浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称： 光速的测量

实验桌号： 8

指导教师： _____

班级： _____

姓名： _____

学号： _____ _____

实验日期： 2025 年 10 月 28 日　　**星期** 二 **下午**

（此处填实验选课系统内日期）

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：

情况说明：

一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

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”在实验室内测量光速。

实验原理： 实验的基本思想是：让光源发出的光强度随高频信号 ν（本实验中 $\nu = 100$ MHz）进行周期性调制，其光强可表示为 $I = I_0 + \Delta I_0 \cos(2\pi\nu t)$。此光信号被光电探测器接收后，转换为同频率的电信号 $U(t)$。

1. 相位延迟：设参考信号为 $U_1 = A_1 \cos(2\pi\nu t)$。光波在空气中传播距离 Δs 后被接收器接收，信号 U_2 相对于 U_1 会产生一个时间延迟 $\Delta t = \Delta s/c$。因此，测量信号为 $U_2 = A_2 \cos(2\pi\nu(t - \Delta t)) = A_2 \cos(2\pi\nu t - \Delta\phi)$。其中，$\Delta\phi$ 是由光程差 Δs 引起的相位差：

$$\Delta\phi = 2\pi\nu\Delta t = 2\pi\nu\frac{\Delta s}{c} \tag{1}$$

原理上，通过测量 $\Delta\phi$ 和 Δs，即可求出光速 c：

$$c = \frac{2\pi\nu\Delta s}{\Delta\phi} \tag{2}$$

2. 频率变换：由于高频信号的相位 $\Delta\phi$ 难以直接精确测量，本实验采用“频率变换”的方法将其转换为低频信号的相位差。如图1所示，将高频 ν（100 MHz）的参考信号和测量信号分别与一个频率为 ν''（99.5 MHz）的本地振荡信号进行混频（调制），然后通过低通滤波器，滤去高频的和频分量，仅保留差频分量 $\nu' = \nu - \nu'' = 0.5$ MHz。

处理后的参考信号变为 $U_1' = A_1' \cos(2\pi\nu' t)$，测量信号变为 $U_2' = A_2' \cos(2\pi\nu' t - \Delta\phi)$。关键在于，高频信号的相位差 $\Delta\phi$ 被完整地保留到了低频信号中。

3. 公式推导：我们实际测量的是低频差拍信号 U_1' 和 U_2' 之间的相位差。如图3所示，该相位差 $\Delta\phi$ 在示波器上表现为两波形的时间差 $\Delta t'$。它们的关系是：

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\Delta t'}{T'} \quad \text{其中} T' = \frac{1}{\nu'} \tag{3}$$

联立公式1可得：$\frac{2\pi\nu\Delta s/c}{2\pi} = \frac{\Delta t'}{1/\nu'}$，即：

$$\frac{\nu\Delta s}{c} = \nu'\Delta t' \quad \Longrightarrow \quad c = \frac{\nu}{\nu'}\frac{\Delta s}{\Delta t'} \tag{4}$$

实验中，光程差的变化量为 $\Delta s = 2(s_2 - s_1)$（s_1, s_2 为折光器位置），对应的时间差变化量为 $\Delta t'$。因此，最终的光速计算公式为：

$$c = \frac{2(s_2 - s_1)\nu}{\Delta t'\nu'} \tag{5}$$

实验方法： 本实验在思想方法上主要运用了：

(1) 相位法：将直接测量光传播的微小时间（$\Delta t \approx 10^{-9}$s）这一难题，转化为测量调制信号的相位差（$\Delta\phi$）的问题。

(2) 频率变换：将难以精确测量的高频信号相位差（$\Delta\phi$），通过混频（见图1）和滤波，“平移”到低频信号上，使其表现为易于在示波器上精确读数的时间差（$\Delta t'$）。

(3) 差分测量：实验不测量 Δs 和 $\Delta t'$ 的绝对值，而是测量光程的改变量 $\Delta s = 2(s_2 - s_1)$ 和时间差的改变量 $\Delta t'$。这可以有效消除由仪器内部电路延迟等因素造成的固定系统误差。

(4) 线性回归：通过多次测量不同光程差 Δs_i 及其对应的 $\Delta t'_i$，绘制 $\Delta s - \Delta t'$ 关系图。根据公式4，图线的斜率 $k = \Delta s/\Delta t'$。通过线性拟合求出斜率 k，再代入 $c = k \cdot (\nu/\nu')$ 计算光速，可有效减小随机误差。

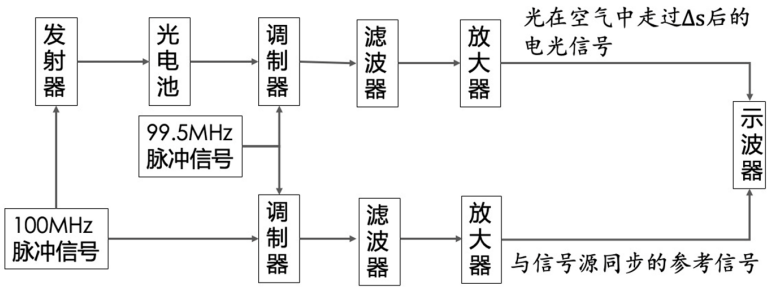


图 1: 仪器原理框图

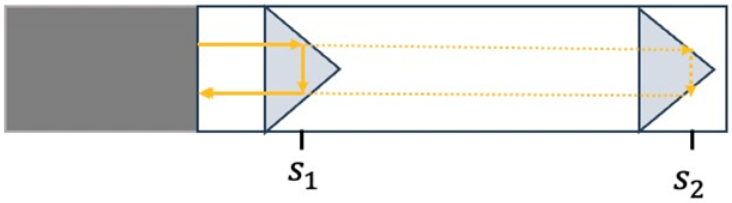


图 2: 光路示意图

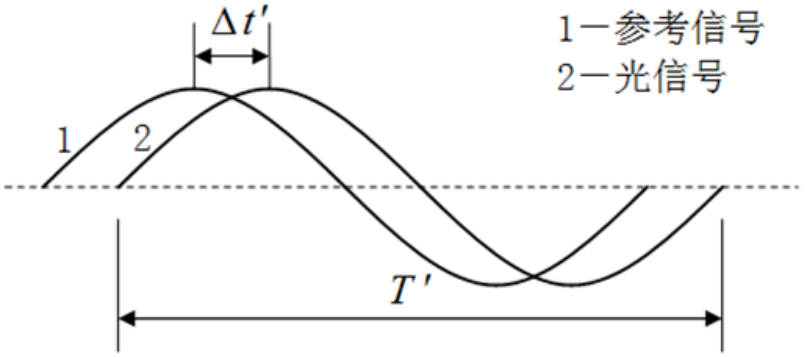


图 3: 示波器上观测到的低频信号波形示意图

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

1. 掌握利用“相位法”和“频率变换法”测量光速的基本原理（见公式1至5）。
2. 学会使用数字示波器，特别是其“Track”（光标）功能，精确测量两个周期信号之间的时间差（$\Delta t'$）。

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：保证从发射器发出的光经平行光管准直后，能被直角折光器（见图2），准确反射回接收器中，以获得稳定且幅值足够大的测量信号。

2. 数据读数：在示波器（见图3）上准确读取时间差 $\Delta t'$。由于信号可能存在噪声，需精确对准波形的同一特征位置（如峰值点），以减小测量误差。

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。）

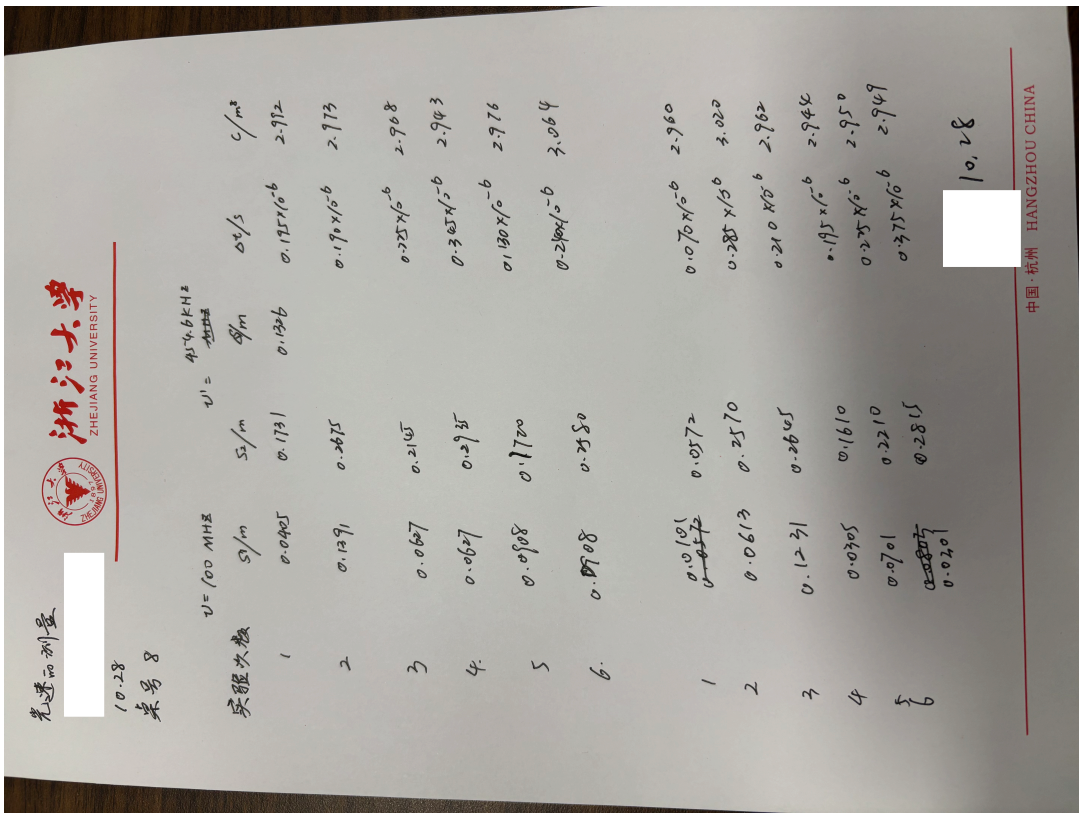


图 4: 原始数据记录

原始数据如图4所示。

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）
将原始数据转化到表格中如表1和表2所示

$$\nu = 100MHz, \nu' = 454.6KHz$$

表 1: 实验数据 (正弦波)

实验序号	1	2	3	4	5	6
S_1/m	0.0405	0.1391	0.0627	0.0627	0.0908	0.0908
S_2/m	0.1731	0.2675	0.2145	0.2935	0.1720	0.2580
$\Delta S/m$	0.1326	0.1284	0.1518	0.2308	0.0812	0.1672
$\Delta t/s$	0.195×10^{-6}	0.190×10^{-6}	0.225×10^{-6}	0.345×10^{-6}	0.130×10^{-6}	0.240×10^{-6}
$C/10^8 m$	2.992	2.973	2.968	2.943	2.976	3.064

根据正弦波的数据，计算光速测量值的平均值 $\bar{C_1}$：

$$\bar{C_1} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} C_i \quad (N = 6)$$

计算得到 $\bar{C_1} = 2.986 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$。

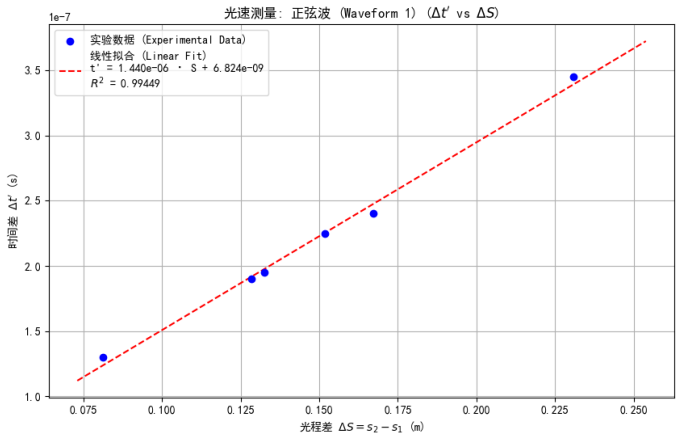


图 5: 正弦波数据线性拟合图像

计算机辅助作图如图5所示，根据斜率计算的光速 $c = \frac{2\nu}{k \cdot \nu'} = 3.056 \times 10^8 m/s$

表 2: 实验数据 (方波)

实验序号	1	2	3	4	5	6
S_1/m	0.0101	0.0613	0.1231	0.0305	0.0701	0.0301
S_2/m	0.0572	0.2570	0.2645	0.1610	0.2210	0.2815
$\Delta S/m$	0.0471	0.1957	0.1414	0.1305	0.1509	0.2514
$\Delta t/s$	0.070×10^{-6}	0.285×10^{-6}	0.210×10^{-6}	0.195×10^{-6}	0.225×10^{-6}	0.375×10^{-6}
$C/10^8 m$	2.960	3.020	2.962	2.944	2.950	2.949

根据方波的数据，计算光速测量值的平均值 $\bar{C}_2$：

$$\bar{C}_2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} C_i \quad (N = 6)$$

计算得到 $\bar{C}_2 = 2.964 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$。

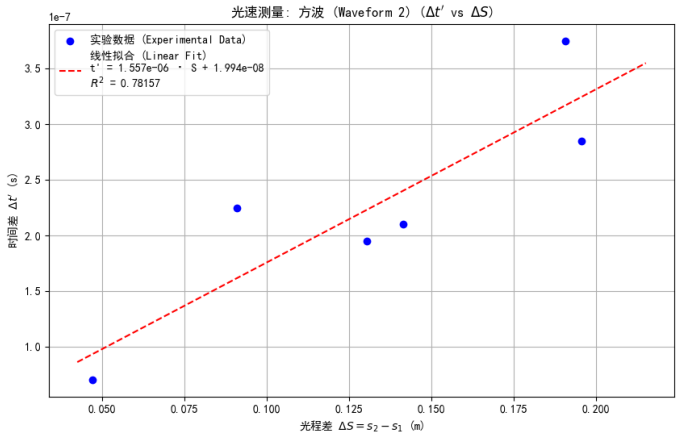


图 6: 方波数据线性拟合图像

计算机辅助作图如图6所示，根据斜率计算的光速 $c = \frac{2\nu}{k\cdot\nu'} = 2.825 \times 10^8 m/s$

2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

相对误差计算： 本实验在空气中进行,光在空气中的速度(标准大气压,20°C)公认值约为 $c_{\mathrm{lit}} = 2.997\times10^8\,\mathrm{m/s}$。我们使用此值作为标准，计算四种处理方法得到的测量结果的相对误差 $\alpha = \frac{|C_{\text{测量值}} - C_{\text{标准值}}|}{C_{\text{标准值}}} \times 100\%$。

(1) **正弦波 (平均值法)**: $\bar{C}_1 = 2.986 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$

$$\alpha_1 = \frac{|2.986 - 2.997|}{2.997} \times 100\% \approx 0.37\%$$

(2) **正弦波 (线性拟合法)**: $C_{\text{fit1}} = 3.0562 \times 10^8\,\text{m/s}$

$$\alpha_2 = \frac{|3.0562 - 2.997|}{2.997} \times 100\% \approx 1.98\%$$

(3) **方波 (平均值法)**: $\bar{C}_2 = 2.964 \times 10^8\,\text{m/s}$

$$\alpha_3 = \frac{|2.964 - 2.997|}{2.997} \times 100\% \approx 1.10\%$$

(4) **方波 (线性拟合法)**: $C_{\text{fit2}} = 2.8251 \times 10^8\,\text{m/s}$

$$\alpha_4 = \frac{|2.8251 - 2.997|}{2.997} \times 100\% \approx 5.74\%$$

比较上述结果，使用正弦波信号和平均值法得到的 $\bar{C}_1$ 相对误差最小。理论上，线性拟合法能更好地排除随机误差，但本次实验中拟合法的相对误差均大于平均值法，尤其是方波的拟合结果偏差较大，这可能和我当时使用实验仪器的时候，因为发现把接收器调的太远会导致示波器上图像发生偏转，因而选用的 ΔS 都比较小。

综合考虑，选取正弦波平均值 $\bar{C}_1$ 作为本次实验的最佳结果。**最终测量结果：**$C = (2.986 \pm 0.011) \times 10^8\,\mathbf{m/s}$。

误差来源分析：

(1) **系统误差：**

- **仪器频率不准：**实验公式 $c \propto \nu/\nu'$。高频振荡器和本振的频率漂移或不准确，会直接导致 c 的测量产生系统偏差。
- **空气折射率：**实验测量的是光在空气中的速度 $c_{\text{空气}}$，而公认值 $c_0 = 2.9979... \times 10^8\,\text{m/s}$ 是真空中的光速。空气折射率 $n \approx 1.0003$，这导致 $c_{\text{空气}} \approx c_0/n$，本身就存在约 0.03% 的系统差异。

(2) **随机误差：**

- **时间差 $\Delta t'$ 读数：**这是最大的随机误差来源。示波器上的波形可能存在噪声、抖动，或因强度变化而变形。使用光标（Track）对准波形的同一特征点（如峰值或过零点）时存在主观判断误差。方波的上升沿虽然陡峭，但也可能存在振铃，导致对齐困难。
- **位置 ΔS 读数：**在导轨上读取折光器位置 s_1 和 s_2 时，存在估读误差和视差。
- **光路调节：**光路未完全对准，可能导致接收到的信号强度弱、信噪比低，增大 $\Delta t'$ 的读数难度。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验利用光调制法，通过测量光程差 Δs 引起的调制信号相位差 $\Delta\phi$ 来计算光速。巧妙运用频率变换技术，将高频信号相位差转换为易于测量的低频信号时间差 $\Delta t'$。实验操作的关键在于精密调节光路和准确读取示波器上的时间差 $\Delta t'$。通过数据处理（平均值法和线性拟合法）得到光速测量值，并与公认值比较分析误差。

四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

1. 实验中可能出现波形假移位，如何克服？

波形假移位通常指由于光程差 Δs 变化较大，导致低频信号的时间差 $\Delta t'$ 的变化量超过了一个周期 T'，从而在示波器上观察到的相位差 $\Delta\phi$ (或 $\Delta t'$) 可能是 $\Delta\phi + 2k\pi$ (k 为整数)。这会导致计算出的光速出现较大偏差。

克服方法：

(1) **步进测量**：改变光程 Δs 时，采用较小的步长，确保每次 $\Delta t'$ 的变化量远小于一个周期 T'。连续观察 $\Delta t'$ 的变化趋势，判断是否发生了整周期的跳变。

(2) **粗略估算验证**：利用光速的公认值 $c_{\text{lit}} \approx 3 \times 10^8\,\text{m/s}$，根据公式 $c = \frac{\nu}{\nu'}\frac{\Delta s}{\Delta t'}$ 估算 $\Delta t'$ 的预期变化量 $\Delta t'_{\text{expected}} = \frac{\nu}{\nu'}\frac{\Delta s}{c_{\text{lit}}}$。将测量值 $\Delta t'_{\text{measured}}$ 与预期值比较，如果两者相差接近 T' 的整数倍，则说明发生了假移位，需要对测量值进行修正（加上或减去 kT'）。

2. 分析影响实验精度的主要因素。

影响本实验精度的主要因素包括：

(1) **时间差 $\Delta t'$ 的测量精度**：这是最主要的误差来源。示波器读数的分辨率、波形噪声、触发稳定性以及操作者使用光标对齐波形特征点的主观误差都会影响 $\Delta t'$ 的准确性。

(2) **频率 ν 和 ν' 的准确性和稳定性**：信号发生器的频率漂移或标称值与实际值不符，会直接引入系统误差，因为 c 的计算依赖于 ν/ν' 的比值。

(3) **光程差 ΔS 的测量精度**：包括导轨标尺的最小分度值、读数时的估读误差和视差。虽然是差分测量，但 s_1 和 s_2 的读数误差会累积。

(4) **光路准直情况**：光路未对准会导致接收信号弱、信噪比低，增加 $\Delta t'$ 读数难度和误差。

(5) **环境因素**：空气温度、湿度、气压的变化会引起空气折射率 n 的微小变化，从而影响光在空气中的实际速度 $c_{\text{air}} = c_0/n$。

其中，$\Delta t'$ 的测量精度通常是决定整体精度的关键瓶颈。

3. 描述光速测量的其他实验方法。

(1) **天文学方法**：如罗默利用木卫蚀现象，或布拉德雷利用光行差现象，都从天文观测中推算了光速。

(2) **地面飞行时间法**：斐索的旋转齿轮法和傅科/迈克尔逊的旋转镜法，通过测量光往返已知距离的时间来确定光速，后者精度更高。

(3) **电磁波共振法**：利用微波在已知尺寸谐振腔中的共振频率和波长关系 $c = \lambda f$ 来计算光速。

(4) **现代激光干涉法**：通过独立精确测量激光的频率 f（比对原子钟）和波长 λ（比对长度标准），利用 $c = \lambda f$ 计算光速，是目前精度最高的方法，也是光速定义的基础。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。

3.“实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。

4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制