



国防科技图书出版基金

Passive Tracking Technology
of Non-Cooperative Space
Target and Application

空间非合作目标 被动跟踪技术与应用

■ 廖 瑛 刘光明 文援兰 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

空间非合作目标被动 跟踪技术与应用

Passive Tracking Technology of Non - Cooperative
Space Target and Application

廖瑛 刘光明 文援兰 梁加红 杨雪榕 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间非合作目标被动跟踪技术与应用 / 廖瑛等编著.
—北京: 国防工业出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-118-09567-8

I. ①空… II. ①廖… III. ①雷达跟踪系统 IV.
①TN953

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 264721 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 字数 218 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	吴有生	蔡 镭	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	贺 明		
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨 伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆 军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

空间目标监视是国家空间战略信息获取的重要途径,而天基无源监视跟踪系统是我国空间目标监视系统的重要组成部分。一般来说,角度观测信息在天基无源监视跟踪系统中是最基本的测量信息,仅测角法、测角与测频率联合观测法及基于运动学原理的定位法,从某种角度来说都是测角跟踪方法的延展。可以说,研究天基仅测角条件下空间非合作目标的无源跟踪定轨方法及其相关技术,对所有以角度测量为基础的天基无源监视跟踪系统都具有重要的理论参考价值,是实现我国天基空间目标监视系统亟需突破的关键技术。目前,国内公开出版的系统研究该领域技术的书籍甚少。

近年来,在国家自然科学基金、“863”计划、国防预先研究基金、航天科技创新基金等的支持下,我们围绕空间非合作目标的被动跟踪技术与应用做了大量研究工作,本书是根据作者在科研与教学工作中的积累而写成,书中大部分内容取自作者(和合作者)公开发表的学术论文、有关技术报告和博士学位论文。本书以天基空间目标监视系统为主要研究背景,以参数估计理论、连续同伦方法、非线性滤波理论、抗差估计理论及卫星编队构形控制方法为理论基础,系统研究了基于天基测角信息的初轨确定、联合定轨、抗差自适应跟踪定轨、空间目标编目维护及卫星编队控制等关键技术。全书共分9章。第1章为概论,主要介绍天基空间目标监视系统发展现状与关键技术进展;第2章介绍天基无源跟踪系统的信息处理流程和基于天基测角信息的空间目标跟踪模型及可探测性分析;第3章提出基于天基测角信息的初轨确定方法;第4章论述基于天基测角信息的目标跟踪滤波算法;第5章分析基于抗差估计的天基仅测角跟踪滤波算法;第6章介绍天基目标监视系统中空间目标飞行轨迹的双行轨道根数生成方法;第7章论述空间目标的逼近技术;第8章和第9章论述观测卫星编队控制问题和编队安全防碰撞问题。

书中公式和符号较多,同一符号在不同公式中可能有不同含义。另外,为了语言表达上的需要,同一物理量在不同之处可能有不同的名称。然而,对于一些常用量,将尽可能用同一符号来表示,而且采用本学科领域中惯用的表示符号。

本书的内容紧密结合工程技术专业,采用数学推导与仿真实验相结合的研

究思路,保证了模型和算法的正确性,初步解决了空间目标天基测角跟踪中的若干关键问题,取得了一些具有创新性的研究成果。本书可作为高等院校航空航天、电子信息、控制科学等专业研究生和科研学者的教学参考书,也可以供从事航空宇航科学与技术、信号与信息处理以及控制科学与工程领域的工程技术人员和研究人员学习参考。

本书在编写过程中得到了国防科学技术大学各级领导的支持和专家的推荐,得到了总装备部国防科技图书出版基金的资助,在此表示衷心感谢。课题组的张志、刘翔春等博士生也付出了大量劳动,在此表示感谢。

由于作者理论和学术水平有限,难免有不足或错误之处,恳请读者批评和指正。

编著者

2014 年 2 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 天基空间目标监视技术概述	1
1.2 天基空间目标监视系统发展及现状	3
1.2.1 美、俄地基空间目标监视系统	3
1.2.2 天基空间目标监视系统	5
1.2.3 美国空间目标监视系统编目更新与维护	7
1.2.4 空间目标抵近观测和跟飞编队应用	8
1.2.5 国内空间目标监视研究现状	9
1.3 空间目标跟踪定轨相关关键技术进展	10
1.3.1 空间目标的初轨确定技术	10
1.3.2 空间目标的非线性跟踪滤波	11
1.3.3 空间目标的联合定轨技术	13
1.3.4 抗差估计理论在跟踪定轨中的应用现状	14
参考文献	15
第 2 章 基于测角信息的天基监视跟踪系统	18
2.1 天基无源跟踪系统信息处理	18
2.1.1 天基光学监视系统的信息处理	18
2.1.2 非合作辐射源目标探测系统的信息处理	19
2.2 空间非合作目标天基可探测性分析	20
2.2.1 天基光电传感器的可见性	20
2.2.2 非合作辐射源目标探测系统的可探测性	22
2.3 空间目标天基仅测角跟踪模型	23
2.3.1 坐标系定义及转换	23
2.3.2 空间目标运动描述	25
2.3.3 天基仅测角跟踪的观测方程	26
2.4 观测数据预处理方法	26
2.4.1 物理量纲复原	27

2.4.2	测角数据跳变消除	27
2.4.3	观测数据异常值处理	27
2.4.4	观测噪声平滑	28
参考文献		29
第3章 基于天基测角信息的初轨确定方法		30
3.1	天基仅测角短弧初定轨的迭代初值选取	30
3.1.1	天基仅测角初定轨的平凡解	30
3.1.2	考虑 J_2 项摄动的简单迭代法	31
3.1.3	基于经典高斯法的信赖域方法	32
3.1.4	仿真实验与分析	34
3.2	基于连续同伦算法的天基仅测角初定轨方法	37
3.2.1	拉普拉斯改进法	37
3.2.2	考虑摄动影响的单位矢量法	38
3.2.3	连续同伦算法基本理论	40
3.2.4	基于同伦路径跟踪算法的观测条件方程组求解	41
3.2.5	基于弧长参数的同伦路径跟踪改进算法	42
3.2.6	双星立体观测下空间目标的初轨确定方法	44
3.2.7	仿真算例与分析	49
参考文献		53
第4章 基于天基仅测角信息的跟踪滤波算法		55
4.1	天基仅测角跟踪的可观测性与误差特性	55
4.1.1	非线性控制系统可观性定理	55
4.1.2	一般条件下相对动力学方程	56
4.1.3	单星对空间目标仅测角跟踪可观测性分析	58
4.1.4	跟踪滤波误差下限与系统可观测度	59
4.2	天基仅测角跟踪自主定轨亏秩分析	65
4.2.1	单星对空间目标仅测角跟踪自主定轨亏秩分析	65
4.2.2	双星编队对空间目标仅测角跟踪自主定轨亏秩分析	68
4.2.3	自主定轨亏秩问题的改进策略	71
4.3	单星对空间目标仅测角跟踪滤波算法	72
4.3.1	单星对空间目标仅测角跟踪模型	72
4.3.2	迭代 UKF 算法的推导	74
4.3.3	仿真实验与分析	78
4.4	基于双星编队的天地联合定轨方法	84

4.4.1 空间非合作目标的天地联合定轨模型	84
4.4.2 平方根 UKF 算法及改进	86
4.4.3 仿真实验与分析	88
参考文献	90
第 5 章 基于抗差估计的天基仅测角跟踪滤波算法	93
5.1 适于空间目标跟踪定轨的抗差估计理论	93
5.1.1 抗差估计基本概念	93
5.1.2 抗差最小二乘估计	95
5.1.3 相关观测抗差估计方法	98
5.2 基于抗差自适应滤波的跟踪滤波算法	99
5.2.1 抗差自适应 EKF 算法	99
5.2.2 带时变噪声统计特性估计器的抗差自适应 UKF 算法	110
参考文献	126
第 6 章 空间目标的双行轨道根数生成方法	128
6.1 双行轨道根数和 SGP4 模型介绍	128
6.2 空间目标的 TLE 拟合算法	129
6.2.1 非线性最小二乘估计	129
6.2.2 无奇异轨道根数及偏导数推导	130
6.2.3 仿真算例与分析	135
6.3 面向天基仅测角跟踪应用的 TLE 生成算法	137
6.3.1 非线性最小二乘递推算法	138
6.3.2 仿真算例与分析	140
参考文献	142
第 7 章 空间目标的逼近技术	143
7.1 空间目标的快速轨道逼近技术	143
7.1.1 相对动力学方程	143
7.1.2 设定时间内的快速轨道逼近方法	144
7.1.3 基于微分改正的摄动修正方法	146
7.1.4 仿真算例与分析	147
7.2 轨道交会控制研究	149
7.2.1 双冲量 Lambert 交会算法	150
7.2.2 考虑观测的双冲量交会	153
7.2.3 多冲量轨道交会	156
参考文献	157

第 8 章 观测卫星编队控制问题研究	158
8.1 观测卫星编队控制问题分析	158
8.1.1 卫星编队控制问题假设	158
8.1.2 绝对轨道参数预报偏差影响分析	159
8.1.3 控制输出脉宽调制	161
8.2 观测卫星编队构形的李雅普诺夫控制研究	162
8.2.1 构形捕获与重构方案	162
8.2.2 跟飞编队李雅普诺夫控制律	163
8.2.3 仿真算例与分析	165
参考文献	174
第 9 章 观测卫星编队防碰撞问题研究	175
9.1 卫星编队碰撞因素分析	175
9.1.1 编队安全的相关定义	175
9.1.2 碰撞影响因素分析	177
9.1.3 碰撞影响因素解决策略	180
9.2 卫星编队碰撞预警算法研究	180
9.2.1 碰撞预警策略	180
9.2.2 变尺度直接逼近算法	183
9.2.3 仿真算例与分析	185
参考文献	187

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1. 1 Summary of Space – Based Surveillance Technology of Space Target	1
1. 2 Situation and Development of Space – Based Surveillance System of Space Target	3
1. 2. 1 Ground Surveillance System of Space Target in America and Russia	3
1. 2. 2 Space – Based Surveillance System of Space Target	5
1. 2. 3 Catalogue Update and Maintenance of Space Target in American Surveillance System	7
1. 2. 4 Approaching Observation and Measurement Based on Satellite Format Flying	8
1. 2. 5 Current Situation of Space Target Surveillance in China	9
1. 3 Key Technology Development of Space Target Tracking and Orbit Determination	10
1. 3. 1 Method of Initial Orbit Determination of Space Target	10
1. 3. 2 Orbit Determination of Space Target Using Nonlinear Filter	11
1. 3. 3 Method of Combined Orbit Determination of Space Target	13
1. 3. 4 Situation of Robust Estimation for Target Tracking and Orbit Determination	14
References	15
Chapter 2 Space – Based Surveillance System of Space Target with Bearing – only Information	18
2. 1 Information Processing of Space – Based Surveillance System	18
2. 1. 1 Information Processing of Space – Based Optical Surveillance	

System	18
2. 1. 2 Information Processing of Space – Based Surveillance System – Based on Radiation of Non – Cooperative Space Target	19
2. 2 Space – Based Observability Analysis of Non – Cooperative Space Target	20
2. 2. 1 Visibility of Space – Based Photoelectric Sensor	20
2. 2. 2 Space – Based Observability Based on Radiation of Non – Cooperative Space Target	22
2. 3 Space – Based Observation Model of Space Target Based on Bearing – only Tracking	23
2. 3. 1 Coordinate System and Its Conversion	23
2. 3. 2 Motion Equation of Space Target	25
2. 3. 3 Observation Equation of Bearing – only Tracking for Space Target	26
2. 4 Observation Data Preprocessing Methods	26
2. 4. 1 Reversion of Physical Dimension	27
2. 4. 2 Mend of Angle Measurement Data Leap	27
2. 4. 3 Outliers Processing	27
2. 4. 4 De – Noising and Smoothing of Observations Data	28
References	29
Chapter 3 Initial Orbit Determination Methods with Space – Based Bearing – only Information	30
3. 1 Methods of Initial Values Selection in Short – Arc Initial Orbit Determination	30
3. 1. 1 Normal Solution of Initial Orbit Determination Based on Space – Based Bearing – only Information	30
3. 1. 2 Simple Initial Orbit Iteration Determination with Perturbation J2	31
3. 1. 3 Trust Region Algorithm Based on Classical Gauss Method	32
3. 1. 4 Simulation Experiment and Analysis	34
3. 2 Initial Orbit Determination with Space – Based Bearing – only Information Based on Homotopy Continuation Theory	37

3. 2. 1	Improved Laplace Method	37
3. 2. 2	Unit Vector Method with Orbit Perturbation	38
3. 2. 3	Theory of Homotopy Tracking Algorithm	40
3. 2. 4	Solution of Observation Equation Based on Homotopy Track Algorithm	41
3. 2. 5	Improved Homotopy Track Algorithm Based on Arc Length Parameters	42
3. 2. 6	Initial Orbit Determination of Space Target with Double Satellites Tracking	44
3. 2. 7	Simulation Experiment and Analysis	49
References		53

Chapter 4	Filter Algorithm for Orbit Determination with Space – Based Bearings – only Tracking Information	55
4. 1	Observability and Error Characteristic Analysis of Space – Based Bearings – only Tracking	55
4. 1. 1	Observability Theorem of Nonlinear Control System	55
4. 1. 2	Relative Dynamic Equation under General Conditions	56
4. 1. 3	Observability Analysis of Space Target with Single Satellite Bearings – only Tracking	58
4. 1. 4	Tracking Error Lower Limit of Filter and System Observability	59
4. 2	Rank Deficit Analysis of Orbit Determination Based on Space – Based Bearings – only Information	65
4. 2. 1	Rank Deficit Analysis of Autonomous Orbit Determination of Space Target Based on Single Satellite Bearings – only Tracking	65
4. 2. 2	Rank Deficit Analysis of Autonomous Orbit Determination of Space Target Based on Double Satellites Bearings – only Tracking	68
4. 2. 3	Improved Solution of Rank Deficit of Autonomous Orbit Determination of Space Target	71
4. 3	Filter Algorithm for Orbit Determination Based on Single Satellite Bearings – only Tracking	72
4. 3. 1	Observation Equation of Single Satellite Bearings – only	

Tracking	72
4. 3. 2 Derivation of Iterative UKF	74
4. 3. 3 Simulation Experiment and Analysis	78
4. 4 Combined Orbit Determination Methods Based on Two – Satellite Formation and Ground Tracking	84
4. 4. 1 Combined Orbit Determination Model of Non – Cooperative Space Target Based on Ground Tracking and Space – Based Tracking	84
4. 4. 2 The Square Root UKF and Its Improvement	86
4. 4. 3 Simulation Experiment and Analysis	88
References	90
Chapter 5 Robust Filter Algorithm for Orbit Determination with Space – Based Bearings – only Tracking Information	93
5. 1 Robust Estimation Theory for Space Target Tracking	93
5. 1. 1 Basic Concept of Robust Estimation	93
5. 1. 2 Robust Least Squares Estimation	95
5. 1. 3 Robust Estimation with Relevant Observations	98
5. 2 Orbit Determination Algorithm Based on Robust Adaptive Filter	99
5. 2. 1 Robust Adaptive Extended Kalman Filter	99
5. 2. 2 Robust Adaptive UKF with Time – Varying Statistical Characteristic of Noise	110
References	126
Chapter 6 Fitting Method of TLE of Space Target	128
6. 1 Introduction of TLE and SGP4 Model	128
6. 2 Fitting Method of TLE of Space Target	129
6. 2. 1 Nonlinear Least Squares Estimation	129
6. 2. 2 Derivation of Non – Singular Orbit and Its Partial Derivative	130
6. 2. 3 Simulation Experiment and Analysis	135
6. 3 Generation Algorithm of TLE of Space Target Based on Space – Based Bearing – only Tracking	137
6. 3. 1 Iterative Algorithm of Nonlinear Least Squares Estimation	138
6. 3. 2 Simulation Experiment and Analysis	140

References	142
Chapter 7 Technology of Approach to Space Target	143
7.1 Fast Approach to Space Target	143
7.1.1 Relative Dynamic Equation	143
7.1.2 Fast Approach Method within Setting Time	144
7.1.3 Perturbed Improvement Method Based on Differential Correction	146
7.1.4 Simulation Experiment and Analysis	147
7.2 Research on Orbit Rendezvous Control	149
7.2.1 Lambert Algorithm of Orbit Rendezvous Based on Double Pulses	150
7.2.2 Orbit Rendezvous Based on Double Pulses	153
7.2.3 Orbit Rendezvous Based on Multiple Pulses	156
References	157
Chapter 8 Research on Formation Flying Control of Tracking Satellites	158
8.1 Analysis of Formation Flying Control of Tracking Satellites	158
8.1.1 Assumption of Formation Flying Control of Tracking Satellites	158
8.1.2 Deviation Analysis of Satellite Absolute Orbit Prediction ...	159
8.1.3 Pulse Width Regulation of Control Output	161
8.2 Research on Lyapunov Control of Formation Flying of Tracking Satellites	162
8.2.1 Formation Capture and Reconstruction Scheme	162
8.2.2 Lyapunov Control Law of Formation Flying of Tracking Satellites	163
8.2.3 Simulation Experiment and Analysis	165
References	174
Chapter 9 Research on Collision Avoidance of Satellite Formation Flying	175
9.1 Collision Factors Analysis of Satellite Formation Flying	175
9.1.1 Relevant Security Definition of Satellite Formation Flying ...	175
9.1.2 Collision Factors Analysis	177
9.1.3 Solution of Collision Avoidance	180