

国家自然科学基金项目60702010资助

# 空间电子侦察 定位原理

LOCALIZATION PRINCIPLES  
IN SPACE ELECTRONIC RECONNAISSANCE

■ 郭福成 樊 昀 周一宇 周彩根 李强 著 ■



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

国家自然科学基金项目 60702010 资助

# 空间电子侦察定位原理

Localization Principles in Space Electronic Reconnaissance

郭福成 樊昀 周一宇 周彩根 李强 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

空间电子侦察定位原理 / 郭福成等著. —北京:  
国防工业出版社, 2012. 1

ISBN 978-7-118-07243-3

I. ①空… II. ①郭… III. ①电子侦察—卫星定位  
IV. ①TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 143169 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 × 960 1/16 印张 20 $\frac{1}{4}$  字数 370 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 88.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

随着几十年来航天技术和卫星载荷技术、电子侦察技术的发展,空间电子侦察系统由于其侦察覆盖面广、不受气候影响的独特优点而受到各国军方广泛关注。美、俄、欧等航天大国和组织已有多种体制的空间电子侦察系统进入作战使用,国内近年来在这方面的技术也取得了快速进步。在空间电子侦察设备中,获取辐射源的位置是其最重要的任务之一。由于卫星轨道运动的特殊性和侦察平台的高度高,空间电子侦察系统与地面、海面的电子侦察系统在定位原理和方法上有较大不同,因此研究空间电子侦察的定位技术具有重要的意义和价值。

由于空间电子侦察系统目前主要应用于军事情报侦察和预警探测、全球电磁频谱普查等领域,各航天大国对该领域技术较为保密,具体的技术文献较少。有关空间电子侦察定位原理方面的资料虽然有一些,但它们都散布于各种期刊、书籍中,目前国内外还没有一本专门论述空间电子侦察定位技术的学术专著,与当前发展迅速的空间电子侦察技术状况极不相称。为此,我们在总结近 10 年来本课题组空间电子侦察方面技术积累的基础上,借鉴国外和国内相关技术资料,指导撰写了本书。

本书是一本系统地介绍空间电子侦察定位原理和技术的专著,较全面地反映了 10 多年来国内外空间电子侦察定位与跟踪系统的概念、原理、技术和方法的最新进展。本书首先介绍了空间电子侦察定位的概念和国外发展概况,然后详细论述了对地面辐射源侦察定位应用中的单星测向定位、多星测时差定位、双星时差/频差定位、基于运动学的单星定位和基于临近空间平台的定位技术等,并对空间观测平台对卫星辐射源的测向、测频定轨技术等进行了深入的分析和探讨。

全书共计 11 章:第 1 章概述空间电子电子侦察分类、发展状况和结构;第 2 章介绍定位原理和卫星轨道、地球球面等基础知识;第 3 章至第 5 章分别介绍单星测向定位体制、多星时差定位体制、双星时差/频差定位体制等对地面辐射源的侦察定位技术;第 6 章介绍基于运动学参数的定位体制;第 7 章介绍基于临近空间平台的侦察定位方法;第 8 章至第 10 章讨论对运动卫星辐射源的定位跟踪技术,包括仅测角定位体制、测角度及频率定位体制、仅测频定位体制等;第 11 章主要对空间电子侦察定位技术进行了展望。

本书的主要内容是在近年来作者及所在课题组的公开发表论文、内部技术研究报告、相关的博士与硕士论文基础上修改和增删完成的。在本书的撰写过程中,得到了国防科技大学电子科学与工程学院、总参五十四研究所的领导和同事们的关心和大力支持,尤其是姜文利教授、邓新蒲副教授、柳征、许丹、钟丹星、王强、盛卫东、贾兴江、李腾、苗雨、高谦、郑瑾等提供了相关的技术资料 and 思路,另外徐晖教授、安玮教授、吴京教授、黄知涛教授、卢启中副研究员、冯道旺副研究员、谢凯、刘海军、韩韬、彭峰、徐湛、徐义、张敏、刘晓光、李金洲、王雪莹、郭莲花、刘洋、张文等也为作者提供了不少帮助,在此一并表示感谢。另外,还感谢毛士艺教授对本书稿提出的宝贵意见。

作者在此特别感谢导师孙仲康教授多年来在无源定位与跟踪技术方面给予的理论指导和帮助。

目前,空间电子侦察定位技术仍处于不断高速发展的过程中,作者及所在的课题组也只是其中的参加者之一,因此,可能有一些更好、更新的定位技术没有在本书中得到论述。另外,鉴于该技术领域的高度敏感性,我们删除了一些可能与项目背景相关的技术,主要以介绍原理为主,因此本书不一定能很全面地阐述空间电子侦察领域的所有问题。书中的观点和方法仅供大家参考,起抛砖引玉的效果。由于作者水平有限,书中难免出现疏漏和不足之处,恳请读者批评和指正,不胜感激。

作 者

2011年5月于长沙

# 目 录

<b>第 1 章 空间电子侦察定位技术概论</b> .....	1
1.1 引言.....	1
1.2 空间电子侦察定位技术体制的分类.....	2
1.2.1 对地面辐射源的定位 .....	2
1.2.2 对卫星辐射源的定位 .....	6
1.2.3 基于临近空间侦察平台的定位 .....	7
1.3 空间电子侦察系统结构.....	8
1.4 空间电子侦察定位技术的发展概况.....	9
1.4.1 美国电子侦察卫星发展概况 .....	9
1.4.2 俄罗斯电子侦察卫星发展概况.....	20
1.4.3 法国电子侦察卫星发展概况.....	24
<b>第 2 章 卫星轨道及定位基础知识</b> .....	26
2.1 卫星轨道及其分类 .....	26
2.1.1 开普勒定律.....	26
2.1.2 卫星轨道分类.....	27
2.2 卫星轨道参数及状态 .....	30
2.2.1 卫星轨道根数.....	30
2.2.2 几种近地点角的定义及其相互关系.....	32
2.3 坐标系的建立和相互转换 .....	33
2.3.1 常用的空间坐标系.....	33
2.3.2 坐标系之间的相互转换.....	36
2.4 地球球面模型 .....	38
2.4.1 正球面模型.....	38

2.4.2	椭球面模型	38
2.5	电子侦察卫星的覆盖范围	41
2.5.1	覆盖范围的近似计算方法	41
2.5.2	覆盖范围的计算举例	42
2.5.3	侧向侦察覆盖范围	43
2.6	几何定位的基本原理	44
2.6.1	空间的定位面	44
2.6.2	空间的定位线	44
2.7	定位误差的度量指标	48
2.7.1	定位误差的一般定义	48
2.7.2	定位误差的分布	49
2.7.3	定位误差的图形化表示	50
2.7.4	球概率误差及圆概率误差	52
2.8	定位的可观测性问题	53
<b>第3章</b>	<b>基于测向的单星定位体制</b>	<b>55</b>
3.1	电子侦察的测向技术	55
3.1.1	比幅测向技术	55
3.1.2	干涉仪测向技术	57
3.1.3	阵列测向技术	62
3.1.4	其他测向技术	63
3.2	单星3维单次瞬时测向定位	64
3.2.1	测向瞬时定位模型	64
3.2.2	测向定位解法	65
3.2.3	测向定位误差 CRLB	66
3.2.4	测向定位误差的仿真分析	68
3.2.5	测向定位误差的几何分布	69
3.3	单星多次测角定位	70
3.3.1	单星多次测角交叉定位方法	71
3.3.2	单星多次定位平均滤波方法	72
3.3.3	单星多次定位加权滤波方法	72

3.3.4	单星对地仅测角定位仿真	73
3.4	高轨卫星测向定位	77
3.4.1	静止轨道卫星测向定位	77
3.4.2	准静止轨道多次测向定位	79
<b>第4章</b>	<b>基于时差测量的三星电子侦察定位体制</b>	<b>81</b>
4.1	基于正球面的三星时差定位算法	81
4.1.1	三星时差定位解算方法	81
4.1.2	多星时差定位方法	84
4.1.3	多星时差定位误差的CRLB	87
4.1.4	球面模型的密合误差	88
4.2	基于WGS-84地球表面模型的三星时差定位算法	90
4.2.1	解析计算方法	91
4.2.2	球面迭代算法	94
4.2.3	牛顿迭代方法	96
4.2.4	3种解法的性能比较	97
4.2.5	高程输入定位算法	101
4.3	定位的模糊问题和无解问题	102
4.3.1	定位的模糊问题	102
4.3.2	定位的无解问题	104
4.4	三星时差定位的定位误差分析	106
4.4.1	随机测量误差带来的定位误差分析	107
4.4.2	高程假设引起的系统误差分析	109
4.4.3	卫星星座构型变化对定位误差分布的影响	111
4.5	三星时差定位的标校技术	113
4.5.1	地面四站定位标校技术	113
4.5.2	地面三站定位标校技术	118
<b>第5章</b>	<b>基于时差/频差的双星电子侦察定位体制</b>	<b>122</b>
5.1	双星时差/频差的基本原理	122
5.1.1	双星时差/频差定位原理分析	122



5.1.2	双星时差/频差定位的系统结构	123
5.2	低轨时差/频差定位的解算方法	124
5.2.1	定位模型	124
5.2.2	代数解析解算方法	126
5.2.3	同轨近似解析方法	129
5.2.4	定位模糊点的消除方法	132
5.3	时差/频差定位误差分析	133
5.3.1	定位误差分析方法	133
5.3.2	低轨双星的单次定位误差分布	134
5.3.3	同轨双星定位误差分布与参数关系	138
5.4	高轨双星时差/频差定位	142
5.4.1	同步轨道双星时差/频差定位原理	142
5.4.2	基于参考站的定位求解方法	143
5.4.3	多参考站的校正定位方法	146
5.4.4	校正定位流程	152
5.5	时差与频差测量方法	153
5.5.1	基于互模糊函数的时差/频差联合估计方法	153
5.5.2	时差/频差测量性能理论分析	154
5.5.3	互模糊函数分段相干累加方法	155
5.5.4	同时同频多信号分辨问题	159
<b>第6章</b>	<b>基于运动学原理的单星定位体制</b>	<b>162</b>
6.1	基于运动学原理的单星定位模型	162
6.2	单星单天线仅测频定位	163
6.2.1	仅测频定位方法	163
6.2.2	定位误差分析	164
6.2.3	仅测频定位仿真计算	166
6.3	单星单天线仅测频率变化率定位	167
6.3.1	仅测频率变化率定位方法	167
6.3.2	定位误差分析	169
6.3.3	定位仿真计算	170

6.4	单星单天线仅测信号到达时间定位	171
6.4.1	仅测信号到达时间定位模型与方法	171
6.4.2	定位误差分析	173
6.4.3	定位仿真计算	176
6.5	单星仅测干涉仪相位差变化率定位	177
6.5.1	定位模型	177
6.5.2	定位算法	178
6.5.3	定位误差的 CRLB	180
6.5.4	定位误差的计算分析	181
<b>第7章</b>	<b>临近空间平台的电子侦察定位</b>	<b>184</b>
7.1	临近空间平台定位概述	184
7.1.1	临近空间平台概念	184
7.1.2	临近空间平台定位问题	185
7.2	多平台的测向交叉定位	185
7.2.1	2 维测向交叉定位原理	185
7.2.2	双站测向交叉定位误差分析	186
7.2.3	最优布站方式	189
7.3	多平台的时差定位	191
7.3.1	多平台时差定位原理	191
7.3.2	2 维时差定位算法	193
7.3.3	辐射源高度假设的时差定位算法	195
7.3.4	3 维时差定位算法	196
7.4	单平台的定位方法	198
7.4.1	定位测量模型	199
7.4.2	2 维近似定位方法	200
7.4.3	扩展卡尔曼定位算法	202
7.4.4	定位仿真	202
<b>第8章</b>	<b>单星对卫星仅测角被动定轨跟踪技术</b>	<b>205</b>
8.1	仅测角被动定轨跟踪的基本原理	205

8.2	仅测角被动定轨跟踪模型与方法	206
8.2.1	二体问题下的状态模型和测量模型	206
8.2.2	二体问题下的扩展卡尔曼滤波方法	207
8.2.3	考虑地球非球形摄动的状态模型和测量模型	210
8.2.4	考虑地球非球形摄动的扩展卡尔曼滤波方法	211
8.3	系统可观测度分析	213
8.3.1	系统可观测度描述方法	213
8.3.2	系统可观测度与状态方程相关影响因素的关系	214
8.3.3	系统可观测度与测量方程相关影响因素的关系	215
8.4	定位跟踪仿真及其分析	216
8.4.1	二体问题下的仅测角被动定轨跟踪性能仿真	218
8.4.2	考虑地球非球形摄动时的仅测角被动定轨跟踪性能仿真	224
<b>第9章</b>	<b>单星对卫星基于角度和频率信息的定轨跟踪技术</b>	<b>230</b>
9.1	被动定轨跟踪的基本原理	230
9.2	基于角度和频率信息的被动定轨跟踪模型与方法	230
9.2.1	二体问题下的状态模型和测量模型	231
9.2.2	二体问题下的扩展卡尔曼滤波方法	232
9.2.3	考虑地球非球形摄动的状态模型和测量模型	235
9.2.4	考虑地球非球形摄动的扩展卡尔曼滤波方法	236
9.3	系统可观测度分析	237
9.3.1	系统可观测度与状态方程相关影响因素的关系	237
9.3.2	系统可观测度与测量方程相关影响因素的关系	239
9.4	定位跟踪仿真及其分析	243
9.4.1	二体问题下的被动定轨跟踪性能仿真	243
9.4.2	考虑地球非球形摄动时的被动定轨跟踪性能仿真	253
<b>第10章</b>	<b>单星对卫星仅测频被动定轨技术</b>	<b>261</b>
10.1	仅测多普勒频率被动定轨的基本原理和数学模型	262
10.1.1	单星对卫星仅测多普勒频率被动定轨的基本原理	262
10.1.2	二体问题下的系统模型	263

10.1.3	考虑地球非球形摄动的系统模型 .....	264
10.2	基于 PSO 的单星对卫星仅测频被动定轨方法 .....	266
10.2.1	PSO 算法 .....	266
10.2.2	基于 PSO 算法的状态参数估计方法 .....	268
10.3	系统可观测度分析 .....	268
10.4	轨道参数估计误差 CRLB 分析 .....	274
10.5	定轨跟踪仿真及其分析 .....	278
10.5.1	二体问题下仅测频被动定轨方法的性能仿真 .....	280
10.5.2	摄动情况下仅测频被动定轨方法的性能仿真 .....	289
<b>第 11 章</b>	<b>空间电子侦察定位技术发展展望 .....</b>	<b>292</b>
<b>附录</b>	<b>二体运动下卫星轨道根数、运动状态和坐标的转换 .....</b>	<b>293</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>296</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction of Space Electronic Reconnaissance Technology</b>	1
1.1	Introduction	1
1.2	Classification of Space Electronic Reconnaissance Localization Technology	2
1.2.1	Localization of Ground Emitter	2
1.2.2	Localization of Satellite Emitter	6
1.2.3	Localization Using near Space Platform	7
1.3	Structure of Space Electronic Reconnaissance System	8
1.4	History of Space Electronic Reconnaissance Localization Technology	9
1.4.1	Electronic Reconnaissance Satellites of United States	9
1.4.2	Electronic Reconnaissance Satellites of Russian	20
1.4.3	Electronic Reconnaissance Satellites of French	24
<b>Chapter 2</b>	<b>Preparatory Knowledge of Satellite Orbits and Localization</b>	26
2.1	The Orbit of Satellite and its Classification	26
2.1.1	The Kepler's Laws	26
2.1.2	The Classification of Satellite Orbits	27
2.2	Parameters and State of Satellite Orbits	30
2.2.1	Satellite Orbit Elements	30
2.2.2	Definitions of Perigee Angle and Their Relations	32
2.3	Coordinate Definitions and Transforms	33
2.3.1	Common Used Coordinate Definitions	33
2.3.2	Coordinate Transforms	36
2.4	Earth Surface Models	38

2. 4. 1	Earth Sphere Model	38
2. 4. 2	Earth Spheroid Model	38
2. 5	The Coverage Area of Reconnaissance Satellite	41
2. 5. 1	Approximate Computation Method of Coverage Area	41
2. 5. 2	Examples of Coverage Area Computation	42
2. 5. 3	The Flank Coverage Area of Reconnaissance	43
2. 6	Principle of Geolocation	44
2. 6. 1	The Location Surfaces in Space	44
2. 6. 2	The Location Lines in Space	44
2. 7	Index for Localization Error	48
2. 7. 1	Common Definition of Localization Error	48
2. 7. 2	Geometric Dilution of Precision	49
2. 7. 3	Graphic Presentation of Localization Error	50
2. 7. 4	Sphere Error Probable and Circle Error Probable	52
2. 8	The Observability of Localization	53

### **Chapter 3 Localization Method Based on Single Satellite**

	<b>Direction-finding</b>	55
3. 1	Direction-finding Technology of Electronic Reconnaissance	55
3. 1. 1	Amplitude Comparison Direction-finding Technology	55
3. 1. 2	Interferometer Direction-finding Technology	57
3. 1. 3	Array Direction-finding Technology	62
3. 1. 4	Other Direction-finding Technologies	63
3. 2	Direction-finding Instantaneous Localization by a Single Satellite in Three-dimensional Space	64
3. 2. 1	Model of Direction-finding Instantaneous Localization	64
3. 2. 2	Solution of Direction-finding Localization	65
3. 2. 3	CRLB of Direction-finding Localization Error	66
3. 2. 4	Simulation Results of Direction-finding Localization Error	68
3. 2. 5	GDOP of Direction-finding Localization Error	69
3. 3	Multiple Line-of-sight Measurements Localization	70

3.3.1	Multiple Line-of-sight Crossing Localization Method	71
3.3.2	Average Filtering Localization Method	72
3.3.3	Weighting Average Filtering Localization Method	72
3.3.4	Simulation Results of Bearings-only Localization	73
3.4	Direction-finding Localization Method of High Orbit Satellite	77
3.4.1	Direction-finding Localization Method of Geostationary Satellite	77
3.4.2	Direction-finding Localization Method of near Geostationary Satellite	79
<b>Chapter 4</b>	<b>Localization Method Based on TDOA of Three-satellite</b>	<b>81</b>
4.1	Three-satellite TDOA Localization Method Based on Sphere Earth Model	81
4.1.1	Analytic Solution Method of Three-satellite TDOA	81
4.1.2	TDOA Localization Method of Multiple Satellites TDOA	84
4.1.3	CRLB of Multiple Satellites TDOA Localization Error	87
4.1.4	Deriving of the Fit Error of Sphere Earth Model	88
4.2	Three-satellite TDOA Localization Method Based on WGS-84 Earth Model	90
4.2.1	Analytic Solution	91
4.2.2	Sphere Iteration Method	94
4.2.3	Newton Iteration Method	96
4.2.4	Comparison between Three Methods	97
4.2.5	Localization Method of Inputting Altitude	101
4.3	Location Ambiguity and Non-existed Solution Problem	102
4.3.1	Location Ambiguity Problem	102
4.3.2	No Solution Problem of Localization	104
4.4	Error Analysis of Three-satellite TDOA Localization	106
4.4.1	Localization Error Analysis of Random Measurement Error	107
4.4.2	Localization Error Analysis of Wrong Altitude	

Assumption .....	109
4.4.3 Affect of Satellites Geometric Distribution to GDOP .....	111
4.5 The Calibration Technology of Three-satellite TDOA Localization ...	113
4.5.1 Four Emitters Calibration Method .....	113
4.5.2 Three Emitters Calibration Method .....	118
<b>Chapter 5 Two-satellite Localization Method of TDOA/FDOA .....</b>	<b>122</b>
5.1 The Principle of Two-satellite TDOA /FDOA Localization .....	122
5.1.1 Analysis of Two-satellite TDOA/FDOA Localization Principle .....	122
5.1.2 The System Structure of Two-satellite TDOA/FDOA Localization .....	123
5.2 The Solution of Low Orbit Two-satellite TDOA/FDOA Localization Problem .....	124
5.2.1 Localization Model .....	124
5.2.2 Algebra Analytic Solution Method .....	126
5.2.3 Approximated Solution for Same Orbit Two-satellite .....	129
5.2.4 Clearance of Localization Ambiguity .....	132
5.3 Error Analysis of TDOA/FDOA Localization .....	133
5.3.1 Method of Localization Error Analysis .....	133
5.3.2 GDOP of Localization Error .....	134
5.3.3 The Relation between Same Orbit Two-satellite GDOP and Localization Parameters .....	138
5.4 TDOA/FDOA Localization by Two High Orbit Satellites .....	142
5.4.1 Two High Orbit Satellites TDOA/FDOA Localization Principle .....	142
5.4.2 Localization Solution Method Based on a Reference Emitter .....	143
5.4.3 Calibration and Localization Based on Multiple Reference Emitters .....	146
5.4.4 The Process of Calibration and Localization .....	152



5.5	Measuring Method of TDOA and FDOA .....	153
5.5.1	TDOA/FDOA Estimation Method Based on Cross Ambiguity Function .....	153
5.5.2	The Theoretic TDOA/FDOA Measuring Performance Analysis .....	154
5.5.3	CAF Segment Coherent Summation Method .....	155
5.5.4	Distinguish Multiple Same-arrived-time Signals .....	159
<b>Chapter 6</b>	<b>Localization by a Single Satellite Based on Kinematics Theory .....</b>	<b>162</b>
6.1	The Single Satellite Localization Model Based on Kinematics Theory .....	162
6.2	Single Satellite Single Antenna Frequency only Localization .....	163
6.2.1	Frequency only Localization Method .....	163
6.2.2	Localization Error Analysis .....	164
6.2.3	Localization Simulation Results .....	166
6.3	Single Satellite Single Antenna Frequency Rate-of-changing only Localization .....	167
6.3.1	Frequency Rate-of-changing only Localization Method .....	167
6.3.2	Localization Error Analysis .....	169
6.3.3	Localization Simulation and Computation .....	170
6.4	Time of Arrival only Localization .....	171
6.4.1	TOA Localization Model and Method .....	171
6.4.2	Localization Error Analysis .....	173
6.4.3	Localization Simulation and Computation .....	176
6.5	Single Satellite Interferometer Phase Difference Rate-of-changing only Localization .....	177
6.5.1	Localization Model .....	177
6.5.2	Localization Algorithm .....	178
6.5.3	CRLB of Localization Error .....	180
6.5.4	Analysis of Localization Error .....	181