

# 卫星互联网路由技术现状及展望

朱立东, 张勇, 贾高一

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

**摘 要:** 卫星互联网作为空间信息传输网络, 具备广域覆盖、可靠传输的特点, 是重要的战略基础设施。信息的全球可达及空间资源的高效利用对路由技术提出了要求, 因此对卫星互联网路由技术进行了详细阐述。由于路由策略受系统架构的影响, 首先对单层、多层卫星星座体系下的路由技术分别进行了综述; 其次考虑路由策略也往往涉及优化问题, 因此从时延、带宽、数据分组丢失率、稳健性及资源利用等方面分别对已有研究进行了回顾和介绍; 最后对进一步的研究方向进行了展望。

**关键词:** 卫星互联网; 卫星通信; 空间网络; 路由; 卫星星座

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2021166

## Current status and future prospects of routing technologies for satellite Internet

ZHU Lidong, ZHANG Yong, JIA Gaoyi

National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

**Abstract:** As a space communication network for information delivery, satellite Internet has the characteristics of wide-area coverage and reliability, which makes it an important strategic infrastructure. In satellite Internet, the routing technologies were necessary for the global accessibility of information and the utilization of space resources, thus reviewing the routing technologies for satellite Internet was focused on. Considering that the routing strategy was based on system architecture, firstly, the routing technologies for single-layer and multi-layer satellite constellation systems were reviewed respectively. In addition, routing strategies often involved optimization issues, therefore, the existing research work from the perspectives of delay, bandwidth, packet loss rate, robustness, and the resource utilization was also classified and reviewed. Finally, the further research directions were recommended.

**Keywords:** satellite Internet, satellite communication, space network, routing, satellite constellation

### 1 引言

卫星通信系统具有广域覆盖、高可靠的特点, 在社会发展、国民生活的各方面发挥着越来越重要的作用, 世界各主要大国也都在竞相部署太空基础设施, 构建天基通信网络。随着卫星通信系统与互联网的深度融合, 卫星互联网已成为天基信息传输

系统的重要组成, 近年来, 迅速推进的 Starlink、OneWeb 等大规模卫星星座系统都是卫星互联网的典型代表。随着卫星互联网的结构越来越复杂, 规模和投入越来越大, 如何高效地发挥其潜力并开展应用是卫星互联网领域的重要课题。路由技术是保证卫星互联网各节点之间互联互通的基础性技术, 也是卫星互联网的重要研究方向。

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-07-09

通信作者: 张勇, zhang.yong@uestc.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019YFB1803102); 国家自然科学基金资助项目 (No.61871422)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1803102), The National Natural Science Foundation of China (No.61871422)

卫星互联网的空间节点往往包含多颗低轨卫星，这些低轨卫星之间、卫星与地面之间存在高速相对运动，使整个网络拓扑具有时变特性，因此地面网络常用的基于静态拓扑的路由策略无法直接在卫星互联网中运用。早期卫星网络主要通过“快照技术”<sup>[1-2]</sup>来实现星上的路由转发，即基于虚拟拓扑的集中式路由机制，地面集中计算并生成每个时间片的转发表，星上存储所有时间片内的转发表，并定期进行更新。随着卫星数量的增加，对基于虚拟拓扑的静态离散时间片技术带来极大挑战，因此频繁的链路切换会导致星上存储和维护的路由表规模激增。为解决星上路由表过大的问题，卫星相对位置信息可以加以利用，因此可利用同轨道高度内卫星相对位置进行路由寻址<sup>[3]</sup>。同样利用位置的思路，采用基于地理位置信息编址的 IP 编址策略，可利用 IP 地址获取目的地址的位置信息，并计算出其相对方位，在空间节点得出它的最优转发接口进行数据分组转发，不需要邻居间交换状态信息<sup>[4]</sup>，可降低卫星网内信令开销。以上仅对当前卫星网络路由研究进行了简单描述，本文后续部分将对卫星互联网路由技术进行综述，系统归纳各类基于卫星网络的路由策略，并以此为主线介绍卫星互联网路由的研究现状及未来的发展方向。

## 2 卫星通信网组成结构

卫星互联网作为衍生于卫星通信网的信息传输系统，系统组成与常规卫星通信网类似，包括空间段、地面段及用户段，卫星通信网系统结构

如图 1 所示。

空间段由通信卫星构成，卫星的运行轨道可以分为低地球轨道 (LEO, low earth orbit)、中地球轨道 (MEO, medium earth orbit)、地球静止轨道 (GEO, geostationary earth orbit) 或倾斜地球同步轨道 (IGSO, inclined geosynchronous orbit) 等。根据星上载荷类型的不同，通信卫星可采用透明中继或星上处理的工作方式。

地面段包括关口站、网络管理中心、互联网接入等功能实体。

用户段包括各类用户终端设备及应用场景的支持设施。

卫星通信网与地面网络已逐渐开始深度融合，尤其是 5G 移动通信系统，其作为系统的系统，与卫星通信网的统筹考虑是未来信息网的一个重要方向。此外，我国的天地一体化网络建设正在稳步推进中，天地一体化网络的系统结构示意图如图 2 所示<sup>[5-6]</sup>。

## 3 不同空间段架构下的路由研究分析

卫星互联网的网络结构复杂，涉及的网络实体较多，其首要解决的是网内节点间的互联互通。因此，路由技术是保证卫星互联网内信息可靠、高效传输所必不可少的重要技术，也是本文所讨论的主要内容。从空间段架构上，网络可分为单层和多层星座结构，本节将对其分别进行讨论。

### 3.1 单层星座系统

单层星座系统的空间段卫星部署于相同轨道高度，由一个或多个轨道面构成。每颗卫星一般配

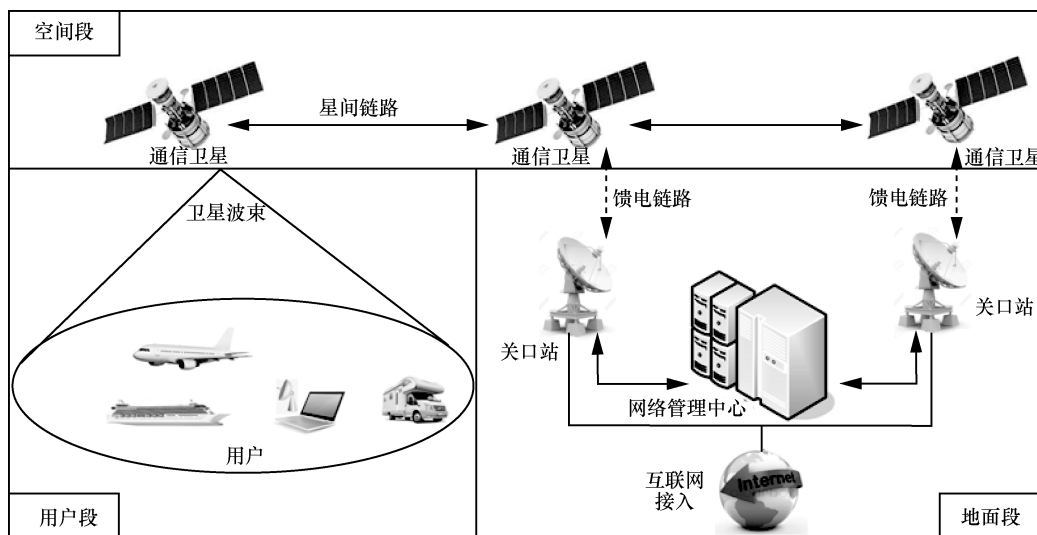


图 1 卫星通信网系统结构

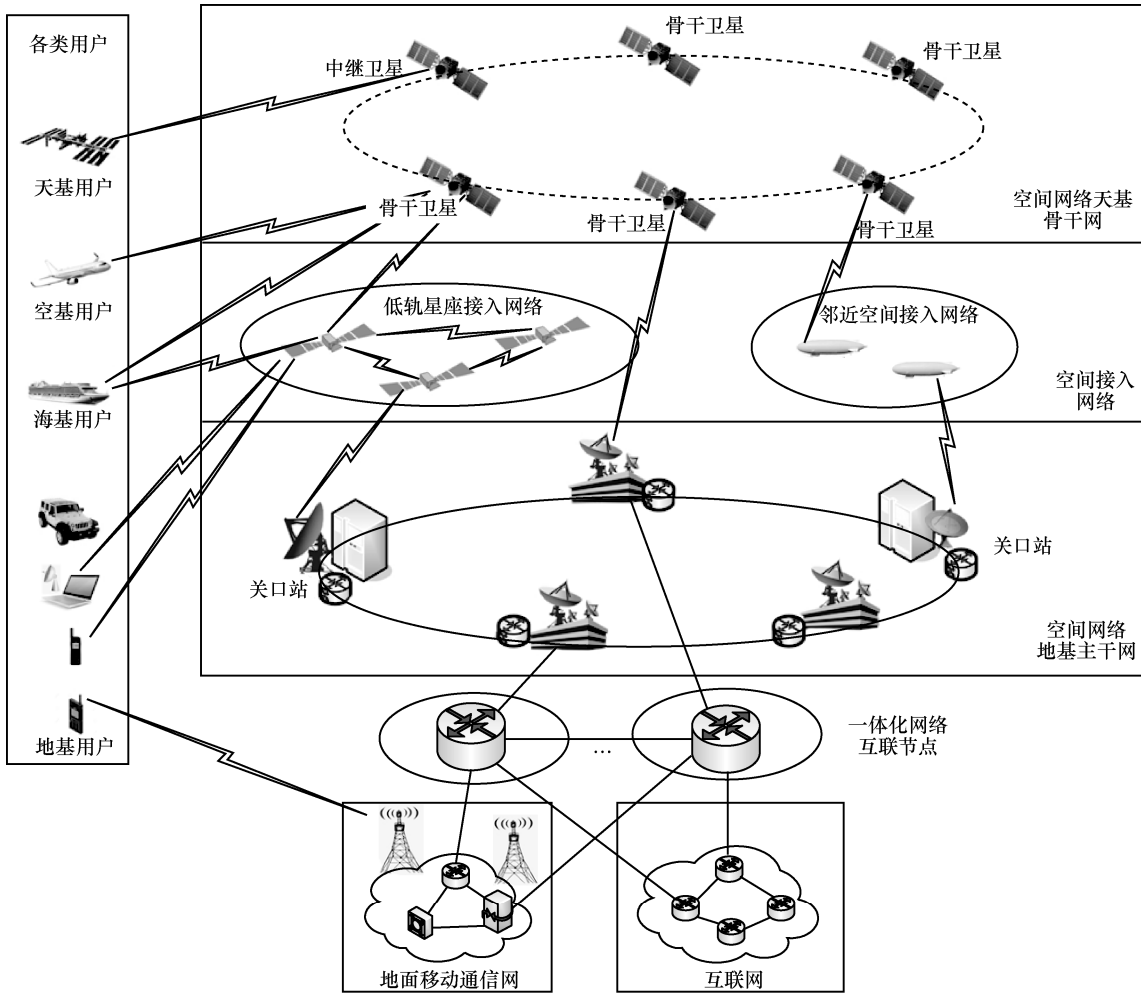


图 2 天地一体网络的系统结构示意图

有星间链路，可与同轨面及异轨面的相邻卫星进行通信。同时，卫星可通过馈电链路和用户链路分别与地面关口站和用户站进行信息交互，从而构成了一个具有多种链路的复杂天地通信系统，其结构如图 3 所示。

在基于单层星座系统的路由策略研究中，空间

段的星座往往是 LEO 星座，包括类 Celestri 星座<sup>[7-8]</sup>、类 Globalstar 星座<sup>[9]</sup>、铱星星座<sup>[10]</sup>等，这些星座均由多个轨道面及数十颗卫星组成。对于星座中的卫星节点，会充分考虑其连通性，每个节点往往由 4 条星间链路分别与最近的 4 个邻居节点互联互通，其中 2 条为同轨面内邻居节点，2 条为异轨面邻居节

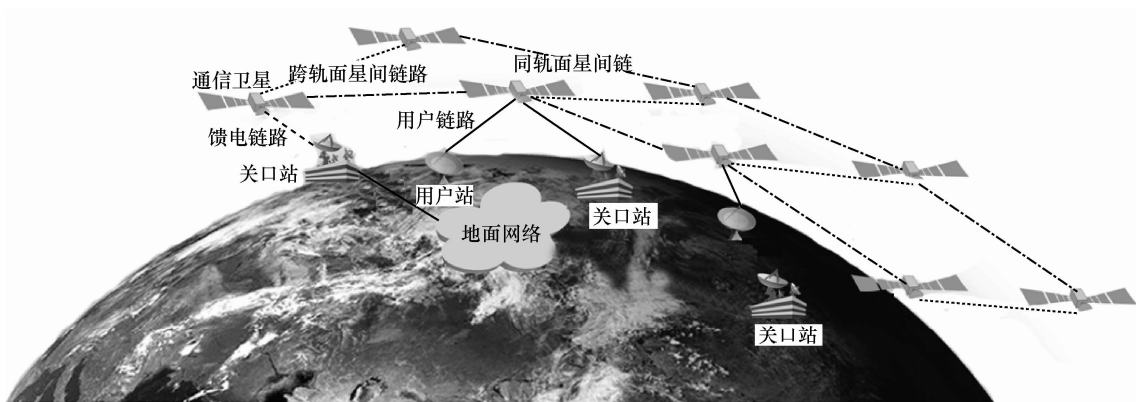


图 3 单层星座卫星互联网结构

点<sup>[7-8, 11-12]</sup>。此外，也有研究仅考虑多颗 GEO 卫星构成的单层星座<sup>[13]</sup>。

由于 LEO 卫星间的高速相对运动，导致卫星节点构成的空间拓扑结构会随时间变化，这种拓扑的时变特性是路由算法设计时着重考虑的因素。为了屏蔽空间拓扑的动态性，使其对上层透明，可采用虚拟节点的概念<sup>[9, 14]</sup>，如此卫星网上的路由算法就可承载在一个拓扑固定的虚拟网络上，方便路由层的算法设计。除了动态性屏蔽的思路外，也有研究利用星座的特性，如倾斜 Delt-LEO 星座的准不变特性，采用基于位置的路由策略，并解决死角问题<sup>[11]</sup>。死角问题是由于考虑星间切换开销，为了得到同一颗卫星的最长服务时间，地面站接入的不一定是距离最近的卫星所导致的目的地不可达问题。尽管空间节点拓扑是时变的，但考虑其变化间隔远大于数百毫秒的系统内端到端时延，因此有的研究工作路由发现阶段依然采用了洪泛的策略，并利用地面站的协同，降低对星载存储的要求<sup>[9]</sup>。

有别于传统的很多路由研究中利用卫星运行的可预测性而采用时间离散图模型，Li 等<sup>[15]</sup>提出了一种时态网格模型（TNM, temporal netgrid model）用于描述大规模小卫星系统的时变拓扑，其思路是

将整个空间分成小空间即网格，卫星能定位到网格中，而不采用每个卫星的坐标，以此构建一个网络拓扑以适应随机业务的路由。类似于网格分区的思路，Na 等<sup>[10]</sup>利用 LEO 卫星的地理覆盖特性对地域进行分区，对地面的业务量进行定量分析，并采用机器学习的方法进行卫星业务量的预测，为路由算法的设计提供参考。

### 3.2 多层星座系统

多层星座系统的空间段由不同轨道高度的卫星组成，不同的系统可能会有不同的组合，如多层 LEO、LEO/GEO、GEO/MEO/LEO 混合星座等，基于多层星座的卫星互联网系统结构如图 4 所示。

多层星座系统由于具有更复杂的空间段结构，网络中的路由设计会有不同的考虑。多层的空间段结构有 LEO/MEO 双层结构<sup>[16-17]</sup>、LEO/GEO 双层结构<sup>[18]</sup>、MEO/IGSO 双层结构<sup>[19]</sup>、LEO/MEO/GEO 三层混合结构<sup>[20]</sup>等。多层空间结构为路由策略的设计带来了更多的自由度，路由设计的策略也更多样化。比如以距离进行分工，短距离只采用 LEO 层进行路由，而长距离通过 MEO 层进行路由<sup>[16]</sup>。多层卫星之间的协同也可以根据时延或链路拥塞情况考虑，Jiang 等<sup>[18]</sup>采用的路由策略为当仅采用 LEO

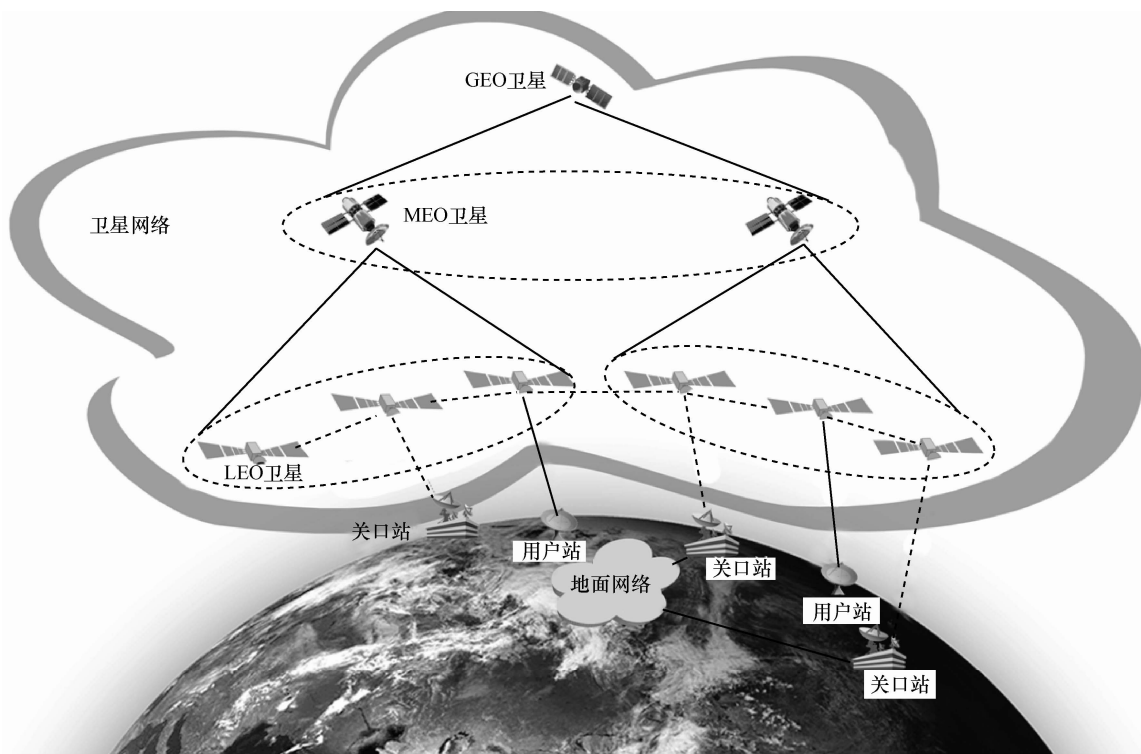


图 4 基于多层星座的卫星互联网系统结构

进行路由的跳数超过门限（该门限根据端到端时延确定）或阻塞发生时，才会激活 GEO 与 LEO 之间的星间链路，然后 GEO 层将加入路由。

在多层空间段结构中，卫星数较多，在进行路由策略研究时，可采用分组的方式进行管理。Yi 等<sup>[19]</sup>以 MEO/IGSO 混合星座作为空间段，将卫星节点分成 3 个组，所有在同一个轨道面的 MEO 卫星属于一个组，每一颗 IGSO 卫星根据空间关系隶属于一个组，3 个组形成一个超级组，均在地面控制中心的管理之下。每个组会根据其与地面控制中心的距离，选出一个卫星作为簇头，其他卫星作为组成员。组内与地面控制中心的交互均要通过簇头。在管理上，空间中的节点都作为地面控制中心的一个成员节点，实际上该系统采用的是一种基于动态分组的中心化路由策略。除了分组外，由于空间节点间的分层式结构也可以采用各层分工协同的方式，实现空间路由策略。对于由 LEO、MEO 及 GEO 卫星所组成的多层空间段卫星系统，考虑 LEO 卫星数目多，Akyildiz 等<sup>[20]</sup>对 LEO 卫星进行了分组，将每个组看作一个节点，采用逻辑位置的概念把 LEO 卫星的移动性与上层协议隔离开，使上层协议的设计不用考虑 LEO 的移动性，实现了协议上下层间的解耦。GEO 层隐藏了 LEO 的具体拓扑，从而可以降低计算复杂度，使路由表的计算更容易。GEO 卫星采用最短路径算法进行网内路由表的计算，并分发至 MEO 卫星。MEO 卫星则为 LEO 卫星创建路由表，并分发至 LEO 卫星，从而实现了空间全网路由信息的建立。

最近的研究中，一些网络结构新技术也可应用于多层卫星网络，如 SDN (software defined network) 技术。Wang 等<sup>[21]</sup>提出了一种基于 GEO/MEO/LEO 三层空间段的 SDN 架构，其中 GEO 卫星作为顶层控制节点，负责计算优化的通信链路和资源调度。MEO 卫星作为辅助路径，帮助 GEO 卫星收集地面和 LEO 卫星附近目标的信息。LEO 卫星负责接收 GEO 卫星的命令和执行信息转发功能。此外，近年来天地一体化网络作为热点研究领域，往往也具有多层的空间结构，因此其路由问题也一并放在本节进行讨论。Pace 等<sup>[22]</sup>提出的系统架构是包括地面层、中间层和卫星层的天地一体化网络，所提路由算法就是找出一组候选的最小跳数的路径，选择最小阻塞的路径为最终路由路径，因此路由问题就转换为一个最优化问题，即最小化最忙链路的使

用，并获得网络负载的均衡。Yang 等<sup>[23]</sup>针对地面成功应用的路由协议无法在天地一体化网络中有效运行的问题，利用卫星运动的可预测性，提出拓扑发现子层的概念，以避免大量路由消息的传输。

## 4 卫星互联网路由技术研究方向

卫星互联网相较于地面通信网而言，其网络拓扑具有时变性，同时星载存储、计算及功率有限，因此现有地面通信网路由策略往往无法直接应用于卫星通信网，已有许多研究根据卫星网络的特性开展了相应的路由策略探索<sup>[24]</sup>。卫星路由算法一般以一些关键性能作为考虑项开展研究，如时延、带宽、数据分组丢失率、稳健性及资源利用等，本节将对这些关键性能进行分类讨论。

### 4.1 时延、带宽、数据分组丢失率

卫星互联网路由策略的研究往往以单一或多个性能作为优化目标，这些目标与具体业务所常要求的 QoS (quality of service) 相关，如时延、带宽、数据分组丢失率等。

时延在路由研究中往往指端到端时延，时延最小化是许多路由策略的优化目标。此外，如果业务 QoS 对时延提出了要求，则总的端到端时延需满足该要求，可表示为

$$\sum_{(u,v) \in P(\text{Src}, \text{Des})} d(u,v) \leq D \quad (1)$$

其中， $P(\text{Src}, \text{Des})$  表示从源节点到目的节点的一条规划路由，它可由多条单跳链路组成； $(u,v)$  表示一条单跳链路，该单跳的起止节点分别用  $u$  和  $v$  表示； $d(u,v)$  表示链路  $(u,v)$  的端到端时延； $D$  表示要求的整个路由端到端时延约束。

如果业务 QoS 提出了带宽要求，则路由中的每一跳之间的链路可用带宽均不能小于该带宽要求，可表示为

$$\min_{(u,v) \in P(\text{Src}, \text{Des})} \text{band}(u,v) \geq B_{\min} \quad (2)$$

其中， $\text{band}(u,v)$  表示链路  $(u,v)$  的可用带宽； $B_{\min}$  表示要求的整个路由的最小带宽约束。

数据分组从源节点至目的节点的过程中，可能由于信道干扰、排队超时等原因造成数据分组丢失，数据分组丢失的数量与总传输数据分组的数量之比即为数据分组丢失率。不同业务的 QoS 对于数据分组丢失率一般会有不同的要求，如数据传输业务的数据分组丢失率通常要求比语音传输业务的

数据分组丢失率低。

卫星互联网相较地面网络一个较明显的区别是节点间传输距离远, 如 GEO 卫星距离地面约 36 000 km, 信号在星地间往返传播时间约为 240 ms。虽然 LEO 卫星的星地距离相对较近, 然而单颗 LEO 卫星覆盖的地球面积相对也较小, 在选定位置的服务时间仅为 10 min 左右, 因此需在 LEO 卫星之间不断切换。此外, 随着卫星互联网规模不断增大, 星上处理时间也会随之增加。因此为了降低信息在卫星网内的传输时延, 已有许多以低时延为目标的卫星网络路由研究, 具体介绍如下, 关键性能对比如表 1 所示。

比较直接的方式是选择时延最小的端到端路径来计算路由表, 如针对多层卫星的 MLSR (multi-layered satellite routing) 算法<sup>[20]</sup>。对于 LEO 卫星星座而言, 由于卫星之间的相对运动, 星间链路均有生存周期, DLRA (double-layered satellite network routing algorithm)<sup>[16]</sup>在 MLSR 算法的基础上, 针对 LEO/MEO 双层卫星网络, 将星间链路的剩余生存期考虑到路径的权值函数中, 以计算出兼顾时延和稳定性的优化路径。而 BDSR (bandwidth-delay satellite routing) 算法<sup>[25]</sup>则兼顾时延和带宽, 当链路带宽过载且平均端到端时延的变化受到约束时, 它会选择剩余带宽较多的另一条链路, 随着运行时间的增加, 端到端时延逐渐减小, 平均最小带宽则缓慢增加。链路状态是路由策略所需的基本信息, 为了降低基于链路状态的路由算法的开销和收敛时间, 卫星网络链路状态路由 (SLSR, satellite network link state routing) 算法<sup>[26]</sup>利用空间传播时延可预测的特点, 因此仅对不确定的星上排队时延、链路和节点故障进行实时状态采集。对关注于寻找

端到端传播时延最小路径的路由策略, 随着卫星网络业务量的增加, 可能会出现高数据分组丢失率和长排队时延的情况, 基于队列状态的 N GEO (non-geosynchronous earth orbit) 卫星网络动态路由机制 QSDR (queue state based dynamical routing)<sup>[27]</sup>利用卫星实时队列状态的路由模型对预先计算的路由进行调整, 以便尽快发送数据分组, 避免当前节点出现拥塞, 使网络中的所有卫星都为接收相邻卫星的数据分组留出了更多的空间, 在一定程度上减小了排队时延。

时延往往是 QoS 中的一项指标要求, 此外, 还包括带宽、时延抖动、数据分组丢失率等。以时延抖动为例, 其一种产生情况是由于在 LEO 卫星网络中, 卫星运动使属于不同轨道的卫星之间相对位置频繁发生变化, 从而导致星间链路出现时延抖动。不同的应用场景对 QoS 的要求会有所不同, 针对多媒体应用对服务质量的要求, Yuan 等<sup>[8]</sup>采用遗传算法实现星间链路的 QoS 路由, 提出了一种适用于 LEO 卫星网络的多径卫星间链路路由 (MPIR, multi-path inter-satellite link routing) 策略, 该策略在带宽和时延约束下的时延抖动、呼叫阻塞概率等方面具有较好的 QoS 保证。然而其带来的挑战是算法的复杂度, 尤其是在 LEO 卫星资源受限的情况下。Liu 等<sup>[17]</sup>引入了一种启发式路由算法, 并提出一种新的可预测卫星网络路由协议 (PSNRP, predictable satellite network routing protocol), 以满足网络用户的服务质量要求, 获得更好的路由性能。在自适应 QoS 路由方面, Yan 等<sup>[28]</sup>提出了一种针对卫星网络状态和信誉自适应的路由 (SRADR, status and reputation adaptive based dynamic routing) 算法, 引入了以节点信誉表示的安全属性, 根据网络状

表 1 部分路由策略所考虑的关键性能

路由策略	空间段	时延	带宽	数据分组丢失率	信令开销	链路稳定性
MLSR	多层星座	√	×	×	√	×
DLRA	多层星座	√	×	×	×	√
BDSR	单层星座	√	√	×	×	×
SLSR	单层星座	√	×	×	√	×
QSDR	单层星座	√	×	×	×	×
MPIR	单层星座	√	√	×	×	×
PSNRP	多层星座	√	√	√	×	×
SRADR	单层星座	√	√	×	×	×
SPPC、DRAC	单层星座	×	×	√	×	×

态和节点信誉值进行路由发现和动态更新维护,使所选路径成为综合性能和状态较好的安全路径。

卫星互联网作为信息传输网络,数据分组丢失率往往也是 QoS 中的重要指标项,Zhang 等<sup>[29]</sup>针对星地链路切换导致的数据分组丢失率陡增问题,分别基于静态路由和动态路由,提出了源预规划计算(SPPC, source preplanning calculation)和目标重定向计算(DRAC, destination readdressing calculation) 2 种优化策略,以期缓解数据分组丢失问题。但 SPPC 不能解决随机时延导致的切换中断,对网络传输的抗拥塞性要求高,而 DRAC 虽然可以解决未知的网络拥塞,但代价是额外的路由开销。

#### 4.2 稳健性

由于卫星轨道的循环可见性和轨道固定性,卫星互联网容易遭受攻击和干扰<sup>[30]</sup>。此外,宇宙空间环境、器件老化的影响或卫星技术频繁更新会使卫星失效,与其相关的星间链路则会断链,从而引发卫星网络拓扑变化。因此,提升网络抗干扰能力及稳健性,也是近年来卫星互联网路由研究的热点。

针对 MEO/LEO 卫星网络离线路由算法不能适应不可预测拓扑变化的问题,Li 等<sup>[31]</sup>提出了一种抗毁动态路由算法,将卫星网络划分为多个簇,通过采用边界-卫星源路由方案来优化切换效果,并在星间链路发生故障时,增强系统生存性。由于抗毁动态路由算法需更新链路状态,因此会产生额外的传输开销,在此基础上 Li 等<sup>[32]</sup>进一步提出了一种适用于 LEO 卫星网络的抗毁路由算法,以期以最小的代价自动避免无效的星间链路并且重路由。

为应对网络的变化性,Fang 等<sup>[33]</sup>提出一种基于检测和自学习的多轨道混合卫星网络路由算法,以解决卫星网络拓扑结构变化引起的不确定因素,由于其具有的分布式运行特点,从而有着良好的抗攻击能力。要对抗拓扑的变化性,往往需增大系统开销以更新路由信息,Pan 等<sup>[34]</sup>提出了一种新的面向 LEO 卫星网络的路由协议 OPSPF (orbit prediction shortest path first routing) 和一种按需动态路由机制,在出现非规则拓扑变化时能够减少通信开销和路由收敛时间。在面对多种影响系统稳健性因素时,如未知中断、突发拥塞和智能干扰等,则需更加智能化的路由方案,Han 等<sup>[30]</sup>基于博弈论和深度学习,提出了一种异构卫星互联网抗干扰路由方案,将路由抗干扰问题建模为一个分层的抗干扰 Stackelberg 博弈,所得路由策略具有较低的开销和

较好的抗干扰性能。

#### 4.3 资源利用

卫星互联网由于卫星节点的高速移动特性,在人口稠密区和人口稀少区上空运行时,网络资源流量分布极其不均,瞬间过大的流量会引起卫星网络节点拥塞,导致网络排队时延增大,进而引起整个卫星网络路由性能下降。此外,由于轨道资源的稀缺性及卫星发射和部署成本较高,因此包括卫星在内的系统资源应加以高效利用,这也是路由技术研究的热点。

网络拥塞会导致数据分组丢失、系统吞吐能力降低,不利于高效利用网络资源。Ma 等<sup>[11]</sup>提出了一种适用于低轨道卫星网络的分布式数据报路由算法,在选择下一跳卫星节点时,对其拥塞状态进行考虑,从而使该路由策略有利于拥塞处理和减少时延,同时能够提高节点故障时的数据传输成功率。Yi 等<sup>[19]</sup>针对 MEO/IGSO 卫星网络提出了一种按需计算和缓存的集中路由策略,设计了卫星网络拓扑动态分组的路由算法,将数据传输路由计算分为方向估计、方向增强和拥塞避免 3 个阶段,以使卫星网络配置更灵活、传输更高效并易于管理。

负载均衡可以使网内链路中的信息传输均衡化,有利于提高整个系统的吞吐能力和避免拥塞。Li 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于实时队列状态和路由由状态模型的动态路由更新算法,以均衡流量负载,保证每颗卫星尽可能快地发送数据分组,避免当前节点的拥塞。Wang 等<sup>[21]</sup>提出了 2 种优化星间链路使用数量的路由算法,通过将低优先级流量调度到高优先级业务使用的链路上,减少低优先级流量使用的链路数量,同时引入负载均衡策略,控制网络流的聚合,以减少使用的链路总数,从而提高卫星网络的资源利用率,节约能源。但在轨道密集的情况下,反向链路的拓扑策略可以增加星间链路的数量,减少各链路上的流量,从而可以贡献更高、更稳定的网络容量性能<sup>[35]</sup>,因此减少链路数量的策略要根据具体情况而定。

计算能力是卫星互联网的宝贵资源,尤其对于作为空间节点的卫星而言更是如此。卫星的体积、重量及功耗限制了其计算能力,因此对于路由算法也提出了更高的挑战。为了满足卫星存储和处理能力的要求,Yi 等<sup>[36]</sup>提出了一种路由表的生成和更新算法,将卫星网络的路由计算分配给星载路由器和地面路由器来完成,分别生成局域网路由表

和全网路由表。该算法可以降低对卫星计算能力的要求,减轻星间链路的负担,并且地面路由器也可以随着卫星网络扩展而升级。此外,基于预计算和分布式星载实时计算相结合的方法,并考虑实时的星间链路状态,计算目标在每颗卫星上的下一跳路由和前向表,也可提高实时性,并减少星载计算负荷<sup>[37-38]</sup>。

为提高系统的资源利用效率,系统内的路由开销应尽量小,因此,可采用基于地理位置的方法<sup>[39-42]</sup>,将卫星网络和地球划分为多个域,这样可以有效地减少大规模的卫星互联网中路由表的大小和生成时间,并在用户条件发生变化时保持路由表的稳定性,大大降低路由开销。

## 5 卫星互联网路由技术研究展望

### 5.1 基于人工智能的路由

卫星互联网的路由策略,一般可以建模为优化模型,但其往往为多目标优化问题,随着卫星网络规模的增加,其计算复杂度也随之增高,路由空间的搜索难度进一步加大。当对更多要素进行考量时,如优化目标既包括 QoS 要求,又要考虑卫星网络链路状态时变、干扰等因素时,会进一步加大路由的难度。传统的路由设计方案通常是基于网络流量特征的人工建模,并在此基础上有针对性地设计路由策略。然而,当前网络流量具有复杂的时空分布波动性,人工建模难度极大。例如,许多基于模型的网络路由优化研究都是针对特定网络场景或者特定假设的流量模型进行求解,其方法由于假设本身带来的误差以及模型与真实网络的区别,导致所提出的方案难以在真实网络场景中取得较好的路由效果。而机器学习(ML, machine learning)等人工智能技术通常可以自动提取网络流量特征,并且不依赖人类专家经验生成相应网络策略,在解决网络路由 NP 难问题上相对于传统方案开辟了新的道路<sup>[43]</sup>,因此基于人工智能的路由生成是具有前景的卫星互联网路由技术研究方向。

### 5.2 卫星与 5G/6G

地面移动通信标准从第三代起,在标准制定的过程中就开始尝试将卫星网络统筹考虑,但远未达到天地融合的地步,天地网络依然相对独立地发展。近些年,随着卫星互联网的迅速发展,天地融合的趋势也越发明显。作为新一代移动通信系统的

5G 网络,其从体系架构上具有更高的开放性,被誉为由网络构成的网络<sup>[44]</sup>,为卫星网与地面网的融合提供了技术基础。6G 作为下一代网络,各主要机构正在开展系统定义、关键技术验证等工作,而天地一体融合发展作为未来 6G 网络的一个重要特征已经获得了广泛的共识,因此卫星网络与地面 5G/6G 网络的互联互通性是必然要求。常规低轨卫星网基于虚拟拓扑的路由机制在与地面路由机制融合时的难度较大,因为前者是利用卫星标识和星间连接关系生成路由信息,在与基于 IP 路由的地面网络融合时,需要 2 种路由机制配合,且需要前者能根据当前地面用户连接情况及时地更新星上路由的存储信息,这会产生相当大的星上维护开销,加剧星上资源压力。由于卫星高速移动使卫星网络与地面网络之间连接关系不断变化,传统 IP 逻辑编址机制中改变接入卫星会导致终端 IP 地址改变,触发绑定更新,频繁的绑定更新会消耗大量星上通信资源<sup>[4]</sup>。这些都对天地一体化网络的路由设计提出了极高的要求,同时使天地全域路由成为新的研究方向。

### 5.3 巨型卫星星座

近些年,卫星互联网的空间节点规模呈现出多层次、大规模部署的特点,各类星座的卫星规模从数十颗到数万颗。巨型星座系统的出现,使空间网络的能力得到了极大的提升,可为用户提供与地面网络相比拟的服务。巨型星座的极大节点规模,对星座路由常用的“快照技术”等基于虚拟拓扑的路由机制带来了极大挑战,由于拓扑切分得到的时间片数目正比于链路切换次数,星座规模的扩大会导致星上需要存储和维护的路由表数目急剧增长,在对星上资源有限的卫星网络提出挑战的同时也为空间路由技术开辟出新的研究方向。

## 6 结束语

卫星互联网作为信息基础设施,具备极强的渗透性和带动性,它将极大地改变全社会的信息获取方式,成为社会转型与创新发展的推动力。路由技术作为卫星互联网的基础性技术之一,是实现空间资源高效利用、天地一体融合互通、业务承载支持的关键技术。本文围绕卫星网络节点之间的互联互通性要求综述了卫星信息传输网络中的路由研究现状,并讨论了卫星互联网路由技术的挑战和进一步研究方向。

## 参考文献:

- [1] CHANG H S, KIM B W, LEE C G, et al. Topological design and routing for low-earth orbit satellite networks[J]. Proceedings of GLOBECOM '95, 1995, 1: 529-535.
- [2] WERNER M, DELUCCHI C, VOGEL H J, et al. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(1): 69-82.
- [3] 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.
- [4] 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, 41(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, 41(8): 120-129.
- [5] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.  
LI H W, WU Q, XU K, et al. Progress and tendency of space and earth integrated network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.
- [6] 黄惠明, 常呈武. 天地一体化天基骨干网络体系架构研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5): 460-467, 491.  
HUANG H M, CHANG C W. Architecture research on space-based backbone network of space-ground integrated networks[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(5): 460-467, 491.
- [7] MOHORCIC M, SVIGELJ A, KANDUS G, et al. Performance evaluation of adaptive routing algorithms in packet-switched intersatellite link networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2002, 20(2): 97-120.
- [8] YUAN R, WANG R. Multi-path QoS routing using genetic algorithm for LEO satellite networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 27(1): 35-40.
- [9] WAN P, YAN J, CAO Z G, et al. Dynamic source routing algorithm in low-earth orbit satellite constellation[C]//2006 International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-4.
- [10] NA Z Y, PAN Z, LIU X, et al. Distributed routing strategy based on machine learning for LEO satellite network[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018, 2018: 1-10.
- [11] MA Y P, PENG W, YU W R, et al. A distributed routing algorithm for LEO satellite networks[C]//2013 12th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1367-1371.
- [12] ZHANG T T, YIN J, SHI H F, et al. Routing algorithms with efficient resource utilization for LEO satellite networks[C]//Second Symposium on Novel Technology of X-Ray Imaging. [S.n.:s.l.], 2019: 1-8.
- [13] SUN C H, YIN B, DOU Z B, et al. A routing protocol combining link state and distance vector for GEO-GEO satellite backbone network[J]. Mobile Networks and Applications, 2019, 24(6): 1937-1946.
- [14] LIU H Y, SUN F C, YANG Z A, et al. A novel distributed routing algorithm for LEO satellite network[C]//2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2012: 37-40.
- [15] LI J, LU H C, XUE K P, et al. Temporal netgrid model-based dynamic routing in large-scale small satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 6009-6021.
- [16] YUAN Z, ZHANG J, LIU Z K. Routing in LEO/MEO double-layered satellite networks[C]//2006 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-4.
- [17] LIU H Y, SUN F C. Routing for predictable multi-layered satellite networks[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(11): 1-18.
- [18] JIANG M, LIU Y B, XU W C, et al. An optimized layered routing algorithm for GEO/LEO hybrid satellite networks[C]//2016 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1153-1158.
- [19] YI X Q, SUN Z L, YAO F, et al. Satellite constellation of MEO and IGSO network routing with dynamic grouping[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2013, 31(6): 277-302.
- [20] AKYILDIZ I F, EKICI E, BENDER M D. MLSR: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424.
- [21] WANG F, JIANG D D, QI S. An adaptive routing algorithm for integrated information networks[J]. China Communications, 2019, 16(7): 195-206.
- [22] PACE P, ALOI G. Effective routing algorithm for multilayered terrestrial-HAP-satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(6): 510-512.
- [23] YANG Z Y, LI H W, WU Q, et al. Topology discovery sub-layer for integrated terrestrial-satellite network routing schemes[J]. China Communications, 2018, 15(6): 42-57.
- [24] ALAGOZ F, KORCAK O, JAMALIPOUR A. Exploring the routing strategies in next-generation satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(3): 79-88.
- [25] ZHANG D Y, LIU S, YIN M L. A satellite routing algorithm based on optimization of both delay and bandwidth[C]//2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [26] YAN H C, ZHANG Q J, SUN Y. A novel routing scheme for LEO satellite networks based on link state routing[C]//2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2014: 876-880.
- [27] LI H Z, ZHANG H T, QIAO L, et al. Queue state based dynamical routing for non-geostationary satellite networks[C]//2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [28] YAN D, TAO T, XIONGWEN H, et al. SRADR: network status and reputation adaptive QoS dynamic routing for satellite networks[C]//2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1496-1500.
- [29] ZHANG J R, ZHU S B, BAI H F, et al. Optimization strategy to solve transmission interruption caused by satellite-ground link switching[J]. IEEE Access, 2020, 8: 32975-32988.
- [30] HAN C, LIU A J, HUO L Y, et al. Anti-jamming routing for Internet of satellites: a reinforcement learning approach[C]//ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2020: 2877-2881.

- [31] LI D N, MAO X F, YU J, et al. A destruction-resistant dynamic routing algorithm for LEO/MEO satellite networks[C]//The Fourth International Conference on Computer and Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2004: 522-527.
- [32] LI D N, WANG X, MENG Y. A destruction-resistant routing algorithm in low earth orbit satellite networks[C]//2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1841-1844.
- [33] FANG F, ZHANG R, LI M, et al. Research on multi-orbit hybrid satellite network routing algorithm based on detection and self-learning[C]//2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control. Piscataway: IEEE Press, 2018: 575-580.
- [34] PAN T, HUANG T, LI X C, et al. OPSPF: orbit prediction shortest path first routing for resilient LEO satellite networks[C]//2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [35] XIAO Y L, ZHANG T, SHI D Y, et al. A LEO satellite network capacity model for topology and routing algorithm analysis[C]//2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1431-1436.
- [36] YI Z, QUAN Z, JUN L, et al. The generation and update algorithm of routing table in satellite network[C]//2015 IEEE International Conference on Communication Problem-Solving. Piscataway: IEEE Press, 2015: 619-622.
- [37] LIU C Y, LIU Y J. A real-time distributed algorithm for satellite constellation routing[C]//2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2018: 745-749.
- [38] LIU Z G, ZHU J, ZHANG J M, et al. Routing algorithm design of satellite network architecture based on SDN and ICN[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(1): 1-15.
- [39] XIAO Y L, ZHANG T, SUN M. Geographical addressing strategy for space-ground integrated network[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(2): 178-192.
- [40] LV S, LI H, WU J X, et al. Routing strategy of integrated satellite-terrestrial network based on hyperbolic geometry[J]. IEEE Access, 2020, 8: 113003-113010.
- [41] HAN H, ZHAO Y, WEI J Y, et al. GHRP: an efficient routing protocol for satellite networks[C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [42] ROTH M, BRANDT H, BISCHL H. Implementation of a geographical routing scheme for low earth orbiting satellite constellations using intersatellite links[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(1): 92-107.
- [43] 孙鹏浩, 兰巨龙, 申涓, 等. 基于牵引控制的深度强化学习路由策略生成[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(7): 1563-1572.
- SUN P H, LAN J L, SHEN J, et al. Pinning control-based routing policy generation using deep reinforcement learning[J]. Journal of Computer Research and Development, 2021, 58(7): 1563-1572.
- [44] LIN M, HUANG Q Q, DE COLA T, et al. Integrated 5G-satellite networks: a perspective on physical layer reliability and security[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 152-159.

## [作者简介]



朱立东 (1968- ), 男, 四川邻水人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信技术、无线与移动通信、通信抗干扰技术、现代通信中的信号处理等。



张勇 (1979- ), 男, 四川荣县人, 博士, 电子科技大学在站博士后、高级工程师, 主要研究方向为卫星及无线通信、通信抗干扰技术、阵列信号处理等。



贾高一 (1998- ), 男, 四川绵阳人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信、通信抗干扰技术等。