

北京航空航天大学计算机学院

# 硕士研究生学位论文

## 文献综述

论文题目：面向低轨卫星网络的轻量化链路状态路由协议设计与实现

专    业：计算机技术

研究方向：计算机网络

研  究  生：单乾

学    号：ZY2206311

指导教师：王志远

北京航空航天大学计算机学院

2023 年 11 月 17 日



## 摘 要

低轨卫星网络将成为未来天地一体化网络的重要组成部分，为用户提供泛在、可靠、全球无缝覆盖的互联网服务。低轨卫星网络具有拓扑形状可预测的特性，然而在其中进行路由时也面临拓扑动态性强、负载分布不均衡的挑战。在此基础上，本文重点介绍了低轨卫星网络星间路由协议的研究现状。

星间路由协议大致可分为静态路由与动态路由。其中，静态星间路由又可细分为基于虚拟节点的方法和基于虚拟拓扑的方法，这类方法实现较简单、协议通告开销较低，但无法处理星间链路突发性故障的情况，不能完全适用于低轨卫星网络；动态星间路由协议引入了星间链路状态通告机制，具备应对星间链路突发性故障的能力，但由此带来的通告开销较大。因此，需要进一步利用低轨卫星网络的拓扑可预测特性，设计一种新的具有负载均衡功能的星间路由协议，以更低的通告开销达到高效路由的目的。

**关键词：**低轨卫星网络，路由协议，链路状态，负载均衡



## Abstract

Low Earth Orbit (LEO) satellite networks are poised to become a vital component of future Space-Integrated-Ground Networks, providing ubiquitous, reliable, and seamless Internet services to users. LEO satellite networks exhibit a predictable topology; however, routing within them faces challenges related to dynamic topologies and uneven load distribution. Building upon this foundation, this paper focuses on the current research status of inter-satellite routing protocols in LEO satellite networks.

A systematic analysis of existing inter-satellite routing protocols reveals that they can be broadly categorized into static and dynamic routing protocols. Among these, static inter-satellite routing can be further subdivided into methods based on virtual nodes and those based on virtual topologies. While these methods are relatively simple to implement and have low protocol announcement overhead, they cannot effectively handle sudden inter-satellite link failures, rendering them less suitable for LEO satellite networks. Dynamic inter-satellite routing protocols introduce inter-satellite link state announcement mechanisms, endowing them with the capability to address sudden link failures. However, this comes at the cost of increased announcement overhead. Hence, there is a need to harness the predictable topology characteristics of LEO satellite networks to design a novel inter-satellite routing protocol with load balancing functionality, aiming to achieve efficient routing with lower announcement overhead.

**Key Words:** LEO satellite networks, routing protocol, link-state, load balancing



## 目 录

摘 要.....	2
Abstract.....	3
1. 研究背景.....	5
2. 概述.....	6
3. 国内外研究现状.....	7
3.1 低轨卫星网络.....	7
3.2 静态星间路由协议.....	8
3.2.1 基于虚拟节点的静态星间路由协议.....	9
3.2.2 基于虚拟拓扑的静态星间路由协议.....	10
3.2.3 小结.....	11
3.3 动态星间路由协议.....	11
4. 结论.....	13
5. 主要参考文献.....	14

## 1. 研究背景

《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》[1]指出，未来互联网要实现全球无缝覆盖，并以此为基础实现普惠智能的人类社会。然而，根据国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 发布的《全球连通性报告 2022》[2]，全球仍有 29 亿人仍处于“完全离线”状态。其中的一大原因是，现有的互联网基础设施主要由地面设备和光纤提供，存在着受地形限制而难以覆盖全球、易受自然灾害影响等缺点。与之相对的，卫星通信系统具有覆盖范围广、抗损坏能力强等优点，有望为全球用户提供更泛在、更可靠的无线通信服务[3]。因此，星地一体融合组网技术被认为是 6G 的十大潜在关键技术方向之一。

卫星互联网作为天地一体化网络的重要组成部分，将主要采用安装有星间链路 (Inter-Satellite Link, ISL) 的低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星星座进行建设。在域内路由方面，建成的低轨卫星网络将拥有地面网络所不具备的良好特性：

1. **节点位置的可预测性。**在低轨卫星网络轨道参数已知的情况下，任意一颗卫星在任意时刻的空间位置是易于预测的。据此可以推算任意时刻整个卫星网络拓扑图中所有“节点”的位置。

2. **邻居关系的确定性。**在常见的低轨卫星网络架构中，星间链路的连接方式是预先确定的。具体来说，每颗卫星一般通过星间链路与 4 颗邻居卫星相连：通过轨内链路与同轨道内的相邻卫星相连，同时通过轨间链路与相邻轨道上处于相邻相位的卫星相连。对于极轨道星座，卫星进入极区时会主动关闭轨间链路直到离开极区。据此可以推算任意时刻整个卫星网络拓扑图中，在不存在突发链路故障情况下所有“边”的连通性。

结合上述“节点位置的可预测性”与“邻居关系的确定性”，低轨卫星网络具有“**拓扑形状的可预测性**”，即可以得出在不存在星间链路突发性故障前提下，低轨卫星网络在任意时刻的拓扑形状。

然而低轨卫星网络在星间路由方面仍存在较大挑战，这主要是由于：

1. **较强的拓扑动态性。**低轨卫星网络的拓扑存在较强的动态性，主要是由星间链路的频繁通断引起。首先，对于极轨道星座，由于星间链路的建立需要邻居

卫星的通信天线通过机械结构对准[4]，而在轨道南北极附近由于相邻轨道间的卫星相对运动过快，在卫星经过极区时往往需要关闭其轨间星间链路，由此形成了星间链路的规律性通断。例如在 OneWeb 星座中，平均约每 1.9 秒左右都会发生一次卫星进出极区事件，由此引起的拓扑形状变化较为频繁，且与星座规模成正相关[5]。此外，星间链路也存在不可避免的突发性故障与恢复，由此形成了星间链路的突发性通断。

2. **不均衡的负载分布**。由于地球人口分布不均，地表上不同位置的用户密度与业务量不同，导致卫星网络不同位置的负载情况存在着较大差异。

而现有的应用于地面网络的路由协议如路由信息协议 (Routing Information Protocol, RIP) [6]与开放最短路径优先 (Open Shortest Path First, OSPF) 协议[7]等均假设网络拓扑不会频繁变化，且并未重点考虑负载均衡功能，故均不能很好地应用于低轨卫星网络。

于是为了进一步发挥低轨卫星网络的优势、解决低轨卫星网络的问题，有必要针对其特性设计一套新的适用于低轨卫星网络的星间路由协议，使卫星网络域内的数据传输更加快速、高效。

## 2. 概述

针对低轨卫星网络较强的拓扑动态性和不均衡的负载分布问题，需要设计一套新的适用于低轨卫星网络的**星间路由协议**，其中一般需要包含**星间路由机制**和**星间负载均衡机制**两部分。

星间路由机制主要指在低轨卫星网络中决定数据包如何在源卫星和目的卫星之间进行路由和传递的一组规则和算法，以及相关的路由信息收集策略。主要目标是使卫星在转发数据报文时选择较优的路径，即克服低轨卫星网络的拓扑动态性。现有的星间路由机制可分为静态路由机制与动态路由机制。静态路由机制中，首先基于拓扑形状的可预测性预先计算得到一个静态的网络拓扑，之后卫星根据当此静态拓扑进行路由决策；动态路由机制中，卫星之间按一定规则交互特定的路由信息，并根据自身掌握的最新路由信息进行路由决策。根据所采用星间路由机制的不同，星间路由协议可分为静态、动态两大类。

星间负载均衡机制则主要是指在路由决策的基础上调整数据报文的转发路径,将流量尽可能均匀地分配到不同的星间链路与卫星,以期网络不会出现拥塞与丢包,即克服低轨卫星网络的不均衡负载分布。现有的星间负载均衡机制主要根据卫星的转发队列占用情况判断星间链路负载状态,在星间链路负载较高时及时按特定规则调整转发路径,具体机制实现方式则与星间路由机制紧密相关。

### 3. 国内外研究现状

本章首先介绍对于低轨卫星网络的相关研究,之后着重介绍现有的星间路由协议。本文将现有的星间路由协议分为静态星间路由协议与动态星间路由协议两大类,其中静态星间路由协议又可进一步分为基于虚拟节点的星间路由协议和基于虚拟拓扑的星间路由协议,如表 1 所示。

表 1 星间路由协议分类

路由方法		基本思路	文献	优势	缺陷
静态路由	虚拟节点	将地球表面划分为虚拟节点并与卫星对应	[13]-[15] [17]	实现简单、通告开销低	受地球自转影响、无法应对链路突发故障
	虚拟拓扑	将拓扑分为快照，按当前时刻快照进行路由	[19] [21]-[23]	易实现路由转发与负载均衡机制	存储开销大、无法应对链路突发故障
	动态路由		卫星间通过链路状态报文实时交互拓扑形状	[24]-[32]	可应对链路突发故障

#### 3.1 低轨卫星网络

卫星星座按轨道高度不同,可以分为地球同步轨道 (Geostationary Earth orbit, GEO) 星座、中地球轨道星座 (Medium Earth Orbit, MEO) 和低地球轨道星座。未来的 6G 天地一体化网络中将主要采用低轨卫星网络,这主要是由于低轨卫星网络有着建设成本低、部署速度快、星地延迟低、信号覆盖好等优势。例如,相比同步轨道、中轨道星座,低轨星座的星地传播延迟可大幅降低至 2 到 12 毫秒 [4],并且星地信道有着的香农容量可提升约 30% [8]。此外,模拟结果显示,当低轨星座规模足够大时,沿卫星网络进行远距离传输的端到端时延优于沿地面光



纤网络的端到端时延[9]。这主要是由于信号在卫星网络的无线信道中可沿直线传播，但在光纤网络中由于全反射原理需要沿折线传播。

由于低轨卫星网络的独特优势，目前许多商业主体正加紧部署自己的星座，部分星座的主要参数信息如表 2 所示[10]。

表 2 部分低轨卫星星座主要参数

	每轨道卫星数	轨道数	卫星总数	轨道高度	轨道倾角
Starlink	22	72	1584	550km	53°
OneWeb	40	18	720	1200km	87.9°
Kuiper	34	34	1156	630km	51.9°
Iridium	11	6	66	780km	86.4°

当前阶段正在建设的低轨卫星网络中，大多数星座并没有配备星间链路。在这种情况下，卫星只是两个地面站之间的中继，端到端的传输呈“弯管式”特点。为了进一步发挥低轨卫星网络的优势，相关厂商正在开展星间链路的研发与部署测试[11]。这些星间链路广泛采用 Ku、Ka 及以上频段，再结合相关硬件技术如高增益天线、相控阵多波束等，使得单星容量可达数十 Gbit/s[12]。在未来，安装有星间链路的低轨卫星网络正式建成后，将成为天地一体化网络中一个重要的，同时又具有相对独立性的一个域。

近年来针对低轨卫星网络的研究较多，且主要集中在星地链路切换策略（如[13]-[15]）、地面信关站布局优化设计（如[16]-[18]）、卫星网络安全接入（如[19]-[21]）、星间路由协议等方面。本文主要关注星间路由协议部分。

### 3.2 静态星间路由协议

由于低轨卫星网络的拓扑形状可预测性，静态路由方法的核心思想是在时间和空间上对低轨卫星网络的拓扑进行划分，变动态拓扑为静态拓扑，从而尽可能屏蔽低轨卫星网络的动态性。各卫星根据静态拓扑进行路由选择与转发，卫星之间一般没有控制报文交互。根据具体实现方法的不同，静态路由方法可大致分为基于虚拟节点和基于虚拟拓扑等方法。



### 3.2.1 基于虚拟节点的静态星间路由协议

基于虚拟节点的静态星间路由协议将地球表面按一定规律划分为若干个小的区块,称为虚拟节点 (virtual node, VN)。每个虚拟节点的逻辑位置是固定的,与其上空最近的一颗卫星形成映射关系。当这颗卫星由于轨道运动离开该虚拟节点时,其轨道上的后续卫星将接管该逻辑位置。在这种情况下,路由可在虚拟节点构成的静态虚拟网络上分布式地执行。具体来说,地面用户进行通信时,只需根据地理位置即可推知其所在的虚拟节点,并进一步获知其所映射的卫星。而在卫星进行路由选择时,主要根据当前卫星和目的卫星的相对空间位置关系,沿“最短路径”进行转发。注意不同的协议对“最短路径”的定义可能不同,可能是最小路由跳数的路径,也可能是最小传播时延(不考虑排队时延)的路径,还可能是最小端到端时延的路径等。并且由于虚拟网络是静态的,卫星之间不会交互任何拓扑信息,所以该种协议的控制开销较小。

例如,在早期提出的分布式路由算法 (Distributed Routing Algorithm, DRA) 协议[22-23]中,每颗卫星会根据自身与目的卫星的相对空间位置,分布式地将收到的数据报文沿最小传播时延路径转发。DRA 具有较简单的星间负载均衡机制:若当前卫星最小传播时延路径上的转发队列占用率超出阈值,则选择一个处在最小路由跳数路径上的其他出接口作为下一跳。因此,DRA 协议中的星间负载均衡机制可以看做是对星间路由机制的修正。

而在后期的基于邻居卫星负载状态的分布式路由算法 (distributed routing algorithm based on the load status of neighbor satellite, DRNL) [24]中,星间负载均衡机制成为星间路由机制做出选路决策的主要依据。具体来说,DRNL 中每颗卫星根据自身所有出接口转发队列的占用情况计算自身的负载等级并与邻居卫星交互。星间路由机制在所有候选的最小跳数路径中,依概率选择负载等级低的路径。

然而,这种在地球表面建立虚拟节点的方法不能消除地球自转引起的拓扑动态性。由于地球自转的存在,在虚拟网络建立较长时间后,卫星轨道面将大幅度偏离原本映射到的地面虚拟节点,因此无法支持虚拟节点的切换。此时,除非建立一个新的虚拟网络,基于虚拟节点的静态路由协议将失效。而重新建立虚拟网络的控制开销往往是不可接受的[25]。



为了消除地球自转的影响,有研究提出基于天球区域划分的虚拟节点 (celestial sphere division based virtual node, CSD-VN) 方法[26],把划分地球表面改为划分天球表面,即虚拟节点不是位于地表而是位于天球。这种方法可以完全屏蔽卫星间拓扑的动态性,然而却又无法解决星地之间的动态性,即无法根据地面用户的地理位置得到其所对应的虚拟节点。

### 3.2.2 基于虚拟拓扑的静态星间路由协议

基于虚拟拓扑 (Virtual Topology, VT) 的静态路由协议根据低轨卫星网络的拓扑形状的可预测性,将网络拓扑按时间离散化并分为一系列快照[27]。当快照的时间片足够短时,可以认为卫星在这段时间内几乎没有发生运动,即该时间片内的网络拓扑是静态的。每颗卫星存储一个轨道周期内的所有快照,并根据当前时间选取对应的快照,并按此快照内的静态拓扑进行路由。

在基于虚拟拓扑的静态星间路由协议中,由于每个快照中的拓扑是完全已知且完全静态的,可以较容易地为该快照建立路由表。例如有研究[28]使用深度优先搜索 (Depth First Search, DFS) 结合 Dijkstra 算法[29]在静态拓扑中以较高的计算效率得到符合要求的路径。

此外,在星间负载均衡机制方面,与基于虚拟节点的方法不同,基于虚拟拓扑的静态星间路由协议不再关注虚拟节点而关注卫星本身,于是利用卫星的历史负载信息进行负载均衡成为可能。例如基于优先级的适应性路由 (priority-based adaptive routing, PAR) 协议[30],卫星的每个网络接口都根据其历史与当前信息 (如丢包率、转发队列占用长度等) 被赋予优先级,每颗卫星在进行转发时都按优先级在候选下一跳中做出选择,从而尽可能达到负载均衡。另如基于星间链路属性的软件定义低轨卫星网络动态路由 (Dynamic Routing for Software-Defined LEO Satellite Networks based on ISL Attributes, IADR) [31]协议,使用软件定义网络 (software defined network, SDN) 的技术将低轨卫星网络分为控制平面与数据平面,由控制平面生成快照、计算路由。IADR 中根据链路信噪比、收发包速度等定义了链路和路径的利用率,控制平面负责收集全局所有链路的利用率并沿利用率最高的路径转发数据包。由于要收集全局实时信息,IADR 的控制开销较大。再如紧凑显式多路径路由 (Compact Explicit Multi-Path Routing, CEMR) [32]则在



虚拟拓扑的基础上,为源卫星和目的卫星计算多条路径,将流量分配到多条路径上传输,从而平衡网络的流量负载、提高网络吞吐量。

综上可知,基于虚拟拓扑的静态星间路由协议可较容易地实现星间路由转发机制,也有着多种手段实现星间负载均衡功能。然而随着低轨卫星网络规模的扩大,卫星网络的拓扑动态性增强,星上需要存储数量更多、持续时间更短的快照,从而带来更大的拓扑管理和路由开销[5],可能并不适用于未来的大规模低轨卫星网络。

### 3.2.3 小结

本节介绍了静态星间路由协议的两大种类:基于虚拟节点的静态星间路由协议和基于虚拟拓扑的静态星间路由协议。基于虚拟节点的静态星间路由协议将地球表面按一定规律划分为若干个虚拟节点,每个虚拟节点与其上空最近的一颗卫星形成映射关系。这种协议控制开销较小,但是难以克服地球自转的影响。基于虚拟拓扑的静态星间路由协议将网络拓扑按时间切片为一系列快照,每颗卫星按照当前时刻的快照进行路由。这种协议便于实现星间路由与星间负载均衡功能,但控制开销较大。

此外,静态星间路由协议还有着共同的缺点,即鲁棒性较差、难以应对星间链路突发性故障的情况。由于默认拓扑是保持静态的,且卫星间不交互实时的拓扑信息,静态星间路由协议无法及时获取链路的突发故障,可能导致错误的路由决策。由此可见,完全静态的星间路由协议可能难以实际用于未来的大规模低轨卫星网络中。

## 3.3 动态星间路由协议

动态星间路由协议的核心思想是容忍一定程度的拓扑动态性,使卫星之间交互网络拓扑信息与负载状况信息,并根据自身掌握的信息实时地做出路由决策,从而能够对星间链路的突发性故障与网络流量变化做出反应。动态星间路由协议中,最典型的是链路状态(link-state, LS)路由协议,即卫星之间交互链路状态信息并各自独立地维护链路状态数据库(link-state database, LSDB),根据自身掌握的链路状态数据库的内容选择最短路径。

用于地面网络的最经典的动态路由协议是 OSPF 协议。在 OSPF 协议中，每当链路状态发生变化（即链路断开或恢复）时，相关路由器都会产生链路状态通告 (link-state advertisement, LSA) 信息并以洪泛 (flooding) 的方式传播给同一个 OSPF 区域 (area) 中的所有路由器。然而由于低轨卫星网络较大的规模与较强的拓扑动态性，原始 OSPF 协议会出现频繁的链路状态通告与洪泛，带来大量控制开销（主要是发送链路状态信息带来的网络开销），难以直接应用。于是有较多动态星间路由协议致力于对 OSPF 进行修改，使其更加适用于低轨卫星网络。此类协议通常认为整个低轨卫星网络处在同一个 OSPF 区域中，因此每颗卫星需要掌握整个低轨卫星网络的所有链路状态。

为了减小协议的通告开销，一种思路是利用低轨卫星网络的拓扑形状可预测性，降低链路状态通告的频率。例如 OSPF+ 协议[33]中每颗卫星基于自身与邻居卫星的轨道参数进行拓扑预测，此外还扩展了 OSPF 的邻居状态机，对于受辐射干扰而误码率较高的链路有着较高鲁棒性。又如 OPSPF 协议[34]在静态路由的基础上引入动态路由，周期性计算静态拓扑以屏蔽卫星运动导致的动态性，只对于突发性链路故障采用动态路由。

另一种思路是减小每次链路状态通告的开销。如基于洪泛拓扑剪枝的轻量化路由洪泛方法[35]提出了“洪泛拓扑”的概念，在需要进行链路状态通告时首先从整个低轨卫星网络拓扑中选择一个最优的最小生成树作为洪泛拓扑，链路状态通告报文只在此洪泛拓扑上传播，能够在确保所有卫星收到链路状态通告的前提下达到尽可能小的控制开销。

还有一种思路是参考 OSPF 协议中划分区域的方法，将整个低轨卫星网络划分为若干个区域，确保以区域为粒度的拓扑形状基本稳定，使链路状态通告的范围限制在本区域内，从而减小链路状态通告开销。例如，基于区域的卫星路由 (area-based satellite routing, ASER) 协议[36] 首先对低轨卫星网络进行区域划分，然后基于链路状态建立域内路由表和域间路由表，并提出了结合域内路由表和域间路由表形成转发表从而提高转发效率的算法，提升了在大规模卫星网络上的可扩展性。又如基于逻辑路径标识的分层路由协议 (logic path identified hierarchical routing, LPIH) [37]，将区域间的多条物理路径映射到一个逻辑路径标识上，使得区域间路由的表现更好。

此外也有方法从计算复杂度的角度减小协议带来的计算开销、加快路由收敛速度,如从 Dijkstra 算法改进而来的稳定性路由 (Stable Route) 算法[38],在网络拓扑发生改变时从多个花费相同的候选最短路中选择合适的路径,使得路由表的变化较小,减少了路由震荡的出现。

在星间负载均衡方面,由于链路状态协议的 LSDB 中一般不存储链路负载信息,协议做出的路由决策并不会考虑链路负载,因此往往需要额外的负载均衡机制对路由决策进行修正。即如果基于 LSDB 算出的最短路径负载较高,负载均衡机制会使数据包向备份路径转发。例如显式负载均衡 (explicit load balancing, ELB)[39]机制中,每颗卫星根据自身所有转发队列的占用率计算自身“拥塞状态”信息并定时将其与邻居卫星交互。当邻居卫星拥塞状态较严重时,需要重新计算备用路径并将流量分配到备用路径以缓解邻居卫星的拥塞。在此基础上,基于交通灯的智能路由 (traffic-light-based intelligent routing, TLR) 策略[40]综合考虑当前卫星与下一跳卫星的负载状况,将每个转发队列的负载程度映射到交通灯的三种颜色上,红色表示负载较高,黄色表示负载适中,绿色表示负载空闲,最终根据交通灯颜色调整下一跳接口。也有研究[41]将低轨卫星网络中的流量分为 A、B、C 三类,并通过预测卫星网络的拥塞情况,动态地平衡负载并分配资源,以确保满足不同业务的需求的服务质量 (quality of service, QoS) 需求。

## 4. 结论

针对低轨卫星网络的拓扑动态性的问题和负载分布不均衡的问题以及拓扑形状可预测性的特性,本文介绍了多种星间路由协议。其中,静态星间路由协议利用拓扑形状可预测性生成静态拓扑,协议通信与计算开销较小,但不能很好应对突发性的星间链路故障;动态星间路由协议动态地收集链路状态信息,能对星间链路故障和负载情况变化做出及时响应,但协议的通信开销较大。因此,需要在现有动态星间路由协议的基础上,进一步利用低轨卫星网络的拓扑形状可预测性减小通信开销。此外,现有的动态星间路由协议中,基于 LSDB 信息做出的路由决策不能充分考虑负载信息、需要负载均衡机制对已做出的路由决策进行修正,可以考虑将链路负载信息融合进 LSDB 中,从而在进行路由决策时即可达到负



载均衡的效果。

## 5. 主要参考文献

- [1] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[J]. 2021.
- [2] Kende M, Livingston S, Minehane S, et al. Global Connectivity Report 2022[J]. Tech. Rep., 2022.
- [3] 郑爽, 张兴, 王文博. 低轨卫星通信网络路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 97-105.
- [4] Al Homssi B, Al-Hourani A, Wang K, et al. Next generation mega satellite networks for access equality: Opportunities, challenges, and performance[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(4): 18-24.
- [5] Wang J, Li L, Zhou M. Topological dynamics characterization for LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(1): 43-53.
- [6] Hedrick C L. RFC1058: Routing information protocol[J]. 1988.
- [7] Moy J. RFC2328: OSPF Version 2[J]. 1998.
- [8] Giordani M, Zorzi M. Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2020, 35(2): 244-251.
- [9] Bhattacharjee D, Aqeel W, Bozkurt I N, et al. Gearing up for the 21st century space race[C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. 2018: 113-119.
- [10] Li Y, Li H, Liu W, et al. A case for stateless mobile core network functions in space[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. 2022: 298-313.
- [11] Carrizo C, Knappek M, Horwath J, et al. Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations[C]//Free-Space Laser Communications XXXII. SPIE, 2020, 11272: 8-18.
- [12] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状[J]. Journal on Communications, 2022.
- [13] Cho S, Akyildiz I F, Bender M D, et al. A new connection admission control for spotbeam handover in LEO satellite networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8: 403-415.
- [14] Liu S, Hu X, Wang W. Deep reinforcement learning based dynamic channel allocation



- algorithm in multibeam satellite systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15733-15742.
- [15] Li J, Xue K, Liu J, et al. A user-centric handover scheme for ultra-dense LEO satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1904-1908.
- [16] Guo J, Rincon D, Sallent S, et al. Gateway placement optimization in LEO satellite networks based on traffic estimation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 3860-3876.
- [17] Lyras N K, Efrem C N, Kourogiorgas C I, et al. Optimum monthly based selection of ground stations for optical satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1192-1195.
- [18] Zhou D, Sheng M, Wu J, et al. Gateway placement in integrated satellite-terrestrial networks: Supporting communications and Internet of Remote Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(6): 4421-4434.
- [19] Han M, Cao L, Lei Y, et al. Handover Authentication Mechanism Based on Consensus and Ticket for Space Information Network[C]//2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2021: 2217-2224.
- [20] Deng X, Shao J, Chang L, et al. A blockchain-based authentication protocol using cryptocurrency technology in LEO satellite networks[J]. Electronics, 2021, 10(24): 3151.
- [21] Wang S, Zhao G, Xu C, et al. A NTRU-Based Access Authentication Scheme for Satellite Terrestrial Integrated Network[C]//GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2022: 3629-3634.
- [22] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 2001, 9(2): 137-147.
- [23] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. Datagram routing algorithm for LEO satellite networks[C]//Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064). IEEE, 2000, 2: 500-508.
- [24] 杨明川, 薛冠昌, 李清毅. 基于邻居卫星负载状态的低轨卫星分布式路由算法[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 43-51.
- [25] Korçak Ö, Alagöz F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in Earth-fixed LEO satellite systems[J]. Computer networks, 2009, 53(9): 1497-1511.



- [26] Chen Q, Guo J, Yang L, et al. Topology virtualization and dynamics shielding method for LEO satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 24(2): 433-437.
- [27] Qu Z, Zhang G, Cao H, et al. LEO satellite constellation for Internet of Things[J]. IEEE access, 2017, 5: 18391-18401.
- [28] Jia M, Zhu S, Wang L, 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: 285-300.
- [29] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[M]//Edsger Wybe Dijkstra: His Life, Work, and Legacy. 2022: 287-290.
- [30] Korçak Ö, Alagöz F, Jamalipour A. Priority - based adaptive routing in N GEO satellite networks[J]. International journal of communication systems, 2007, 20(3): 313-333.
- [31] Han Z, Zhao G, Xing Y, et al. Dynamic routing for software-defined LEO satellite networks based on ISL attributes[C]//2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2021: 1-6.
- [32] Jianjun B, Xicheng L, Zexin L, et al. Compact explicit multi-path routing for LEO satellite networks[C]//HPSR. 2005 Workshop on High Performance Switching and Routing, 2005. IEEE, 2005: 386-390.
- [33] 徐明伟, 夏安青, 杨芫, 等. 天地一体化网络域内路由协议 OSPF+[J]. 2017.
- [34] Pan T, Huang T, Li X, et al. OPSPF: orbit prediction shortest path first routing for resilient LEO satellite networks[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019: 1-6.
- [35] Ruan G, Pan T, Lu C, et al. Lightweight Route Flooding via Flooding Topology Pruning for LEO Satellite Networks[C]//ICC 2022-IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2022: 1149-1154.
- [36] Zhang X, Yang Y, Xu M, et al. Aser: Scalable distributed routing protocol for leo satellite networks[C]//2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN). IEEE, 2021: 65-72.
- [37] Yan F, Lian P, Luo H, et al. Logic Path Identified Hierarchical (LPIH) Routing for LEO Satellite Network[C]//2022 IEEE International Conference on Satellite Computing (Satellite). IEEE, 2022: 19-24.





- [38] Luo Z, Pan T, Song E, et al. A refined dijkstra's algorithm with stable route generation for topology-varying satellite networks[C]//2021 IEEE 41st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2021: 1146-1147.
- [39] Taleb T, Mashimo D, Jamalipour A, et al. Explicit load balancing technique for NGEO satellite IP networks with on-board processing capabilities[J]. IEEE/ACM transactions on Networking, 2008, 17(1): 281-293.
- [40] Song G, Chao M, Yang B, et al. TLR: A traffic-light-based intelligent routing strategy for NGEO satellite IP networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3380-3393.
- [41] Nishiyama H, Kudoh D, Kato N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1998-2007.