

文章编号: 2095-4980(2022)03-0261-06

机动多波束测控系统卫星目标跟踪

田明辉^{1,2}, 王亚青^{1,2}, 王璐^{1,2}, 徐晓靖^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230088; 2. 孔径阵列与空间探测安徽省实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要: 目标跟踪是航天测控领域中的一重要技术。针对机动多波束卫星测控系统, 提出一种机动多波束测控系统卫星目标跟踪方法。该方法给出机动平台下卫星目标波束跟踪处理的应用模型和流程。在仿真实验中构建了几种典型的场景, 分析了该方法的目标预测误差。最后给出一些应用性结论, 具有一定的工程参考意义。

关键词: 机动平台; 多波束; 测控系统; 目标跟踪

中图分类号: TN973

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020142

Satellite target tracking for mobile multi-beam TTC system

TIAN Minghui^{1,2}, WANG Yaqing^{1,2}, WANG Lu^{1,2}, XU Xiaojing^{1,2}

(1.No.38 Research Institute of CETC, Hefei Anhui 230088, China;

2.KLAASA Laboratory, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: Target tracking is an important technology in aerospace Telemetry Track and Command (TTC) scope. An algorithm for target tracking in mobile multi-beam TTC system is proposed. In this algorithm, the application model and the processing steps are given for mobile multi-beam TTC system. In the simulation experiment, several typical scenes are constructed and the precision of target predicting is also analyzed. Finally, several constructive conclusions are made for practical engineering applications.

Keywords: mobile platform; multi-beam; Telemetry Track and Command(TTC) system; target tracking

近年来, 卫星测控技术^[1-4]发展日新月异, 目标跟踪作为卫星测控的核心功能之一, 也相应地越来越复杂。机动平台测控设备卫星目标跟踪主要是根据测量信号的距离、方位角和俯仰角, 结合平台自身的位置姿态信息, 对卫星目标进行波束跟踪预测, 输出目标下一周期的波束方位角和俯仰角, 从而引导测控设备的上下行波束进行切换, 始终与卫星保持波束覆盖与链路通信的过程。机动多波束测控设备卫星目标跟踪, 由于机动平台自身受功耗等限制, 上下行的波束较窄, 从而对目标跟踪预测的精确度和波束切换的频度提出了更高的要求。再者, 由于机动多波束测控设备具有“动中测”的业务需求, 在运动中平台的位置和姿态是实时变化的, 上下行波束容易受到平台颠簸和平台机动造成指向偏差的影响, 因此测控设备如何在机动平台下对目标进行精准跟踪, 一直是目标波束跟踪重点和难点^[5-8]。本文针对机动平台下测控设备卫星目标波束跟踪存在的问题, 提供一种机动多波束测控系统卫星目标跟踪方法, 给出了机动平台下卫星目标波束跟踪处理的模型和流程, 在仿真实验中构建了几种典型场景, 分析了该方法的跟踪预测误差, 解决了机动平台下卫星目标跟踪的问题, 最后给出了一些应用性结论, 进而推动此项技术在卫星测控工程实践上的广泛应用。

1 应用模型

通过接收机动多波束测控系统中阵列天线与射频分系统测量的目标信号俯仰角、方位角等信息, 接收数字基带分系统测量的目标距离信息, 接收惯导设备发送的平台位置姿态信息, 包括平台的经度、纬度、高度、偏航、俯仰、横滚等信息, 接收数据交互计算机发送的目标数字引导信息, 进行目标的自跟踪、记忆跟踪、程序引导、数字引导等处理步骤, 预测目标下一周期的俯仰角和方位角, 并引导上下行波束进行波束切换, 从而完成机动多波束测控系统的卫星目标波束跟踪。

图 1 为机动多波束测控系统的卫星目标波束跟踪的方法流程图, 本文提供的机动多波束测控设备卫星目标波束跟踪方法, 主要包括以下 6 个部分: a) 接收阵列天线与射频分系统测量的目标信号俯仰角、方位角等信息; b) 接收数字基带分系统发送的目标距离信息; c) 接收惯导设备发送的平台位置姿态信息, 包括平台的经度、纬度、高度、偏航、俯仰、横滚等信息; d) 接收数据交互计算机发送的目标数字引导信息; e) 对目标进行角度自跟踪、记忆跟踪、程序引导、数字引导等处理步骤, 更新目标航迹数据; f) 输出目标下一周期的俯仰角和方位角给阵列天线与射频分系统, 引导上下行波束进行波束切换, 完成机动多波束测控设备卫星目标波束的闭环跟踪。

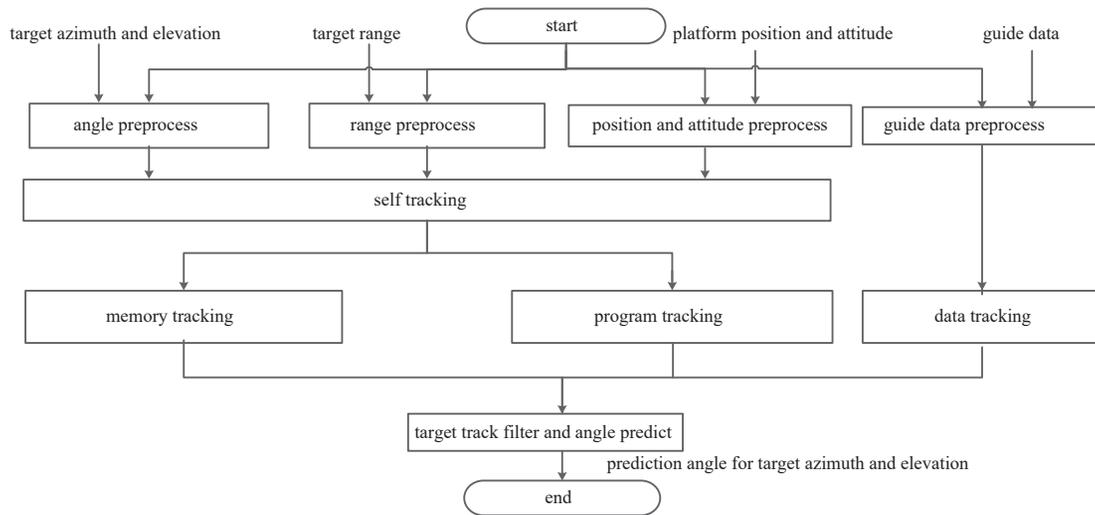


Fig.1 Flow of beam tracking for satellite target

图 1 卫星目标波束跟踪流程图

由于卫星目标跟踪的难点主要在步骤 e) 的处理过程中, 因此以下主要针对卫星目标跟踪处理的过程与步骤进行分析。

2 跟踪处理

对于卫星目标的跟踪预测处理过程主要包含自跟踪、记忆跟踪、数字引导和程序引导, 见图 2。

2.1 自跟踪

自跟踪^[9]是在波束成功捕获到目标后, 通过数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)多波束测角获得目标在观测时刻的俯仰角和方位角的测量值, 通过基带处理获得目标在观测时刻的距离测量值。主要包括以下几个步骤:

- 1) 一维滤波: 目标的跟踪数据率设置为 50 Hz, 对目标距离、方位和俯仰的观测数据率可以设定为 100 Hz 时, 对距离、方位和俯仰进行一次一维线性滤波, 以提高跟踪滤波前的测量精确度。
- 2) 时间配准: 由于俯仰方位的测量值和距离的测量来自不同的处理, 因此两者之间的测量时序是异步的, 所以必须对目标的距离、俯仰和方位进行时间配准, 将一方通过线性插值配准到另一方的观测时刻。配准原则一般将数据率较高的一方配准到数据率较低的一方。
- 3) 阵面坐标系观测值: 通过配准获得目标在阵面坐标系下的距离、方位和俯仰值。
- 4) 惯导数据配准: 由于惯导数据与目标的观测数据也是异步的, 因此需要将惯导数据配准到目标观测数据上, 获得目标在观测时刻时平台的位置(经度、纬度、高度)和姿态(偏航、俯仰、横滚)信息。
- 5) 坐标变换至地心地固: 根据平台的位置和姿态信息, 可以将目标在阵面坐标系下距离方位俯仰转换到地心地固(Earth Centered Earth Fixed, ECEF)坐标系下。
- 6) 滤波跟踪: 将目标在地心地固(ECEF)坐标系下的位置作为输入, 进入滤波器对目标进行跟踪滤波, 滤波器选择不敏滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)^[10]。
- 7) 滤波预测: 滤波器能够输出目标当前时刻的滤波位置和下一时刻的预测位置。
- 8) 平台姿态预测: 根据对平台惯导输入的位置和姿态信息, 对平台在下一时刻的位置进行预测。
- 9) 坐标变换至阵面: 根据平台下一时刻的位置和姿态, 将目标在地心地固坐标系下的预测位置通过坐标变换, 转成目标下一时刻在阵面坐标系下的距离、方位和俯仰。

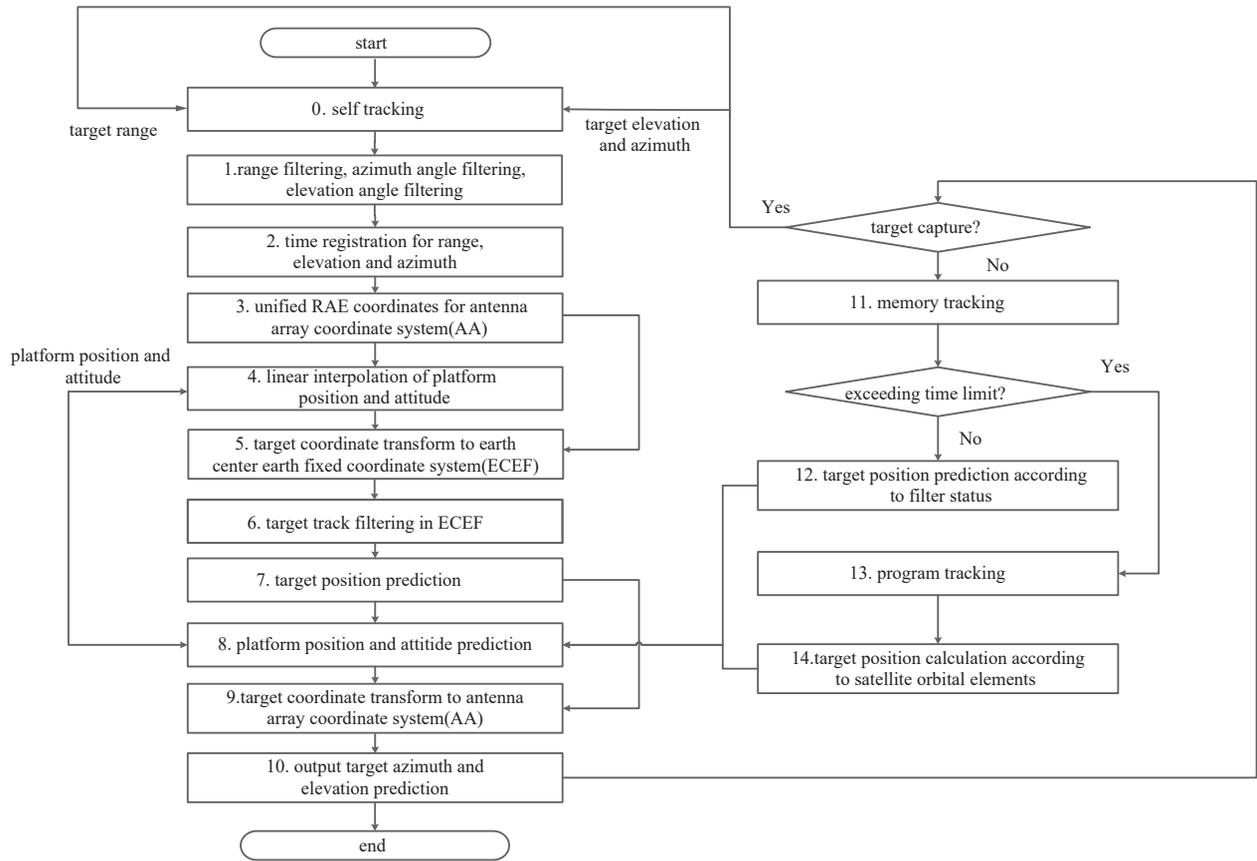


Fig.2 Workflow for satellite target tracking
图2 卫星目标的跟踪预测流程

10) 时序控制：将目标下一时刻的俯仰和方位送入波束时序控制队列，在下一时刻到来前 10 ms 送入波束控制，计算波束控制字。

2.2 记忆跟踪

11) 记忆跟踪：若波束未能成功捕获目标，则不能形成对目标的观测。在记忆时限内，可以认为目标仍符合原运动状态。

12) 外推预测：通过最近一次滤波器的状态对目标进行短时间的外推预测，预测下一时刻目标在地心地固坐标系下的位置。

2.3 数字引导

当波束未能成功捕获目标，且已超过记忆跟踪的记忆时限，通过记忆已无法推测目标的准确位置。若此时有外部周期性(通常是 1 次/s)发送的目标数字引导数据，则可通过线性插值法对卫星下一时刻的位置进行预测，之后通过自跟踪的步骤 8)~步骤 10)进行处理。

2.4 程序引导

当波束未能成功捕获目标，且已超过记忆跟踪的记忆时限，通过记忆已无法推测目标的准确位置。根据目标的轨道根数，通过轨道计算获得卫星下一时刻目标地心地固坐标系下的位置，之后通过自跟踪的步骤 8)~步骤 10)进行处理。

3 仿真实验

实验通过卫星仿真工具，建立高度 400 km 的圆轨道卫星，假定波束切换时间为 0.5 s，俯仰维的观测范围是 $[-60^\circ, 60^\circ]$ ，方位维的观测范围是 $[-80^\circ, 80^\circ]$ 。俯仰角测量精确度为 0.1° ，方位角的测量精确度为 0.37° 。

3.1 仿真场景

建立以下几种场景的仿真实验，见图3和图4。

- 1) 平台自身以 60 km/h 的速度沿着星下点轨迹作匀速直线运动；
- 2) 平台自身以 60 km/h 的速度在星下点的一侧进行匀速直线运动；
- 3) 平台自身在星下点轨迹的一处固定不动，且车头方向平行于星下点轨迹运动方向；
- 4) 平台自身在星下点轨迹的一处固定不动，且车头方向垂直于星下点轨迹运动方向；
- 5) 平台自身在星下点轨迹的一处小范围内，以 12°/s 的角速度进行顺时针运动。



Fig.3 3D graph for simulation scene
图3 建模仿真场景设定三维图

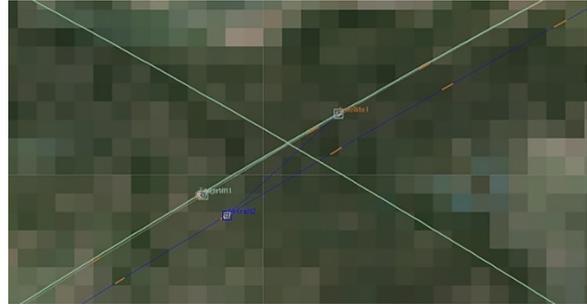


Fig.4 2D graph for simulation scene
图4 建模仿真场景设定二维图

3.2 仿真结果

在上述仿真条件下，分别对以上5种情况在地心地固坐标系(ECEF)下对目标的俯仰角和方位角进行跟踪预测，然后再转换回阵面坐标系下，获得的结果见图5~图9。其中红色为观测卫星的方位角和俯仰角的真值，蓝色部分为跟踪预测值，黑色部分为测量值。

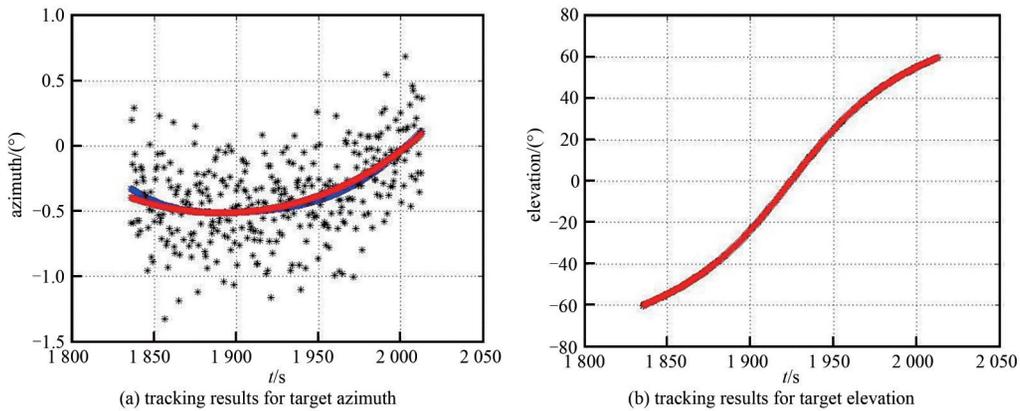


Fig.5 Tracking results for target azimuth and elevation in scene 1

图5 仿真场景1下方位角与俯仰角跟踪预测结果

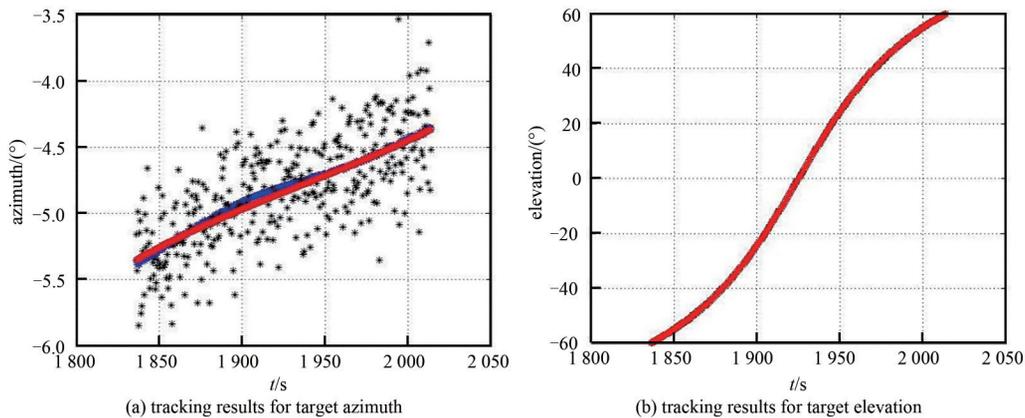


Fig.6 Tracking results for target azimuth and elevation in scene 2

图6 仿真场景2下方位角与俯仰角跟踪预测结果

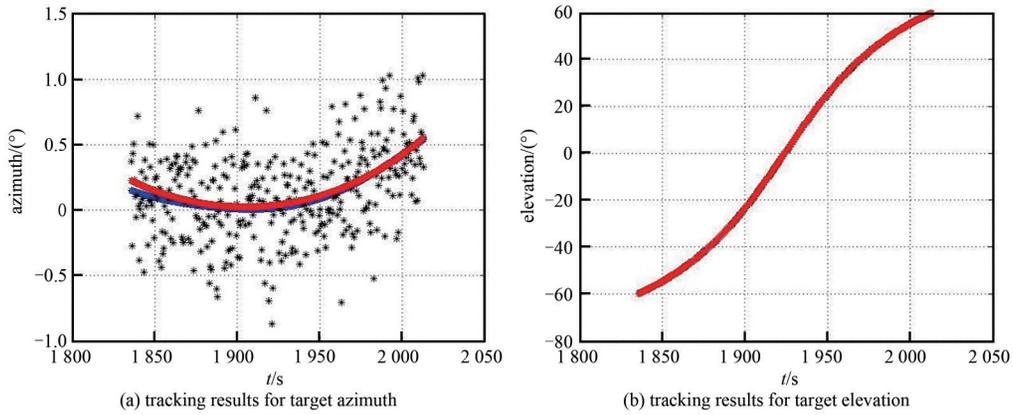


Fig.7 Tracking results for target azimuth and elevation in scene 3

图 7 仿真场景 3 下方位角与俯仰角跟踪预测结果

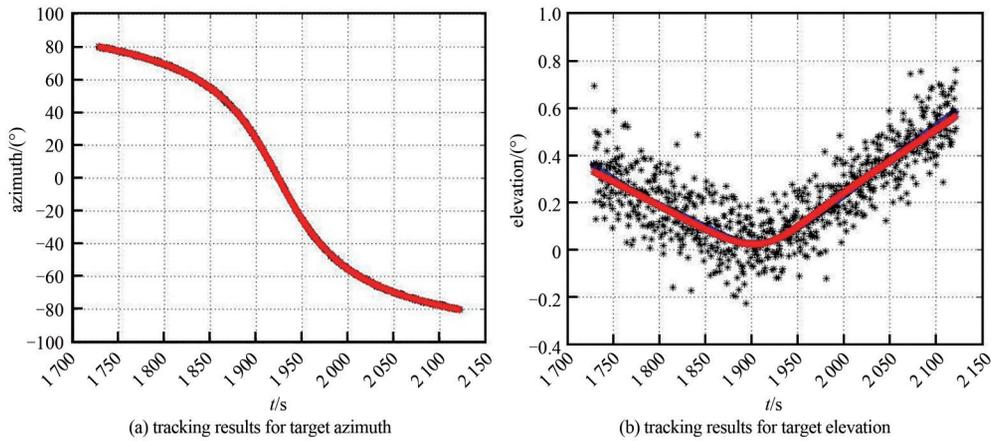


Fig.8 Tracking results for target azimuth and elevation in scene 4

图 8 仿真场景 4 下方位角与俯仰角跟踪预测结果

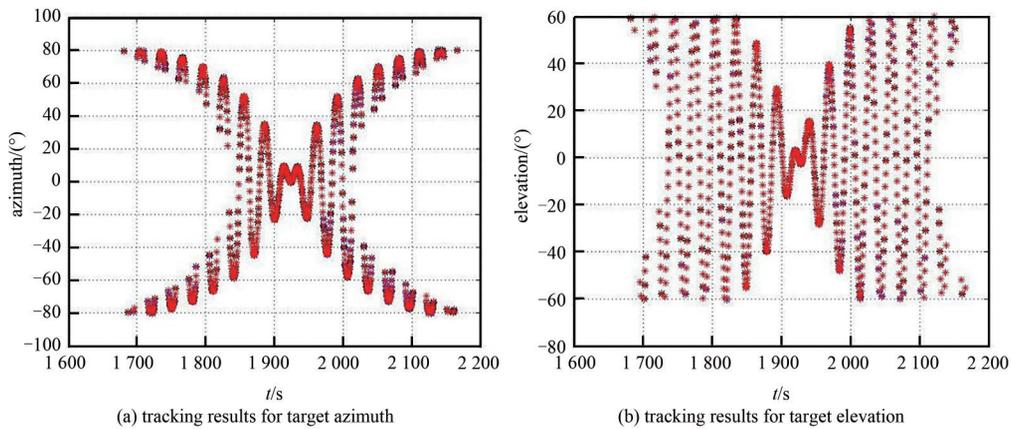


Fig.9 Tracking results for target azimuth and elevation in scene 5

图 9 仿真场景 5 下方位角与俯仰角跟踪预测结果

从以上仿真实验结果可以得出：

- 1) 进行测控任务时，当平台固定不动或者进行直线运动时，目标卫星在阵面坐标系下的方位角和俯仰角呈现线性变化规律，在阵面坐标系下直接进行跟踪预测可以较好地满足要求。
- 2) 进行测控任务时，当平台发生机动，目标卫星在阵面坐标系下的方位角和俯仰角呈现非线性变化，此时若在阵面坐标系下对目标进行跟踪预测，线性滤波器会失效，不能对目标进行较为有效的预测；把观测数据转换到地心地固坐标系下，则目标自身的运动在俯仰角和方位角上仍为线性运动，可以有效地对目标进行跟踪及预测；
- 3) 对于波束宽度 1° 的测控系统，跟踪波束切换数据率大于 2 Hz 就足以满足轨道高度在 400 km 及以上的卫星测控任务，保障目标在执行测控任务时始终被波束覆盖。

在上述 5 种仿真场景下的目标方位角跟踪与俯仰角跟踪的误差均值和均方根情况见表 1。

表 1 五种仿真场景下跟踪预测的误差情况
Table 1 Error for tracking result in the five scenes

scene number	error for azimuth angle/(°)		error for elevation angle/(°)	
	mean value	root mean square	mean value	root mean square
1	-0.037 2	0.044 5	0.003 3	0.040 7
2	0.011 9	0.024 8	-0.005 7	0.038 2
3	0.027 6	0.037 1	0.008 3	0.042 5
4	0.006 5	0.189 1	0.000 4	0.009 0
5	0.005 3	0.326 9	-0.000 4	0.096 7

4 结论

本文给出了一种机动多波束测控系统卫星目标跟踪方法,有效解决机动平台下多波束测控设备中卫星目标波束跟踪不稳定、易丢失等问题,相比传统固定站测控设备波束跟踪而言,更适用于机动平台测控设备。通过对仿真结果分析,得出以下结论:a)当平台固定时,可以直接在阵面坐标系下对目标进行跟踪预测;b)当平台发生机动时,需要在地心地固坐标系下对目标进行跟踪预测;c)对于波束宽度 1° 的测控系统,跟踪波束切换数据率大于 2 Hz 足以满足轨道高度在 400 km 及以上的卫星测控任务需求。

参考文献:

- [1] 张忠华,顾纪祥,茅永兴,等. 航天器海上测控技术现状分析与发展思考[J]. 遥测遥控, 2011,32(4):1-4. (ZHANG Zhonghua, GU Jixiang, MAO Yongxing, et al. Current situation analysis and development thinking of spacecraft maritime tracking & control technologies[J]. Journal of Telemetry, Tracking, and Command, 2011,32(4):1-4.)
- [2] 曾杰民. Ka 频段测控天线跟踪关键技术的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (ZENG Jiemin. Key technique research for Ka band TT&C antenna tracking[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [3] 王怀,彭兴会,李凡. 低轨遥感卫星 Ka 频段捕获跟踪的设计及应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(4):580-584. (WANG Huai, PENG Xinghui, LI Fan. Design and application of low orbit remote sensing satellite Ka band capture tracking[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(4):580-584.)
- [4] 朱虎. 运动平台相控阵卫星跟踪系统角度测量与跟踪实现研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (ZHU Hu. Research on angular measurement and tracking implementation of phased array satellite tracking system on motion platform[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.)
- [5] 马越,李朝海. 基于和差波束测角的角度跟踪仿真研究[J]. 雷达科学与技术, 2017,15(1):68-72. (MA Yue, LI Chaohai. Simulation research of angle tracking based on angle measurement of sum and difference beams[J]. Radar Science and Technology, 2017,15(1):68-72.)
- [6] 朱虎,李超海,张江波,等. 相控阵卫星跟踪系统角度测量研究[J]. 雷达科学与技术, 2017,15(4):347-353. (ZHU Hu, LI Chaohai, ZHANG Jiangbo, et al. Research on angular measurement of phased array satellite tracking system[J]. Radar Science and Technology, 2017,15(4):347-353.)
- [7] 向晓萍,李朝海,黄宇声,等. 相控阵卫星跟踪系统搜索/捕获仿真研究[J]. 雷达科学与技术, 2015,13(5):535-542. (XIANG Xiaoping, LI Chaohai, HUANG Yusheng, et al. Simulation research on search/capture process of phased array satellite tracking system[J]. Radar Science and Technology, 2015,13(5):535-542.)
- [8] 张江波,李朝海,马越,等. 相控阵卫星跟踪闭环实验系统设计与实现[J]. 雷达科学与技术, 2017,15(4):421-426. (ZHANG Jiangbo, LI Chaohai, MA Yue, et al. Design and realization of closed-loop experiment system of phased array satellite tracking system[J]. Radar Science and Technology, 2017,15(4):421-426.)
- [9] 张宇,陶晓明. 卫星地面站天线跟踪性能评估方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4):508-511. (ZHANG Yu, TAO Xiaoming. Evaluation method for tracking performance of satellite earth station antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):508-511.)
- [10] 陈洪,李晶,张茂辉,等. 基于 IMM-UKF 的航天测控雷达机动目标跟踪[J]. 现代电子技术, 2014,37(13):43-46. (CHENG Hong, LI Jing, ZHANG Maohui, et al. Maneuvering target tracking of aerospace measurement & control radar based on IMM-UKF algorithm[J]. Modern Electronic Technique, 2014,37(13):43-46.)

作者简介:

田明辉(1981-),男,黑龙江省大庆市人,博士,高级工程师,主要从事卫星测控系统设计研究工作.
email:mhtian@mail.ustc.edu.cn.

王亚青(1981-),男,安徽省庐江市人,博士,主要从事航天系统工程研究.

王璐(1973-),男,合肥市人,硕士,正高级工程师,主要从事系统结构研究.

徐晓靖(1972-),男,安徽省肥西县人,正高级工程师,主要从事航天系统总体研究.