

《红外与光电系统手册》第8卷

新系統和技術

航天工业总公司第三研究院
八三五八所翻译出版

新 系 統 和 技 術

红外与光电系统手册

第 8 卷

一部丛书 红外及光
电军事工程设
计
的重要手册

王太
一九九六年
十月

《红外与光电系统手册》

翻译出版委员会

顾 问：姚绍福 黄瑞松 承 文 于世元

委员会主任：姜殿元 谷满仓 程金信 张佐成

副 主 任：尹怀勤 孙再龙 杨树谦

主 编：孙再龙

责任编辑：赵雪燕 何淑珍 丰金凤 李 瑾

《新系统和技术》

翻

译：第一章 陆玲华

第二章、第六章 孙兴文 张 振

第三章 李正顺*

第四章、第七章 张天序**

第五章、第一章第1.7节 陈 刚

技术校对：第二章、第六章 雷宇鸣 孟军和

第三章 陈渭莉*

第五章、第一章第1.7节 孙宝举

总技术校对：陈光余

* 航天工业总公司三院三部

** 武汉华中理工大学图像所

其他 航天工业总公司三院八三五八所

翻译出版序言

本书以1978年出版的“红外手册”为基础，并对它作了大量的修订、更新和补充，而且进行了重新整理和编排，于1993年再版。因此，无论在内容上和形式上都以崭新的面貌出现。

全书共分八卷四十五章。几乎涉及到目前活跃于军事、航空航天和民用光电技术的大部分学科。有些内容是由先进的军事技术派生而来，在公开发表的文献中很少有如此大量的报道。在编排上也较好地考虑了可使用性因素。每章自成一体，避免了互相间繁琐的查阅，陈述格式由简明导言、实用公式汇编、有关数据、公式和数据使用方法实例四部分组成，非常明了、实用。

本书内容广泛充实，有较丰富的数据和参考资料，反映了美国80年代后至90年代初在此学科领域内的工程研究水平，具有先进性和很好的借鉴性，是目前红外与光电系统学科领域中最新的一本参考书和非常有用的工具书。

为及时地把这本手册推荐给我国从事红外和光电系统设计的工程技术人员，我们决定翻译出版本手册，但由于篇幅较长，翻译出版工作量巨大，故拟分两次进行。目前已翻译出版的有第三、五、六、七、八卷。第一、二、四卷正在出版过程中。

红外和光电系统技术属于跨学科应用工程技术，所涉及的专业知识面极广。由于参加翻译、校对和审订者的专业水平和外语水平有限，在译文中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

本手册由中国科学院成都分院林祥棣院长推荐并引进，值此翻译出版之际对他表示谢忱。

孙再龙

2000年5月

《红外与光电系统手册》总目次

第1卷 辐射源

- 第1章 辐射理论
- 第2章 人工辐射源
- 第3章 自然辐射源
- 第4章 辐射计

第2卷 辐射的大气传输

- 第1章 大气透射
- 第2章 通过大气湍流的传输
- 第3章 空气动力学效应
- 第4章 非线性传输：热晕

第3卷 光电元器件

- 第1章 光学材料
- 第2章 光学设计
- 第3章 光机扫描应用、技术和器件
- 第4章 探测器
- 第5章 红外传感器的读出电路
- 第6章 低温制冷系统的热学与机械设计
- 第7章 图像显示技术以及在机载条件下的特殊问题
- 第8章 摄影胶卷
- 第9章 调制盘
- 第10章 激光器

第4卷 光电系统设计、分析和测试

- 第1章 光电成像系统分析基础
- 第2章 光电成像系统性能预测
- 第3章 光机系统设计
- 第4章 红外成像系统测试
- 第5章 跟踪和控制系统
- 第6章 特征预测和模拟

第5卷 被动光电系统

- 第1章 红外行扫描系统
- 第2章 前视红外系统
- 第3章 凝视传感器系统
- 第4章 红外搜索/跟踪系统

第6卷 主动光电系统

第1章 激光雷达

第2章 激光测距仪

第3章 毫米波雷达

第4章 光纤系统

第7卷 光电对抗系统

第1章 报（预）警系统

第2章 伪装、抑制及屏障系统

第3章 主动红外对抗

第4章 消耗性诱饵

第5章 光学和传感器的保护

第6章 遮挡对抗

第8卷 新系统和技术

第1章 非常规成像系统

第2章 自适应光学

第3章 传感器与数据融合

第4章 自动目标识别系统

第5章 定向能量系统

第6章 全息学

第7章 视觉耦合系统的设计考虑

目 次

第1章 非常规成像系统

1.1 引言	(1)
1.2 恒星斑纹干涉测量法	(1)
1.2.1 基本理论	(2)
1.2.2 斑纹干涉测量法的理论	(2)
1.2.3 信噪比	(15)
1.2.4 物体发光强度的再现	(20)
1.2.5 仪器实现	(32)
1.2.6 天文应用结果	(35)
1.3 孔径面干涉法	(38)
1.3.1 理论背景	(38)
1.3.2 可见光波段的旋转切变干涉仪	(44)
1.3.3 红外旋转切变干涉法	(48)
1.3.4 总结及未来展望	(51)
1.4 被动干涉测量法距离-角度成像	(52)
1.4.1 基本概念	(53)
1.4.2 成像模式	(54)
1.4.3 光栅干涉仪的仪器实现	(56)
1.4.4 应用及实现问题	(59)
1.4.5 小结	(59)
1.5 非成像激光斑纹图案的图像形式	(60)
1.5.1 基本成像方程	(62)
1.5.2 成像方法	(64)
1.5.3 成像相关法	(65)
1.5.4 系统参数	(67)
1.5.5 结 论	(72)
1.6 光学距离-多普勒成像	(72)
1.6.1 系统基本工作原理	(72)
1.6.2 接收信号的描述	(73)
1.6.3 模糊函数	(77)
1.6.4 距离-多普勒成像的限制	(81)
1.6.5 傅里叶变换成像	(82)
1.6.6 工作系统	(86)

1. 7 用于成像补偿的激光导航星自适应光学	(86)
1. 7. 1 背景	(86)
1. 7. 2 激光导航星理论	(91)
1. 7. 3 激光导航星的产生	(95)
1. 7. 4 系统考虑	(98)

第2章 自适应光学

2. 1 引言	(114)
2. 2 历史纵览	(115)
2. 3 斯特列尔比	(117)
2. 4 像差源	(118)
2. 4. 1 大气湍流	(118)
2. 4. 2 传播影响	(121)
2. 4. 3 热模糊	(124)
2. 4. 4 湍流、抖动和热模糊	(135)
2. 4. 5 像差的非大气根源	(137)
2. 5 波前采样	(140)
2. 5. 1 透射采样器	(140)
2. 5. 2 反射采样器	(141)
2. 5. 3 混合采样器	(141)
2. 6 波前传感	(142)
2. 6. 1 低级模式的传感	(143)
2. 6. 2 剪切干涉仪	(145)
2. 6. 3 哈特曼波前传感器	(146)
2. 6. 4 多高频振动器的传感和校正	(148)
2. 6. 5 图像锐化	(149)
2. 6. 6 不等晕	(149)
2. 7 波前再现和控制机构	(150)
2. 7. 1 线性方程式的解	(151)
2. 7. 2 计算波前	(152)
2. 7. 3 计算变形镜驱动信号	(154)
2. 7. 4 时间的考虑	(156)
2. 8 波前校正	(158)
2. 8. 1 变形反射镜	(158)
2. 9 总结	(161)

第3章 传感器与数据融合

3. 1 概述	(165)
3. 1. 1 名词术语	(165)
3. 1. 2 多传感器复合	(166)
3. 1. 3 数据融合	(168)

3. 2	数据融合模型	(169)
3. 2. 1	单源数据处理	(169)
3. 2. 2	单源和多源数据联合	(170)
3. 2. 3	多源和多传感器数据融合	(170)
3. 2. 4	传感器数据融合的 DFS 模型	(171)
3. 3	结 构	(173)
3. 3. 1	传感器组的选择及技术要求	(173)
3. 3. 2	集中式与分布式融合处理	(176)
3. 3. 3	组合激增的处理	(180)
3. 3. 4	数据融合的适应性	(184)
3. 4	数据对准	(186)
3. 4. 1	时间外延	(186)
3. 4. 2	坐标转换	(188)
3. 4. 3	非对准误差补偿	(188)
3. 5	数据关联与航迹	(189)
3. 5. 1	假设产生	(190)
3. 5. 2	假设评估	(192)
3. 5. 3	假设选择	(197)
3. 5. 4	状态估计	(198)
3. 6	多传感器确认	(200)
3. 6. 1	参数分类	(202)
3. 6. 2	物理模型	(206)
3. 6. 3	认识库模型	(206)
3. 7	多平台融合	(208)
3. 7. 1	多平台融合结构	(209)
3. 7. 2	多平台测量	(212)
3. 8	统一集中管理	(215)
3. 8. 1	用于集成传感器/反应管理的模型	(215)
3. 8. 2	跟踪级别提示	(218)
3. 8. 3	探测级提示	(219)
3. 8. 4	传感器/响应复合	(219)
3. 8. 5	传感器协同工作能力	(222)
3. 9	性能测量	(224)
3. 9. 1	有效性测量	(224)
3. 9. 2	融合试验台	(225)
3. 9. 3	潜在性能	(226)
第 4 章 自动目标识别系统		
4. 1	引 言	(232)
4. 2	历史回顾	(233)

4.3	自动目标识别性能度量	(234)
4.3.1	目标检测性能度量	(235)
4.3.2	目标分类性能度量	(236)
4.4	影响自动目标识别性能的因素	(237)
4.4.1	场景参数	(237)
4.4.2	大气参数	(238)
4.4.3	传感器参数和平台动力学特性	(238)
4.4.4	与自动目标识别有关的图像度量	(238)
4.4.5	辅助数据源	(240)
4.5	自动目标识别系统分析	(240)
4.5.1	系统分析方法	(240)
4.5.2	自动目标识别的系统功能单元	(241)
4.5.3	自动目标识别系统的功能单元	(243)
4.6	自动目标识别算法	(243)
4.6.1	目标表示方案	(243)
4.6.2	统计模式识别算法	(244)
4.6.3	模板相关算法	(250)
4.6.4	基于模型的算法	(252)
4.6.5	人工神经网络算法	(255)
4.7	自动目标识别体系结构	(255)
4.7.1	数字实现	(256)
4.7.2	光学处理的实现	(258)
4.7.3	神经网络的实现	(259)
4.8	自动目标识别单元性能示例	(261)
4.8.1	性能数据	(261)
4.8.2	检测性能分析	(262)

第5章 定向能量系统

5.1	引言	(265)
5.2	定向能量系统的组成	(265)
5.3	定向能量系统示例	(266)
5.3.1	高能激光器	(266)
5.3.2	粒子束	(266)
5.3.3	激光熔化系统	(267)
5.3.4	激光雷达和照明系统	(267)
5.3.5	激光通讯系统	(267)
5.3.6	将来的应用	(267)
5.4	工程公式——子系统性能	(267)
5.5	光束的形成	(269)
5.5.1	功率	(270)

5. 5. 2 光束质量	(271)
5. 5. 3 波 长	(277)
5. 6 光束变换系统.....	(277)
5. 6. 1 功 率	(277)
5. 6. 2 光束质量	(279)
5. 7 扩束和瞄准.....	(284)
5. 7. 1 功 率	(285)
5. 7. 2 直 径	(286)
5. 7. 3 扩束器光束质量	(287)
5. 8 跟 踪.....	(292)
5. 8. 1 轴线偏转/漂移.....	(292)
5. 8. 2 抖 动	(292)
5. 9 目标耦合.....	(293)
5. 9. 1 目标相互作用机理	(293)
5. 9. 2 目标耦合的几何学	(293)
5. 10 工程公式——系统性能	(294)
5. 11 功率估算	(298)
5. 12 直径估算	(299)
5. 13 光束质量估算	(299)
5. 13. 1 波前影响.....	(300)
5. 13. 2 轴线偏转/漂移	(300)
5. 13. 3 抖 动.....	(301)
5. 13. 4 衍射效应.....	(301)
5. 13. 5 传输影响.....	(302)
5. 13. 6 其它影响.....	(302)
5. 14 波 长	(302)
5. 15 余 量	(303)
5. 16 作用距离	(303)
5. 17 数据概要一览	(304)
5. 17. 1 激光波长.....	(304)
5. 17. 2 典型估算值.....	(304)
5. 17. 3 激光谱线吸收.....	(306)
5. 17. 4 贝塞耳函数.....	(309)
5. 18 计算示例	(310)
5. 18. 1 高能激光照明系统的直径.....	(310)
5. 18. 2 测量目标相对速率的精度要求.....	(311)
5. 18. 3 谐振腔波前误差.....	(311)

第6章 全息学

6. 1 简 介.....	(315)
---------------	-------

6. 2	基本理论	(315)
6. 2. 1	制作全息图	(315)
6. 2. 2	再现过程	(316)
6. 2. 3	载波频率 (离轴参考光) 技术	(316)
6. 2. 4	同轴全息	(318)
6. 2. 5	离轴全息和同轴全息	(319)
6. 2. 6	波带片观点	(319)
6. 3	三维记录介质中的全息图	(321)
6. 3. 1	布拉格衍射	(321)
6. 3. 2	衍射光的带宽	(322)
6. 4	全息摄影的记录材料	(322)
6. 5	位相共轭	(323)
6. 6	全息干涉测量	(324)
6. 6. 1	概 念	(324)
6. 6. 2	理 论	(325)
6. 6. 3	振动 (时间 - 平均) 全息	(326)
6. 6. 4	二次曝光全息	(327)
6. 6. 5	实时全息干涉测量	(327)
6. 7	复数空间滤波	(327)
6. 7. 1	全息复数空间滤波器的构造	(327)
6. 7. 2	匹配滤波器	(329)
6. 8	全息光学元件	(329)
6. 9	显示全息	(330)
6. 9. 1	Dunisyuk 全息	(330)
6. 9. 2	Benton 全息	(331)
6. 9. 3	Benton 全息的设计因素	(331)
6. 9. 4	复合全息	(332)
6. 10	总 结	(333)

第 7 章 视觉耦合系统的设计考虑

7. 1	引 言	(335)
7. 2	系统概述	(335)
7. 3	子系统的详细描述	(336)
7. 3. 1	分辨率	(337)
7. 3. 2	前视红外仪	(337)
7. 3. 3	装配在头盔上的显示器	(339)
7. 3. 4	装配在头盔上的观察系统	(346)
7. 4	其它设计问题和考虑	(346)
7. 5	总 结	(347)

第一章 非常规成像系统

1.1 引言

1.2~1.7 节包罗了以下几种非常规成像系统:恒星斑纹干涉测量法、孔径面干涉测量法、被动相干距离-角度成像、非成像激光斑纹模式成像、光学距离-多谱勒成像及用于补偿成像的激光导航星自适应光学。

1.2 恒星斑纹干涉测量法

利用光学干涉测量法确定天体的空间结构最早是由 Fizeau 于 1868 年提出的^[1]。在现代术语中,恒星干涉仪测量照射在地球上光的空间相干性及物体的发光强度(或如直径之类的参数)是用 van Cittert Zernike 理论计算的^[2]。Fizeau 提出的方法导致了特定的长基线干涉仪的发展;Michelson 恒星干涉仪^[3,4]直接采用了 Fizeau 法(振幅相干法),而 Hanbury Brown 和 Twiss 强度干涉仪^[5]可测量热源的空间相干函数模的平方根。

直至最近,单个的光学望远镜仍应用于常规的(非干涉的)方式,由于大气扰动或能见度的出现,其空间分辨率限制在近似 1arcsec。1970 年,Labeyrie^[6]发明了恒星斑纹干涉技术,用这项技术,从单个大口径的望远镜可获得衍射限的分辨率,无论能见度怎样,根据瑞利准则,波长为 λ 、口径为 D 的望远镜的衍射限分辨角 $\Delta\alpha$ 可表示为:

$$\Delta\alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D}^* \quad (1.1)$$

对于 4m 的望远镜,当 $\lambda = 400\text{nm}$ 时,分辨角近似为 $0.025''$ 。Labeyrie 及其合作者于 1972 年最先公布了实验结果^[7],之后又有近 1150 篇关于斑纹干涉测量法的论文发表^[8]。

Labeyrie 的重大贡献是认识到在一个大型望远镜的焦点处形成的斑纹,其角度尺寸取决于衍射,即其最小尺寸由公式(1.1)给出。有关天体的衍射限信息可用适当减少数据的方法从短时间曝光和窄波带的图像中提取出来。

恒星斑纹干涉测量法的基本原理在 1.2.1 节中以非数学术语的形式给出,然后在 1.2.2 节中对该技术作了详细的数学讨论。在天文学中,被观察的物体通常是微弱发光的,而且可观察的空间也很有限,因此信噪比的问题很重要,1.2.3 节对此作了评价。1.2.4 节讨论了利用斑纹数据找到天体图像(或分布图)的问题。这是需要理论工作者和观察者共同参与的领域。1.2.5 节描述了完成斑纹干涉测量法的装置,其中包括对一维红外斑纹干涉测量技术的讨论,这一技术近年来被证明是富有成果的。最后,对用斑纹干涉测量法得到的天文应用上的结果作了一个简短的小结——涉及从小行星到类星体和超新星的测量。

* 公式(1.1)中, λ 和 D 取相同量纲, $\Delta\alpha$ 的量纲为弧度——译校者。

1.2.1 基本理论

图 1.1 示出了在曝光时间为 10^{-2} s, 滤光片带宽为 10nm 的大型望远镜下一个不可分辨的(点)和一个可分辨星体的高倍放大图像。在点源情况下(图中上一行), 图像呈斑纹状结构, 并且发现作为普通的激光斑纹图样, 斑纹最小尺寸与望远镜的爱里圆斑具有相同量级的振幅。长时间曝光图像是许多短时间曝光图像的简单相加, 每幅具有斑纹结构的短时间曝光图像在细节上有所差异, 所以, 在好的能见度下, 其强度光滑分布直径一般为 $1.0''$ 。点源及图 1.1 所示的可分辨星体的长时间曝光图像之间显示出很少的差异(如果有的话)。另一方面, 在 400nm 的平均波长, 4m 望远镜的最小斑纹尺寸约为 $0.025''$ 。通过从短时间曝光图像中正确地提取信息, 有可能观察小至衍射限的细节, 并且不局限于常规图像 $1.0''$ 的分辨率。

对于一颗不可分辨的星体, 两颗相互分离的双星体及一颗可分辨的星体(表示成被均匀照明的圆盘), 描述基本方法的一种实验室模拟如图 1.2 所示。摄取了大量短时间曝光记录, 而每份记录都是不同大气条件下, 典型的样例如图中 B 行所示。对于双星体, 每个星体都形成一个同样的斑纹图案(假设等晕且忽略了光子噪声); 在有利的环境下, 在每幅短曝光的图像上都可看到双斑纹效应。各星体的光学衍射图案或傅里叶变换的模平方的典型短时间曝光记录如图中 C 行所示。单次记录信噪比(SNR)比较低, 将许多这样的衍射图案相加, 可以提高信噪比(图中 D 行)。不可分辨的星体有相对较大的衍射双星体可得到周期与其分离间距成反比的周期性条纹, 可分辨星体得出的衍射晕圈, 其直径与星体本身的直径成反比。对每个全体平均的衍射图案作进一步傅里叶变换, 可得到每个星体的衍射限图像的平均空间(或角度)自相关(图中 E 行)。

斑纹干涉测量法这一术语为 Gezari, Labeyrie 和 Stachnik 所采用^[7]。实际上, 干涉仪是这样一种望远镜: 来自瞳径的所有光传播到像面上, 在像面上发生干涉而形成斑纹图案。恒星干涉测量法的其它形式中, 瞳径上的光以不同的方式汇集, 例如用一个旋转切变干涉仪来实现。斑纹技术的完美在于这种干涉仪(即望远镜)已经被设计成所要求的容差。

1.2.2 斑纹干涉测量法的理论

1.2.2.1 理论概要

假定物体的角度扩展不太大, 对于每次短时间曝光记录, 通常的准单色、等晕的公式仍适用*:

* 在这篇论文中, 选取角度(α, β)为物面和像面的坐标, 其傅里叶变换面上的坐标为角频率(arcsec^{-1})——译者注。

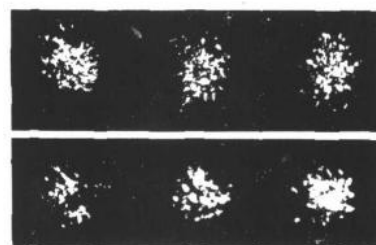


图 1.1 用 4m 望远镜获取的未被分离的点源(图中上一行)和已分离的恒星 α -Orionis(图中下一行)的短时间曝光照片, 曝光时间和滤光片带宽分别是 10^{-2} s 和 10nm

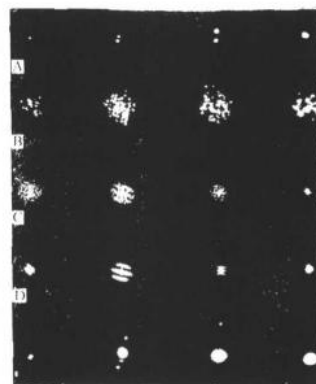


图 1.2 恒星斑纹干涉测量法原理的实验室仿真:(A)星体,(B)典型的短时间曝光照片,(C)B 行的衍射图案,(D)20 幅衍射图案之和,(E)D 行的衍射图案

$$I(\alpha, \beta) = \iint_{-\infty}^{\infty} O(\alpha', \beta') P(\alpha - \alpha', \beta - \beta') d\alpha' d\beta'$$

或者表示为:

$$I(\alpha, \beta) = O(\alpha, \beta) \otimes P(\alpha, \beta) \quad (1.2)$$

式中 $I(\alpha, \beta)$ 是瞬间图像强度, 它是角度 (α, β) 的函数; $O(\alpha, \beta)$ 是物体强度; $P(\alpha, \beta)$ 是归一化为单位体积的大气/望远镜系统的瞬时点扩散函数, $\otimes$ 表示卷积。

正如 1.2.1 节所证明的, 分析这些数据可用两种等效的方法进行, 可求出图像的角自相关函数在角域或空域的全体平均, 它可定义为:

$$C_I(\alpha, \beta) \equiv \left\langle \iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha', \beta') I(\alpha' + \alpha, \beta' + \beta) d\alpha' d\beta' \right\rangle$$

或表示为:

$$C_I(\alpha, \beta) \equiv \langle I(\alpha, \beta) * I(\alpha, \beta) \rangle \quad (1.3)$$

式中 $*$ 代表角的自相关。联合公式(1.2)和(1.3)可求出物体和图像的自相关函数之间的关系式:

$$C_I(\alpha, \beta) \equiv C_O(\alpha, \beta) \otimes \langle P(\alpha, \beta) * P(\alpha, \beta) \rangle \quad (1.4)$$

式中 $C_O(\alpha, \beta)$ 是物体强度的角自相关函数。请注意公式(1.4)中物体和图像的自相关函数在形式上与公式(1.2)中物体和图像的强度很相似, 但它对于脉冲响应却等于 $\langle P(\alpha, \beta) * P(\alpha, \beta) \rangle$ 。

在角度(或空间)频域, 可求出图像强度傅里叶变换模的平方的平均。正确地说叫作平均能量谱^{*}:

$$\Phi_I(u, v) \equiv \langle |i(u, v)|^2 \rangle \quad (1.5)$$

其中:

$$i(u, v) \equiv \iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta) \exp[-2\pi i(u\alpha + v\beta)] d\alpha d\beta \quad (1.6)$$

联解公式(1.2)和(1.5)、(1.6)可得到图像能量谱 $\Phi_I(u, v)$ 和物体能量谱 $\Phi_O(u, v)$ 之间的简单关系式:

$$\Phi_I(u, v) = \Phi_O(u, v) \cdot \mathcal{T}(u, v) \quad (1.7)$$

* 函数的能量谱等于其傅里叶变换模的平方。如果这个函数是表示一个可积分非稳定的随机过程, 那么公式(1.5)可定义为一个全体平均的能量谱。一个稳定随机过程的函数没有傅里叶变换, 但是可根据广义的傅里叶变换定义功率谱^[9]。