

相位差法测量光速

光速是物理学中最重要的基本常数之一，也是各种频率的电磁波在真空中的传播速度，许多物理概念和物理量都与它有密切的联系，光速值的精确测量将关系到许多物理量值精确度的提高，所以长期以来对光速的测量一直是物理学家十分重视的课题。许多光速测量方法巧妙的构思、高超的实验设计一直在启迪着后人的物理学研究。光的偏转和调制，则为光速测量开辟了新的前景，并已成为当代光通信和光计算机技术的课题。

【目的与要求】

1. 掌握相位法测量光的传播速度。
2. 了解调制和差频技术。
3. 熟悉和掌握数字存储示波器的使用。

【原理】

采用频率为 f 的正弦型调制波，调制波长为 $0.65\mu\text{m}$ 的载波的强度，调制波在传播过程中其位相是以 2π 为周期变化的，表达式为：

$$I = I_0 + \Delta I_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f(t - \frac{x}{c})) \quad (1)$$

如光接收器和发射器的距离为 Δs ，则光的传播延时为 $\Delta t = \frac{\Delta s}{c}$ ，其中 c 为光速。在 Δs 的距离上产生的相位差为 $\Delta\phi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t = 2\pi \cdot \frac{\Delta s}{c}$ 。

被光电检测器接收后变为电信号，该电信号被滤除直流后可表示为：

$$U = a \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t - \Delta\phi) \quad (2)$$

可得光速：

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta\phi} \cdot 2\pi \cdot f \quad (3)$$

如果光的调制频率非常高，在短的传播距离 Δs 内也会产生大的相位差 $\Delta\phi$ 。如果光的调制频率 $f = 60.000\text{MHz}$ ，当 $\Delta s = 5\text{m}$ 时，就会使光信号的相位移达到一个周期 $\Delta\phi = 2\pi$ 。然而高频信号的测量和显示是非常不方便的，普通的教学示波器不能用于高频信号的相位差测量。

设在接收端还有一个高频信号 $f' = 59.900\text{MHz}$ 作为参考信号，表示为：

$$U' = a' \cdot \cos(2\pi \cdot f' \cdot t) \quad (4)$$

将 U 和 U' 相乘得到：

$$\begin{aligned} U \cdot U' &= [a \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t - \Delta\phi)] \cdot [a' \cdot \cos(2\pi \cdot f' \cdot t)] \\ &= \frac{1}{2} aa' \cos[2\pi \cdot (f - f') \cdot t - \Delta\phi] + \frac{1}{2} aa' \cos[2\pi \cdot (f + f') \cdot t - \Delta\phi] \end{aligned}$$

可见经乘法器后将得到和频 $f + f' = 60.000 + 59.900 = 119.000\text{MHz}$ 及差频

$f_1 = f - f' = 60.000 - 59.900 = 100\text{KHz}$ 的混合信号。将该混合信号通过一个中心频率为 100KHz 、带宽为 10KHz 的滤波器后，和频信号将被滤除，差频信号将保留。上式将变为： $U_1 = a_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t - \Delta\phi)$

该信号频率仅为 100KHz ，很容易被低频示波器观测到。此式中 $\Delta\phi$ 没有被改变与 (2) 式相同， $\Delta\phi$ 与信号 f_1 的传播时间 Δt_1 相关， Δt_1 可以从示波器上观测到。设 f_1 的周期为 T_1 ，则：

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot f_1 \cdot \Delta t_1 = 2\pi \cdot \frac{\Delta t_1}{T_1} \quad (5)$$

将 (5) 式带入 (3) 式得光速：

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t_1} \cdot T_1 \cdot f \quad (6)$$

根据上面的条件：

$$T_1 = \frac{1}{100\text{KHz}} = 10\mu\text{s}, \quad f = 60.000\text{MHz}.$$

测得 Δs ， Δt_1 即可由 (6) 式计算出光速。

使用比较法测量光在非空气介质中的传播速度 c_m ，如图 1 所示

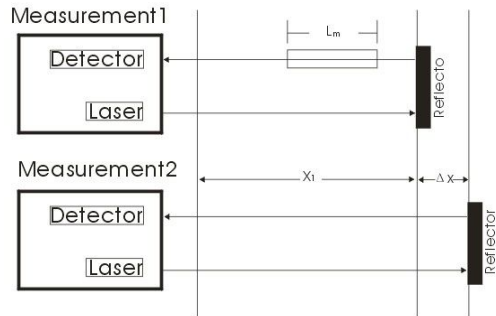


图 1 比较法测量光在不同介质中传播速度

在光路中加入玻璃或水等介质（长度为 L_m ）进行第一次测量，总光程为 L_1 ，传播时间为 t_1 ，反光棱镜位置为 x_1 ；第二次测量时，将介质拿掉，信号的相位会发生变化，移动反光棱镜到位置 x_2 处（即移动距离为 $\Delta x = x_2 - x_1$ ），使测量信号相位回到第一次测量的位置，即使光的传播时间和第一次相同为 t_1 ，此时总光程为 $L_1 + 2\Delta x$ ；由此可以得出光在空气中传播距离 $L_m + 2\Delta x$ 和在介质中传播距离 L_m 所需时间相同。

由上述可以得出介质的折射率：

$$n_m = \frac{2\Delta x + L_m}{L_m} \quad (8)$$

因此介质中的光速为：

$$c_m = \frac{c}{n_m} \quad (9)$$

【仪器】

DHLV-2 光速测定仪、UTD2102CEX 数字存储示波器。

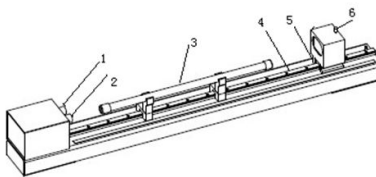


图2 光速测定仪测试架

1. 激光发射装置，
2. 光电探测装置，
3. 水或石英玻璃装置，
4. 直线导轨，
5. 滑块及反射棱镜，
6. 棱镜调节螺杆

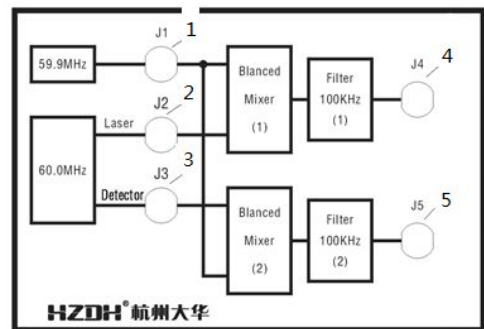


图3 光速测定仪面板图

1. J1: 59.9MHz 参考频率信号输出，
2. J2: 60MHz 调制频率信号输出，
3. J3: 60MHz 光电接收信号输出，
4. J4: 100KHz 参考信号输出，
5. J5: 100KHz 测量信号输出

【实验内容与步骤】

实验装置如图 2 和图 3 所示。

1. 熟悉数字示波器主要旋钮的功能，观测光速测定仪面板图中各输出端口的信号。观测光速测定仪面板图中 J1 和 J2 信号的乘积，了解调制和差频技术。

2. 测量光在空气中的传播速度 c_a

(1) 参考信号输出 J4 接示波器通道 1，测量信号输出 J5 接示波器通道 2。

(2) 示波器设置：触发信号设置为 CH1。

(3) 光路调节：棱镜全程滑动时，反射光完全射入接收端，从示波器上观察测量信号，全程幅度变化小于 1V。一般情况调节棱镜仰角便可将光路调合适。

(4) 建议用频率计测量参考信号和测量信号的频率，因为晶振是有误差的，得到的 100K 信号往往有近 1% 的误差，这样的话用实测频率就会减小测量误差。

(5) 用测量时间差法测空气中光速：通过移动滑块及反射棱镜的位置，用示波器测量相应测量信号与参考信号的时间差，改变滑块及反射棱镜的位置重复测量 6 次，测量结果记入表 1。

(6) 用测量相位差法测空气中光速：通过移动滑块及反射棱镜的位置，测量相应测量信号与参考信号的相位差，多次测量 6 次取平均，测量结果记入表 2。

3. 测量光在水和石英玻璃中的光速

(1) 将待测样品水和石英玻璃棒分别安放在测试架上，样品放在激光返回的光路上，尽可能靠近光电探测装置，移动滑块及反射棱镜至靠近待测样品，记下当前参考信号和测量信号的时间差 Δt_1 ，记下滑块及反射棱镜的位置 x_1 。重复测量 6 次。

(2) 将待测样品取下，滑动滑块及反射棱镜使得参考信号和测量信号的时间差等于步骤 (1) 中的 Δt_1 ，记下滑块及反射棱镜的位置 x_2 。重复测量 6 次。

【数据处理与分析】

1. 用测量时间差法测空气中光速：用图解法计算光在空气中的传播速度 c_a 。并与公认值

$c_0 = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ 比较，计算百分误差。

- 2. 用测量相位差法测空气中光速：用式（3）计算在空气中光速的平均值和不确定度。
- 3. 计算光在石英玻璃中的传播速度和折射率的平均值和不确定度。
- 5. 计算光在水中的传播速度和折射率的平均值和不确定度。

数据记录参考表格如下：

表 1 光在空气中传播速度数据表（测量时间差法）

编号	测量信号频率 f/kHz	$T_1/\mu\text{s}$	反射棱镜位置 x/cm	时间差 $\Delta t_1/\mu\text{s}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

表 2 光在空气中传播速度数据表（测量相位差法）

编号	相位差为 0° 时反射棱镜位置/ cm	相位差为 90° 时反射棱镜位置/ cm
1		
2		
3		
4		
5		
6		

表 3 光在石英玻璃(或水) 中传播速度数据表

编号	测试样品长度 L_m/cm	反射棱镜的位置 x_1/cm	反射棱镜的位置 x_2/cm
1			
2			
3			
4			

5			
6			

【预习思考题】

1. 如何用数字示波器测量两信号的时间差？
2. 用比较法测量光在非空气介质中的传播速度时，介质棒应如何放置？
3. 如何准确判断相位差？

【分析讨论题】

1. 试综合分析光速测量误差产生的原因。

附图：

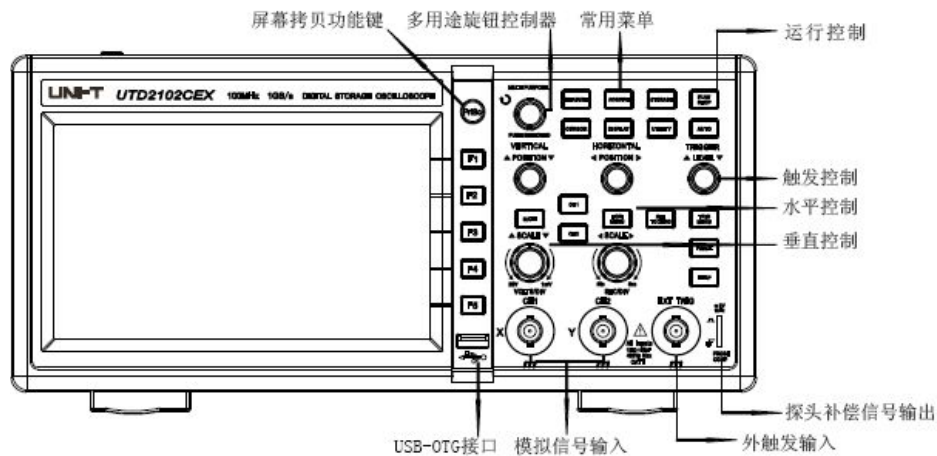


图 UTD2102CEX 数字示波器的面板

表 1 UTD2102CEX 数字示波器面板的中英文对照表

英文面板	中文面板	英文面板	中文面板
SELECT	选择	SET TO ZERO	置零
MEASURE	测量	MENU	菜单
ACQUIRE	获取	50%	50%
STORAGE	存储	FORCE	强制触发
RUN/STOP	运行/停止	HELP	帮助
COARSE	粗调	VERTICAL	垂直
CURSOR	光标	HORIZONTAL	水平
DISPLAY	显示	TRIGGER	触发
UTILITY	辅助功能	◆POSITION	垂直位置
AUTO	自动设置	◀POSITION▶	水平位置
CH1	CH1	LEVEL	触发电平
CH2	CH2	SCALE	标度
MATH	数学	VOLTS/DIV	伏/格
REF	参考	SEC/DIV	秒/格
OFF	关闭	PrtSc	屏幕拷贝

1、用示波器观察相关波形和测量相关参数：

- (1) 按下示波器面板上自动设置按钮“auto”，在示波器上显示出稳定的波形，并调节垂直方向的灵敏度（Vertical）和水平方向（Horizontal）的扫描旋钮，使波形大小适中。
- (2) 测量波形的电压和时间参数：按“measure”，测量频率、Vpp、周期等。

2、应用Cursor光标功能进行时间差测量：

- (1) 按下“cursor” 按键以显示光标测量菜单；
- (2) 按下“F1” 键菜单操作键设置光标类型为时间；
- (3) 旋转多用途旋钮控制器“multi purpose”将光标1置于需要计时的起点处，按下“select”，使光标2被选中；
- (4) 然后再旋转多用途旋钮控制器，将光标2置于需要计时的终点处，光标菜单中则自动显示 ΔT 值，即该两点的时间差；
- (5) 按下“cursor” ，选择关闭光标。

3、用示波器观察李萨如图形：

- (1) 按下“display” 按键出现显示菜单；
- (2) 按下“F2” 键将格式改为“X-Y”， 在示波器上显示利萨如图形，调节两信号垂直方向的灵敏度（Vertical），使图形大小适中。

4、通过设置采样方式减少显示噪声

如果被测信号上叠加了随机噪声，导致波形过粗或毛刺。可以应用平均采样方式，去除随机噪声的显示，使波形变细或光滑，便于观察和测量。具体操作是：按面板菜单区域

采样“**acquire**”按钮，显示采样设置菜单。按F1键菜单操作键设置获取方式为平均状态，然后按多用途键调整平均次数。

5、用示波器观察两信号运算结果：

按下“**math**” 键出现显示菜单，选择需要运算的算符，及出现运算结果。