

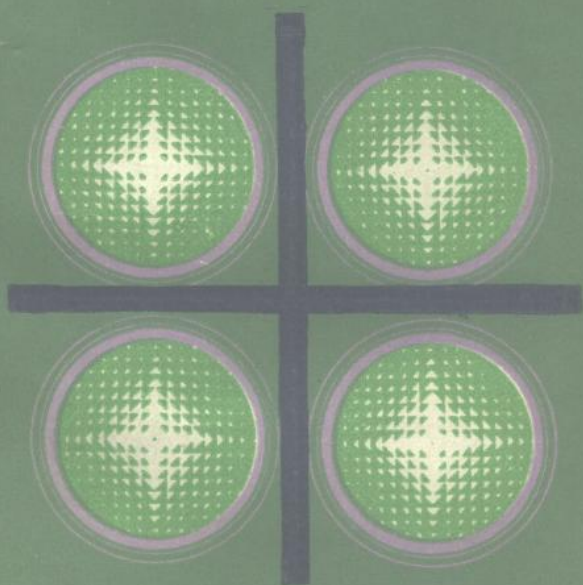
激光測量系統

JIGUANG CEBIANG XITONG

〔苏〕A. C. 巴特拉柯夫等著

张华忠 译

姚建铨 校



電子工業出版社

73.771
127

激光测量系统

[苏] A.C.巴特拉柯夫等著
张华忠 译 姚建铨 校



电子工业出版社

3910319

103/02

内 容 简 介

本书是国外新近出版的论述激光测量系统的专著。书中详细讨论了精确记录直线位移、角位移、速度和加速度等的激光测量系统的物理基础和制作原理。书中着重论述了测量系统的精确度特性、提高激光通信系统工作效率的方法以及激光测量系统特性的工程计算方法和最佳化方法。此外,对很有应用前景的激光元件的非传统工作状态也作了扼要介绍。

本书可供从事无线电、光学、计量工作的工程技术人员和系统工程设计人员以及无线电技术、光学和仪器制造专业的高年级学生和研究生参考。

激 光 测 量 系 统

(苏) A. C. 巴特拉柯夫等著

张华忠 译

姚建铨 校

责任编辑 连潮东

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

北京燕山印刷厂印刷

电子工业出版社发行 各地新华书店销售

*

开本850×1168 1/32 印张 15.25 字数 409千字

1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数: 2000册 定价: 6.90元

ISBN 7-5053-0108-X/TN134

译者序

本书系根据1981年苏联出版的《ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ》一书翻译而成。

自1960年第一台固体激光器（红宝石激光器）问世以来，仅20多年，激光已在工业、农业、军事、医学及科学研究等各个领域中获得广泛应用，成为当代极为重要的新兴科学技术之一。

到目前为止，围绕各类激光器的研制、激光的检测和接收以及激光的应用等论题，国内外已先后出版过多种书籍。然而，专门论述激光测量系统的书籍则还不多见，本书便是相当全面而系统地论述这个问题的最新专著。

本书系由苏联几位著名激光专家分工撰写而成。书中对几种常用的激光测量系统（包括激光通信系统、测角、测距、测位移、测加速度和全息干涉测量系统等）的工作原理、技术特性的工程计算方法、系统的应用范围及发展前景做了详细介绍，评价了各类系统的优缺点，并指出了一些尚待解决的潜在问题。

本书的最大特点是内容详尽、取材丰富、叙述严谨而富有启发性。通过阅读本书，可以对各类激光测量系统的特点有较全面的了解，对实际工作有一定的指导意义。

应当指出的是，由于本书由多位作者分工写成，故书中名词术语的运用不尽统一，给翻译工作带来不少困难。尽管译者在翻译过程中注意到这个问题并力求使之统一，但遗误之处仍

在所难免，敬请读者阅读时明察。

承蒙天津大学激光教研室姚建铨教授细心校对了本书的译文，在此，译者谨向他表示衷心的感谢。

鉴于本书涉及的专业范围甚广，译者水平有限，译文中的缺点和错误一定不少，切望读者不吝指正。

译者

原 序

相干光辐射的独特性质，决定了激光方法和激光设备的高速发展以及在国民经济各个部门中的实际应用。将激光辐射聚焦成尺寸极小的光斑，可以获得高的功率密度，为制造工程设备和开拓新的领域——激光工艺学奠定了基础。激光工艺学已经取得了显著成就。在苏联和国外，已安排生产用于材料的焊接、切割和线度加工的工业设备以及用于无线电仪器零部件的制造、装配和调试的工业设备。因此，在国内外的出版物中，有关激光工艺学的大量问题很自然地得到了足够全面的反映。

在用相干光通信信道来传输信息方面，也取得了重大理论成果和重要的实际结果。相干光通信信道能在一个光载频上传输极大容量的信息，有高的辐射方向性，确保提高信息传输系统的抗干扰性、经济性和电磁兼容性。在光通信的理论方面，也发表了许多论述这个领域的现状和发展前景的著作。

除此之外，激光还成功地用于光学定位系统、激光大地测量和导航、计量学和地质勘探以及科学技术实验中。它们的共同之处就是测量目标的一定参数，物体在四维空间一时间簇中的坐标、物理场的特性。这些都表现在相干光场与目标相互作用之后，其信息参数的变化上。这样的系统总起来可称为激光测量系统。

不难看出，激光测量系统与激光信息传输系统有着根本的区别。事实上，如果说在光通信系统中信息源是处在发射机之前，并且信号在进入通信线路之前便载有特殊的信息，那么，

在绝大多数激光测量系统中，由发射机发射出的信号是没有携带测量信息，而是预先知道的时间的周期函数或伪随机函数，例如，光学定位、激光光谱学和多普勒定位就是这种情况。因此，在通信系统中已被充分研究和应用的方法，并不总能直接搬到激光测量系统上。

在实际利用激光测量系统方面，如今已取得了显著进展。这些进展溯源于基础科学研究的成就、工艺的完善以及对成批生产激光系统零部件的组织安排。此外，应当指出，专家们难以详细了解有关激光测量系统的发展情况，这是由于日益增多的有关这个领域的报导尚未在科技手册和专著中得到足够全面而系统的反映，只是在诸如激光陀螺仪、全息照相的应用这样一些个别方面才有论著，这些著作阐明了实际利用激光器来解决具体测量任务的理论问题与特点。因此，在本书中，作者旨在对有关激光测量系统的理论基础和构成原理的浩瀚资料进行搜集和综合。这些系统能记录下由于光波与被研究的各种不同性质的目标（人造地球卫星、液流或气流、声学振动、重力场等）相互作用而发生变化的光波场参数。

激光测量系统的构成原理和分析方法多种多样，要求我们对有关资料认真精选并加以系统化。在激光测量系统的理论中，精确度特性的研究占据中心地位。在激光测量系统发展的现阶段，分析可能达到的精度和实际精度、揭示在实际条件下对系统的极限精确度特性起限制作用的种种因素，寻求使精确度特性最佳化的途径等有着重要的意义。因此，书中首先说明提高激光测量系统的工作效率的问题。这个问题既可通过适当地选择系统的参数来解决，也可以通过使系统的结构和参数适应于随机不均匀性媒质的特性来解决。在多数情况下，随机不均匀性媒质将测量部分与研究目标分隔开来。

针对具体的激光测量系统类型来选择材料时，一方面，作者力图提供最普通的系统（如光学定位器、多普勒测速仪），同时将注意力集中到选择系统结构方案的特点及估计精确度特性（它能最全面地体现相干光场的特点）的方法；另一方面则指出一些非传统的测量方法和设备。在其它频段，有时还没有与之对应的方法和设备。因此，对激光加速度计、利用环形气体激光器的精密角位移和角速度测量仪、用于研究形变和振动的全息干涉仪以及对于测量系统很有应用前景的参量变频器也做了分析。

很自然，上列所有激光测量系统目前并非同样地得到了仔细研究。例如，在光学定位和测距、激光测角方面不仅提出相应测量仪的原理，而且用以制造测量仪的元件也已经研制出来，精密测距仪、动态测角仪也已成功地得到应用。激光加速度计现今虽然还只是处于实验研究的阶段，但是，就是在这个发展水平上，也还是令人信服地证明了激光加速度计的各种方案是很有前途的，而激光重力计已经取得的精确度特性则引起广大专家们的极大兴趣。最后，作者本身的学术兴趣，对材料的选择也有明显的影响，有几章就是根据他们的研究材料来编写的。

本书的内容大致可分为三个部分。第一部分（1、2章）研究了激光测量系统的构成原理，提出了考虑到大气扰动场的空间一时间统计特性时使用系统的可能方案以及适应光信号湍流畸变的方法。第二部分（3~9章）论述了激光测量系统的具体类型及其精确度特性的分析。第三部分（10、11章）研究了激光测量系统所用元件的改进问题。

激光测量系统正处在方兴未艾的阶段，在一系列最重要的科技领域中已占据牢固的地位。这个过程明显地表现出进一步

发展的趋势。在这种情况下，作者的任务并不是对所有现存的各种测量系统进行研究，因为在象激光测量技术这样迅速发展的领域中，对于那些在最近还不太成熟的系统就很难提出并加以说明。

目 录

译者序.....	v
原 序.....	ii
第一章 在有随机参数的信道中, 激光测量系统的工 作特点	1
1.1 问题的提出.....	1
1.2 空间分集激光测量系统组合体的数学模型.....	3
1.3 云层不均匀性场的模型及一次测量的概率特性.....	7
1.4 在云层场条件下, 采用激光测量系统组合体的效果分析.....	13
第二章 相干光学系统中的自适应法	20
2.1 自适应法的理论基础.....	20
2.2 相位畸变自适应补偿系统的效果.....	37
2.3 自适应雷达系统的构成原理.....	43
2.4 自适应系统的基本元件.....	47
2.5 自适应系统的实验研究和模拟结果.....	58
第三章 光学定位基础	68
3.1 光学定位系统的构成原理和应用范围.....	68
3.2 激光辐射源.....	78
3.3 脉冲激光辐射源工作状态的最佳化.....	86
3.4 连续工作状态的气体激光器的最高效率.....	93
3.5 激光辐射接收机.....	98
3.6 目标对光辐射的反射.....	105
3.7 光学定位系统接收信号的最佳方法.....	111

第四章	激光定位系统的改进和最佳化的基本方向	120
4.1	激光系统最佳化的一般原则	120
4.2	提高脉冲测距系统精度的途径	123
4.3	光学定位系统的能量特性	129
4.4	脉冲激光定位系统	132
4.5	改进连续辐射激光测距仪的基本方向	144
第五章	激光测速仪	153
5.1	相对论电动力学在分析多普勒测量系统中的应用	153
5.2	激光多普勒局部速度测量仪的分析	159
5.3	激光多普勒测速仪的光学傅里叶分析	164
5.4	激光多普勒测速仪的精确度特性	167
5.5	测速仪的实际系统	174
5.6	测量气流速度矢量各个分量的特点	178
5.7	多频激光多普勒测速仪的特点	182
5.8	用环形气体激光器测量气流速度	186
第六章	研究形变和振动的全息干涉仪	190
6.1	全息干涉测量术的原理	190
6.2	散射波的场结构对干涉图样形成过程的影响	201
6.3	全息干涉图的获得	212
6.4	全息干涉图的识别	219
第七章	激光加速度计	223
7.1	测量加速度的一般原理	223
7.2	激光加速度测量术的物理基础	226
7.3	光弹效应	229
7.4	利用光弹效应的加速度计的工作原理	234
7.5	频率型激光加速度计	237
7.6	单分量加速度计的偏振特性	242
7.7	频率型单分量加速度计的结构特点	248
7.8	激光重力计	255

第八章	激光陀螺定向	260
8.1	激光陀螺定向术的物理基础.....	260
8.2	确定真实子午线方向的方法.....	266
8.3	静态激光陀螺的基本方程.....	267
8.4	静态激光陀螺的基本误差分析.....	273
8.5	作用速度的估算.....	277
8.6	仪器误差的特点.....	281
8.7	静态激光陀螺敏感元件中所用环形气体激光器的选择.....	286
8.8	设计制造静态激光陀螺时, 确定一些基本要求的顺序.....	288
8.9	激光陀螺定向的动态法.....	291
第九章	角位移和角速度的记录	302
9.1	记录角位移的方法简介.....	302
9.2	测量角度的双频偏振法.....	305
9.3	利用环形气体激光器的测角原理.....	311
9.4	角度测量中, 环形气体激光器的潜在精度.....	314
9.5	环形气体激光器的输出特性.....	316
9.6	由环形气体激光器参数的起伏引起的测角误差.....	324
9.7	用环形气体激光器对测角误差进行实验研究.....	328
9.8	角度定位系统的误差.....	331
9.9	利用环形气体激光器来制造和检定离散型角度变换器.....	337
9.10	用于转速稳定的系统中的环形气体激光器.....	342
9.11	在惯性空间记录角速度的特点.....	348
9.12	有机平衡初始偏移的激光角速度测量仪.....	354
第十章	环形气体激光器的锁模工作状态	359
10.1	环形气体激光器在产生几个纵模状态下的工作特点.....	359
10.2	纵模锁定的方法.....	363
10.3	环形气体激光器中纵模锁定状态的物理基础.....	366
10.4	环形气体激光器在锁模状态下的多模振荡方程.....	372
10.5	调制器参数的选择.....	378

10.6 在环形气体激光器的谐振腔内放置调制器的特点.....	383
10.7 在纵模锁定状态下, 对环形气体激光器进行实验研究的方法.....	385
第十一章 参量变频器	396
11.1 被圆场激励的电控介质光学.....	396
11.2 各向异性媒质中的耦合波.....	402
11.3 变频状态.....	415
11.4 对参量变频晶体的电光常数张量诸分量提出的要求.....	425
11.5 变频器中所用晶体的分类.....	431
11.6 圆控制场激励的特点及实验研究结果.....	438
附录 描述参量变频过程的微分方程组的通解	449
参考文献	461

第一章 在有随机参数的信道中， 激光测量系统的工作特点

1.1 问题的提出

激光测量系统因其良好的精确度特性而拥有巨大的应用潜力，这种应用潜力在很大程度上受到光波在真实媒质（其中包括大气层）中传播条件的限制（图1.1）。

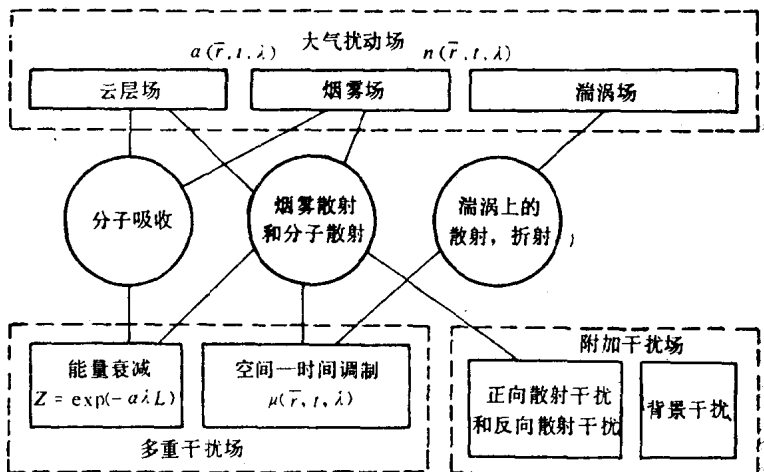


图1.1 大气扰动场的分类、大气扰动场与相干光场的互作用效应以及这时所产生的干扰的特点 [1]

云层不均匀性的屏蔽作用对光学测量信道的影响最大。云层不均匀性由衰减系数（每公里几十分贝或几百分贝）和大的空间尺度、大的时间尺度来表征^[2, 7]。内部空间尺度即云层和云层生成物的尺寸在 10m~10km 之间变化，而表征场范围的外部空间尺寸达几百甚至几千公里^[3~5]。云层不均匀性场的存在时间从几小时到几昼夜，而个别云层生成物的存在时间则从几十分钟到几百分钟^[5~7]。烟雾场的特点是对光的衰减以及空间尺度和时间尺度都相当小^[1]。

在不存在任何云层场和烟雾场的透明大气条件下，由光信号在各种尺寸的不均匀湍流上散射所产生的复合干扰具有决定性的影响。湍流不均匀性的内部尺寸 l 和外部尺寸 L 分别为 1mm 和 1~100m 左右。而尺寸可与 l 相比拟的不均匀性的存在时间达 1ms^[8, 9]。

大气的影晌极明显地表现在光信道内，例如，用于轨道测量和天文学测量、月球定位、解决校准和准直问题的宇宙—地球和地球—宇宙信道内^[10~13]。在这些信道内，利用激光测量系统需要考虑光波的传播特性。光波保证在观察者所处地平线上方的空间范围内与卫星实现光联系。假如除此之外还考虑因卫星移动的高速度而使测量一次的持续时间很短，以及由一个观测站进行测量的低精度，那么，采用分散在辽阔的领土上并形成测量网的一组激光测量系统就是十分自然的事情了。

因此，与靠选择波段来大大降低大气生成物的干扰作用的无线电工程宇宙测量网不同^[14]，采用激光测量系统的效果在很大程度上取决于两个因素：一是系统布置的几何形状和卫星的运动状态（这使激光测量系统与无线电工程测量仪相近）；二是大气场的统计特性。这些特性在对用于确定缓慢移动的目标（月球、同步卫星）位置的测量网的结构进行综合考虑时，起

着主要作用^[11, 12]。

提高激光测量系统的效能，应按大气不均匀性的尺度和不均匀场的空间—时间特性，分成两个结构等级来加以解决。

第一级使激光测量系统的结构适应于大气扰动^[15]或使扰动定向变化^[16]、选择测量系统的最佳参数、将光学测量仪和无线电测量仪进行组合^[13]。这一级在很大程度上反映了激光测量系统的特别性质，第二章中对此作了分析。

第二级是关键性的一级。这一级涉及到对与云层场随机结构和卫星运动状态呈最佳配合的激光测量系统组合体的空间—时间结构进行综合^[17]。激光测量系统组合体具有大型系统的全部特性，即工作的目标指向性和概率特性、对结构分等级、错综复杂的联系以及有可能适应外界条件^[18]。因此，应从系统工程的角度来解决激光测量系统组合体的分析与综合问题，并选择应用它们的适当方案。系统工程处理的基础是将所研究的系统（这里指激光测量系统组合体）用不同的抽象等级表示，以使用最简单的表示就能反映出系统的基本特性。为了对激光测量系统组合体的空间—时间结构进行综合，适当的作法是拟出组合体工作的一般模型和特殊模型。一般模型应包括特殊模型。特殊模型表征空间分集激光测量系统组合体工作的基本过程。

1.2 空间分集激光测量系统组合体的数学模型

在系统理论中，当给定复杂系统的输入和输出时，系统工作的一般抽象模型被视为集合系乘积的吉卡尔托夫（Декартов）关系^[19]：

$$S \subseteq X \times Y \quad (1.1)$$

式中 $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ 是由子集 X_i 组成的输入集合， Y 是输出系统的集合。

假如 S 是函数，则激光测量系统的组合体是表示抽象集合 X 映射到抽象集合 Y 的函数组，即 $S: X \rightarrow Y$ ，抽象集合映象使 Y 中的唯一元素与 X 中每一个元素 $x \in X$ 相对应。

论证激光测量系统组合体模型（对应于不同的峰状层）及选择由 (1.1) 式决定的初始集合，必须在计及激光测量系统和云层区特性的情况下，根据超体系所解决的任务来进行。

激光测量系统组合体可以表示成两级系统 S_1 、 S_2 的形式（图1.2），图中，上面的一级（测量组合体）是明确表示的空间—时间系统。所研究模型的特点，是在不同的结构等级上有不同尺度的不均匀性扰动模型。测量组合体系统的输入端是由与被考察目标互作用引起的信息光学场模型和大尺度云层场模型。

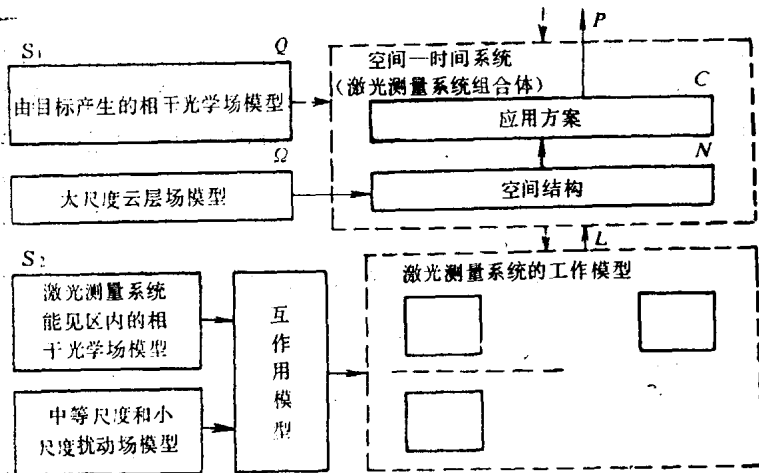


图1.2 激光测量系统组合体的一般模型