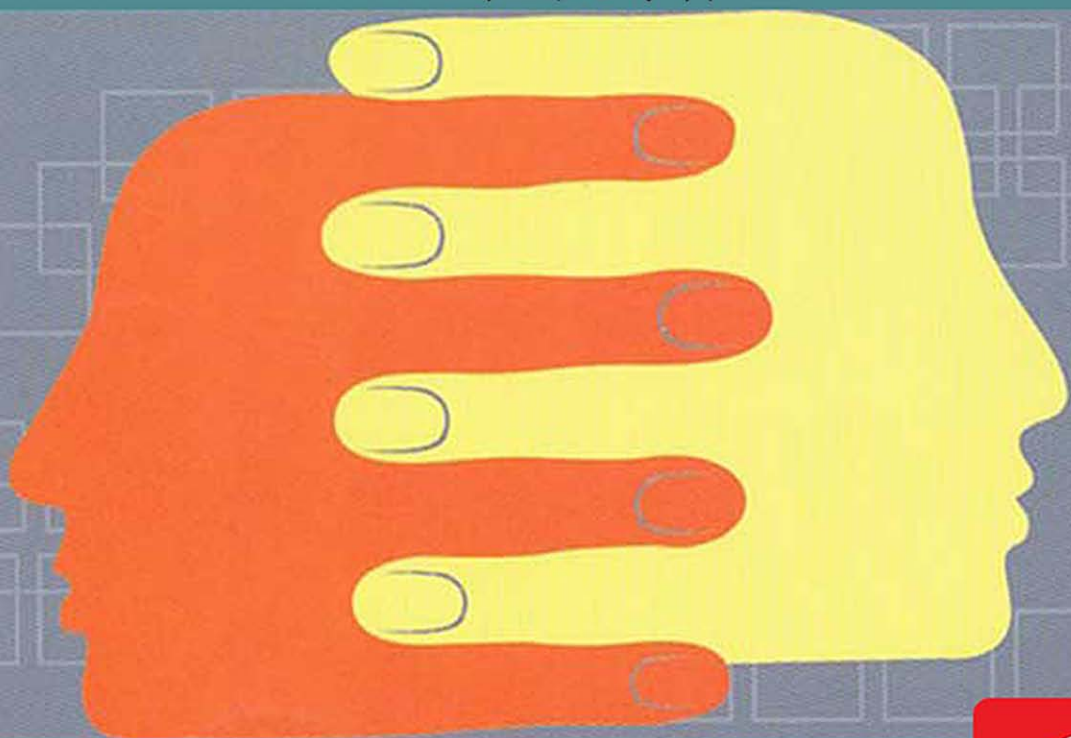


合成孔径激光成像雷达原理和系统

刘立人等著



上海科学技术出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

光学前沿研究与应用丛书

总主编 王之江

合成孔径激光成像雷达 原理和系统

刘立人 孙建锋 著
周煜 卢智勇

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径激光成像雷达原理和系统 / 刘立人等著. —
上海: 上海科学技术出版社, 2020. 1

(光学前沿研究与应用丛书)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4696 - 4

I. ①合… II. ①刘… III. ①合成孔径雷达—激光成
像雷达—研究 IV. ①TN958. 98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 271273 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

合成孔径激光成像雷达原理和系统

刘立人 孙建锋 著
周煜 卢智勇

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www. sstp. cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 25

字数 440 千字

2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4696 - 4/TN · 24

定价: 168.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书系统论述了合成孔径激光成像雷达的基本原理和系统实现。从光学视角对合成孔径激光成像雷达进行了重新解释,更加接近合成孔径激光成像雷达的本质,便于光学和激光专业人员认识和理解。理论上论述了合成孔径激光成像雷达统一的数据收集过程、工作模式;提出了双向环路收发光路,可以解决传统雷达近场成像的难题;介绍了合成孔径激光成像雷达独有的滑动聚束成像模式;分析了激光散斑对合成孔径激光雷达成像的影响。本书可供激光成像相关专业的学生及科研工作者、工程技术人员参考。

丛书编委会

总主编

王之江(中国科学院院士)

副总主编

楼祺洪 (中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

刘立人 (中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

编委(以拼音为序)

陈良尧 (复旦大学教授)

陈险峰 (上海交通大学教授)

李育林 (中国科学院西安光学精密机械研究所研究员)

刘旭 (浙江大学教授)

饶瑞中 (中国科学院安徽光学精密机械研究所所长、研究员)

王清月 (天津大学教授)

徐剑秋 (上海交通大学教授)

翟宏琛 (南开大学教授)

Ting-Chung Poon (美国 弗吉尼亚理工州立大学教授

Virginia Polytechnic Institute and State University)

丛 书 序

光学是物理学的一部分,是物理学的一个分支,也是当前科学研究中最活跃的学科之一,光学的发展是人类认识客观世界的进程中一个重要的组成部分。光学从产生开始就具有强烈的应用性,并形成了光学工程这一独特技术领域,在人类改造客观世界的进程中发挥了重要作用。光学实验的结果曾经推动了近代相对论和量子论的发展。光学为多个学科提供了重要工具,如望远镜对于天文学与大地测量学、显微镜对于生物医学与金相学、光谱仪对于化学和材料科学。光学的发展还为生产技术提供了许多重要的观察和测量工具。

从爱因斯坦辐射理论可以预见到激光存在。20世纪中叶,激光问世对光学及相关科学和技术影响很大。激光的本质是受激辐射形成的高亮度、高功率密度,从而派生出种种前所未有的非线性物理现象;形成非线性光学、激光光谱学等新学科分支;开拓了远紫外到太赫兹等新辐射波段;提供了超快过程研究的工具。激光作为新光源已应用于多个科研领域,并很快被运用到材料加工、精密测量、信号传感、生物医学、农业等极为广泛的技术领域。产生了光通讯、光盘等新产业。此外,激光还为同位素分离、受控核聚变以及军事上的应用,展现了光辉的前景,成为现代物理学和现代科学技术前沿的重要组成部分。

信息科学原先以电子学为基础,如电报、电话、雷达等领域。现代科技的发展使图像信息日益重要,光信息的获取、传输、存储、处理、接收、显示等技术在近代都有非常大的进步。光信息科学已是信息科学的重要组成部分。

总之,现代光学和其他学科、技术的结合,在人们的生产和生活中发挥着日益重大的作用和影响,成为人们认识自然、改造自然以及提高劳动生产率

的越来越强有力的武器。学术的力量是科技进步的基础,上海科学技术出版社在这个时候策划出版一套“光学前沿研究与应用丛书”,是一件非常合乎时宜的事情。将许多专家、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,对促进我国光学事业的发展具有十分重要的现实意义。

本套丛书的内容涵盖光学领域先进的理论方法和科研成果,图书类别主要以专著、教材为主,旨在从系统性、完整性、实用性和技术前瞻性角度出发,把理论知识与实践经验结合起来,更好地促进光学领域的学术交流与合作,让更多的学者了解该领域的科研成果和研究趋势,为促进我国光学领域科研成果的转化、加速光学技术的发展提供参考和支持。

可以说,本套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了众多国内外光学专家、学者的智慧和成果。期望这套丛书能有益于光学专业人才的培养、有益于光学事业的进一步发展,同时能吸引更多的仁人志士投身于祖国的光学事业。

王之江

中国科学院院士,物理学家

中国科学院上海光学精密机械研究所研究员

前 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)是一种新型主动成像技术,具有成像分辨率高、主动全天时、成像速度快等优点,在空间目标感知、对地测绘、要地防空等方面具有重要的应用价值,属于目前国际研究热点。

SAIL 蕴含了极其丰富的学科内容,包含激光信息的时间和空间的编码和调制、目标反射特性分析、极窄线宽激光技术、运动补偿及图像重构等内容。由于技术先进,目前还没有一本系统介绍 SAIL 技术的专著,不利于该技术的发展,使得同领域科学家不能在相同的技术层面进行良好的沟通和交流。由于近年来研究的深入,相关研究成果层出不穷,急需一本系统性讲述 SAIL 理论与技术的论著。无论对于从事本领域研究的科技人员,还是希望了解相关技术的各界人士都是非常有意义的。

本书从传统微波合成孔径雷达原理出发,系统阐述了 SAIL 的通用数理基础,并对关键子系统进行了详细分析。在传统侧视 SAIL 基础上,扩充了直视 SAIL 的内容,不仅包含相对完整的理论体系,也有实际的工程实施案例。

作者刘立人先生从事信息光学、合成孔径激光成像雷达研究 50 余年,有着丰富的学术成果和实践经验,在国内外期刊上发表过系列 SAIL 方面的论文,是 SAIL 领域的先驱和集大成者。刘立人先生曾作为中国唯一一位获得 *APPLIED OPTICS* 全球发表论文最多(前 50 名)的作者,在该期刊上系统发表了他在 SAIL 方面的研究成果,本书是他几十年学术研究成果的结晶。

刘立人先生是我国最早从事 SAIL 研究的科技人员之一,独立完成了相对完整的理论体系,还创造性地提出了直视合成孔径激光成像雷达的体制,并给予了全面的论述,形成了相对完整的体系结构。

撰写此书是刘立人先生多年来的愿望,本书的大部分工作是刘立人先生生前课题组公开发表的工作,部分内容属于首次展现,同时吸收和采纳了目前国际上的其他主流研究成果,是对 SAIL 工作的全面梳理和理论总结。感谢中国科学院电子所、中国科学院上海技术物理研究所、中国航天科工集团第三研究院 33 所、西安电子科技大学等单位同行在本书的编写过程中给予的支持和帮助,特别感谢课题组同事对合成孔径激光成像雷达研究的贡献。感谢课题组同事和研究生在图书编写过程中的支持。

本书分为 12 章,刘立人先生对全书的内容都有创造性贡献,孙建锋研究员负责本书第 1,2,3,6,7 章的编写和整理,周煜副研究员负责本书第 4,8,11,12 章的编写和整理,卢智勇助研负责本书第 5,9,10 章的编写和整理以及全书的统稿和文字校对工作。

由于作者能力所限,本书中难免会有疏漏和不足,欢迎广大读者多多指正。

孙建锋

2019 年 12 月 5 日于上海

目 录

第1章 合成孔径激光成像雷达导论 1

1.1 概述	1
1.2 侧视合成孔径激光成像雷达	5
1.2.1 光纤发射和接收结构的啁啾侧视 SAIL 系统的突破和 发展	7
1.2.2 望远镜发射和接收结构的啁啾侧视 SAIL 系统的发展	14
1.2.3 伪随机编码侧视 SAIL 的发展	18
1.3 直视合成孔径激光成像雷达	18
参考文献	21

第2章 合成孔径激光成像雷达的数理基础和关键子系统 24

2.1 光束传播理论	24
2.2 光学天线理论和结构	25
2.2.1 基于衍射的光学发射天线	26
2.2.2 基于成像的光学发射天线	27
2.2.3 离焦望远镜接收天线	30
2.2.4 双向环路发射接收望远镜	33
2.3 光学相干探测及方向性函数	41
2.3.1 光学外差探测及其方向性函数	41
2.3.2 偏振干涉自差接收探测	46
2.4 成像算法	46
2.4.1 一维傅里叶变换和一维匹配滤波	47
2.4.2 二维傅里叶变换成像算法	49

参考文献	57
第3章 线性调频侧视合成孔径激光成像雷达	59
3.1 线性调频侧视 SAIL 的基本原理和结构	59
3.2 合成孔径激光成像雷达的数据收集过程	60
3.2.1 矩形孔径 SAIL	61
3.2.2 圆孔径 SAIL 的成像分辨率及影响因素分析	65
3.2.3 交轨向成像分辨率分析	69
3.3 合成孔径激光成像雷达工作模式	71
3.3.1 统一工作模式的二维数据收集方程	73
3.3.2 基本工作模式分解	76
参考文献	79
第4章 伪随机相位编码侧视合成孔径激光成像雷达	81
4.1 引言	81
4.2 伪随机相位编码侧视 SAIL 原理	81
4.3 伪随机相位编码 SAIL 的多普勒影响分析	92
4.4 伪随机相位编码 SAIL 的验证	94
参考文献	97
第5章 直视合成孔径激光成像雷达	98
5.1 引言	98
5.2 直视 SAIL 基本原理	98
5.2.1 直视合成孔径激光成像雷达的一般性结构	99
5.2.2 信息获取过程	102
5.2.3 信息处理过程	106
5.2.4 分析和讨论	106
5.3 直视 SAIL 的正交偏振双通道波面变换发射器	109
5.3.1 交轨向双透镜平移调制方式	111
5.3.2 交轨向单透镜转动方式	114

5.3.3	交轨向单棱镜转动方式	117
5.3.4	交轨向单反射镜偏转方式	119
5.3.5	交轨向单倾斜镜旋转方式	121
5.4	直视合成孔径激光成像雷达工作模式	124
5.4.1	条带扫描模式	124
5.4.2	静态扫描模式	124
5.4.3	聚束/滑动聚束模式	132
	参考文献	143

第6章 合成孔径激光成像雷达关键问题 145

6.1	回波信号复数化	145
6.1.1	光频复数化方法	145
6.1.2	数字域复数化方法	148
6.2	初始相位同步	149
6.2.1	侧视 SAIL 初始相位同步	149
6.2.2	直视 SAIL 初始相位同步	150
6.3	目标退偏振效应	151
6.3.1	侧视外差平衡探测	152
6.3.2	直视自差平衡探测	152
6.3.3	直视自差平衡探测偏振影响的克服	154
6.4	大气信道的的影响	155
6.4.1	大气消光效应的影响	156
6.4.2	等晕角区域的限制	156
6.4.3	复图像与调制传输函数	157
6.4.4	系统平均的调制传输函数和分辨率	158
6.4.5	湍流引入相位误差	159
6.5	直视 SAIL 的交轨向正弦调制的非线性影响	163
6.5.1	准几何光学法相位函数的光学傅里叶变换方法	163
6.5.2	正弦调制的线性和非线性近似条件分析	168
6.5.3	三次相位项交轨向成像分辨率加宽效应的分析	169
6.5.4	顺轨向相位二次项多普勒效应及其补偿	171
	参考文献	173

第7章 合成孔径激光成像雷达的时间和空间频谱 174

7.1 侧视 SAIL 的时间和空间频谱	174
7.1.1 侧视啁啾 SAIL 交轨向的频谱分布	174
7.1.2 侧视伪随机相位编码 SAIL 交轨向的频谱分布	175
7.2 直视 SAIL 的时间和空间频谱	178
7.2.1 透射式交轨向双柱面透镜平移调制	178
7.2.2 透射式单透镜转动	182
7.2.3 透射式单棱镜转动	184
7.2.4 反射式交轨向单反射镜偏转	186
7.2.5 反射式交轨向单倾斜镜旋转	187
7.3 空间域-顺轨向空间带宽	189
7.3.1 侧视 SAIL	189
7.3.2 直视 SAIL	190
7.4 侧视 SAIL 和直视 SAIL 频谱的比较	190
参考文献	190

第8章 合成孔径激光成像雷达的信噪比 192

8.1 SAIL 信号采集和处理	192
8.1.1 直视 SAIL 的信号采集和处理	192
8.1.2 侧视 SAIL 的信号采集和处理	198
8.2 噪声功率谱	202
8.3 SAIL 成像的信噪比	205
8.3.1 直视 SAIL 信噪比	205
8.3.2 侧视 SAIL 信噪比	206
8.4 数据采样的傅里叶变换影响	207
8.5 讨论	208
参考文献	208

第9章 SAIL 的激光散斑效应 210

9.1 引言	210
--------------	-----

9.2	SAIL 时空散斑特性	212
9.2.1	目标面反射散射场特性	212
9.2.2	合成孔径激光成像雷达散斑的相干特性和平均尺寸	213
9.2.3	侧视 SAIL 接收面的激光散斑的波长特性	217
9.2.4	光学接收天线散斑孔径积分场的相干函数	219
9.2.5	侧视和直视 SAIL 的光学接收天线散斑孔径积分的相干函数	225
9.2.6	理想散斑下的侧视和直视 SAIL 的(顺轨向)成像起伏特性	230
9.3	抑制激光散斑效应方法	233
9.3.1	滑动聚束模式	233
9.3.2	多发射/多接收/多波长的多通道结构	235
9.4	小结	238
	参考文献	238
 第10章 合成孔径激光成像雷达光学成像处理		 240
<hr/>		
10.1	基于二维傅里叶变换的光学成像处理	240
10.1.1	二维傅里叶变换光学处理器	240
10.1.2	SAIL 二维傅里叶变换光学处理验证	246
10.2	基于单像散透镜的光学成像处理	249
10.2.1	基于单个实像散透镜的 SAIL 光学处理器	249
10.2.2	基于单个虚柱面透镜的光学处理器	258
10.3	基于光折变全息的光学并行成像处理	261
10.3.1	Fe: LiNbO ₃ 晶体波面记录	273
10.3.2	基于 Fe: LiNbO ₃ 晶体的 SAIL 光学像重建	275
10.4	直视 SAIL 的光学成像处理	277
	参考文献	279
 第11章 合成孔径激光成像雷达的实验室调试和性能验证		 281
<hr/>		
11.1	SAIL 综合测试平台	281
11.1.1	侧视 SAIL 的综合测试平台	281

11.1.2	直视 SAIL 的综合测试平台	287
11.2	SAIL 的调试和性能验证	290
11.2.1	尺度缩小侧视 SAIL 的二维成像实验	290
11.2.2	大口径侧视 SAIL 演示样机及其实验室验证	292
11.2.3	侧视 SAIL 原理样机外场实验	295
11.2.4	直视 SAIL 的实验室调试和成像验证	298
11.2.5	直视 SAIL 的外场实验	300
11.2.6	不同天气对直视 SAIL 的成像影响实验	304
11.2.7	直视 SAIL 的飞行验证实验	307
11.2.8	直视 SAIL 飞行试验姿态扰动补偿	312
11.2.9	直视 SAIL 的远程成像实验	319
11.2.10	直视逆 SAIL 外场成像试验	321
	参考文献	327

第12章 其他合成孔径激光成像雷达 329

12.1	菲涅耳望远镜全孔径合成的成像激光雷达	329
12.1.1	基本原理	331
12.1.2	实验室验证	336
12.2	自干涉 3D 成像雷达	339
12.2.1	自干涉直视 SAIL 的结构	340
12.2.2	信息获取和处理过程	341
12.3	非相干合成孔径激光成像雷达	350
12.3.1	非相干合成孔径激光成像雷达原理	351
12.3.2	聚束非相干合成孔径激光成像雷达成像验证	362
	参考文献	367

附录 370

附录 A	稳相法一维相位函数的傅里叶变换近似求解	370
附录 B	匹配滤波算法	376

索引 377

第 1 章 合成孔径激光 成像雷达导论

1.1 概 述

合成孔径激光成像雷达是能够达到厘米量级成像分辨率的光学遥感手段之一,属于物理光学前所未有的研究难题,已经发展了侧视合成孔径激光成像雷达和直视合成孔径激光成像雷达两种体系。直视合成孔径激光成像雷达在复杂信道条件下有更大的实际应用可能性,侧视合成孔径激光成像雷达有希望在空间平台实现工程化使用。

射频波段的合成孔径雷达(SAR)是卫星和飞机最主要的对地观察手段之一。20世纪50年代发明的射频波段的合成孔径雷达,在应用方面取得了巨大的成功,随着60年代激光技术的出现,合成孔径激光成像雷达引起了研究人员的浓厚兴趣。合成孔径激光成像雷达在军事方面可以用于星载和机载空间远程超高分辨率成像遥感观察以及空间运动小目标的成像识别,包括航天器、航空器、导弹、空间碎片等;在航天方面可以用于行星表面形貌的精确测绘,可在宇宙空间进行小行星和其他太空物体的探测;在环境监测方面可以连续观测和测量地球海洋、陆地、南北极、沙漠、森林等,或用于海冰检测、舰船监测、海面浮油检测、冰雪探测、洪水和干旱检测以及地表覆盖测绘等,或用于监测地球变化包括陆地沉陷、冰川运动和火山活动等,为地理信息应用提供图像帮助监测和预防环境灾难;在气象、气候方面可以提供关于气候和地质推移、水循环和海洋环流的详细信息,为研究各种自然和人为因素造成的气候改变提供大气数据。

合成孔径雷达的基本原理是在交轨向(又称距离向)实行视距的交轨向分辨成像和在顺轨向(又称方位向)实行孔径合成成像。基于这种原理的合成孔径雷达不能区分雷达两侧的目标,侧视观察为其必要工作条件。前期合成孔径激光成像雷达的研究发展均沿用射频波段合成孔径雷达的基本原理和方法。

美国等国家从20世纪60年代起有不少关于合成孔径激光成像雷达研究结果的报道,但是都不属于真正的侧视合成孔径雷达概念。直到2002年美国海军

实验室首先报道了一种在光学隔振平台上实现的侧视合成孔径激光成像雷达原理验证实验^[1],其采用了 $1.55\ \mu\text{m}$ 啁啾激光源和光纤技术,通过线性频率调制发射和外差去斜解调,是一个突破性的进展。实验成功的关键是采用了分子精细吸收谱线触发实现了脉冲间的初始频率同步,从而确保了孔径合成采样上的距离差频信号的相位稳定。此后,其他研究机构进一步取得了一系列光学平台尺度的实验结果,如采用了数字延时替代光学延时线^[2],实现了聚束模式和干涉三维成像实验等^[3]。合成孔径激光成像雷达的另外一个发展是交轨向采用窄脉冲激光内相位编码调制和相关接收的测距原理,洛克希德-马丁公司在 2011 年实现了机载实验^[4],作用距离为 1.5 km、光学足趾为 1 m 左右,同时采用了相位梯度算法来降低大气相位干扰的影响。应当注意,2007 年美国国防先进研究计划局(DARPA)战略技术办公室在一个会议上报道了雷声公司和诺斯罗普·格鲁门公司分别成功研制了 $1.55\ \mu\text{m}$ 和 $9.112\ \mu\text{m}$ 波长的合成孔径激光成像雷达样机,并进行了机载航空实验^[5],但是该报告中没有给出样机的工作原理和实物照片,也没有给出任何实验结果图片。

事实上光频段直接拷贝射频侧视合成孔径雷达的原理和方法无论在实现方面还是所能得到的性能方面都遇到了非常大的困难,这些主要由于以下本质原因^[6]:

(1) 光频波长很短,远远小于射频波长 3~6 个数量级,光频波长要远远小于光学元件的尺度,而射频范围的元件尺度与波长是相当的。

(2) 在射频波段搭载在电场载频上的目标信息一般通过降频的方法到达电子处理带宽内,而在光波范围只有采用平方律的光电探测器实现光频信号到电子信号的转换,这种转换是非线性的,特别是具有包裹化作用,即把光频信号包含的相位去 2π 整数倍,因此对于外界的相位干扰特别敏感。

(3) 合成孔径激光成像雷达在调制、解调和处理领域对于光信号的振幅、偏振、频率、时间相位和空间相位全部有严格要求,特别是对于激光发射与接收采样信号之间必须具有相关的专用和高精度的交轨向初始相位同步手段。

由于上述原因,侧视合成孔径激光成像雷达在实现方面还存在很多问题^[7]。侧视合成孔径激光成像雷达的光学天线采用光学望远镜,因为发射光斑必须具备相位二次项波前,所以必须由发射主镜的衍射极限产生,因此为了增大目标面上发射光斑尺寸,必须采用较小的光学天线口径。光学望远镜用于光学外差接收时其接收视场角相当于天线口径的衍射角,为了保证发射激光发散角和外差接收视场角的相匹配,接收望远镜口径必须与发射望远镜口径相等,这样就造成接收口径也非常小,使得接收回波信号强度变得很弱,这与侧视合成孔径激光成像雷达要求同时达到大的光学足趾和强的接收信号是相互矛盾的。侧视合成孔