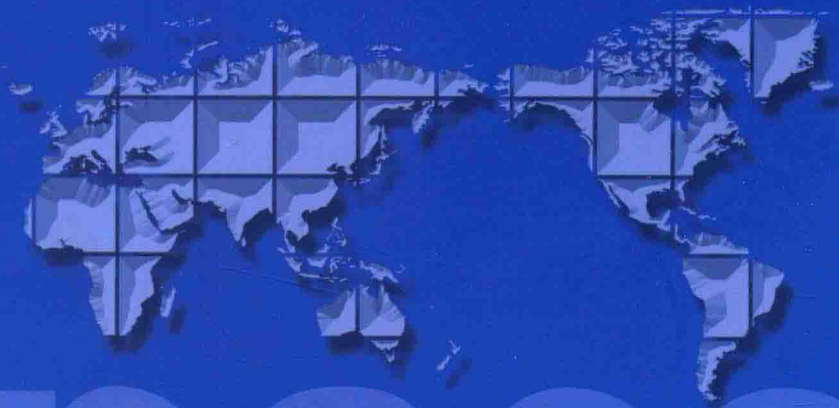


系列丛书

空间态势 感知基础

杜小平 耿文东 等编著
赵继广 马志昊



Space



国防工业出版社
National Defense Industry Press

空间态势感知系列丛书

空间态势感知基础

杜小平 耿文东 赵继广 马志昊 方秀花 等 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书作为空间态势感知系列丛书之一,试图在介绍空间态势感知基本内涵的基础上,侧重阐明在空间态势要素分析、态势信息获取、态势分析与描述等态势感知过程中所涉及的基础理论和方法。态势信息处理主要应用信号与信息处理领域的相关理论和方法,有许多文献可供学习。

本书主要作为空间态势感知领域相关专业本科高年级学员教材、研究生学员及任职教育学员的辅导教材,也可作为空间态势感知领域相关研究人员的基础理论参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间态势感知基础/杜小平等编著. —北京:国防工业出版社,2017.4

ISBN 978 - 7 - 118 - 11410 - 2

I. ①空... II. ①杜... III. ①地理信息系统 - 研究
IV. ①P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 272516 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)
三河市众誉天成印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 26 字数 465 千字
2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 90.00 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

《空间态势感知基础》编写组

主 编 杜小平

副主编 耿文东 赵继广

编写组 马志昊 方秀花 宋一铄 曾德贤

王 鹏 殷智勇 郝刚涛 刁华飞

韩 蕾

空间是继陆地、海洋和空中之后,人类又一新的活动与发展领域,蕴涵着国家重大战略利益。随着航天器、火箭箭体、空间碎片等在轨空间目标数量的不断增加,空间环境不断恶化,对航天器的正常运行、后续的航天任务和未来航天事业的发展构成了严重、持续且广泛的威胁。2009年2月发生的美俄卫星在轨碰撞事件更是给人类敲响了空间安全的警钟。

空间态势感知就是美国为应对空间目标显著增多、空间环境不断恶化、空间碰撞风险日益增加情况下如何维护空间安全、保持其在空间领域已有的优势问题,在空间目标监视、空间环境监测和情报信息系统的基础上提出的概念。

空间态势感知是集宇航技术、信息技术、材料技术、传感器技术及数学、物理学、运筹学等多学科于一体的复杂理论与技术体系。本书着重针对具有物理学、电子学、信息科学等学科技术基础的本科高年级学员,在概述空间态势感知基本概念与内涵、基本构成、对象、任务、用途及能力需求的基础上,以空间态势感知的实质为主线,以“空间目标及特性—空间环境及特点—空间态势信息获取—空间态势分析”为架构,重点介绍空间目标基本特点与属性、空间目标运动特性及光电特性、空间环境及效应、空间环境监测及预报、空间目标信息获取传感器原理以及空间态势分析与描述等内容,包括绪论、空间目标、空间目标特性、空间环境、空间环境监测与预报、态势感知雷达原理与系统、空间目标光学测量原理、空间态势分析与描述等共8章。本书内容安排试图使读者在了解空间态势感知基本内涵的基础上,进一步掌握获取空间态势信息的传感器原理,分析判断空间有什么、每个目标的位置、处于什么状态、构型与尺寸、其周边环境如何等的相关基础理论和方法,为其未来从事空间态势感知研究与应用等相关工作奠定基础。本书力求理论联系实际,在相关学科理论的基础上,结合空间态势感知系统现有技术手段和技术水平进行阐述,要求概念清楚,能够正确应用,只列举有代表性的有关系统、数据和图表,其他请读者查阅相关文献和资料。

本书由多位从事空间态势感知领域相关研究工作的同志共同编著,由杜小平、耿文东、赵继广负责全书的总体内容设计,编写组共同完成全书的内容章节框架和细目设计,并根据个人专长确定分工。第一章由杜小平编写,第二章由曾

德贤编写,第三章由杜小平、赵继广、马志昊编写,第四章由王鹏、殷智勇、郝刚涛编写,第五章由韩蕾、刁华飞、殷智勇编写,第六章由耿文东编写,第七章由方秀花、赵继广、宋一铄编写,第八章由杜小平、马志昊编写。方秀花、程相正、苟瑞新、刘浩为本书的编写做了大量制表、校对等工作。杜小平、殷智勇负责全书的统稿和审校工作。

虽然与空间态势感知特别是空间目标监视理论、技术、系统相关的文献及研究成果越来越多,但从目前掌握的资料看,国内外尚未有对空间态势感知所涉及物理学问题的相关基础理论知识进行全面、系统论述的专著和教材。美国空军学院在2009年开发本科生高年级学员“空间态势感知中的物理学”课程的同时,提出了编写空间态势感知物理学教材的需求,但目前并未公开出版。本书编写组从事空间态势感知专业方向本科、硕士研究生、博士研究生及任职学员的教学工作,了解空间态势感知专业领域人才所必需的专业基础知识需求,且多年从事空间态势感知相关研究工作,了解空间态势感知技术发展、系统开发、能力建设、态势信息产品应用的现状及趋势,熟悉空间态势感知所需的相关基础理论、方法、技术体系架构及核心内容,在总体内容设计上参考了美国空军学院“空间态势感知中的物理学”课程的核心内容安排,从而保证了教材的针对性、基础性、系统性、先进性。

尽管作者查阅了大量的相关资料,借鉴了众多的研究成果,但限于知识储备与能力欠缺,错误和不妥之处在所难免,恳请读者不吝批评指正。

本书立意是从保障空间任务实施、空间活动安全和保护空间环境的角度出发,介绍空间态势感知所需的基础理论和方法,如果有涉及空间作战/对抗/控制等术语出现均为相关文献中美国的观点,并不表明作者持有此观点。

最后,对本书中所借鉴、引用参考文献的作者表示衷心的感谢!对在本书编写过程中提供资料支持和帮助的所有人员表示衷心的感谢!

感谢装备学院科研部的大力支持与资助!感谢为本书的成稿提出宝贵建议的专家学者!

第一章 绪论	1
1.1 空间态势感知概念	1
1.2 空间态势感知对象	3
1.2.1 空间目标	3
1.2.2 空间环境	4
1.3 空间态势感知用途	4
1.3.1 对空间任务规划的作用	5
1.3.2 对空间任务实施的作用	6
1.3.3 对任务效果评估的作用	7
1.4 空间态势感知组成	7
1.4.1 空间态势信息获取系统	8
1.4.2 空间态势信息处理系统	11
1.4.3 空间态势认知及其产品生成系统	11
1.4.4 空间态势感知管理系统	12
1.5 空间态势感知任务	13
1.6 空间态势感知能力需求	14
1.6.1 探测/跟踪/识别能力	17
1.6.2 威胁告警和评估能力	17
1.6.3 特性/特征描述能力	17
1.6.4 数据集成/处理/应用能力	17
分析思考题	19
参考文献	19
第二章 空间目标	20
2.1 空间目标概述	20
2.1.1 空间目标定义	20
2.1.2 空间目标分布	20
2.1.3 空间目标体积和质量	23

2.2 典型空间目标类型	23
2.2.1 航天器	23
2.2.2 弹道导弹	37
2.2.3 空间碎片	42
2.2.4 临近空间目标	44
分析思考题	49
参考文献	49
第三章 空间目标特性	50
3.1 空间目标特性基本含义及用途	50
3.1.1 空间目标特性基本含义	50
3.1.2 空间目标特性的地位和作用	54
3.2 空间目标几何与材质特性	55
3.2.1 空间目标几何特性	55
3.2.2 空间目标材质特性	58
3.3 空间目标运动特性	59
3.3.1 空间目标运动时间与坐标系统	59
3.3.2 空间目标轨道运动基本原理与特点	67
3.3.3 空间目标轨道运动特性分析	78
3.3.4 空间目标姿态运动特性分析	89
3.4 空间目标光学特性	97
3.4.1 目标光学特性基本术语	97
3.4.2 目标光学特性基本定律	102
3.4.3 目标光学特性描述方法	109
3.4.4 空间目标光学特性获取及应用	118
3.5 空间目标雷达特性	124
3.5.1 概述	124
3.5.2 目标雷达特性类型及用途	124
3.5.3 RCS 测量方法及其应用	126
3.6 空间目标无线电特性	135
分析思考题	135
参考文献	137
第四章 空间环境	139
4.1 空间环境主要特点	139
4.1.1 空间的高真空特点	139

4.1.2	空间的强辐射特点	140
4.1.3	空间的冷黑特点	140
4.2	空间环境要素	141
4.2.1	中性大气	142
4.2.2	等离子体	144
4.2.3	地磁场	145
4.2.4	高能带电粒子	145
4.3	空间环境参数表征	146
4.3.1	中性大气参数表征	146
4.3.2	等离子体参数表征	148
4.3.3	地磁场参数表征	149
4.3.4	高能带电粒子参数表征	150
4.4	空间环境效应	151
4.4.1	中性大气效应	153
4.4.2	等离子体效应	154
4.4.3	地磁场效应	155
4.4.4	高能带电粒子效应	155
4.5	太阳活动及其影响	157
4.5.1	太阳活动及其描述	157
4.5.2	太阳活动对空间环境的影响	161
4.5.3	太阳活动对在轨航天器的影响	162
4.6	空间环境对空间态势感知系统的影响	169
4.6.1	电离层环境对空间目标测控系统的影响	169
4.6.2	空间环境对空间目标探测识别系统的影响效应	169
	分析思考题	171
	参考文献	171
第五章	空间环境监测与预报	173
5.1	空间环境监测概述	174
5.2	太阳活动监测	176
5.2.1	太阳活动监测的内容	176
5.2.2	太阳黑子监测	177
5.2.3	光学耀斑监测	177
5.2.4	X 射线耀斑监测	179
5.2.5	日冕物质抛射监测	179

5.2.6	太阳射电监测	180
5.3	地球空间环境监测	181
5.3.1	中高层大气监测	182
5.3.2	电离层监测	186
5.3.3	地磁场监测	189
5.3.4	高能带电粒子监测	191
5.4	空间环境预报	195
5.4.1	空间环境预报方法	195
5.4.2	空间环境现报	196
5.4.3	空间环境短期预报	196
5.4.4	空间环境警报	196
5.4.5	空间环境中长期预报	196
5.5	太阳活动预报	197
5.5.1	太阳黑子长期预报	198
5.5.2	太阳耀斑预报	198
5.5.3	太阳质子事件预报	199
5.6	地球空间环境扰动预报	201
5.6.1	地磁暴预报	201
5.6.2	高能电子暴预报	202
5.6.3	电离层扰动预报	202
	分析思考题	204
	参考文献	204
第六章	态势感知雷达原理与系统	205
6.1	雷达基础	205
6.1.1	雷达基本组成	206
6.1.2	雷达工作基础	207
6.1.3	雷达主要类型	208
6.1.4	雷达性能技术指标	209
6.2	典型雷达设备简介	210
6.2.1	相控阵雷达	210
6.2.2	单脉冲雷达	213
6.2.3	双(多)基地雷达	215
6.3	电磁谱段与传播环境	220
6.3.1	电磁谱段	220

6.3.2	电磁波传播环境	224
6.4	雷达方程及参数测量	227
6.4.1	雷达方程	227
6.4.2	参数测量	228
6.4.3	定位与跟踪	240
6.4.4	雷达干扰、噪声与杂波	244
6.5	雷达天线	247
6.5.1	常用线天线	247
6.5.2	常用面天线	250
6.6	雷达发射机	252
6.6.1	微波电子管发射机	252
6.6.2	固态发射机	253
6.6.3	固态收发模块	254
6.7	雷达接收机	255
6.7.1	雷达接收机类型	255
6.7.2	超外差式雷达接收机	255
6.8	雷达终端显示器	257
6.8.1	距离显示器	258
6.8.2	平面显示器	259
6.8.3	高度显示器	260
6.8.4	情况显示器和综合显示器	260
6.8.5	光栅扫描显示器	261
	分析思考题	261
	参考文献	261
第七章	空间目标光学测量原理	263
7.1	光学测量设备简介	263
7.1.1	光学测量设备的基本构成	263
7.1.2	典型的光学测量设备简介	268
7.2	光学镜头	270
7.2.1	普通光学镜头	270
7.2.2	光学望远镜	273
7.2.3	望远镜的作用距离	276
7.3	光电探测器	279
7.3.1	光电探测器的理论基础	279

7.3.2	CCD 探测器	289
7.3.3	CMOS 探测器	300
7.3.4	pin 探测器	304
7.3.5	APD 探测器	305
7.3.6	红外探测器	306
7.4	被动式光学位姿测量	307
7.4.1	多站交会测量原理	308
7.4.2	单站精密测角原理	311
7.4.3	双目立体测量基本原理	313
7.4.4	红外测量原理	320
7.5	主动式光学位姿测量	323
7.5.1	激光雷达原理	324
7.5.2	激光三维成像原理	328
7.5.3	典型激光三维成像系统	331
7.6	光度测量方法	333
7.6.1	光度的概念	333
7.6.2	光度测量的基本方法	335
7.7	偏振测量方法	337
7.7.1	自然光与偏振光	337
7.7.2	偏振测量基本原理	338
7.8	光谱测量方法	342
7.8.1	光谱测量原理	342
7.8.2	光谱测量系统	345
7.8.3	光谱测量的应用	347
	分析思考题	349
	参考文献	350
第八章	空间态势分析与描述	351
8.1	空间目标轨道预报与精确计算	351
8.1.1	双行根数与轨道预报模型	352
8.1.2	轨道参数的精确计算	357
8.2	空间碎片碰撞预警	363
8.2.1	空间碎片碰撞预警流程	363
8.2.2	危险交会筛选方法	366
8.2.3	碰撞概率计算方法	370

8.2.4	空间碎片碰撞预警在航天发射中的应用	380
8.3	空间态势描述方法	381
8.3.1	空间态势显示需求及描述方式	382
8.3.2	空间态势图的内涵	384
8.3.3	空间态势图的系统体系架构	392
8.3.4	空间态势图显示的关键技术	397
	分析思考题	399
	参考文献	400

1.1 空间态势感知概念

随着航天器、火箭箭体、空间碎片等在轨空间目标数量的不断增加,空间环境不断恶化,对航天器的正常运行、后续航天任务和未来航天事业的发展构成了严重、持续且广泛的威胁。2009 年 2 月发生的美俄卫星在轨碰撞事件更是给人类敲响了空间安全的警钟。为了确保空间资产安全、充分利用空间,充分了解空间目标与环境综合信息并最终获取空间优势已成为世界各国空间力量建设的终极目标。美国对空间优势的强化催生了空间态势感知概念,并指导了美国以空间目标监视与空间环境监测为核心的空间态势感知力量的建设和发展。

作者通过对美国相关条令的分析,总结了各条令中对空间态势感知的认识与调整。从表 1-1 可知,经过不断的充实、调整与完善,空间态势感知已从最初的一个作战计划人员需要考虑的作战相关因素,逐步发展为目的美国一个重要的独立的空任务领域,其概念已从一个简单的地位、作用及组成描述,发展为包含了地位、作用、任务目标、构成要素、空间协调权及其职责等丰富内涵的较为完备的概念,其地位作用已从最初的空间任务领域的支持辅助性作用,提升为指导空间任务的基础,位列五大空任务领域之首。美国 2013 年 5 月发布的最新《联合作战空间对抗条令》将空间任务规划空间态势感知、空间力量增强、空间支援、空间控制、航天部队应用五大任务领域,并将空间态势感知由 2012 年空军《空间作战条令》中的三大任务领域全球空间任务实施、空间支持、空间控制的共性基础提升为独立任务领域并位列首位。

表 1-1 美军历次空间作战条令中对空间态势感知概念演变

空间态势感知呈现的形式	条令版本	具体内容
概念第一次出现	1998 年《空间作战条令》	空间作战计划人员应该考虑问题之一
作为联合战略的空间因素第一次出现	2001 年《空间作战条令》	空间作战计划人员应该考虑问题之一

(续)

空间态势感知呈现的形式	条令版本	具体内容
作为正式的空间作战相关概念及一项典型的作战任务	2004 年《空间作战条令》	明确了空间态势感知重要地位、作用、组成、需求和任务。空间态势感知由情报、监视、侦察、环境监视、指挥控制组成
丰富完善	2006 年《空间作战条令》	从空间协调权的职责、航天部队主管职责、空间作战规划等方面强调了空间态势信息及保持空间态势感知的重要性
作为一项空间任务	2009 年《空间联合作战条令》	4 个任务领域(空间力量增强、空间支持、空间控制、空间力量运用)的空间控制任务领域(进攻性空间控制、防御性空间控制、空间态势感知)的三项任务之一。并以空间通用作战图描述了空间态势感知在指挥控制的地位作用等
将空间态势感知能力和基础情报能力赋予最高优先权	2009 年 2 月美俄卫星相撞后,2010 年《美国国家空间政策》	进一步强调了空间态势感知在保持对自然干扰以及他国空间能力、活动和企图的持续感知方面的基础支撑能力
从 2004 版的空间控制领域独立出来,作为全球空间任务实施、空间支持、空间控制三大任务领域共性基础,并与其并列论述	2012 年空军《空间作战条令》	明确了构成要素,阐述了其确保空间飞行安全、保护空间活动和空间设施、执行和确认国际条约协定、增强地面军事行动、支持国家安全和国家战略的任务目标
作为美国及军事行动的五大任务领域之一	2013 年美军《联合作战空间对抗条令》	重新划定的五大任务领域:空间态势感知,空间力量增强,空间支援,空间控制,航天部队应用

装备学院耿文东教授等编著的《空间态势感知导论》中,在充分理解态势、态势感知和空间态势感知实质的基础上,总结提炼出的空间态势感知概念较全面涵盖了空间态势感知的要素、信息、活动及作用。本书结合其地位的不断提升和作用的不断加强,对其稍作拓展,将空间态势感知定义如下:

空间态势感知是对空间目标的信息获取、信息处理、态势的认知与认知产品的生成及其应用,以及空间环境监测的活动。提供空间任务活动——筹划计划、任务决策、实施过程监控以及任务效果评估所需的态势信息,服务于空间任务领域范围内所有的决策人员与指挥人员、决策指挥机关与任务执行单位等。

可见,空间态势感知的核心内涵是空间态势信息获取、信息认知和信息利用,具体如图 1-1 所示。



图 1-1 空间态势感知

1.2 空间态势感知对象

空间态势感知的对象主要包括空间目标和空间环境。

1.2.1 空间目标

空间目标是在人类进行空间相关活动中产生的对象,这些产物是人类进行空间活动的主体,关系到人类相关活动目的的实现。空间目标通常是指长期驻留空间的物体,有时也包括某些一次性进入空间或某些特殊轨道的机动飞行器。空间目标主要包括人造地球卫星、特定的空间平台、空间站、空间运载工具、空间碎片等。一般来说,直径 $0.01 \sim 0.1\text{cm}$ 的碎片会对航天器表面产生凹陷和剥蚀,长期与卫星碰撞可能造成明显的积累影响;直径大于 0.1cm 的碎片会对卫星结构造成损害;直径大于 1cm 的碎片会对航天器造成灾难性的破坏。本书主要针对直径大于 1cm 的空间目标。

随着临近空间概念的提出及临近空间的开发和利用,临近空间飞行器已成为各国竞相发展的新的应用平台,作为未来军事装备体系发展的一个重要领域,必然会纳入未来空间目标监视范围。各国竞相研发的临近空间目标主要集中在

浮空气球、飞艇、高空无人机及高超声速飞行器等,但目前尚未进入使用阶段。临近飞行器距离地面位置适中,能够以高超声速飞行或进行定点悬停,与航空飞行器相比具有更强的机动能力、维持几周甚至几个月的滞空时间,具有较大的覆盖范围、较高地面分辨率和成像灵敏度,避免了空间飞行器距离遥远、信号微弱致使分辨率和灵敏度不高的缺点。而且,临近空间飞行器安全性高、生存能力强、部署快速、效费比高,作为一项新兴的增进通信、情报、侦察监视、预警能力的平台,具有重要的应用价值。

1.2.2 空间环境

尽管美国空军认为空间和大气层是一个无缝隙的连续统一体,但空间环境与大气层环境的特性有很大差别。虽然至今还没有关于大气层和空间之间特定边界的国际协议,但航空飞行器则遵循空气动力学原理,只能运行在大约 20km 高度以下、具有温度/湿度/风/雨雪和压力差的地球/大气层环境中。空间飞行器的工作运行遵循天文动力学原理,运行在 100km 高度以上、以高能粒子与起伏变化的磁场和温度为特征的恶劣环境中。

美军 2004 版《空间作战条令》引用 JP1-02 对空间环境的描述:空间环境是从地球电离层的下边界(大约 50km)开始,延伸到外层空间,包含固体粒子(小行星、流星体)、携带能量的粒子(离子、质子电子等)以及电磁和电离射线(X 射线、紫外线、 γ 射线等)。

自美国空军“施里弗”-3 演习中首次把临近空间引入作战视野,20 ~ 100km 高度空间区域的重要性已得到充分认识并成为各国研究的热点,各国对该区域能力的竞争不亚于对空间能力的竞争。临近空间环境特点主要是空气稀薄、气温极低、有严重的臭氧腐蚀和强烈的紫外线破坏,但气象状况较航空空间简单得多,层内干燥,水汽、杂质、云雨、雷暴闪电较少,也没有大气湍流现象,温度几乎不变,湿度接近于零等,而且大气几乎以水平运动为主,平均速度为 10m/s,非常适合浮空器和采用吸气式动力的飞行器平稳飞行。临近空间的军事意义在于,该区域不仅能够避免目前绝大多数地面装备的攻击,而且可以提高军事侦察和对地攻击的精度,对于情报收集、侦察监视、通信保障以及对空对地作战等,具有极大的发展潜力。

1.3 空间态势感知用途

从上述态势感知概念的分析可知,空间态势感知是引导空间行动的基础,是完成空间任务的关键部分,并对完成其他所有空间任务具有重要的支撑作用。