

引用本文:章可钦,林宝军,刘迎春,等.基于激光微波混合星间链路的导航星座网络优化方法[J].光通信技术,2023,47(4):62-66.

基于激光微波混合星间链路的导航星座网络优化方法

章可钦^{1,2}, 林宝军^{1,2,3,4,5}, 刘迎春^{1,2,3}, 董明佺^{1,2}, 邵瑞强^{1,2}

(1.中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 201210; 2.上海微小卫星工程中心, 上海 201210; 3.中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094; 4.中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100094; 5.上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 201210)

摘要:为满足空天信息传输容量快速增长的需求,针对未来卫星高速率大带宽的发展趋势,提出了基于激光微波混合星间链路的北斗导航网络优化方法。分析了混合链路在星间链路测距能力、路由收敛效率,并进行了仿真,验证了协同测距、协同管理方法在提升混合网络效率中的有效性。仿真结果表明:Ka频段激光协同测距时间相较传统微波网络短,定位精度因子(PDOP)最高值由3.4降低至2.3;混合网络路由收敛速度较单激光网络快,由41 s降至15 s左右。

关键词:星间链路;激光微波混合;导航星座;星座网络;网络优化

中图分类号:TN929 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2023)04-0062-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Optimization method of navigation constellation network based on laser microwave hybrid inter satellite link

ZHANG Keqin^{1,2}, LIN Baojun^{1,2,3,4,5}, LIU Yingchun^{1,2,3}, DONG Mingji^{1,2}, SHAO Ruiqiang^{1,2}

(1. Institute of Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China; 2. Shanghai Microsatellite Engineering Center, Shanghai 201210, China; 3. Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 4. School of Electrical, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 5. School of Information Science and Technology, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201210, China)

Abstract: In order to meet the rapid growth demand of space information transmission capacity, and in response to the development trend of high speed and large bandwidth of future satellites, a Beidou navigation network optimization method based on laser microwave hybrid inter satellite links is proposed. The ability of inter-satellite link ranging and routing convergence efficiency of hybrid link are analyzed, and simulation is carried out to verify the effectiveness of collaborative ranging and collaborative management methods in improving the efficiency of hybrid network. The simulation results show that the Ka laser cooperative ranging time is shorter than the traditional microwave network, and the maximum positioning accuracy factor (PDOP) decreases from 3.4 to 2.3. The routing convergence speed of hybrid network is faster than that of single laser network, which decreases from 41 s to about 15 s.

Key words: intersatellite link, laser microwave mixing, navigation constellation, constellation network, network optimization

0 引言

在当今空间探索事业飞速发展的时代,天基信息网络建立的高速率、高可靠的星间网络是保障空间信息畅通的基础^[1-2]。北斗三号卫星全球定位系统借助微

波集成技术和相控阵天线,并根据地面向卫星上注的建链时隙表进行Ka频段链路(下文简称Ka链路)建链目标切换,实现了与其它卫星的测距与通信功能,在国内外微波星间链路中得到了广泛应用。近年来,随着定轨精度与星间通信容量需求不断提升,空间激光通信凭借其通信容量大、传输速率高、安全性好、结构轻便以及设备经济等优势^[3-4]快速发展。但激光链路仍存在捕获时间长、组网和广播通信较难等固有的局限性,而微波链路也存在频段受限、通信能力不足等问题^[5-7]。若将激光和微波链路二者的优势互补并与混合网络协同应用,可有效弥补微波或激光链路的

收稿日期:2022-03-15。

作者简介:章可钦(1998—),女,硕士研究生,毕业于中国科学院大学空天信息创新研究院电子与通信工程专业,主要研究方向为卫星导航信息处理技术、混合星间链路、卫星姿态轨道控制,并针对具体的星间网络进行优化算法研究及其仿真验证。



不足,提升星间链路系统容量和链路传输的稳定性。

目前,国内外针对激光微波混合链路进行了大量探索。文献[8]对微波星间链路和融合激光微波星间链路对应的导航星座自主定轨手段开展了探究,提出了基于卫星动力学短弧段定轨和伪逆平差理论的新算法,实现了自主定轨的目标。文献[9]介绍了星座自主运行方式对应的激光和微波星间链路融合思路,通过连续建链的方式构建了激光链路体系,实现了时间同步和高准确度的测量目标。文献[10]对点波束星间链路无法改善卫星距离测量精度和信息通信能力进行了探讨,依据整网平均观测几何精度因子和链路传输时延综合加权降低了链路损耗,实现了对链路的优化配置。文献[11]考虑到卫星时间延迟高、编码错误频发以及交换节点性能不佳的情况,对混合卫星网络信号指令平台的能力标准进行了阐释,编制了混合卫星网络信号指令协议。文献[12]依据双门限切换理论发明了能够自主适应的切换方法,在保证星间通信效果的同时,结合大气环境对链路信噪比的影响,实现激光链路和微波链路的自行转换,提高了网络的实用性和可靠性。然而,上述研究并未对激光和微波混合星间网络的优化策略提出有效的解决方法。

为了提升激光微波混合网络性能与稳定高效运行能力,本文提出一种基于激光微波混合星间链路的导航星座网络优化方法,对激光微波混合星间链路协同测距和路由管理策略开展研究、分析和仿真。

1 基于激光微波混合星间链路的导航星座网络优化方法

1.1 激光微波混合星间链路协同测距研究

导航卫星微波星间链路通过时分复用的方式实现双向测距功能。与微波(Ka频段)星间链路相比,激光链路可获得更高精度的时间测量结果,采用激光微波链路协同时间同步方法生成的时间基准在短期、中期稳定度方面均优于微波星间链路^[3]。为了实现激光与微波星间链路优势互补,提升混合链路星间测量精度,在激光链路连接关系固定、微波星间链路动态捷变的拓扑构型下,本文提出一种激光微波混合链路的网络协同测距方法。

微波星间链路利用时隙表规划建链对象,以时隙为单位表明任意时刻整网星间链路的连接状态。任意一颗卫星经过 N 个时隙后,在时隙表覆盖时间内完成了与多颗不同目标卫星的建链通信,不同卫星通过两两建链获取双向测距信息,完成整网卫星的组网数传。

卫星网络的定轨精度受到卫星数目、几何分布以及测距精度等方面因素的共同影响。当设定可见卫星数量和链路测距精度固定时,卫星网络的轨道定位精度由测距链路的几何分布决定。定位精度因子(PDOP)既能反映星间观测的数量,又能反映星间观测的几何分布,作为测距性能的度量,其计算方式^[13]为

$$\delta_{\text{PDOP}} = \text{tr} \left[\left(\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l \right)^{-1} \right] \quad (1)$$

星间观测系数矩阵 $\mathbf{G}_l$ 如式(2)所示。

$$\mathbf{G}_l = \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}_u - x_1}{R_{u1}} & \frac{\hat{y}_u - y_1}{R_{u1}} & \frac{\hat{z}_u - z_1}{R_{u1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\hat{x}_u - x_m}{R_{um}} & \frac{\hat{y}_u - y_m}{R_{um}} & \frac{\hat{z}_u - z_m}{R_{um}} \\ \frac{\hat{x}_u - x_{m+1}}{R_{u(m+1)}} & \frac{\hat{y}_u - y_{m+1}}{R_{u(m+1)}} & \frac{\hat{z}_u - z_{m+1}}{R_{u(m+1)}} \\ \frac{\hat{x}_u - x_n'}{R_{un}'} & \frac{\hat{y}_u - y_n'}{R_{un}'} & \frac{\hat{z}_u - z_n'}{R_{un}'} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, u 表示本星, m 表示激光可见的星, n 表示 Ka 链路可见的星, x_n, y_n, z_n 分别表示 Ka 链路可见星的三轴坐标值。星间激光测距值 R_{um} 与星间 Ka 链路测距值 R_{un}' 分别表示为

$$R_{um} = \sqrt{(\hat{x}_u - x_m)^2 + (\hat{y}_u - y_m)^2 + (\hat{z}_u - z_m)^2} \quad (3)$$

$$R_{un}' = \sqrt{(\hat{x}_u - x_n')^2 + (\hat{y}_u - y_n')^2 + (\hat{z}_u - z_n')^2} \quad (4)$$

加入不同测量方式后的几何公布误差 σ_{PDOP} 公式为

$$\sigma_{\text{PDOP}} = \sqrt{\delta_{\text{PDOP}}} \quad (5)$$

其中, $(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u)$ 为本星坐标, (x_m, y_m, z_m) 为激光固定链路测距得到的坐标, m 为每颗卫星配置的激光链路数量,这里假设 $m=3$; (x_n', y_n', z_n') 为 Ka 链路可轮询测距得到的其它卫星坐标, n 为本星的可见卫星数量。由于激光卫星的约束角更大且增加了星间链路条数,所以理论上混合网络的 PDOP 相较传统微波网络得到了提升。

除自主定轨轨道估计方法的影响外,通常定轨精度的影响因素主要为模型精度、观测数据精度、观测几何构型等。在卫星定轨过程中,轨道预报得到的卫星总体状态主要被用于建立包含动力学模型误差在内的观测方程。因此,卫星自主定轨的误差可通过以下公式计算:

$$\sigma_{\text{ANE}} = \sigma_{\text{PDOP}} \cdot \sigma_{\text{obs}} + \sigma_{\text{sys}} \quad (6)$$

章可钦,林宝军,刘迎春,等. 基于激光微波混合星间链路的导航星座网络优化方法

其中, σ_{obs} 、 σ_{sys} 分别表示观测、系统造成的误差。 σ_{PDOP} 在式中表示观测误差的扩大倍数, 不受系统误差的影响, 只与几何构型有关。

1.2 激光微波混合网络路由管理策略

激光微波混合星间链路存在时延大、链路时变、带宽受限、误码率高等问题, 常用路由协议在实践中经常会引发链路信息冗余传递、重路由成本高、收敛速度慢等不良情况, 给空间网络路由管理带来了很大的困难和挑战。

在路由协议里, 网络收敛时效由故障检测、链路状态广播(LSA)泛洪以及链路状态数据库更新等部分的延迟时间组成, 分别以 T_1 、 T_2 和 T_3 表示, 即网络的收敛时效等于三者之和。为了加快激光星间网络路由收敛的速度, 可以采取激光微波混合网络路由快速收敛策略, 通过微波快速捷变的信息空分传输特性, 在确保路由算法稳定的同时, 最大限度地缩短 T_1 、 T_2 和 T_3 。

激光微波网络管理内容如下:

1) 拓扑管理: 拓扑管理包括卫星组网的实时拓扑发现和拓扑信息同步, 为故障管理和性能管理的信息采集、故障定位和性能评估奠定基础。

2) 故障管理: 使用 Ka 链路来收集整网状态信息, 包括卫星节点和 2 个端口是否健康等信息。

3) 性能管理: 主要是指时延、吞吐量的管理。

激光微波网络管控过程如下:

1) 激光星间链路端口告警, 检测到链路中断。

2) 根据 Ka 频段建链规划表和时隙表向全网通报故障信息, 端到端广播时长最长为 5 个时隙。

3) 端节点维护的路由表更新。

激光微波混合网络收敛的流程图如图 1 所示。传输过程中激光终端若检测到链路中断发生告警, 则 Ka 链路利用时隙表将故障信息一一传输到全网, 在经过至多 n 个时隙后, 全网链路状态更新后网络收敛。

激光链路故障主要会出现 2 种情况: 链路故障和节点故障, 其示意图如图 2 所示。图中, 虚线表示不可用链路, 实线表示可用链路

图 2(a)中, 在卫星 1 与卫星 2 间链路 $L(1,2)$ 发生故障时, 卫星 1、2 这 2 个节点均会生成 LSA 信息, 其余的节点在获取到 LSA 并进行相应处理后对 $L(1,2)$

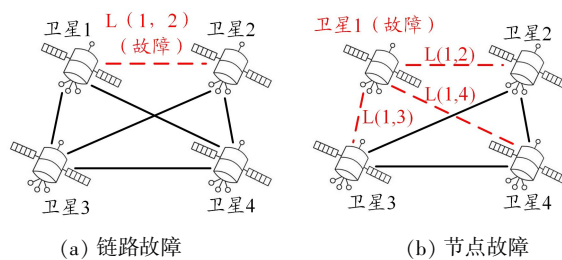


图 2 链路故障类型

是否仍处于正常状态进行判别, 明确故障类型。在 $L(1,2)$ 链路中断的情况下, 卫星 1、2 将形成相应的 LSA 信息对它们之间链路的情况进行说明, 此时下一级路由更新节点卫星 5 在分别接收并处理来自卫星 1、2 的 LSA 后, 可判断故障类型为卫星 1、2 间的链路故障。

图 2(b)中, 在卫星 1 发生故障的情况下, 卫星 2、3、4 会分别产生描述 $L(1,2)$ 、 $L(1,3)$ 、 $L(1,4)$ 链路情况的 LSA, 当下一路由更新节点接收并处理上述 LSA 后就能判定所出现的故障来源于卫星 1, 为节点故障。

2 仿真分析

2.1 激光微波协同测距仿真

北斗三号的卫星微波星间链路系统均装有相控阵天线, 可以根据已设定的时隙表, 在不同时刻对其进行切换, 调整天线方向, 指向不同卫星使其两两开展测距与通信。以 1 m 为周期, 假设在每周期内星间网络的可见性关系不变, 每 3 s 为一个时隙, 其中包括 1.5 s 前向测量通信时隙和 1.5 s 后向测量通信时隙, 则 1 m 内一颗卫星可切换对象进行至多 20 次测量通信。

尽管几何可视关系、天线可视关系以及链路信号功率等都会在不同程度上影响星间链路的建立, 但是为了便于分析, 本文暂不考虑链路信号功率的约束条件, 只对卫星间的可视性约束进行分析。地球遮挡和卫星天线波束角在很大程度上限制了星间链路的可视性, 只有在 2 颗卫星不受地球遮挡, 且互相均处于对方天线扫描范围内时, 才满足可视性的约束条件。

为了进行激光微波协同测距仿真, 本文建立了中轨道地球卫星(MEO)星座为 Walker24/3/1, 卫星轨道高度为 21 528 km, 轨道倾角为 55° , 共 3 个轨道面, 每个轨道面各 8 颗卫星。使用 STK+Matlab 协同对算法的仿真结果分析可知, 激光链路相较微波链路的可建链数量更多、可见星数更多; 激光链路与每颗星的可见时间更长、可见性更好。以天线指向角范围为 60° 的 Walker24/3/1 星座 1 号轨道 1 号卫星 MEO_{11} 为例,

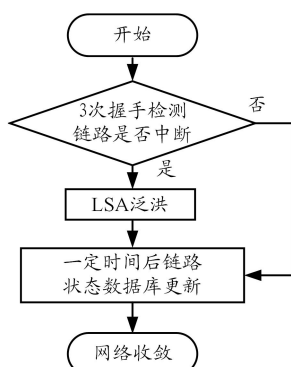


图 1 激光微波混合网络收敛的流程图

将3条激光链路分别分配给 MEO1₁~MEO1₂、MEO1₁~MEO1₈、MEO1₁~MEO3₈。对比相同时间内的 PDOP 可知,激光微波混合网络的 PDOP 比单微波网络小。

此外,相同时间内 MEO1₁ 的激光链路 with 3 号轨道的永久可建链路数量为 4 条,分别为 MEO1₁ 与 MEO3₁、MEO3₄、MEO3₅ 和 MEO3₈ 建立的链路,仿真结果如表 1 所示。可以看出,由于激光链路的特殊性,在选择建链卫星时,应尽量选择角度较稳定、变化范围小的卫星,在俯仰角相对较稳定的情况下,MEO3₈ 较 MEO3₄ 的方位角变化更小。因此,考虑选择 MEO3₈ 作为 MEO1₁ 的异轨建链对象。MEO 星座激光星间链路静态拓扑方案如图 3 所示。以地球为圆心,围绕地球的一圈为 360°,每 8 颗卫星均匀地分配在这个圆形轨道上。将轨道 1 的 1、3、5、7 号卫星分别与轨道 3 的 8、2、4、6 号卫星建立异轨链路;轨道 3 的 1、3、5、7 号卫星分别与轨道 2 的 8、2、4、6 号卫星建立异轨链路;轨道 2 的 1、3、5、7 号卫星分别与轨道 1 的 8、2、4、6 号卫星建立异轨链路。

表 1 MEO1₁ 与异轨卫星方位角俯仰角距离关系表

卫星号	方位角 变化/(°)	俯仰角 变化/(°)	距离 变化/km	距离 平均值/km
MEO3 ₁	85.567	31.789	24 603.6	33 082.0
MEO3 ₄	91.305	30.576	22 276.1	36 039.6
MEO3 ₅	94.433	31.789	18 144.2	43 661.1
MEO3 ₈	88.694	30.576	19 236.3	41 342.7

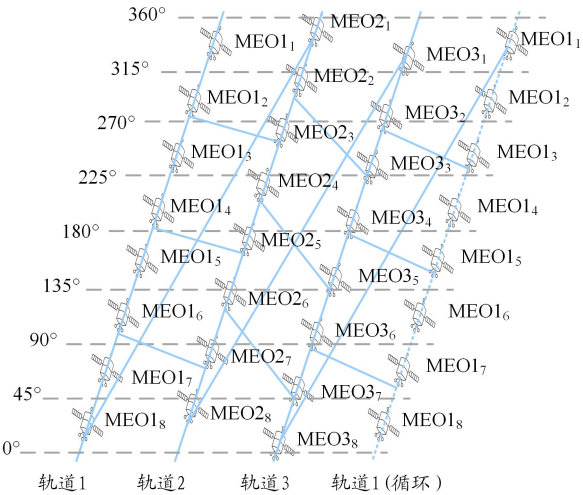


图 3 MEO 星座激光星间链路静态拓扑方案

PDOP 能够体现卫星星间网络的几何构型,星座的构型与卫星间的可见性是其影响主要因素。Walker24/3/1 星座中 MEO1₁ 分别在传统微波网络和激光微波混合网络中随时间变化的 PDOP 值的对比情

况如图 4 所示。可以看出,传统微波网络的最大 PDOP 值约为 3.4,激光微波混合网络的最大 PDOP 值约为 2.3,相比明显减小,验证了激光微波混合网络在几何构型方面的优势,这主要是因为激光卫星的约束角更大,增加了星间链路条数。

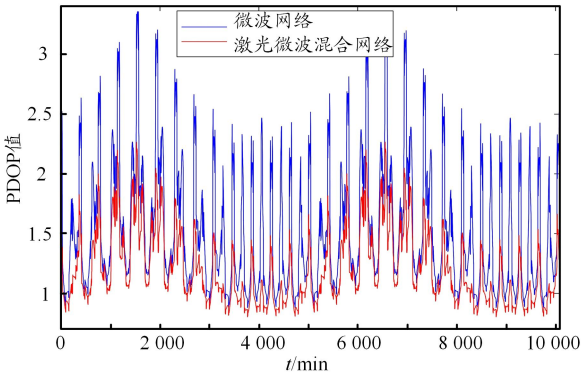


图 4 相同时间内 Ka 链路 with 激光微波混合网络 PDOP 值对比

2.2 激光微波混合链路网络路由管理仿真

以建立的 MEO Walker24/3/1 星座为例。首先,仿真在不同时延带宽误码率条件下某条链路中断时最短路径优先(OSPF)协议进行路由时激光网络的收敛时间,以 MEO1₁ 与 MEO2₁ 链路中断为例,分别设置时延为 25、15 ms,带宽为 1 000、100 Mb/s,误码率为 10⁻⁶、10⁻⁴,不同实验组的结果都大致相同,收敛时间接近 41 s,说明单微波星间链路的时延长、带宽大小和误码率等对网络路由的收敛产生的干扰有限,因此在仿真中可暂不考虑这些因素带来的影响。

然后,仿真 Ka 链路利用时隙表负责路由管控、激光固定链路负责通信时获取全网信息的收敛时间,在第二个时隙 MEO1₁ 未与 MEO 建链;MEO1₄ 与 MEO1₂ 建链,MEO1₂ 获得故障信息;MEO2₁ 与 MEO3₅ 建链,MEO3₅ 获得故障信息;MEO2₃ 与 MEO3₆ 建链,MEO3₆ 获得故障信息。以此类推,直至第五个时隙,最后一批卫星获得故障信息,即此时的路由代价为 5 个时隙,如表 2 所示。

表 2 卫星通过 Ka 链路的时延跳数统计表

卫星号	时隙数/个
MEO1 ₁	无效
MEO1 ₂	2
MEO1 ₃	4
MEO1 ₄	1
MEO1 ₅	3
MEO1 ₆	3
MEO1 ₇	3
MEO1 ₈	4
MEO2 ₁	无效
MEO2 ₂	4
MEO2 ₃	1
MEO2 ₄	5
MEO2 ₅	4
MEO2 ₆	3
MEO2 ₇	4
MEO2 ₈	3
MEO3 ₁	3
MEO3 ₂	3
MEO3 ₃	5
MEO3 ₄	4
MEO3 ₅	2
MEO3 ₆	2
MEO3 ₇	5
MEO3 ₈	5

章可钦,林宝军,刘迎春,等.基于激光微波混合星间链路的导航星座网络优化方法

由表2可知,激光微波混合星间链路在一个超帧内最后接收到信息的卫星花费的时间为5个时隙,即收敛时间大约为15 s,因此激光微波混合星间链路相对于开放式OSPF,在收敛时间上出现了很大的降幅。这是因为Ka链路能够直接基于激光星间链路端口对故障信息进行判别和处理,而OSPF必须经过4个Hello报文周期才能够完成这一判别和处理过程。由此可知,采用Ka链路对激光星间网络进行管理的路由收敛时间较短。

3 结束语

本文对激光微波混合星间网络优化方法开展了研究,提出并设计了激光微波星间链路协同测距方法和激光微波混合网络路由管理策略。仿真结果表明,相较于微波星间链网络,激光微波混合星间链路对应的PDOP更低,PDOP最高值由3.4降低至2.3。由此可见,本文提出的激光微波混合网络路由管理策略比单激光网络传统OSPF协议进行路由的收敛时间更短,由约41 s降低至15 s左右,网络的鲁棒性更高,算法的有效性得到了验证。

参考文献:

- [1] 林益明,何善宝,郑晋军,等.全球导航星座星间链路技术发展建议[J].航天器工程,2010,19(6):1-7.
- [2] 董明估,林宝军,刘迎春,等.基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化[J].中国激光,2018,45(7):217-228.
- [3] 张靓,杜中伟,谌明,等.激光测控通信技术研究进展与趋势[J].飞行器测控学报,2016,35(1):10-20.
- [4] 张忠萍,程志恩,张海峰,等.北斗卫星全球激光测距观测及数据应用[J].中国激光,2017,44(4):164-172.
- [5] 赵馨,牛俊坡,刘云清,等.导航卫星中激光通信测距一体化技术及链路特性分析[J].激光与光电子学进展,2015,52(6):87-93.
- [6] 韩凯,董日昌,邵丰伟,等.基于改进遗传算法的导航卫星星间链路网络动态拓扑优化技术[J/OL].航空学报:1-15.[2021-11-20].<https://kns-cnki-netwebvpn.las.ac.cn/kcms/detail/11.1929.v.20210906.1259.030.html>.
- [7] 刘学武.激光微波混合卫星通信网络QoS路由技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [8] 李灏霖.融合激光微波星间观测的导航星座自主定轨方法研究[D].长沙:湖南大学,2018.
- [9] 刘苏洋,杨宁虎,郭熙业,等.导航星座激光/微波星间链路协同时间同步方法研究[J].中国科学:物理学力学天文学,2021,51(1):153-161.
- [10] 王东会.面向测距与通信性能优化的卫星导航星间链路组网技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014.
- [11] 陆路.混合卫星通信网信令协议的研究与原型实现[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [12] 冯刚.混合激光/微波通信系统仿真与切换技术研究[D].成都:电子科技大学,2012.
- [13] CHANG H S, KIM B W, LEE C G, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1037-1048.
- [14] 张忠山,谢平,闫俊刚,等.双层规划求解兼顾测量与通信的星间链路设计[J].宇航学报,2016,37(5):576-585.
- [15] 李红艳,张焘,张靖乾,等.基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J].通信学报,2020,41(10):116-129.
- [16] SOSNICA K, THALLER D, DACH R, et al. Satellite laser ranging to GPS and GLONASS [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89: 1-19.
- [17] 林夏,林宝军,刘迎春,等.北斗卫星整网集中式自主定轨算法研究[J].吉林大学学报(信息科学版),2020,38(4):428-432.
- [18] 丛丽, AHMED I A, 谈展中.卫星导航几何因子的分析和仿真[J].电子学报,2006(12):2204-2208.