基于数字孪生的低轨巨型星座QoS路由算法研究

摘要

为解决多可见卫星场景下，低轨巨型星座网络链路频繁切换，负载严重不均衡，导致业务服务质量（Quality of Service, QoS）无法得到保障的问题，本文提出了一种基于数字孪生的QoS保障的路由算法。首先利用数字孪生卫星网络的历史存储、实时分析和推演能力，根据链路稳定性和拥塞可能性两个维度评估链路质量，对网络拓扑进行剪枝；然后对剪枝后的网络应用改进的蚁群算法，选择出满足QoS约束的最优路径。仿真结果表明，和传统的路由算法相比，该算法的丢包率、系统吞吐量和网络负载均衡性等方面均具有明显优势。

关键词：低轨巨型星座、数字孪生、多可见卫星、QoS路由、

介绍

近年来，国际上低轨卫星网络迅速发展，以Starlink、LightSpeed等为代表的低轨巨型星座网络工程已经进入实际部署阶段，成为天地一体化通信系统的重要组成部分。

但是，低轨巨型星座的网络场景下，目前的卫星网络星间路由算法，在可靠性方面仍然存在诸多挑战：一方面，由于低轨巨型星座网络拓扑的卫星密度大，拓扑变化动态性强，导致星间链路稳定性差，存在频繁的断开和切换。另一方面，由于全球流量分布不均，致使卫星节点和链路易发生拥塞。

低轨巨型星座场景

相比于传统LEO卫星网络，低轨巨型星座网络规模庞大，单层卫星数量增大到几百、甚至上千的量级。巨大的规模带来了可接入用户数量和网络容量的大幅提升，但也使得网络拓扑结构更加复杂，且网络的星间路由切换也因为卫星密度增大而更加频繁，导致了网络的管理难度急剧增大。

于此同时，随着卫星密度的大幅增加，单颗卫星可以连接到巨型星座架构中的多个可见卫星。【】然而传统研究中，仅采用了曼哈顿街道网络（Manhattan Street Network, MSN）的模型，即卫星只能和同轨道面上下，以及左右轨道面相邻最近的卫星建立链路。尽管MSN结构具有易于发现连接卫星和链路维护简单等优点，但由于临轨卫星的单一可见性，使得网络整体效率低下。

此外，由于地形、气候、技术发展和经济繁荣的差异，全球卫星用户分布密度差异很大。通常情况下，服务于用户密集的城市地区的卫星将比覆盖农村地区的卫星更加繁忙，覆盖有许多热点的北半球卫星将比覆盖南半球的卫星拥有更大的拥塞概率。在巨型星座网络中，网络负载不均衡的现象将会更加严重。【】

现有星间路由算法

在现有的研究中，星间路由算法主要有虚拟拓扑法、虚拟节点法和动态拓扑更新法三类。虚拟拓扑法利用卫星星座运动的周期性和可预测性，将星座周期划分为若干个时间片，将卫星网络的拓扑在时间片间隔内看做静态。但大量的时间片导致了多份路由表，占用了大量的星上资源。虚拟节点法将每个区域上的卫星对应到一个唯一的逻辑地址，当卫星移动到下个位置，逻辑地址也会随之改变，但无法应对网络拥塞的情况。动态拓扑更新法利用星间链路实时交换网路状态信息，从而计算更新路由表，能够实时响应节点失效和网络拥塞问题，但是重路由耗时长，影响通信质量。

数字孪生技术

面对低轨巨型星座的网络场景，部分传统的QoS路由算法已经不再适用，而借助数字孪生技术是解决上述问题的一种较为理想的办法。

近年来，数字孪生（Digital Twin, DT）技术已经在学术和工业界引起了广泛的关注，尤其是在工业、医疗和交通领域，而目前为止，将DT应用在卫星网络领域的研究还很少。例如，陶飞等人【】总结了DT研究的最新技术，涉及DT的关键组成部分、当前发展，以及DT在工业中的主要应用。[Palak Jain](https://ieeexplore.ieee.org/author/37085794179)等人【】研究了用于故障诊断的数字孪生方法的设计方法、数学分析、仿真研究和实验验证。[Neda Mohammadi](https://ieeexplore.ieee.org/author/37086331159)等人【】设计了一种智能城市DT模型，可以提高对城市人类-基础设施-技术交互的可见性。然而，目前为止，将DT技术应用在卫星网络领域的研究还很少。

算法方案

在低轨巨型星座的网络场景下，随着卫星数量的增加，卫星网络中的可见关系变得越来越复杂，同时，卫星的高动态性使得网络拓扑结构发生频繁的变化，造成QoS的下降。为了解决这个问题，我们将DT的概念引入卫星网络中，来辅助卫星间的路由选择。