询时延的理论下界为 60~80 ms。

4.2　星上存储开销分析

单颗测量卫星上的存储开销主要由 Sketch、BF 和本地维护的 DHT 轨迹项组成，可表示为：

$$M = M_{\text{Sketch}} + M_{\text{BF}} + M_{\text{DHT}} \tag{4}$$

其中，M_{Sketch} 和 M_{BF} 为固定开销部分，不随流量规模的变化而变化，设每个 Sketch 计数器位宽为 b，则有 $M_{\text{Sketch}} = dwb$，设 BF 的位数组长度为 m，则有 $M_{\text{BF}} = m$；M_{DHT} 为动态开销部分，与该节点负责的轨迹项数成线性关系，设单位时间轨迹写入率为 λ，轨迹保留窗口为 T_a，每条轨迹项信息长度为 l_e，则有 $M_{\text{DHT}} = \lambda T_a l_e$。通过阈值筛选可降低 λ，通过

轨迹老化可限制 T_a，从而控制 DHT 存储开销。

若 d=4、w=2 048、b=32 bit，可得单个 CM-Sketch 的存储开销 M_{Sketch} 为 32 KB；若 BF 长度为 m=2 048 bit，对应存储开销 M_{BF} 为 0.25 KB；若典型工作点下单星维护约 600 条活跃长流轨迹，每条轨迹项长度约为 50 B，则动态存储开销约为 29.30 KB。因此，单星总存储开销 M_{DHT} 约为 61.55 KB，该数量级远低于星载处理平台可提供的内存资源。

4.3 通信开销分析

通信开销主要来自两类场景：轨迹上报和流量查询。记每周期内的全网流总数为 $|F|$，轨迹上报概率为 ρ，每条流 f 实际经过的平均测量卫星数量为 l。当进行轨迹上报时，每条大流在每个测量周期内，在其经过的每颗测量卫星上最多触发一次轨迹上报消息（由 BF 首包检测保证）。记单次上报开销为 c，则全网每周期轨迹上报通信开销为：

$$C_{\text{report}} \approx \rho |F| l \cdot c \tag{5}$$

当进行流量查询时，首先执行一次 DHT 查找，随后仅向实际轨迹中的 l 颗卫星发送查询请求并接收响应。记单次 DHT 查找开销为 c_l，单次查询请求和响应开销分别为 c_q 和 c_r，则全网每周期查询总开销为：

$$C_{\text{query}} \approx \rho |F| \cdot \left[c_l \log N + l(c_q + c_r) \right] \tag{6}$$

设周期内全网流总数 $|F|=10^4$ 条，轨迹上报率为 15%，每条大流平均跨 3 颗卫星，则全网每周期轨迹上报消息数约为 4 500 条；设每条消息为 c=100 B，则每周期的总上报开销约 450 KB。查询开销方面，设请求与响应各约为 100 B，单次查询需向 3 颗卫星发送请求，则单次查询开销约为 600 B，以每分钟 10 次查询的负载估算，查询通信开销约为 6 KB/min，不足星地链路带宽（1 Gbit/s）的 0.001%。

4.4 测量误差分析

（1）CM-Sketch 测量误差

CM-Sketch 估计误差具有理论保证[6]。对于单颗卫星，设该卫星在给定时间窗口内处理的总流量字节数为 $\|F\|_1$，对于任意一条流 f，真实的片段流量值为 $v(f)$，则 CM-Sketch 给出的片段估计值 $\hat{v}(f)$ 满足：

$$\hat{v}(f) \geqslant v(f) \tag{7}$$

即估计值均为正向偏差，且高估量以至少 $1-\delta$ 的概率满足：

$$\hat{v}(f) \leqslant v(f) + \varepsilon \|F\|_1 \tag{8}$$

其中，δ 为失败概率，ε 为误差参数，由 Sketch 宽度和哈希行数决定。因此，对于跨 l 颗测量卫星的一条跨星长流 f，求和后偏差累加，则聚合估计误差满足：

$$\hat{V}(f) - V(f) \leqslant \varepsilon \sum_{i=1}^{l} \|F_i\|_1 \tag{9}$$

聚合误差随跨星数的增加存在一定的累积趋势，通过合理配置 w 和 d，可以将误差控制在较低水平。

以典型配置 w=2 048、d=4 为例，$\varepsilon=\frac{\mathrm{e}}{2\,048}\approx 0.001\,3$，$\delta=\mathrm{e}^{-4}\approx 0.018$。对于跨 3 颗卫星的长流，聚合误差的 99% 置信上界约为 $3\times 0.001\,3\times\|F\|_1=0.003\,9\|F\|_1$，即相对误差不超过 0.39%（最坏情况）。考虑到现实流量分布的不均匀性，实际平均误差通常高于理论误差。

（2）BF 检测误差

BF 存在假阳性，可能会导致某条此前未出现过的流被误判为“已见过”，使该流在当前卫星上的首包事件未被记录。BF 的参数为 m（位数组长度）和 k（哈希函数个数），设一个周期内 BF 中已插入的元素数量为 m_x，则单次查询的假阳性率[24]满足：

$$p \approx (1 - \mathrm{e}^{-\frac{km_x}{m}})^k \tag{10}$$

对于一条跨 l 颗卫星的长流，其轨迹被完整记录（即所有经过的卫星均准确记录）的概率为 $(1-p)^l$。因此，至少发生一次漏报的概率为：

$$P_{\text{miss}} = 1 - (1-p)^l \tag{11}$$

通过参数配置及周期重置，可将漏报的概率控制在低位。BF 误报只影响该卫星片段能否被纳入全局轨迹索引，而非直接破坏本地测量精度。

注意，虽然卫星可能服务千余条长流，但实际在 BF 周期内新出现的大流数量远少于长流数量，假设每周期插入元素数为 50~100，取 k=3，m=2 048 bit，根据式(10)可得：当 m_x = 50 时，假阳性率约为 0.04%；当 m_x = 100 时，假阳性率约为 0.25%。考虑到实际系统中哈希相关性、周期边界和实现近似带来的偏差，实验中观测到的假阳性率可能略有偏高，但仍完全处于工程可控范围内。

5　实验评估

5.1　实验设置

本文基于STK（Systems Tool Kit）[28]和Python搭建了仿真实验场景。在STK中，构建LEO卫星星座，获取卫星星历、星地可见性窗口以及卫星间相对连接关系等信息。将上述信息导出并输入Python仿真框架，在其中构建时变网络拓扑，模拟接入卫星切换、星间链路传播以及消息交互过程，并实现CM-Sketch、BF、DHT以及地面查询与聚合逻辑等功能。

LEO卫星星座设计为Walker星座，参考Starlink一代星座，卫星总数为792颗（轨道面数为36，单轨道面卫星数为22），轨道高度为550 km，单星对地覆盖时长约为10 min，星间链路带宽为10 Gbit/s，星地链路带宽为1 Gbit/s。核心测量结构CM-Sketch的参数d为4，w默认为2 048，b为32 bit；BF的参数k为3，m为2 048 bit，BF在每个重置周期内独立工作；大流上报阈值T默认为100 KB，轨迹老化周期为24 h，测量结构重置周期为1个轨道周期（约90 min）。

实验流量模型采用具有代表性的混合流量模型，参考互联网和卫星宽带业务中常见的长尾流量特征，设定小流数量占多数、大流数量占少数但贡献主要字节量；同时，结合LEO单星覆盖时长有限的特点，将持续时间短于单星覆盖时长的流定义为短流，将持续时间不短于单星覆盖时长的流定义为长流。具体生成时，流大小与持续时间分别按照设定分布独立采样，其中小流占比约85%、大流占比约15%；短流占比约85%、长流占比约15%。这种设置用于模拟真实业务中“多数短小流+少量跨星长流”的典型混合场景。

本节选取集中式全量上报Sketch方案（集中式Sketch）、无轨迹优化分布式Sketch方案（广播式Sketch）和目录分布式Sketch方案（Directory-Sketch）作为基线方案，并与本文方案（DHT-Sketch）进行对比。4种方案介绍如下。

（1）集中式Sketch：测量卫星本地部署Sketch完成流量统计，并在星地可见窗口内周期性回传全量Sketch至地面控制中心，由地面统一汇总查询。

（2）广播式Sketch：仅测量卫星维护本地Sketch，星上不记录流轨迹、不主动回传，查询时向候选卫星广播请求并汇总结果。

（3）Directory-Sketch：地面维护中心化目录索引，测量卫星在检测到大流后向目录节点上报“流–卫星”映射。查询时先查目录，再定向访问目标卫星拉取Sketch估计值。

（4）DHT-Sketch：通过DHT维护流轨迹，结合BF实现首包检测和低开销轨迹更新，查询时基于轨迹精确定位相关卫星并按需聚合片段统计值。

为了验证所提方案在LEO卫星网络流量测量中的有效性，本文从查询时延、系统开销、测量误差和关键参数4个方面开展实验评估。

5.2　查询时延

端到端查询时延指从地面控制平面发起任意时刻的查询请求，到获得该时刻最新的、完整的流统计结果的总时长。集中式Sketch方案由于采用周期性回传机制，地面中心仅在每个上报周期结束后才拥有最新数据，若查询发起时刻不在周期结束点，则必须等待下一个回传窗口，实际时延为秒级至分钟级，无法支持任意时刻实时查询。因此，时延分析仅对比本文DHT-Sketch与广播式Sketch、Directory-Sketch方案。

图6展示了端到端查询总时延及各段时延（即星上处理时延、星间路由时延、星地传输时延）。实验中固定查询目标为跨3颗测量卫星的长流，每组实验重复100次取平均值。DHT-Sketch采用分布式哈希定位机制，查询请求能够快速到达目标测量节点，避免了集中式汇聚带来的长链路反复转发与热点拥塞，因此总时延仅为128.0 ms；Directory-Sketch需要先访问目录节点进行索引查找，再转发至目标卫星，因而总时延上升至178.6 ms；广播式方案则需要向多个候选节点泛洪查询，导致星间通信开销急剧增加，总时延达到600.5 ms，明显高于其他方案。

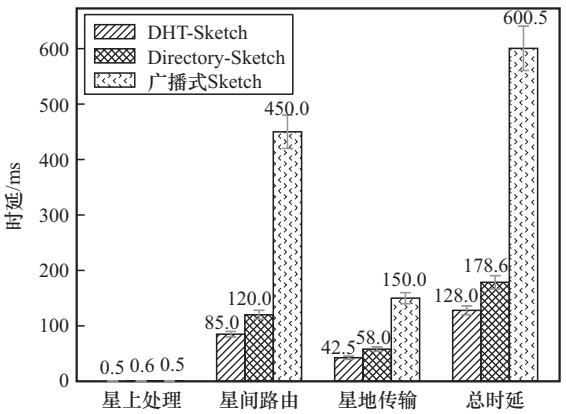


图6　端到端查询总时延及各段时延（跨3颗卫星）

图 7 进一步表明，随着跨星数量从 1 增加到 6，所有方案的查询时延均呈上升趋势，但 DHT-Sketch 增长速率最慢。当跨星数量为 6 时，DHT-Sketch 的查询时延为 187 ms，Directory-Sketch 和广播式 Sketch 分别达到 272 ms 和 1 150 ms。因此，DHT-Sketch 在星座规模扩大、业务路径变长的情况下仍能保持较好的时延可扩展性，适用于大规模低轨卫星网络中的分布式流量测量。

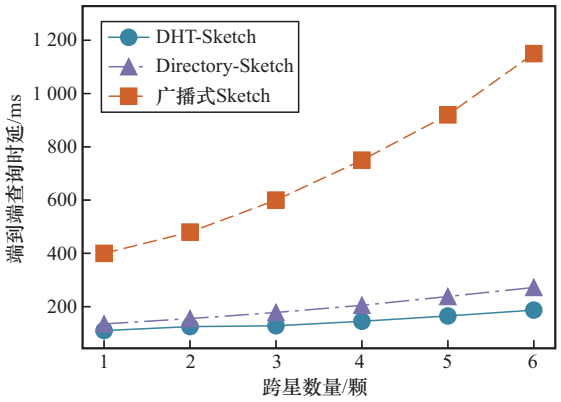


图 7　不同跨星数量下的查询时延

5.3　系统开销

针对星上资源受限、星地带宽宝贵的核心约束，从存储开销和通信开销两方面评估本文方案，重点分析 Sketch、BF 和 DHT 这 3 类结构的存储特性，以及测量系统带来的额外通信开销。

图 8 展示了本文方案的单星存储开销随活跃长流数量的变化关系。星上存储开销中，Sketch 与 BF 的存储占用为固定值，分别为 32 KB 和 0.25 KB；DHT 轨迹存储开销随活跃长流数量线性增长，在典型工作点（600 条长流、每条目信息占用 50 B）下，DHT 占用 29.30 KB，同时老化机制可定期清理过期轨迹，避免持续累积，内存占用可能更低。实验表明，DHT-Sketch 的单星稳态总存储开销仅为 61.55 KB，在极端情况（1 200 条长流）下，最大占用不超过 100 KB，远低于星上平台的内存容量约束。

通信开销为测量系统在星间和星地链路上产生的额外传输开销。图 9 展示了不同测量方案的通信开销，实验周期覆盖完整的卫星轨道运行周期。结果表明，DHT-Sketch 的总通信开销仅为集中式 Sketch 的 10.7%、广播式 Sketch 的 5.5%、Directory-Sketch 的 26.5%，带宽占用优势显著。DHT-Sketch 通信开销具有优势的核心原因在于：基于分布式索引和哈希定位的方案能够显著减轻地面控制与链路通信压力；两级过滤机制大幅降低信令开销，首包检测避免了信令风暴。本文方案具备较好的带宽节省能力，适用于星地链路资源紧张的低轨卫星网络环境。

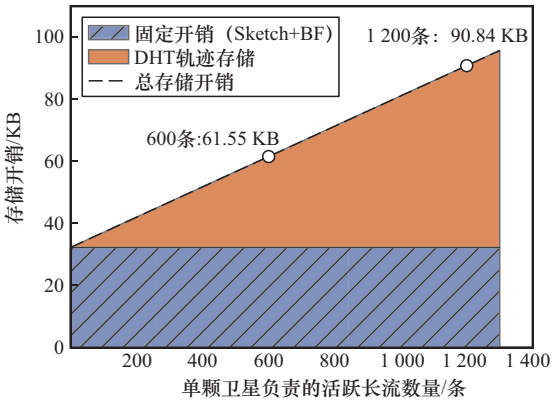


图 8　本文方案的单星存储开销随活跃长流数量的变化关系

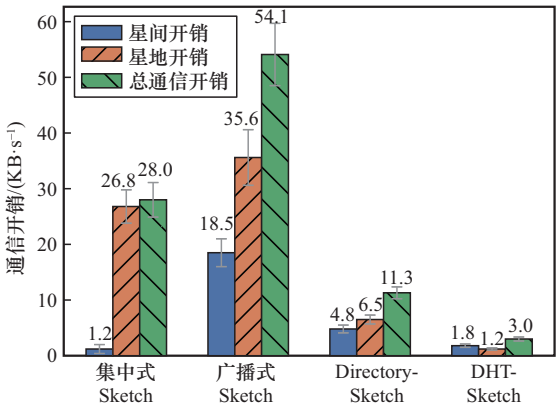


图 9　不同测量方案的通信开销对比

5.4　测量误差

误差是估计值的固有特性，本节针对跨星长流的误差问题展开实验验证，重点分析跨星数量对误差的影响，并对不同方案的误差进行对比。

图 10 展示了跨星数量对本文方案平均相对误差的影响。从图 10 可以看出，单星场景下，DHT-Sketch 的平均相对误差为 1.2%，与 CM-Sketch 的理论精度一致，满足流级测量要求；随着跨星数量增加，测量误差呈缓慢线性增长。当流跨 6 颗测量卫星时，平均相对误差仅为 3%，仍保持在 5% 以内的工程可接受范围，误差可控。本文采用了先取最小值后求和的聚合策略：CM-Sketch 的估计值为正向偏差，单颗卫星内取哈希行计数器的最小值，可最大程度抵消单星内的哈希冲突误差；通过线性求和完成多星片段聚合，避免了误差的叠加放大。

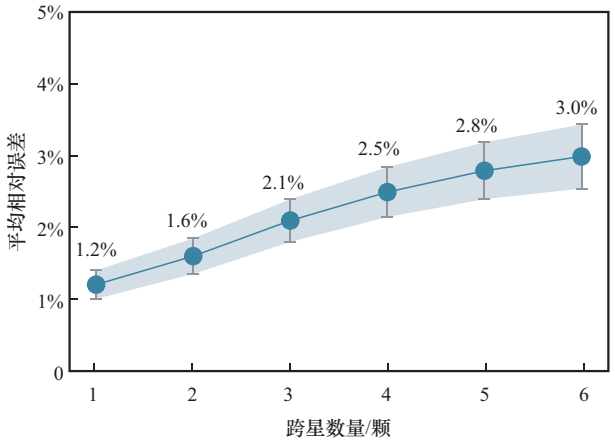


图10　跨星数量对本文方案平均相对误差的影响

图11进一步展示了4种测量方案在跨3颗卫星场景下的平均相对误差与最大相对误差。集中式Sketch的平均相对误差为4.5%，最大相对误差却高达30%，因其采用周期性回传机制，当查询发起时刻处于两个上报周期之间时，会导致部分流量片段被遗漏，此外，集中回传可能导致极高的星地通信瞬时峰值，对有限带宽构成冲击，导致测量信息的丢失；广播式Sketch的平均相对误差约为7.4%，最大相对误差超过20%，它需要向全网所有候选卫星广播查询请求，部分目标卫星与查询发起卫星之间的星间路径较长或星地链路瞬时拥塞，其响应可能超时或丢失；Directory-Sketch和DHT-Sketch均实现了较低的相对误差，其中，DHT-Sketch的平均和最大相对误差分别仅为2.1%和4.9%。因此，本文采用的分布式哈希定位与局部聚合机制能够有效抑制误差传播，提升测量结果稳定性。

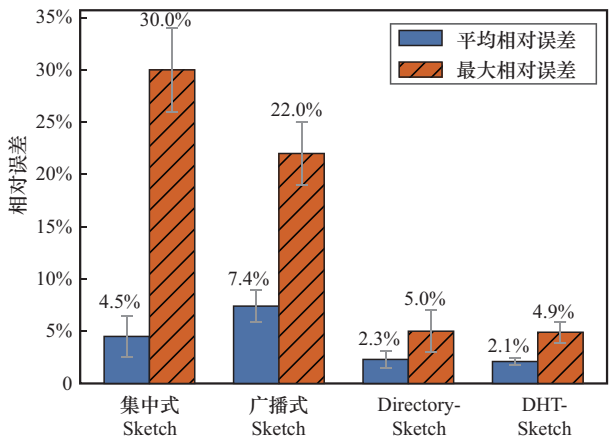


图11　4种测量方案在跨3颗卫星场景下的平均相对误差与最大相对误差

5.5　关键参数

本节选取影响测量系统性能的两个关键参数（大流上报阈值T和CM-Sketch计数器宽度w）进行参数敏感性实验，分析参数最优取值区间。

图12展示了大流上报阈值T对测量结果的影响。T是平衡长流覆盖率与通信开销的核心参数，本文测试了T从10 KB增加到1000 MB时，系统长流覆盖率与总通信开销的变化规律。实验结果表明，当T<100 KB时，随着阈值降低，长流覆盖率缓慢提升，但通信开销呈指数级增长，例如，当T=10 KB时，覆盖率为98.2%，但通信开销达到95 KB/s，大量中等长度流触发轨迹上报，导致星间链路信令开销激增；当T>100 KB时，随着阈值升高，通信开销缓慢降低，但长流覆盖率快速下降，例如，当T=1 000 KB时，通信开销仅为0.3 KB/s，但长流覆盖率降至62.7%，大量跨星长流被过滤，无法完成轨迹追踪与完整统计；当T=100 KB时，系统达到相对最优平衡点，长流覆盖率达到96.7%，同时通信开销控制在2 KB/s以内，兼顾了测量覆盖率与带宽开销。

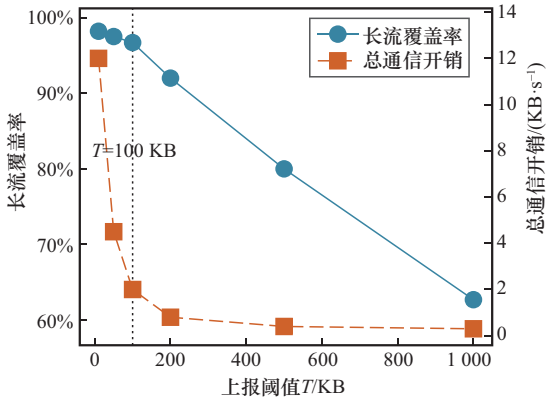


图12　大流上报阈值T对测量结果的影响

图13展示了CM-Sketch计数器宽度w对测量结果的影响。计数器宽度w是平衡测量误差与存储开销的重要参数，本文固定d=4，测试w从512增加到4 096时，测量相对误差与Sketch存储开销的变化规律。实验结果表明，随着w增大，测量误差持续降低，但存储开销呈线性增长。当w=2 048时，平均相对误差控制在2%左右，满足流量测量精度要求，同时单星存储开销仅为32 KB，完全适配星上资源约束；当w>2 048时，误差下降趋势趋于平缓，但存储开销翻倍增长，投入产出比降低。

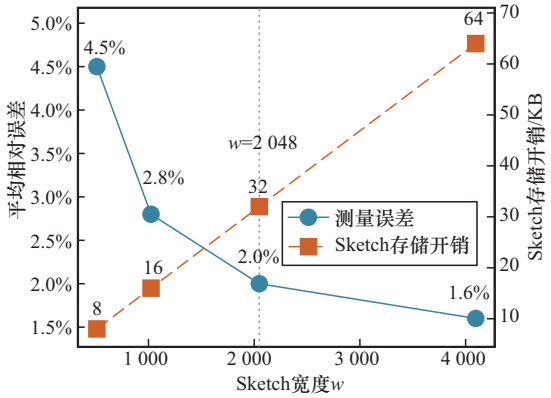


图 13 CM-Sketch 计数器宽度 w 对测量结果的影响

6 结束语

本文针对 LEO 卫星网络中星地切换频繁、跨星长流轨迹难寻、卫星资源受限等挑战，提出了一种星上分布式 Sketch 测量框架。该框架采用卫星数据平面与地面控制平面解耦的设计思路，星上仅保留轻量化测量功能，将复杂计算下沉到地面。在卫星端部署 Sketch 实现流量的本地统计，结合分布式哈希和布隆过滤器实现跨星长流的轨迹记录，解决了流量分散后的寻址定位和统计汇聚难题；在地面控制端进行按需查询与结果聚合，充分利用 Sketch 的线性可加性，实现了分散流量片段的高效汇聚。实验结果表明，本文方案在查询时延、通信开销和测量精度之间达到了较好的平衡，实现了低时延、低开销、高精度的流量测量。

未来工作将围绕以下方向展开：全局 Top-K 大流查询，研究基于 Sketch 合并的分布式 Top-K 算法，实现全网大流排名；自适应参数优化，当前参数配置主要依赖经验规则和周期性调整，未来可结合在线流量预测、强化学习等方法，实现参数自适应配置；异常检测与主动告警，目前方案为地面主动查询，未来可设计卫星的主动告警逻辑，当检测到流量突增等异常时，卫星主动向地面发送告警。

参考文献：

[1] SPACEX. Starlink[EB]. (2024)[2026-05-19].

[2] Eutelsat OneWeb. OneWeb: LEO satellite constellation for global broadband connectivity[EB]. (2024)[2026-05-19].

[3] Westphal C, Han L, Li R. LEO satellite networking relaunched: survey and current research challenges[J]. ITU Journal on Future and Evolving Technologies, 2023, 4(4): 711-744.

[4] Claise B. Cisco Systems NetFlow services export version 9[S]. RFC 3954, IETF, 2004.

[5] Phaal P. InMon Corporation's sFlow: a method for monitoring traffic in switched and routed networks[S]. RFC 3176, IETF, 2001.

[6] Cormode G, Muthukrishnan S. An improved data stream summary: the count-min sketch and its applications[J]. Journal of Algorithms, 2005, 55 (1): 58-75.

[7] Charikar M, Chen K, Farach-Colton M. Finding frequent items in data streams[C]//Proceedings of the 29th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP 2002). Berlin: Springer, 2002: 693-703.

[8] Estan C, Varghese G. New directions in traffic measurement and accounting[J]. ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), 2003, 21 (3): 270-313.

[9] Huang Q, Jin X, Lee P P C, et al. SketchVisor: robust network measurement for software packet processing[C]//Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM Press, 2017: 113-126.

[10] Yang T, Jiang J, Liu P, et al. Elastic sketch: adaptive and fast network-wide measurements[C]//Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM Press, 2018: 561-575.

[11] Cormode G, Muthukrishnan S, Yi K. Algorithms for distributed functional monitoring[J]. ACM Transactions on Algorithms, 2011, 7(2): 1-20.

[12] Woodruff D P, Zhang Q. Tight bounds for distributed functional monitoring[C]//Proceedings of the Forty-Fourth Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York: ACM Press, 2012: 941-960.

[13] Agarwal P K, Cormode G, Huang Z F, et al. Mergeable summaries[J]. ACM Transactions on Database Systems, 2013, 38(4): 1-28.

[14] Pan J P, Zhao J W, Cai L. Measuring the satellite links of a LEO network[C]//Proceedings of the ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2024: 4439-4444.

[15] Mohan N, Ferguson A E, Cech H, et al. A multifaceted look at starlink performance[C]//Proceedings of the ACM Web Conference 2024. New York: ACM Press, 2024: 2723-2734.

[16] Zhang Y, Pan T, Fu Q, et al. In-band network-wide telemetry for topology-varying LEO satellite networks[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2024 - 2024 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2024: 4479-4484.

[17] Zhang Y, Pan T, Zheng Y, et al. Topology-adaptive LEO satellite network telemetry via graph isomorphism and topology partitioning[C]// Proceedings of the 9th Asia-Pacific Workshop on Networking. New York: ACM Press, 2025: 93-99.

[18] Zhang Y H, Hua C Q, Liu L Y, et al. ATS-CP: an adaptive framework for traffic state collection and prediction in software-defined LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2026, 62: 5898-5914.

[19] Liu X Y, Liu G, Tian X C, et al. CountingStars: low-overhead network-wide measurement in LEO mega-constellation networks[PP]. V1. (2025-08-19)[2026-05-19]. arXiv: arXiv.2508.13512.

[20] Wang J F, Li L, Zhou M T. Topological dynamics characterization for LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(1): 43-53.

[21] Zheng G, Wang N, Tafazolli R R. SDN in space: a virtual data-plane addressing scheme for supporting LEO satellite and terrestrial networks integration[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2024, 32(2): 1781-1796.

[22] Chen L, Chou Y C, Wang H Z, et al. TASRI: toward traffic-aware, sustainable and reliable ISL provisioning for LEO satellite constellation networking[C]//Proceedings of the 2024 IEEE/ACM 32nd International Symposium on Quality of Service (IWQoS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.

[23] Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2001 Conference. New York: ACM Press, 2001: 149-160.

[24] Broder A, Mitzenmacher M. Network applications of bloom filters: a survey[J]. Internet Mathematics, 2004, 1(4): 485-509.

[25] Tarkoma S, Rothenberg C E, Lagerspetz E. Theory and practice of bloom filters for distributed systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(1): 131-155.

[26] Karger D, Lehman E, Leighton T, et al. Consistent hashing and random trees: distributed caching protocols for relieving hot spots on the World Wide Web[C]//Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York: ACM Press, 1997: 654-663.

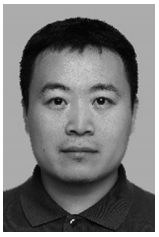
[27] Maymounkov P, Mazières D. Kademlia: a peer-to-peer information system based on the XOR metric[C]//Proceedings of the First International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002). Berlin: Springer, 2002: 53-65.

[28] Analytical Graphics Inc. Systems Tool Kit (STK)[EB]. (2024)[2026-05-19].

[作者简介]



张妍（1994– ），女，紫金山实验室工程师，主要研究方向为低轨卫星网络、云数据中心网络等。



潘恬（1987– ），男，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为云数据中心网络、低轨卫星网络、智算中心网络、高速可编程网络设备等。



郑奘（1988– ），男，紫金山实验室工程师，主要研究方向为低轨卫星网络仿真、网络测量等。



刘江（1983– ），男，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为未来网络体系架构、网络虚拟化、软件定义网络、信息中心网络、网络试验环境构建、卫星互联网等。



黄韬（1980– ），男，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为未来网络体系架构、软件定义网络、确定性网络等。