

В. П. 考隆凯维奇
〔苏〕 В. С. 萨波列夫 著
Ю. Н. 杜布尼晓夫

激光干涉量度学

科学出版社

44.307

内 容 简 介

本书阐述了激光干涉量度学的理论、方法和应用等方面的问题,介绍了激光位移干涉仪、激光重力测量系统、激光方向干涉仪和激光多普勒测速仪的原理与装置。该书还讨论了作为新的仪器、装置的物理理论基础,列举了新的干涉系统在科学和工业中的应用与结果。

本书可供科学实验和技术方面应用激光的科学工作者、工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

В. П. Коронкевич, В. С. Соболев, Ю. Н. Дубнищев

ЛАЗЕРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

«Наука», Новосибирск, 1983

激 光 干 涉 量 度 学

В. П. 考隆凯维奇

〔苏〕 В. С. 萨波列夫 著

Ю. Н. 杜布尼晓夫

陈彩廷 译

刘玉泉 校

责任编辑 刘海龄

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1988 年 10 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1988 年 10 月 第一次印刷 印张: 7 5/8

印数: 0001—4,100 字数: 168,000

ISBN 7-03-000065-X/ТВ·3

定价: 4.00 元

译 者 的 话

激光是一种高亮度的单色光,它有良好的时间相干性和空间相干性,因此,使用激光器作为光源能够显著改善干涉仪的性能。激光干涉量度学十几年来得到了蓬勃发展。

本书作者是苏联科学院西伯利亚分院自动学和电测学研究所的知名学者,他们在激光干涉量度学方面作了许多工作,发表了大量文章。

本书阐明激光干涉量度学的理论、方法和应用问题,叙述了激光位移干涉仪、激光重力测量系统、激光方向干涉仪和激光多普勒测速仪的原理和装置,讨论了作为新装置基础的物理原理。近代激光干涉仪的一个特点,是与微电子学和计算机相结合,本书也反映了这一状况。本书列举了新干涉系统在科学和工业中的应用结果。

本书可供在科学实验和技术方面应用激光的科学工作者、工程技术人员,以及大专院校有关专业师生参考。

序

激光干涉量度学方法广泛地用于科学实验和工业中。激光辐射的高度时间相干性和空间相干性，使我们有可能制造精密的非接触型仪器来解决与长度有关的物理量的一大类测量问题。用激光干涉仪研究机械运动——测定它的线位移、角位移、速度和加速度等这类参量——是特别富有成效的。

测定长度——基本物理量——的精度与物理科学的发展水平有关，并对工业技术的进步有极大的影响。激光辐射非常接近于理想的单色波，它的空间周期是检验物体大小的适当单位。

向读者推荐的这本专著总结了苏联科学院西伯利亚分院自动学与电测学研究所最近十年完成的研究结果。激光干涉量度学方法的发展与应用获得了重要的科学成就，并完成了一系列有实际意义的工作。流体动力学湍流产生过程的研究说明，层流-湍流过渡是有限数量的振动模的非线性相互作用的结果，而不是早先认为的无限数量的振动模受激发的结果。在重大的科学成果中，应当指出用激光重力计在地球上 25 个不同的地点测得的重力加速度值是稳定的。这些数据推翻了巴尔特-福盖尔 (Барт-Фогель) 关于地核相对地幔移动的假说。

在生产数控重型精密机床时，使用激光干涉仪可大大地缩短它们的校准、检测和调整的过程。西伯利亚重型机床与水压机厂的 HC33Φ2 型机床的制造工作可以作为一个例子。

我认为，干涉量度学的这些成就，是依靠激光器、微电子

• ▼ •

学和计算机等这些现代技术相结合而组成一个进行科学实验的统一的自动化系统而达到的。

本专著不包括现代激光干涉量度学的全部问题，其主要注意力集中于测量位移的干涉仪的制造原理及其应用的特点，并详细地分析了激光重力测量问题及提高测定重力加速度绝对值精度的方法。例如提出了激光多普勒风速测定法这样的非接触研究液流和气流的有前途的方向性的理论和实践方面的论点。

希望本书能向读者提供有关现代激光干涉量度学方面的知识，并给予从事于精密测量的实验者和专家有益的帮助。

责任编辑 科学院院士

Ю. Е. 涅斯捷里欣 (Нестерихин)

前 言

本专著阐述激光干涉量度学方法。激光干涉量度学属于应用光学和测量技术的蓬勃发展的领域,它无论在科学实验或工业技术中都有广阔的应用。书中在双光束干涉原理的基础上,分析了测量位移、速度、加速度和确定方向等激光方法。

用于测量物体长度和位置的位移干涉仪和方向干涉仪,在激光器出现之前已为大家所熟知。物体的长度是根据干涉光束的相位差(实际上是将被测线段与辐射源的波长相比较)来确定的;而物体的位置是根据干涉条纹的宽度和方向的变化来判断的。在激光器出现之前,这类仪器主要是用于物理实验和高精度度量学测量中。激光器从根本上改变了干涉仪的状况,并大大地扩展了它们的应用范围。

与经典干涉仪相比,激光干涉仪有以下基本特点:

1. 激光辐射的窄的光谱宽度决定了它具有高的相干长度,从而可以在程差超过数百米时观察到干涉现象,而较好的光谱灯将经典干涉仪的测量距离限制在一米以内。

2. 激光辐射的高度空间相干性,使得在制造干涉仪时能够得到高反差的干涉结构。激光束的横截面光场一般为高斯分布。众所周知,光束横截面的高斯分布与其它分布相比可保证具有最小的发散角。因而没有必要使用长焦距的入射和出射准直光管,从而将仪器的尺寸缩小了一个数量级以上,放宽了干涉仪光学元件的公差,并降低了对仪器的调整要求。激光辐射的良好方向性,使得在大多数干涉仪系统中可以不考虑对光源尺寸进行修正。

3. 由于入射孔径的尺寸小,因而我们能够制造在两臂中反射次数之差为奇数的激光干涉仪。与这种干涉仪相类似的是劳埃德 (Lloyd) 系统,其中干涉场是靠镜象倒置光束的干涉而形成的。具有倒置光瞳的干涉仪对光源相对于视准线的位移有灵敏的反应,可用于确定物体的位置。而在经典干涉量度学中,则尽量避免使用倒置光束的系统。

4. 信号的交流成分载有必要的信息,它的相位与干涉仪中的程差成正比。干涉背景,或信号的直流部分不含有有效信息,可在随后的处理中除去。为了抑制干涉背景和与背景有关的干扰,采用将信号频谱迁移至高频段的方法。信号频谱的迁移是现代激光干涉量度学的特点。这项程序简化了信号的处理,改善了信噪比,提高了测量干涉条纹分数部分的精度,可以消除湍流干扰的影响,并从根本上提高了仪器的可靠性。

5. 发明激光器之后,出现了测量速度的多普勒干涉仪,在经典干涉量度学中没有类似仪器。在这类干涉仪中用光学混频法确定在运动的散射中心的随机系综上衍射的光波的频谱结构。由于原理方案和使用特征不同,故将这类仪器划分为激光干涉量度学的一个独立的方面。

作者的目的在于包罗激光干涉量度学的各个方面,也无意叙述它的发展史和排列发明的优先权。书中没有包含多光束干涉量度学和全息干涉量度学方面的内容,也不讨论散斑干涉量度学问题。

作者向参与本书准备工作的下列同事们表示感谢: Г. П. Арнаут, Ю. Г. Стус, В. П. Кирьянов, Г. А. Ленкова, В. А. Ханов, В. В. Донцова, Ф. А. Журавль, Г. А. Кашеева, Н. Ф. Шмойлов, А. А. Столповский, Е. Н. Уткин, А. И. Жилевский, Ю. Г. Василенко, А. И. Скурлатов, Ф. И. Козюлин, В. И. Балацкова, Л. П. Филинченко.

目 录

译者的话	3
序	v
前言	vii
第一章 位移干涉仪	1
§ 1.1 激光位移干涉仪的制造原理	2
§ 1.2 位移干涉仪光学系统的特点	11
§ 1.3 相位调制的干涉仪 (ИПЛ-10)	21
§ 1.4 精度分析	32
§ 1.5 位移干涉仪的工业产品	38
第二章 激光重力测量学	51
§ 2.1 测量重力加速度绝对值的激光干涉仪	52
§ 2.2 测量误差分析	57
§ 2.3 激光重力计的测量结果	66
第三章 方向干涉仪	70
§ 3.1 反射次数不相等的干涉仪	71
§ 3.2 对称式干涉仪	80
第四章 测量速度的激光多普勒干涉仪	88
§ 4.1 激光多普勒干涉量度学原理	88
§ 4.2 激光多普勒干涉仪光信号的空间结构和频谱结构	104
§ 4.3 测量速度的激光多普勒干涉仪的光学系统	117
第五章 多普勒信号的统计特性	128
§ 5.1 多普勒电信号的结构	128
§ 5.2 多普勒信号的谱密度	137
§ 5.3 相位噪声分析	149
§ 5.4 多普勒信号的频率和振幅的统计学联系	156

§ 5.5 按多普勒信号的尖脉冲数目计算速度的可能精度	162
§ 5.6 梯度噪声的方差和谱密度	165
第六章 处理多普勒信号的方法和设备	171
§ 6.1 多普勒信号的频谱分析	172
§ 6.2 用光子-相关光谱学方法分析多普勒信号	176
§ 6.3 多普勒信号解调的脉冲-计数系统	183
§ 6.4 跟踪式滤波-解调器	189
§ 6.5 ЛАДО-1 型和 ЛАДО-2 型激光多普勒风速计	201
第七章 激光风速计的应用结果	210
§ 7.1 以库艾特流动为例的流体动力学湍流产生过程的研究	210
§ 7.2 用 ЛАДО-1 型风速计研究平面通道中的流动	220
参考文献	222
缩写词俄汉对照	231

第一章 位移干涉仪

激光位移干涉仪是用与频率稳定的激光波长相比较的方法进行长度绝对测量的直线测量系统。被测线段的比较是借助于双光束干涉仪实现的，它的一个反射镜与被测物体连系在一起。当物体运动时，干涉光束的程差发生变化，并在仪器的输出端观察到光通量自极小值至极大值之间的特征变动。当反射镜移动激光辐射的半波长、即一个干涉条纹时，这就相应于光通量变化一个周期。干涉条纹数由光电系统读出，被测长度则按下式计算：

$$L = (N + \Delta\varphi) \lambda_{\text{вак}} / 2 n_{\text{возд}} \quad (0.1)$$

式中 $(N + \Delta\varphi)$ ——干涉级(干涉条纹的整数和分数部分)；

$\lambda_{\text{вак}}$ ——真空中的激光辐射波长；

$n_{\text{возд}}$ ——在空气中进行测量时空气的折射率。

因此，长度测量的过程必然要求仪器的反射镜通过给定的距离。这里与用“分数部分重合法”工作的干涉仪^[1]是不同的，长度是在动态条件下通过位移测定的。该“比较程序”实际上是与迈克尔孙测定辐射波长的经典实验^[2]相反的。在位移干涉仪中，自然恒量——稳定的激光波长是原始的长度单位。现代激光器波长的误差在 5×10^{-8} 至 5×10^{-9} 之间，也就是说，与作为米定义基础的同位素氪-86 的黄橙谱线的复现性误差处于同一个水平上。因此，这类光电仪器实际上可用与原始标准相同的精度测量长度。

这种新仪器的应用范围是十分广阔的：从确定重力加速度的绝对值的物理实验、预报地震、监测原子弹爆炸直至生产

工业产品的以电子计算机为基础的数控自动化机床、激光干涉仪用于装备生产大型反射镜的机床^[3]、电视光盘的制造系统^[4]、机器制造业中零件检验的测量机^[5]以及电子计算机用的磁存储器的生产装置等。处理照片的摄影测量自动制图机^[6]、全息存储器^[7]及制造平面光学元件^[8]和综合全息图的装置已处于使用阶段。

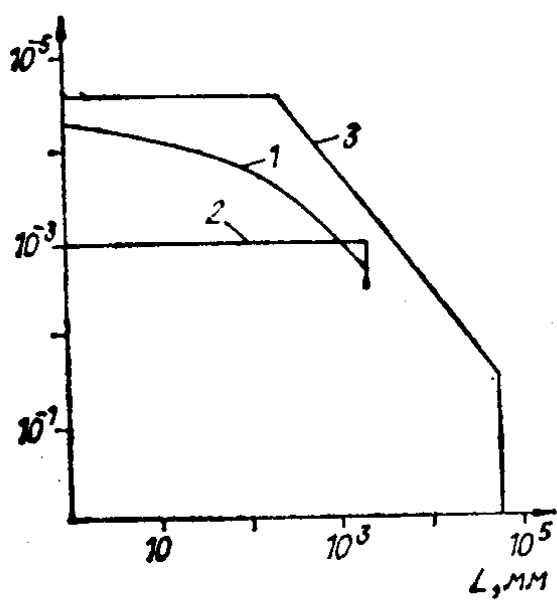


图 1.1

激光干涉仪的使用性能示于图 1.1。图中用对数比例尺表明干涉仪的精度与测量范围的依赖关系。与机器制造业的主要标准——块规(1)和二级刻线尺(2)相比,激光干涉仪(3)不但有良好的精度,而且在测量范围方面超过了前两者。可以断言,测量范围为 0 至 60 m、相对误差为 1×10^{-7} 的激光干涉仪是现代的“光学长度量器”。在测量范围和精度方面,它们都优于机器制造业和仪表制造业的所有测量仪器。

§ 1.1 激光位移干涉仪的制造原理

第一台条纹计数的干涉仪是在激光器发明之前的 1953 年由 E. R. 佩克 (Peck) 制造的。1967 年在世界市场上出现了激光干涉仪的工业样机。目前世界各大公司出售的激光干涉仪型号大家知道的约有 20 种。在某种条件下,可将所有这类仪器划分为两代:第一代使用的可靠性不高,测量范围限于 15 m,反射镜的移动速度不超过 8 m/min。第二代,当反射

镜的移动速度为 18 m/min 时, 最大测量范围为 60 m . 在干涉仪的结构方面, 从研制独立的测量仪器向制造可收集测量结果、处理大量信息、储存主要结果并以对使用者方便的形式显示主要结果的综合性测量系统的过渡已略具规模. 第二代激光干涉仪的功能已扩大到速度、加速度、平面度、直线度、角度偏转、介质的折射率等测量领域中去. 这是向干涉仪的基本结构补充外围装置而实现的.

第二代干涉仪与第一代相比有本质的差别. 实验表明^[9], 当测量范围扩大到 60 m 时, 干涉信号的参量发生了变化. 由于激光的发散和在光学元件上的衍射损耗, 直流分量实际上减小了一个数量级, 在有用信号中大大增加了由空气湍流引起的噪声. 因此, 在目前的研究工作中, 用信号移至高频区的方法来消除干涉信号的背景. 向“交流”系统的过渡, 即向工作于行波干涉花样的干涉仪过渡, 保证了在完全保持精度的条件下具有高度使用可靠性.

美国的 Hewlett-Packard 公司取得了最好的实际的和商业上的成就, 该公司的干涉仪于 1970 年出现在世界市场上. 在这种干涉仪中, 使用干涉花样的外调制法实现了低频噪声的抑制和信号频谱的迁移, 而没有给干涉仪的光学系统增加附加元件. 这使得干涉仪在运动反射镜只返回百分之几的光的条件下能够在长线路上工作. 在入射端具有双频激光器的干涉仪使用的光学元件最少, 容易与测量直线性、平面度和角度偏转的外围装置相连接.

1973 年苏联科学院西伯利亚分院自动学与电测学研究所研制了 ИИЛ-10 型激光干涉仪, 它的主要性能不亚于双频激光干涉仪. 新的相位调制原理在这种干涉仪中奠定了基础. 仪器的优点在于: 它不限制运动反射镜的移动速度; 其输入端装有稳定的单频激光器, 它的度量学特性已被很好的研

究过,生产工艺颇为简单并比双频激光器便宜.文献[9]中列举了 ИПЛ-10 型干涉仪的变型,它们能从测量结果中自动消除在比较仪原理受到破坏时出现的阿贝误差,并限制了复杂系统的测量精度.

在随后几年内 ИПЛ-10 的基本结构装入了用于摄影图象加工的 Зенит-2 型摄影测量自动制图机^[6]、全息存储系统^[7]、综合平面光学元件(位相数字全息图*)的装置^[8]、在大洋深处测量水密度的仪器中,并用来检测重型机床的度量学参数^[10].关于这些工作的细节,读者可以在相应的引用文献中去查找.本书将叙述仪器结构中所包含的测量方法并提供 ИПЛ-10 的基本型式.激光干涉仪的应用领域不断的扩大.可以认为,这种仪器的发展研究已花费了近 10 年的时间,近几年位移干涉仪的需求量将以比过去十年更为高的速度增长.

我们的讨论将限于三种类型的干涉仪:输入端具有单频激光器的干涉仪、内相位调制干涉仪^[11]和具有双频激光器的干涉仪(外调制).我们约定今后将所有仪器分为两类:信号谱迁移系统和非迁移系统.上面曾经指出,在第二代干涉仪中,为了抑制干扰,有效信号谱迁移到高频波段.频谱迁移可借助干涉仪前的双频激光器用程差相位调制的方法实现,或者加入声光调制器或电光调制器来实现.第一类仪器有时称为“直流干涉仪”,而第二类——“交流干涉仪”^[12].这种叫法强调了下述事实:在后一种情况下,甚至当干涉仪的两个反射

* 位相数字全息图 (Киноформ) 是一种新的计算机产生的提供三维图象的波前再现元件.与普通全息图不同,它受到照射时仅产生单一的衍射级,即所有入射光都用来再现唯一的象.这种光学元件对光波的相位产生作用,与普通光学元件(透镜、棱镜和反射镜等)不同,它的光学厚度可与光的波长相比拟,因此又称为综合平面光学元件.——译校者

镜都处于静止状态时,输出的光电信号也是交变的。

迈克尔孙干涉仪的光学原理图示于图 1.2. 它由三个光学元件组成: 分光立方体 2 和两个反射镜 3 和 4. 在光束复合点上由反射镜 3 和 4 返回的光信号可表示为

$$W_{1,2} = a_{1,2} e^{-i(\omega_{1,2}t - 4\pi x_{1,2}/\lambda)} \tag{1.1}$$

式中 $a_{1,2}$ —— 第一光束或第二光束的振幅;

$\omega_{1,2}$ —— 角频率;

$x_{1,2}$ —— 分别为至反射镜 3 和 4 的距离。

在第二臂内的频率偏移, 例如可借助于双频激光器 1 来实现。双频激光辐射按频率不同而分开, 并射向干涉仪的不同臂中。这种方法是现代干涉仪的标准方法。这是为抑制低频干扰所必须的。这种处理程序的有利效果将在下面讨论。在干涉仪两臂中的辐射不仅有不同的频率, 而且还有不同的波长。因为对于大量的应用来说, 反射镜的移动速度不会超过 20 m/min, 因而由波长之差引起的位移误差为 5×10^{-9} , 当以 1×10^{-7} 的精度进行测量时, 该误差可以忽略不计, 并认为 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ 。在以较高的精度测量长度, 而且角反射棱镜的运动速度较大时(参阅第二章), 则对最后结果给予相应的修正。

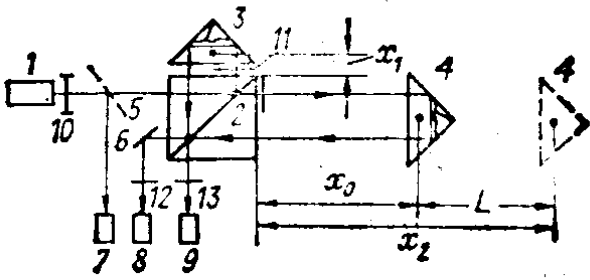


图 1.2

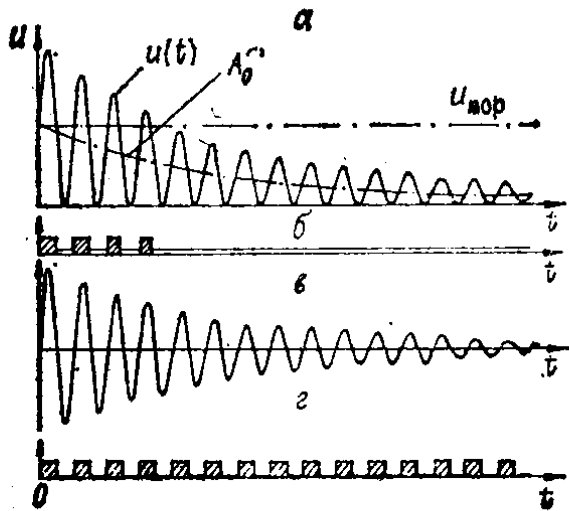


图 1.3

我们将干涉仪输出端的光波叠加, 并求出合成花样的强

度:

$$I = (W_1 + W_2)(W_1 + W_2)^* = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos [(\omega_2 - \omega_1) t - 4 \pi (x_2 - x_1) / \lambda] \quad (1.2)$$

当反射镜 4 (见图 1.2) 以某一变速 $v(t)$ 移动时, 分光立方体与反射棱镜光心间的距离可由下式表示

$$x_2(t) = x_0 \pm \int_0^t v(t) dt$$

这时, 当反射镜运动时输出信号可写为

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos [(\omega_2 - \omega_1) t - 4 \pi (x_0 - x_1) / \lambda \pm 4 \pi / \lambda \int_0^t v(t) dt] \quad (1.3)$$

余弦符号下面的第二项在测量过程中实际上是常数。当数小时时间测量时, 它的变化(例如, 由于干涉仪热变形引起的变化)会导致干涉仪零点的“漂移”。在现代结构中已采取措施消除这种误差, 其中包括使分光立方体和参考反射镜接近物体(测量反射镜)^[13], 或者附加“监视” $(x_0 - x_1)$ 值变化的专用干涉仪^[9]。

在 $\omega_2 = \omega_1$ 的情况下, 我们转到经典的“直流”干涉仪, 它的信号谱没有预先的频移并与干涉背景谱相重叠。我们将仔细地分析这个系统。

无信号频谱迁移的干涉仪 在输入端装有单频干涉仪 1 (见图 1.2) 的激光干涉仪是这种系统的典型例子。输出信号由两个光接收器 8 和 9 取出。为了从光接收器得到相位差为 90° 的信号, 在该系统中加入了偏振滤光片 10, 12 和 13。如果 $\omega_2 = \omega_1$, 则按照 (1.3) 式

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos [4 \pi (x_0 - x_1) / \lambda \pm (4 \pi / \lambda) \int_0^t v(t) dt] \quad (1.4)$$

光接收器的输出信号为

$$u(t) = A_0 + A \cos \left[\varphi_0 \pm (4 \pi / \lambda) \int_0^t v(t) dt \right] \quad (1.5)$$

式中 φ_0 —— $t=0$ 瞬间的初始相位差; $A_0 = \xi(a_1^2 + a_2^2)$ ——输出信号的直流分量, 或者干涉背景; $A = \xi(2 a_1 a_2)$ ——有用信号的交流分量的振幅; ξ ——光接收器的灵敏度.

信号的交流分量的相位增量与位移值有如下关系:

$$\varphi = \varphi_0 + (4 \pi / \lambda) \int_0^t v(t) dt = \varphi_0 + 4 \pi L(t) / \lambda$$

由此得到

$$L(t) = [(\varphi - \varphi_0) / 2 \pi] \cdot \lambda / 2 \quad (1.6)$$

(1.6)式的整数部分等于干涉级数, 即通过光接收器窗口的干涉条纹数; 分数部分——相应于一个干涉条纹范围内的位移. 公式(1.6)与原始公式(0.1)相似, 即

$$L(t) = (N + \Delta\varphi) \lambda / 2 \quad (1.7)$$

当 $v(t) = 0$ 时

$$u(t) = A_0 + A \cos \varphi_0 \quad (1.8)$$

即 $u(t)$ 实际上是直流电压. 当 $v(t) \neq 0$ 时, $u(t)$ 电压是单极性的, 它的极值相对被称为是信号直流分量的电平 A_0 成对称分布. 为了分出相位增量为 2π 的整周期的数目 N , 必须记录 $u(t)$ 瞬时间通过初始相位 φ_0 的次数. 但是 φ_0 值可能是 0 — 2π 间的任意值, 因此实际上是在某些固定的点上记录周期数, 例如在信号直流分量电平的那些点上记录周期数 N . 并用测量干涉条纹分数部分的装置相对这些点测定 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 值. 所谓二倍器和四倍器是分数部分的最简单的内插器. 在四倍器情况下, 记录相位增量 $\pi/2$. 由(1.6)式我们得到

$$L(t) = [(\varphi - \varphi_0) / 2 \pi] \cdot \lambda / 8 \simeq N' \lambda / 8 \quad (1.9)$$

式中 N' ——整数.

上述方法有下列优点: 装置相对来说是简单的, 没有限制反射镜运动速度的因素(除了电子系统通过能力所决定的自然因素外), 由于计数脉冲整形器有倒相的工作特性, 而有良

好的抗干扰能力。因为在公式(1.3)中 $\omega_1 = \omega_2$, 有用信号谱占有的谱带比使用双频激光器的干涉仪的谱带窄两倍。但是上述抗干扰能力与由光接收器和光电流放大器的灵敏度的漂移以及激光功率和干涉仪测量光束强度的波动引起的信号电平的随机变化无关。这些原因会导致工作点的漂移, 会给干涉条纹分数部分的测量带来误差, 而当信号减小 50% 时, 装置就会完全停止工作。这些非稳定因素会改变光电流的直流分量的电平和交流分量的振幅。

图 1.3a 表示一个光接收器的信号, 其振幅与被测长度有关。电平减小两倍就会导致方波脉冲整形器的工作中断 (见图 1.3b)。不难证实, 直流分量 A_0 的不稳定性是信号整形中断的主要原因。在没有直流分量时 (见图 1.3c), 整形器可在交流分量振幅波动较大的状态下工作, (见图 1.3d)。在输出信号中抑制直流分量 A_0 时会大大提高干涉仪的工作能力。

在一系列技术方案^[14]中, 例如, 卡尔·蔡司人民企业 (德意志民主共和国) 制造的激光干涉仪, 用将输出信号分离在四个光接收器上的方法来消除直流分量的漂移。转换的实质是对每一个相移 90° 的信号建立反相信号, 即移相 180° 。经过减法放大器后, 在相移 180° 的信号中将没有直流分量。不能认为这种补偿直流分量的方法是有效的, 因为这个方法在很大程度上受到直流放大器的漂移、光接收器灵敏度和激光功率起伏的限制。如果 A_0 不变化, 而且光接收器的光电特性相同时, 则能够补偿直流分量。很遗憾, 当离反射镜的距离很长 (10 m 以上) 时, 信号大约降低了 50% (反射镜的孔径为 30 mm)。在这种情况下, 得不到完全补偿。如果考虑到, 光通量分为四个部分会使干涉系统复杂化并使信噪比降低, 则可以理解为什么这种方法没有得到推广。

信号谱迁移的干涉仪 (内相位调制) “内相位调制”是我