

调制波法测量光速

崔雅静 11号

西南交通大学物理实验中心

实验背景

1. 光在真空中的速度是物理学中一个基本常数之一。

$$c_0 = 299792458 \text{ m/s}$$

2. 1983年10月在巴黎召开的第十七届国际计量大会上通过了“**米**”的新定义：“米是1/299792458秒的时间间隔内光在真空中行程的长度”。

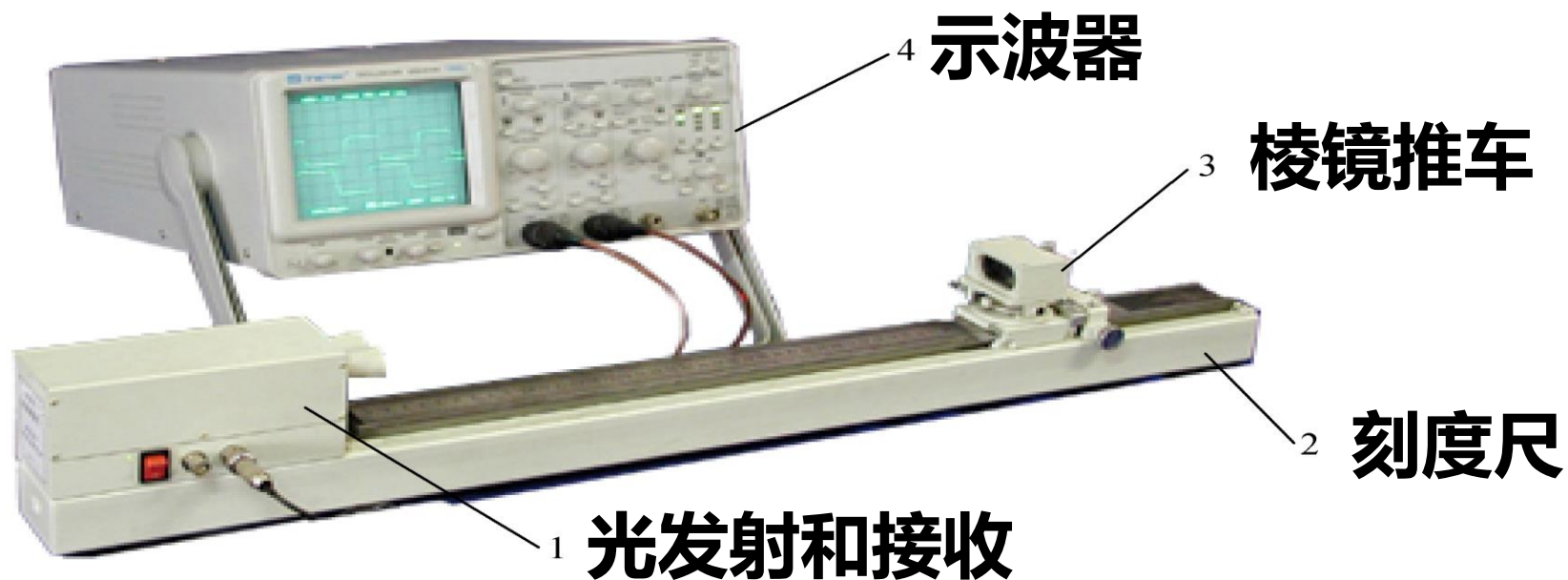
3. 光速的测定最终推动了Einstein相对论的发展。

4. 精确测量光速的值具有非常重要的物理意义和应用价值。

真空中光速的精密测量，沈乃澂，物理，45(12), 790 (2016)

实验目的

1. 掌握利用**调制波**测量光速的原理及方法。
2. 进一步熟悉**逐差法**处理实验数据的方法。



实验原理

1. 光速测量的基本原理：

$$c = \lambda \cdot f$$

技术困难：

(1) 可见光频率的量级： 10^{14} Hz

(2) 可见光波长的量级： 100 nm

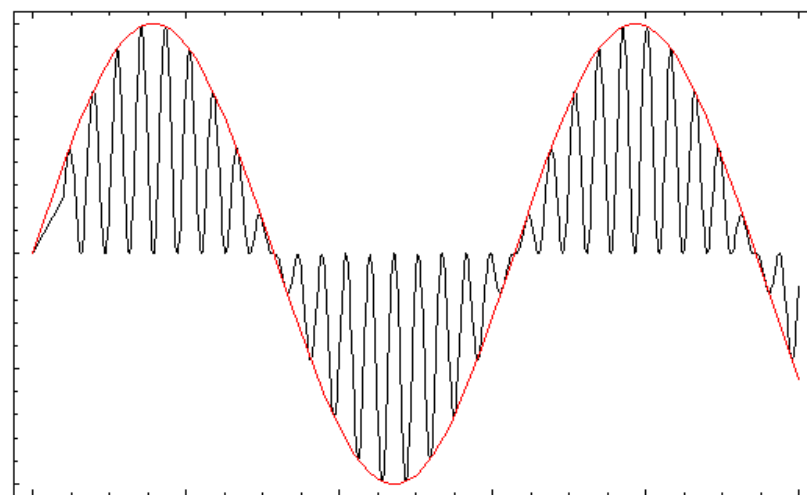
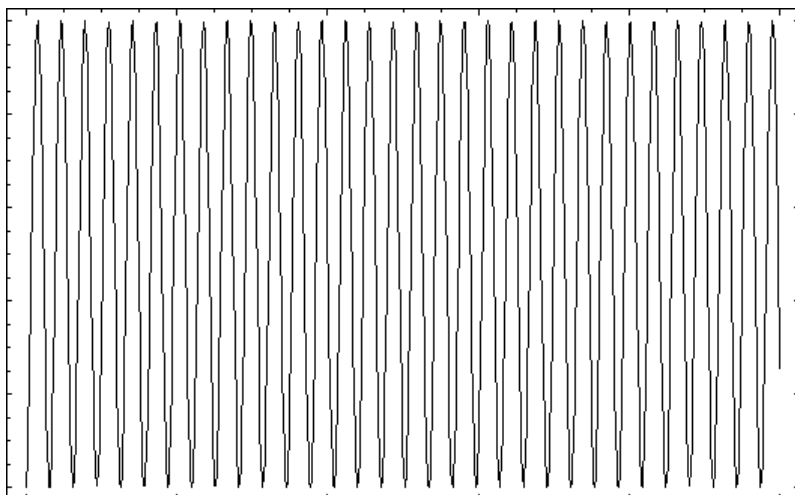
直接测量这两个量不太现实！

实验原理

2. 频率测量的转移:

调制： 周期性地在被测信号上做特殊、可识别的标记，直接测量对象是**标记**，而非被测信号，这种方法叫“调制”。

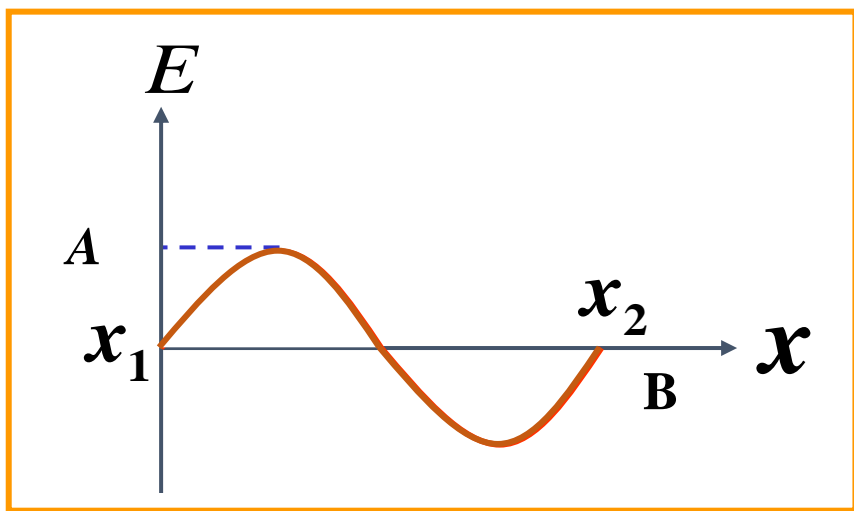
在高频的光波上叠加一个低频 (~ 100 MHz) 的信号。



低频信号频率的测量：**频率计**、示波器。

实验原理

3. 波长测量的转移:



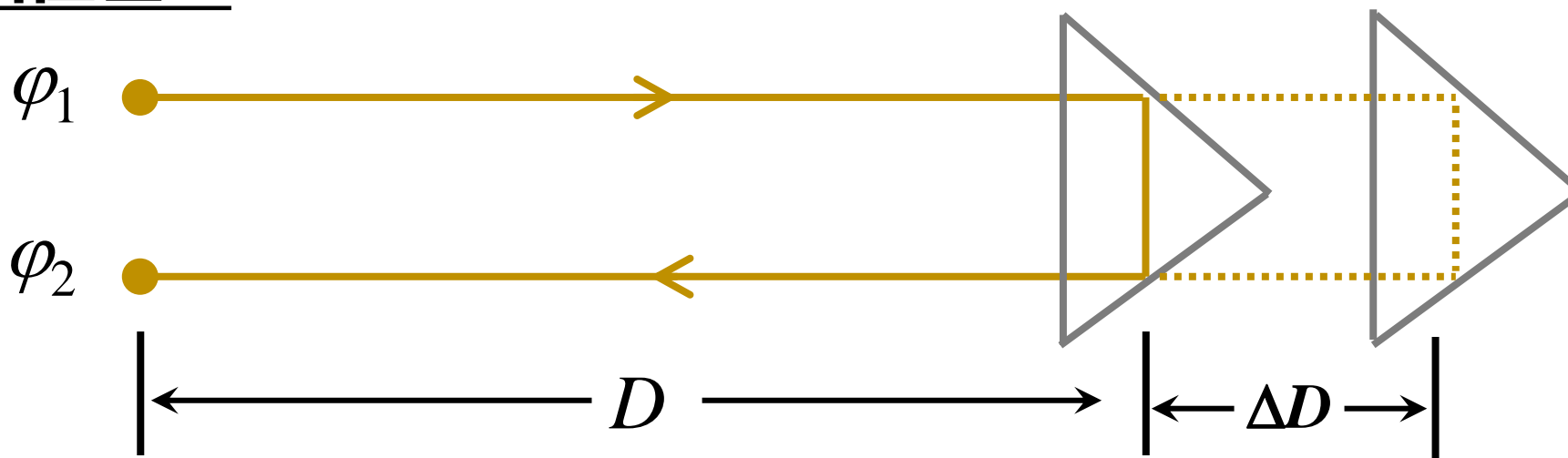
$$\lambda \longrightarrow 2\pi$$

将波长测量转移到**相位差**的测量上。

相位差测量：比相计、**示波器**。

实验原理

4. 测量相位差：



$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2D \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\varphi_2^\Delta - \varphi_1 = 2(D + \Delta D) \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$$



$$\varphi_2^\Delta - \varphi_2 = 2\Delta D \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$$

$\varphi_2^\Delta - \varphi_2$: 示波器测量

ΔD : 标尺测量

实验原理

5. 100 MHz信号相位差的测量:

100 MHz



10 ns

测量精度

通常用的相位计开关时间: $\sim 40\text{ns}$

工作速度

测相系统的稳定性

电路分布参量造成的附加相移

如何克服?



差频法

实验原理

6. 差频法测量相位差：

将两频率不同的正弦波同时作用于一个非线性元件（如光发射器、探测器等）时，其输出端包含有两个信号的差频成分。

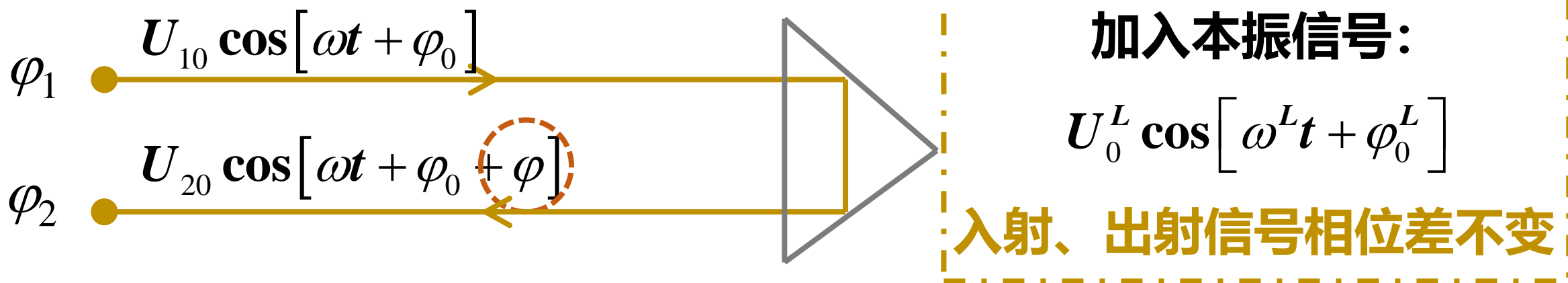
三个频率成分

激光频率： 10^{14}Hz

调制波频率 ω ： 约100MHz

仪器的本振频率 ω^L ： 约100MHz

实验原理



入射信号 φ_1 与本振信号混频后所得差频信号为:

$$A_2 U_{10} U_0^L \cos[(\omega - \omega^L)t + (\varphi_0 - \varphi_0^L)]$$

被测返回信号与本振信号混频后所得差频信号为:

$$A_2 U_{20} U_0^L \cos[(\omega - \omega^L)t + (\varphi_0 - \varphi_0^L) + \varphi]$$

实验原理

6. 差频法测量相位差：

将两频率不同的正弦波同时作用于一个非线性元件（如光发射器、探测器等）时，其输出端包含有两个信号的差频成分。

三个频率成分

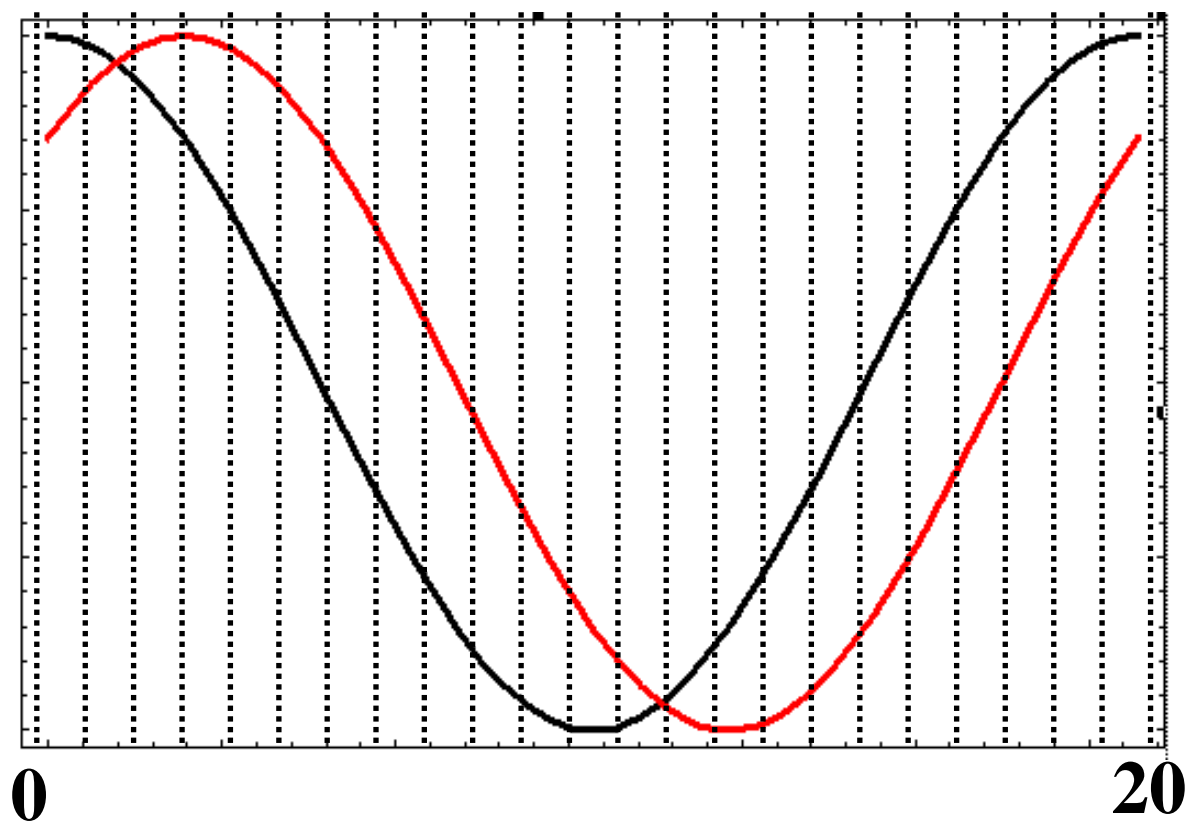
激光频率： 10^{14}Hz

调制波频率 ω ： 约100MHz

仪器的本振频率 ω^L ： 约100MHz

实验原理

7. 示波器测量相位差：



定标：20格 $\longrightarrow 2\pi$

$$\varphi_2^{\Delta} - \varphi_2 = 2\Delta D \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = 3 \times \frac{2\pi}{20}$$

实验原理

8. 光速的间接测量:

$$c = \lambda \cdot f$$

f : 频率计测量 (~100MHz)

λ : 示波器测差频信号 (~ 400 KHz) 的相位差

实验内容

1. 等距离测量调制波波长法：

棱镜小车在标尺上等距离移动，每隔5cm测量一个位相值，共测量8个数据，用表格形式（注意单位和有效数字）列出所有原始数据。

棱镜小车位置 x_i (cm) ↵	测相波形平移量 φ_i (小格数)↵	棱镜小车位置 x_i (cm) ↵	测相波形平移量 φ_{i+4} (小格数)↵	$\Delta\varphi = \varphi_{i+4} - \varphi_i$ (小格数)↵
5.00↵	0.0↵	25.00↵	↵	↵
10.00↵	↵	30.00↵	↵	↵
15.00↵	↵	35.00↵	↵	↵
20.00↵	↵	40.00↵	↵	↵

$\overline{\Delta\varphi} =$ _____ (单位)， $\overline{\lambda} =$ _____ (单位) $c =$ _____ (单位) ↵

逐差法求出相位差的平均值

实验内容

2. 等相位测量调制波波长法：

棱镜小车在标尺上移动，使示波器屏幕上**相位移动量相等**，每隔两小格测量一个标尺值，用表格形式（注意单位和有效数字）列出所有原始数据。

测相波形平移量 φ_i (小格数) ↗	棱镜小车位置 x_i (cm) ↗	测相波形平移量 φ_i (小格数)↗	棱镜小车位置 x_{i+4} (cm) ↗	$\Delta x = x_{i+4} - x_i$ (cm)↗
0.0↗	↗	8.0↗	↗	↗
2.0↗	↗	10.0↗	↗	↗
4.0↗	↗	12.0↗	↗	↗
6.0↗	↗	14.0↗	↗	↗

$\overline{\Delta x} =$ _____ (单位), $\overline{\lambda} =$ _____ (单位) $c =$ _____ (单位) ↗

逐差法求出变化相同相位时距离的平均值

实验内容

3. 分别计算两种方法的相对误差：

$$E = \frac{c - c_0}{c_0}$$

$$c_0 = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

说明哪种方法的相对误差较小！

思考

1. 为什么不直接选用一个较低的调制波频率?
2. 光速测量的精度主要受哪些因素的限制?

$$c = \lambda \cdot f$$

幅度误差

照准误差

光源噪声

° 12°

实验科学与技术

2007年 12月

差频相位法测光速的数据处理分析^{*}

孙世志^{**}

(大连理工大学物理系, 辽宁 大连 116023)

摘要: 利用调制波测量光速的关键在于测量调制波的波长, 实验中采用相位差法测调制波的波长。通过对实验数据的处理分析, 可知调制波的频率对测量误差基本上没有影响, 测量误差主要是来源于波长的测量误差。

关键词: 差频; 相位法; 光速; 数据处理

注意事项



1. 开始实验不盲目，先整理好**思路**再开始
2. 实验开始后严格按步骤进行实验，**不焦躁**
3. 实验中遇到问题，认真思考，根据现象排查原因
4. 纪录数据时考虑好**有效数字的位数**
5. 不用铅笔、橡皮
6. 独立完成实验，允许相互探讨