

北京航空航天大学计算机学院

硕士学位论文开题报告

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 15 日

目 录

1. 论文研究背景与意义.....	1
2. 国内外研究现状.....	3
2.1 静态星间路由协议.....	4
2.1.1 基于虚拟节点的静态星间路由协议.....	4
2.1.2 基于虚拟拓扑的静态星间路由协议.....	6
2.1.3 小结.....	7
2.2 动态星间路由协议.....	7
3. 论文研究内容与技术路线.....	9
3.1 研究目标与创新性.....	9
3.2 研究内容.....	10
3.3 技术方案.....	11
3.3.1 研究内容一：局部化星间链路状态传播机制.....	12
3.3.2 研究内容二：细粒度星间链路负载感知机制.....	16
3.3.3 研究内容三：性能验证与协议实现.....	18
4. 论文研究计划.....	21
4.1 工作进度安排.....	21
4.2 论文工作基础.....	22
4.3 可能遇到的问题与解决途径.....	22
5. 主要参考文献.....	22

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

1. 论文研究背景与意义

《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。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%[5]。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[6]。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 1 所示[7]。

表 1 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°

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，且与星座规模成正比相关[8]。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) [9]与开放最短路径优先 (Open Shortest Path First, OSPF) 协议[10]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. 国内外研究现状

本章着重介绍现有的**星间路由协议**，其中一般包含**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。

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和卫星，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。

本文根据星间路由协议所采用路由机制的不同，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 2 所示。

表 2 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	通告开销高、需额外设计负载均衡机制

2.1 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。

2.1.1 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[13][14]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) [15]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[16]。

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[17]，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。

2.1.2 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[18]。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[19]使用深度优先搜索 (Depth First Search, DFS) 结合 Dijkstra 算法[20]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[21]，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) [22]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) [23]

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。

综上所述，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[8]，可能并不适用于未来的大规模低轨卫星网络。

2.1.3 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。

2.2 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[24]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[25]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[26]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[27]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) [28],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[29],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)[30]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[31]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[32]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。

3. 论文研究内容与技术路线

3.1 研究目标与创新性

本研究针对低轨卫星网络拓扑动态性强、负载分布不均衡的挑战，设计并实现一种新的基于局部细粒度链路状态的星间路由协议。此协议充分利用低轨卫星网络的拓扑形状可预测性，同时具有动态路由协议的特征，将实时的链路状态与链路负载信息限制在局部传播，从而达到较小的通信开销应对突发链路故障以及负载均衡的目的。本研究的创新性如下：

(1) **链路状态的局部传播**。以往的动态星间路由协议大都要求链路状态需要全网洪泛、所有卫星需要保证 LSDB 全局同步，这带来较大的通告开销。然而本研究充分考虑到低轨卫星网络拓扑形状的可预测性，卫星通过局部的链路状态交互，精确掌握自身附近一定跳数范围内的拓扑形状，同时根据拓扑形状可预测性大致推测较远处的拓扑形状。

(2) **融合的负载均衡机制**。在传统的链路状态路由协议中，链路状态一般并不包含链路负载信息。本研究将扩展“链路状态”的语义，使其同时包含链路通断信息和负载信息，于是卫星做出的路由决策就考虑到了负载状态。

(3) **完整的协议实现**。以往的研究主要通过纯软件仿真 (simulate)[33]进行性能验证。与之相对的，本研究首先通过仿真验证性能，之后在基于容器技术的模拟 (emulate) 平台上实现真实可用的协议代码。

3.2 研究内容

为实现上述研究目标，本论文将深入研究低轨卫星网络的拓扑特征，设计并实现一种轻量化的链路状态路由协议。主要内容如下：

(1) **研究内容 1：局部化星间链路状态传播机制**。每颗卫星精确掌握自身附近一定跳数范围内的链路连通性信息，同时根据拓扑形状可预测性大致推测较远处的链路连通性信息，并基于这些信息分布式地进行路由决策，从而在保证端到端传输效果的前提下，实现较小的通告开销。其包含下列子内容。

1. **基于可控传播距离的链路状态通告**：通过设置链路状态的传播距离，实现链路状态的局部化通告。

2. **基于拓扑形状可预测性的链路状态数据库维护：**每颗卫星独立维护不一致的链路状态数据库，其中存有全网所有链路状态，其来源有两种，分别为经由局部通告精确得到和通过拓扑形状可预测性推测得到。

(2) **研究内容 2：细粒度星间负载均衡机制。**拓展链路状态通告报文的语义使其在携带链路通断信息的基础上，还携带链路负载状态信息，从而实现负载均衡功能。其包含下列子内容。

1. **面向链路负载的链路状态语义扩展：**将链路状态所包含的信息从单纯的通断信息扩展为通断信息与负载状态信息，使链路状态语义的粒度得到扩展与细化。
2. **基于链路负载的链路状态传播触发：**设计触发机制，使本协议快速感知链路连通性变化（即链路断开、恢复）与链路负载变化（即转发队列排队长度增加、减少），并进行相应通告。
3. **基于链路负载的路由决策：**基于精确得到与推测得到的链路状态，综合考虑传播时延与排队时延，选择时延最短的路径进行数据包转发。

(3) **研究内容 3：性能验证与协议实现。**本研究首先进行性能验证，在确定本研究所提协议性能优于现有方法后，开展协议实现工作。其包含下列子内容：

1. **基于仿真软件的性能验证：**选取相应的基线方法，在仿真软件中实现基线方法与本协议的功能，比较不同方法的传输表现。
2. **基于容器技术的协议实现：**在基于容器技术的模拟平台中，完整实现一套真实计算机系统中可用的路由协议，包含用户态模块、内核态模块及两模块之间的消息传递机制。

3.3 技术方案

本节根据上一节的研究内容，介绍对应的技术方案。整体方案如图 1 所示。

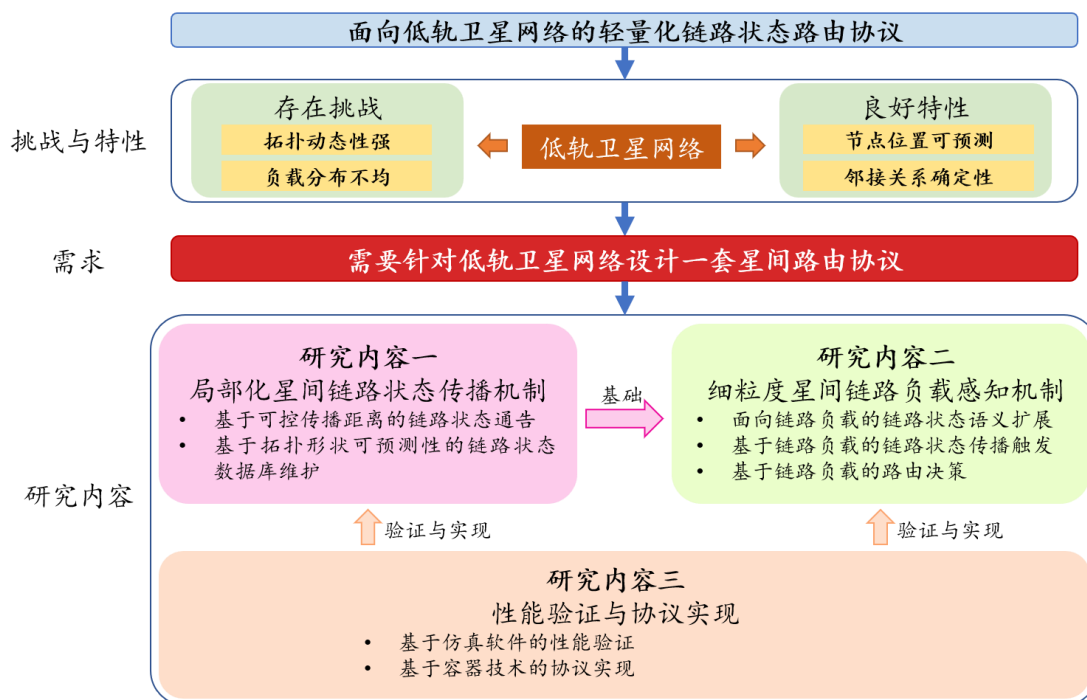


图 1 本研究整体方案

3.3.1 研究内容一：局部化星间链路状态传播机制

以往的动态星间路由协议大都要求链路状态需要全网洪泛、所有卫星需要保证 LSDB 是全局同步的，这带来较大的通告开销。然而考虑到低轨卫星网络拓扑形状的可预测性，整个网络拓扑的大致形状是可以轻易推断的，因此卫星可以不关心一条距离自己较远的链路的实时状态，只需实时关注自身附近一定范围内链路状态即可。即每颗卫星通过链路状态交互，精确掌握自身附近一定跳数范围内的拓扑形状，同时根据拓扑形状可预测性大致推测较远处的拓扑形状。在这种情况下，由于各卫星并不掌握全局实时信息，于是所做出的路由决策可能并非全局最优，但随着数据报文的传递，各卫星分布式地进行路由决策，将能够使数据报文沿着相对较优的路径转发。基于上述假设，需设计一套链路状态的局部传播机制。

(1) 基于可控传播距离的链路状态通告

在以 OSPF 为基础改进而来的大多数传统星间链路状态协议中，链路状态信息通过洪泛的方式，确保所有卫星都能收到最新的链路状态信息。在具体实现中，链路状态信息由链路状态通告 (Link-State Advertisement, LSA) 表示，一条 LSA 对应着一条链路的状态。卫星之间传递的协议报文称为链路状态更新 (Link-State Update, LSU) 报文，每个 LSU 报文封装在网际互连协议 (Internet Protocol, IP) 报文中，可能包含一条或多条 LSA。当某颗卫星收到 LSU 报文时，会触发洪泛机制。这里的 LSU 报文既可能是其本身检测到自身某条链路状态发生变化而生成的，也可能是其收到的其他卫星洪泛而来的。洪泛机制会对每条 LSA 进行检查，简化后的整体逻辑如下所示：

- 1) 检查 LSA 的校验和，若检查通过则继续执行，否则检查下一条 LSA；
- 2) 根据收到的 LSA，查询自身 LSDB 中持有的该 LSA 对应实例。若自身 LSDB 未持有对应实例或自身持有的实例比收到的 LSA 更旧，则继续执行，否则检查下一条 LSA；
- 3) 根据收到的 LSA 更新自身 LSDB；
- 4) 向所有符合条件的网络接口（一般是除收到该 LSA 的所有其它接口）发送收到的 LSA，该 LSA 会被单独或与其他一些 LSA 封装在一个新的 LSU 报文中并从该接口向外发送。

值得注意的是，所有的 LSU 报文，其生存时间 (Time to Live, TTL) 字段均为 1，即在网络中只会传播一跳，收到该 LSU 的卫星会根据上述逻辑生成新的 TTL 为 1 的 LSU 报文并继续传播。于是在传统链路状态路由协议中，链路状态信息正是通过此种“逐跳接力”的方式传播到全网的。

一般来说，一颗卫星在收到链路状态信息后，会向除收到该信息的另外 3 个网络接口转发。于是对于有 M 个轨道、每个轨道上有 N 颗卫星的整个低轨卫星网络来说，假设一条 LSA 的大小为 c 字节，将其洪泛到全网的通告开销约为 $3MNC$ 。由此可知，随着低轨卫星网络规模的增大，传统链路状态路由协议的通告开销也将不断增加。

为了实现将链路状态限制在局部传播，本研究拟采用对 LSA 设置 TTL 的方式。具体来说，本研究将使用 RFC2328[10]中的 Router-LSA 描述链路状态，其格式定义如表 3 所示。一条 Router-LSA 描述与路由器（即卫星）相连的所有链路的状态，其中的一个 (Link ID, Link Data) 元组表示一条链路状态信息。注意到其第 23 字节为全 0，可以修改为 TTL 字段。

表 3 Router-LSA 格式定义

byte1	byte2	byte3	byte4
LS age		Options	LS type
Link State ID			
Advertising Router			
LS sequence number			
LS checksum		length	
flags		0	# links
Link ID			
Link Data			
...			

于是本研究拟采用的链路状态局部传播机制，在传统洪泛机制上修改如下：

- 1) 检查 LSA 的校验和，若检查通过则继续执行，否则检查下一条 LSA；
- 2) 根据收到的 LSA，查询自身 LSDB 中持有的该 LSA 对应实例。若自身 LSDB 未持有对应实例或自身持有的实例比收到的 LSA 更旧，则继续执行，否则检查下一条 LSA；
- 3) 根据收到的 LSA 更新自身 LSDB；
- 4) 将 LSA 的 TTL 字段减 1，并更新校验和；
- 5) 若 LSA 的 TTL 字段大于等于 1，则向所有符合条件的网络接口发送该 LSA。

采用上述局部传播机制，假设初始 TTL 为 n ，则各卫星会将其直接相连的链路状态信息传播给 n 跳范围内的邻居（在无链路故障时共 $2n^2 - 2n + 1$ 颗卫星），

由此达到减小协议通告开销的目的。 $n = 1$ 的情况如图 2。如图 2 左侧所示，当卫星 S_i 和 S_j 之间的链路 L_{ij} 断开时， S_i 和 S_j 各自都事件触发式地生成 LSA，其中分别包含两颗卫星直接相连的 4 条链路状态信息。该信息被封装在 LSU 报文中向外传播 1 跳，则所有紫色的卫星都能实时掌握 L_{ij} 的链路状态。如图 2 右侧所示， $n = 1$ 时对于卫星 S_k 来说，其可以收到 1 跳范围内的邻居即 S_i 、 S_q 、 S_l 、 S_p 发出的 LSA，这些 LSA 涵盖了图 2 右侧的所有绿色链路，即任一卫星可掌握 2 跳范围内的实时链路状态。

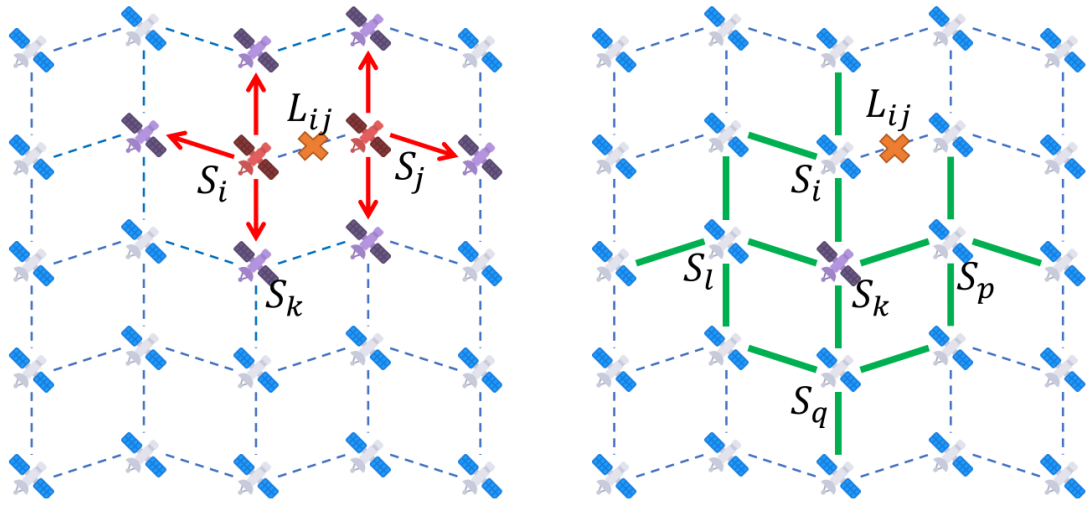


图 2 链路状态传播机制示意

由此可知，初始 TTL 值 n 的设置将是本研究的一个重要参数。若初始 TTL 设为 n ，则每颗卫星可获知 $n + 1$ 跳范围内的实时链路状态。随着 n 的增大，卫星所掌握的信息增多，做出的路由决策可能更优，但协议通信开销也会更大，所以必须在其间做出权衡。

(2) 基于拓扑形状可预测性的链路状态数据库维护

在传统的链路状态星间路由协议中，所有卫星的 LSDB 需全局一致。具体来说，当两颗卫星建立邻居关系时会通过邻居状态机交互各自持有的链路状态信息并进行相应的请求与更新，最终达到一致的 LSDB。此种 LSDB 维护方式带来较大的通告开销，且不利于相邻卫星间快速建立邻居关系。

针对这一问题,本研究充分利用低轨卫星网络中的拓扑形状可预测性,对于自身 $n + 1$ 跳范围内的链路状态,可通过上述基于可控传播距离的链路状态通告,根据收到的 LSA 实时更新,达到准确获知;对于自身 $n + 1$ 跳范围内的链路状态,无法通过链路状态通告获知,则利用拓扑形状可预测性大致推断,可计算得到当前时刻存在的规律性链路通断,并默认不存在突发性链路通断。

3.3.2 研究内容二:细粒度星间链路负载感知机制

在传统的链路状态路由协议中,LSA 一般并不包含链路负载信息,其 Link Data 字段(见表 3)包含的一般是在协议配置阶段设置的固定链路花费(cost),除非修改配置,否则此字段的值一般不会变化。这导致以往的动态星间路由协议中,LSDB 中大多只储存链路通断状态,不储存链路负载状态,于是基于 LSDB 做出的路由决策往往未考虑到负载状况。在此情况下,负载均衡机制大多作为一个单独的模块存在,负责对做出的路由决策进行修正。这还导致卫星之间除了交互链路状态信息之外,又需单独定义链路负载报文并交互,也增大了协议通信开销。本研究拟拓展 LSA 的语义,使其不仅描述链路通断状态,还描述链路负载状态,即链路负载状态与链路通断状态共同在局部进行传播,从而使本研究所提的协议内生地支持负载均衡功能。

(1) 面向链路负载的链路状态语义扩展

本研究的链路状态信息布置包含链路通断情况,也包含链路负载情况,其中链路负载情况一般由该链路的转发队列占用率定义。如图 3 所示,一颗卫星 S_1 生成的 LSA 包含与它直接相连的 4 条 ISL (L_1, L_2, L_3, L_4) 的链路状态,包括各 ISL 的通断情况与负载情况。

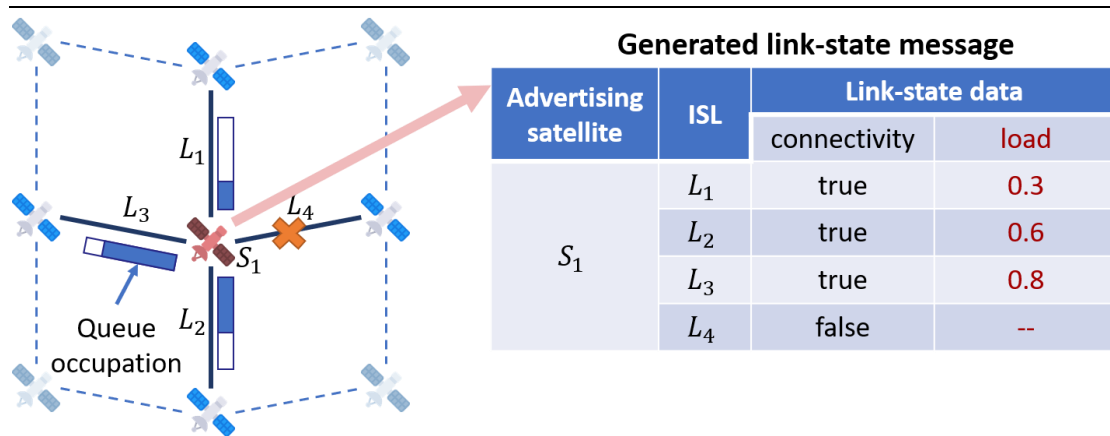


图 3 链路状态语义扩展示例

(2) 基于链路负载的链路状态传播触发

链路负载状态需要“及时”地通告给邻居卫星，即上述链路状态局部传播机制除了在链路通断状态变化时触发，还需要在负载状态满足一定条件时触发。

传统的动态路由协议中，负载状态往往是定时通告，即每隔 Δt 时间通告一次。此种定时通告的方式有较大局限性，即如果负载状态在一段较长的时间内保持基本稳定，这段时间内定时通告的内容基本相同，会带来较多的协议通信开销；此外如果 Δt 时间内链路负载状态发生了剧烈变化，负载均衡状态则无法及时更新。

针对上述局限性，本研究拟采用事件触发的方式，当转发队列占用长度超过一定阈值时，即

$$|q(t) - \tilde{q}| \geq Q \cdot \delta$$

时进行链路状态局部传播。其中 $q(t)$ 表示当前时刻的队列占用长度、 \tilde{q} 表示记录的上次局部传播时的队列占用长度、 Q 表示转发队列总长度、 $\delta \in [0,1]$ 表示阈值大小的参数。

可见 δ 是本研究的第二个重要参数。当其设置为一个较小的值时，队列占用长度每发生较小变化即会触发链路状态局部传播，使得卫星对链路负载状态较敏感，能够达到较好的负载均衡效果，但带来的通告开销也会较大；设置为一个较大值时则反之。于是 δ 值的设置将成为本研究的另一处权衡。

(3) 基于链路负载的路由决策

在进行路由决策时相比于选择最小跳数的路径,选择最短端到端时延的路径更有实用意义,于是在计算路由表时需要为每条 ISL 赋予花费值,且该花费值应综合考虑传播时延与排队时延,即

$$Cost_{link} = d_{link}^{Propa} + d_{link}^{Queue}$$

其中 d_{link}^{Propa} 、 d_{link}^{Queue} 分别代表该链路的传播时延与排队时延,其中 d_{link}^{Propa} 由卫星根据拓扑形状可预测性计算得知,即

$$d_{link}^{Propa} = \frac{L_{link}}{c}$$

其中 L_{link} 是根据拓扑形状可预测性得到的两颗卫星的空间距离, c 是光速。而 d_{link}^{Queue} 与转发队列占用长度与链路带宽有关,即

$$d_{link}^{Queue} = \frac{q(t)_{link}}{BW}$$

其中 $q(t)_{link}$ 表示进行链路状态局部通告时转发队列的占用长度,为时变值; BW 为链路带宽,为已知值。

通过此种方式,每颗卫星可由收到的 LSA 得到局部范围内所有链路的传输时延,同时根据拓扑形状可预测性推算较远处链路的传输时延,并以此选择总时延最短、负载较小的路径进行数据包转发。

3.3.3 研究内容三：性能验证与协议实现

以往的研究中,在提出星间路由协议后往往通过纯软件仿真 (simulate),并不能完全复现网络协议栈及无线信道的全部逻辑与流程,且模拟软件中的代码并不能直接移植到真实的计算机系统中。与之相对的,模拟 (emulate) 则通过物理设备或虚拟化技术构建实际的网络,对真实网络进行复刻与近似。本研究首先通过仿真验证性能,之后在基于容器技术的模拟 (emulate) 平台上实现真实可用的协议代码。

(1) 基于仿真软件的性能验证

本研究首先在 OMNeT++ 平台[34]中进行软件仿真以验证性能。OMNeT++ 是一个可扩展的、模块化的、基于组件的 C++ 仿真库和框架，可以实现离散时间仿真。其中提供了 inet 套件用于仿真各网络协议栈的功能。

本研究编写仿真代码，仿真了一个类铱星星座 (6 个轨道，每个轨道 11 颗卫星，轨道高度 780km)，并以 OPSPF、ELB 为基线开展性能验证，主要关注协议通信开销、端到端时延与传输成功率等性能指标。

在轻负载条件下，本协议(LoFi)的性能如图 4 所示。随着 n 增加，通告开销增大，丢包率、时延呈变好趋势，且收益呈边际递减趋势。特别地，链路故障率 5%， $n=3$ 时，本协议丢包率、时延与基线方法基本一致，且通告开销比基线方法减少 78%。这表明局部化星间链路状态传播机制(研究内容一)可大幅降低通告开销，同时实现较好传输效果

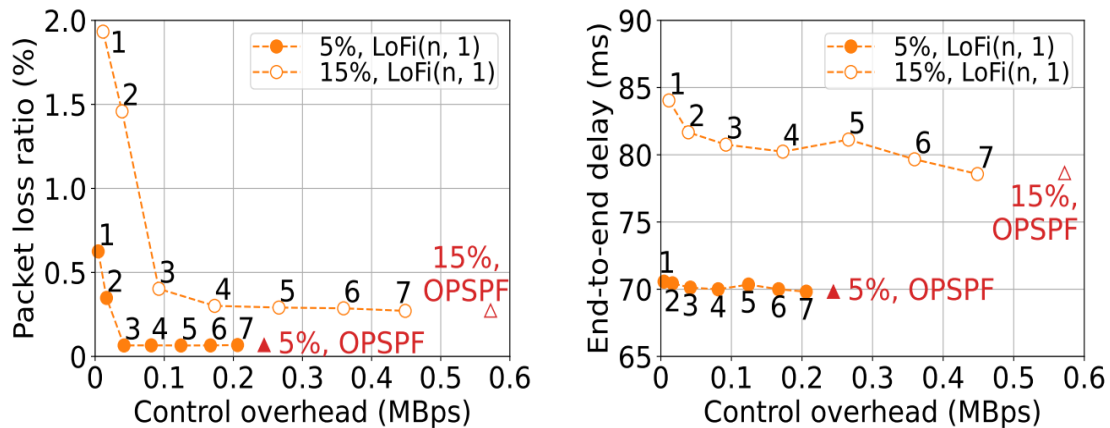


图 4 轻负载条件下的性能

在重负载条件下，本协议的性能如图 5 所示。LoFi(4, δ) 的通告开销、时延、丢包率均优于基线方法；且随着 δ 增加，通告开销变小，但丢包率、时延变差；对链路负载的感知变迟钝。这表明细粒度星间链路负载感知机制(研究内容二)能通过较小的通告开销，有效平衡链路负载。

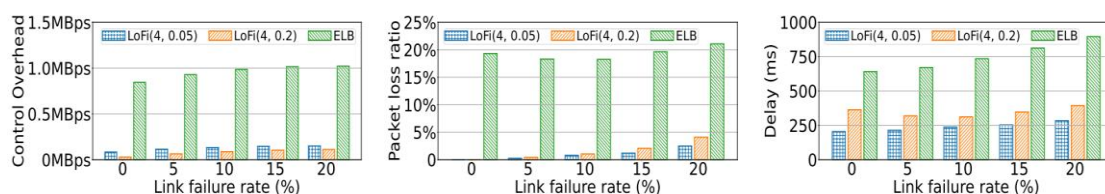


图 5 重负载条件下的性能

(2) 基于模拟平台的协议实现

本研究将在基于 Docker 容器的模拟平台上实现全套协议代码。此模拟平台框架如图 6 所示,其中使用 Docker 容器模拟卫星, Docker Bridge 模拟星间链路,并由外部控制程序配置链路带宽与传播时延以及生成随机故障事件。在容器中,用户空间运行 FRRouting 路由套件,内核为 Linux5.15.132,并有 4 个网络接口与其他容器通过 Docker Bridge 相连。其中, FRRouting 是一个适用于 Linux 平台的免费开源互联网路由协议套件,其中实现了 OSPF、BGP 等多种网络协议,可与本地 Linux/Unix IP 网络堆栈无缝集成。

本研究将在 FRRouting 的框架下编写协议在用户态的代码以实现链路状态局部传播与负载均衡功能,并相应修改内核空间中 IPv4 子模块的源代码实现相应的转发逻辑,此外还将修改 FRRouting 与内核之间的 rtnetlink 消息机制以实现链路负载状态的感知。

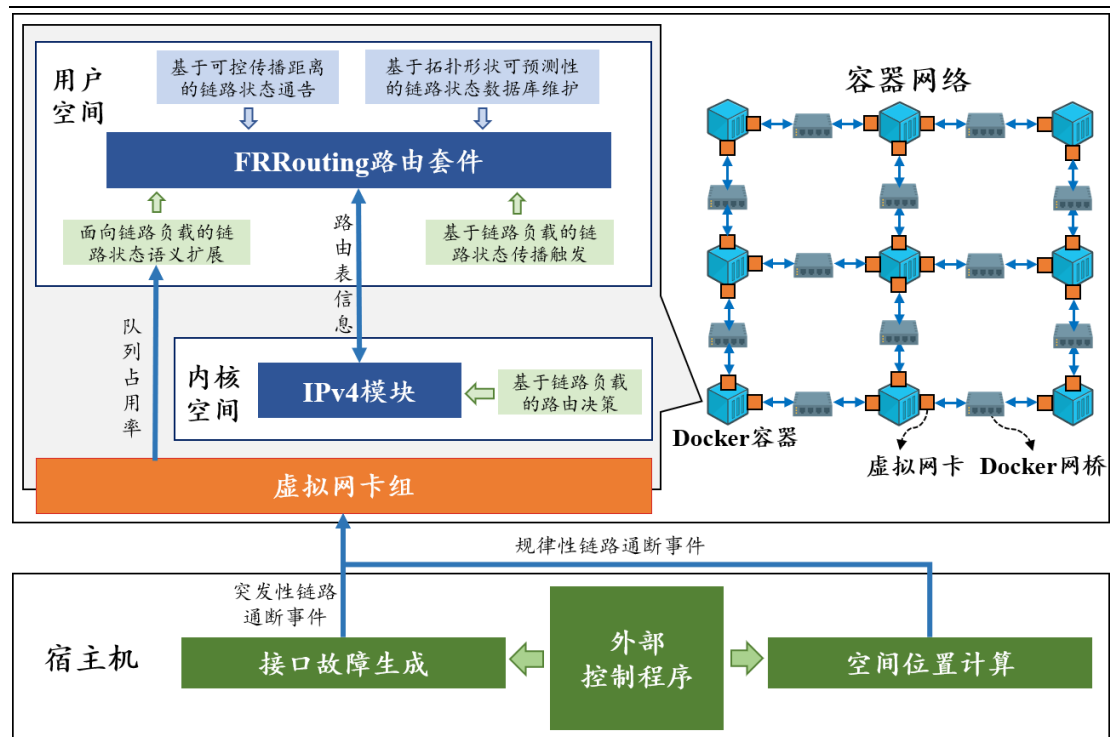


图6 模拟平台框架示意

4. 论文研究计划

4.1 工作进度安排

如下表所示。

表4 工作进度安排

时间	研究内容	完成情况
2022.9~2023.2	文献调研	已完成
2023.3~2023.5	在仿真软件中完成研究内容一	已完成
2023.5~2023.8	在仿真软件中完成研究内容二	已完成
2023.9~2023.10	学习模拟平台架构，确定协议实现方式	已完成
2023.11	准备开题	正在进行
2023.12~2024.2	考虑负载感知带来的数据包乱序问题	未完成
2024.3~2024.5	探究不同链路负载定义方式对协议性能的影响	未完成
2024.6~2024.9	在模拟平台中实现研究内容一、二	未完成
2024.10~2024.12	撰写毕业论文	未完成

4.2 论文工作基础

本研究先期工作已写成论文《Routing in LEO Satellite Networks: How Many Link-State Updates Do We Need?》并被 IEEE Satellite 2023 会议接收;

4.3 可能遇到的问题与解决途径

- 1) 基线方法代码未开源: 需按照原论文中的协议思想、工作流程与细节, 开展复现工作;
- 2) 对 Linux 内核机制不熟悉: 需广泛学习技术博客、教科书等, 了解 Linux 内核关于路由与转发的工作流并进行相应修改。

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] Giordani M, Zorzi M. Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2020, 35(2): 244-251.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Wang J, Li L, Zhou M. Topological dynamics characterization for LEO satellite networks[J].

- Computer Networks, 2007, 51(1): 43-53.
- [9] Hedrick C L. RFC1058: Routing information protocol[J]. 1988.
- [10] Moy J. RFC2328: OSPF Version 2[J]. 1998.
- [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] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Korçak Ö, Alagöz F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in Earth-fixed LEO satellite systems[J]. Computer networks, 2009, 53(9): 1497-1511.
- [17] 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.
- [18] Qu Z, Zhang G, Cao H, et al. LEO satellite constellation for Internet of Things[J]. IEEE access, 2017, 5: 18391-18401.
- [19] 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.
- [20] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[M]//Edsger Wybe Dijkstra:

- His Life, Work, and Legacy. 2022: 287-290.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 徐明伟, 夏安青, 杨荒, 等. 天地一体化网络域内路由协议 OSPF+[J]. 2017.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Taleb T, Mashimo D, Jamalipour A, et al. Explicit load balancing technique for N GEO satellite

- IP networks with on-board processing capabilities[J]. IEEE/ACM transactions on Networking, 2008, 17(1): 281-293.
- [31] Song G, Chao M, Yang B, et al. TLR: A traffic-light-based intelligent routing strategy for N GEO satellite IP networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3380-3393.
- [32] 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.
- [33] 谢景昭, 单炜, 肖畅, 等. Klonet: 面向技术创新的网络模拟实验平台[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 66-75.
- [34] Mészáros L, Varga A, Kirsche M. Inet framework[J]. Recent Advances in Network Simulation: The OMNeT++ Environment and its Ecosystem, 2019: 55-106.