

轻小型无人机遥感发展报告

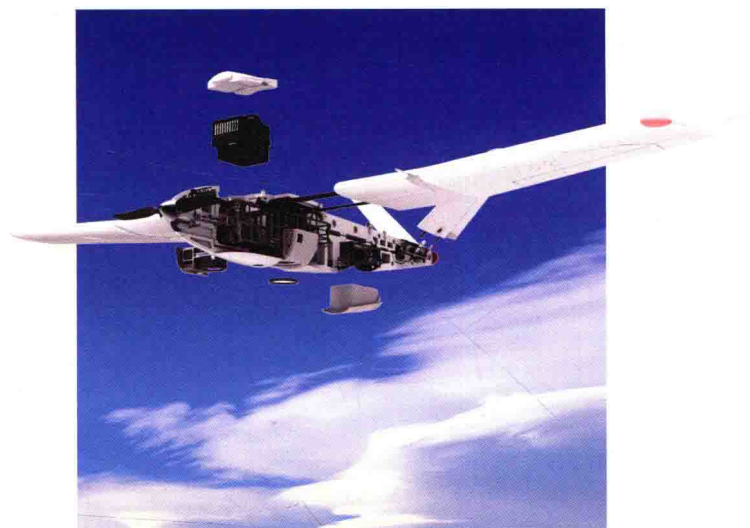
廖小罕 周成虎 主编



科学出版社

轻小型无人机遥感发展报告

廖小罕 周成虎 主编



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对我国轻小型无人机遥感发展进行了剖析,总结其发展历程,重在现状分析,也对其趋势进行预判。全书分绪论及上、中、下三篇。绪论对无人机平台、遥感载荷及遥感应用进行了概述;上篇回顾了无人机平台的发展,分析了无人机测控与任务规划的产品及其技术特点,总结了轻小型无人机管理规范与标准的现状;中篇介绍了光学、激光雷达、成像光谱仪等目前主要遥感载荷的发展、产品及其技术特点;下篇从应用角度,分析了轻小型无人机遥感的数据获取、处理和服务技术现状,梳理了轻小型无人机遥感当前的主要应用领域及案例。

本书可供遥感、地理信息系统、地理、测绘、海洋、环境及无人机应用等领域相关科研人员、教师和研究生等,以及相关政府、企事业有关人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

轻小型无人机遥感发展报告 / 廖小罕, 周成虎主编. —北京: 科学出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-03-046681-5

I. ①轻… II. ①廖… ②周… III. ①无人驾驶飞机-航空遥感-研究报告 IV. ①TP72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 306514 号

责任编辑: 杨帅英 崔慧娴 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 图阅社

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 22 1/2

字数: 670 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编 委 会

主 编	廖小罕	周成虎		
副 主 编	苏奋振	齐贤德	肖 青	李英成
编 委 会	廖小罕	周成虎	齐贤德	陈秀万
	苏奋振	肖 青	王 剑	万志强
	李加洪	李英成	张松梅	岳焕印
	谭 翔	朱 骅	唐志华	权 军
	丁晓波	卢海英		

前 言

作为采集地球数据及其变化信息的重要手段,遥感在资源探测、环境监测等方面得到广泛应用。近年来轻小型无人机遥感异军突起,发展异常迅猛。由于其不受轨道及重访周期制约,具有云下作业、厘米级超高分辨率数据获取和小时级响应的能力,正在被越来越多的行业和应用领域所认可。

我国轻小型无人机遥感在2008年汶川地震应急中大显身手后,也已在重大突发事件和自然灾害的应急响应、国土资源调查与监测、海洋测绘、农业植保、环境保护、交通、能源、反恐等方面得到全面应用。比如在玉树、鲁甸、尼泊尔地震以及天津港特大爆炸事故应急中;又比如在安全与反恐方面,获取了大毒枭糯康营房基地高精度数据,对远海如钓鱼岛进行了多期高精度数据获取行动等。

2015年,我国遥感应用专业级轻小型无人机已超过3000架。目前,整个行业既处于井喷期,也处于瓶颈时期。突出表现在技术上急需科技推动,急需协同攻关,以推动平台和载荷进一步吻合应用场景;急需出台切合轻小型无人机遥感的标准和规范,急需提供管理技术和信息服务技术,以规范飞行作业各环节,以提高数据的使用效率等。

为促进技术发展,国家遥感中心成立了轻小型无人机遥感应用专家工作组,通过全国实地考察、走访和调查研究及文献资料整理,梳理了轻小型无人机遥感的国内外发展过程、主要技术、主流产品等,历时年余,几易其稿,编撰了本书。

本书共计14章,分绪论及上、中、下三篇。其中,第1章绪论从轻小型无人机平台、遥感载荷、遥感应用三个方面概括了轻小型无人机遥感的发展现状,并对其发展趋势进行了分析。

上篇论述轻小型无人机遥感平台的发展,由第2~4章组成。其中,第2章论述了无人机的定义、分类、发展历程和国内外现状,介绍了轻小型无人机主要气动布局类型,以及适用于轻小型无人机平台的动力、导航、飞行控制等系统的技术特点;第3章从状态监控、数据链路、任务规划、动态组网四个方面介绍无人机遥感测控系统的发展,并分析了轻小型无人机常用的惯性/卫星组合导航系统以及飞行控制系统产品的发展现状;第4章从轻小型无人机遥感的角度,对国内外关于无人机及其子系统、遥感作业及信息处理、无人机遥感管理及应用的现行标准进行梳理和分析。

中篇论述轻小型无人机遥感载荷的发展,由第5~11章组成。其中,第5~10章分别介绍了光学、红外谱段、激光雷达、成像光谱、合成孔径雷达及航空物探载荷的技术发展和主要产品;第11章选取了微波辐射计载荷、微波GNSS-R载荷和大气载荷这三种典型的在研载荷,分别从原理、研究发现和趋势三个方面进行介绍。

下篇论述轻小型无人机遥感应用的发展,由第12~14章组成。其中,第12章主要阐述当前轻小型无人机遥感数据的获取过程,相应数据处理方法、技术、流程及软件等;第13章介绍轻小型无人机遥感在应急响应、国土测绘、资源调查与监测等领域的应用,以及大众社会化应用情况等;第14章介绍了轻小型无人机遥感信息服务技术系统国内案例,及国内外可用于轻小型无人机遥感数据管理与信息服务的系统或软件。

全书由廖小罕、周成虎和苏奋振统稿完成。第1章由廖小罕和苏奋振统稿,编委会全体成员参

与撰写。上篇由齐贤德和万志强统稿完成,其中第2章由王剑、张旭东、王璠、尹航、王明珠撰写,王秀丽、何俊提供了部分材料;第3章由张霄、王悦、郭若辰、王岩等编写;第4章由万志强、卢海英、章异羸、张啸迟、王泽溪等编写。中篇由肖青和陈秀万统稿完成,其中第5章由龚建华、汪承义、金鼎坚、戴玉成、于淼、梁剑鸣等撰写;第6章主要由方俊永、赵冬、李春来等撰写,苏艳梅、谢峰、张晓红、王潇、刘凯等参与部分内容编写;第7章主要由王成、朱精果等撰写,习晓环、刘汝卿、钟若飞、苏伟、庞勇、夏少波、聂胜、王平华、黎东、李旺等参与部分内容编写;第8章由王跃明、谢峰、郎均慰、邵红兰、刘成玉等撰写;第9章由梁兴东、乔明、董勇伟、王逸萧、姜文等撰写,李炎磊、冀广宇、杨振理、汪丙南等参与部分内容编写;第10章由郭子琪、黄大年、尹长春、焦健、于显利等撰写,孟庆敏提供了部分资料;第11章由李浩、李紫薇、于暘、谢品华、李昂、徐晋等撰写,杨东凯、万玮提供了部分材料。下篇由李英成和丁晓波统稿完成,由丁晓波、刘飞、吴文周、石伟、杨必胜、赵建华、支晓栋等撰写。

尽管编委会暨轻小型无人机遥感应用专家工作组走访了全国许多轻小型无人机遥感的参与机构、公司和专家,进行了国内外轻小型无人机遥感平台、载荷和应用案例的摸底调查,并开展了全国轻小型无人机遥感系统信息库、操控师信息库、成果数据信息库等建设工作,力图使本书的编写具有坚实的调查研究基础,以避免挂一漏万或一叶障目现象。但由于轻小型无人机遥感的发展风起云涌,其平台、载荷和应用的发展日新月异,从业的机构、公司和专家越来越多,应用的领域也越来越广。由此,难免有所遗漏或谬误,特请读者批评指正。本书引用或转载出于非商业性的教育和科研之目的,如涉及版权等问题,请与编委会联系。

廖小罕 周成虎
2015年8月30日

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 发展现状	1
1.1.1 轻小型无人机平台	1
1.1.2 遥感载荷	2
1.1.3 遥感应用	3
1.2 发展趋势	4
1.2.1 轻小型无人机平台	4
1.2.2 遥感载荷	5
1.2.3 遥感应用	6

上 篇

第2章 轻小型无人机平台	11
2.1 无人机历程	11
2.1.1 无人机定义	11
2.1.2 无人机分类	12
2.1.3 无人机的发展历程	13
2.1.4 国外无人机现状	16
2.1.5 国内无人机现状	22
2.1.6 消费类无人机的兴起	27
2.2 轻小型无人机布局及其特点	27
2.2.1 固定翼轻小型无人机	27
2.2.2 无人直升机	29
2.2.3 多旋翼无人机	32
2.2.4 复合式布局无人机	35
2.2.5 微型无人机	36
2.3 无人机动力装置	37
2.3.1 活塞式发动机	37
2.3.2 涡轮发动机	40
2.3.3 电池动力与电动马达	41

2.4	轻小型无人机导航技术	43
2.4.1	卫星导航	43
2.4.2	惯性导航	44
2.4.3	组合导航	47
2.4.4	无线电导航	49
2.5	轻小型无人机飞行控制	49
2.5.1	无人机飞行控制系统	49
2.5.2	飞行控制系统的实现	49
第3章	轻小型无人机测控与任务规划	57
3.1	无人机状态监控与地面指控站	57
3.1.1	无人机地面监控系统	58
3.1.2	无人机地面指控站	58
3.1.3	机载控制系统	61
3.2	无人机数据链路	61
3.2.1	无人机链路系统组成	61
3.2.2	无人机链路信道传输特性	62
3.2.3	无人机数据链路设备	63
3.3	无人机任务规划与指挥控制	66
3.3.1	无人机任务规划的内容	66
3.3.2	无人机任务规划流程	67
3.3.3	无人机航路规划	68
3.3.4	无人机任务规划系统的未来发展	69
3.4	无人机编队飞行	70
3.4.1	无人机编队飞行的主要特点	70
3.4.2	无人机编队研究现状	71
3.4.3	无人机移动自组网	73
第4章	管理规范与技术标准	75
4.1	相关规范标准综述	75
4.1.1	轻小型无人机遥感标准体系	75
4.1.2	国外标准现状、相关管理法规	76
4.1.3	国内标准现状、相关管理法规	76
4.1.4	国内外代表性标准介绍	77
4.2	轻小型无人机遥感管理及应用	79
4.2.1	相关规定	79
4.2.2	无人机管理	80

4.2.3 从业人员管理	83
4.3 无人机及载荷标准与规范	85
4.3.1 无人机平台子系统	86
4.3.2 遥感任务载荷子系统	88
4.3.3 电源系统	89
4.4 遥感作业的标准与规程	89
4.4.1 遥感作业法规与安全须知	89
4.4.2 遥感作业操作规范	91
4.4.3 遥感作业应急预案	91
4.5 遥感信息处理的标准与规范	92
4.5.1 数据预处理与精处理	92
4.5.2 信息提取与综合	94
4.5.3 数据管理	94
4.6 轻小型无人机遥感系统综合验证场	96
4.6.1 验证场基本构成	96
4.6.2 国外综合验证场发展现状	97
4.6.3 我国综合验证场发展情况	98

中 篇

第5章 轻小型无人机光学遥感载荷	109
5.1 光学载荷发展现状与趋势	109
5.1.1 国内光学遥感载荷发展现状	109
5.1.2 无人机光学载荷发展趋势	111
5.2 光学遥感载荷原理	113
5.2.1 传感器原理	113
5.2.2 多角度摄影原理	115
5.2.3 摄影导航与控制系统原理	116
5.2.4 数据存储系统原理	116
5.2.5 数据传输系统原理	117
5.2.6 系统集成原理	118
5.3 轻小型无人机光学遥感载荷关键技术	119
5.3.1 轻小型无人机光学载荷关键技术	119
5.3.2 轻小型无人机载荷数据产品验证关键技术	121
5.4 轻小型无人机典型光学载荷产品与应用	122
5.4.1 典型光学传感器产品	122

5.4.2	典型光学载荷产品	125
5.4.3	应用案例	129
第6章	轻小型红外谱段遥感载荷	132
6.1	红外载荷发展现状与趋势	132
6.1.1	国外微型红外载荷发展现状和趋势	132
6.1.2	我国微型红外载荷发展状况	136
6.2	红外载荷原理	138
6.2.1	红外辐射原理	138
6.2.2	红外探测原理	138
6.2.3	红外载荷原理	139
6.3	轻小型无人机红外载荷关键技术	140
6.3.1	红外载荷开发与系统集成关键技术	140
6.3.2	轻小型无人机红外载荷数据处理关键技术	141
6.3.3	载荷数据产品验证关键技术	142
6.4	轻小型无人机红外载荷典型产品和应用	142
6.4.1	轻小型无人机红外载荷主要产品	142
6.4.2	应用实例	155
第7章	轻小型无人机激光雷达载荷	158
7.1	激光雷达载荷发展现状与趋势	158
7.1.1	轻小型机载激光雷达载荷发展现状和趋势	158
7.1.2	我国轻小型机载激光雷达载荷发展状况	162
7.2	机载激光雷达原理	166
7.2.1	机载激光雷达工作原理	166
7.2.2	机载激光雷达系统组成	167
7.3	轻小型无人机载激光雷达载荷关键技术	169
7.3.1	轻质高效激光发射机技术	169
7.3.2	高频、大视场扫描技术	170
7.3.3	POS 联合解算及校正技术	170
7.3.4	设备内标定及检校技术	170
7.3.5	数据预处理与点云处理	171
7.4	轻小型无人机载激光雷达载荷典型产品和应用	172
7.4.1	轻小型无人机载激光雷达载荷主要产品	172
7.4.2	轻小型无人机载激光雷达载荷应用案例	176
第8章	轻小型无人机成像光谱遥感载荷	181
8.1	成像光谱仪发展现状与趋势	181

8.1.1 国外成像光谱载荷的发展	181
8.1.2 国内成像光谱载荷的发展	184
8.2 成像光谱载荷原理	188
8.2.1 色散型成像光谱仪	188
8.2.2 干涉式成像光谱仪	189
8.2.3 滤光片式成像光谱仪	190
8.3 轻小型无人机成像光谱载荷关键技术	191
8.3.1 轻小型无人机平台成像光谱载荷关键技术	191
8.3.2 轻小型无人机成像光谱载荷数据处理关键技术	191
8.4 小型无人机成像光谱载荷应用案例	193
第9章 合成孔径雷达载荷	196
9.1 合成孔径雷达发展现状与趋势	196
9.1.1 国外微型 SAR 载荷发展现状与趋势	196
9.1.2 我国微型合成孔径雷达发展现状	203
9.2 合成孔径雷达原理	204
9.2.1 SAR 成像几何构型	205
9.2.2 SAR 空间分辨率	206
9.2.3 SAR 图像处理	207
9.2.4 SAR 复数图像	207
9.3 微型 SAR 载荷关键技术	208
9.3.1 微型化、低功耗与高性能的雷达系统技术	208
9.3.2 非线性误差估计与校正	209
9.3.3 微型 SAR 成像处理技术	210
9.3.4 高精度运动补偿技术	213
9.3.5 微型 SAR 的实时成像处理技术	217
9.4 典型载荷产品和应用实例	218
9.4.1 典型载荷介绍	218
9.4.2 微型 SAR 应用特点和典型应用实例	223
第10章 航空物探载荷	226
10.1 航空物探载荷发展现状与趋势	226
10.1.1 航空磁载荷发展现状与趋势	226
10.1.2 航空电磁载荷发展现状与趋势	227
10.1.3 航空放射性载荷发展现状与趋势	230
10.2 航空物探载荷关键技术	231
10.3 航空磁载荷典型产品与应用案例	232

10.4 航空电磁载荷典型产品和应用实例	235
第 11 章 在研载荷	237
11.1 轻小型飞机微波辐射计	237
11.1.1 微波辐射计原理	238
11.1.2 机载微波辐射计发展现状	239
11.1.3 机载微波辐射计载荷发展趋势	241
11.1.4 轻小型无人机平台微波辐射计关键技术	241
11.1.5 轻小型机载微波辐射计产品	242
11.2 GNSS-R 载荷	245
11.2.1 GNSS-R 载荷原理	245
11.2.2 GNSS-R 载荷发展现状	246
11.2.3 GNSS-R 载荷发展趋势	250
11.2.4 轻小型无人机 GNSS-R 载荷关键技术	250
11.2.5 轻小型无人机 GNSS-R 载荷典型产品和应用	251
11.3 轻小型无人机差分吸收光谱仪 (DOAS)	252
11.3.1 差分吸收光谱技术 (DOAS) 原理	252
11.3.2 轻小型差分吸收光谱仪 (DOAS) 发展现状	254
11.3.3 轻小型无人机平台 DOAS 载荷关键技术	255

下 篇

第 12 章 遥感数据获取与处理	259
12.1 遥感飞行作业与数据获取	259
12.1.1 遥感任务规划	259
12.1.2 空域申请与作业流程	259
12.1.3 数据质量检查与整理	261
12.1.4 空域管理	262
12.2 光学影像处理技术	263
12.2.1 单传感器数据处理技术	263
12.2.2 多视立体影像处理技术	266
12.3 SAR 影像处理技术	268
12.3.1 雷达立体测量	268
12.3.2 雷达干涉测量	268
12.3.3 SAR 影像处理软件	269
12.4 Lidar 数据处理技术	270
12.4.1 航摄设计软件	271

12.4.2	数据预处理软件	271
12.4.3	数据后处理软件	272
12.4.4	激光数据处理一体化软件	272
12.4.5	激光雷达数据应用软件	273
12.4.6	激光雷达数据免费浏览工具软件	273
12.5	机载视频处理技术	274
12.6	遥感影像解译专题处理技术	274
第 13 章	轻小型无人机遥感应用	277
13.1	重大突发事件和自然灾害应急响应	277
13.1.1	需求特点	277
13.1.2	服务对象	277
13.1.3	经济效益	277
13.1.4	发展趋势	278
13.1.5	典型案例	278
13.2	国土、测绘、城市、海洋等领域应用	281
13.2.1	需求特点	281
13.2.2	服务对象	282
13.2.3	经济效益	282
13.2.4	发展趋势	282
13.2.5	典型案例	282
13.3	农林、环保、科教文化等领域应用	290
13.3.1	农林应用	290
13.3.2	环保应用	293
13.3.3	科教文化应用	295
13.4	矿业、能源、交通等领域应用	296
13.4.1	矿业应用	296
13.4.2	能源领域	297
13.4.3	交通应用	300
13.5	公共安全领域应用	301
13.5.1	需求特点	301
13.5.2	服务对象	301
13.5.3	应用案例	302
13.5.4	社会意义	302
13.6	互联网、移动通信和百姓娱乐应用	303
13.6.1	互联网应用	303

13.6.2	移动通信领域	304
13.6.3	文化娱乐活动	304
第14章	信息服务技术系统	306
14.1	轻小型无人机遥感系统及操控师信息库系统	306
14.1.1	系统结构	306
14.1.2	系统访问与更新机制	306
14.1.3	系统功能模块	308
14.1.4	用户界面	309
14.2	轻小型无人机遥感成果信息服务系统	311
14.2.1	系统结构	311
14.2.2	系统功能	312
14.2.3	用户界面	312
14.3	国内外相关影像管理数据系统或软件	313
14.4	国外遥感影像元数据管理	317
参考文献		319
附录一	典型无人机遥感应用机型介绍	326
附录二	无人机遥感应用大事记	337

第1章 绪 论

轻小型无人机遥感是我国当前和未来获取厘米级超高分辨率、小时级即时响应遥感数据的主要途径，是空间对地观测体系不可或缺的组成部分，是我国完整的空间对地观测基础设施体系的重要组成部分，是实现高频次、超高分辨率遥感数据获取的关键，是实现即时全方位空间信息提供的关键，也是即时全方位覆盖，实现新时代空间信息产业革命的关键所在。

在国家科技项目支持下，在巨大的市场需求下，我国轻小型无人机遥感技术及应用取得了突飞猛进的发展，其在 2008 年汶川地震应急服务中大显身手，由此拉开了我国轻小型无人机遥感应用令人瞩目的序幕。此后，轻小型无人机遥感系统以其全天候、全天时、实时化、高分辨率、灵活机动、高性价比等优势，在应急、减灾、农林、国土、测绘、海洋、反恐等方面的发展势头迅猛，2015 年我国遥感应用专业级轻小型无人机已超过 3000 架。整个行业既处于井喷时期，也处于瓶颈时期，主要表现在技术急需新突破，行业急需好规范。

未来，面向超高分辨率地理空间数据获取、重大突发事件快速应急响应、重点与热点地区资源环境信息获取等国家重大需求，通过突破轻小型遥感无人机多型设计与组网处理、载荷微型化和应用网络化等关键技术，在移动互联、物联网背景下，将更快速、更便捷、更精准地提供超高分辨率空间信息，为我国快速城镇化、产业转移、反恐维稳、周边行动提供坚实的技术能力和精细数据支撑能力，使其成为国家发展与国际权益斗争的科技保障新手段。汇同云计算与大数据技术，将直接推动全国低空无人机的有效管控，推动对地观测和大众精准感知服务的革命性变革，改变人们生活及出行方式，推动我国建成世界领先的空间信息产业，在未来 5 年内形成年产值超千亿美元的朝阳产业。

1.1 发展现状

卫星遥感受其本身重访周期的限制，加之光学传感器易受云层等影响，无法实现实时观测，难以获取全部地区的高分辨率影像。航空遥感虽然不受重访周期限制，但申请中空飞行空域十分不便，起降条件要求高，而且气象条件影响也很大。而相比较轻小型无人机技术与全球定位系统技术、遥感技术的结合，其具备的快速反应和云下高分辨率特点使其应用范围越来越广，渗透至国民经济建设各领域。本节将从轻小型无人机平台、遥感载荷及遥感应用三方面阐述当前轻小型无人机遥感发展现状。

1.1.1 轻小型无人机平台

小型化、高性能动力装置的成熟，以及高精度、多功能、低成本导航飞控系统的进步，一方面使传统无人机的体型得以小型化；另一方面使传统航模具有更高更好的性能。未来无人机平台将更加小型化、智能化和实用化，在操控性上将更加方便易学，在安全上将更具有可预测性和低风险性。

1) 布局形式

按气动布局，轻小型无人机可分为固定翼、旋翼、扑翼和复合式布局等类型。目前轻小型遥感

无人机多数为常规布局、鸭式布局、飞翼布局的固定翼类无人机，少数为直升机和多旋翼布局的旋翼类无人机。固定翼无人机大都采用弹射、短距滑跑或手抛起飞，伞降、短距滑跑降落或撞网回收，无人直升机和多旋翼无人机具备垂直起降能力，使用灵活方便。

2) 动力装置

目前，轻小型无人机动力装置以小型活塞发动机和电动动力为主。小型活塞发动机主要为航模用甲醇机或汽油机，其中“DLE”等国产小型活塞发动机已占据半壁江山。大部分电推进型无人机的动力都以聚合物锂离子电池为主，目前国内民用无人机的锂电池供货厂商有格瑞普、欣旺达（无电芯能力）、新能源科技有限公司（Amperex Technology Limited）、瑟福、力神等。当前，可将锂离子电池按一体化设计，加工成无人机的结构件，以有效减轻飞机结构重量，增加结构空间。此外，油、电混合动力在多旋翼无人机上也已经得到应用。

3) 导航方式

目前，轻小型无人机主要采用卫星、惯性、地磁或组合导航。卫星导航使用最多的是美国的GPS导航系统和我国北斗导航系统。目前北斗导航系统已在我国及周边区域使用，其独特的短报文通信能力可在地面监控能力范围外对无人机进行监控。基于微机械惯性器件的惯性导航系统已经在轻小型无人机上大量应用，使用卫星导航作为修正，完全能够满足飞行控制和导航的精度需求。但由于元器件生产工艺上的差距，用于测绘载荷的高精度微机械惯性器件主要还依赖于进口。

4) 飞行控制

无人机的操控方式分为自主控制、指令控制（人机混控）和人工控制三种方式。飞控系统是无机自主飞行的核心，担负着姿态控制、航迹控制、载荷设备控制、故障检测等重要任务，决定着飞行稳定性和安全性，具有高度集成的特点。轻小型无人机受其尺寸、成本的限制，飞控系统一般由低成本的传感器以及低功耗嵌入式处理器组成，其关键器部件和解算方法也日趋成熟，北京零度智控、北京普洛特、成都纵横等公司的市场产品日渐丰富。

5) 数据链路

目前，适用于轻小型无人机使用的数据传输系统通视条件下作用距离超过200km，传输速率可达200kb/s；图像传输系统通视条件下作用距离超过100km，传输速率可达10Mb/s。

6) 规范与标准

目前国内尚未有专门针对轻小型无人机遥感的标准体系，仅有部分军用无人机、民用无人机和航空遥感的标准，对于轻小型无人机遥感系统针对性并不强。美国、欧洲等国家和地区针对无人机研究和应用早于我国，已开始制定或起草民用无人机的相关标准，但同样尚未形成完整体系；目前我国已经启动针对轻小型无人机及其遥感标准的研究和制定。我国即将颁布《无人驾驶航空器飞行管理规定》，该规定是国内无人机行业的基础法规，将对我国无人机的研发、生产、使用、管理产生重要影响。轻小型无人机遥感相关标准的制定工作必须严格依照该规定进行。

1.1.2 遥感载荷

小型无人机遥感的功能载荷，主要有光学影像和视频设备、红外探测、激光测距、孔径雷达、电子对抗任务载荷等。随着电子、电池、芯片等技术的发展，一些载荷体积、质量和功耗水平都足够低的载荷不断涌现，特别是光学载荷已经在各行业及领域得到了切实的应用。

(1) 轻小型无人机遥感载荷不断涌现并展示了较强的应用潜力。轻小型无人机平台的出现以及飞控和飞行保障能力的增强，使得轻小型无人机遥感成为可能。基于数据需求，一些轻小型光学遥感载荷在轻小型无人机平台上得以实际应用，在抗震救灾、环境治理、农业植保和土地确权等多个

领域得到很好应用。随后,其他一些小型载荷(如红外、多光谱载荷)逐渐被研发成功并逐步得到应用,而成像光谱、激光雷达、SAR(Synthetic Aperture Radar)载荷的一些应用案例在各种文献中也能发现,有些已经成为较为成熟的商业载荷,如成像光谱德国 Cubert UHD185,激光雷达 Riegl VUX-1 等载荷以及投放市场。微型 SAR 载荷有些型号(如 NanoSARMISAR)已经研发成功并开始量产。

(2) 轻小型无人机载荷处于初级阶段,可实际应用传感器的种类较单一。由于飞行平台的商载能力、供电和安全性等方面的限制,目前可实际应用的传感器尚显单一。据抽样统计,全国民用轻小型无人机航摄系统的载荷传感器中,数码相机占 77%,视频摄像机占 7%,多光谱相机占 4%,红外辐射计占 3%,其他传感器占比均小于 2%。光学相机和视频摄像机得益于地表民用光学设备的成熟,应用广泛。随着消费类无人机的兴起,摄像机和照相机复合作为载荷正越来越普遍。在专业方面,除有关高校和科研院所搭载热红外成像仪、多光谱相机、高光谱相机外,实际应用尚不普遍,主要原因在于这些设备正走向微型化,功能、性能或价格方面尚离应用需求有一定距离。例如,多光谱相机及红外相机大多采用工业设备改造后用于遥感数据获取;成像光谱仪由于未能与高性能辅助设备(GPS(Global Positioning System)、POS(Packet Over SONET/SDH)、云台等)进行高度集成,数据后处理能力和应用还有一定限制;机载激光雷达目前已经有美国 Velodyne HDL32E、Riegl VUX-1、L'Avion Jaune 公司的 YellowScan 等多款(3kg)产品问世,但是每套系统的价格昂贵,接近或者超过百万人民币,不利于推广使用。

(3) 轻小型无人机载荷的数据处理模型和软件有所欠缺。目前针对轻小型无人机多种载荷的专用数据处理软件还比较欠缺,大多沿用传统有人机的处理流程和软件,并未针对无人机遥感飞行和设备的特点进行设计与优化。而轻小型无人机由于本身姿态稳定性原因以及搭载重量和空间尺寸的限制,其空中姿态变动较大,有些姿态参数甚至需要采用新方法、新途径获取,由此需要针对新型数据获取方式研发新的数据处理模型或软件,以快速准确地获得地表信息。

1.1.3 遥感应用

我国对轻小型无人机遥感的需求迫切而巨大,促使其发展活跃、势头迅猛,已广泛应用于经济社会的众多行业,目前在应用方面我国处于世界先进水平。但就经济规模而言,目前的应用仍然处于起步阶段,尚未形成产业效应。此外,尚需要制定相应的管理办法和标准规范,尤其是研制针对轻小型无人机的空管技术手段,保障低空安全和作业有序。

(1) 面向行业的轻小型无人机遥感应用,以获取 0.05~0.2m 高分辨率遥感影像,生产加工地理信息为主,是当前最主要的市场应用,广泛支持国民经济建设和社会发展所需。目前市场有专业轻小型无人机约 3000 架,估计未来 5 年的装备需求总量超过 30000 架。轻小型无人机遥感数据的处理方面,目前大多采用传统遥感数据处理的技术和平台,但开始出现一些专门针对轻小型无人机数据的处理平台。

(2) 近年来轻小型无人机遥感在汶川、玉树、鲁甸、尼泊尔地震以及天津港特重大爆炸事故等突发灾害的减灾救灾应急方面有突出表现,充分体现了轻小型无人机反应快、作业便捷、数据精准的特点;在安全与反恐方面,充分展现了轻小型无人机噪声和雷达反射面小的特点,获取了大毒枭糯康营房基地高精度数据,对钓鱼岛进行了多期高精度数据获取行动,为我国国家行动提供了重要的技术和数据支撑。

(3) 随着飞控、链路、导航等元器件的微小化和成本下行,面向百姓大众的消费类轻小型无人机遥感呈井喷发展,突出体现在运动、娱乐、影视广告制作等方面。目前已经形成年销售约 80 万