

星座卫星在轨长期管理测控策略研究

高 括, 刘会杰, 刘 磊, 杨杰峰, 陈晓庆, 潘小彤

(上海微小卫星工程中心 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203)

摘要: 近年来, 低轨大型卫星星座蓬勃发展, 使得在轨卫星数量急剧增加, 卫星在轨长期管理任务面临巨大挑战; 首先分析了卫星星座在轨长期管理面临的挑战, 针对星座卫星在轨长期管理面临的几种常见应用场景, 通过理论分析扩频体制测控应答机的抗干扰机理, 结合地面概念星卫星平台模拟验证, 在微波暗室通过地面概念星卫星平台对星座卫星在轨长期管理可能出现的情况进行模拟; 模拟不同星座卫星在轨运行场景以及相应的测控应对策略, 验证了多星同时入境时的卫星长期管理策略的可行性, 给出星座卫星在轨长期管理的有效应对策略, 为卫星在轨长期管理问题提供参考。

关键词: 大型星座; 在轨长期管理; 应对策略; 地面模拟验证

Research on TT&C strategy of Long-term Management of Constellation Satellites in Orbit

Gao Kuo, Liu Huijie, Liu Lei, Yang Jiefeng, Chen Xiaoqing, Pan Xiaotong

(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

Abstract: In recent years, the low-orbit large-scale constellation satellites has flourished, resulting in a sharp increase in the number of satellites in orbit. Firstly, the challenges of long-term management of satellite constellation in orbit are analyzed. According to several common application scenarios of long-term management of satellite constellation in orbit, the anti-interference mechanism of TT&C transponder with spread spectrum system is analyzed theoretically. Combined with the simulation verification of ground concept satellite platform, the situation that long-term management of satellite constellation in orbit can appear through ground concept satellite platform in micro wave darkroom is verified. The simulation is carried out. Simulation of different constellation satellite in orbit operation scenarios and the corresponding measurement and control response strategies verify the feasibility of the satellite long-term management strategy when multiple satellites enter the country at the same time, and give the effective response strategy of constellation satellite in orbit long-term management. It provides a reference for long-term satellite in orbit management and subsequent large-scale constellation rail long tube problems that may be encountered.

Keywords: large-scale satellite constellation; Long-term management in orbit; preventive solution; Ground simulation

0 引言

在物联网、移动互联网快速发展带动下, 低轨卫星星座发展迎来一个崭新的发展高潮。以 L、S、VHF 等低频段为主的 Iridium 星座、“全球星”(Globalstar)、“轨道通信”(Orbcomm) 系统等传统的三大低轨移动通信星座已经完成升级换代; 以 Ku、Ka 频段甚至更高频段的新兴互联网星座计划呈现爆发式增长, 美国一网公司 OneWeb、美国太空探索技术公司 SpaceX、低轨卫星公司 LEOSat、加拿大电信卫星公司 TeleSat 等纷纷提出新兴互联网星座计划, 国外典型低轨通信卫星星座计划发射卫星数量总和超过 8 000 颗^[1]。

随着美国 Space X、One Web 等公司“千星计划”的崛起, 我国也积极构建自己的天基互联网系统, 典型系统有中国航天科工集团的“虹云工程”卫星通信系统和中国航

天科技集团的“鸿雁星座”卫星通信系统, 其中“虹云工程”计划发射 156 颗卫星, 在轨高度约为 1 000 km, 工作频段为 Ka 频段; “鸿雁星座”系统计划发射 300 颗卫星, 一期将由 60 颗核心骨干卫星组成, 工作频段为 L / Ka 频段, 以星间链路技术实现卫星空间组网, 是一个能够连接卫星、飞机、船舶、车辆甚至个人的超级通信系统^[2]。

世界各国典型低轨卫星星座的载荷工作频段、轨道高度以及卫星数量信息如表 1 所示。如此庞大数量的卫星集中在 500~1 400 km 的轨道上, 所有星座最终组网成功之后, 众多卫星在此区域运行, 犹如在地球近地轨道织就卫星网, 星罗密布, 相互交错, 形成异常复杂的卫星星座运行场景, 如表 1 最后一列中的卫星在轨仿真场景所示。

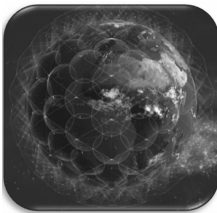
1 卫星星座在轨长期管理面临的挑战

由于在轨卫星星座数量的逐年增多, 卫星星座在轨测控长期管理面临诸多挑战: 多站同时协同跟踪多目标在轨测控管理技术、地面站双站甚至多站跟踪切换技术、地面测控站和中继卫星形成天地一体测控联合管理等; 未来随着卫星星座发展, 在轨卫星在不远的将来可能会遇到以下情

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-06。

作者简介: 高括(1987-), 男, 硕士, 工程师, 河南民权人, 主要从事卫星测控总体设计、测控通信一体化等方向的研究。

表 1 典型低轨卫星星座轨道及卫星数量

星座名称/ 研制单位	工作频段	轨道高度 /km	卫星数 量/颗	卫星星座在轨场景
Iridium NEXT	L/Ka	780	66	
Globalstar	S	1400	24	
OneWeb	Ku	1200	720	
SpaceX 'Starlink'	Ku/Ka	550	4425	
Boeing	Q/V	1200	2956	
TeleSat	Ka	1000	117	
LEOSat	Ka	1400	108	
Orbcomm1	UHF/VHF	740~825	35	
Orbcomm2	VHF	740~825	18	
虹云工程	Ka	1000	156	
鸿雁星座	L/Ka	1100~1300	300	

况：双站跟踪或者地面站和中继卫星同时跟踪相同测控扩频码的不同卫星；双站跟踪或者地面站和中继卫星同时跟踪相同测控扩频码相同测控频点的不同卫星等。在轨卫星的出现上述情况，地面测控系统如何应对？卫星测控中心长管如何处理这些新的状况？对测控系统提出了新的挑战。本文通过理论分析和地面概念星模拟验证，对星座卫星在轨长期管理可能出现的情况进行地面模拟，最后给出结论，为星座卫星在轨长期管理提供参考。

2 地面模拟星座卫星在轨运行场景

星座卫星目前常用的测控体制为扩频体制^[7-8]，在进行地面模拟验证试验过程中，采用两颗扩频体制模拟卫星进行试验；两套地面测控综合测试设备分别模拟两个地面测控站或者一台模拟地面测控站一台模拟中继卫星；通过调节上行链路可调衰减器模拟调节地面测控站或者中继卫星 EIRP，通过调节下行链路可调衰减器模拟控制不同地面站接收到的下行信号强度。

场景一：地面测控站和中继卫星同时跟踪星座中的一颗卫星。

地面测控站和中继卫星同时跟踪星座中的一颗卫星场景如图 1 所示，根据卫星的测控频点和扩频码组选用情况，该场景可以细化以下四种情形：

- 1) 星座卫星中的对地测控和中继测控采用相同频点相同扩频码组设计，即“同频同码”的天地一体化测控体制；
- 2) 星座卫星中的对地测控和中继测控使用相同的测控扩频码组、不同频点；
- 3) 星座卫星中的对地测控和中继测控使用相同频点、不同的测控扩频码组；
- 4) 星座卫星中的对地测控和中继测控使用不同的频点、不同的测控扩频码组。

对于情形 2)~4) 三种情形，卫星的对地测控链路和中继测控链路可以通过码分或者频分进行区分开，拥有两个相对独立的测控链路，类似于两颗不同的在轨卫星，这三种情

形与场景三类似，将在后边进行统一阐述并试验验证在轨长期管理的方法。

对于情形 1)，如果卫星在地面测控站跟踪弧段内，没有必要再调用中继链路资源进行跟踪。这种情形主要是模拟验证在轨卫星中继跟踪弧段相对地面测控站较长，如果中继测控跟踪过程尚未结束，此时卫星已经进入地面测控站弧段，并且地面测控站也发送上行信号同时发送上行遥控指令，此时该卫星是如何响应？并通过地面试验验证，给出星座卫星在轨出现这种情形时的长管应对策略。

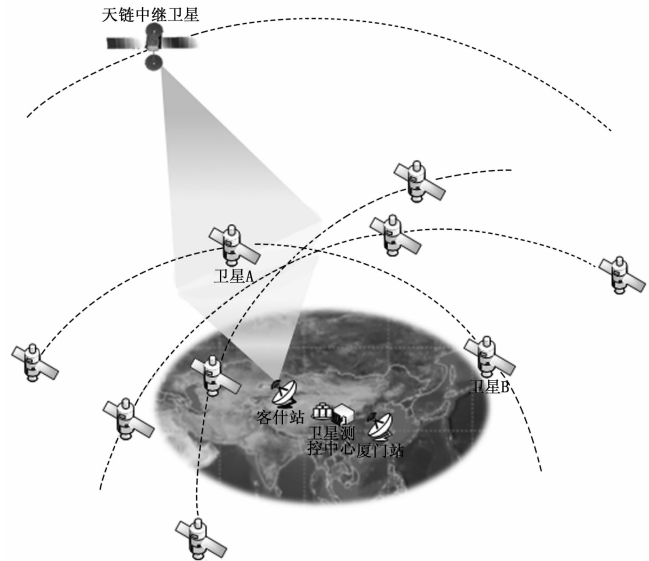


图 1 地面测控站和中继卫星同时跟踪星座中一颗卫星场景

理论分析：卫星测控体制为同频同码的天地一体化测控体制，不管是中继卫星发送的测控上行信号还是地面测控站发送的测控上行信号均是相同的扩频信号，两种信号时延不同，信号强度不同。如果是卫星先经过中继弧段（测控应答机先锁定中继信号），尚未停止发送中继上行信号时地面测控站也发送上行信号，此时的地面站发送的上行信号对于该卫星测控应答机来说可以看成是一种干扰信号。假设该卫星的抗干扰能力为 C_{nd} (dB) 测控应答机接收到的地面发送的上行信号强度为 E_g (dBm)，测控应答机接收到中继卫星发出的上行信号的强度为 E_z (dBm)，那么：

1) 如果 $E_g > E_z + C_{nd}$ ，此时相当于干扰信号过强，超过了卫星的抗干扰能力，则卫星测控应答机重新锁定地面发送的上行信号，如果此时中继链路和地面测控站同时发送上行遥控指令，卫星执行地面测控站发送的遥控指令，中继链路通道的遥控指令不会被执行。此种情形在卫星干扰领域应用较为广泛；

2) 如果 $E_g \leq E_z + C_{nd}$ ，此时由于干扰信号强度没有超过卫星的抗干扰能力，测控应答机始终锁定原来的中继链路发送的上行信号，如果此时中继链路和地面测控站同时发送上行遥控指令，卫星执行中继链路通道的遥控指令，地面测控站发送的遥控指令不会被执行。

试验验证：验证试验在微波暗室中进行，试验连接框图

如图 2 所示。概念星 A 配置扩频测控体制, 支持对地测控和中继测控两种模式; 中继卫星测控转发终端用测控综合地检设备 A 模拟, 测控收发共用天线 A 模拟中继卫星测控天线; 地面测控站用测控综合地检设备 B 模拟, 测控收发共用天线 B 模拟地面测控站测控天线。测控前端 A 和 B 分别用于发送中继遥控指令、接收中继遥测数据和发送地面测控站遥控指令、接收对地遥测数据。

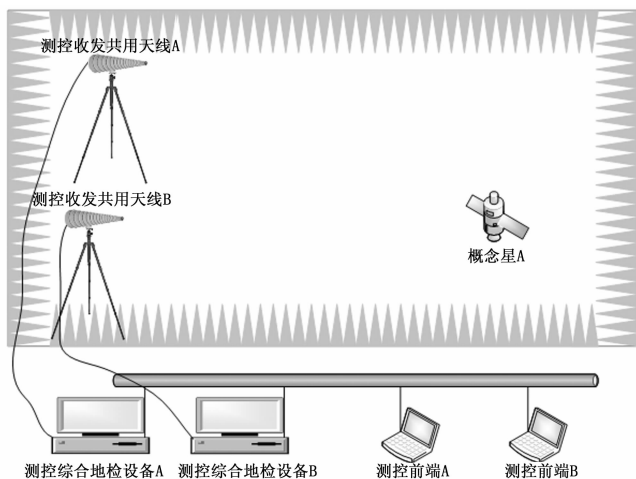


图 2 双站跟踪星座中一颗卫星试验框图

模拟在轨星座场景: 星座卫星轨道高度为 800 km, 卫星扩频抗干扰能力为 18 dB, 中继卫星选天链 1 代卫星, 分别模拟地面测控站常用的天线为 3 m 和 10 m 两种应用情形。通过链路计算, 当地面测控站选择 3 m 天线时, 卫星应答机接收来自地面测控站发出的上行信号时接收机入口电平约 -132.5 dBW, 卫星应答机接收来自中继卫星发出的上行信号时接收机入口电平约 -149 dBW, 两个链路接收到的信号强度相差 16.5 dB, 此时两条链路接收到的信号差在卫星抗干扰能力内; 当地面测控站选择 10 m 天线时, 卫星应答机接收来自地面测控站发出的上行信号时接收机入口电平约 -122.1 dBW, 卫星应答机接收来自中继卫星发出的上行信号时接收机入口电平约 -149 dBW, 两个链路接收到的信号强度相差 27 dB, 此时两条链路接收到的信号差超过了卫星抗干扰能力。卫星和中继卫星相关参数如表 2 所示^[4-6]。

应用情形一。

表 2 模拟在轨卫星相关参数

应用情形	地面站 EIRP/dBW	天链 1 代 EIRP/dBW	卫星 G/T 值/(dBi/K)	星座卫星轨道高度/km	应答机接收地面上行入口电平/dBW	应答机接收中继前向上行入口电平/dBW	卫星抗干扰能力/dB
地面站 3m 天线	42	45.3	-28	800	-132.5	-149	18
地面站 10m 天线	52	45.3	-28	800	-122	-149	18

信号标定: 通过调节图 2 测控综合地检设备 A 通道的上行可调衰减器, 将概念星测控接收机入口处用频谱仪标定上行信号强度为 -149 dBW, 用于模拟在轨中继发送的上行信号; 通过调节图 2 测控综合地检设备 B 通道的上行可调衰减器, 将概念星测控接收机入口处用频谱仪标定上行信号强度为 -132.5 dBW, 用于模拟地面站 3 m 测控天线发送的上行信号。信号标定结束后, 停止发送两路上行信号, 卫星恢复试验状态。

在轨长管模拟: 发送测控综合地检设备 A 通道的上行信号, 卫星正常接收到 A 通道遥控指令, 测控前端 A 接收到卫星遥测数据; 状态稳定之后, 加载测控综合地检设备 B 通道的上行信号, 配置参数和 A 通道完全相同; 此时星上状态显示正常锁定, 测控前端 A 和测控前端 B 两个通道的下行遥测均能够正常接收; 通过测控前端 A 和测控综合地检设备 A 发送遥控指令, 卫星正常接收到遥控指令并成功执行; 通过测控前端 B 和测控综合地检设备 B 发送遥控指令, 卫星未接收到遥控指令。

调整中继卫星和地面站跟踪顺序, 首先加载测控综合地检 B 上行信号 (模拟地面测控站), 卫星状态稳定后发送测控综合地检 A 的上行信号 (模拟中继卫星发出的上行信号)。此时卫星未收到通道 A 遥控指令, 正常接收并正确执行通道 B 遥控指令。

应用情形二。

信号标定: 测控综合地检设备 A 用于模拟中继卫星上行通道, 在应用情形一中已经标定完成; 通过调节图 2 测控综合地检设备 B 通道的上行可调衰减器, 将概念星测控接收机入口处用频谱仪标定上行信号强度为 -122 dBW, 用于模拟地面站 10 m 测控天线发送的上行信号。信号标定结束后, 停止发送两路上行信号, 卫星恢复试验状态。

在轨长管模拟: 发送测控综合地检设备 A 通道的上行信号, 卫星正常接收到 A 通道遥控指令, 测控前端 A 接收到卫星遥测数据; 状态稳定之后, 加载测控综合地检设备 B 通道的上行信号, 配置参数和 A 通道完全相同; 此时星上状态显示失锁然后恢复锁定, 测控前端 A 和测控前端 B 两个通道的下行遥测均能够正常接收; 通过测控前端 A 和测控综合地检设备 A 发送遥控指令, 卫星未接收到遥控指令; 通过测控前端 B 和测控综合地检设备 B 发送遥控指令, 卫星正常接收到遥控指令并成功执行。

调整中继卫星和地面站跟踪顺序, 首先加载测控综合地检 B 上行信号 (模拟地面测控站), 卫星状态稳定后发送测控综合地检 A 的上行信号 (模拟中继卫星发出的上行信号)。此时卫星未收到通道 A 遥控指令, 正常接收并正确执行通道 B 遥控指令。

场景二: 地面测控站双站跟踪星座中的一颗卫星。

地面测控站双站接力跟踪星座中的一颗卫星的应用场景如图 3 所示, 地面测控站喀什站厦门站接力跟踪星座卫星中的一颗卫星 A。该场景与场景一类似, 涉及在轨卫星双站跟踪问题, 区别是该场景测控双站均是地面测控站, 两个站发

送的上行信号到卫星测控应答机接收机的入口电平相差没有场景一大。地面模拟和场景一相同,如图 2 所示。理论分析和星座模拟场景除了中继链路用地面测控站替换其他条件设置和场景一相同。

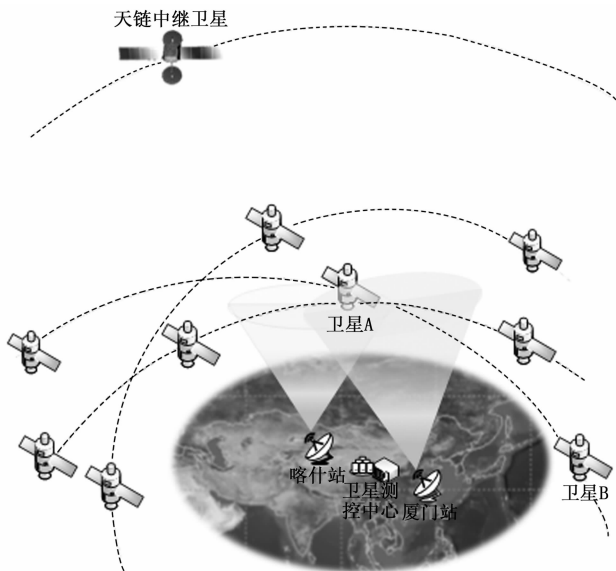


图 3 地面测控站双站接力跟踪星座卫星中的一颗卫星场景

地面模拟试验:如图 2 所示,通道 A 发送上行信号,卫星状态稳定后,发送通道 B 遥控上行信号,1 dB 每档逐步减小通道 A 上行信号强度,同时 1 dB 每档增加通道 B 上行信号强度,模拟在轨卫星双站跟踪情况,每调节一档发送上行遥控指令并观察卫星遥测状态,直至通道 A 和通道 B 发送的上行信号强度相差超过卫星的抗干扰能力 (18 dB)。

试验结果:当通道 A 和通道 B 给出的上行信号强度相差在 18 dB 以内时,卫星正常执行通道 A 遥控指令,通道 B 的遥控指令不会被执行;当通道 A 和通道 B 给出的上行信号强度相差超过 18 dB 时,卫星测控应答机上行锁定状态显示失锁后重新锁定,重新锁定后卫星正常执行通道 B 遥控指令,通道 A 的遥控指令不会再被执行。试验结果与前面理论分析一致。

场景三:地面测控站双站跟踪星座中的两颗卫星。

地面两个测控站均能够同时覆盖卫星星座中的两颗不同卫星,在轨运行场景如图 4 所示。该场景可以分为两种情况:卫星星座中扩频码复用的两颗卫星(这两颗卫星测控扩频码和频点完全相同,通过卫星标识字区分)和扩频码或者频点不同的两颗卫星两种。对于第二种情况,属于比较常见的测控站覆盖两颗完全不同的卫星,是当前卫星在轨长管经常遇到的情况,应对方法和策略比较成熟,这里就不再分析。重点分析并试验验证第一种情况的在轨长管应对策略。

场景分析:假设地面测控站喀什站和厦门站同时覆盖天地一体化扩频体制卫星星座中的卫星 A 和卫星 C,并且卫星 A 以喀什站为测控主站进行测控跟踪,卫星 C 以厦门站为测控主站进行测控跟踪;由于卫星首先进入喀什站测控弧段,喀什站发送上行信号,此时卫星 A 和卫星 C 均锁定喀什站的

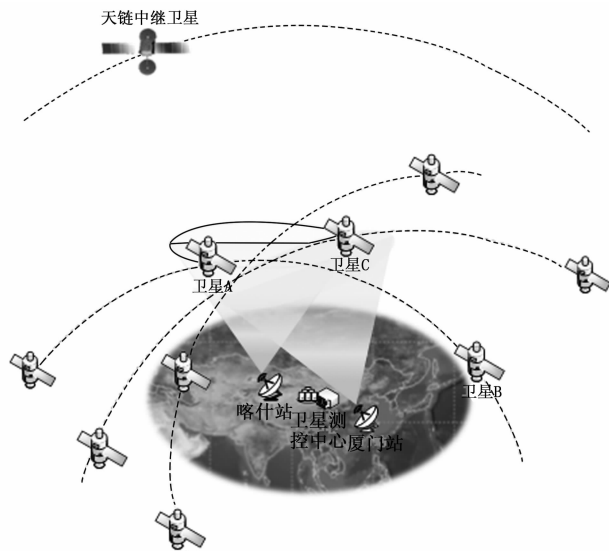


图 4 地面测控站双站跟踪星座中的两颗卫星场景

上行信号,当两颗卫星均进入厦门站弧段且还在喀什站测控弧段内,喀什站上行信号发送的同时厦门站也发送和喀什站同频同码的上行信号,此时卫星长管人员如何应对?根据测控站跟踪计划,卫星 C 应该是厦门站主站,但是此时卫星 C 的扩频应答机还是锁定在喀什站的上行信号,此时喀什站和厦门站分别发送卫星 A 和卫星 C 的遥控指令,两颗卫星如何响应?这些将在此场景下进行分析并试验验证。

试验验证:验证试验在微波暗室中进行,试验连接框图如图 5 所示。概念星 A 配置扩频测控体制,概念星 B 配置和概念星 A 同频同码的测控体制,两颗卫星的区别只是航天器标识字不同,两颗概念星模拟在轨星座中同频同码的两颗卫星;喀什站用测控综合地检设备 A 模拟;厦门站用测控综合地检设备 B 模拟。测控前端 A 和 B 分别用于发送中继遥控指令、接收中继遥测数据和发送地面测控站遥控指令、接收对地遥测数据。

试验步骤:

1) 概念星 A 和 B 同时加电,测控综合地检设备 A 发送上行遥控信号,两颗卫星均锁定 A 通道上行遥控信号,通过星务前端监视概念星 A 和 B 的地测数据,发送概念星 A 的遥控指令,概念星 A 收到遥控指令并成功执行,概念星 B 显示收到错误帧计数增加 1;

2) 测控综合地检设备 B 发送和 A 通道相同的上行信号,测控前端 A 和测控前端 B 分别发送卫星 A 和卫星 B 的遥控指令,地测显示概念星 A 收到遥控指令并成功执行,概念星 B 显示收到错误帧计数增加 1;

3) 取消加载测控综合地检 A 的上行信号,通过测控前端 B 发送概念星 B 的遥控指令,地测结果显示地测显示概念星 B 收到遥控指令并成功执行,概念星 A 显示收到错误帧计数增加 1;

4) 在步骤 3) 基础上重新加载通道 A 上行信号,通过测

(下转第 44 页)