

LEO 巨型卫星网络端到端路由机制研究

李克军¹, 王 羽¹, 赵思琳^{2,3,4}, 陈星池¹, 文少杰^{2,3,4}, 王 野¹, 李 清¹

(1. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055;
2. 上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 201210;
3. 上海市卫星互联网重点实验室, 上海 201210;
4. 卫星互联网全国重点实验室, 上海 201210)

摘要: 低轨巨型星座构成的卫星通信网络需要解决地面终端之间卫星直连方式的端到端路由问题, 为此, 首先分析了低轨巨型星座的特点, 提出一种基于天地融合网络的移动和切换管理方案, 同时提出一种基于位置导向的智能巨型卫星网络路由算法 LoISR, 解决了天地融合网络端到端的全路径通信问题。所提算法对目标卫星网络进行仿真并采集基准路由数据, 基于该数据训练得到机器学习模型, 再对模型进行裁剪和压缩, 部署到卫星节点, 并通过相关实验验证了所提算法的可行性和效率。

关键词: 卫星网络; 天地融合网络; 路由算法; 机器学习

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2025045

Research on end-to-end routing mechanism for LEO mega-constellation networks

Li Kejun¹, Wang Yu¹, Zhao Silin^{2,3,4}, Chen Xingchi¹, Wen Shaojie^{2,3,4}, Wang Ye¹, Li Qing¹

1. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China
2. Shanghai Satellite Network Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201210, China
3. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201210, China
4. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201210, China

Abstract: Satellite communication networks composed of low earth orbit mega-constellation networks need to solve the end-to-end routing problem between ground terminals through direct satellite connections. To this end, the characteristics of low-orbit mega-constellations are first analyzed, and a mobility and handover management mechanism based on space-ground integrated network is proposed. At the same time, a location-oriented intelligent giant satellite network routing algorithm LoISR is proposed to solve the end-to-end full-path communication problem in space-ground integrated network. The proposed algorithm collects benchmark routing data through simulation of the target satellite network, a machine learning model is trained based on this data, then trims and compresses the model and deploys it to satellite nodes, the feasibility and efficiency of the proposed algorithm are verified through relevant experiments.

Key words: satellite network, space-ground integrated network, routing algorithm, machine learning

0 引言

典型的在建及拟建的低轨巨型卫星网络 (low earth orbit mega-constellation network, LEO-MCN) 包括 SpaceX 的 Starlink 星座、OneWeb 星座、Telesat Lightspeed 网络、Amazon 的 Kuiper 项目^[1-2]。为充分发挥 LEO-MCN 的优势, 卫星网络不仅需要关注本身的建造和空中的互联, 还

需要与地面互联网实现融合以便承载以 IP 技术为主流的各类网络应用, 例如视频、游戏、在线交易、即时通信、物联网等。然而, 受限于卫星网络自身的特点^[3], 在与地面互联网实现端到端融合应用的过程中, 卫星网络需要克服相应的技术问题, 本文研究了 LEO-MCN 与地面网络融合的天地融合网络 (space-ground integrated network, SGIN) 中端到端路由算法设计面临的相关问题^[4], 提出一种适

用于SGIN的移动和切换管理方案以及一种基于位置导向的智能卫星网络路由算法。

(1) LEO-MCN的特点

LEO-MCN规模庞大, 包含从数百颗到数万颗运行在低地球轨道(low earth orbit, LEO)的卫星, 这些卫星通常被规划在一条或多条规则分布的轨道上, 轨道高度在500~1 500 km, 以组成全球通信覆盖的卫星网络。由于LEO-MCN空间段部分的卫星运动具有可预测性和规律性, 因此卫星构成的网络拓扑也呈周期性和规则性。

卫星网络空间段的节点之间通常通过星间链路(inter-satellite link, ISL)互联。以Starlink星座为例, 该星座v1.5之后的每颗卫星都配置了4个激光通信部件^[5]。本文假定所讨论的LEO-MCN中每颗卫星均配置4个激光通信部件: 其中2个与同轨道前后相邻的两颗卫星相连建立ISL, 另外2个与左右相邻轨道的两颗卫星相连建立ISL。同轨道卫星之间的ISL相对稳定, 而异轨道卫星之间的ISL在经过极地区(在极轨道星座场景下)或高纬区(在倾斜轨道星座场景下)时会发生切换, 每个轨道周期内相应的ISL会分别发生两次断链和重新建链, 导致卫星网络拓扑呈现高动态性^[3]。为统一叙述, 下文将高纬区和极地区统一称为高纬临界区(critical region, CR)^[6], 当卫星进入CR时, 卫星的轨道面间ISL将断开; 当卫星离开CR时, 卫星的轨道面间ISL重新建链。此外, 随着MCN规模的增大, 地面用户能够同时“看到”多颗卫星并与之建立连接, 且可以与建链条件最好的那颗卫星建立连接, 地面终端与卫星之间的链路具有随机性和不可预测性, 这也给MCN空间段卫星网络最后一跳的路由和寻址带来挑战^[7]。

(2) MCN星座构型及星间链路

为了在实现全球覆盖的同时更高效地利用卫星资源,

LEO-MCN通常同时规划部署多个低倾角分布的Walker星座。Walker星座可由星座构型参数 $\alpha:N \times M/N/F$ 表示, 其中 α 为轨道倾角, $N \times M$ 为星座的卫星总数, N 为星座内等间距间隔的轨道面数, M 为每个轨道面内等间距分布的卫星数, F 为相位因子。本文同时对极轨道和倾斜轨道两种构型的星座展开研究, 所提路由算法适用于这两种类型的星座, 且使用相同的星座构型参数描述这两种类型的星座。对于Walker Delta和Walker Star星座, N 个轨道面之间的相位角分别均匀间隔 $2\pi/N$ 和 π/N 。

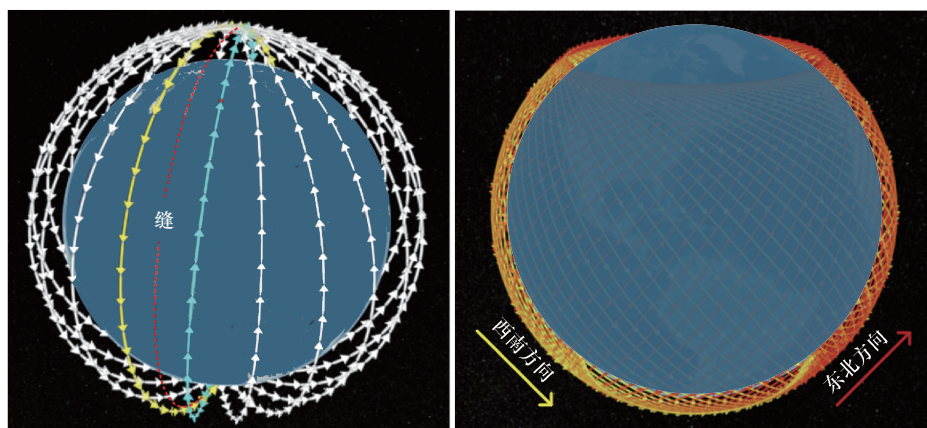
一个星座内所有卫星集合可表示为 $S = (s_{n,m})$, 其中 $n=0,1,\dots,N-1$ 为卫星所在轨道面(orbital plane, OP)编号, $m=0,1,\dots,M-1$ 为卫星在轨道面内的编号, 卫星集合另外表示为 $S = (s_i)$, 其中 $i=0,1,\dots,N \times M-1$ 。每颗卫星可分别与同轨道前后相邻的两颗卫星以及左右相邻轨道的两颗卫星建立共4条ISL, 本文默认ISL均为激光通信链路。同轨道面内的ISL称为轨道面内ISL, 异轨道面之间的ISL称为轨道面间ISL^[3]。

图1给出了极轨道星间链路的缝以及倾斜轨道星间链路构成的升轨面和降轨面^[8], 其中图1(a)模拟OneWeb星座实际构型, 展示了极轨道星座各轨道面间的缝, 图1(b)模拟Starlink星座第一期壳层1实际构型, 展示了倾斜轨道星座中不同运行方向的卫星构成的两个通信面, 图中红色区域为升轨面, 黄色区域为降轨面。

1 相关工作

1.1 虚拟拓扑路由机制

虚拟拓扑法利用卫星运动及卫星网络具有的周期性和可预测性, 将连续的时间域划分为离散的时间片/快照



(a) OneWeb星座 (86.4°:12×50/12/0)

(b) Starlink星座第一期壳层1 (53.0°:72×18/72/45)

图1 极轨道星间链路的缝以及倾斜轨道星间链路构成的升轨面和降轨面

$[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$, 网络拓扑仅在时刻 $t_0, t_1, t_2, \dots$ 发生变化, 在每个快照周期内卫星网络拓扑可视为静态拓扑, 基于该静态拓扑可预先执行源卫星和目的卫星之间的路径计算, 并将直接将计算结果作为路由表在星上存储, 由此屏蔽了卫星网络拓扑的动态性。

文献[9]针对极轨道星座场景首次提出虚拟拓扑法, 针对异步传输模式 (asynchronous transfer mode, ATM) 协议场景, 基于每个时间片内的静态拓扑, 为所有通信双方提前计算好通信路径。文献[10]将 LEO 星座拓扑进行形式化描述, 并同时针对倾斜轨道和极轨道星座进行静态虚拟拓扑分析。文献[11]基于虚拟拓扑法, 利用软件定义网络 (software defined network, SDN) 技术以及多层混合星座, 将 LEO 星座视为 SDN 的数据面, 将更高层的卫星星座作为控制面, 结合深度优先搜索 (depth-first-search, DFS) 和 Dijkstra 算法根据实时的网络信息执行计算和控制, 克服了虚拟拓扑法的部分缺陷。

虚拟拓扑法中静态拓扑的持续时间 (即快照长度) 与每个轨道面内的卫星数量以及星座的总卫星数量呈反比^[10], 仅适用于卫星数量较少的星座, 不适用于 MCN 星座。

1.2 虚拟节点法路由机制

虚拟节点法将地球表面划分为若干规则的小区, 每个小区被赋予一个虚拟 ID, 称为虚拟节点 (virtual node, VN), 当卫星运动到指定 VN 上空并为该 VN 服务时, 将通过虚拟 ID 与该 VN 关联并绑定。由此, 卫星的运动不会影响由 VN 构成的网络拓扑, 卫星网络的路由算法可基于由多个 VN 构成的静态拓扑计算。

文献[12]针对 ATM 协议应用场景首次提出了虚拟节点法, 其中卫星与 VN 一一对应, 一个 VN 内的所有小区及其用户需要在不同卫星之间完成同步切换。文献[13]以规则的极轨道星座为例, 进一步对其形式化并提出了经典的直径路由代理 (diameter routing agent, DRA) 算法。文献[14]针对多颗卫星可能同时覆盖一个 VN 并为其提供服务的情形, 提供了一种多状态虚拟网络 (multi-state virtual network, MSVN) 架构, 并重点分析了在不同天线模式下用户终端在不同 VN 之间切换的问题。文献[15]基于天球划分虚拟区域, 消除了地球自转对 VN 与卫星一一对应关系的影响。

虚拟节点法通常要求卫星天线支持地球固定足印模式, 即卫星天线需要始终对准当前服务的 VN, 并随着卫星的运动调整天线的对地覆盖情况。此外, 上述基于虚拟节点法的路由算法都是基于极轨道星座分析和设计的。

对于倾斜轨道星座, 由于卫星的运动特性, 在高纬临界区难以进行合理的 VN 划分和管理。地球自转造成的地面与卫星之间相对位置的变化将增加卫星切换的复杂性。此外, 倾斜轨道同时存在两个不同运动方向的通信面: 一个是卫星向北方运动的升轨面, 另一个是卫星向南方运动的降轨面, 由此大大增加了应用虚拟节点法的难度。

1.3 地理位置或方位路由机制

卫星网络的一个特征是卫星可以感知地理位置信息, 卫星网络作为宽带业务的承载网络, 其通信和路由的实质是将来自地面某个位置的分组报文转发并下行至地面的另一个位置, 由此衍生出了基于地理位置或方位的路由方式, 即尽力将分组报文朝向目的地的位置和方位/方向进行转发。

文献[16]提出了一种朴素的基于地理位置和方位的路由算法, 当前节点所拥有的信息包括目的地位置、当前位置、当前节点邻居及位置。当分组到达节点 v 时, 设邻居为 u , 目的地为 t , 选择角度 $\angle vut$ 最小的邻居转发 (邻居 u 可能有多个)。文献[17]针对无线自组织网络提出贪婪周边无状态路由 (greedy perimeter stateless routing, GPSR) 算法, 当前路由节点选择距离目的地物理距离最近的邻居进行转发, 当没有符合条件的邻居时, 则通过右手原则在由节点构成的平面图上探测转发边界并沿边界朝向目的地转发。文献[18]针对极轨道星座, 每个节点计算自己以及所有邻居与目的地之间的空间距离, 选择距离目的地最近的邻居进行转发, 当分组抵达目的地附近时, 则使用最短路径算法进行有限范围 (如 2 跳) 内的洪泛, 以确保分组能够抵达用户的接入卫星节点。文献[7]针对天地融合应用场景, 将地面区域编码并与 IP 地址关联, 路由节点根据分组中的 IP 地址确定目的地位置, 然后基于节点自身位置、节点邻居位置, 以及目的地位置确定转发端口。文献[19]针对卫星网络支持高可靠、低时延服务场景, 提出定向渗透路由算法, 该算法下的分组向所有靠近目标节点的邻居转发, 定向泛洪, 以带宽换取可靠性和时延, 实现最低时延。

在虚拟拓扑法和虚拟节点法中, 路由均是基于实际的卫星节点计算的, 卫星只是在虚拟节点法中需要与 VN 动态绑定, 此两类算法不存在最后一跳是否可达的问题, 所提算法均默认分组抵达目的卫星节点即是地面终端的接入卫星。在基于地理位置的路由算法中, 分组的目的地可能被多颗卫星同时覆盖, 路由算法需要保证最后一跳可达。文献[7]的算法考虑了相关设计, 但算法仅针对极轨道星座, 文献[19]未提及最后一跳的可达性, 算法在

Starlink 倾斜轨道场景下进行验证,但没有考虑倾斜轨道两个不同方向的通信面。

2 巨型卫星网络端到端传输架构设计

SGIN 包括卫星网络(如 LEO-MCN)和地面网络,卫星网络包括以 ISL 互连的卫星组成的空间段以及由一定数量的信关站组成的地面段。此外,卫星网络还包括大量的用户终端。LEO-MCN 的用户终端包括固定位置的用户终端和移动用户终端:固定位置的用户终端包括个人电脑、笔记本电脑、平板电脑等设备;移动用户终端包括移动宽带手机、飞机、船舶、移动车辆等,所有用户终端都需要通过运营商的卫星终端设备注册并接入卫星网络。通常来说,卫星地面站提供地面与卫星之间的信号转换、发射与接收等功能;卫星信关站除提供地面站的基本功能外,还提供在用户终端和卫星网络之间接收、封装和转发基于 IP 的应用数据以及其他网络管理功能。本文中,为简化表述,“地面站”与“信关站”不作严格区分,二者泛指同一类具备上述功能的卫星网络地面设施。此外,本文假定用户终端都有一个与之关联的注册信关站,在弯管模式下,用户终端与注册信关站需保持在同一颗卫星的通信覆盖范围内,不通过 ISL 通信。

2.1 SGIN 的端到端通信架构

天地融合网络端到端宽带应用场景如图2所示。MCN 的端到端通信包括两类:一类是卫星网络的用户终端之间

通过卫星网络直接通信(如图2中的红色虚线所示),不借助地面网络;另一类是卫星网络的用户终端通过卫星网络访问地面网络的应用及其终端(如图2中的蓝色点划线所示)。图2中蓝色点划线所示的通信为非弯管模式,卫星用户对地面网络的访问经由了 ISL,且图2中的信关站即为用户的注册信关站。卫星网络的发展趋势是适应 IP 技术在地面网络中的应用现状,即卫星网络 IP 化和宽带化的趋势。为此,卫星网络系统需拥有并维护一组 IP 地址,这些 IP 地址首先需要支持包括信关站在内的所有卫星网络终端的内部通信(内部 IP 地址),也需要与地面互联网通信(外部 IP 地址),信关站为卫星网络内部和外部 IP 地址之间提供网络地址转换服务。

地面网络中 IP 及相关协议的应用以地面网络拓扑相对稳定为前提,卫星运动导致卫星网络及其拓扑具有高度动态性,因此 IP 及其相关路由和传输协议无法直接应用于卫星网络^[20-21]。用户终端在初始注册时,将被分配一个卫星网络内部 IP 地址,并指定一个为该用户终端提供注册和接入服务的注册信关站。由于卫星的高速运动,每颗 LEO 卫星服务地面终端用户的时间仅能维持数分钟,终端用户需要在不同的卫星之间频繁切换,由此触发终端 IP 地址与卫星之间的重新绑定和更新。考虑到 LEO-MCN 的规模趋势以及终端用户的规模(Starlink 的用户终端已达 500 万个^[5]),在卫星网络全网广播的方式交换并更新终端用户当前的接入信息,使得全网卫星节点同步掌握

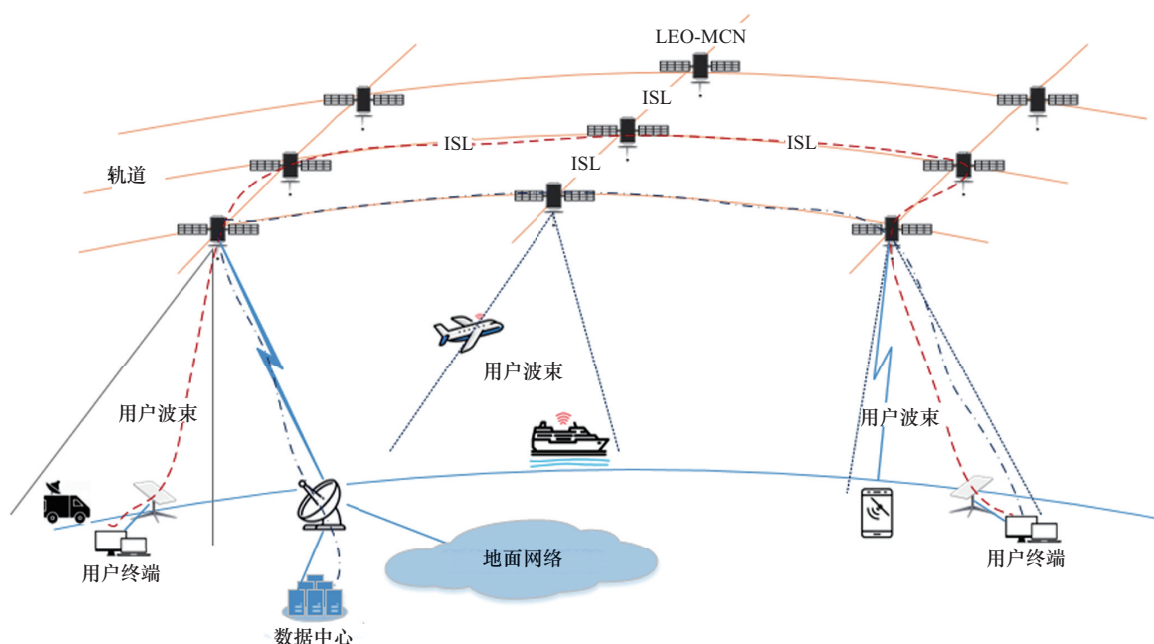
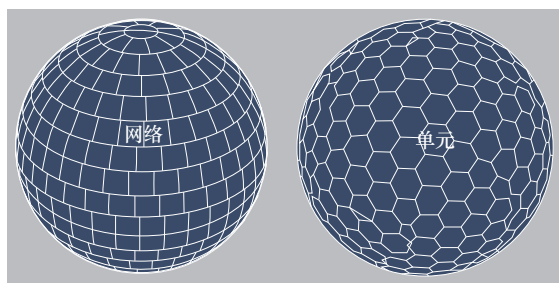


图2 天地融合网络端到端宽带应用场景

所有用户IP与卫星之间的映射关系,这对于协议带宽开销和星上计算及存储资源的占用都是不合理的。

如前所述,为屏蔽LEO-MCN的动态性,常用方法包括虚拟拓扑法^[9-11]和虚拟节点法^[12-15]。在虚拟节点法中,地球表面被划分为互不重叠的单元或网格区域,地面区域划分示意如图3所示。区域的划分可以是不规则的,例如基于卫星网络运营商的管理需求划分,采用这种方式划分的区域数量是可控且可管理的,系统可为每个区域分配一个逻辑标识(r_id),卫星运行到指定区域上空并服务于该区域时,便与该区域建立映射关系,随着卫星的运动,卫星在不同的区域之间切换,实时更新其与地面的映射关系并维护一个正提供服务的地面逻辑区域列表,逻辑区域及其拓扑本身不会变化,保持稳定。这种区域划分方式不仅能够屏蔽卫星网络拓扑的动态性,而且能够提供终端用户IP地址与逻辑区域之间的稳定映射,进而便于运营商对卫星网络IP地址进行统一分配及管理。即,运营商将所有卫星网络相关的IP地址与逻辑区域建立映射表,每个IP地址与一个区域关联,则网络设备均能够通过查表得到与IP地址对应的区域及其位置,例如以经度和纬度表示的位置信息,在此映射机制下,基于地理位置的路由及寻址就自然产生了。



(a) 类矩形网格

(b) 蜂窝网格

图3 地面区域划分示意

在实际通信过程中,对于图2所示用户终端之间通过卫星网络直接通信的情形,终端应用可通过查表确定IP分组中源地址和目的地址对应的区域标识及其对应的物理位置信息;对于用户终端通过卫星网络访问地面网络的应用及其终端(其IP地址不在运营商内部IP地址映射表内),则通过用户终端的注册信关站IP查表获取相关

信息。然后,卫星网络的终端设备(包括用户终端和信关站)将向卫星网络传送的IP分组封装为卫星网络的协议数据单元(protocol data unit, PDU),将IP地址对应的区域标识和物理位置信息编码到PDU中,接入卫星可依据PDU中的区域标识和物理位置信息进行路由封装。卫星网络PDU帧格式如图4所示。其中,各字段含义如下: s_r_id 为发送端所在区域标识; s_ip 为发送端源IP地址; d_r_id 为接收端所在区域标识; d_ip 为接收端目的IP地址; d_lon 与 d_lat 分别表示接收端的经纬度信息;FCS为分组报文帧校验序列。

2.2 区域划分策略

在地面互联网和移动互联网中,为支撑网络运维,运营商通常对网络进行区域划分,本文认为,区域划分策略同样适用于旨在为全球用户提供宽带接入服务的LEO-MCN运营商以实施网络运维和管理。为此,地球表面将由运营商划分为管理区域(region),依据运营商的管理需求,区域划分可以是规则或不规则的,区域划分表示为 $Earth_surface = R = \{region_1, region_2, \dots, region_n\}$,简记为 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。

区域划分满足条件:任意两个区域之间均没有交叉或重叠,记为 $\forall r_i, r_j \in R, r_i \cap r_j = \emptyset$,其中 $i \neq j$ 。

每个区域有一个全网唯一的区域标识(r_id),并关联一个地理位置信息,本文将地理位置信息表述为经纬度,一个区域的示意性定义为 $Region = \{r_id, \langle lon, lat \rangle, \dots\}$,其中, r_id 为区域标识, $\langle lon, lat \rangle$ 为以经纬度表示的区域地理位置信息,该经纬度值为指定区域的代表性位置,例如区域的关键地点或中心点等,该位置信息将用于后续路由算法。

卫星网络的每个用户终端和信关站均被分配至少一个运营商内部IP地址,例如IPv6地址。信关站还被分配与地面互联网通信的天地融合网络的全局IP地址,每个用户终端(IP地址)与一个注册信关站绑定,用户终端与地面网络的通信都通过用户的注册信关站完成。卫星网络的每个内部IP地址与一个区域绑定 $\langle ip, r_id \rangle$,逻辑上归属于该区域,故每个区域都维护一个与之关联的IP地址列表,该列表中的每个地址对应一个用户终端或信关站。通过运营商的管理数据库,卫星网络中的节点可

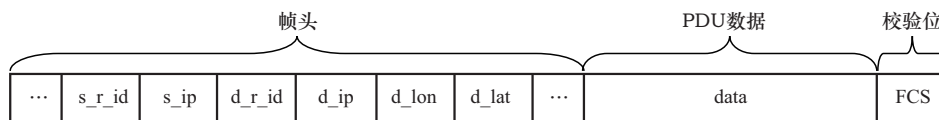


图4 卫星网络PDU帧格式

根据需求由IP地址查询得到与该IP地址对应的区域,并由此获得该区域的地理位置信息。

对于位置相对固定的卫星用户终端,例如固定建筑内的用户终端,终端内部IP地址与区域的绑定关系相对稳定;而对于诸如飞机、船舶、移动车辆等的移动用户终端,当这些移动用户终端跨区域时,与地面移动网络类似,卫星网络需要实现用户在不同区域之间的绑定切换并实现全网的更新与同步。例如,可通过移动终端GPS定位信息,主动或被动追踪移动用户终端的位置信息,当确定用户终端移动至新区域时,则进行用户终端与区域的绑定更新。与地面移动网络终端与基站之间的切换不同,卫星网络用户终端的这种跨区域移动并不一定会导致与卫星之间的通信中断或切换,终端在不同区域之间移动切换时,有可能是同一颗卫星在持续提供接入及宽带通信服务,本文定义的区域切换和绑定是一种宽松的绑定关系,逻辑区域与卫星通信覆盖关系如图5所示。

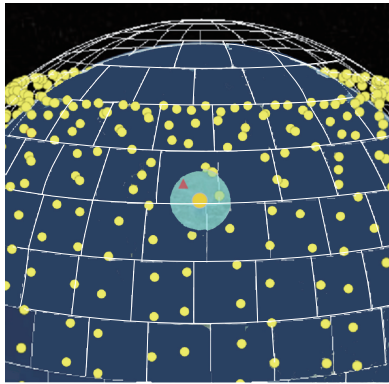


图5 逻辑区域与卫星通信覆盖关系

(注:区域大小为1 000 km×1 000 km, Starlink星座(第一期亮层1),卫星覆盖范围直径为1 000 km,同一区域可被多颗卫星覆盖,单颗卫星的通信可覆盖多个区域。)

与现有方案^[12-15]中对虚拟节点(及其对应区域)的划分不同,本文在此提出的区域划分与卫星天线的工作模式、覆盖范围等无关。区域是运营商运维范畴的逻辑划分,图5中红色三角表示卫星用户终端,黄点表示卫星,青色圆圈表示卫星的对地覆盖范围。由图5可以看出,一个区域可同时被多颗卫星覆盖,一颗卫星也可同时覆盖多个区域,卫星与区域之间没有强制的耦合或映射关系。用户终端通过信号同步、测距方式选择最优接入卫星后,再进行注册以及身份验证,然后与卫星建立链接,该卫星随即将用户加入其当前正服务用户列表(list of serving user, LSU) $\langle ip_1, ip_2, \dots, ip_n \rangle$,并根据用户

的IP地址查表得到对应的区域标识,生成并维护一个当前正服务区域列表(list of serving region, LSR) $\langle r_1, r_2, \dots, r_m \rangle$,卫星将结合LSR信息完成SGIN端到端通信最后一跳的分组转发决策。当用户在不同的卫星之间切换时,除常规的用户状态切换外,卫星可根据需要实时更新其LSU和LSR。

LSR除在用户接入卫星和与卫星断链时需要更新维护外,卫星节点需要根据自己当前的运行位置进行更新维护,LSR须涵盖卫星通信覆盖范围内的所有地面区域,当地面区域进入/移出卫星的通信覆盖范围时,卫星节点需要从LSR中添加/删除相应的区域以及LSU中的相关用户信息。

2.3 移动和切换管理策略

本文针对天地网络端到端通信的移动和切换管理主要涉及两个部分:一是终端用户在区域之间的移动和切换,二是终端用户在卫星之间的切换。

(1) 终端用户在区域之间的移动和切换

如算法1所示,用户首次注册卫星网络运营商时,将被赋予一个区域标识,用于识别用户的注册区域(register region),用户终端的注册区域与其注册信关站所属区域可以不同。前面提到,运营商为管理方便将地球编码划分为互不重叠的管理区域,管理区域可以与用户注册地域关联,也可以不关联,终端用户在区域之间的移动和切换仅涉及管理区域。在通信过程中,每个用户与一个管理区域关联 $\langle u_id, r_id \rangle$,运营商可通过GPS定位信息主动或被动追踪移动用户终端,当用户终端从一个区域移动到另一个区域时,需要及时更新用户本地的关联信息 $\langle u_id, r_id \rangle$,并及时更新运营商的管理数据库,以便同时更新用户IP地址与当前区域的映射关系 $\langle u_id, u_ip, r_id \rangle$ 。在本文中,以用户IP地址表示用户ID,即 $u_id = u_ip$ 。

算法1: 终端用户在区域之间的移动和切换算法

输入: 用户当前关联区域 r_curr , 用户当前位置 pos , 当前位置所属区域 r_pos

输出: 更新用户和区域间的映射关系

```

1. begin
2.      $r\_curr \leftarrow \langle u\_id, r\_id \rangle$ 
3.     if  $pos \notin r\_curr$  then
4.          $\langle u\_id, r\_id \rangle \leftarrow \langle r\_pos \rangle$ 
5.          $\langle u\_id, u\_ip, r\_id \rangle \leftarrow \langle u\_ip, r\_pos \rangle$ 
6.     end if
7. end

```

(2) 终端用户在卫星之间的切换

如算法2所示, 卫星节点根据卫星的实时接入状态维护LSU和LSR, 当出现新的用户接入或现有接入用户断链的情况时, 卫星节点会在本地及时更新和维护LSU和LSR。

算法2: 终端用户在卫星之间的切换算法

输入: 卫星节点 S , 用户终端 u_id , 区域 r_id

输出: LSU和LSR

```

1. begin
2.     Status  $\leftarrow$  CheckStatus( $S, u\_id$ )
3.     if Status == connect then
4.         LSU.append( $u\_id$ ), LSR.append( $r\_id$ )
5.     else LSU.remove( $u\_id$ ), LSR.remove( $r\_id$ )
6.     end if
7. end

```

2.4 邻居间通告策略

如前所述, 根据本文所提出的端到端路由方案, 卫星节点需要本地维护LSU和LSR, 且随着用户的移动和用户在卫星之间的切换, 卫星节点需实时更新本地的LSU和LSR。

为高效解决天地一体化融合网络场景中端到端最后一跳的问题, 本文提出一种在邻居卫星节点之间通告LSU的机制, 卫星节点根据通告信息在本地维护一张邻近服务用户列表 (list of adjacent serving user, LASU) $\langle u_ip, r_id, ef \rangle$, 其中字段“ef”为出端口号。LASU维护有邻近节点且与该节点共有服务区域的正服务用户信息。

LSU的通告范围 (跳数) 根据管理区域的划分而定, 管理区域确定后, 可确定管理区域的最大直径, 假设为 D ; LEO星座规划确定后, 可确定卫星覆盖地面的半径为 R 、同轨邻居卫星最小间距为 L_co 、异轨邻居卫星最小间距为 L_hetero , 则选择 $L = \min(L_co, L_hetero)$, LSU通告跳数可确定为 $\text{CEIL}((D+R)/L)$, 其中CEIL代表向上取整。即, 相互通告的邻居所叠加的地面覆盖区域不小于最大管理区域, 这一限制是为了确保最后一跳的分组被路由转发到目的地地面终端。卫星节点定期向自己的直接邻居通告本节点维护的LSU以及LASU信息, 并在通告信息中设置相应跳数。

节点接收到来自邻居的通告信息 $\langle u_ip, r_id \rangle$ 后, 依次处理每一条通告信息。具体来说, 节点首先校验该通告信息中的区域标识 r_id 是否存在于本地LSR内: 若不存在, 则判定该区域不在服务范围内并终止处理; 若存在, 则

立即更新本地LASU同时记录对应端口信息。随后检查通告跳数, 若跳数值大于1则执行跳数减1操作, 并将更新后的通告信息通过除接收该通告的原始端口外的所有相邻节点进行转发。邻居通告信息逻辑如图6所示。

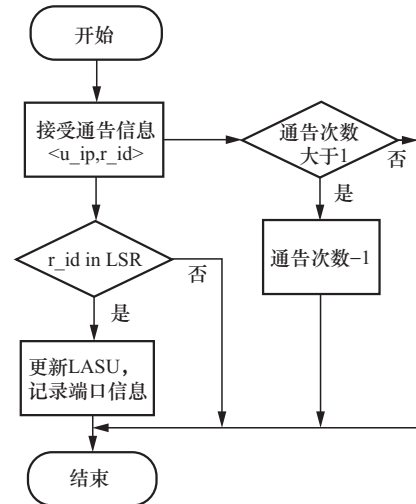


图6 邻居通告信息逻辑

对通告信息的处理不会影响节点本地的LSU, 只会更新节点的LASU。由于通告机制约束节点仅通告和处理与本节点共享服务区域的相关信息, 因此避免了信息洪泛。当卫星在不同区域之间切换时, 需要在更新LSR的同时更新 (清除) LASU中对应的接入用户信息。

2.5 最后一跳的问题

在基于虚拟拓扑法^[9-11]和基于虚拟节点法^[12-15]的算法中, 路由算法默认的源地址和目的地址均为卫星节点, 而非地面终端用户, 算法默认分组被路由转发到目的节点 (卫星) 后即抵达目的终端用户, 这种假设仅适用于不存在两个运行方向相反的通信面的极轨道星座的缝两侧, 且卫星节点与地面逻辑区域是一一对应的情形 (地球固定足印模式)。在基于地理位置或方位的路由算法中^[7,16-19], 由于其并没有假设地理位置与卫星节点的映射关系, 因此分组在抵达目的地附近时, 需要通过有限洪泛以确保分组能够被转发到终端用户的接入卫星, 也没有考虑到倾斜轨道终端用户可能随机接入两个运行方向不同的通信面的情形。

一方面, 随着LEO-MCN规模的增大, 卫星对地覆盖能力越来越强, 同一地面区域可能有多颗卫星同时提供接入服务, 例如Starlink星座^[22]; 另一方面, 随着天线技术的发展以及多波束天线和相控阵技术的应用, 卫星和地面终端用户均可灵活自由地选择建立更有效的通信链

路。在天地融合场景中，在没有特别机制设计的情况下，如果通信目的端为卫星终端用户，通信源端并不能提前预测通信目的端当前接入的卫星。

综合本节提出的SGIN融合通信端到端解决方案中的区域划分、移动和切换管理、基于区域的卫星节点间邻居通告等技术，可解决MCN高动态场景下用户最后一跳的可达性问题。

卫星网络空间段转发的PDU分组包含目的地位置信息，且网络中所有的位置信息都与特定的区域关联。接收到分组后，卫星网络节点的分组处理逻辑如图7所示：当卫星网络节点接收到包含目的地位置信息的PDU分组时，首先根据目的IP地址查询本地LSU，若存在匹配项则直接将该分组转发至对应终端完成路由；若未匹配则进一步校验目的地位置信息关联的区域标识是否存在于本节点LSR中——若不存在，表明当前分组尚未进入最后一跳服务范围，按决策树路由规则进行转发；若存在，则检查目的IP地址是否记录于本节点LASU内，进一步地，若存在则通过LASU指定的端口转发分组，若不存在则判定目的终端处于其他卫星通信面，并将分组路由至对应通信面完成跨面传输。

3 基于位置导向的智能巨型卫星网络路由算法

地面互联网的路由算法主要基于相对静态的网络拓扑及配置信息决定路由决策，例如开放最短路径优先（open shortest path first, OSPF）和边界网关协议（border gateway protocol, BGP），这些协议算法通常难以适应SGIN的高动态性^[20-21]。由前面的介绍可知，MCN具有卫星轨道运动规律、网络连接稳定和拓扑规则等特性，且卫星（路由节点）可以实时感知地面位置信息。基于这些特点并结合第

2节提出的移动和切换管理方案，本文提出一种基于位置导向的智能巨型卫星网络路由（location-oriented intelligent satellite network routing, LoISR）算法。

总体而言，LoISR算法基于MCN的规则性和规律性，通过离线机器学习得到全网基于地理位置的最优路由并直接应用于节点的路由决策，结合第2节SGIN端到端场景中提出的区域划分、移动和切换管理、邻居间通告以及最后一跳问题的相关方法和技术，LoISR算法提供了一种适合LEO-MCN的端到端的线速路由转发机制。

以Starlink第一期壳层4星座作为参考星座进行算法的演示和验证，该星座轨道高度540 km，为典型的Walker Delta星座，星座构型参数为：53.2°: 72×18/72/45。

3.1 路由机制整体概述

参考前述关于ISL的分析，MCN中的每个卫星节点均配置同轨道前后及异轨道左右4条ISL，相对位置的“前后”和“左右”均可参考卫星的运动方向设定。节点的路由决策过程即选择4条ISL的其中一条进行转发的过程，此逻辑与机器学习中的分类算法契合。基于机器学习模型的路由算法主要分为两个部分：机器学习和分组转发。其中机器学习部分对应传统网络中的控制面，控制面的计算基于离线采集的经典路由协议数据，通过相关学习算法生成路由决策模型；分组转发部分则对应传统网络的转发面，其根据路由决策模型线速推理决策分组转发的下一跳方向，并完成端到端的分组转发。

LoISR算法的机器学习部分包括基于地理位置的路由决策数据采集、模型选择和训练以及模型部署适配3个步骤。

在LEO-MCN中，卫星的运行状态和相对位置是动态

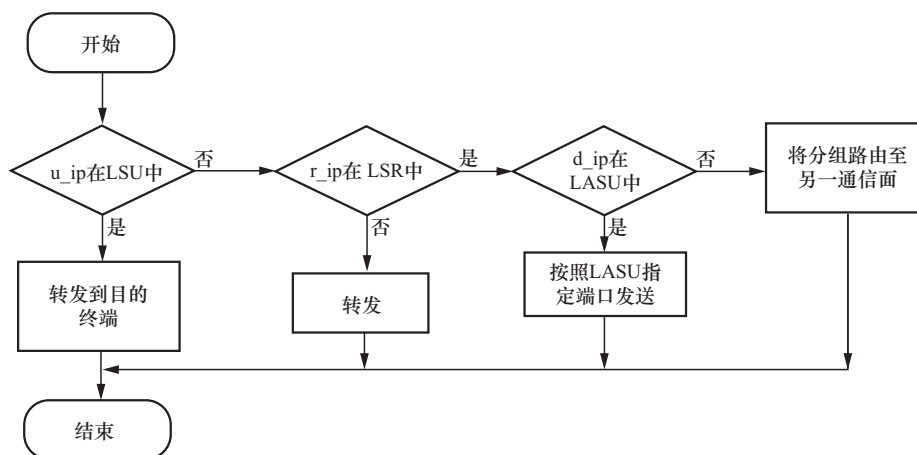


图7 卫星网络节点的分组处理逻辑

变化的,需要在动态拓扑的精准模拟基础上仿真运行相应的路由协议,以模拟实际数据传输过程。在此过程中,系统记录所有卫星节点(源节点)针对其他所有目的卫星(目的节点)的路由决策结果,并进行相应的转发端口标记,最终将结果作为机器学习的输入数据。

获得输入数据后,算法对其进行分析、训练,使其自主学习并输出路由决策模型,基于该决策模型的转发是一种智能路由决策,其基于仿真路由决策数据确定实际网络的最优转发路径。机器学习算法根据数据的特征和行为对分组进行下一跳路由决策指导,实现路由的智能化和自适应。

决策模型最终被转化成适合路由器部署的 **match-action (M&A)** 模式,即按顺序执行匹配条件后的动作,部署到路由设备(即卫星节点)上,由此实现智能决策,使得 **LEO-MCN** 能够适应高动态特性。此外,随着卫星网络规模的增大, **M&A** 条目将突破现有路由交换设备的资源限制,本文针对这一可能的限制提供多种路由决策树压缩算法,以减少决策条目数量,适配路由器的硬件资源。

机器学习部分是 **LoISR** 算法的关键组成部分,通过学习、分析数据构建决策模型,确保卫星网络的路由决策的智能、自适应和高效。这种智能化的路由决策机制能够应对 **LEO-MCN** 中卫星位置、用户需求等动态变化的复杂情况,以提高网络性能。通过将机器学习与传统路由协议相结合,本文所提算法对于提升 **LEO-MCN** 的性能和实用性具有积极效果(尤其是在大规模卫星星座的场景下), **LoISR** 路由协议架构如图8所示。

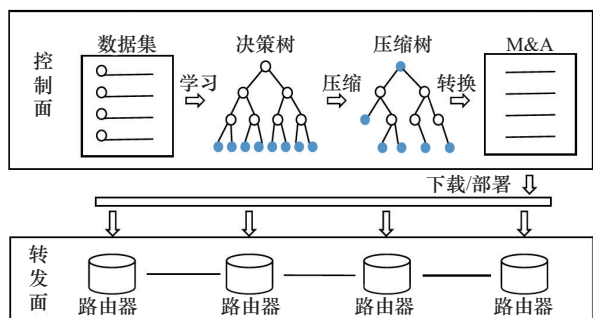


图8 LoISR路由协议架构

3.2 数据集获取

在卫星通信系统的设计和实际运行中,轨道预测是至关重要的一环。在仿真阶段和实际部署应用中,可以借助 **SGP4** 模型^[23]对卫星在特定时刻的位置进行高度准确的预测。一旦确定各颗卫星的位置,就可以通过简单的

几何计算得出卫星与邻居卫星之间的距离。该距离信息是路由算法的关键输入,因为在卫星网络中的信号传输时间和路径选择直接依赖于该距离,并最终影响网络的性能和稳定性。

在地面网络中, **OSPF** 是一种常用的动态路由选择协议。由于卫星网络拓扑的同构性,默认所有 **ISL** 配置相同,因此可以利用 **OSPF** 协议通过最短路径衡量通信开销从而衡量路由效率,作为路由算法的比较基准。由此,通过在仿真系统模拟的卫星网络的各个卫星节点上模拟运行 **OSPF** 路由算法,将获得的每颗卫星到网络中其他任意卫星的最短路径和下一跳端口的选择作为数据集,再通过机器学习技术,能够在实际网络中参考执行路由策略,确保路由路径最优。

仿真拓扑基于目标星座的真实两行轨道根数 (**two-line element, TLE**) 参数构建,数据集特征主要包括源卫星和目的卫星的地理位置信息(经度、纬度),以及参考路由算法 **OSPF** 协议的路由选择结果。此外,参考前述对卫星运动特点的分析,以倾斜轨道为例,构成星座拓扑的卫星可分为两部分,形成两个通信面(即升轨面和降轨面),位于两个通信面的卫星只能通过高纬同轨卫星之间的链路实现切换,因此数据集还需包括预设的源卫星和目的卫星所在的通信面。

本文所提出的 **LoISR** 算法,数据集的最终特征包括以下内容。

- **s_surf**: 源卫星所在的通信面,即升轨面或降轨面。
- **s_lon**: 源卫星所处的经度,即所在逻辑区域在东西方向的编码。
- **s_lat**: 源卫星所处的纬度,即所在逻辑区域在南北方向的编码。
- **d_surf**: 目的卫星所在的通信面,即升轨面或降轨面。
- **d_lon**: 目的卫星所处的经度,即所在逻辑区域在东西方向的编码。
- **d_lat**: 目的卫星所处的纬度,即所在逻辑区域在南北方向的编码。
- **nexthop**: **OSPF** 路由算法通过对全网拓扑的计算,获得源卫星路由到目的卫星的下一跳端口选择,将其作为机器学习的输出分类标签。

3.3 区域的划定

根据第2.1节的设计,在进行路由之前需要将地球表面划分为多个管理区域,以便进行用户管理、路由优化

等处理工作。由于按经纬度划分可以精确定位地球上的任何一个点,方便进行各种地理数据的分析,因此在算法实例中按照经纬度颗粒划分区域,不同的经纬度颗粒代表不同的区域大小。

根据第2.2节的设计,每个区域与一个地理位置信息关联,即由经纬度进行编码/表示。以OSPF协议输出的路由路径为基准,若新路由算法的输出和OSPF路径相同,则认为路径匹配,否则认为路径不匹配,最终匹配的路径总数和所有路径总数的比率即为路由精度。根据区域经纬度进行路由决策,区域划分的大小将影响路由精度,区域划分越小,学习得到的模型越大,模型路由的精度也越高;反之则相反。通过对各种区域大小划分的实验,得到各区域大小下路由精度对比如图9所示,其中横轴为区域大小,纵轴为与OSPF协议比较的路由精度。各区域大小下模型大小对比如图10所示,其中纵轴表示模型大小,数值为对应决策树叶节点的数量。

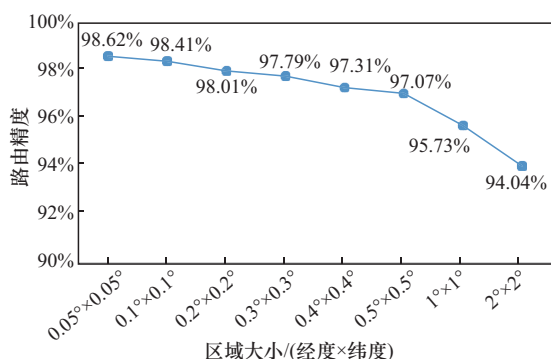


图9 各区域大小下路由精度对比

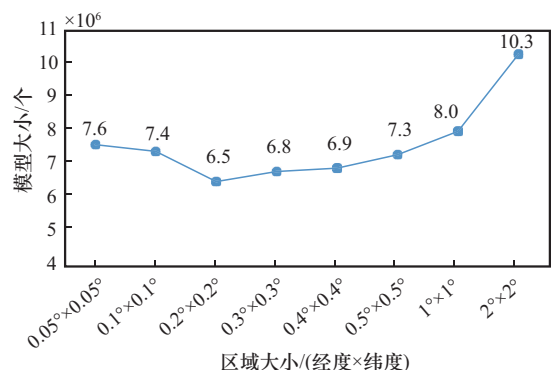


图10 各区域大小下模型大小对比

实验中取“经度×纬度”值分别为0.05°×0.05°、0.1°×0.1°、0.2°×0.2°、0.3°×0.3°、0.4°×0.4°、0.5°×0.5°、1°×1°、2°×2°。从图9可以看到,划分的区域越大,路由精度越低。这是由于源卫星到目的卫星之间的最佳选择会

根据具体位置的不同存在多个,故区域的划分越大,路由本身的精度越低。

区域划分越大,在一定范围内模型会越小;但随着区域增大,样本分布的特征区分度相应会降低,当最大信息增益特征的分裂增益小于预设阈值时,算法可能激活备选特征评估,选择相对次优的分裂点,树会过度分裂,从而导致决策树膨胀。从图10可以看到,随着区域划分越来越大,模型大小存在一个极点(经度×纬度为0.2°×0.2°),在该点模型最小,且精度损失不大,后续实验将选择该参数用于推荐的区域划分方案。

3.4 模型压缩和推理

当前的互联网核心网路由表急剧增加,互联网路由系统面临严重的可扩展性问题。路由器转发一般采用昂贵的三态内容可寻址存储器(ternary content-addressable memory, TCAM)存储,因此超大容量路由表会给卫星路由器带来巨大的硬件成本;此外,每一个分组转发在路由器中需读取所有转发条目进行最高优先级匹配,过大的转发表也会导致巨大能耗。在图10中,对应所参考的星座规模及优选地面区域大小,决策树模型学习后的条目为6百万~8百万量级,决策树模型中的叶子节点代表最终的决策结果或类别标签,其中一个叶子节点代表卫星路由器转发表中的一个转发决策条目,模型大小对算法的应用可行性有巨大影响。当前的商用专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC)芯片尚未有如此量级的路由表容量,因此模型在实际部署前,还需要对其进行压缩处理。

在设计决策树模型压缩算法时,LoISR考虑了多个级别的模型聚合,每个级别都与不同的性能取舍相关。算法先将决策树模型转换为字典(trie)树结构,之后在该trie树结构基础上进行模型压缩操作。

3.5 路由方案设计

基于本节提出的机器学习数据采集、模型选择、模型的压缩及推理等算法和方案,结合前述SGIN移动和切换管理方案,当机器学习模型最终转换为可在路由器中部署的M&A匹配条目后,路由协议及方案如下。

下面从卫星网络中端到端通信的源端发起通信开始,一直到数据(分组)被路由到通信的目的端结束来描述LoISR算法方案。所描述的场景均假定为终端直连卫星经卫星节点路由的情形,如果实际通信中涉及信关站,则将信关站视为一种类型的终端即可。

(1) 源端发起通信

地面终端与接入卫星之间通信的分组为链路层分组,

参考图4的帧格式定义,除数据(负载)外,源端封装的链路层分组中包含如下协议控制字段。

- 源端的归属区域(与一对经纬度编码关联),用于回程通信。
- 源端IP地址,用于回程通信。
- 目的端所属区域,可以通过运营商的管理协议获取。
- 目的端IP地址。
- 目的端区域及关联的位置信息(经纬度)。

需要说明的是,实际经纬度值为浮点数,本文涉及的经纬度值均为整数,需要进行必要的转换操作。

(2) 接入卫星执行路由协议封装

接入卫星接收到源端的数据后进行路由协议封装,LoISR路由协议分组格式如图11所示。

协议各字段意义及解释如下。

- **d_ip**: 目的IP地址。
- **d_r_id**: 目的端所属区域。
- **d_surf**: 目的端接入卫星所在通信面。接入卫星(以及中间卫星节点)并不能确定目的端接入卫星所处的通信面,接入卫星可随机选择初始化一个通信面,例如设置为与自己同一个通信面。
- **d_lon**: 目的端关联的区域经度。
- **d_lat**: 目的端关联的区域纬度。
- **hetero-nexthop**: 节点的异轨下一跳选择,取值“左”或“右”,左右位置可参考卫星运动方向设定。对于接入卫星,此字段设置为未知“unknown”。
- **co_nexthop**: 节点的同轨下一跳选择,取值“前”或“后”,前后位置可参考卫星运动方向设定。本字段以及下一字段(**hetero-nexthop**)均为避免路由环路设定,且符合卫星网络拓扑规律,可提高路由效率。此外,由于接入卫星是第一跳,此字段初始值设置为未知“unknown”。
- **data**: 路由协议负载,其中包含链路帧协议相关信息。
- **FCS**: 校验位。

接入卫星完成路由协议封装后,即可执行正常的路由决策。

(3) 中间路由

中间路由即所有卫星节点均需执行的路由决策流程,结合第2.5节关于最后一跳的解决方案,路由步骤如下。

1) 节点接收并解析分组,获得路由分组头,解析得到协议相关字段。

2) 节点判断“目的IP(**d_ip**)”是否在本节点的LSU中,如果在,则表示目的终端正在由本节点提供服务,节点直接将分组转发给目的终端,路由结束;否则,继续步骤3)。

3) 判断“目的区域(**d_r_id**)”是否在本地LSR中,如果不在,则分组尚未抵达最后一跳范围,按正常的路由转发逻辑处理,转到步骤6);否则,表示分组已经处于目标区域,继续步骤4)。

4) 检查“目的IP地址(**d_ip**)”是否在节点的LASU中,如果在,则按照LASU指示的端口转发;如果不在,说明分组虽已到达目标区域,但目的端的接入卫星在目标区域的另一个通信面。

5) 修改分组头中“目的通信面(**d_surf**)”为相反通信面,清空“同轨下一跳(**co_nexthop**)”和“异轨下一跳(**hetero_nexthop**)”的设置,转入下一步正常路由转发逻辑。

6) 根据本节点当前位置信息和分组中的目标位置信息“目的位置(**d_lon, d_lat**)”执行推理,得到下一跳(**nexthop**)信息,推理输入为: [**s_surf, s_lon, s_lat, d_surf, d_lon, d_lat**],其中“**s_surf, s_lon, s_lat**”为当前路由节点(卫星)的信息,“**d_surf, d_lon, d_lat**”由路由分组头获取。

7) 如果分组中“异轨下一跳(**hetero_nexthop**)”为无效值,且推理下一跳为异轨跳转,则选择推理下一跳作为本次转发下一跳,并更新分组中“异轨下一跳(**hetero_nexthop**)”。

8) 如果分组中“异轨下一跳(**hetero_nexthop**)”为

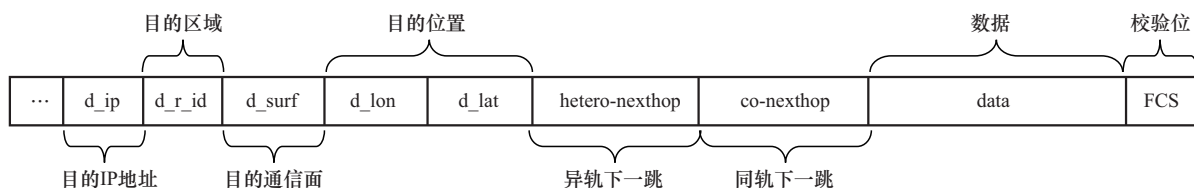


图11 LoISR路由协议分组格式

有效值，且推理下一跳为异轨跳转，则选择分组中“异轨下一跳（hetero_nexthop）”为本次转发下一跳（可避免回环）。

9) 如果分组中“同轨下一跳（co_nexthop）”为无效值，且推理下一跳为同轨跳转，则选择推理下一跳作为本次转发下一跳，并更新分组中“同轨下一跳（co_nexthop）”。

10) 如果分组中“同轨下一跳（co_nexthop）”为有效值，且推理下一跳为同轨跳转，则选择分组中“同轨下一跳（co_nexthop）”为本次转发下一跳（可避免回环）。

11) 如果选择的下一跳对应的链路无效或已中断，则选择分组中同轨下一跳的反方向作为本次转发下一跳。

LoISR路由算法流程如图12所示。

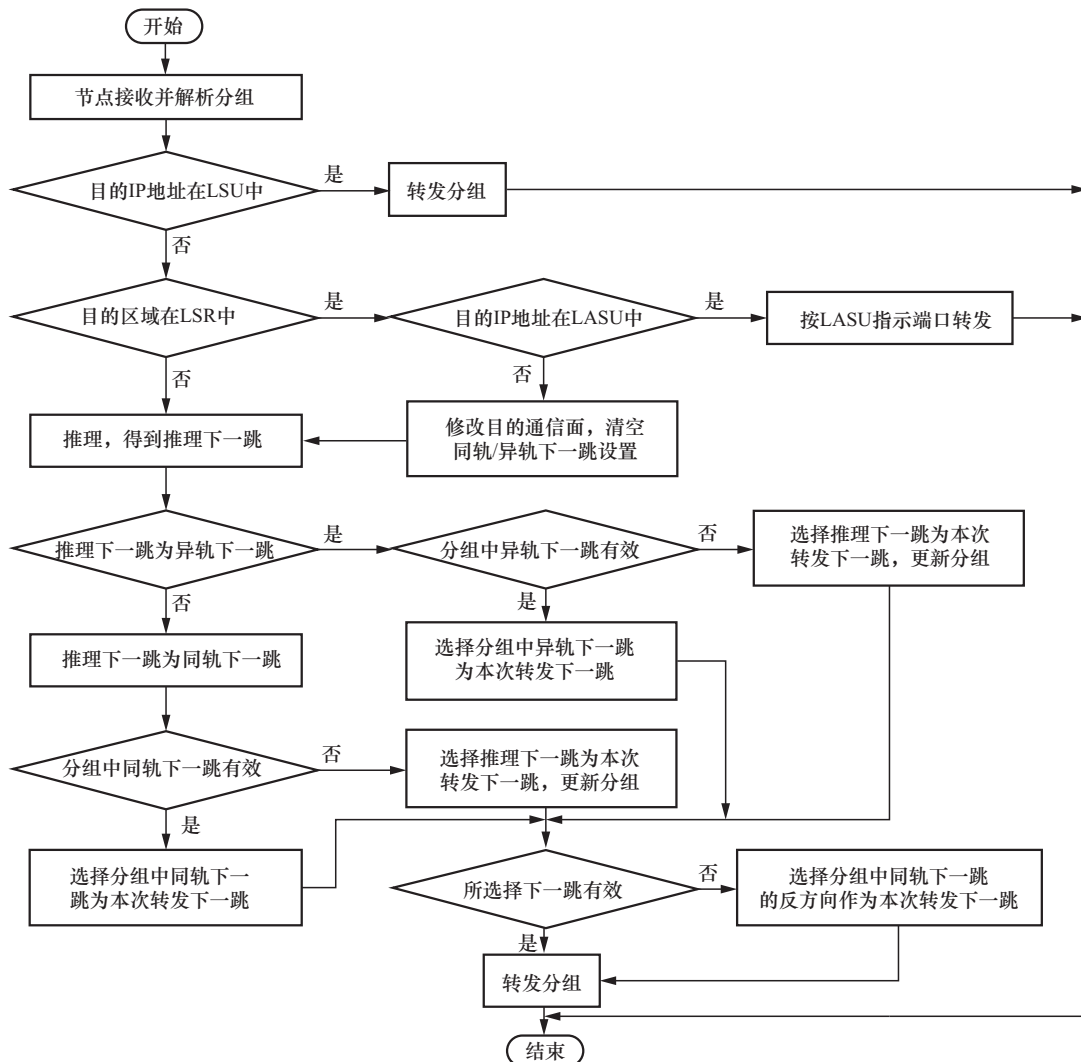


图12 LoISR路由算法流程

4 实验结果及分析

4.1 实验设置

考虑到OSPF协议在实际网络中的广泛应用及其良好的开放性、灵活性与稳定性，本文选取OSPF作为性能评估的基准路由协议。在仿真实验中，基于NS-3网络模拟器对OSPF协议进行了扩展，使其能够适用于LEO环境，并支持ISL的动态模拟。

基于Starlink第一期壳层4的卫星数据构建了一个完整的LEO卫星星座模型，其包含72个轨道面，每个轨道面包含18颗卫星，倾斜角 53.2° ，卫星轨道高度540 km，轨道周期约为95 min。通过运行扩展后的OSPF协议，在仿真过程中定时采样并记录所有卫星节点的路由表信息以及对应的地理位置信息，以构建用于训练的样本数据集。基于上述数据集，使用监督学习方法训练决

策树模型,以学习地理位置信息与路由决策之间的映射关系。在模型训练完成后,进一步采用模型压缩技术对原始决策树进行简化,以提升模型的部署效率和运行性能。

4.2 实验结果

(1) 模型选择结果分析

机器学习模型有很多种,具体模型选择需要根据任务的性质、数据的特点和需求来决定。考虑到算法需要基于地理位置信息的数据进行下一跳选择,且所有卫星节点端口配置基本一致,如果将下一跳视为类别,则其本质上是一种分类任务,因此分类模型或深度学习模型比较适合基于地理位置信息的机器学习。根据路由决策任务需要,推荐的模型包括:K近邻(K-nearest neighbors, KNN)^[24]、决策树(decision tree, DT)^[25]、多层感知机(multi-layer perceptron, MLP)^[26]以及极梯度提升(eXtreme gradient boosting, XGBoost)^[27]。

为验证算法的可行性,针对参考仿真星座数据进行仿真,以不同的数据集大小进行模型训练。在具体的实验设计中,小数据集采用参考星座全网仿真第1分钟的所有数据进行学习,训练所得模型预测第2分钟的节点路由决策结果;大数据集仿真时间为95 min,并以1 min为间隔取出所有数据进行学习,利用该模型预测第96分钟的节点路由决策结果。将得到的预测结果与OSPF协议比较,不同机器学习模型在不同训练数据集下的精度比较结果如图13所示。

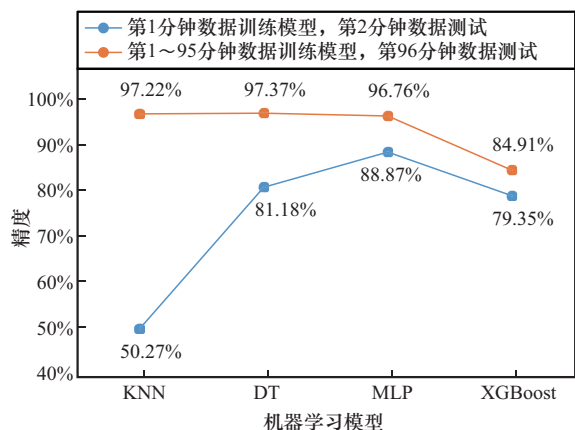


图13 不同机器学习模型在不同训练数据集下的精度比较结果

可以看到,当数据集较小时(蓝色线),MLP具有最优预测精度,但当数据集较大时(橙色线),DT决策树模型具有最佳的优势。考虑到决策树模型具有可解释性的优点,每个节点都可以明确解释为一个路由决策条件,

以便于部署到资源受限的卫星节点中,后续将采用决策树作为LoISR的学习模型。

(2) 对比实验与分析

模型压缩算法及算法参数的选择将直接影响路由表大小和更新频率。以 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 的区域划分为例,保留卫星将来出现的20个区域作为源区域进行无损压缩,可在压缩效率(压缩后路由条目约5万条)和路由更新频率(分钟级)之间取得一个较优平衡。

以OSPF作为性能参考标准,将仿真星座拓扑中任意一个节点作为源节点,拓扑中所有其余节点作为目的节点,分别运行OSPF和LoISR算法,得到两种算法端到端的路径,然后对路径代价进行比较。

通过对参考仿真星座拓扑的模拟,第96分钟到第100分钟短周期内的端到端路径代价如图14所示,图中横轴为预测的误差范围,计算式为 $100\% \times (\text{LoISR路径长度} - \text{OSPF路径长度}) / \text{OSPF路径长度}$;纵轴为算法计算的路径,和OSPF结果对比落在该误差区间的占比。

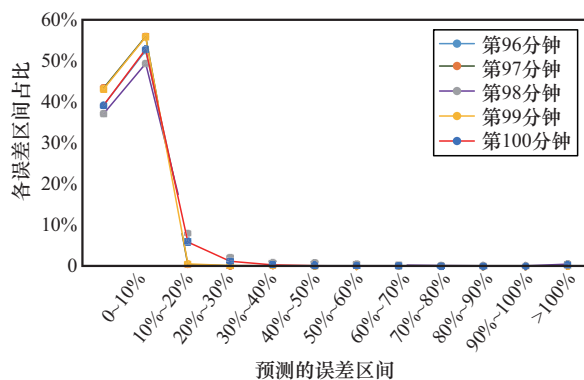


图14 短周期内的端到端路径代价

从图14可以看出,以第1分钟到第95分钟的数据学习到的模型来推测5分钟内的路径转发,绝大部分的路径差异保持在10%以内,LoISR算法的路径长度超出最短路径长度30%以上的占整体比比较小,整体算法在规避全网协议交互的基础上达到了较好效果。

本文还对模型在后续较长时间范围内的路径转发推理结果进行了分析,主要对第2小时到第24小时,每隔1小时的数据进行了全面推理验证,并取所有结果的平均占比作为数据,长周期内端到端路径代价结果如图15所示,其中横纵轴含义与图14相同。

从图15可以看出,长周期的结果趋势和短周期一致,即在长周期内模型依然能获得很好的性能。LoISR算法的

路径长度超出最短路径长度小于10%的总占比为97.064%，而超出30%的路径只占0.629%。

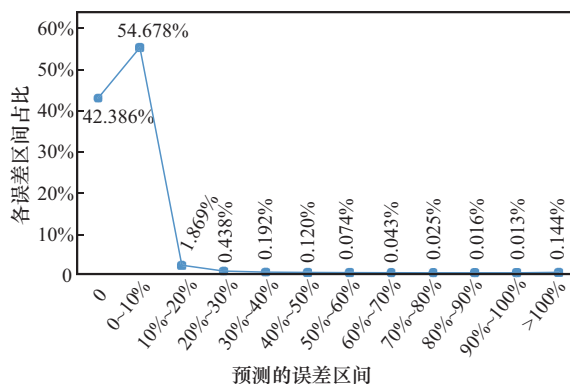


图15 长周期内端到端路径代价结果

5 结束语

本文对LEO-MCN端到端路由涉及的相关特征进行了分析，提出SGIN场景下基于LEO-MCN的终端移动和切换管理方案，并基于所提出的移动和切换管理方案设计基于位置导向的智能卫星网络路由算法LoISR。基于对参考LEO-MCN星座的模拟仿真，得到仿真输出的节点地理位置信息并获得各节点内部的OSPF路由表，基于此利用机器学习获得了决策树模型，将模型压缩后部署到实际卫星网络中指导报文转发，最后基于真实的卫星数据进行实验，验证了LoISR算法的有效性，实验结果证明LoISR算法的一些特点及优势如下。

(1) 算法无须协议交互：由于LEO卫星网络是高度动态的，节点之间的拓扑关系会频繁变化，LoISR通过基于地理位置信息进行机器学习决策，不需要频繁的协议交互，从而有效减少了在高动态网络中的通信开销，节省了带宽。

(2) 消除了拓扑同步时间差异导致的问题：传统的路由协议需要进行拓扑同步，但拓扑同步需要一定的传输和处理时间，而在尚未同步的时间段内，极易出现路由环路、路由黑洞等问题，LoISR通过机器学习的智能算法，避免了相关问题，确保了算法稳定性。

(3) 简化了路由部署方案：LoISR算法通过（离线）机器学习直接生成路由决策模型及路由表，降低了网络管理的复杂性，提高了网络的可维护性。

(4) 算法的高度适应性：LoISR算法同时适用于倾斜轨道星座和极轨道星座，适用于极轨道星座的缝以及倾斜轨道星座不同通信面之间的路由，也适用于终端连接

多颗卫星的情形（多波束），解决了卫星网络中端到端之间的全路径路由问题。

下一步将继续研究基于LoISR算法的可靠传输、QoS提供、流量均衡、安全及隐私等问题，并拓展应用到其他机器学习算法。

参考文献

- [1] Reddy Y M, Raj V H, Thethi H P, et al. Low earth orbit (LEO) satellite networks: a new era in global communication[C]//Proceedings of the 2023 10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). Piscataway: IEEE Press, 2023.
- [2] Pachler N, Del portillo I, Crawley E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [3] Wood L, Clerget A, Andrikopoulos I, et al. IP routing issues in satellite constellation networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 69-92.
- [4] 蒋长林, 李清, 王羽, 等. 天地一体化网络关键技术研究综述[J]. 软件学报, 2024, 35(1): 266-287.
Jiang C L, Li Q, Wang Y, et al. Survey on key technologies in space-ground integrated network[J]. Journal of Software, 2024, 35(1): 266-287.
- [5] Wikipedia contributors. Starlink[EB]. 2025.
- [6] Hofner K, Vahl A, Stoll E. Cost-efficient satellite constellation design by network reliability analysis[C]//Proceedings of the 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [7] 李贺武, 刘李鑫, 刘君, 等. 基于位置的天地一体化网络路由寻址机制研究[J]. 通信学报, 2020(8): 120-129.
Li H W, Liu L X, Liu J, et al. Location based routing addressing mechanism of integrated satellite and terrestrial network[J]. Journal on Communications, 2020(8): 120-129.
- [8] Elbehry E, Tageldien H, Fares A, et al. Survey on routing algorithms for LEO constellations network[J]. Fayoum University Journal of Engineering, 2024, 7(2): 89-99.
- [9] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas

- in Communications, 1997, 15(8): 1636-1648.
- [10] Wang J F, Li L, Zhou M T. Topological dynamics characterization for LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(1): 43-53.
- [11] Jia M, Zhu S Y, Wang L F, et al. Routing algorithm with virtual topology toward to huge numbers of LEO mobile satellite network based on SDN[J]. Mobile Networks and Applications, 2018, 23(2): 285-300.
- [12] Mauger R, Rosenberg C. QoS guarantees for multimedia services on a TDMA-based satellite network[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(7): 56-65.
- [13] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147.
- [14] Korçak Ö, Alagöz F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in earth-fixed LEO satellite systems[J]. Computer Networks, 2009, 53(9): 1497-1511.
- [15] Chen Q, Guo J M, Yang L, et al. Topology virtualization and dynamics shielding method for LEO satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 433-437.
- [16] Singh, H, Jorge U. Compass routing on geometric networks[C]//Proc. of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry, Vancouver, Canada. 1999.
- [17] Karp B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]//Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2000.
- [18] Henderson T R, Katz R H. On distributed, geographic-based packet routing for LEO satellite networks[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, 2000.
- [19] Hu J H, Cai L, Zhao C C, et al. Directed percolation routing for ultra-reliable and low-latency services in low earth orbit (LEO) satellite networks[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [20] Xu M W, Xia A Q, Yang Y, et al. Intra-domain routing protocol OSPF+ for integrated terrestrial and space networks[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(1): 12-17.
- [21] Yang Z Y, Li H W, Wu Q, et al. Analyzing and optimizing BGP stability in future space-based Internet[C]//Proceedings of the 2017 IEEE 36th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC). Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [22] Wang Y, LI Q, LI K J, et al. Application status and analysis of star-link constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023,4(2): 62-70: 62-70.
- [23] Vallado D, Crawford P, Hujsak R, et al. Revisiting spacetrack report #3[C]//Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. AIAA, 2006.
- [24] Cover T, Hart P. Nearest neighbor pattern classification[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1967, 13(1): 21-27.
- [25] Quinlan J R. Induction of decision trees[J]. Machine Learning, 1986, 1(1): 81-106.
- [26] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323(6088): 533-536.
- [27] Chen T Q, Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2016.

[作者简介]



李克军 (1982-), 男, 鹏城实验室工程师, 主要研究方向为算网感知与调度、天地一体化网络体系结构、网络仿真及验证技术。



王羽 (1972-), 男, 博士, 鹏城实验室高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网体系结构、网络传输与在网计算。



赵思琳 (1997-), 女, 卫星互联网全国重点实验室工程师, 主要研究方向为卫星互联网体系结构、承载网传输验证、路由测试技术。



陈星池（1987-），男，博士，鹏城实验室助理研究员，主要研究方向为算力网、人工智能、边缘智能、空天地一体化网络、医疗物联网等。



王野（1983-），男，博士，鹏城实验室副研究员，主要研究方向为卫星通信、资源分配与移动互联网等。



文少杰（1987-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师，主要研究方向为卫星互联网网络架构，网络管控，资源调度，分布式路由等。



李清（1985-），男，博士，鹏城实验室研究员，主要研究方向为下一代互联网体系架构协议与算法、天地一体化网络、基于可编程数据面的网内智能计算等。