

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

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 v (例如 $v = 100 \text{ MHz}$) 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 $\Delta t = \Delta \frac{S}{c}$ ，对应的相位延迟为 $\Delta\varphi = 2\pi v \Delta t = 2\pi v (\Delta \frac{S}{c})$ 。

由于 100 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 v)与一个频率相近的本地振荡信号(频率 v'' ，例如 $v'' = 99.5 \text{ MHz}$)进行混频(调制)。混频后经低通滤波器，得到频率为 $v' = v - v''$ (例如 $v' = 0.5 \text{ MHz}$) 的差频信号。这个低频差频信号 $U' \propto \cos(2\pi v' t - \Delta\varphi)$ 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 $\Delta\varphi = 2\pi v' \Delta t'$ 。联立两个 $\Delta\varphi$ 的表达式，可得 $2\pi v (\Delta \frac{S}{c}) = 2\pi v' \Delta t'$ ，解出光速 $c = \frac{\Delta S}{\Delta t'} \cdot \frac{v}{v'}$ 。

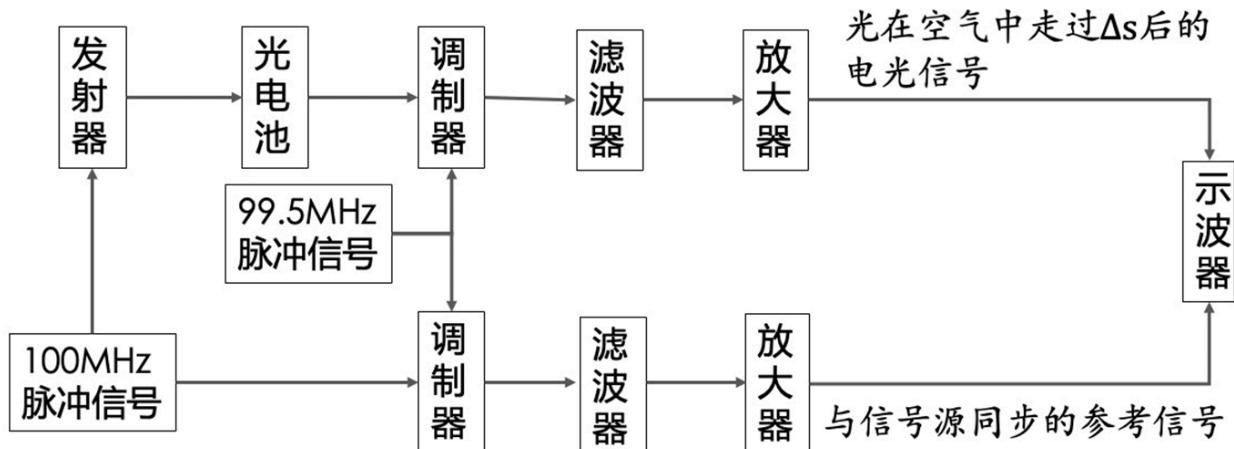


Figure 1: 仪器电路原理图

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 ΔS 和 $\Delta t'$ ，以及已知的 v 和 v' 代入公式 $c = \frac{2(S_2 - S_1)}{\Delta t'} \cdot \frac{v}{v'}$ (或 $c = \frac{\Delta S}{\Delta t'} \cdot \frac{v}{v'}$)，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 v' ）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 李宇晗 桌号 10 $v = 456.19 \text{ kHz}$

次數	s_1/m	s_2/m	$\Delta t/\text{s}$	$c/(\text{m/s})$	平均值
1	3.00×10^{-2}	49.00×10^{-2}	0.630×10^{-6}		
2	14.00×10^{-2}	49.00×10^{-2}	0.700×10^{-6}		
3	5.00×10^{-2}	42.00×10^{-2}	0.680×10^{-6}		
4	8.00×10^{-2}	50.00×10^{-2}	0.685×10^{-6}		
5	7.00×10^{-2}	63.12×10^{-2}	0.700×10^{-6}		
6	15.50×10^{-2}	49.00×10^{-2}	0.715×10^{-6}		

次數	s_1/m	s_2/m	$\Delta t/\text{s}$	
1	70.00×10^{-2}	0.1145×10^{-6}		
2	19.00×10^{-2}	0.265×10^{-6}		
3	2.00×10^{-2}	27.00×10^{-2}	0.400×10^{-6}	12周
4	35.00×10^{-2}	0.525×10^{-6}		
5	43.00×10^{-2}	0.680×10^{-6}		
6	51.00×10^{-2}	0.825×10^{-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)	$c_i (10^8 \text{ m/s})$
1	0.0300	0.4800	0.4500	0.630×10^{-6}	3.132
2	0.0400	0.4700	0.4300	0.700×10^{-6}	2.694
3	0.0500	0.4200	0.3700	0.600×10^{-6}	2.704
4	0.0800	0.5000	0.4200	0.685×10^{-6}	2.689
5	0.0700	0.6312	0.5612	0.700×10^{-6}	3.515
6	0.0550	0.4900	0.4350	0.715×10^{-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 $u_{A(\bar{c}_1)}$ ：

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

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

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

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

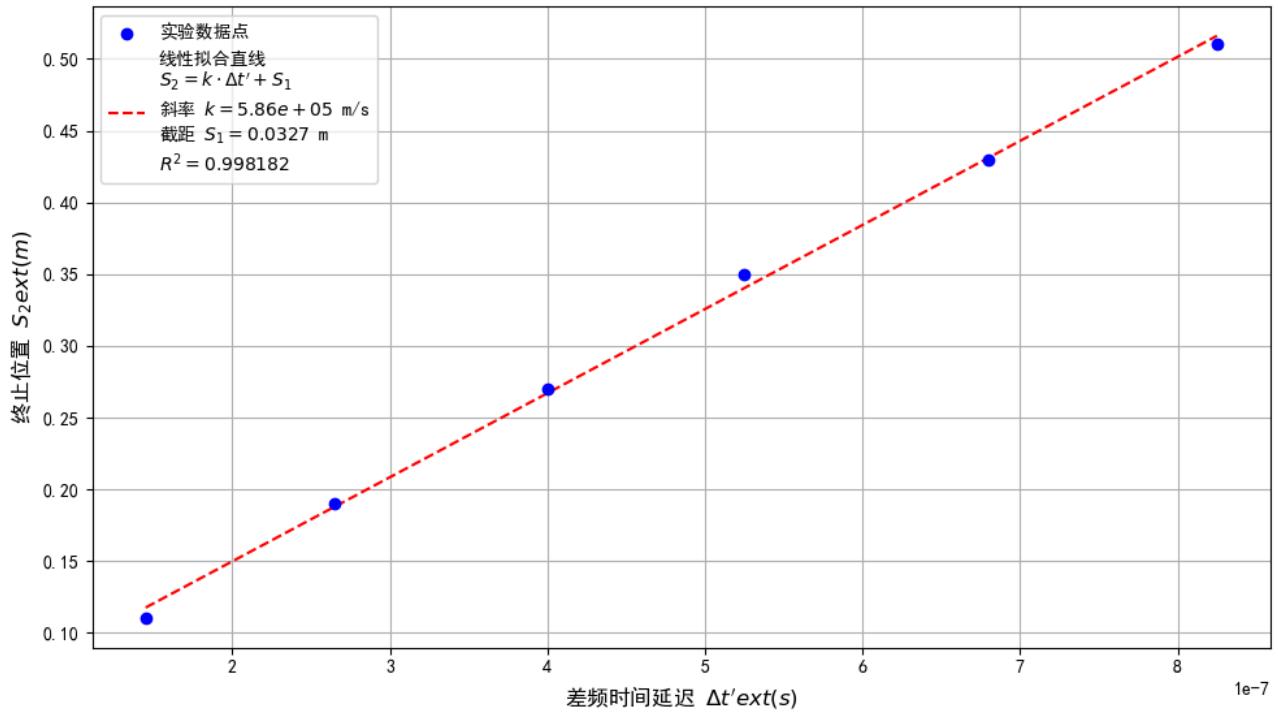
取 $u_{A(\bar{c}_1)} = 0.14 \times 10^8 \text{ m/s}$

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	0.145×10^{-6}	0.1100
2	0.265×10^{-6}	0.1900
3	0.400×10^{-6}	0.2700
4	0.525×10^{-6}	0.3500
5	0.680×10^{-6}	0.4300
6	0.825×10^{-6}	0.5100

光速测量实验（表二）： S_2 vs $\Delta t'$



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：

- 逐次测量法（表一）： $\bar{c}_1 = 2.90 \times 10^8$ m/s, $u_{A(\bar{c}_1)} = 0.14 \times 10^8$ m/s
- 作图法（表二）： $c_2 = 2.57 \times 10^8$ m/s, $u_{A(c_2)} = 0.10 \times 10^8$ 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 $c_0 = 2.998 \times 10^8$ 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： $c = \bar{c}_1 \pm u_{A(\bar{c}_1)} = (2.90 \pm 0.14) \times 10^8$ m/s
- 表二结果： $c = c_2 \pm u_{A(c_2)} = (2.57 \pm 0.10) \times 10^8$ m/s

3. 误差原因分析

• 系统误差：

- 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。
- 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。
- 表二的系统偏差：** 作图法（表二）的拟合截距为 $S_{1'} = 0.0244$ m，而实验设定的 $S_1 = 0.0300$ 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）：

- 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。
- 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 ($\bar{c}_1 = (2.90 \pm 0.14) \times 10^8$ m/s) 的结果相对误差 (3.3%) 远小于作图法 ($c_2 = (2.57 \pm 0.10) \times 10^8$ 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）

- 实验中有可能出现波形假移位，如何克服？

- 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 $T' = \frac{1}{v}$ 时。
- 克服方法：**在本实验中，差频周期 $T' = \frac{1}{4.5619 \times 10^5 \text{ Hz}} \approx 2.19 \mu\text{s}$ 。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 $< 2.19 \mu\text{s}$)，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”。
- 分析影响实验精度的主要因素。**
 - 答：
 - 频率的准确性和稳定性：** v (100 MHz) 和 v' (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 $\frac{v}{v'}$ (约 219 倍) 这个放大系数。
 - $\Delta t'$ 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。
 - ΔS 的测量精度：** S_1 和 S_2 的米尺读数存在视差和估读误差。
- 描述光速测量的其他实验方法。**
 - 答：
 - 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。
 - 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。
 - 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。
 - 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 λ 和频率 f ，利用 $c = \lambda f$ 计算光速。
 - 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。