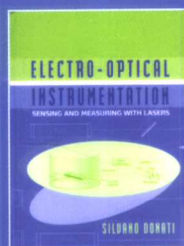


光电仪器：激光传感与测量

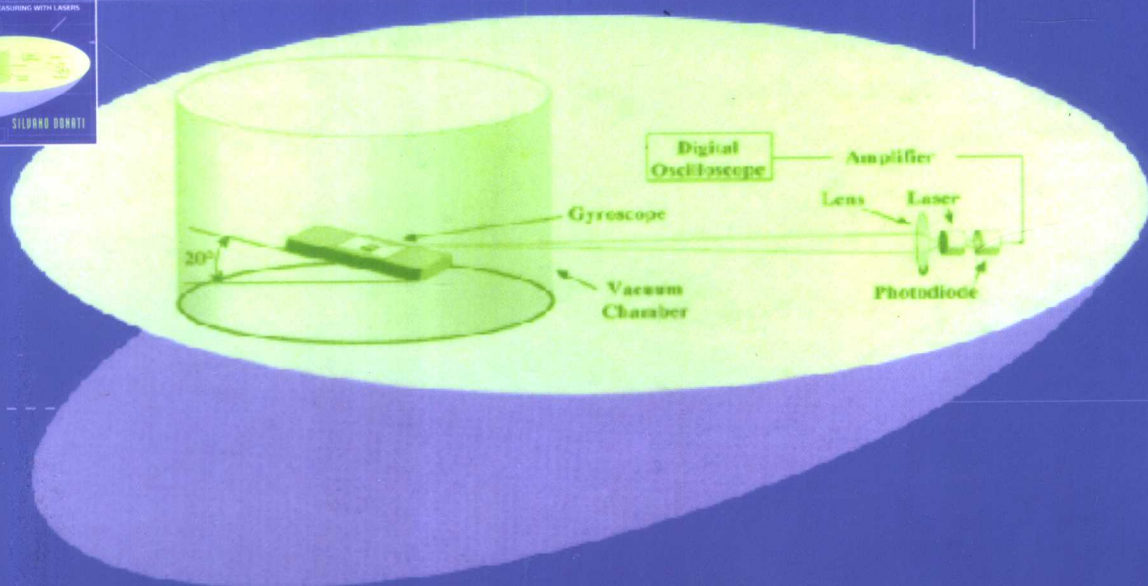
Electro-Optical Instrumentation Sensing and Measuring with Lasers

〔意〕西尔瓦诺·多纳特 著

赵宏 王昭 杨玉孝 姜涛 译



LASER



PD

PD

LASER



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



 国外名校最新教材精选

Electro - Optical Instrumentation
Sensing and Measuring with Lasers

光电仪器：激光传感与测量

〔意〕 西尔瓦诺·多纳特 著

Silvano Donati
University of Pavia

赵宏 王昭 杨玉孝 姜涛 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

内容提要

本书系统全面地介绍了激光仪器在科学技术、工业技术如汽车及航空电子方面的应用,同时对这些仪器的实际应用提出了明确的设计原理和有益建议。全书共分8章,涉及内容有:亚微米位移测量的干涉仪;纳米级振动测量仪和结构完整性检测;用于液体流速测量的多普勒测速仪;测距与防撞系统;线直径和微粒直径的非接触测量;对准和水平仪装置;环状激光陀螺仪和光纤陀螺仪;光纤传感器等。

本书内容详尽,易于理解,可作为光电仪器专业的本科高年级学生和研究生教材,也可作为从事设计光电仪器系统的科技人员以及相关人员的参考书。

Authorized translation from the English language edition, entitled Electro-Optical Instrumentation: Sensing and Measuring with Lasers, 1st Edition,

ISBN:0-13-061610-9 by Silvano Donati, published by Pearson Education, Inc. publishing as Prentice Hall, Copyright © 2004 Pearson Education Asia Ltd.

All Rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education Inc.

Simplified Chinese edition published by Pearson Education Asia Limited and Xi'an Jiaotong University Press Copyright © 2006

This Edition is authorized for sale and distribution in the People's Republic of China exclusively (except Taiwan, Hong Kong SAR and Macao SAR).

本书封面贴有 Pearson Education 出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2005-004号

图书在版编目(CIP)数据

光电仪器:激光传感与测量/(意)多纳特(Donati, S.)著;
赵宏等译. —西安:西安交通大学出版社,2006.2

书名原文, Electro-Optical Instrumentation Sensing and
Measuring with lasers

ISBN 7-5605-2096-0

I. 光... II. ①多... ②赵... III. 光电仪器 IV. TH89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 002798 号

书 名:光电仪器:激光传感与测量

著 者:[意]西尔瓦诺·多纳特

译 校 者:赵宏 王昭 杨玉孝 姜涛

出版发行:西安交通大学出版社

地 址:西安市兴庆南路25号(邮编:710049)

电 话:(029)82668357 82667874(发行部)

(029)82668315 82669096(总编办)

电子邮件:xjtupress@163.com

印 刷:西安交通大学印刷厂

字 数:513千字

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:21.375

印 次:2006年2月第1版 2006年2月第1次印刷

印 数:0 001~3 000

书 号:ISBN 7-5605-2096-0/TN·84

定 价:38.00元

版权所有 侵权必究

译者序

随着科学技术的发展,光学技术已渗透到科技、生产和生活的许多领域。尤其是以光电技术为核心的新技术正在推动着许多科技革命,推动着国民经济的发展,同时,也改变着人们的生产和生活。关于本书的指导思想、使用对象以及具体内容编排,作者在前言中已经做了详细的介绍,这里不作赘述。

本书作者 Silvano Donati 博士长期从事光电技术的应用研究,对激光测量仪器的原理和方法有很深刻的认识,并且积累了一整套开发和使用激光测量仪器的经验。该书不仅对测量仪器的原理进行了详细的描述,同时对有关影响测量精度的电路处理、操作方法以及仪器的校准调试等方面也做了细致的介绍,其中采用了大量的图形和图表来进行相关的解释,为了让读者易于理解,还插入了大量的与实际相关的例子和数据,作者宽广的知识面和用心细致,令译者钦佩。

本书第1章至第3章由姜涛翻译,第4章、第5章由赵宏翻译,第6章、第7章由杨玉孝翻译,其余章节均由王昭翻译。在本书的翻译过程中,得到了博士生朱永凯、张璐以及硕士生李晴晴、赵志华、苏磊、张博妮、曹立刚等的帮助,在此对他们表示诚挚的感谢。最后,还要特别向本书的责任编辑宗立文、赵丽萍表示衷心的感谢,没有他们的帮助和理解,本书将难以完成,同时,还要感谢鲍媛小姐为本书所做的工作。

原书中有少量的疏漏,在翻译过程中做了改动。另外,由于本书所涉及的知识范围很广,而且限于译者的水平和不可避免的主观片面性,翻译不当或表述不清之处在所难免。恳请广大读者及专家不吝指教,提出修改意见,我们将不胜感激。

译者

2006年2月于西安交通大学

前 言

本书是根据作者多年在 Pavia 大学的授课笔记整理而成的。该课程安排在电子工程专业的最后一年,也作为光电子工程学、仪表测量和微电子工程学的选修课。

在这些年里,我一直不断改进和扩充这个教材。这些涉及干涉仪、激光测距仪、图像仪和光纤传感器方面的新内容部分来自于文献,部分来源自我本人的研究成果。

光电子学是科学家们从传统的电子学、光学、激光物理和电磁学综合而成的交叉性很强的学科。

一些研究者可能把这本书的内容归结为激光测量、干涉技术、光电测量和光学计量等更多合适的名称。我认为光电测量仪能比较好地反映出这个领域本身的特点,在近些年中,我们已经看到了光和电之间的联系和将它们结合所带来的益处。

本书对正文和附录的内容做了合理的安排,所用的基本原理被列入正文,而补充说明其他学科的常识及基本检索则列入附录。

作者努力使下列传统规范用于本书:(1)说明了实际应用所依据的基本原理;(2)略述设计的指导思想;(3)讨论具体的技术性能和所达到的噪声极限。

本书尽量做到各个章节和附录的内容相对独立,以便使任何一章都可以独立成为一个短的课程。对于一个 35 学时的授课课程,它包含了书中的大部分内容。从基本思想到详述具体性能的限制,并给出了这些技术进一步发展的线索。对于这个课程,我还安排了 10 学时的实验和练习。在授课中,我通常是略过数学推导的细节和一些最困难的高级科目,但这些内容在书中都给予保留,因为它们诠释了光电测量仪的精粹,并且对于进一步的研究有着重要的作用。

根据我的经验,对于那些在光电子学方面知识较少的学生,最好先用 6 到 8 学时的时间来学习附录中的激光和光纤的基本知识,这样就能顺利地学习本课程。

在本书中,我尽量把详细的数学推导减少到最低限度,取而代之的是很直接的推导;为了简洁,我尽量将等式安排在一行上,以便节约宝贵的印刷空间,读者对这样安排最初看起来有些奇怪,但会很容易熟悉它的。

本书的重点是用发展的观点来完全理解基本原理,与同类书比较,读者可以发现,书中有许多信号处理的电路图,并且讨论了实际器件的影响,以及对最终性能限制进行了评价。这正是我认为电子工程师所应掌握的。一般读者也能从本书中掌握如何处理测量仪器的工程问题。

本书目前不包含习题。在本书出版后的几个月里,将在网站上公布习题(ele.unipv.it/~donati)。如果教师选定此书为教材的话,在该网站上还可以找到用 PowerPoint 做的视图。

从课程授课笔记的整理开始到本书的出版,得到了许多人的帮助,在这里我要特别感谢 Tiziana Tambosso,感谢他对本书中论据的形成所提供的帮助以及许多很好的建议。

另外,还要感谢 Risto Myllyla, Gordon Day, Peter deGroot, Jesse S. Greever 和 Thierry

Bosch 审阅手稿并提供了意见。

我希望这本书能对工作在光电测量领域中的年轻人有指导作用。如果这本书能激发出一些新思想或者能产生出一些新仪器,那将对我的付出是一种最好的回报。

Silvano Donati

Pavia, December 2003

Ele. unipv. it/~donati

目 录

译者序

前言

第 1 章 引言	(1)
1.1 回顾	(1)
参考文献	(7)
第 2 章 定位、定向和测量大小的仪器	(9)
2.1 准直	(9)
2.2 定位与跟踪	(12)
2.2.1 象限光电二极管	(12)
2.2.2 位置识别探测器	(15)
2.2.3 光栅位置传感器	(17)
2.3 激光水准仪	(19)
2.4 线径测量传感器	(21)
2.5 颗粒尺寸的测量	(23)
参考文献	(29)
第 3 章 激光测距仪	(30)
3.1 三角测量	(31)
3.2 光行经时间式测距仪	(33)
3.2.1 功率的预算	(33)
3.2.2 系统等式	(35)
3.2.3 脉冲式测距仪的精度	(38)
3.2.3.1 时域信号的最佳滤波	(42)
3.2.4 正弦波式测距仪的精度	(45)
3.2.5 不定性问题	(46)
3.2.6 固有的精度和标定	(48)
3.2.7 发射和接收光	(48)
3.3 测距仪的改进型仪器	(50)
3.3.1 脉冲式测距仪	(50)
3.3.1.1 基本脉冲发生器的改进	(52)
3.3.1.2 慢脉冲式脉冲测距仪	(53)
3.3.2 正弦波式测距仪	(56)
3.4 成像测距仪	(60)

3.5 脉冲激光雷达·····	(61)
参考文献·····	(66)
第4章 激光干涉测量 ·····	(68)
4.1 干涉测量应用概述·····	(69)
4.2 激光干涉仪·····	(71)
4.2.1 双光束激光干涉仪·····	(71)
4.2.2 双频激光干涉仪·····	(77)
4.2.2.1 纳米级位移测量·····	(80)
4.2.3 激光干涉测量·····	(82)
4.2.3.1 多维测量·····	(82)
4.2.3.2 平面度测量·····	(83)
4.2.3.3 垂直度测量·····	(83)
4.2.3.4 漫反射目标的测量·····	(84)
4.3 性能参数·····	(85)
4.4 性能极限·····	(87)
4.4.1 量子噪声极限·····	(87)
4.4.2 时间相干性·····	(88)
4.4.3 空间相干与偏振状态·····	(90)
4.4.4 介质的色散·····	(90)
4.4.5 热相位误差·····	(91)
4.4.6 布朗运动·····	(91)
4.4.7 散斑相关误差·····	(91)
4.5 干涉仪的输出(结构)形式·····	(93)
4.5.1 内结构式·····	(93)
4.5.2 回射式结构·····	(96)
4.5.2.1 弱反馈状态下的回射分析·····	(97)
4.5.2.2 回射式干涉仪的带宽和噪声·····	(98)
4.5.2.3 He-Ne 回射式干涉仪·····	(100)
4.5.2.4 中等水平的回射分析·····	(102)
4.5.2.5 三反射镜方式分析·····	(103)
4.5.2.6 Lang-Kobayashi 等式分析·····	(105)
4.5.2.7 半导体激光回射式干涉仪·····	(107)
4.6 激光测振仪·····	(109)
4.6.1 短距离测振仪·····	(110)
4.6.1.1 高频条纹跟踪·····	(112)
4.6.2 中距离测振仪·····	(113)
4.6.2.1 条纹稳定型回射式测振仪·····	(113)
4.6.2.2 一种普通的回射式测振仪·····	(116)
4.6.3 远距离测振仪·····	(117)

4.7 回射式干涉仪的其他应用	(123)
4.7.1 绝对距离测量	(123)
4.7.2 角度测量	(125)
4.7.3 弱反射检测	(126)
4.8 白光干涉仪	(130)
4.8.1 轮廓测量的应用	(132)
参考文献	(134)
第5章 散斑仪	(137)
5.1 散斑特性	(138)
5.1.1 概述	(138)
5.1.2 统计分析	(141)
5.1.3 允许的散斑尺寸	(145)
5.1.4 散斑统计特性的联合分布	(145)
5.1.5 散斑相位误差	(149)
5.1.6 目标移动产生的散斑误差	(150)
5.1.7 光束移动引起的散斑误差	(151)
5.1.8 变焦镜头引起的散斑误差	(151)
5.1.9 探测器的尺寸所引起的相位误差和散斑误差	(151)
5.2 单点干涉仪中的散斑	(152)
5.2.1 振动测量中的散斑	(152)
5.2.2 位移测量中的散斑	(153)
5.2.3 散斑相位误差校正问题	(159)
5.3 电子散斑干涉仪	(162)
参考文献	(168)
第6章 激光多普勒测速仪	(170)
6.1 工作原理	(170)
6.1.1 测速仪就是干涉仪	(172)
6.2 性能参数	(174)
6.2.1 相对误差衡量因子	(174)
6.2.2 多普勒频率的准确度	(174)
6.2.3 敏感区的尺寸	(175)
6.2.4 序列和位置误差	(176)
6.2.5 光子探测器的位置	(178)
6.2.6 方向识别	(179)
6.2.7 播种粒子	(180)
6.3 多普勒信号的电子学处理	(181)
6.3.1 时域处理法	(181)
6.3.2 频域处理法	(183)

6.4 光学结构	(185)
参考文献	(186)
第7章 陀螺仪	(187)
7.1 回顾	(187)
7.2 塞纳克效应	(191)
7.2.1 塞纳克效应和相对性	(192)
7.2.2 塞纳克相位信号和相位噪声	(193)
7.3 陀螺仪的基本结构	(196)
7.4 RLG 的发展	(200)
7.4.1 颤动式激光陀螺仪	(202)
7.4.2 环形 Zeeman 激光陀螺仪	(204)
7.4.3 RLG 性能	(207)
7.5 光纤陀螺仪的发展	(210)
7.5.1 开环光纤陀螺仪	(210)
7.5.2 对 FOG 部件的要求	(213)
7.5.2.1 相位调制器	(213)
7.5.2.2 光纤	(214)
7.5.2.3 偏振器	(215)
7.5.2.4 回向散射效应	(216)
7.5.2.5 光源	(216)
7.5.2.6 耦合器	(217)
7.5.2.7 接收器	(218)
7.5.2.8 残留误差	(218)
7.5.3 FOG 的补偿技术	(218)
7.5.4 闭环 FOG	(220)
7.6 谐振式 FOG 和其他方法	(223)
7.7 汽车自动化中的 3×3 FOG	(225)
7.8 MEMS 陀螺仪及其他方法	(227)
7.8.1 MEMS 陀螺仪	(229)
7.8.2 压电陀螺仪	(232)
参考文献	(233)
第8章 光纤传感器	(236)
8.1 引言	(236)
8.1.1 OFS 分类	(237)
8.1.2 OFS 概况	(237)
8.2 光学应变仪:一个研究例子	(239)
8.3 读出结构	(239)
8.3.1 强度读出	(240)

8.3.2 偏振读出	(249)
8.3.2.1 圆双折射读出	(249)
8.3.2.2 电流 OFS 的性能	(254)
8.3.2.3 线性双折射读出	(255)
8.3.2.4 复合双折射读出	(258)
8.3.2.5 外部调制型偏振计温度 OFS	(259)
8.3.3 干涉测量读出	(260)
8.3.3.1 被测量的相位响应度	(262)
8.3.3.2 干涉型 OFS 的实例	(262)
8.3.3.3 白光干涉型 OFS	(263)
8.3.3.4 相干辅助读出	(264)
8.4 多路复用式和分布式的 OFS	(266)
8.4.1 复用	(266)
8.4.2 分布式传感器	(269)
参考文献	(272)
附录 A0 术语	(274)
A0.1 响应度和灵敏度	(274)
A0.2 不确定性和分辨率	(275)
附录 A1 仪器中的激光器	(276)
A1.1 激光基础	(278)
A1.1.1 振荡条件	(279)
A1.1.2 相干	(280)
A1.1.3 He-Ne 激光器的类型	(281)
A1.2 He-Ne 激光的频率稳定	(284)
A1.2.1 频率参考和误差信号	(284)
A1.2.2 腔长的调节	(288)
A1.2.3 频率稳定性的最终限制	(289)
A1.2.4 He-Ne 激光器最终的评价	(289)
A1.3 半导体窄线和频率稳定的激光器	(290)
A1.3.1 半导体激光器的类型和参数	(290)
A1.3.2 稳频的半导体激光器	(294)
A1.4 二极管-泵浦、固态激光器	(295)
A1.5 激光安全问题	(298)
参考文献	(300)
附录 A2 基本的光学干涉仪	(301)
A2.1 结构和性能	(301)
A2.2 光学元件的选择	(305)
参考文献	(308)

附录 A3 大气传输	(309)
A3.1 混浊性	(309)
A3.2 湍流	(315)
参考文献	(317)
附录 A4 时间优化滤波器	(319)
参考文献	(320)
附录 A5 传播和衍射	(321)
A5.1 传播	(321)
A5.2 菲涅耳近似	(322)
A5.3 例子	(323)
参考文献	(326)
附录 A6 光电仪器的信息源	(327)
关于作者	(329)

第 1 章

引言

激光发明后的数年间,也就是 20 世纪的 60 年代中叶。当时激光作为一种具有无与伦比的性能的全新技术,在测量中的巨大潜力很快就被科学界所认识。与传统方法相比,它是一种崭新的方法。在 70 年代,许多成功应用激光的范例开始在仪器和传感器上出现,包括陀螺仪、激光干涉仪、脉冲测距仪和激光测速仪。这些仪器最初只是科学家们的一些想法,但通过以后几年的研究和发展,很快就变成了很好的工业产品。

起初,军事方面的应用对研究和发展有很大的推动作用,例如在系统平衡方面,激光就扮演了一个很重要的角色。在后来的几十年中,民用市场方面的应用也发展起来了,光电测量仪器才有了今天的地位。

人们关注的焦点转移了,从过去的设计思想转到了测量方法上,推动了光学和电子学的结合,并将这种新技术融入测量科学的框架中。

1.1 回顾

光电测量仪器的普及和发展之快是非常惊人的。

关于测距仪,我们也许能回忆起著名的实验——月球距离实验 LUnar Ranging Experiment(LURE)。这个实验是在 1969 年,由阿波罗 11 号的宇航员将一个 1m 见方的(三面直角)反射棱镜阵列带上月球(图 1-1)后实施的^[1]。

当时在地面上的几台天文望远镜要将经调 Q 的红宝石激光脉冲聚焦在这个反射棱镜阵列上。因为目标是不可见的,只知道这个反射棱镜阵列的月球坐标,所以这个任务是非常艰巨的。5 台望远镜中有 3 台的脉冲激光射中了目标,返回的信息少得可怜,只有 10 个光子返回。脉冲的延迟或称光飞行时间大约有 2 s,仪器测量的分辨率大约是纳秒数量级。这样,对于测量的 384 000 km 的距离,大约有 30 cm 的误差。

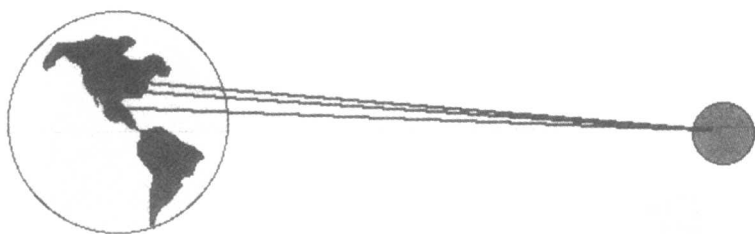


图 1-1 1969 年的月距实验(LURE)创造了长距离脉冲测量方法的记录,从地球到月球的基准直线距离为 384 000 km

对于早期激光环绕实验,它不仅仅是一个大的科技展示,它还是现代地球-卫星测距仪网络的先驱,现在用激光测距仪进行的长距离测量,已经成为在大地测量中的常规和强有力的工具。

这个实验,基于 Nd:YAG 调 Q 开关的激光和 CO₂ 激光束在雾天较好的透过率,打开了机载测距仪和测高仪的道路(图 1-2)。最近的仪器使用了小型半导体激光器的测距仪,它可以安装在汽车的前灯内部(图 1-3)^[2]。

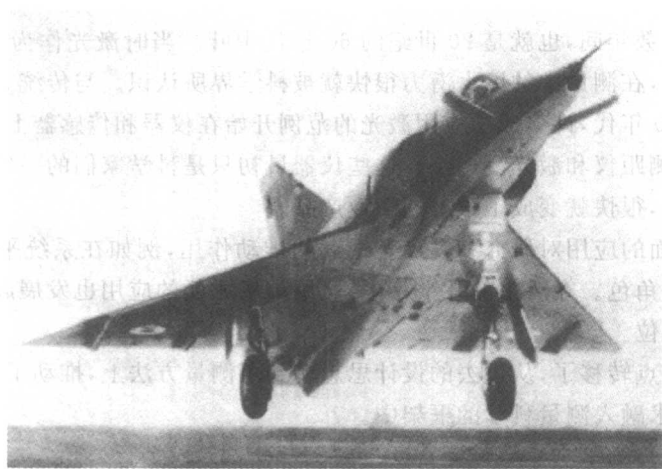


图 1-2 自从 1970 年起,装有调 Q 式固体激光器的脉冲式测距仪已经被安装在军用飞机上

这种用在汽车防碰撞系统内的测距仪已经作为一种标准的产品出售了,2004 年有望推出自动导向系统,这些不再是科幻小说中的梦想,它已经是被推进的科学技术了。

1970 年研制的正弦波式的激光二极管测距仪,现在已经在建筑领域中得到了广泛的应用,这标志着经纬仪和一些测量尺已经被淘汰(图 1-4)^[3]。

从早期概念直接发展而成的地形测距仪,在几百到几千米的测量中,有 1 cm 的误差。其年销售额达到 2 亿美元。

1997 年,在“火星探测器”上发扬和光大了月距测量实验,它是一个火星卫星,在它上面用了一个激光测高计(MOLA),这项技术应用令人振奋,它环绕红色星球超过一年的运行中收集了大量的火星表面的高度数据。

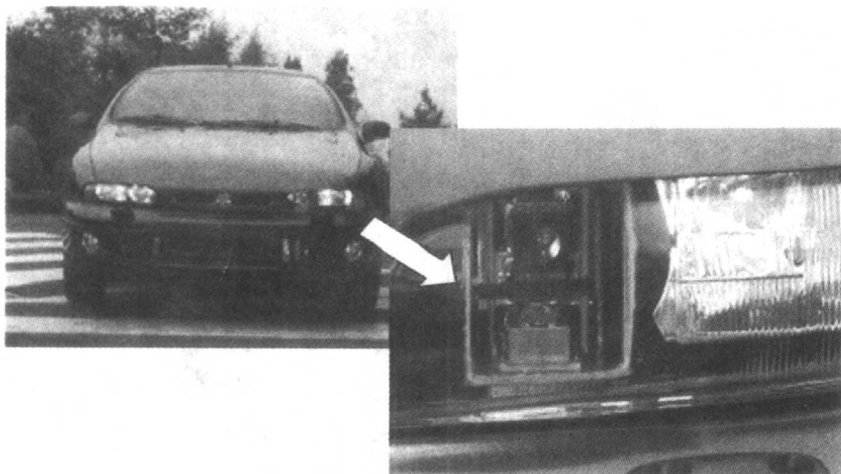


图 1-3 半导体二极管激光器式的小型测距仪。作为防碰撞系统的传感器,近年来它已经进入汽车行业(在意大利的都灵菲亚特汽车公司被允许拍到的照片)



图 1-4 在 1970 年初,正弦波式测距仪已经替代了军用工程领域中的经纬仪,它能直接测量几百米的距离,它有厘米数量级的分辨率

图 1-5 是这个测高计 MOLA 向地球发回的令人惊喜的火星地形照片,这张照片是从平均 400 km 距离的火星表面发回的,像素大小为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$,高度的精度是 10 m ^[5]。这个“火星探测器”上安装的测距仪是以 Cr 二极管激光泵、调 Q 的 Nd:YAG 激光器为光源,提供 8 ns 的脉冲,重复频率为 10 Hz。接收器是一个直径为 50 cm 的望远镜,末端有一个硅光电倍增管的探测器和一个带宽为 2 ns 的滤波器,用来防止太阳的背景影响。

与星球测距仪类似,有许多激光测距仪的观察站(LRO)已在世界各地建立,用来测量地球轨道上的卫星。其中,Matera(LRO)^[6]的时间精度已经达到 25 ps,大约是 3 mm 的精度。

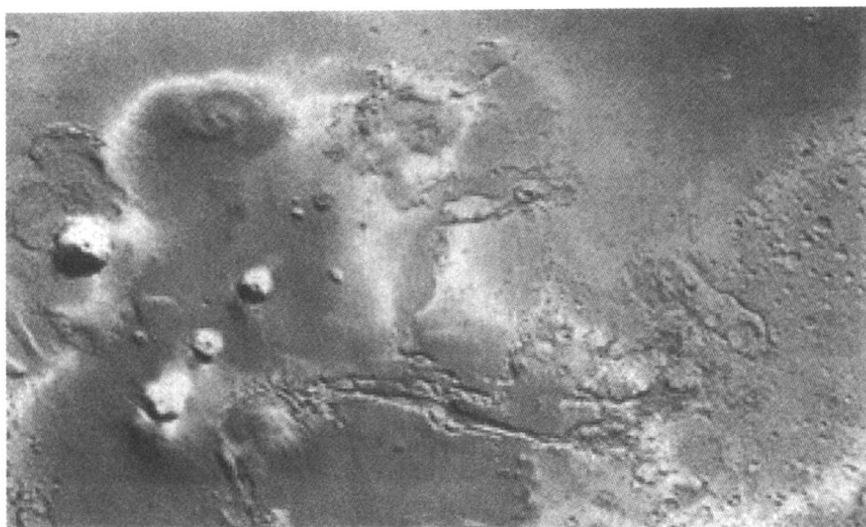


图 1-5 由 MOLA 轨道测距仪提供的火星地形图。它的测量精度是 100 m, 高度精度是 10 m(经 MOLA 科研组允许发表)

激光识别和测距仪(LIDAR 见 3.5 节)是基于测距仪的另一个翻版。这种仪器也属于脉冲测距仪,但它的光源是一个波长可调的激光器;通过接收从大气中返回的反射波,对不同的图像进行分析(DIAL, CARS 等),从而能够测量大气污染浓度。借助于污染物浓度测量的距离分辨图像,可以测到 10 亿分之一的污染浓度(图 1-6)。

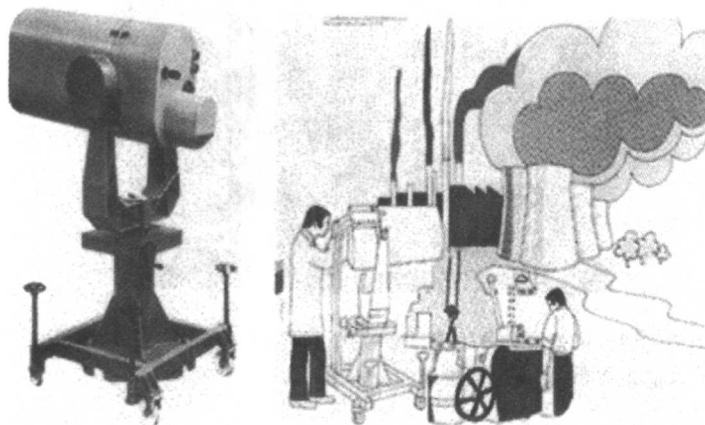


图 1-6 LIDAR 脉冲测距仪。它的光源是一个波长可调的激光器,在不同的波长下,可通过对大气的返回波的分析,测量出 10 亿分之一的污染物并且得到距离分辨图像([7], 经英国的 Ferranti 允许发表)

在科学和工业中的另一个巨大成就,就是激光陀螺仪。早在 1962 年,在 He-Na 激光器发明后的一年中,激光陀螺的概念就被提出了。实验是在 Sperry Corp 实验室进行的,它是由 1 个四边各长 1 m 的 He-Na 激光器组成的一个环型装置,可以测量地球的旋转率($15^\circ/\text{h}$)

(见图 1-7)。这是个令人鼓舞的开端,自此激光陀螺仪开始了漫长且充满艰辛的研发,其中包括难以克服的闭锁效应。

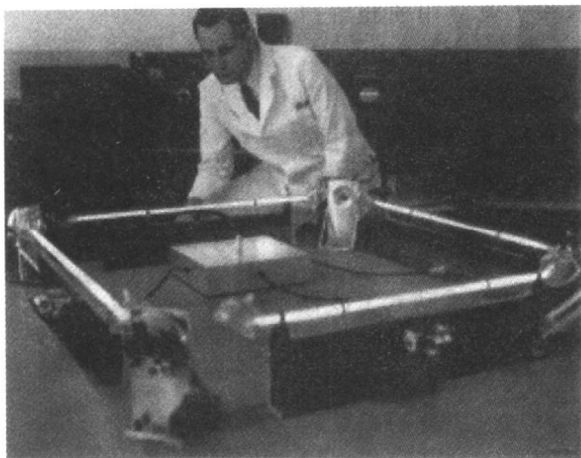


图 1-7 早期的塞纳克(Sagnac)效应演示,由 He-Na 激光器组成的环型装置。1962 年由 Macek of Sperry Corp 提供([9],经[IEEE] 允许发表)

在世界范围内,经过科学团体的研究努力,仅用了十几年的时间,大大推动了技术的最终发展,形成了精度可达 $0.001^\circ/\text{h}$ 的现代尖端环形激光陀螺仪(RLG)。自 1980 年以来,这个装置(图 1-8)已经被用在几乎所有的民航制造业中,成为当今民航班机的嵌入式导航系统(INUs)的心脏部分。这个一个边长大约为 25.4 cm 的电子装置,造价可达 150 万美元。这个装置可以在飞机飞行了几小时以后确定其位置,精度为 1.6 km。

直至今日对激光陀螺仪的研究始终没有停止,自从 1978 年单模光纤产生以来,光纤激光陀螺仪(FOG)的技术就被提出来并开始研究这项技术。它的目标是要使得产品的重量较轻,廉价和可靠,它主要是被用在空间技术中。

又经过了十几年的研究,这种新方法有了改进。到 1990 年的时候,如图 1-9 所示的产品已经被安放在通讯卫星上,作卫星姿态的调整和军事方面的应用。由于这个装置(FOG)的价格低廉,它也开始试图用在汽车工业中的汽车“导航”系统中(图 1-10)。不过,这个装置(FOG)的价格问题仍然是一个主要的矛盾,尽管科学家们努力研究使价格进一步降低,但这个装置(FOG)太复杂了,还是满足不了人们对价格的要求。

因为汽车市场很大,所以科学家们一直在不断努力研究,把微波-光-机-电系统技术用在原来的光电陀螺中。在今后的几年中,它将是激光陀螺仪方面的又一个很大的可能突破。

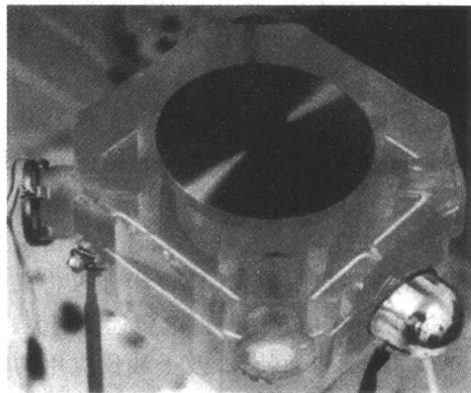


图 1-8 这是一个 10 cm 的环型激光陀螺仪,它是当今民航班机导航系统(INUs)的心脏([9],经[IEEE] 允许发表)