

基于Dijkstra算法的低轨星座通信路径规划方法优化

尹曙明, 薛成成, 郝利云, 张新军

(北京空间信息传输中心, 北京 102300)

摘要: 低轨星座网络的通信路径规划存在网络拓扑复杂、网络资源利用易不平衡的问题。针对这两个问题, 兼顾时延、负载和任务优先级, 利用有权图来表征实际的卫星以及相互之间的连通关系, 基于Dijkstra算法提出一种改进的优化路径规划方法。该方法通过先分组并行后串行的设计减少规划耗时, 通过实时更新拓扑和规划路径的方式解决算法难以适应低轨星座网络动态变化的问题。STK和Python的仿真结果表明, 本文提出的方法动态稳定性较好、优化路径规划准确、规划耗时比原始算法平均缩短了约70%。

关键词: 卫星通信; 低轨星座; 路径规划

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024028

Optimization of Communication Path Planning Method for Low Earth Orbit Constellation Based on Dijkstra Algorithm

YIN Shuming, XUE Chengcheng, HAO Liyun, ZHANG Xinjun

Beijing Space Information Transmission Center, Beijing 102300, China

Abstract: Complex network topologies and unbalanced uses of network resources are key problems in communication path planning for low earth orbit constellations. To address these issues, an optimization path planning method considering time delays, loads and task priorities was proposed. In this method, weighted graphs were used to characterize interconnections between satellites, and Dijkstra algorithm was improved to implement parallel computing and adapt to dynamically changing networks of low earth orbit constellations. Results of simulations based on STK and Python demonstrated that the method presented by this paper performs well in terms of dynamic stability and plans optimization paths accurately, and the planning time decreased by about 70% on average compared with the original algorithm.

Keywords: satellite communication, low earth orbit constellation, path planning

0 引言

低轨卫星星座作为天地一体化信息网络的重要组成部分, 以其时延低、信号强、成本低等特点^[1], 在近年来成为卫星通信的热点发展方向。美国SpaceX公司的“星链”(Starlink)、Amazon公司的柯伊伯(Kuiper)、英国OneWeb公司的“一网”(OneWeb), 以及中国的“鸿雁”“虹云”“天象”“银河Galaxy”等都在积极部署并投入试运营^[2-4]。

随着低轨卫星数量的增加, 其组成的大型低轨卫星

星座网络面临新的技术挑战。由于网络中卫星数量众多以及地面站分布式建设, 低轨星座的网络拓扑更复杂^[5], 在规划路由时往往有多条路径可以选择, 优化难度增大。另外, 低轨卫星存在高速运动、链路不稳定的问题, 容易出现某些节点或链路的负载远高于另外一些节点或链路的现象, 网络资源利用的不平衡可能导致局部拥塞, 从而带来用户数据的丢失^[6]。因此, 规划最优路径可以使通信时延较低的同时实现网络负载均衡, 是维护网络性能、提高用户体验的关键。

本文重点考虑通信时延、负载均衡和任务优先级3个

因素,基于图论中的最短路径思想,提出一种优化通信路径规划方法。

1 路径规划方法

1.1 方法设计

多用户通信时星间及星地连接示意如图1所示。尽管卫星与卫星之间、卫星与地面站之间的可见关系会发生动态变化,但是在执行规划操作的短时间内,可近似认为上述关系保持不变。此时需解决的问题为:在某时间切片内,为多个并发的任务合理规划通信链路,使得在每个任务的时延尽可能短的同时保持整个网络的负载均衡。考虑到在通信任务持续时间内,由于低轨卫星的高速运动,卫星相对位置可能发生改变,所规划路径未必能保持最优,因此在任务开始后应实时更新卫星位置,及时优化规划路径。

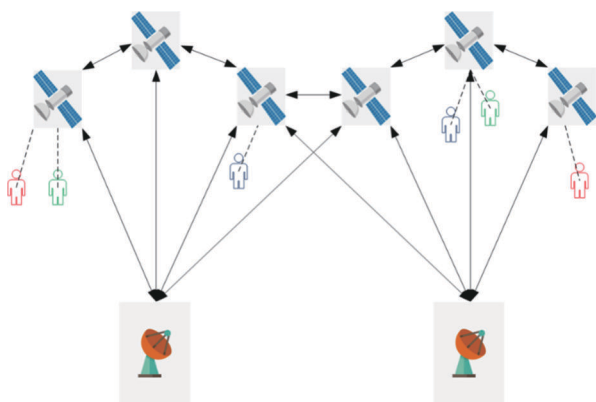


图1 星间及星地连接示意

根据图论基本思想,可将低轨星座网络抽象成一张加权图,该图由节点、边以及代表边特征的权重构成。节点主要为低轨卫星;如果两个节点之间可以通信,则两者之间存在一条边;边的权重由距离、负载和任务优先级共同决定。寻找两颗卫星之间的最优通信路径问题,即可转化为在加权图中确定起始节点和终止节点后,寻找最短加权路径的问题。

考虑到距离、负载和任务优先级,权重 ω 的表达式为

$$\omega = k_1 D + k_2 \frac{L}{C} + k_3 P \quad (1)$$

其中, D 为两条边之间的实际距离, L 为当前链路上的负载量, C 为星间链路能力, P 为当前链路上任务的综合优先级, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为对应的权重因子。

当某条边的负载接近上限时,应该迅速降低该条路径被选择的概率,因此对权重 ω 按以下公式进行修正

$$\omega = \begin{cases} \omega, & \omega \leq \omega_0 \\ e^{\omega}, & \omega > \omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, ω_0 为权重预警阈值。

本文采取先并行后串行的方式进行路径规划。首先根据历史经验数据,或根据起终点间的大致路径,将任务分成多个任务组,以实现并行规划、提高计算效率的目的;对于组内可能涉及路径竞争的任务,按照优先级进行串行规划;每完成一个任务的规划后,更新路径之间的权重。考虑到拓扑动态性,在任务持续时间内,自动更新网络拓扑并重新进行路径规划。具体的流程图如图2所示。

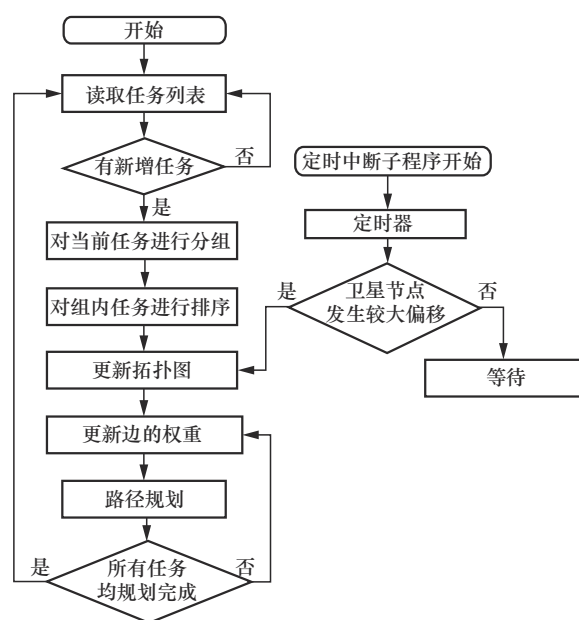


图2 路径规划方法流程图

1.2 算法分析

方法的核心算法为最短路径规划算法,一般分为多源全局优化算法和单源路径规划算法。多源全局优化算法可以基于当前的状态对多个任务的路径进行全局最优的规划,但是规划出来的路径可能出现多个任务同时经过某段路径的现象,从而导致该路径实际无法承载的问题。在本方法中,路径规划之前有分组设定,单组内任务具有一定的串行性,因此单源路径规划算法更为适用。

经典的单源路径规划算法主要包括 Dijkstra 算法^[7]、A*算法^[8]和D*算法^[9]等。Dijkstra 算法简单,能保证在当前状态下找到最优路径,但是算法较为耗时。A*算法属于启发式搜索算法,它在 Dijkstra 算法的基础上增加了估价函数来减小搜索范围,估价函数针对每个节点设计,可预测当前节点与目标节点的大致距离;但是与常规路径规划问题中只需要考虑距离因素不同,本文的规划场景还需综

合考虑负载和优先级, 估价函数设计难度大、预测精准度低, 采用该算法可能导致规划的路径并非最优。 D^* 算法则是针对动态环境而设计, 主要解决外界环境不断变化、障碍物位置无法预测时的机器人行走路径规划问题, 且同样涉及估价函数, 在解决静态问题时暂不考虑该算法。

基于上述原因, 本文采用Dijkstra算法为每个任务规划最短路径, 该方法的优势在于理论上能为每个通信任务找到一条最优路径保证权重最低。Dijkstra算法基于贪心思想, 将节点划归两个集合 A 和 B , 集合 A 中为已求出最短路径的节点, 集合 B 中为还未求出最短路径的节点。算法基本步骤为: ①初始化集合, 使集合 A 中只包含源节点 v_0 , 集合 B 中包含剩余所有节点; ②从集合 B 中选出距离源节点 v_0 路径最短的节点 v_i , 将 v_i 加入集合 A 中, 同时从集合 B 中移除 v_i ; ③更新集合 B 中各个节点到 v_0 的距离; ④对集合 B 中的节点重复步骤②和③, 直到集合 B 变为空集; ⑤最终集合 A 包含图中所有节点到 v_0 的最短距离及其路径^[7]。

2 仿真验证

2.1 仿真设置

为了验证本文所提方法的有效性, 基于Satellite Toolkit (STK) 软件搭建低轨卫星星座进行仿真。

参考Starlink的轨道参数, 设置种子卫星的轨道高度为550 km, 轨道倾角为 53° , 升交点赤经为 160° , 偏心率为0, 基于种子卫星生成由72轨共1 584颗卫星组成的低轨星座, 如图3所示, 每颗卫星能与其同轨及邻轨共4颗卫星传输数据。

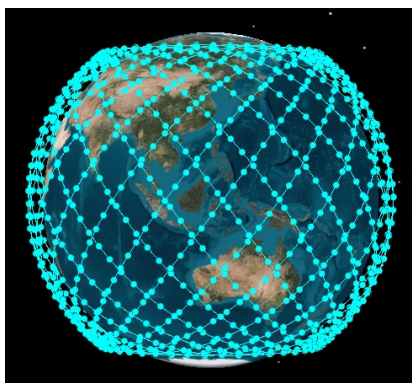


图3 星座仿真示意

以图的形式表示仿真的星座拓扑结构, 如图4所示, 实心圆点代表卫星, 两个节点之间有连线代表可以交互数据。

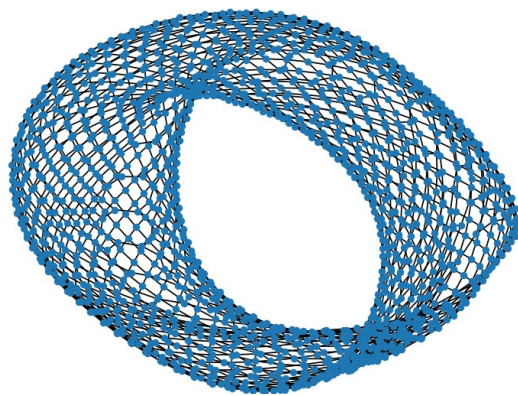


图4 星座仿真拓扑

根据本文所提方法设计, 本文在仿真时将通信任务按传输路径进行分组。根据可能涉及的卫星节点是否相同, 将任务划分为多组, 同组所涉及的所有节点组成子图, 在子图的基础上进行路径规划。上述分组方式可能会存在一定的路径重叠, 但整个仿真拓扑网络之间的权重会刷新并在各组之间共享, 因此仿真结果受分组的影响较小。

在开始仿真时, 假设系统已经运行一段时间, 网络中已经有一定的业务量, 在此用随机数进行初始化模拟网络中初始业务。

2.2 仿真任务

选择通信任务的起始点/终止点分别为: (39.9°N , 116.4°E) (北京附近)、(55.6°N , 37.8°E) (莫斯科附近) 和 (36.8°S , 118.3°E) (悉尼附近), 仿真以下两个任务来验证方法的有效性:

(1) 从 (39.9°N , 116.4°E) 到 (55.6°N , 37.8°E) 的通信任务, 持续时间为30 min;

(2) 从 (39.9°N , 116.4°E) 到 (36.8°S , 118.3°E) 的通信任务, 持续时间为30 min。

通过STK软件可以得到卫星在不同时刻对地面的覆盖情况, 由此确定起始点/终止点在任务期间的接入卫星, 本方法不考虑从地面用户到卫星的时延, 因此所规划的路径为从起始点接入卫星到终止点接入卫星之间的最短路径。

上述两个任务分属于不同的任务组, 仿真时并行调用相应的子图进行路径规划。以任务(1)为例, 所属任务组的子图的实际区域和对应的拓扑图如图5所示。由于低轨卫星的位置时变性, 当仿真任务开始后, 需不断更新卫星的位置信息以及经过任务组区域的卫星编号, 即子图的拓扑节点会实时发生变化, 当规划的路径中有不可达节点时, 需要重新进行规划。

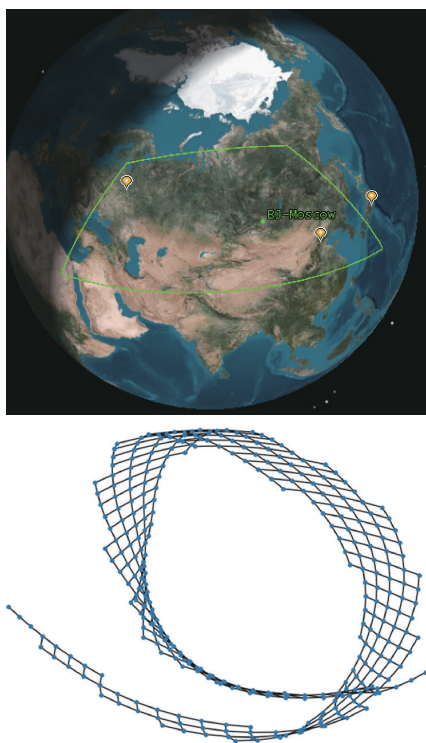


图5 仿真任务(1)调用子图的实际区域及对应的拓扑图

2.3 仿真结果

基于 Python 软件编程实现本文提出的方法, 并对 2.2 节中的任务进行仿真分析。任务(1)和任务(2)在开始时刻和结束时刻的优化加权路径结果如图6所示。

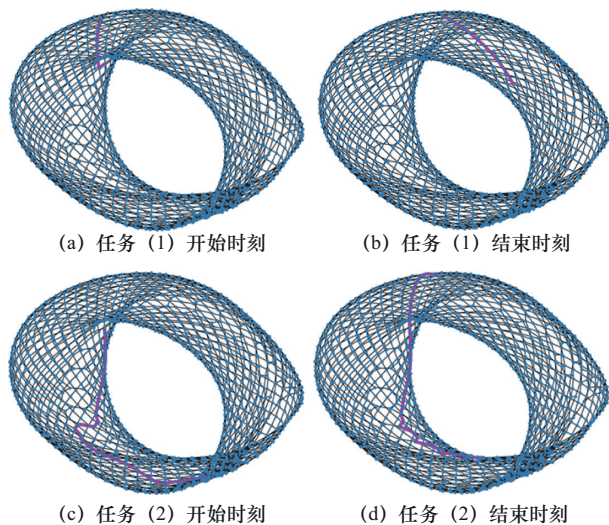


图6 两个任务起止时刻优化加权路径结果

从上述结果来看, 两个任务均完成了优化路径规划。随着任务持续时间的推移, 卫星的位置发生变化, 所规划路径经过的节点也发生了相应的变化。在充分利用分

组算法和历史数据的前提下, 不同任务组任务可并行规划, 算法的实时性要求基本能得到满足。

为了验证本文方法规划结果的动态稳定性, 均匀选取任务持续时间内的10个时刻, 将这些时刻规划路径中的节点编号转换为实际经纬度, 进行多次规划实际路径的对比。任务(1)和任务(2)的路径规划动态稳定性验证结果如图7所示, 图中红星表示任务起始点, 绿星表示任务终止点, 蓝线表示规划路径, 蓝点表示路径经过的节点。可以看出, 在两个任务中, 不同时刻的规划路径均有少许不同, 但整体趋势保持一致。这是由于随着拓扑的动态变化, 当路径中节点产生位置偏离时, 算法会重新进行规划, 因此所规划路径会发生微小跳变。此外图7(a)和图7(b)的对比也证明了分组的有效性。

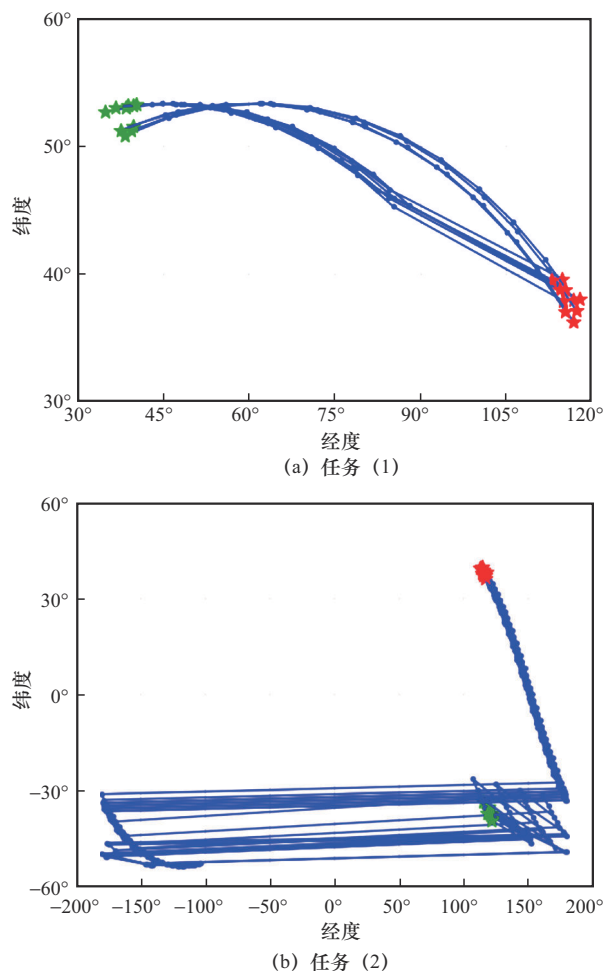


图7 路径规划动态稳定性验证结果

为了验证本文所设计方法的准确性, 将本文方法规划的结果与原始算法规划的结果进行对比, 两种方法所规划的路径见表1(卫星节点命名方式为“s+轨道编号+

表 1 两种方法路径规划结果对比

任务时刻	原始算法规划结果	本文方法规划结果
任务(1) 开始时刻	's0759', 's0657', 's0656', 's0655', 's0654', 's0653', 's0652', 's0651', 's0650'	's0759', 's0657', 's0656', 's0655', 's0654', 's0653', 's0652', 's0651', 's0650'
任务(1) 结束时刻	's0748', 's0747', 's0746', 's0745', 's0744', 's0743', 's0742', 's0741', 's0740', 's0739', 's0738', 's0737'	's0748', 's0747', 's0746', 's0745', 's0744', 's0743', 's0742', 's0741', 's0740', 's0739', 's0738', 's0737'
任务(2) 开始时刻	's0759', 's0760', 's0761', 's0762', 's0763', 's0764', 's0765', 's0766', 's0767', 's0768', 's0769', 's0770', 's0771', 's0772', 's0701', 's0702', 's0703', 's0704', 's0705', 's0706', 's0707', 's0708', 's0709', 's0710', 's0711', 's0712', 's0713', 's0714', 's0715', 's0716', 's0614', 's0512', 's0410', 's0308'	's0759', 's0760', 's0761', 's0762', 's0763', 's0764', 's0765', 's0766', 's0767', 's0768', 's0769', 's0770', 's0771', 's0772', 's0701', 's0702', 's0703', 's0704', 's0705', 's0706', 's0707', 's0708', 's0709', 's0710', 's0711', 's0712', 's0713', 's0714', 's0715', 's0716', 's0614', 's0512', 's0410', 's0308'
任务(2) 结束时刻	's0748', 's0749', 's0750', 's0751', 's0752', 's0753', 's0754', 's0755', 's0756', 's0757', 's0758', 's0759', 's0760', 's0761', 's0762', 's0763', 's0764', 's0765', 's0766', 's0767', 's0768', 's0769', 's0770', 's0771', 's0772', 's0670', 's0671', 's0672', 's0570', 's0571', 's0572', 's0470', 's0471', 's0472', 's0370'	's0748', 's0749', 's0750', 's0751', 's0752', 's0753', 's0754', 's0755', 's0756', 's0757', 's0758', 's0759', 's0760', 's0761', 's0762', 's0763', 's0764', 's0765', 's0766', 's0767', 's0768', 's0769', 's0770', 's0771', 's0772', 's0670', 's0671', 's0672', 's0570', 's0571', 's0572', 's0470', 's0471', 's0472', 's0370'

该轨道上的卫星编号”)。

通过以上对比结果可知，本文所设计方法的规划结果准确可靠。

本文所设计方法的并行计算设计可带来实时性能的提升，将本文方法的规划耗时与原始算法的规划耗时进行对比，结果见表 2。

表 2 两种方法规划耗时对比

任务时刻	原始算法规划 耗时/ms	本文方法规划 耗时/ms	耗时减少
任务(1)开始时刻	2.09	0.87	58.37%
任务(1)结束时刻	2.05	1.01	50.73%
任务(2)开始时刻	12.20	1.67	86.31%
任务(2)结束时刻	11.46	1.88	83.60%

以上结果表明，在保证优化路径规划结果准确的前提下，本文方法相较于原始算法的耗时得到极大缩短，平均减少了约 70%。对比两个任务的耗时减少量可得，任务起止点距离越远，本文方法的实时性优势越显著。

3 结束语

本文针对低轨卫星网络通信路径的选择问题，利用加权图来表征通信节点及节点间的可见关系，路径权重的设置同时考虑了通信距离、实时负载和任务优先级，采用 Dijkstra 算法来为每个任务规划最短路径。为了增强算法的并行计算性能，本文提出基于历史数据或起止点相对位置对通信路径进行预规划、对通信区域进行预分组的方法。为了适应低轨星座网络拓扑动态变化的特点，

本文改进了静态规划算法，改进算法可根据拓扑变化实时更新规划路径，并具备较好的动态稳定性。为了验证本文方法的有效性，基于 STK 软件搭建仿真环境、基于 Python 软件编写仿真程序，从仿真结果来看，采用该方法规划结果准确，规划耗时减少。未来可以将该方法与粒子群等算法进行优势结合，针对更复杂的场景和评价指标，完成方法的进一步优化。

参考文献：

[1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.

[2] 姜燕丽, 刘晓娟, 张雪梅, 等. 低轨卫星互联网发展问题研究[J]. 数字通信世界, 2018(8): 21-22.
JIANG Y L, LIU X J, ZHANG X M, et al. Research on the development of LEO satellite Internet[J]. Digital Communication World, 2018(8): 21-22.

[3] O' CALLAGHAN J. Amazon successfully launches its prototype Kuiper satellites[J]. New Scientist, 2023, 260(3460): 14.

[4] 吴树范, 王伟, 温济帆, 等. 低轨互联网星座发展研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 1-11.
WU S F, WANG W, WEN J F, et al. Review on development of LEO Internet constellation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 1-11.

[5] MARKOVITZ O, SEGAL M. Seam-aware location-based random walk routing algorithms for low orbit satellite constellations[C]//Pro-

ceedings of the 2021 17th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Piscataway: IEEE Press, 2021: 351-356.

- [6] JIANG D D, WANG F, LV Z H, et al. QoE-aware efficient content distribution scheme for satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(1): 443-458.
- [7] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [8] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [9] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments[C]//Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 1994: 3310-3317.

[作者简介]



尹曙明（1979—），男，北京空间信息传输中心高级工程师，主要研究方向为卫星通信、天基测控等。

薛成成（1991—），女，北京空间信息传输中心工程师，主要研究方向为卫星移动通信。

郝利云（1987—），男，北京空间信息传输中心工程师，主要研究方向为卫星移动通信。

张新军（1989—），男，北京空间信息传输中心工程师，主要研究方向为卫星移动通信。