

基于时分复用的航天测控网卫星测控支持满足率研究

徐建, 李文舒, 杨帆, 刘振韬, 吕莹, 张力军

中国西安卫星测控中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年11月23日; 录用日期: 2021年12月22日; 发布日期: 2021年12月30日

摘要

地面测控资源对卫星支持的满足率是测控网高效运行的评价尺度, 是航天测控网的综合能力的重要体现。当测控网所支持的卫星数量超过一定限度时, 卫星对测控资源的需求会产生冲突, 某些卫星的测控需求将无法得到满足, 此时测控网内地面测控资源将会出现缺口。本文基于某一测控网运行情况开展综合分析, 梳理出地面测控资源的各个影响因子, 建立了需求约束体系, 对体系中的指标进行量化评估, 通过定性、定量研究相结合的分析方法, 对地面站资源的使用情况进行综合分析, 从中可以初步推算出未来一段时间内地面测控资源对卫星支持的满足率, 并能够据此对地面测控资源的发展规划提出合理的建议。

关键词

测控网, 满足率, 约束体系

Research on Satellite Support Satisfaction Rate of TT & C Network Based on Time Division Multiplexing

Jian Xu, Wenshu Li, Fan Yang, Zhentao Liu, Ying Lyu, Lijun Zhang

China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 23rd, 2021; accepted: Dec. 22nd, 2021; published: Dec. 30th, 2021

Abstract

The satisfaction rate of ground TT & C resources to satellite support is the evaluation criterion for the efficient operation of TT & C network and an important embodiment of the comprehensive

文章引用: 徐建, 李文舒, 杨帆, 刘振韬, 吕莹, 张力军. 基于时分复用的航天测控网卫星测控支持满足率研究[J]. 国际航空航天科学, 2021, 9(4): 153-159. DOI: [10.12677/jast.2021.94017](https://doi.org/10.12677/jast.2021.94017)

ability of Aerospace TT & C network. When the number of satellites supported by the TT & C network exceeds a certain limit, the requirements of satellites for TT & C resources will conflict, and the TT & C requirements of some satellites will not be met. At this time, there will be a gap in ground TT & C Resources in the TT & C network. Based on the operation of a measurement and control network, this paper carries out a comprehensive analysis, combs out various influencing factors of ground measurement and control resources, establishes a demand constraint system, quantitatively evaluates the indicators in the system, and comprehensively analyzes the use of ground station resources through a combination of qualitative and quantitative research. From this, we can preliminarily calculate the satisfaction rate of ground TT & C resources to satellite support in the future, and put forward reasonable suggestions on the development planning of ground TT & C resources.

Keywords

TT & C, Satisfaction Rate, Constraint System

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着航天测控事业的飞速发展,我国在轨航天器和测控设备的数目激增,地面测控资源相对较为紧张,因此,航天测控网卫星支持满足度是测控网高效运行的评价尺度,是航天测控网的综合能力的重要体现。开展测控网卫星支持满足度分析方法研究是提升航天测控服务质量及多任务支持能力的关键环节。国外近地测控网测控站数量较多,一般在地理位置上分布较广,形成全球性的测控网布局。这样,一方面对于某个近地卫星,可以通过多个测控站进行接力跟踪,扩大测控覆盖率,缩短了对航天器的测控中断时间[1] [2] [3]。另一方面对于多个近地卫星,则可由处于不同地理位置的测控站同时进行测控,减少测控站资源的使用冲突。由于近地卫星轨道高度、倾角、周期等轨道要素的不同,所以会出现两个或多个卫星同时经过同一测控站上空、并要求其提供测控支持的情况,从而引起测控设备使用冲突。为解决这一矛盾,一般是给测控站配备两套或多套测控设备,以使该站可同时对多个目标提供测控支持。

因此,航天测控网卫星支持满足度分析是资源问题的关键环节,通过对测控资源的测控能力进行综合分析,从中可以得出测控资源运行管理水平和资源满足度的评价,并能够据此对测控网资源的发展规划提出合理的建议。本文基于某一典型测控网运行历史数据进行深度挖掘研究,针对高轨、低轨卫星对地相对运动特性,测控站点跟踪模式方法差异性较大,本文在开展航天测控网卫星支持满足度研究时,首先对资源使用约束进行体系设计、建立约束模型,其次,对同一站点同一设备采用时分复用的方式进行建模分析,采用定性和定量相结合的方式,通过计算星地可见预报、设备匹配关系等方法,充分考虑体系约束情况,仿真计算推断出未来一段时间内的卫星支持满足度。

2. 卫星需求约束体系设计

选取某一典型的测控网开展研究,地面测控资源的使用约束主要来源于跟踪测控任务类型、地面站设备不可用等情况,如图1所示。

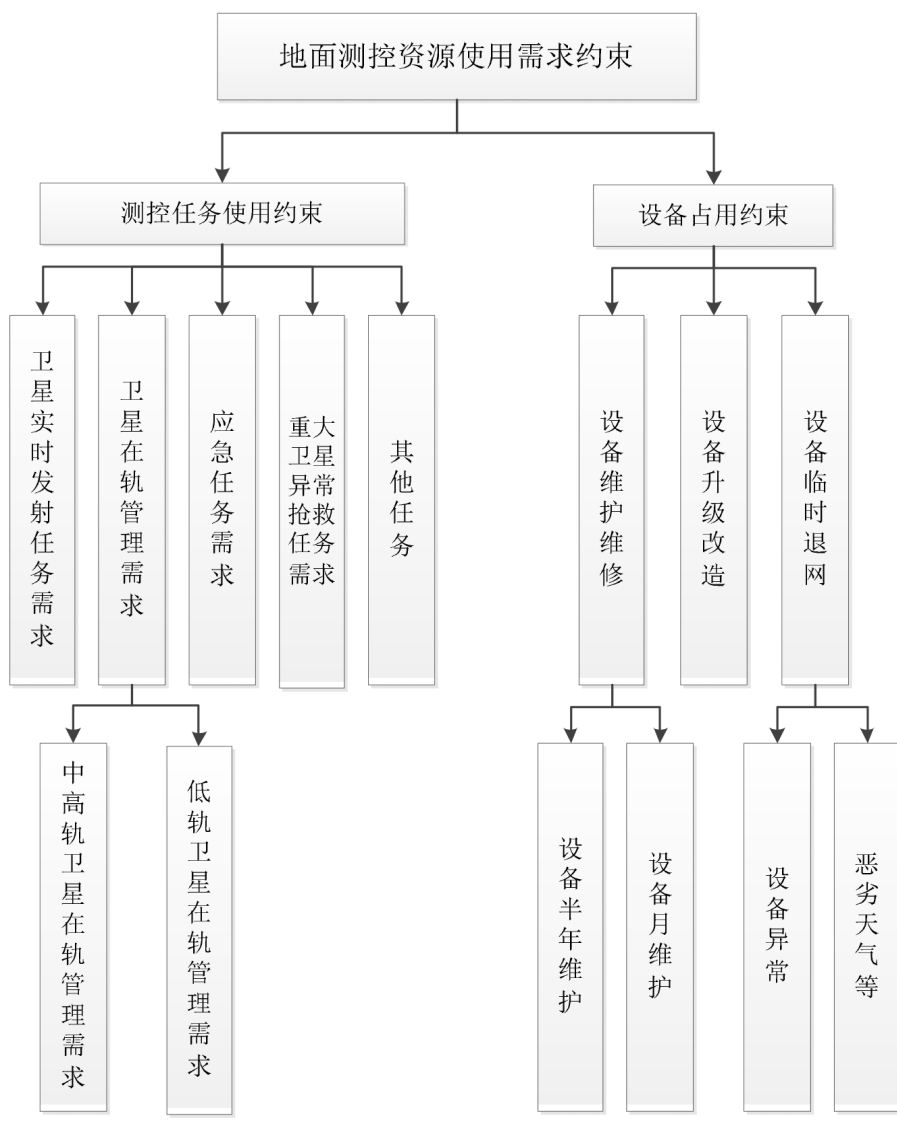


Figure 1. Constraints on the use of ground TT & C Resources
图 1. 地面测控资源使用约束条件

2.1. 测控任务约束

2.1.1. 卫星实时发射任务资源需求

根据实际运行情况，在实时任务在发射段中，与在轨段任务冲突时，由于实时发射任务资源使用优先级高，在轨运行管理任务往往会降低自身的测控需求来满足实时任务，因此，本文在分析实时任务地面资源满足度时，可不考虑卫星在轨管理任务对测控资源占有情况的影响。

2.1.2. 卫星在轨管理任务资源需求

1) 低轨卫星任务资源需求

低轨卫星的测控需求因任务中心的差异而不统一，经 STK 仿真计算，当前典型的低轨道卫星为太阳同步轨道、低倾角圆轨道卫星，经仿真计算，其星下点轨迹如图 2 所示，对某一地面站来说 1 天可见低倾角圆轨道卫星圈次约为升轨 4 圈/降轨 4 圈，可见太阳同步轨道卫星圈次约为升轨 2 圈/降轨 2 圈。在不

考虑临时轨道控制、碰撞预警等重要事件时, 在轨管理阶段单个卫星的测控需求基本为升轨 NS 圈/降轨 NJ 圈等固定需求模式[4] [5]。

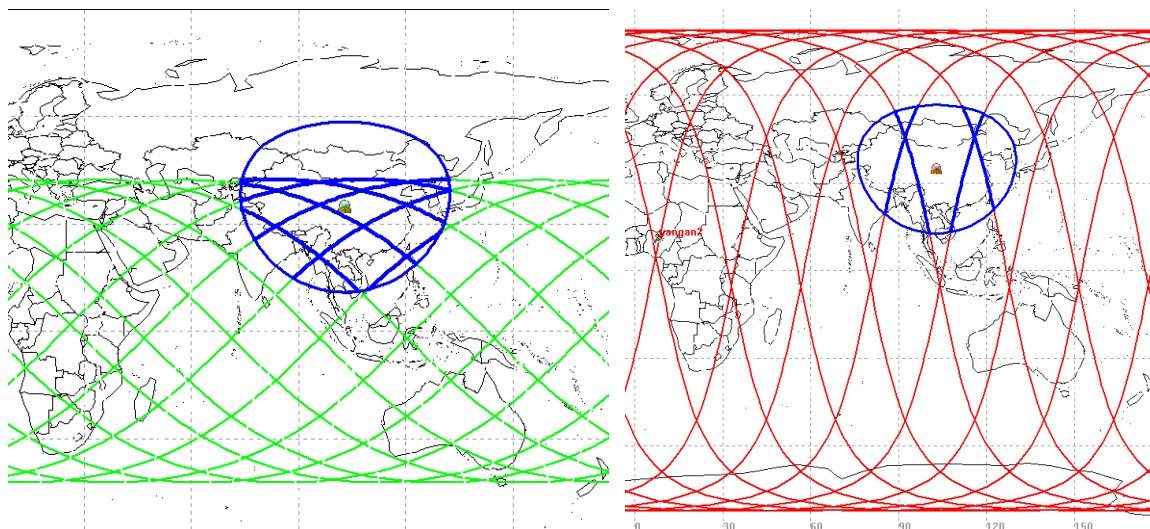


Figure 2. Schematic diagram of satellite coverage in low inclination circular orbit (solar synchronous orbit)

图 2. 低倾角圆轨道(太阳同步轨道)卫星覆盖示意图

根据某测控网历史数据测算, 单颗低轨卫星每天的测控需求 $\bar{Q}$ 圈次。

$$\bar{Q} = \left(\sum_{t=0, n=0}^{t=T, n=N} Q_{t,n} \right) / T / N$$

其中, $\bar{Q}$ 为单星圈次/天; $Q_{t,n}$ 为第 t 天的第 n 设备跟踪总圈次; T 为总天数, N 为设备总数。

2) 中高轨卫星任务资源需求

中高轨卫星的测控需求主要为 24 小时遥测接收(安排相对固定的下行遥测单收设备完成)、轨道控制(安排全功能设备完成)等, 由测控网内遥测单收设备、全功能设备进行资源保障任务。

此外, 中高轨卫星还需要测控网内其他全功能设备进行部分弧段支持保障, 通过跟踪数据进行模算, 每天约需全功能设备 N_g 套。

$$\bar{S} = \left(\sum_{t=0, n=0}^{t=T, n=N} S_{t,n} \right) / (T \times 24 \times N)$$

其中, $\bar{S}$ 为全功能设备需求/天; $S_{t,n}$ 为第 t 天的第 n 套设备跟踪总时长; T 为总天数, N 为设备总数。

2.2. 设备约束

本文研究的设备使用约束主要是测控网长期管理引起的能力损耗, 由设备非跟踪任务用途引起的设备无法跟踪, 这些任务用途活动主要包含日常维护、测试对接、改造搬迁转场等工作。设备非跟踪任务损耗集合为:

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_M\}$$

其中 L 为设备总损耗; l_i 为第 i 个任务引起设备损耗, 其中包含了各损耗值的折算。

① 重大任务保障。根据某一测控网运行情况, 全年重大任务保障中频繁占用地基资源等情况。通过折算分析, 部分型号卫星需要提高测控需求, 每颗星每天平均可见 8 圈, 则:

$$l_1 = \left(\sum_{k=1}^{155} q_k \right) / 40 \approx x \cdot (8-4) / 40$$

② 设备维护。按照测控网运行规范，每套测控设备每年 2 次半年维护(各 7 天)、每套设备每月维护 1 次(各 1 天)，则设备每天约损耗为

$$l_2 = (S \times T_y + S \times T_m) / 365$$

其中 l_2 为设备维护损耗/天； S 为参加维护的设备总数； T_y 为设备半年维护的总天数， T_m 为月维护的总天数。

③ 设备测试对接、故障、测试、恶劣天气等退网。根据某一测控网运行情况统计分析，按照任务分布，按照 1.5 倍前期情况考虑。

$$l_3 = 1.5 \times 0.04 = 0.06。$$

④ 重大任务设备预留。在重大任务保障期间，指定区域方向需预留 0.5~1 套设备进行保障。

$$l_4 = 1.5(3)。$$

3. 评价标准设计

从用户需求满足、资源综合使用、任务满足率等方面考虑，测控资源调度评价指标体系主要包含以下 3 个类型：

① 调度目标完成情况。航天测控资源调度中，调度目标完成情况是调度者或决策者判断调度结果是否满意的最直观和最重要的评价指标。

② 任务需求满足情况。包括总的需求满足指标，以及如冲突度、单星被测控支持情况、各类型集合下的航天器需求满足情况等。

③ 测控资源利用情况。包括测控网服务能力、资源利用效率、资源配置合理程度等主要指标，以及其他如应急任务支持能力、资源可靠性等辅指标。

由于现有的调度模式、调度系统暂不考虑用户的评价指标以及对测控服务能力、资源可靠性等均不完全掌握，因此，本文重点按照以下评价标准对单设备资源调度能力进行预估，见表 1。本文基于现有低轨卫星分布，通过资源调度系统进行模算，并结合现有数据进行分析，每套全功能设备每天的调度能力约为 N 圈次[6] [7]。

Table 1. Evaluation criteria

表 1. 评价标准

目标类型	评价内容描述	评价结果
目的型	调度时需满足特定卫星任务对设备测控体制、功能、性能等方面的要求	是否满足
	由于卫星轨道的特征，调度时任务安排时间必须在设备对卫星的可视弧段内	是否满足
	由于支持能力、稳定性、卫星轨道或设备波束宽度等因素制约，测控设备可视是单目标支持，即同一时间内只能为一颗卫星提供测控支持	是否满足
	同一设备相邻任务之间的时间间隔应大于设备切换时间	是否满足

4. 资源支持满足率分析

本文基于卫星需求约束体系采用定性和定量分析的方法，对某一测控网的卫星任务支持满足率进行

分析预判,选取 200 颗卫星和 25 套设备进行模算分析,采用设计的基于目的型的评价标准,来仿真得到资源支持满足率结果。

由于卫星发射任务中,卫星的轨道、测控需求等均无法预计,加之任务优先级高、其他卫星管理任务会转让或降低测控需求等不可控因素,因此,实时任务用定性分析法进行计算;根据本文建立的需求约束体系和评估体系,对参加应急任务和自动调度的设备,采用定量方法基于时分复用的航天网卫星支持满足率模型,对其他类型设备均采用定性分析法。

4.1. 定性分析

针对航天发射等特殊类型任务类型,采用定量分析的方式进行评估计算。按照全年 40 次发射任务进行分析,经估算重要弧段安排双站跟踪存在同时需要 10 套设备支持测控工作的情况,25 套设备完全满足发射任务保障需求。

4.2. 定量分析

根据历史经验推算,重大任务保障和实时任务发射期间,测控资源使用最为紧张,设备占用最多,决定了是否出现资源缺口。下面,本文基于历史数据推算后续设备使用紧张度情况,推算的内容包括单套设备的跟踪能力、设备非长管损耗、中高轨卫星占用损耗等。

1) 全功能设备跟踪能力

采用现有系统的计算模型,只考虑了设备跟踪最低约束条件(单弧段最少跟踪时长 8 分钟、进出站仰角 8°),未考虑各站点设备遮蔽角、退网、单弧段卫星只安排 1 套设备、卫星需求等约束情况,经仿真系统推演计算得到平均每套全功能设备极限跟踪低轨卫星能力约为 60 圈次/天。

2) 中高轨卫星占用损耗

根据上文开展的分析看,中高轨卫星的任务主要由地面站网内遥测单收设备接收,全功能设备还需承担中高轨卫星的常规测轨和应急跟踪任务,通过历史数据进行折算,得到:

$$\bar{S} = \left(\sum_{t=0, n=0}^{t=T, n=N} S_{t,n} \right) / (T \times 24 \times N) \approx 0.5 \text{ 套/天}。$$

因此,中高轨卫星平均每天占用约 5 套全功能设备。

3) 非长管地面资源占用损耗

根据本文梳理的约束模型,考虑设备维护维修、改造、发射等情况,不考虑设备预留和大面积提升部分低轨卫星测控需求的前提下,设备非在轨管理占用的最大损耗为:

$$L = l_1 + l_2 + \dots + l_5 \approx 8.41 \text{ 套/天}。$$

4) 地面资源使用紧张度分析

综合以上仿真计算结果推算分析,仅考虑实时任务、联调对接、应急和维护轮休等实际需求时,为支持 200 颗卫星测控需求,则需要 20 套全功能设备支持,基本满足航天发射、平台测控等多任务保障工作。

5. 结论

本文研究针对地基测控网开展测控网紧张度建模分析工作,直接服务于测控网管理工作,目的是将研究成果推广应用于下一年任务分析和未来一段时间内的航天测控网卫星测控支持满足率。

在分析建模中,本文基于测控网运行期间的历史数据对未来一段时间内的约束需求等进行外推,通过本文的分析建模得到以下几点结论。

1) 航天测控网卫星测控支持满足率是一个复杂过程,既需要历史经验数据的积累,也需要对测控需求发展趋势的梳理,还要测控网测控支持满足率分析度量模型的支持,才能科学合理的预估各影响因子的数值用于地面站网资源紧张度分析评估工作。

2) 测控网内地面站网设备的支持能力取决于设备的功能、点位部署,本文主要分析的全功能设备的跟踪接收能力取决于卫星运行轨道以及设备的点位部署,点位部署越分散支持的卫星弧段就越多,就现有分布布局,通过调度系统仿真计算和数值统计外推,得到每套设备的跟踪能力约为 60 圈次/天。

3) 测控网内设备支持能力的制约因素比较复杂,包含设备维护维修、联调对接、转场停机、应急故障等,主要特点为发生的不确定性和占用时间长,导致建模分析中无法对具体的时刻开展数据分析建模工作,只能基于历史数据外推一段时间内的平均数值。

4) 定性分析方法侧重宏观层面及系统性分析,分析方法简单、结果较为直观,高度依赖历史统计数据和经验数值,适用于设备冗余度高、卫星数量少且测控需求单一的地面站网测控支持满足率分析;定量分析方法更侧重建模计算,分析结果较为全面,但高度依赖外推数据和分析模型,分析结果需要在大量的试验数据中统计获得,可信度较高,但设备不可用情况难以反映到某一时刻的具体分析结果中,只能反映出某段时间内的平均数值。

参考文献

- [1] Yang, T.S., Dong, X.S. and Huang, Y.X. (2007) Method to Realize TT & C of Spacecraft In-Orbit from Ground-Based to Space Ground Based Mode. *Engineering Sciences*, 179-183.
- [2] Ferreira, B.F., Isento, J.N., Dias, J.A., Rodrigues, J.J.P.C. and Zhou, L. (2012) An SNIVIP-Based Solution for Vehicular Delay-Tolerant Network Management. 2012 *IEEE Global Communications Conference*, Anaheim, CA, USA, 3-7 December 2012, 250-255. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2012.6503121>
- [3] Gardikis, G., Sarsembagieva, K., Xilouris, G. and Kourtis, A. (2012) An SNMP agent for active in-network measurements. 2012 *IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*, St. Petersburg, Russia, 3-5 October 2012, 302-307. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2012.6459684>
- [4] 罗赞骞, 夏靖波, 智英建, 等. 统计 IP 网络质量的模糊评估方法[J]. 计算机科学, 2010, 37(8): 77-80.
- [5] 王刚, 武小悦. 美国航天测控系统的构成及发展[J]. 国防科技, 2010, 31(5): 87-91.
- [6] 魏晨曦. 美国航天测控通信网的现状和发展[J]. 飞行器测控技术, 1993(3): 47-64.
- [7] 杨永安, 樊恒海, 冯祖仁, 等. 一种基于 ES 法的卫星测控资源调度仿真及实现[J]. 系统仿真学报, 2005(4): 982-985.