LEO巨型卫星星座端到端路由技术研究

摘要

如没有特别说明，用户终端指的是卫星网络用户终端。

# 引言

得益于计算机技术、通信技术的发展，批量化的卫星制造、可重复火箭发射技术的应用，通过大规模低地球轨道（LEO：Low Earth Orbit）卫星的部署以期提供可与地面互联网匹配的带宽、延迟性能的天基宽带互联网服务成为可能，并能提供相对地面网络在全球覆盖、大规模灵活通信部署、应急及灾难场景通信保障等方面的独特优势。

典型的在建及拟建的巨型低轨卫星星座网络（LEO-MCN, mega-Constellation Network）包括SpaceX的Satrlink星座、OneWeb星座、Telesat LightspeedTM网络、Amazon的Kuiper项目[1]、以及国内的星网计划[2]等。为充分发挥MCN的各项优势，卫星网络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、即时通讯、物联网（IoT）等应用。然而，由于卫星网络自身的特点，在与地面互联网实现端到端融合应用的过程中，卫星网络需要克服一些相关的技术问题及难点，本文重点研究MCN与地面网络融合中端到端路由算法设计将面临的相关问题。

## LEO-MCN的特点

LEO-MCN规模庞大，包含从数百到数万颗在低地球轨道（LEO）运行的卫星[1]，这些卫星通常被规划在一个或多个规则分布的轨道，轨道高度通常在500-1500km之间（轨道周期约95-140min），组成卫星星座中以实现全球覆盖。相较于更高轨道的卫星网络，LEO-MCN能够支持更小型的用户终端，例如更小的天线尺寸、更低的功率要求、更好的频率复用，并具备可与地面网络竞争的传输延迟。

卫星网络空间段的卫星之间通过星间链路（ISL, inter-Satellite Links）互连，以Starlink星座为例，该星座v1.5版之后的每颗卫星都配置了四个激光通信部件，用于分别与同轨道面‘前后’两颗以及相邻轨道面‘左右’两颗卫星建立激光卫星间链路（LISL：Laser-ISL）。本文中均假定每颗卫星有4条ISLs，其中两条与同轨道前后的两颗卫星相连，另外两条与左右相邻轨道的卫星相连。同轨道卫星之间的ISLs相对稳定，由于卫星运动特性，异轨道卫星之间的ISLs在经过极地区（极轨道星座）或高纬区（倾斜轨道星座）时将发生切换，每个轨道周期相应的ISLs会分别发生两次断链和重新建链，导致实际网络拓扑呈现高动态性[3]。此外，作为卫星网络与地面网络的中转枢纽，卫星网络地面段的卫星地面站（Ground Station）或信关站（Gateway Station）一方面与卫星之间建立并保持星地/地星链路（GSL, Ground to Satellite Links），另一方面与地面网络连接。由于卫星的运动，地面站或信关站（下文统称为信关站GST）需要在不同的卫星之间频繁切换以保持连接，尽管信关站通常配置一组天线并可同时与多颗卫星建立链接，由于雨衰、大气条件或太阳活动等导致GSLs的不稳定，并由此带来网络的动态性。

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，可根据实际情况与建链条件最好的任意一颗卫星建立连接，地面终端与卫星之间的链路（TSL, Terminal to Satellite Link）具有随机性和不可预测性，这将给MCN空间段卫星网络最后一跳的路由和寻址带来挑战，在卫星网络与地面网络集成互连的天地一体化网络（SGIN, Space-Ground Integrated Network）融合通信场景的路由算法设计中需要考虑到这一实际情况。

SGIN场景下，MCN具有以下一些将影响到路由算法设计的特点：

* 由于卫星轨道运动的规律性，MCN空间段部分具有可预测性，包括网络节点（卫星）的位置、节点相互之间的AER（Azimuth, Elevation & Range）等，都是可预测和可计算的；
* MCN连接和拓扑的规则性，卫星网络空间段节点的端口数一致，端口对外连接的规则也一致；
* MCN拓扑的动态性，由于异轨道卫星之间链接在极地区或高维区的高度动态，以及节点左右相邻轨道ISLs的断链和重新连接，MCN拓扑呈现高度的动态性，而且这种拓扑的动态性随着MCN规模的增大而增强；
* 用户终端与卫星之间的链路（TSL）的随机性和不可预测性，LEO卫星的轨道周期在100min左右，单颗卫星对地覆盖持续时间仅有几分钟时间，终端用户（以及信关站）需要在不同的卫星之间频繁切换以保持通信连续，本文后面将进一步依据LEO星座构型分析这种随机性和不可预测性给端到端路由算法带来的挑战。

## 典型的LEO-MCNs

Starlink是由美国SpaceX公司运营的巨型低轨卫星互联网星座，Starlink星座的设计和规划分为第一代（First Generation）和第二代（Second Genaeration/2A），第一代星座计划发射11,953颗卫星，第二代星座计划发射10,080颗卫星。其中，第一代星座第1期的壳层1（倾角53.0°，72个轨道面，每轨道面22颗卫星）和壳层4（倾角53.2°，72个轨道面，每轨道面22颗卫星）已完成部署。截至2023年7月，Starlink星座已完成4,698颗卫星的发射，其中在轨4368颗，失效或离轨368颗，报告其已有超过150万的活跃用户[4]（数据需要最后更新）。早期Starlink的宽带服务基于“终端→卫星→地面站”的弯管（bent pipe）模式，2022年9月Starlink通过极地服务测试验证了其LISL的通信能力。2023年3月，Starlink向终端用户推出全球漫游服务，允许用户随时随地访问互联网服务，此类服务需要卫星网络中卫星之间的通信链路服务（ISLs）。受益于SpaceX公司在流水线卫星制造、批量卫星发射、火箭回收利用、星间激光通信等领域的技术优势，Starlink星座已成为巨型低轨卫星星座网络建设及服务提供的领先者。

OneWeb星座由648颗运行于1,200km高度、倾角86.4°的卫星组成，星座最终的轨道面数为12个，每个轨道面49颗卫星，外加一些在轨的备用卫星。OneWeb的第一代卫星之间没有数据链路，因此只能在地面网关站的范围内为用户提供服务，这大大限制了OneWeb星座的服务范围和能力。截至2023年5月，OneWeb星座已有634颗卫星在轨提供服务，并启动第二代星座的发射部署。OneWeb预计其星座最终构成将少于1,000颗卫星，而不是之前计划的数千颗。此外，为避免与其主要对手StarLink竞争，OneWeb表示其主要面向企业、政府（包括国防）、电话网络运营商和社区集群。

Telesat是加拿大一家成熟的卫星通信服务提供商，其计划构建的Telesat Lightspeed卫星网络星座将包括一个极轨道星座（倾角98.98°）和一个倾斜轨道星座（倾角50.88°）。其中极轨道星座由27个轨道面、每轨道面13颗卫星构成，倾斜轨道星座由40个轨道面、每轨道面33颗卫星构成，最终的卫星网络由1,671颗卫星组成。Telesat Lightspeed星座的卫星之间提供轨道面内以及轨道面间的ISLs链路。

Amazon的Kuiper项目计划在590km（倾角33°）、610km（倾角42°）、以及630km（倾角51.9°）的高度部署三个LEO星座，其中包含98个卫星轨道面和总共3,236颗的卫星。Kuiper项目计划分五个阶段完成部署，截至目前Amazon公司尚未正式启动项目的发射活动。

## MCN星座构型及星间链路（ISLs）

典型LEO星座包括*Walker Delta*构型（倾斜轨道）星座和*Walker Star*构型（通常为极轨道/*Polar*）星座。*Walker*星座可由星座构型参数表示，其中为轨道倾角，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。本文的路由算法同时针对两种构型的星座展开研究，算法适用于该两种类型的星座，且使用相同的星座构型参数描述该两种类型的星座。对于*Walker Delta*和*Walker Star*星座，*N*个轨道面之间相位角分别均匀间隔和。

极轨道星座能够实现全球覆盖，但两极及高纬地区的人口分布相对稀疏，为了实现全球覆盖同时更高效利用卫星资源，LEO-MCN网络通常同时规划部署多个倾角分布的星座。参考Starlink的规划，同一个倾角的卫星分布构成一个轨道壳层（orbit shell），本文中，一个轨道壳层即指一个星座，本文的路由算法针对单个轨道壳层OS/星座研究，但可应用于不同的轨道壳层/星座。表X示出了各典型LEO-MCNx的轨道构型。

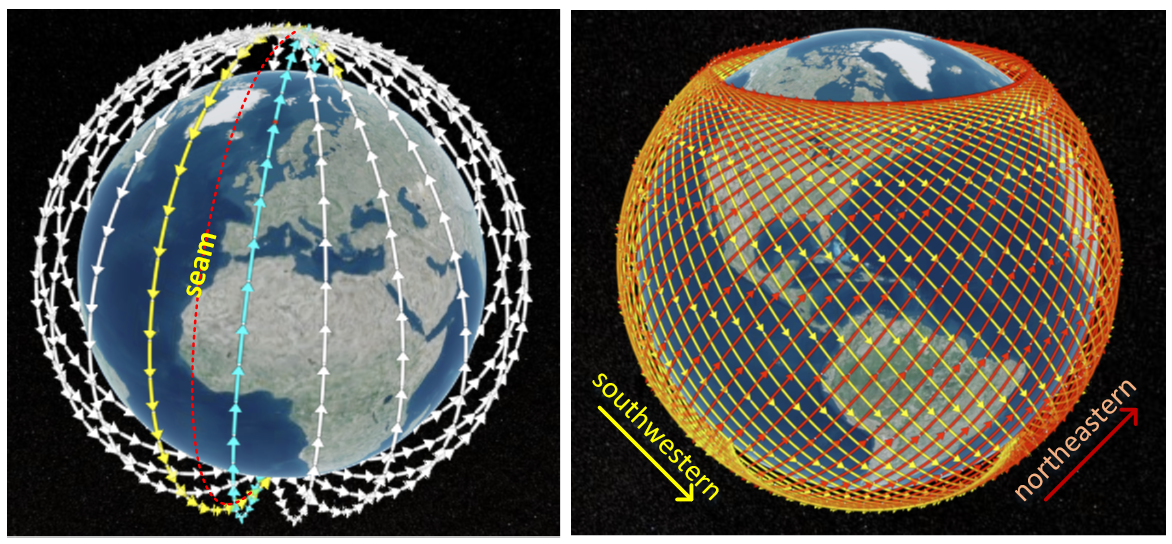
典型LEO-MCNx的轨道构型

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | **极轨道** | | **倾斜轨道** | | **卫星总数** |
| **数量** | **倾角** | **数量** | **倾角** |
| Starlink | 第1代 | 2 | 97.6° | 6 | 53.0°, 70°, 53.2°, 42.0°, 48.0°, 53.0° | 11,926 |
| 第2代 | 0 | — | 3 | 43°, 53°, 33° | 10,080 |
| OneWeb | | 1 | 87.9° | 2 | 55°, 40° | 716 |
| Lightspeed | | 1 | 98.98° | 1 | 50.88° | 1,671 |
| Kuiper | | 0 | — | 3 | 33°, 42°, 51.9° | 3,236 |

Amazon的Kuiper项目没有规划极轨道星座，其目标是为人口稠密地区提供卫星宽带服务，没有考虑高纬和极地区的覆盖。

一个星座内所有卫星的集合可表示为，其中*n=0,1,…,N-1*为卫星所在轨道面（OP，Orbital Plane）编号，*m=0,1,…,M-1*为卫星在轨道面内的编号，本文中卫星集合另外表示为，其中*i*=*0,1,…, N×M-1*。每颗卫星可分别与同轨道（前后）两颗卫星以及相邻轨道（左右）两颗卫星建立共4条星间链路（ISLs, Inter-Satellite Links），本文中默认ISL均为激光通信链路（Laser-ISL）。同轨道面内的ISL称为轨道面内ISL（*intra-plane* ISL），不同轨道面之间的ISL称为轨道面间ISL（*inter-plane* ISL）[3]。

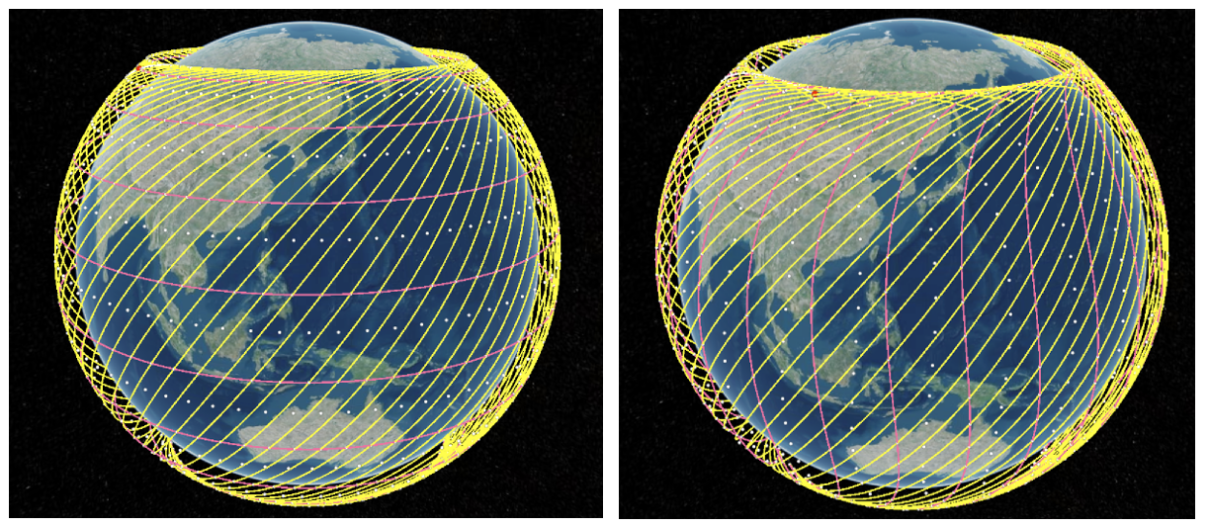
由于卫星的运动特点，对于极轨道星座，第一个轨道面和最后一个轨道面之间的卫星运动方向相反，形成一条缝（seam），缝两边的卫星之间相对AER变化剧烈而难于建立星间链路，图X左侧以OneWeb星座实际构型示意了极轨道星座轨道面间的缝。对于倾斜轨道星座，由于每个轨道面上总有一半的卫星由西南向东北方向运动（升轨），另一半的卫星在地球的另一面由西北向东南方向运动（降轨），由此实际形成两个不同运行方向的通信面（分别称为升轨面和降轨面），两个通信面上的卫星同样由于相对AER变化剧烈，不利于ISL的捕获、跟踪与指向（PAT, Pointing, Acquisition & Tracking）而难于建立星间链路，图X右侧以Starlink星座第1期壳层1实际构型示意了倾斜轨道星座不同运行方向的卫星构成的两个通信面，图中红色为升轨面，黄色为降轨面。



（左）OneWeb星座（*86.4*°*:12×50/12/0*），（右）Starlink第1期壳层1（*53.0*°*:72×18/72/45*）

由于卫星运动特性，在经过极地区（极轨道星座）和高纬区（倾斜轨道星座）时，与卫星相邻轨道面上的左右邻居的位置会发生切换，卫星的轨道面间ISLs需要临时断链和重新建链[3]，由此造成网络拓扑的高度动态。

此外，相位因子*F*的选择对MCN的影响也至关重要，相位因子*F*除了直接决定了卫星网络空间段的拓扑形态，还可能决定通信双方链路上节点跳数[5]。图X仍以Starlink星座第1期壳层1实际构型为例，示意了相位因子分别为*F*=0和*F*=45下ISLs所组成的拓扑形态，图中仅示意了升轨面卫星组成的网络拓扑。



Starlink第1期壳层1：（左）相位因子*F*=0，（右）*F*=45

图X中黄色为轨道面内ISLs，粉红色为轨道面间ISLs，左侧相位因子*F*=0，不同轨道面之间卫星之间的ISLs（inter-plane ISLs）组成一个与赤道平行的环线，这与许多已提出的路由算法假定一致[补充参考文献]，即沿着轨道面间的ISLs路由，卫星的星下点经度会随之改变。右图*F*=45，是根据Starlink该壳层星座实际TLE数据分析得到的相位因子[6]，图中轨道面内的ISLs（黄色）没有变化，而轨道面间的ISLs几乎是一条南北垂直走向的路径，在同一个半球走同一条轨道面间的ISLs，星下点的经度值变化较小。

# 卫星网络相关路由算法

MCN网络的空间段部分（天基网络部分）的节点（卫星）运动具有可预测性、规律性，所构成的网络拓扑也呈周期性和规则性，但轨道间链路（inter-plane ISLs）的动态性导致MCN网络拓扑的高度动态性。MCN网络的动态性主要受卫星运动规律影响，在卫星经过高纬区（倾斜轨道）和极地区（极轨道）时，卫星的左右星间链将发生位置切换，导致临时的断链和重新建链。为统一叙述，下文中将高纬区（倾斜轨道）和极地区（极轨道）统一称为高纬临界区（CR, Critical Region），当卫星进入CR区域时，卫星的轨道面间ISLs将断开，当卫星离开CR区域时，卫星的轨道面间ISLs重新建链。卫星网络拓扑的其他动态性还体现在星地之间的链路频繁切换、星地之间链路的不稳定等。

## 虚拟拓扑法及相关路由算法

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（snapshot）[*t0, t1*], [*t1, t2*], …, [*tn-1, tn*]，网络拓扑仅在时刻*t0, t1, t2,* …发生变化，在每个快照周期内卫星网络拓扑为静态拓扑，基于该静态拓扑可预先执行源和目的之间的路径计算，并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[7]针对极轨道星座场景首次提出虚拟拓扑法，作者针对ATM协议场景，基于每个时间片内静态拓扑为所有通信的双方提前计算好通信路径（path）。文献[8]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了静态虚拟拓扑分析，作者的研究显示星座轨道周期内虚拟拓扑的数量受星座各参数的影响。这种按时间片预先计算的静态虚拟拓扑对网络的实时动态适应性差，例如无法适应链路拥塞、无法根据网络流量的变化调整路由策略以及适应实时的网络故障。文献[9]基于虚拟拓扑法，利用SDN（Software defined network）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（DFS, Depth-First-Search）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。

虚拟拓扑法静态拓扑持续保持的时间（即快照的长度）与每个轨道面内的卫星数量以及星座总的卫星数量成反比[8]，仅能适用于卫星数据较少的星座，不适合于巨型MCN星座。

## 虚拟节点法及相关路由算法

虚拟节点法将地球表面划分为若干规则的区域，每个小区被赋予一个虚拟ID，称为虚拟节点（VN, Virtual Node），当卫星运动到指定VN上空并为该VN 服务时，被指定该VN的虚拟ID。由此，卫星的运动不会影响到由VN构成的网络拓扑，卫星网络的路由算法可基于VNs构成的静态拓扑计算。

文献[10]针对ATM协议应用场景首次提出虚拟节点法，其中卫星与VN一一对应，一个VN内的所有小区（cell）及其用户需要在不同卫星之间完成同步切换。文献[11]以规则的极轨道星座为例，进一步形式化并提出经典的DRA路由算法。文献[12]针对多颗卫星可能同时覆盖一个VN并提供服务的情形，提供一种多状态虚拟网络（MSVN）架构，并重点分析了不同天线模式下用户终端在VNs之间切换的问题。文献[13]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（Earth-fixed）”足印模式，即卫星天线需要始终对准当前服务的VN，需要随着卫星的运动调整天线的对地覆盖。此外，上述提及的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，由于卫星运动特性，在高纬临界区难以进行合理的VN划分和管理。此外，倾斜轨道同时存在两个不同运动方向的通信面（升轨面和降轨面），由此大大增加应用虚拟节点法的难度。

虚拟节点法面临卫星单点失效（导致VN）失效的问题，且没有充分考虑如何解决这一问题。虚拟节点法对卫星天线的工作模式有诸多的限制，虚拟节点法需要在卫星之间频繁切换VN以及与VN有关的网络和用户接入状态等。

## 基于地理位置或方位的路由

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转发并下行到地面的另一个位置，由此一种自然而然的路由方式就是基于地理位置或方位路由，即尽力将分组朝向目的地位置和方位/方向路由。

文献[14]提出了一种朴素的基于地理位置和方位的路由算法（Compass Routing），当前节点所拥有的信息包括目的地的位置、当前位置、当前节点的邻居及位置。当分组到达节点v时，设邻居为u，目的地为t，选择角度∠vut最小的邻居转发（注：邻居u有多个）。文献[15]针对无线自组织（ad-hoc）网络提出GRSR算法，当前路由节点选择自己邻居中距离目的地物理距离最近的转发，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（perimeter）并沿边界朝向目的地转发。文献[16]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（例如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[17]针对天地一体化应用场景，将地面区域编码并与IP地址关联，路由节点（卫星）根据分组中的IP地址确定目的地位置，然后基于节点自己的位置、节点邻居位置、以及目的地位置确定转发端口。作者提出了两种转发策略，一种基于接口（邻居）的方位角，选择与目的地方位角最小的接口转发；另一种基于星间的相对位置，通过目的地位置在二维坐标系中的象限直接选择是经由轨道面内（intra-plane ISL）还是轨道面间（inter-plane ISL）转发。作者还证明了极轨道星座下最后一跳寻址的可达性。文献[18]针对卫星网络支持高可靠低延迟服务场景，提出定向渗透路由DPR，该算法下报文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。算法还通过设置定时缓存，每个报文在每条链路上只转发一次以控制和降低洪泛的带宽冗余消耗。文献提出的ASER方法将网络空间划分为个的虚拟区域，并将路由分为区域内路由和区域间路由。

在虚拟拓扑法和虚拟节点法中，路由是基于实际的卫星（路由节点）计算的，只是在虚拟节点法中卫星需要动态与VN绑定，此两类算法不存在最后一跳是否可达的问题，所提出的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的可达。文献[17]的算法中考虑了相关的设计，但算法仅针对极轨道星座，文献[18]未具体提及最后一跳的可达性，算法以Starlink倾斜轨道为场景验证，但没有考虑倾斜轨道两个不同方向的通信面（参见第x节）。

# 基于IP的天地一体化端到端通信场景

天地一体化网络包括卫星网络（如LEO-MCN）和地面网络（包括地面移动网络），卫星网络包括以ISLs互连的卫星组成的空间段（space segment）以及一定数量的信关站组成的地面段（groud segment）。此外，卫星网络还包括大量的用户终端（若没有特别说明，本文的用户终端均指直接与卫星建立连接以通信的卫星用户终端）。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用户PC机、laptop、pad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。就常规定义而言，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；卫星信关站除了提供地面站的基本功能之外，还负责在用户终端和卫星网络之间接收、封装和转发基于IP的应用数据以及其它网络管理功能。本文的叙述中，信关站和地面站均具有所有这些功能，指的是同一类卫星网络设施。此外，用户终端都有一个与之关联的注册信关站（Register Gateway），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（不经由ISLs通信）。

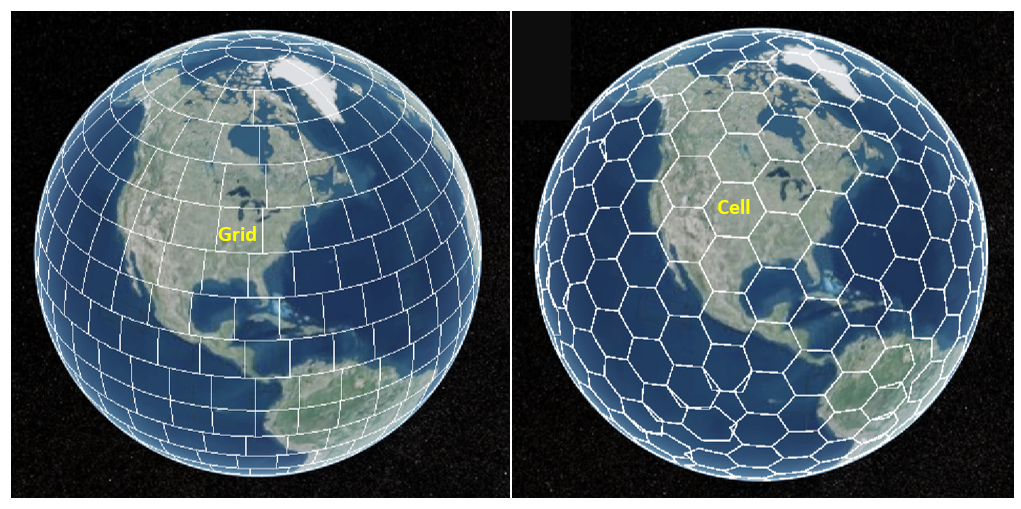
MCN的端到端通信包括两类，一类是卫星网络的用户终端之间通过卫星网络直接通信（图X中的红色虚线所示），不借助或经由地面网络；另一类是卫星网络的用户终端通过卫星网络访问地面网络的应用及其终端（图X中的蓝色虚线所示）。此外，假定卫星网络用户与地面网络及其终端的访问都是经由卫星网络用户的注册信关站完成的。图中蓝色虚线所示的通信为非弯管模式，卫星用户对地面网络的访问经由了ISLs，且图中的信关站即为用户的注册信关站。卫星网络，尤其是宽带LEO-MCN，的发展趋势是适应IP技术在地面网络应用中的主流现状，即卫星网络IP化和宽带化的趋势，卫星网络所有端到端的通信应用，例如语音、视频、游戏、内容访问等，都是基于IP技术的。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（NAT, Network Address Translation）服务。



图X 天地一体化端到端宽带应用场景

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，由于卫星运动导致卫星网络及其拓扑高度动态性，IP及其相关路由和传输协议无法直接应用于卫星网络[19][20]，卫星网络空间段使用节点（卫星）的MAC地址进行标识和转发，为实现经由卫星网络的端到端通信，卫星网络运营商及其设备需要支持用户终端和信关站IP地址与卫星网络空间段MAC地址之间的映射，即与（当前提供服务的）卫星之间的映射。用户终端在接入卫星网络时，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信关站（及其IP地址，本文称为注册信关站）。由于LEO卫星的高速运动，终端用户需要在不同的卫星之间频繁切换（每颗卫星服务终端用户时间仅能维持数分钟），由此触发终端IP地址与卫星（MAC地址）之间的重新绑定和更新。考虑到LEO-MCN的规模，以及终端用户的规模（Starlink的用户终端已达百万[4]），通过在卫星网络全网广播的方式交换并更新用户当前的接入信息以使得所有卫星节点都同步掌握所有用户IP与卫星之间的映射关系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。

为屏蔽LEO-MCN网络的动态性，常用的方法包括虚拟拓扑法[7][8]和虚拟节点（VN, Virtual Node）法[11][12][13]中。在虚拟节点法中，地球表面被划分为互不重叠的单元（cell）（或网格（grid））区域，如图X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。这种方式下，所划分区域的数量（规模）是可控且可管理的，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，映射到该区域并赋予该区域的逻辑标识，随着卫星的运动，卫星在不同的区域逻辑之间切换，实时更新其绑定映射的逻辑标识，而逻辑区域及其拓扑本身不会变化，保持稳定。如果每个区域表示一个网络节点（卫星）的话，这些虚拟节点组成一个静态的网络拓扑，由此屏蔽了原本由运动着的卫星构成的卫星网络拓扑的动态性。特别是，这种区域的划分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，并由此方便于运营商对卫星网络IP地址的统一分配及管理。即，运营商将所有卫星网络相关的IP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地址对应的区域位置，例如经度（Lon）和纬度（Lat），在此映射机制下，一种自然而然的寻址机制就是基于（区域）地理位置的路由及寻址。



图X 地面区域划分示意图（左：类矩形；右：蜂窝网格）

实际通信过程中，对于图X所示的卫星网络的用户终端之间通过卫星网络直接通信的情形，终端应用通过查表确定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（其IP地址不在运营商内部IP地址映射表内），则以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）将出向路由传送的IP分组封装为卫星网络的协议数据单元（PDU, Protocol Data Unit），将IP地址对应的区域标识和物理位置信息编码到PDU中，卫星网络沿途的节点（卫星）依据PDU数据单元中的区域标识和物理位置进行寻址和路由，图X示意了一种卫星网络PDU格式，其中*r\_id*表示区域标识，*lon*和*lat*分别表示经纬度，前缀“s\_”和“d\_”表示源和目的地，与双向通信有关的其他信息编码封装在PDU数据段中。



图X 卫星网络协议数据单元（PDU）帧格式

## 区域的划分及应用

在地面互联网和移动互联网中，运营商为实现网络运维通常进行区域划分，我们认为旨在为全球提供宽带服务的LEO-MCN也适用同样的策略进行网络运维和管理。为此，地球表面由运营商划分为管理区域（Region），区域的划分可以是规则或不规则的，依据运营商的管理需求而定，管理区域的划分表示为：

*Earth\_surface* = R = {r*egion\_1, region\_2, …, region\_n*}，简记为R = {*r1, r2, …, rn*}

区域的划分满足条件：任意两个区域之间均没有交叉或重叠，记为：

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，本文中将地址位置信息设定为经纬度（*<log, lat>*），区域示意性定义如下：

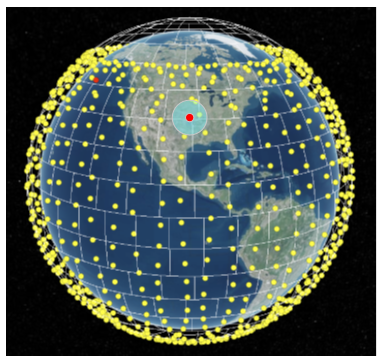
*Region* = {*r\_id, <lon, lat>, …*}

其中，*r\_id*为区域标识，*<lon, lat>*为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，用于为后续路由算法的计算参考值。

卫星网络的每个用户终端和信关站均分配有一个运营商内部IP地址，例如IPv6地址。信关站还分配有与地面互联网通信的天地一体化融合的全局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经由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<*ip, r\_id*>，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，通过运营商卫星互联网管理数据库，卫星网络中的节点可根据需要由IP地址查询到与该IP地址对应的区域，并由此能够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，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，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集中的更新与同步。例如，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到了新的区域，则进行用户终端与区域的绑定更新。与地面移动网络移动终端与基站之间的切换不同，用户终端的这种跨区域并不一定会导致与卫星之间的通信终端或切换，终端在不同区域之间移动切换时，有可能是同一颗卫星仍在持续提供接入及宽带通信服务，在此定义的区域切换和绑定是一种宽松的绑定。

与现有方案[11][12][13]中对虚拟节点（及其对应的区域）划分不同，我们在此提出的区域划分与卫星天线的工作模式、覆盖范围无关。区域是运营商运维范畴的逻辑划分，一个区域可能同时被多颗卫星覆盖，一颗卫星也可能同时覆盖多个区域，卫星与区域之间没有强制的耦合或映射关系。如图X所示。用户终端通过信号同步、测距、注册、以及身份验证后与卫星建立链接，卫星将用户加入其当前正服务用户列表（LSU, List of Service User）<*ip1, ip2, …, ipn*>，并根据用户的IP地址查表得到对应的区域标识，生成并维护一张当前正服务区域列表（LSR, List of Service Region）<*r1, r2, …, rm*>，卫星将利用该正服务区域列表信息完成卫星网络端到端通信最后一跳的分组转发，我们将在后面的算法设计中进一步作出解释。用户从一颗卫星切换到另一颗卫星之后，除了常规的用户状态切换之外，卫星根据需要实时更新其的正服务用户列表（LSU）和正服务区域列表（LSR）。



图X 逻辑区域与卫星通信覆盖关系示意

注：区域大小：1000×1000km，Starlink星座（Phase-1 Shell 1），卫星覆盖范围直径1000km，同一区域被多颗卫星覆盖，单颗卫星的通信覆盖多个区域

## 移动和切换管理

本文针对天地一体化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，二是用户在卫星之间的接入切换。

1）终端用户在区域之间的移动和切换。用户首次注册卫星网络运营商时，通常会有一个地域标识，用于识别用户的注册地域。在上一节提到，运营商为管理方便将地球编码区域划分为互不重叠的管理区域（Region），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<*u\_id, r\_id*>，运营商可通过例如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<*u\_id, r\_id*>，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<*u\_id, u\_ip, r\_id*>

2）用户在卫星之间的接入切换。如上一节所述，卫星节点根据卫星的实时接入状态维护有当前正服务用户列表LSU和当前正服务区域列表LSR，当有新的用户接入或现有接入用户断链的情况，卫星节点在本地及时更新和维护LSU与LSR。

## 邻居间LSU的通告

如前所述，根据本文所提出的端到端路由方案，卫星节点根据需要本地维护一个正服务用户列表（LSU）和一个正服务区域列表（LSR），且随着用户的移动和在卫星之间的切换，卫星节点实时更新本地的LSU和LSR。

LSR除了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列表须涵盖卫星通信覆盖能力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，从LSR添加/删除相应的区域以及与之相关LSR列表中的用户信息。

为高效解决天体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，通告的范围限定在卫星的直接邻居节点之间（1跳）。当节点接收到来自邻居的LSU通告信息，例如<*r\_id, u\_id, u\_ip*>，节点首先检查通告信息中的区域ID（*u\_id*）是否在本节点的LSR列表内，如果在，则根据通告的用户信息（<*u\_id, u\_ip*>）更新本地的LSU列表，否则不作处理。由此，卫星节点在本地LSU列表中维护着其通信覆盖范围内所有区域的当前接入用户的信息。也就是说，LSU中除了记录了直接接入当前卫星的用户信息，还记录了当前卫星LSR列表中对应区域的所有接入用户信息。

## 最后一跳的问题

根据前述对卫星网络相关路由算法的介绍，基于虚拟拓扑法[7]-[9]和基于虚拟节点法[10]-[13]的算法中，路由算法默认的源和目的地均为卫星节点，且算法默认为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（升轨面和降轨面）的极轨道星座。在基于地理位置或方位的路由算法中[14]-[18]，由于算法并没有假设地理位置与卫星节点的映射关系，故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，已知的现有算法也没有考虑到倾斜轨道终端用户可能随机接入两个不同运行方向的通信面的问题。

随着MCN网络规模的增大，卫星对地覆盖能力越来越强，对于同一地面区域同时可有多颗卫星提供接入服务，例如Starlink星座的情形[4]。另一方面，随着天线技术的发展，多波束天线和相控阵技术的应用，卫星和地面终端用户（天线）均可灵活自由的选择建立更为有效的通信链路。天地一体化融合场景中，如果通信的目的端为卫星终端用户，通信源端并不能提前预测通信的目的端当前接入的卫星。

针对基于地理位置或方位的路由算法，本文提出的天地一体化网络融合通信端到端解决方案中的区域划分、用户移动和切换的区域更新、基于区域的卫星节点间邻居通告等技术结合，可完美解决MCN网络高动态下用户最后一跳可达性的问题。卫星网络空间段转发的PDU分组包含目的地位置信息，网络中所有的位置信息（*<log, lat>*）都与特定的区域（*r\_id*）关联。当卫星网络节点接收到分组后，节点首先判断目的地位置信息对应的区域是否在本地LSR列表，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；如果在，则进入最后一跳转发处理逻辑，此时又分为两种情形。1）对于极轨道星座，则分组在指定区域（*d\_r\_id*）范围内洪泛；2）对于倾斜轨道星座，节点首先判断目的用户/IP（*u\_id/u\_ip*）是否在本地LSU列表内，如果在，则分组在指定区域（）范围内洪泛，如果不在，则表示用户的接入卫星可能在另一个运行方向相反的通信面，则将分组跨高纬临界区（CR）转发，待分组跨CR抵达另一个通信面时，继续按照正常的路由转发逻辑处理。

# 位置导向的智能卫星网络路由算法

传统的路由算法主要基于网络拓扑和配置信息来决定路由决策，这些算法通常难以适应天地一体化网络的动态性和复杂性，尤其是在大规模、高负载、高容错性要求的情况下，传统的路由算法难以满足实时性和自适应性的需求。基于此，我们提出位置导向的智能卫星网络路由算法LoISR（Location-oriented Intelligent satellite network Routing）。

在LEO卫星网络中，由于星上资源限制，目前倾斜轨道星座只有较少的链路接口用于和邻居卫星进行通信，典型配置中卫星配置四条星间链路，分别用于连接同轨道内的前后两颗卫星、以及左右两个相邻轨道平面的两颗卫星。因此针对LEO卫星网络中任意一个节点，最多有如下四种下一跳：

1. 连接同轨道且按照自身卫星编号递增的下一跳
2. 连接同轨道且按照自身卫星编号递减的下一跳
3. 连接异轨道且按照自身轨道编号递增的下一跳
4. 连接异轨道且按照自身轨道编号递减的下一跳

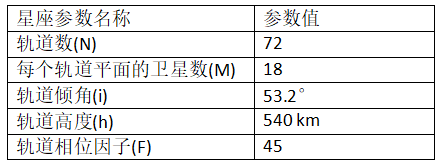
需要注意的是，如上的四种下一跳中，判断编号递增和递减时需要考虑编号溢出最大值N或M的情况。例如当前卫星轨道号为X,卫星编号为Y，则递增时的卫星编号的变化公式为（Y+1）Mod M，轨道编号的变化公式为（X+1）Mod N；递减时卫星编号的变化公式为（Y-1 + M） Mod M，轨道编号的变化公式为（X-1+N）Mod N。

整个路由决策也是一种分类问题，即根据当前卫星所在的区域信息以及目的卫星所在的区域信息，判断出当前卫星影响选择选择四类下一跳的哪一类，对应即是路由决策结果。因此采用基于机器学习的原理，提炼出决策模型并应用到交换机中，从而替代传统的路由算法，以节省传统路由所消耗的带宽资源、算力资源等。

基于机器学习的路由算法可以充分利用大规模地理位置数据。通过仿真、收集和分析卫星、用户设备的位置信息，以及在此基础之上运行路由协议得到的全网的路由选择，可以建立全面、精确、且时间无关的节点地理位置信息和路由决策模型。这种基于历史数据和仿真数据的预测能力，也使得路由决策更加智能、精准，提高了网络的适应性。

此外，基于机器学习的路由算法还可以实现网络资源的智能分配。LEO卫星网络中，不同卫星、地面站的资源有限，需要智能分配给不同用户，而网络负载、用户需求等因素非常复杂，传统的算法难以全面考虑所有全部因素，而机器学习模型具备出色的拟合能力，其能够高效地从庞大的数据集中学得复杂的关联关系，从而更有效地引导和优化路由决策。随着数据采集技术和机器学习算法的不断发展，这种应用将会在未来的LEO卫星通信领域发挥越来越重要的作用。

在后面的描述中为了方便诠释我们的方案，我们采用星链第一代星座壳层4（倾角53.2°，72个轨道面，每轨道面22颗卫星）的卫星数据进行仿真，后续称其为仿真星座，相应参数如下图所示：



图X LEO星座仿真参数

## 算法描述

基于机器学习模型的路由算法可以分为两个主要部分：机器学习和报文转发。其中机器学习部分相当于传统网络中的控制面，它基于大数据集合，学习并输出路由决策的模型数据；报文转发部分则相当于传统网络的转发面，根据路由决策的模型，推理决策出报文转发的下一跳方向，完成端到端的报文转发。

在LEO卫星网络中，卫星的运行状态和相对位置是动态变化的，需要基于动态拓扑的精准模拟基础上，仿真运行相应的路由协议，以模拟实际的数据传输。这过程中，系统记录了所有卫星节点上针对其它所有目的卫星的路由决策结果，将其作为机器学习的输入数据集合。

在获得输入数据集合之后，机器学习算法分析这些记录数据，从中学习并输出路由决策的模型数据。这个模型数据是一种智能化的路由决策模式，它基于仿真路由决策结果，可以预测未来的路由路径。机器学习算法根据数据的特征和历史行为，提供对报文进行下一跳路由决策的指导，使路由更加智能和自适应

最后，这个模型数据会被转化成适合路由器接受的match-action模式，即按顺序执行匹配条件后的动作，最终部署到交换机上。这就实现了高度智能的路径决策功能，使得LEO卫星网络能够更加高效地传输数据，适应动态环境的变化。在这个过程中，由于现有路由器技术的match-action条目的硬件资源限制，不一定能容纳所有决策树条目，因此在部署之前，需要有一个决策树压缩过程，减少条目数量，降低对路由器的硬件要求。

在总体上，这个算法的机器学习部分是一个关键的组成部分，通过学习和分析数据，使得LEO卫星网络的路由决策变得更加智能、自适应和高效。这种智能化的路由决策机制能够应对LEO卫星网络中卫星位置、用户需求等动态变化的复杂情况，提高网络性能。通过将机器学习与传统路由协议相结合，这个算法开创了一种先进的方式，以满足未来卫星通信的需求。这个算法对于提升LEO卫星网络的性能和实用性有着巨大的潜力，尤其是在大规模、高密度卫星星座下。整个系统描述图如下所示：

下载

转换

压缩

学习

转发面

路由器

路由器

路由器

路由器

决策树

数据集

压缩树

M&A

控制面

## 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，我们可以借助SGP4模型[30]来对卫星在特定时刻的位置进行高度准确的预测。SGP4模型是一种常用的卫星轨道预测模型，它基于开普勒理论和摄动力学，能够考虑地球引力、太阳引力等多种影响因素，从而精确预测卫星的位置。一旦我们确定了各个卫星的位置，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。这个距离信息对于路由算法的设计至关重要，因为在卫星网络中，信号的传输时间和路径选择直接依托于该距离，并最终影响网络的性能和稳定性。

在数据网络中，OSPF（Open Shortest Path First）路由算法是一种常用的动态路由选择协议。OSPF协议使用了Dijkstra算法，它能够基于网络拓扑动态地计算最短路径，确保数据在网络中快速、高效地传输。在卫星网络中，由于信号传播的特殊性，路径的选择需要考虑更多因素，如信号传播延迟、功耗等。因此，通过在各个卫星节点上模拟运行OSPF路由算法，我们可以获得每颗卫星到网络中其他卫星的最短路径和下一跳端口的选择，从而能够根据实际情况动态调整网络的路由策略，确保数据的快速传输和网络的稳定性。

通过仿真分析，我们需要获取用于后续机器学习的数据集，该获取的数据包括源卫星的地理位置信息（经度、纬度）,以及机器学习所需要参考的路由算法（例如OSPF）的路由结果。除此之外，由于LEO卫星网络的运行特点，星座的卫星分为两部分，一半向高纬度移动（我们称之为升轨面），一半向低纬度移动（我们称之为降轨面），这两部分的卫星只能通过最高纬或最低纬的同轨到星间连接建立通信，因此还需要获得源卫星和目的卫星分别所在的轨道面。

因此我们最终将获取如下数据集：

s\_plane：源卫星所在的通信面，属于升轨面还是降轨面。

s\_lon：源卫星所处的经度。

s\_lat：源卫星所处的纬度。

d\_plane：目的卫星所在的通信面，属于升轨面还是降轨面。

d\_lon：目的卫星所处的经度。

d\_lat：目的卫星所处的纬度。

nexthop: OSPF路由算法通过对全网拓扑的计算，获得在源卫星发送到目的卫星的下一跳选择，获得后将转换为机器学习的分类标签。

## 机器学习模型选择

机器学习模型有很多种，具体选择模型需要根据任务的性质、数据的特点和需求来决定。由于我们需要的是基于地理位置信息的数据，进行下一跳的选择，如果将下一跳视为类别的话，他们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于基于地理位置信息的机器学习。根据路由决策任务需要，我们考虑如下模型：

K最近邻（K-Nearest Neighbors，KNN）[31]：KNN算法属于分类模型的一种，它基于最近邻样本的地理位置，可以用于预测源节点的下一跳端口选择。通过计算距离来找到与新样本最相似的K个训练样本，并根据它们的端口选择进行预测。

决策树（Decision Tree）[32]：决策树算法属于分类模型，它根据地理位置的特征进行分裂和决策，从而预测源节点的下一跳端口选择。可以使用信息增益、基尼系数等指标选择最佳的地理位置特征进行分裂。

MLP多层感知机（Multilayer Perceptron）[33]：MLP深度学习模型的一种。MLP是一种前馈神经网络，由输入层、多个隐层（也称为中间层）和输出层组成，每个层都由多个神经元组成，相邻层之间的神经元之间存在权重连接，同时每个神经元都有一个激活函数。MLP模型可以学习源节点地理位置和目的节点地理位置之间的复杂关系，从而预测下一跳端口选择。

XGBoost（eXtreme Gradient Boosting）[34]是一种高效的、可扩展的机器学习算法，特别适用于回归和分类问题。它是梯度提升树（Gradient Boosting Trees）方法的一种变体，通过多轮迭代，逐渐构建一组弱学习者（通常是决策树），将它们组合成一个强大的预测模型。

我们取仿真星座数据进行仿真，以不同的数据集大小进行进行模型训练时，小数据集是用整体网络仿真第1分钟时所有数据进行学习，得到的模型预测第2分钟时节点的路由决策结果；大数据集则是用1-95分钟，以1分钟为间隔取出所有数据进行学习，得到的模型预测第96分钟时节点的路由决策结果。得到的结果如下：

图X 不同机器学习模型在不同训练数据集下的精度比较

可以看到，当数据集较小时，MLP具有最好的预测精度，但当数据集较大时，KNN/DT/MLP均具有很高的精度，且差异不大。由于决策树模型具有可解释性的优点，每个节点都可以清晰地解释为一个路由决策条件，所以LoISR中采用决策树作为最终的选择。

## 区域的划定

根据3.1节的描述，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。由于按经纬度划分可以精确地定位地球上的任何一个点, 方便地进行各种地理数据的分析，因此我们在算法实例中采用了按照经纬度颗粒来划分区域，不同的经纬度颗粒度亦代表不同的区域大小。

在算法中，区域的编号可以自然由经纬度来表述，无需引入其它编码方式。根据区域的编号进行路由决策，因此区域划分的大小将影响路由的精度，区域划分越小，学习得到的模型越大，路由的精度也越高；反之依然。我们测试了各种区域大小划分时，模型的精度和模型大小结果如下所示：

图X 各区域大小下模型精度对比 图Y 各区域大小下模型大小对比

我们采用了经度\*纬度分别为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分别进行实验，路由精度主要和OSPF路由算法的输出进行对比，如果训练出来的模型跟OSPF算法输出的结果一致时，则正确的结果加1，最终的精度则是所有正确结果和所有次数的比值。

从图X可以看到，划分的区域越大，模型输出精度总体趋势是越来越低。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而有多个选择，区域的划分越大，路由本身的模型精度越低。

但精度划分越小，模型本身也越大，可能超出现有路由器所能容忍的范围，从图Y中各区域大小下模型大小对比可以看到，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，后续的实验我们也都选择该方式作为推荐的区域划分方案。

## 模型压缩和推理

当前的互联网由于核心网路由表急剧增加，使互联网路由系统面临严重的可扩展性问题。路由器转发表一般用昂贵的TCAM存储，由此超大路由表容量对卫星路由器带来巨大的硬件成本；其次，每一个报文转发在路由器中需读取所有转发表条目进行最高优先级匹配，过大的转发表也导致巨大的能耗。在图Y中，我们已经看到决策树模型学习后的条目约八百万到1千万的量级，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，往往一个叶子节点代表卫星上路由器转发表中的一个转发条目，由此模型大小对算法落地有巨大影响。在当前的商用ASIC芯片中，尚未能达到千万量级的路由表容量，因此在得到实际的决策树模型之后，我们还需要对其进行压缩。

针对当前互联网路由器路由表项快速增长的问题，Xin Zhao等[35]提出了一种FIB（Forwarding Information Base）聚合方案，即在不改变路由下一跳的情况下，将转发表中的具有相同下一跳、且路由前缀可以聚合的多个表项组合在一起进行数据转发。这种方法成本低且效果显著，因为它可以通过路由器的软件升级来完成，而且它的影响在路由器内部是有限的，不需要更改路由协议或路由器硬件，也不会影响多宿主、流量工程或其他网络范围的操作。

但传统 FIB 聚合中，每个 IP 前缀只有一个下一跳，这限制了 FIB 聚合的压缩性能。针对这种缺点，Qing Li等[36]提出NSFIB 聚合方案，在该方案中，通过严格偏序转发和泛化下一跳的概念，先为每个IP前缀构造多个可选下一跳；由此将FIB聚合问题表述为一个优化问题，即在IP前缀可聚合的多个表项中，寻找具有相同下一跳子集的条目，进行聚合。该文证明了它可以用动态规划来解决，且开发了一种新的算法，具有恒定的复杂度O(N)，以处理在线路由更新。

决策树模型的压缩和现有基于IP前缀路由FIB条目的聚合有所区别，决策树模型中是基于管理区域的编号范围，也即区域的经纬度信息，决策树中不存在传统方案中的IP前缀覆盖的场景，所以模型压缩需要采取新的方案。

在设计决策树模型压缩时，LoISR考虑了四个级别的模型聚合，每个级别都与不同的权衡相关。我们先将决策树模型转换为trie树结构，之后在该trie树结构基础上，进行模型压缩的操作。

根据压缩操作是否影响模型预测精度，我们定义如下两种类型的压缩方式：

无损压缩：是指对压缩后的模型树，以任意一个卫星可能出现的区域作为源区域，其余区域作为目标区域，进行路由预测，预测结果和原始模型保持不变。也就要求压缩操作需要保证每一个条目都能维持压缩前的预测结果。

有损压缩：是指对压缩后的模型树，少量的部分条目可能会修改预测结果。

我们总共提出四种压缩方式，其中三种无损压缩，一种有损压缩。接下来将详细描述具体的压缩方案。

1. 无损压缩
2. 模型切片：由于每颗卫星在报文转发时，只关心自己所在的管理区域，其余区域对应的条目均不可能命中，因此对于决策树模型中，源管理区域非当前区域的所有条目，均可以裁剪，只保留当前源管理区域的条目，从而达到压缩的效果。

在LEO卫星网络中，根据每颗卫星现在的位置，能仿真、预测出该卫星未来一段时间内会经历的管理区域列表。因此根据该列表，在本步骤中可在模型中排除卫星节点未来一段时间内不会经历的管理区域的条目删除，从而达到降低模型大小。预测时间段的长短可根据实际的需要进行处理，时间段越长，路由器中的条目更新的次数越少，但对路由器的容量要求越高。

在前面的分析中，管理区域经纬度大小为0.2\*0.2，我们仿真的星链第一代星座壳层4的卫星数据（高度540KM），该区域的大小与其所处的纬度有关，在赤道区域时最大，其边长约为23.45KM。而卫星的运行速度约为7.3KM/S，因此大约卫星在一个管理区域大约停留3秒钟。由此如果卫星路由器转发表中只保留当前管理区域的条目，则需要保证秒级的路由器条目刷新操作，如果可保留20个以上的未来本卫星可能经历的管理区域的条目，则刷新周期可以保持为分钟级。

1. 下一跳合并：此步骤主要将能合并的相邻条目进行合并，类似于IP前缀的聚合处理。参见[35]中的Level2-3的FIB表聚合处理，[35]的Level1为删除与其直接祖先前缀共享相同下一跳的前缀，在这种情况在决策树模型中并不存在，所以可以不考虑。其余三种级别的聚合可参见图X。

Level2聚合在图X(a)中展示，它是当父节点本身不是判决节点且两个叶子节点均是判决节点时完成的，其压缩结果是将判决节点提至父节点来覆盖两个叶子节点的判断。这种聚合方式不修改模型的路由预测结果，严格遵循了原模型的输出。

Level3聚合在图X(b)中展示，它将一组具有相同下一跳的非兄弟判决条目聚合为超级父节点条目。在这些非兄弟判决条目之间，允许存在有不可路由的空间。这种聚合方式扩大了该下一跳的判决空间，但由于扩大的范围属于实际推理时不会遍历到的区域（例如在第一步模型切片中被分割置为无效的条目），因此对实际的判断结果并不影响。

1. 默认路由选择：在图X中展示，它利用当前成熟商用路由转发方案的默认路由技术来实现。默认路由是指在路由表中预先配置的一个路由项，当数据包的目标地址与路由表中的任何现有条目都不匹配时，数据包将被发送到默认路由指定的目标。因此我们可以将决策树模型中指向各个下一跳的条目进行统计，选择条目数最大的路由作为默认路由，从而简化路由表的结构，减少匹配规则的数量，使路由查找更加迅速。

A

A

A

(a)兄弟节点聚合

A

A

A

(b)非兄弟节点聚合

图X 无损压缩之节点聚合

A

B

C

A

A

D

A

C

A

B

C

D

C

图X 默认路由选择

1. 有损压缩

决策树模型中每个节点包含了value数组，其存储的是该节点下每个类别的样本数量，如果该节点样本数占比最大的元素，占该节点总样本的比率大于设置的阈值，则可以认为该节点所有叶子节点均选择样本数占比最大的下一跳，从而达到压缩模型条目的目的。

P4（Programming Protocol-Independent Packet Processors）是一种用于配置网络交换机数据包处理流水线的编程语言。P4 的目标是提供对网络设备数据包处理过程的更直接的控制，使网络管理员能够定义自己的数据包处理逻辑，我们将压缩后的模型最终将编译为适合于交换机的Match & Action条目，其中Match用于检查数据包的头部信息，提取出特定的属性，和路由表或转发表中的条目进行比较，以找到适当的匹配项。Action则是根据匹配结果，设备对数据包执行相应的动作，最终实现报文转发功能。

## 系统方案

之前的内容主要描述了基于机器学习路由算法中关键的机器学习模型选择、机器学习模型的生成和压缩等问题。本节主要解决当机器学习模型最终转换为路由器中可部署的Match&Action的匹配条目之后，模型部署到实际网络中的系统方案，整个系统基于如下前提：

1. LEO卫星网络中的卫星节点均能知晓自身的位置信息，以及所在的管理区域。
2. 卫星节点能知晓当前接入本卫星的所有终端信息。
3. 终端节点能知晓自身的位置信息，并且通过某些方法或协议能知晓目的节点的位置信息。
4. 节点通过自身的地理位置信息以及自身所在的轨道号，可以推测出已知位置信息的目的节点所处的轨道号。

有了如上的前提，算法部署的难点重点集中于如下问题：

1. LEO卫星网络中的卫星节点接收到地面终端的数据报文之后，只能从报文中获取目标位置，并获得目标管理区域，但并不知道该终端接入的具体卫星，因此需要解决报文转发到最终目的卫星的问题，我们称之为最后一跳问题。
2. 当前卫星并不知道终端接入卫星当前的轨道平面是处于升轨面还是降轨面，这会导致接收地面终端数据报文的卫星，不知道该向什么样的目标区域转发报文，因此也无法做出路由决策。

为了解决最后一跳的问题，我们定义一个终端信息扩散区域：它是以终端为中心，以某个预定义阈值为半径的圆形区域。接入卫星在接收到终端的接入请求之后，需要向所有邻居卫星扩散终端接入信息，扩散域即终端信息扩散区域。邻居卫星在收到广播的终端接入信息之后，先保存对应的终端信息以及对应的接入卫星，之后判断自身和终端之间的平面距离是否小于预定义的阈值，如是则需要继续向邻居进行扩散。

终端信息扩散区域必须大于管理区域的大小，这样在数据面报文转发流程中，报文向目的管理区域转发报文，转发到管理区域（或者临近管理区域）后，即进入了终端信息扩散区域，此时卫星按照先前保存的接入卫星进行确定性的路径转发，目的终端的接入卫星最后将报文转发给目的终端。

当源终端将数据报文发送给其接入卫星时，此时接入卫星无法获得目的终端所在的轨道面。我们此时没有其它选择，只能通过随机选择的方式，先假定目的终端所在的轨道面和当前接入卫星相同，由此进行转发。

当数据报文进入到最后一跳问题的范围时，如果当前卫星属于终端信息扩散区域（即其与终端位置的距离小于预定义的阈值），但卫星没有该终端接入卫星的信息，则判断出实际的终端选择在相反的轨道面，此时该卫星需要修改数据报文，将其中的目的终端轨道面修改为相反轨道面，继续进行转发。

很明显，目的终端的接入卫星如果和源终端的接入卫星不在相同的轨道面，整个转发流程将比正常的多一次转发流程，端到端的距离将不是最优。为了优化两难问题导致的传输路径浪费，目的终端在接收到报文后，需要将自身所选择的轨道面编码在报文中向源终端回应，后续的报文即可按照正确的轨道面转发。

为了解决报文转发的问题，我们需要在数据报文进入到LEO卫星网络的首节点，在报文中增加一层报文头，它重点包含如下信息：目的终端轨道面、目的终端经度、目的终端纬度、异轨下一跳方向、同轨下一跳方向。

LoISR的路由算法如下所示：

Algorithm LoISR

Require:

Ensure:

Acquire Dst\_Plane, Dst\_Longitude, Dst\_Latitude, Alien\_Orbit\_Nexthop, Same\_Orbit\_Nexthop from packet

Curr\_Inference\_NextHop = Inference(Self\_Plane, Dst\_Plane, Self\_Longitude, Dst\_Longitude, Self\_Latitude, Dst\_Latitude)

Final\_NextHop = GetNextHop(Dst\_Longitude, Dst\_Latitude, Curr\_Inference\_NextHop, Alien\_Orbit\_Nexthop, Same\_Orbit\_Nexthop)

在代码中，Inference主要用于模型推理，实际上是通过本卫星节点所处的位置信息以及报文中目标地址的位置信息，得到匹配的条目并获得对应的下一跳。GetNextHop则是根据推理下一跳、报文中异轨下一跳、报文中同轨下一跳、目标地理位置信息，进行优先级决策，获得最终的下一跳信息。其优先级决策的顺序为：

1，如果当前卫星已经到达目标轨道，则进行同轨道最短路径跳转；

2，如果报文中异轨下一跳为无效值，且推理下一跳为异轨跳转，则选择推理下一跳作为当前下一跳，并更新报文中异轨下一跳为推理下一跳；

3，如果报文中异轨下一跳为有效值，则选择报文中异轨下一跳；

4，如果报文中同轨下一跳为无效值，且推理下一跳为同轨跳转，则选择推理一跳作为当前下一跳，并更新报文中同轨下一跳为推理下一跳；

5，如果本节点处于高纬环线，且推理下一跳为同轨跳转，则选择推理一跳作为当前下一跳；

6，如果报文中同轨下一跳为有效值，则选择报文中同轨下一跳;

7，如果本节点处于高纬环线，且推理下一跳为不存在的异轨跳转下一跳，则选择和报文中同轨吓一跳反方向，当作当前下一跳。

# 性能及试验

OSPF协议的开放性、灵活性和可靠性使之成为了当前应用最广泛的路由协议，因此我们以OSPF协议作为性能评估的标准协议，并在NS3上扩展实现了针对LEO卫星网络的模拟、以及星间链路的仿真。

通过在仿真星座上运行OSPF协议，利用NS3的LOG功能，在相应的时间点将仿真星座所有节点的路由表数据打印保存。该仿真星座的一个运动周期为95分钟左右，我们通过模拟一个完整的星座运动周期，每分钟到时，获取全网所有节点的路由表，以及所有节点的地理位置信息，将其作为训练数据集，训练出决策树模型，之后对模型进行压缩。

## 无损压缩

在无损压缩方案的模型切片这一步骤，压缩的效果跟切片的源管理区域数量成反比关系，如果要保留的源管理区域数量越大，需要保留的条目越多，所以压缩比越低，反之亦然。当只需要保留单个源管理区域时，压缩效果如下：

图X 单源管理区域无损压缩的压缩率

从压缩效果来看，单源管理区域进行无损压缩之后，其最终的条目可以控制在千条的级别，完全可以满足要求。但这会需要星上路由器频繁的定期更新路由表，由此多源管理区域的无损压缩在实际应用中更有意义，我们评估了多源管理区域的无损压缩率，如下图X所示：

图X 多源管理区域无损压缩的压缩率

由于原始决策树的条目数量都一致，所以在图X中并未展示。从图中可以看到，最终的默认下一跳的无损压缩之后，包含100个源管理区域的所有条目数量在5W条左右，这依然属于对路由器转发表容量要求较小且工程应用很容易部署的数量，实际应用中可以根据具体路由器转发表容量的大小来进行选择。对于不同源区域数量，压缩后单源管理区域的平均条目数课参见下图X：

图X 无损压缩后每源管理区域平均条目

从数据上我们可以看到，如果单纯从每源管理区域平均条目数量上来看，源管理区域数量取20左右比较经济。

## 有损压缩

我们通过设置样本数阈值为99%进行压缩，并对压缩后的模型进行精度测量，不同源区域数量的决策树模型，在压缩后的压缩率如下图X所示：

图X 有损压缩模型压缩率数据

可以看到，即使依据阈值为99%的样本数压缩，模型的压缩率依然比较高，在80%左右浮动。其对精度的影响如下图Y所示

图Y 有损压缩前后模型精度比较

从图中可以看到，原始模型精度随着源区域数量不同而不同，但精度保持在99.3%左右，压缩后的模型则下降较多，最好的精度表现为20个源区域的切片模型进行的有损压缩，其精度保持在90%；而100个源区域的切片模型进行有损压缩后，精度下降到78%。

从数据中，目前采用的有损压缩方式虽然能达到一定的压缩率，但对精度的影响较大，具体通过什么压缩方式，以达到压缩率和精度的平衡，需要在后续的工作中继续研究分析。

## 整体性能

我们以OSPF作为性能的参考标准。在仿真星座中任意一个节点作为源节点，星座中所有其余节点作为目的节点，分别运行OSPF和新算法，获得两种算法端到端的路径，然后针对路径进行代价的比较。由于OSPF算法的代价在模拟仿真中取的是链路的长度，因此在整体性能比较也用路径的整体长度作为性能指标进行比较。

通过对仿真星座的模拟，第96分钟到第100分钟的端到端路径代价如下图所示：

图X 短周期内端到端路径代价比较

从图上可以看出，以第1分钟到第95分钟的数据学习到的模型，推测接下来5分钟的路径转发，绝大部分的路径差异保持在10%以内，而LoISR算法的路径长度超出最短路径长度30%以上的占整体比率较小，整体算法在规避全网协议交互的基础之上，达到了较好的效果。

我们针对模型对后续较长时间范围内的路径转发推理结果也进行了分析，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的推理验证，并取所有结果的平均占比作为数据，结果可参见如下图所示：

图X 长周期内端到端路径代价比较

从上图可以看出，长周期的结果趋势和短周期保持一直，即便在长周期内，原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%的总占比在97.064%，而超出30%以上的路径只占0.629%。

# 相关工作

。

# 结论

本文设计并实现了基于位置导向的智能卫星网络路由算法LoISR，基于对整个LEO卫星网络的一段较长时间内模拟仿真，获取出仿真的节点地理位置信息并获得仿真的各节点内部OSPF路由表，基于此进行机器学习获得决策树模型，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，模拟实验验证了LoISR算法的有效性。这种算法具有一些显著的优势：

1. 无需协议交互：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，从而有效地减少了在高动态网络中的通信开销，节省了带宽。
2. 消除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，但由于拓扑的同步需要一定的传输和处理时间才能达到所有节点一致，在尚未同步的时间段内，极易发生路由环路、路由黑洞等问题。LoISR通过机器学习的智能算法，克服了这些同步问题，提高了网络的稳定性和性能。
3. 简化了路由部署方案： 由于您的算法通过机器学习直接生成路由决策模型，避免了传统路由协议的复杂性和需要维护的路由表。这简化了路由部署方案，减少了网络管理的复杂性，提高了网络的可维护性。

# 参考文献

1. Pachler, Nils, Inigo del Portillo, Edward F. Crawley, and Bruce G. Cameron. "An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband." In *2021 IEEE international conference on communications workshops (ICC workshops)*, pp. 1-7. IEEE, 2021.
2. Andrew Jones, "The coming Chinese megaconstellation revolution"[EB], 2023-03-21, from [https://spacenews.com/the-coming-chinese-megaconstellation-revolution/].
3. Yu, W. A. N. G., L. I. Qing, L. I. Kejun, J. I. A. N. G. Changlin, W. A. N. G. Ye, J. I. A. N. G. Yong, and X. U. Mingwei. "Application Status and Analysis of Starlink Constellation." *Space-Integrated-Ground Information Networks* 4, no. 2 (2023).
4. Wikipedia contributors, Starlink[EB]. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:00, 2023-08-30, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink].
5. Chen, Quan, Giovanni Giambene, Lei Yang, Chengguang Fan, and Xiaoqian Chen. "Analysis of inter-satellite link paths for LEO mega-constellation networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 70, no. 3 (2021): 2743-2755.
6. 刘帅军, 徐帆江等. "Starlink实际星座构型研判与仿真分析"[J], 《太空与网络》, 2022-10-17.
7. Werner, Markus. "A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks." *IEEE journal on selected areas in communications* 15, no. 8 (1997): 1636-1648.
8. Wang, Junfeng, Lei Li, and Mingtian Zhou. "Topological dynamics characterization for LEO satellite networks." *Computer Networks* 51, no. 1 (2007): 43-53.
9. Jia, Min, Siyu Zhu, Linfang Wang, Qing Guo, Haitao Wang, and Zhihui Liu. "Routing algorithm with virtual topology toward to huge numbers of LEO mobile satellite network based on SDN." *Mobile Networks and Applications* 23 (2018): 285-300.
10. Mauger, Roy, and Catherine Rosenberg. "QoS guarantees for multimedia services on a TDMA-based satellite network." *IEEE Communications Magazine* 35, no. 7 (1997): 56-65.
11. Ekici, Eylem, Ian F. Akyildiz, and Michael D. Bender. "A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks." *IEEE/ACM Transactions on networking* 9, no. 2 (2001): 137-147.
12. Korçak, Ömer, and Fatih Alagöz. "Virtual topology dynamics and handover mechanisms in Earth-fixed LEO satellite systems." *Computer networks* 53, no. 9 (2009): 1497-1511.
13. Chen, Quan, Jianming Guo, Lei Yang, Xianfeng Liu, and Xiaoqian Chen. "Topology virtualization and dynamics shielding method for LEO satellite networks." *IEEE Communications Letters* 24, no. 2 (2019): 433-437.
14. Kranakis, Evangelos. "Compass routing on geometric networks." *Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG 1999), Vancouver, August*. 1999.
15. Karp, Brad, and Hsiang-Tsung Kung. "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks." In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 243-254. 2000.
16. Henderson, Thomas R., and Randy H. Katz. "On distributed, geographic-based packet routing for LEO satellite networks." In *Globecom'00-IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No. 00CH37137)*, vol. 2, pp. 1119-1123. IEEE, 2000.
17. 李贺武, 刘李鑫, 刘君, and 吴茜. "基于位置的天地一体化网络路由寻址机制研究." *Journal on Communication/Tongxin Xuebao* 41, no. 8 (2020).
18. Hu, Junhao, Lin Cai, Chengcheng Zhao, and Jianping Pan. "Directed percolation routing for ultra-reliable and low-latency services in low earth orbit (LEO) satellite networks." In *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, pp. 1-6. IEEE, 2020.
19. Xu MW, Xia AQ, Yang Y, Wang YL, Sang M. Intra-domain routing protocol OSPF+ for integrated terrestrial and space networks. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2017, 57(1): 12-17.
20. Yang Z, Li H, Qian W, Wu J. Analyzing and optimizing BGP stability in future space-based internet. *In: Proc. of the IEEE 36th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*. 2017:1-8.
21. 蒋长林, 李清, 王羽, 赵丹, 赵达毅, 江勇, and 徐明伟. "天地一体化网络关键技术研究综述." *软件学报* (2022): 0-0.
22. Pan, Tian, Tao Huang, Xingchen Li, Yujie Chen, Wenhao Xue, and Yunjie Liu. "OPSPF: orbit prediction shortest path first routing for resilient LEO satellite networks." In *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-6. IEEE, 2019.
23. Li, Yuanjie, Hewu Li, Lixin Liu, Wei Liu, Jiayi Liu, Jianping Wu, Qian Wu, Jun Liu, and Zeqi Lai. "" Internet in Space" for Terrestrial Users via Cyber-Physical Convergence." In *Proceedings of the Twentieth ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, pp. 163-170. 2021.
24. Bhosale, Vaibhav, Ahmed Saeed, Ketan Bhardwaj, and Ada Gavrilovska. "A Characterization of Route Variability in LEO Satellite Networks." In *International Conference on Passive and Active Network Measurement*, pp. 313-342. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.
25. T.S. Kelso, CelesTrak. Communications Satellites–Starlink[EB], 2023-07-02, from [https://celestrak.org/NORAD/elements/].
26. Wood, Lloyd, Antoine Clerget, Ilias Andrikopoulos, George Pavlou, and Walid Dabbous. "IP routing issues in satellite constellation networks." *International Journal of Satellite Communications* 19, no. 1 (2001): 69-92.
27. Tsunoda, Hiroshi, Kohei Ohta, Nei Kato, and Yoshiaki Nemoto. "Supporting IP/LEO satellite networks by handover-independent IP mobility management." *IEEE Journal on selected areas in communications* 22, no. 2 (2004): 300-307.
28. Stock, Gregory, Juan A. Fraire, and Holger Hermanns. "Distributed on-demand routing for leo mega-constellations: A starlink case study." In *2022 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*, pp. 1-8. IEEE, 2022.
29. Vallado D A, Crawford P, Hujsak R, et al. Revisiting spacetrack report# 3[J]//AIAA-AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Guidance, Navigation and Control and Co-located Confererces.[S.l.]:AIAA, 2006-6753.
30. T. Cover and P. Hart, "Nearest neighbor pattern classification", IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 13, no. 1, pp. 21-27, Jan. 1967.
31. J. Ross Quinlan. Induction of decision trees. Machine Learnin, 1(1): 81-106, 1986.
32. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. Nature, 323 (6088), 533–536.
33. Chen, Tianqi, Guestrin. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. KDD '16, 785–794
34. Zhao X, Liu Y, Wang L, et al. On the Aggregatability of Router Forwarding Tables. Proceedings of IEEE Infocom, 2010. 848–856
35. Li Q, Wang D, Xu M W, et al. On the scalability of router forwarding tables: nexthop-selectable FIB aggregation. In the Proceedings of the 30th Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM, Mini), 2011:321-325.