

# 浙江大学

## 物理实验报告

实验名称：\_\_\_\_光速测量\_\_\_\_

实验桌号：\_\_\_\_10\_\_\_\_

指导教师：\_\_\_\_乐静飞\_\_\_\_

班级：\_\_\_\_计科 2404\_\_\_\_

姓名：\_\_\_\_李宇晗\_\_\_\_

学号：\_\_\_\_3240106155\_\_\_\_

实验日期：\_\_\_\_2025\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_10\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_27\_\_\_\_ 日      星期 二 上午

浙江大学物理实验教学中心

# 一、预习报告（10 分）

## 1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

本实验采用“光调制法”（也称“相位法”）来测量光在空气中的传播速度。

**实验原理：** 使用一个频率为  $\nu$ （例如  $\nu = 100 \text{ MHz}$ ）的高频信号对激光发射器进行强度调制。调制后的激光射向一个放置在导轨上的直角折光器，经反射后返回，被光电池接收器接收。光在传播过程中，走过的总路程为  $\Delta S = 2L$ （其中  $L$  为发射器到折光器的单程距离），产生的时间延迟为  $\Delta t = \Delta S/c$ ，对应的相位延迟为  $\Delta\varphi = 2\pi\nu\Delta t = 2\pi\nu(\Delta S/c)$ 。

由于  $100 \text{ MHz}$  的高频信号相位差难以在示波器上直接精确读出，实验采用了外差法（或称“差拍法”）。将接收到的高频光电信号（频率  $\nu$ ）与一个频率相近的本地振荡信号（频率  $\nu''$ ，例如  $\nu'' = 99.5 \text{ MHz}$ ）进行混频（调制）。混频后经低通滤波器，得到频率为  $\nu' = \nu - \nu''$ （例如  $\nu' = 0.5 \text{ MHz}$ ）的差频信号。这个低频差频信号  $U' \propto \cos(2\pi\nu't - \Delta\varphi)$  完整地保留了原高频信号的相位延迟  $\Delta\varphi$ 。

这个相位延迟  $\Delta\varphi$  在示波器上表现为低频信号波形的一个时间差  $\Delta t'$ ，满足  $\Delta\varphi = 2\pi\nu'\Delta t'$ 。联立两个  $\Delta\varphi$  的表达式，可得  $2\pi\nu(\Delta S/c) = 2\pi\nu'\Delta t'$ ，解出光速  $c = \frac{\Delta S}{\Delta t'} \cdot \frac{\nu}{\nu'}$ 。

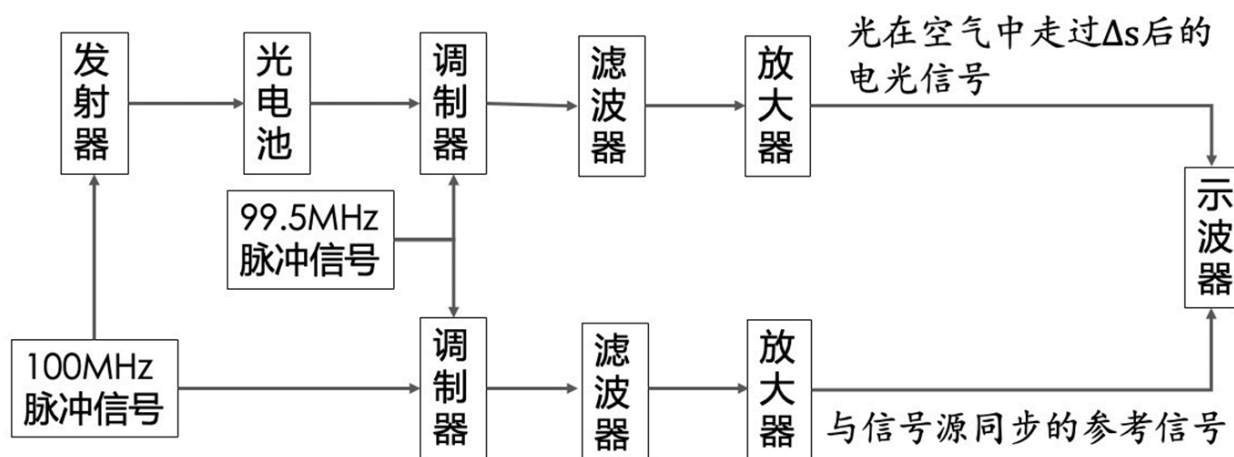


Figure 1: 仪器电路原理图

### 实验方法：

1. **光路调节：** 打开仪器，调节直角折光器位置，使反射光能准确进入光电池接收器。
2. **信号观测：** 将差频参考信号和测量信号分别接入示波器 CH1 和 CH2，调整示波器使波形清晰稳定。
3. **测量：** 记录折光器在导轨上的一个初始位置  $S_1$ 。沿导轨移动折光器到新的位置  $S_2$ ，光程差即为  $\Delta S = 2(S_2 - S_1)$ 。
4. **读数：** 在示波器上测量两个位置对应的波形时间差  $\Delta t'$ （即相位差对应的延迟时间）。
5. **计算：** 将测得的  $\Delta S$  和  $\Delta t'$ ，以及已知的  $\nu$  和  $\nu'$  代入公式  $c = \frac{2(S_2 - S_1)}{\Delta t'} \cdot \frac{\nu}{\nu'}$ （或  $c = \frac{\Delta S}{\Delta t'} \cdot \frac{\nu}{\nu'}$ ），计算出光速  $c$ 。

**实验现象：** 在示波器上会观察到两条频率相同（均为  $\nu'$ ）的差频信号波形。当沿导轨移动直角折光器时，测量信号（来自光接收器）的波形会相对于参考信号的波形发生平移（即出现时间延迟  $\Delta t'$ ），移动的距离  $S_2 - S_1$  越大，时间平移量  $\Delta t'$  也越大。

## 2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

1. 理解并掌握利用高频调制和外差法（差拍法）将高频信号相位测量转换为低频信号相位（时间）测量的基本原理。
2. 学会使用双踪示波器，通过测量两个信号波形（参考信号与测量信号）之间的时间差  $\Delta t'$ （即相位差）来进行精密测量。

## 3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

1. 光路调节的准确性：必须精确调节光路，确保激光束经直角折光器反射后，能准确、稳定地返回并被光电池接收，尤其是在长距离移动折光器时。
2. 示波器读数的精度：准确判读示波器上两个波形的峰值、谷值或过零点，以精确测量其间的时间差  $\Delta t'$ ，这是实验误差的主要来源之一。

## 二、 原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

3240106155 李争峰

集号 10

$v' = 456.19 \text{ km/s}$

次数	$s_1/m$	$s_2/m$	$\sigma'/s$	$c/(m/s)$	平均值
1	$3.00 \times 10^{-2}$	$49.00 \times 10^{-2}$	$0.630 \times 10^{-6}$		
2	$4.00 \times 10^{-2}$	$49.00 \times 10^{-2}$	$0.700 \times 10^{-6}$		
3	$5.00 \times 10^{-2}$	$42.00 \times 10^{-2}$	$0.600 \times 10^{-6}$		
4	$8.00 \times 10^{-2}$	$50.00 \times 10^{-2}$	$0.685 \times 10^{-6}$		
5	<del><math>7.00 \times 10^{-2}</math></del>	<del><math>63.12 \times 10^{-2}</math></del>	<del><math>0.700 \times 10^{-6}</math></del>		
6	<del><math>5.50 \times 10^{-2}</math></del>	<del><math>49.00 \times 10^{-2}</math></del>	<del><math>0.715 \times 10^{-6}</math></del>		

次数	$s_1/m$	$s_2/m$	$\sigma'/s$	
1		<del><math>11.00 \times 10^{-2}</math></del>	<del><math>0.145 \times 10^{-6}</math></del>	
2		$19.00 \times 10^{-2}$	$0.265 \times 10^{-6}$	
3	$7.00 \times 10^{-2}$	$27.00 \times 10^{-2}$	$0.400 \times 10^{-6}$	平均值
4		$35.00 \times 10^{-2}$	$0.525 \times 10^{-6}$	
5		$43.00 \times 10^{-2}$	$0.680 \times 10^{-6}$	
6		$51.00 \times 10^{-2}$	$0.825 \times 10^{-6}$	

### 三、结果与分析（60 分）

#### 1. 数据处理与结果（30 分）

本实验采用差频相位法测量光速，其核心计算公式为：

$$c = \frac{2(S_2 - S_1)}{\Delta t'} * \frac{v}{v'}$$

根据实验给定参数：

- 高频调制信号频率  $v = 1.00 \times 10^8$  Hz
- 差频信号频率  $v' = 4.5619 \times 10^5$  Hz
- 计算得频率比  $K = \frac{v}{v'} = \frac{1.00 \times 10^8}{4.5619 \times 10^5} \approx 219.207$

我们采用两种方法对数据进行处理。

**方法一：逐次测量法（表一数据）** 我们对表一中的 6 组数据分别计算光速  $c_i$ ，然后求其平均值。

数据处理表格（表一）：

次数 $i$	$S_1$ (m)	$S_2$ (m)	$\Delta S = S_2 - S_1$ (m)	$\Delta t'$ (s)	$c_i$ ( $10^8$ m/s)
1	0.0300	0.4800	0.4500	$0.630 \times 10^{-6}$	3.132
2	0.0400	0.4700	0.4300	$0.700 \times 10^{-6}$	2.694
3	0.0500	0.4200	0.3700	$0.600 \times 10^{-6}$	2.704
4	0.0800	0.5000	0.4200	$0.685 \times 10^{-6}$	2.689
5	0.0700	0.6312	0.5612	$0.700 \times 10^{-6}$	3.515
6	0.0550	0.4900	0.4350	$0.715 \times 10^{-6}$	2.668

计算平均值：

$$\bar{c}_1 = \frac{(3.132 + 2.694 + 2.704 + 2.689 + 3.515 + 2.668) \times 10^8}{6}$$

$$\bar{c}_1 = \frac{17.402 \times 10^8}{6} \approx 2.900 \times 10^8 \text{ m/s}$$

计算 A 类不确定度  $u_{A(\bar{c}_1)}$ ：

$$s(c_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c}_1)^2}{n-1}}$$

$$s(c_i) = \sqrt{\frac{0.232^2 + (-0.206)^2 + (-0.196)^2 + (-0.211)^2 + 0.615^2 + (-0.232)^2}{5}} \times 10^8$$

$$s(c_i) = \sqrt{\frac{0.611}{5}} \times 10^8 \approx 0.3496 \times 10^8 \text{ m/s}$$

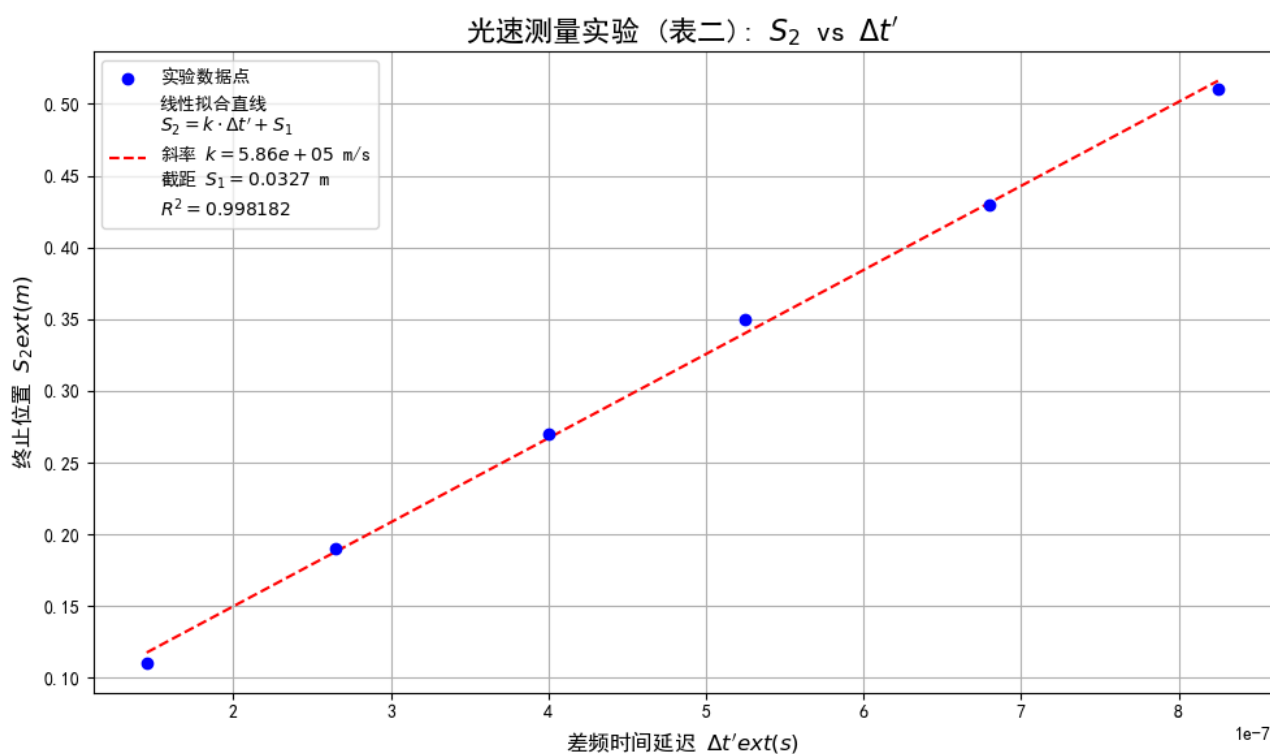
$$u_{A(\bar{c}_1)} = \frac{s(c_i)}{\sqrt{n}} = \frac{0.3496 \times 10^8}{\sqrt{6}} \approx 0.143 \times 10^8 \text{ m/s}$$

取  $u_{A(\bar{c}_1)} = 0.14 \times 10^8 \text{ m/s}$

方法二：作图法（表二数据） 固定  $S_1 = 0.0300 \text{ m}$ ，测量不同  $S_2$  对应的  $\Delta t'$ 。理论模型为  $S_2 - S_1 = \left(\frac{c}{2} * \frac{v'}{v}\right) * \Delta t'$ 。我们建立线性关系  $S_2 = k * \Delta t' + S_1$ ，其中斜率  $k = \frac{c}{2K}$ ， $K = \frac{v}{v'}$ 。因此，光速  $c = 2k * K$ 。

数据处理表格（表二）：

序号 $i$	$x_i = \Delta t' \text{ (s)}$	$y_i = S_2 \text{ (m)}$
1	$0.145 \times 10^{-6}$	0.1100
2	$0.265 \times 10^{-6}$	0.1900
3	$0.400 \times 10^{-6}$	0.2700
4	$0.525 \times 10^{-6}$	0.3500
5	$0.680 \times 10^{-6}$	0.4300
6	$0.825 \times 10^{-6}$	0.5100



使用最小二乘法对表二数据（ $y_i$  对  $x_i$ ）进行线性回归，得到拟合直线的斜率  $k$  和截距  $S_1'$ ，及其 A 类不确定度  $u_{A(k)}$ ：

- 斜率  $k = 5.86 \times 10^5 \text{ m/s}$
- 截距  $S_1' = 0.0244 \text{ m}$
- 斜率的 A 类不确定度  $u_{A(k)} = 0.022 \times 10^5 \text{ m/s}$
- 相关系数  $R^2 = 0.998$ （线性关系极好）

根据斜率计算光速  $c_2$  及其 A 类不确定度  $u_{A(c_2)}$ ：

$$c_2 = 2k * K = 2 * (5.86 \times 10^5) * 219.207 \approx 2.57 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$u_{A(c_2)} = 2 * u_{A(k)} * K = 2 * (0.022 \times 10^5) * 219.207 \approx 0.096 \times 10^8 \text{ m/s}$$

取  $u_{A(c_2)} = 0.10 \times 10^8 \text{ m/s}$

### 结果汇总：

1. 逐次测量法（表一）： $\bar{c}_1 = 2.90 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $u_{A(\bar{c}_1)} = 0.14 \times 10^8 \text{ m/s}$
2. 作图法（表二）： $c_2 = 2.57 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $u_{A(c_2)} = 0.10 \times 10^8 \text{ m/s}$

## 2. 误差分析（20 分）

### 1. 相对误差计算

以真空中的光速公认值  $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$  为标准。

- 表一结果的相对误差  $E_{r(1)}$ ：

$$E_{r(1)} = \frac{|\bar{c}_1 - c_0|}{c_0} = \frac{|2.90 - 2.998|}{2.998} = \frac{0.098}{2.998} \approx 3.3\%$$

- 表二结果的相对误差  $E_{r(2)}$ ：

$$E_{r(2)} = \frac{|c_2 - c_0|}{c_0} = \frac{|2.57 - 2.998|}{2.998} = \frac{0.428}{2.998} \approx 14.3\%$$

### 2. 结果表示

（不考虑 B 类不确定度，仅用 A 类不确定度表示）

- 表一结果： $c = \bar{c}_1 \pm u_{A(\bar{c}_1)} = (2.90 \pm 0.14) \times 10^8 \text{ m/s}$
- 表二结果： $c = c_2 \pm u_{A(c_2)} = (2.57 \pm 0.10) \times 10^8 \text{ m/s}$

### 3. 误差原因分析

#### • 系统误差：

1. 频率测量误差（主要误差源）：公式中的频率比  $K = \frac{v}{v'} \approx 219$  是一个巨大的放大系数。高频  $v$  (100 MHz) 或差频  $v'$  (456.19 kHz) 信号源的任何微小漂移或不准确，都会被放大 200 多倍，导致  $c$  的计算值产生显著的系统偏差。
2. 仪器标定误差：测量  $S_1, S_2$  的米尺的刻度不准；示波器时基 (Time Base) 不准。
3. 表二的系统偏差：作图法（表二）的拟合截距为  $S_{1'} = 0.0244 \text{ m}$ ，而实验设定的  $S_1 = 0.0300 \text{ m}$ 。两者相差 5.6 mm，说明表二的测量数据存在一个固定的系统偏差。这导致了  $c_2$  的结果（误差 14.3%）远不如  $c_1$ 。

#### • 随机误差（A 类不确定度来源）：

1. 波形对齐误差（主要误差源）：在示波器上判断两个信号波形是否“重合”或对齐到“0 位”，完全依赖人眼观察，存在较大的主观性和读数随机误差。这是导致表一中  $c_i$  值（如  $c_5$ ）波动大以及表二  $u_{A(c_2)}$  存在的主要原因。
2. 距离读数误差：在米尺上读取  $S_1, S_2$  位置时存在的视差和估读误差。

### 3. 实验探讨（10 分）

本实验利用差频相位法测量了光速。通过对比，逐次测量法 ( $\bar{c}_1 = (2.90 \pm 0.14) \times 10^8 \text{ m/s}$ ) 的结果相对误差 (3.3%) 远小于作图法 ( $c_2 = (2.57 \pm 0.10) \times 10^8 \text{ m/s}$ ) 的相对误差 (14.3%)。分析表明作图法数据可能存在起始点  $S_1$  的系统偏差。实验的主要误差来源是信号频率的稳定度和示波器波形的对齐读数。

## 四、思考题（10 分）

1. 实验中有可能出现波形假移位，如何克服？

1. 答：“波形假移位”是指示波器上观测到的相位延迟  $\Delta\varphi'$  实际上是  $\Delta\varphi' + n * 2\pi$  ( $n$ 为整数)，因为相位具有周期性。这发生在测量的真实时间延迟  $\Delta t'$  超过了差频信号的一个周期  $T' = \frac{1}{\nu}$  时。
  2. 克服方法：在本实验中，差频周期  $T' = \frac{1}{4.5619 \times 10^5 \text{ Hz}} \approx 2.19 \text{ }\mu\text{s}$ 。在测量中，必须确保移动的距离  $\Delta S = 2(S_2 - S_1)$  足够小，使得在示波器上读出的时间  $\Delta t'$  始终小于  $T'$  (即  $< 2.19 \text{ }\mu\text{s}$ )，这样可以保证所测得的相位延迟是真实的最小相位差，而不是跳过周期的“假相位”。
2. 分析影响实验精度的主要因素。
1. 答：
    1. 频率的准确性和稳定性： $\nu$  (100 MHz) 和  $\nu'$  (456.19 kHz) 的测量准确度和工作时的稳定性是最大的误差源，因为  $c$  的计算正比于  $\frac{\nu}{\nu'}$  (约 219 倍) 这个放大系数。
    2.  $\Delta t'$  的测量精度：在示波器上对准两个波形的重合点（或李萨如图形的闭合）有赖于人眼观察，主观性强，读数随机误差大。
    3.  $\Delta S$  的测量精度： $S_1$  和  $S_2$  的米尺读数存在视差和估读误差。
3. 描述光速测量的其他实验方法。
1. 答：
    1. 天文学方法：如罗默 (Rømer) 利用木卫一 (Io) 的蚀周期变化测量光速。
    2. 菲索齿轮法 (Fizeau' s Method)：利用旋转的齿轮将光“斩”成光脉冲，测量光往返特定距离后是否能通过下一个齿缝。
    3. 傅科旋转镜法 (Foucault' s Method)：菲索法的改进，使用高速旋转的镜面代替齿轮，通过测量反射光斑的微小位移来计算光速。
    4. 微波谐振腔法：通过测量微波在特定尺寸谐振腔内的驻波波长  $\lambda$  和频率  $f$ ，利用  $c = \lambda f$  计算光速。
    5. 激光干涉法：现代最高精度的方法，通过干涉仪精确测量激光的波长和频率，也是目前“米”定义的基础。