



学
生
园
地

光速测量实验中光束传播偏离 产生的误差与解决方法

刘曦文, 陈云琳, 肖文俊, 王坚凯, 王 倩

(北京交通大学 理学院, 北京 100044)

摘 要: 基于光拍频法测量光速的实验光路, 分析了光束传播偏离理想光路产生的误差. 一方面, 光束传播的偏离会引起附加的光程差; 另一方面, 它也会造成光探测器的光敏面接收光信号的位置发生改变, 造成虚假相移. 建立模型并结合实验观测的数据, 定量地分析了它对实验造成的相对误差, 并提出了在实验中减少误差的可行方法.

关键词: 光速; 光拍频法; 光程差; 方向偏离; 误差

中图分类号: O4-34

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2015)11-0037-05

使用 LM2000C 光速测量仪进行光速测量实验, 采用主频为 75 MHz 的声光器件, 使光拍频达到了 150 MHz, 波长为 2 m, 并由此大大减小了仪器的体积(0.7 m×0.2 m), 实现了 $0\sim 2\pi$ 连续相移^[1-2]. 但是实验过程中易出现光线偏离现象, 而这种现象将直接影响测量结果的精度. 本文针对易被忽略而又真实存在的偏差, 分析了它在实验中存在的原因, 并计算了它对实验结果造成的相

对误差. 最后, 提出了在实验中有效地削弱这种误差的操作方法.

1 实验原理与测量方法

光拍频法测量光速是利用声光频移法形成光拍, 通过远、近光路产生光程差, 测量光拍频率和光拍波长, 从而间接测定光速的方法^[1-2]. 利用光拍频法测量光速实验的光路原理图如图 1 所示.

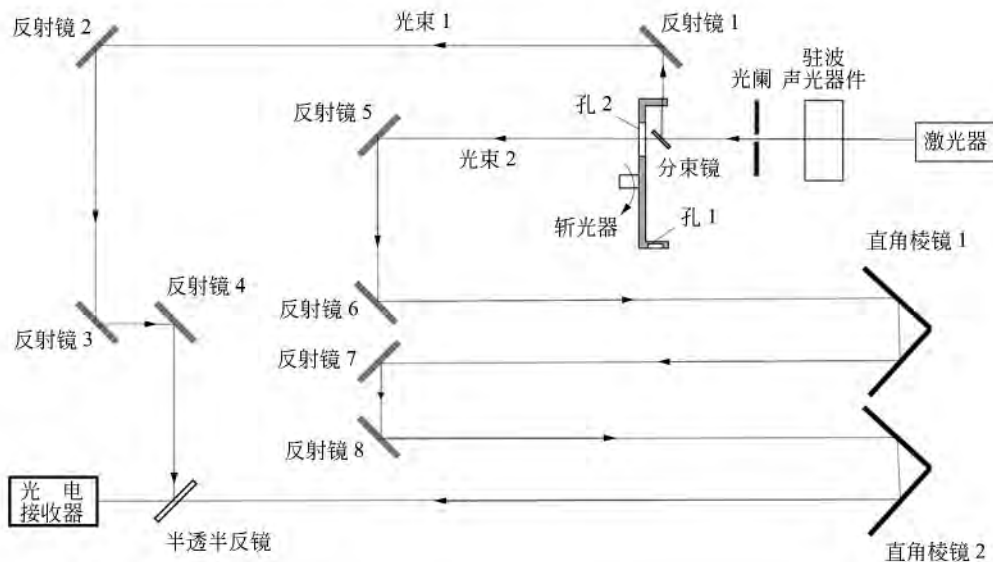


图 1 LM2000C 光速测量仪实验光路图

收稿日期: 2015-03-25; 修改日期: 2015-09-21

作者简介: 刘曦文(1994—), 男, 湖北武汉人, 北京交通大学理学院光信息科学与技术专业 2012 级本科生.

通讯作者: 陈云琳(1965—), 女, 北京人, 北京交通大学理学院教授, 博士, 主要从事光电子材料与器件、集成光学方面的研究.

1.1 实验原理

光拍频波要求相拍的 2 束光之间具有一定的频差. 本实验通过声光效应移频装置(超高频功率信号源输出频率为 $\Omega=75$ MHz 左右), 让超声波在介质中形成驻波使得介质的折射率发生相应的周期性变化, 成为相位光栅^[2-3]. He-Ne 激光器输出波长为 632.8 nm 的激光, 通过该介质时发生衍射, 并加以光阑孔径的限制就可以获得需要的光拍频信号, 如图 2 所示^[1,4]. 介质中出射的光通过半透半反镜之后变为 2 束光拍频同为 $\Delta f=2\Omega$ 的光. 2 束光初相位相同, 经过远、近两光路后被光敏探测器接收.

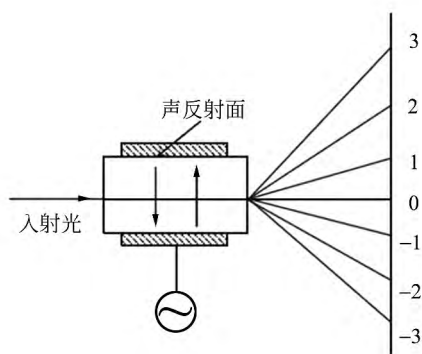


图 2 驻波法获得光拍频示意图

1.2 测量方法

近程光的光路是固定不变的, 因此信号波形的相位也是恒定不变的. 另一方面, 当调节直角棱镜 1 与直角棱镜 2 的位置时, 远程光束走过的光程发生了改变, 信号波形在示波器上所呈现的正弦波的相位也随之发生变化. 当 2 束光的光程差等于光拍频波长的整数倍时, 示波器上 2 束光的波形应该完全重合. 在利用 LM2000C 光速测量仪进行光速测量的实验中, 2 个棱镜小车移动距离之和的 2 倍就是两路光波光程差的增量. 当其等于拍频波的 1 个波长时, 示波器上 2 束光的波形的相位相同. 通过测量 2 个棱镜小车移动的距离就可以推导计算出光拍频的波长, 在频率计上可得到相应光拍信号的频率, 即可由公式^[1]

$$\lambda = \frac{c}{\Delta f} \quad (1)$$

得到光在空气中的传播速度. 其中, λ 为拍频波的波长, Δf 为相应光拍信号的频率, c 则为光在空气中的传播速度.

2 误差的提出与计算方法

2.1 误差的提出

光速测量实验中, 远程光通过透射与多次反射才能到达光敏接收器, 很难保证光线传播方向与原光路保持一致, 光线未严格平行于导轨, 以致光在传播过程中逐渐偏离导轨方向. 而且, 一般通过光线传输的光路结合人的直观感受来确定光线的传播方向. 实际上, 实验中激光在各个光学元件上的照射范围是光斑, 光线在各个棱镜面上的实际入射光点根本无法确定, 因此不容易确定光线传播的准确路径. 这将导致光线的实际传播方向与原光路的方向之间必定会有一定的偏差, 而这往往在实验操作中被实验人员所忽略, 此偏差将直接影响到实验结果的精度. 因此, 有必要研究实验中实际光路与理论设定光路的偏差对实验结果的影响. 由于实验条件达不到理论公式所规定的要求而产生的系统误差, 无法通过实验测量与数据处理方法的改进来克服^[4-5].

在本文中, 我们认为在毫无校准光线方向的情况下, 光线在多次透射与反射的调试过程中出现了不可忽略的偏差, 另外实验过程中人眼的分辨本领不够高, 光线的实际方向与理论上的偏离角应该在度这一量级上. 但在实验操作中, 光线通过光阑进入光敏接收器这一过程并不易于操作, 光束偏离光电探测器中心太多将导致无法入射到探测器^[6-7]. 因此, 光线方向的偏离也不会太大. 本实验中, 光束截面积约为 2.5 mm^2 , 光阑直径约为 1 cm, 棱镜小车光电探测器之间的距离一般不会超过 500 mm, 通过简单的估算 ($\arctan \frac{1}{50} \approx 1.15^\circ$), 认为偏离角应该在 $0 \sim 2^\circ$.

2.2 附加光程差引起的误差

以实验光路图 1 为基础建立简单的物理模型, 定量分析光线传播方向的偏差对实验结果的影响. 为了保证物理图像的清晰与简洁, 加上远、近 2 束光拍频之间产生的相位差只与直角棱镜 1 和 2 的位置有关, 可以将直角棱镜 1 和直角棱镜 2 的移动等效为可移动反射镜组 12 的移动, 如图 3 所示.

实验中, 通过调节图 1 中直角棱镜 1 和直角棱镜 2 的位置, 改变光程差, 使得 2 个信号正弦波同相位. 假定理论上需要移动可滑动反射镜组 12

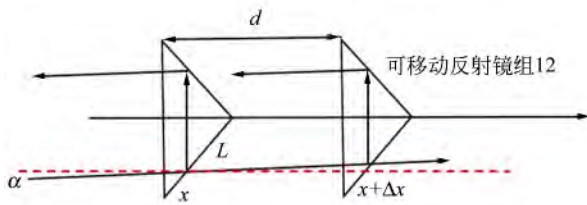


图 3 移动可滑动反射镜组 12 产生光程差示意图

的距离为 d_0 , 考虑实际光线的方向后, 需要移动可滑动反射镜组 12 的距离为 d 时, 可调节反射镜组 12 前后使得 2 束光拍频之间的光程差增加光拍频波长 λ . 则在理论上, 对于 d_0 而言, 应该满足

$$2d_0 = \lambda, \quad (2)$$

为了问题的一般性, 在考虑实际光线方向的偏差后, 给出移动反射镜组 12 一段距离 d 后光拍频之间产生的光程差增量 $\Delta L(d)$, 则有

$$\Delta L(d) = \Delta L_{\text{ext}}(d) + \Delta L_{\text{in}}(d), \quad (3)$$

其中, ΔL_{ext} 为在可滑动反射镜组 12 外部产生的光程差增量, 可以从下式中得到

$$\Delta L_{\text{ext}}(d) = 2 \frac{d}{\cos \alpha}. \quad (4)$$

接下来将给出在可滑动反射镜组 12 内部所产生的光程差增量 $\Delta L_{\text{in}}(d)$. 在此之前, 先给出光线在可滑动反射镜组 12 内部所经历的光程 L_{in} , 由简单的几何光学知识给出^[8]

$$L_{\text{in}}(x) = \frac{x}{\sqrt{2} \cos \alpha} + \frac{L-x}{\cos(\pi/4-\alpha)} + \frac{L-(L-x)\tan(\pi/4-\alpha)}{\sqrt{2} \cos \alpha}, \quad (5)$$

其中, x 是入射光线在可滑动反射镜组 12 一边上的入射位置到其一边缘的距离, 如图 3 所示. 若光线按照原光路传播, 在移动可滑动反射镜组 12 前后, 由于光线平行于反射镜运动方向, x 应保持不变. 光线在可滑动反射镜组 12 内部所走的光程 $L_{\text{in}}(x)$ 也应该保持不变, 且其大小恒为 $\sqrt{2}L$, 光线在可滑动反射镜组 12 内部增加的光程差为 0. 反之, 实际光线的传播并不是沿着设定的光路, 光线在反射镜组 12 内部所走的光程 L_{in} 应该表述为 x 的函数, 且 x 随着反射镜的移动而发生变化, 这将是实验结果产生误差的主要原因. 在移动可滑动反射镜组 12 前后 x 的变化值为

$$\Delta x = \frac{\sin \alpha}{\sin(\pi/4-\alpha)} d, \quad (6)$$

那么, 光线在反射镜组 12 内部所产生的光程差增

量为

$$\Delta L_{\text{in}}(d) = L_{\text{in}}(x + \Delta x) - L_{\text{in}}(x), \quad (7)$$

对于 d 而言, 满足下列关系

$$\Delta L_{\text{ext}}(d) + \Delta L_{\text{in}}(d) = \lambda = 2d_0. \quad (8)$$

通过分析可滑动反射镜组 12 所移动距离的变化, 计算出此变化量对实验结果产生的相对误差. 在本实验结果计算的数据处理中, 按照下列关系来计算光速

$$c = \lambda \Delta f = 2 \Delta f d \propto d, \quad (9)$$

由(9)式可看出, 实验所测得的光速的误差来源于测量 d 时所产生的误差. 那么, 在理论上, 由于光线偏离原光路传播所带来的相对误差为

$$E_r = \frac{|d - d_0|}{d_0} \times 100\%. \quad (10)$$

2.3 虚假相移引起的误差

为了保证实验精度, 除要求准确的频率和棱镜小车移动距离的测量以外, 关键还在于近程光和远程光之间相位的比较. 在实验过程中, 若不是由于光拍频在实空间传播而引起的相位变化都可称为本实验中的虚假相移. 由于虚假相移的存在, 在近程光和远程光之间相位比较的过程中, 需要过多或者过少地移动棱镜小车来抵消虚假相移的影响, 从而引起实验结果的误差. 由于光束的传播方向偏离导轨方向, 在移动棱镜小车前后, 远程光在光探测器的光敏面上的照射点会发生不可忽略的变化, 可以在光探测器方盒内部光敏面的附近放 1 片小纸条来进行观测. 在本实验中, 所使用的光电探测器基于硅光电二极管结构, 光敏面的直径约为 5 mm. 即使光束偏移很微小的角度, 由于棱镜小车与光电探测器距离较远, 在移动棱镜小车前后, 小纸条上的光点也会有明显的移动. 光探测器的光敏面上不同的 2 点, 其灵敏度和电子渡越时间一般不同^[6]. 由于远程光在光敏面上的照射点会发生变化, 造成了远程光前后会出现虚假的相移. 这种虚假相移与附加光程差一样, 会引起相位判断的错误, 造成棱镜小车移动的距离不会是准确值.

3 误差分析与解决方法

3.1 误差分析

图 4 反映了光线偏离设定光路传播时所带来的相对误差与偏离角之间的关系, 其中偏离角在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 范围内变化. 从图 4 中可以看出, 由于

光线传播方向偏离所造成的附加光程差在本实验中并没有造成较大的影响,并且它将导致所测得的光速相对于理论值偏大.这种误差强烈地依赖于偏离角,由于光探测器前光阑的限制,光线传播的偏离角度不会超过 2° ,造成的相对误差在 0.1% 附近,与实际实验中所测得结果的相对误差相比是可以忽略的.因此,实验中附加光程差给实验结果带来的误差并不是主要的.相反,由于远程光在光敏面照射点的移动所引起的虚假相移,才是主要的实验误差.

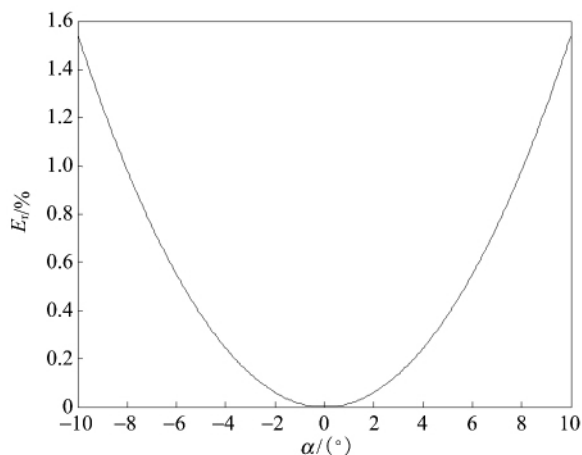


图 4 附加光程差引起的相对误差与偏离角之间的关系

3.2 解决方法

调整光路时,按顺序依次调节各镜片,使入射光斑在各镜片中心位置附近.将棱镜小车 A(直角棱镜 1)移到导轨最左端,并将挡光片固定在小

车 A 上(可用橡皮筋套住).匀速移动小车至最右端,观察激光的光点位置是否发生改变,只要光点在挡光片上的位置发生任意方向上的改变,则说明此时光路与导轨 A 不平行,需反复调节多次,使小车 A 移动时,挡光片上光点位置保持不变.以同样的方法对反射镜 7 和 8 及小车 B(直角棱镜 2)进行调整,保证光路 2 与导轨方向均平行,并在示波器上显示出清晰的波形.同理,通过在光探测器方盒内部光敏面的附近放 1 片小纸条来进行观测,也可以达到减小光束传播偏离的效果.

4 实验结果及分析

表 1 为利用光拍频法进行光速测量的实验结果.该探究共进行 5 组实验,每组实验包括 6 次独立的测量,并将 6 次测量的平均值作为这组实验的测量结果.其中,第 1 组实验中没有进行光束传播方向的校正,其余 4 组实验则在光速测量前按照上述操作尽量使得光束平行于滑动导轨.表 1 中, Ω 为声光调制器的频率, $D_a(0)$ 和 $D_a(2\pi)$ 分别表示棱镜小车 1 滑动前后的位置, $D_b(0)$ 和 $D_b(2\pi)$ 则表示棱镜小车 2 滑动前后的位置,空气中的光速可用 $v = 2f \times 2 \{ [D_b(2\pi) - D_b(0)] + [D_a(2\pi) - D_a(0)] \}$ 得出.比较第 1 组实验与其他 4 组实验中测得光速的相对误差可以发现,在光速测量之间按照之前所述的操作方法来减弱光束传输偏离,可以减少光速测量实验中的实验结果的误差.

表 1 光速测量实验结果

组数	$D_a(0)/\text{mm}$	$D_a(2\pi)/\text{mm}$	$D_b(0)/\text{mm}$	$D_b(2\pi)/\text{mm}$	Ω/MHz	$v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$E_r/\%$
1	5	535	6.77	467.87	75.066 7	297 594.43	0.73
2	5	535	23.97	486.82	75.066 7	298 119.89	0.56
3	5	535	32.75	497.82	75.066 7	298 785.49	0.34
4	5	535	38.05	504.15	75.066 7	299 095.76	0.23
5	5	535	51.20	515.78	75.066 7	298 640.34	0.38

5 结束语

本文对光拍频法测量光速实验过程中由于实验条件达不到理论公式所规定的要求而产生的系统误差进行了研究,并对光束传播偏离理想光路给光速测量带来的误差进行了系统分析,一方面,

光束传播的偏离会引起一个附加的光程差;另一方面,它也会造成光探测器的光敏面接收光信号的位置发生改变,造成虚假相移.通过理论建立模型并结合实验观测的数据,定量地分析了它对实验造成的相对误差;基于实验原理从操作方法上得到改进,获得在实验中削弱这种误差的方法.

参考文献:

- [1] 陈云琳,刘依真. 近代物理实验[M]. 北京:北京交通大学出版社,2010:40-44.
- [2] 南京浪博科教仪器研究所. LM2000C 光速测量仪使用说明[Z]. 2004:1-2.
- [3] 蔡秀峰,蔡德发. 光速测量方法的改进[J]. 大学物理,2007,26(3):44-48.
- [4] 龚添喜,吕云宾. 光拍法测光速实验中的几个误解[J]. 大学物理,2007,26(4):41-44.
- [5] 张倩云,许灵静,芦立娟,等. 改进后的光拍法测量光速研究[J]. 物理与工程,2012,22(3):26-30.
- [6] 仲明礼. 拍频法测量光速实验中关键问题的研究[J]. 淮海学院学报,2008,8(2):111-112.
- [7] 袁学德. 光拍法测量光速实验中的声光调制[J]. 大学物理实验,2004,17(4):39-42.
- [8] 赵凯华. 新概念物理教程·光学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:19-21.

Error due to deviation of light trajectory in measuring speed of light and the solutions

LIU Xi-wen, CHEN Yun-lin, XIAO Wen-jun, WANG Jian-kai, WANG Ji
(School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The error originated from the deviation of trajectory of light had been investigated in measuring the velocity of light using the optical beating method. On the one hand, an additive optical path difference would be induced by the deviation of light trajectory in the experiment. On the other hand, there would be a change of the spot position on the photosensitive surface of the optical detector leading to a fictitious phase shift. Based on the model established, the relative error due to the deviation was quantitatively analyzed combining with the experimental results. In addition, an error reducing method had been put forward.

Key words: velocity of light; light shooting method; optical path difference; deviation of trajectory; error

[责任编辑:郭伟]

欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》创刊于 1980 年,是教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会的会刊。

《物理实验》主要刊载物理实验成果,交流物理实验教学改革的 new 思想、新方法、新动态。开设的栏目有:实验教学,实验与应用,数据处理与误差分析,仪器设计与使用,实验教学研究,基础教育研究,实验技术与技巧,集锦,问题讨论,国外实验教学介绍,学生园地等。适合于物理实验工作者,大、中学校的物理教师,理工科的本科生、研究生及教学仪器研制人员阅读。

《物理实验》愿为广大作者提供交流信息的窗口,展示成果的园地,为广大读者提供丰富的精神食粮,为广大仪器生产厂家提供展示成果的舞台。

《物理实验》杂志为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为 12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。

《物理实验》编辑部