

激光用于引力波探测的研究*

——双激光光源法及同步积累法

吕大炯 王国宗 高建国

(中国科学院物理研究所)

一、引言

广义相对论的提出已有半个多世纪了。然而在过去相当长的一段时间内,对于它的观察检验,仅限于所谓三大验证。这是因为对于地球上的实验条件,广义相对论所预言的效应是极其微弱的。

近来,由于科学技术的发展,给研究万有引力本质的实验工作提供了新的可能。在这类工作中,较为活跃的应当属于探测引力波的研究。

1969年,韦伯宣布他测到来自银河系中心发出的引力波信号。由于引力辐射的存在是广义相对论具有决定性的预言,因此,他的工作引起了广泛的注意。尽管现在已倾向于判定韦伯收到的信号不是引力波,但却促使人们认识到了实验检验引力波理论的现实性。

当前,关于探测引力波的理论方案很多,正在设计和建造的探测器种类也不少,其中较为现实的大致有两类:一是利用激光干涉的方法(探测两个分离质量的相对位移);另一是低温下的韦伯改进型(探测大质量物体的共振效应)。

本文所研究的探测器即属于第一类方案。

二、问题的提出

引力波的存在是一种非牛顿的效应。最初它是由广义相对论推导出来的。在广义相对论中,爱因斯坦的场方程为

$$R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij} \quad (1)$$

而空间距离元 dl 可写成

$$dl^2 = \left(g_{ij} - \frac{g_{0i}g_{0j}}{g_{00}} \right) dx^i dx^j \quad (2)$$

其中 g_{ij} 是度规张量。在引力波的情况下(即真空中弱

引力场的情况),括号中的第二项为零。而 g_{ij} 通过伽里略度规张量 δ_{ij} 和表征引力波的小的修正项 h_{ij} 之和来表示。对于两个检测粒子的情况, dl 的表示式为

$$dl^2 = (1 + h) dl_0^2$$

积分上式,并且进行简单的变换,我们得到两个物体在引力波作用下的相对位移量为

$$\Delta l = l - l_0 = \frac{h}{2} l_0 \quad (3)$$

式中, Δl ——两个检测粒子的相对位移;

h ——平直空间的度规偏差,它由引力波源所决定;

l_0 ——两个检测粒子之间的距离。

在用激光干涉仪探测引力波的情况下, l 为干涉仪臂的长度, Δl 为干涉仪臂的相对位移或振幅。

由于由引力波源所决定的 h 的量极小(对于不同的引力辐射源,理论上估计的 h 的值不同),因此 Δl 同样是极其微小的(当然,通过增加 l 可以增加 Δl)。为了使引力波探测器能够探测如此弱小的信号,必须设法降低探测器的噪声水平。

对于应用激光干涉仪原理的引力波探测器,当激光功率较高时,它的噪声主要是由于量子涨落噪声所引起的,热噪声可以不予考虑。此时,表示量子涨落噪声极限的等效噪声位移,可由下式表示:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{B h \nu}{p \eta} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中, B ——检测系统的频带宽度;

$h\nu$ ——光子能量;

η ——硅光敏三极管的量子效率;

p ——激光功率;

λ ——激光波长。

从式(4)可知,在带宽和硅光敏三极管的量子效率

* 1975年3月12日收到。

一定时,等效噪声位移和激光功率的平方根成反比。提高单模稳频激光功率可以降低等效噪声位移。为此,一般是用加长激光管的长度来获得较高的增益。此时出现的多模,通过使用选模技术选出单模。对于输出为多模的激光器在这里则无法直接应用^[1],因为它在干涉仪的输出中会产生外差噪声。但是,当激光管的长度增加到一定程度,会使纵模间隔变得很狭窄,给选模带来困难。因此激光功率的进一步提高就会受到限制。

其次,在一般情况下,要求被测信号和噪声具有相同的数量级。但若信号小于噪声,则我们就必须采用一种方法,能从弱小信号和强噪声的混合中将前者“提取”出来。

根据以上提出的问题,为了进一步提高探测器灵敏度,我们进行了双激光光源的原理性实验;同时,为了使探测器能够检测比噪声更为弱小的信号,我们又进行了同步积累法的模拟实验。以下分别加以叙述。

三、双激光光源法的原理性实验

1. 原理

若在极微级测量仪^[1]中采用两台激光器以代替一台激光器,而它们发出的光束仍然射到同一台干涉仪上,则可以分别得到相应于每台激光器的光束有两组干涉条纹,而电桥两臂的两个硅光敏三极管中的每一个现在也被两个并联的硅光敏三极管所代替。

光子的涨落噪声服从统计误差规律,即信号正比于事例数 N (在此即入射的光子数);而涨落噪声正比于 \sqrt{N} (均方误差);信噪比则正比于 $N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$ (相对误差的倒数)。对于两台激光器是分别入射在不同的一对硅光敏三极管上,因此避免了拍频现象。但此时总事例数为 $(N_1 + N_2)$,信号正比于 $(N_1 + N_2)$;涨落噪声正比于 $\sqrt{N_1 + N_2}$;信噪比则正比于

$$(N_1 + N_2)/\sqrt{N_1 + N_2} = \sqrt{N_1 + N_2}.$$

当 $N_1 \approx N_2$ 时,则信噪比提高 $\sqrt{2}$ 倍,这和一台单模稳频激光器的功率提高2的因子所得的结果是一样的。

2. 实验装置

双激光光源法原理性实验的装置如下所述:我们采用两层泡沫塑料和两块钢板交替放置的减震台,它的纵向共振频率为3赫芝,横向共振频率为2赫芝。由于用钢板作为干涉仪的桌面,因此,整台干涉仪的温度是均匀的。

激光器采用腔长为150毫米的半内腔式带有压电陶瓷稳频的氦-氖激光管。一只激光管的功率为0.13毫瓦,另一只为0.05毫瓦。干涉仪则为改进的迈克尔逊^[1]。接收元件采用3DU2D硅光敏三极管。用标准

灯、干涉滤光片和XY记录仪进行成对精选(暗电流^[1]小于 3×10^{-10} 安培,响应时间为 10^{-4} 秒)。电桥的输出同时供给三路:第一路是电桥交流输出信号,经由CO-11型测量放大器放大(中心频率为1kc/s,带宽为100Hz)、检波,输出由LZ-3型XY记录仪记录;第二路是平衡电桥的直流零点,由PZ-8数字电压表指示;第三路是电桥直流零点的飘移,由伺服系统反馈至干涉仪一臂上的压电陶瓷,此压电陶瓷同时还接收XD-1信号发生器的正弦信号。伺服系统的作用在于克服由于温度变化及其他原因所引起的慢飘移。

在实验过程中,必须调整光路,使两台激光器相对应的干涉条纹具有相同的相位。

3. 测量结果

第一台激光器对于XD-1型信号发生器加给压电陶瓷的小信号,测得信噪比为2.4($\sim\sqrt{N_1}$);第二台激光器对同样大小的小信号,信噪比为1.5($\sim\sqrt{N_2}$),则与 $\sqrt{N_1 + N_2}$ 相应的信噪比为2.8。而同时用两台激光器对于同样大小的信号,实验测得信噪比为2.9。此时标志仪器灵敏度的等效噪声位移为 $\approx 3 \times 10^{-13}$ 米/赫芝^{1/2}。理论与实验能够较好地符合。

双(多)激光光源原理性实验的意义是:当一台单模稳频激光器功率的提高受到限制时,可采用两台:甚至多台激光器同时作为一台干涉仪的光源,以提高仪器灵敏度。

四、激光型引力波探测器的标定

1. 关于压电陶瓷位移或振幅的定标

激光型引力波探测器的噪声水平(等效噪声位移)是根据压电陶瓷的位移或振幅进行标定的。因此应该首先讨论压电陶瓷本身的位移或振幅的定标问题。

(1) 压电陶瓷的线性问题 根据测量:管状压电陶瓷在200伏/毫米的条件下是线性的(测量误差5%)。在我们的实验中,管状压电陶瓷的壁厚为1.5毫米,所以在300伏以下是线性的。

在本仪器中,管状压电陶瓷工作于直流偏压为80伏左右的状态,故位于压电陶瓷的线性区域内。

(2) 压电陶瓷相应于半波长的位移量的定标 把迈克尔逊干涉仪一个臂上的平面镜粘在所要定标的一块管状压电陶瓷上(实际上压电陶瓷是联同平面镜一起进行定标的),输入1kHz峰-峰较小的交流信号,用硅光敏三极管接收干涉仪输出的圆环干涉条纹也作相应于1kHz的小的交流变化(图1),在紧接于硅光敏三极管后面的示波器的荧光屏上可显示1kHz的正

1) 光电元件在没有光照射的情况下输出的电流,称为暗电流。

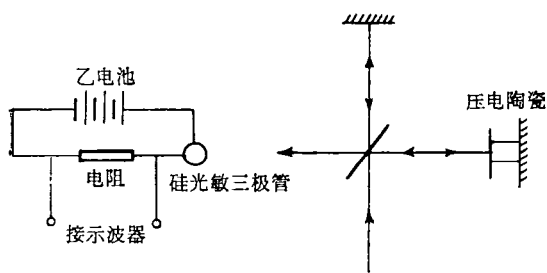


图1 标定压电陶瓷的装置示意图

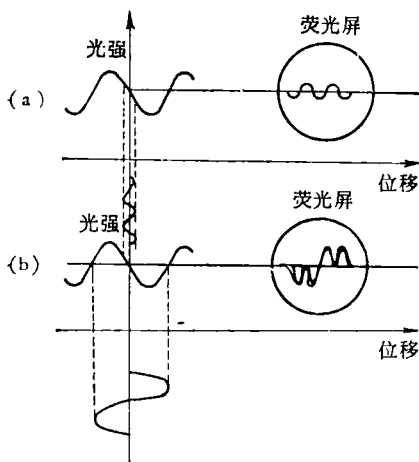


图2 示波器上出现的波形图

- (a) 压电陶瓷的振幅远小于半波长时的情况
- (b) 压电陶瓷的振幅等于半波长时的情况

弦曲线,如图2(a)所示。当逐渐加大输给压电陶瓷的交流信号时,若发现示波器上出现图2(b)所示的波形,则此时的电压峰-峰即相应于压电陶瓷的峰-峰振幅为半波长的值。在本实验中是用波长为6328埃的氦-氖激光器,所以近似地为 3×10^{-7} 米。在本实验的压电陶瓷上测得此电压值近似地为100伏。因此,在压电陶瓷上加峰-峰为100伏的交流电压时,压电陶瓷上的机械峰-峰振幅为 3×10^{-7} 米。

(3) 根据以上两点,可以按比例计算出压电陶瓷在小电压下的振幅量。也就是说,若已知加于压电陶瓷上小的电压值,就可得知它的振幅的大小。例如1毫伏峰-峰电压是100伏的 10^{-3} ,则此时的振幅为 3×10^{-7} 米 $\times 10^{-3} = 3 \times 10^{-10}$ 米。

(4) 在本实验中,交流电压是由XD-1信号发生器供给的,它同时具备最小值为90分贝的衰减器及连续可调的衰减旋钮(用电表指示),衰减器的线性误差小于 ± 2 分贝。

(5) 从现有国内外的资料中,除一篇文献 [Phys. Lett., 24 A-12 (1967), 685], 在零值附近小区域内观察到压电陶瓷的非线性外(若根据这一非线性,仪器

灵敏度比实际灵敏度偏低而不是偏高!),所有其他文献均未发现压电陶瓷的非线性问题。而在本实验中,由于在压电陶瓷上加了80伏的直流偏压,故避开了有争议的非线性区域(图3)。

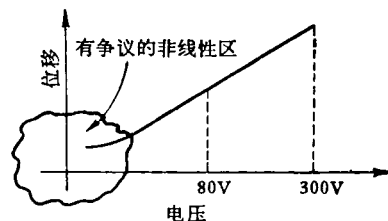


图3 压电陶瓷位移-电压关系曲线

2. 关于激光型引力波探测器的标定

(1) 仪器线性的测量 实验测得在压电陶瓷上所加的电压和干涉仪的输出电压的关系曲线(图4)。从曲线可知,在小振幅的情况下,仪器是线性的。在大范围内的非线性是由于平衡电桥的灵敏度曲线的非线性所引起的。

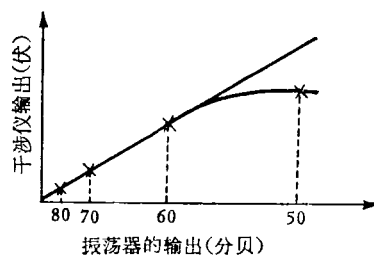


图4 干涉仪输出-振荡器输出关系曲线

我们的应用范围是在-60分贝以下,所以在此范围内,仪器是线性的。

(2) 等效噪声位移的测量 调节CO-11型放大器的放大倍数的旋钮,使CO-11型放大器的输出指示电表(或接数字电压表)位于刻度10小格(这就是噪声水平,单位是相对量)。然后在压电陶瓷上加1毫伏的信号(此信号相应的位移已经过定标)。此时电表指示位于刻度22小格,则信噪比为1.2:1 [根据信息论中的定理:“当两个或多个信号在线性系统内迭加时,可以看作信号矢量的相加。例如通信系统内有噪声(噪声可看成是不需要的信号)时,……,总信号的样点值相应地是两者之和^[2]”。因此,等效噪声位移就等于信号位移除以信噪比,即除以1.2。

(3) 根据上述,测得本仪器的等效噪声位移为(激光器功率为0.24毫瓦)

$$3 \times 10^{-7} \text{ 米} \times \frac{1 \text{ 毫伏}}{100 \text{ 伏}} \times \frac{1}{\sqrt{100 \text{ 赫芝}}} \times \frac{1}{1.2} \\ = 2.5 \times 10^{-13} \text{ 米/赫芝}^{1/2}.$$

这一数值和按公式 $\Delta x \approx \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{Bh\nu}{p\eta} \right)^{1/2}$ 算出来的

值,数量级上相等。

等效噪声位移的物理意义是:当接收机带宽为 1 赫芝,信号位移为 2.5×10^{-13} 米时,本仪器能够以信噪比为 1:1 的清晰度而感知。

3. 仪器的校核

为了对仪器进行校核,我们将干涉仪两臂上的平面镜分别粘在具有相同性能的两块压电陶瓷上。当输入同相、等量小交流电压(1 毫伏)时,输出信号为零(噪声仍为只有一块压电陶瓷时的大小)。当输入反相、等量小交流电压时,输出信号为原有的两倍。这一实验证明:压电陶瓷在小位移下确实是线性的。同时,这一实验还可说明,干涉仪输出的信号的确是压电陶瓷的振动所引起的,而不是感应串扰效应。

五、同步积累法的模拟实验

1. 原理

为了使探测器能从噪声中检测出弱小信号,我们采用同步积累法^[2]。

当探测引力波时,若使激光干涉仪的一个臂对准某一连续的引力波源,则另一个与它垂直的臂就产生振动(根据引力波的横波特性)。此时干涉仪的信号输出不为零;若将干涉仪臂旋转 45° ,则引力辐射在两个互相垂直的臂上所产生的振动分量相等,干涉仪的信号输出为零(此时激光干涉仪应放在一台减震的转盘上)。当我们使干涉仪在这两个位置上来回反复,并采样测量其输出。这样的系统可以看作是一个具有两通道的同步积累器;其中一个通道只具有随机涨落噪声;另一个通道,则在随机涨落噪声上迭加有一个信号,根据同步积累法^[2],可以从噪声中检测出弱小信号。

2. 实验方法

在本实验中,对同步积累进行了模拟实验,即用压电陶瓷上加信号和不加信号来模拟干涉仪的一个臂对准引力波源和把干涉仪的臂旋转 45° 的情况。除了在实验中采用一个激光管以及 CO-11 型测量放大器的输出采用 PZ-5 数字电压表和 LS-5 型数字记录器记录外,其他实验设备和双激光光源法相同。

在实验过程中,利用 XD-1 信号发生器加给干涉仪一臂上的压电陶瓷一个小信号(例如,加给的信号位移幅度为等效噪声位移的 1/10, 1/100, 1/400 等),令数字电压表采样,采样速率为每秒一次左右,连续采样 18 个数据,并用 LS-5 型数字记录器打印成数字记录。然后把 XD-1 信号发生器加给压电陶瓷的小信号切断,再令 PZ-5 数字电压表采样,并用 LS-5 数字记录器打印(采样速率及采样个数同上),这样来回交替采样,数据均记录在纸带上。

六、同步积累模拟实验的数据处理及结果分析

我们在 XD-1 信号发生器加给压电陶瓷的信号位移量为等效噪声位移量的 1/10, 1/100, 1/400 时,取得纸带数据。

下面以 No. 2030 实验为例进行分析。在这次实验中,模拟信号为等效噪声位移的 1/400,也即为 1×10^{-13} 米/赫芝^{1/2}(在这次实验中,等效噪声位移为 4×10^{-13} 米/赫芝^{1/2})。

1. 把纸带上每组中的 18 个数据进行算术平均,再将相应于两通道中的每一个通道的这些平均值对组数作图(图 5)。图上每一点表示 18 个数据的平均值。

2. 由图可知,在信号较弱、累积次数较多的情况下,仪器的慢飘移可以比较明显地看出。在计算测量误差时,为了扣除慢飘移的影响,我们采用差值数据

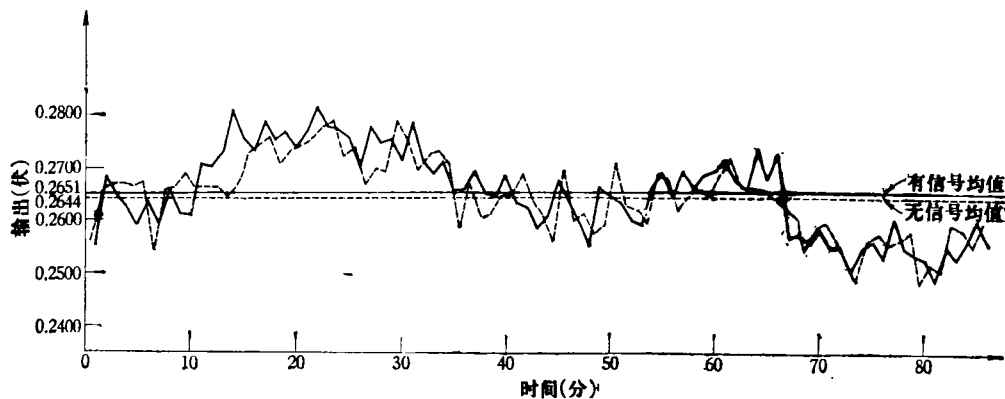


图 5 No. 2030 实验均值数据图

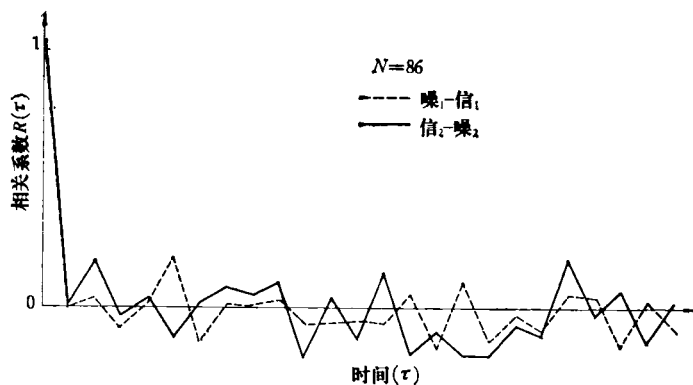


图6 No. 2030 实验差值自相关图

(噪声中迭加有信号与仅有噪声的这两列对应的数据之差)。

3. 为了检验差值数据是否独立随机变量, 我们对该列数据用电子计算机作自相关分析(图6)。从图上可以看出, 无论是前差还是后差, 这列数据可以认为是独立随机变量。

4. 根据上述, 我们建立下述简单模型:

$$y_i = x_i + a_i + \varepsilon_i \quad (\text{有信号的一路通道}),$$

$$y_i^* = x_i^* + \varepsilon_i^* \quad (\text{无信号的一路通道}).$$

其中 y_i 及 y_i^* 分别表示有、无信号的一路通道的测量数据; x_i 及 x_i^* 表示仪器的慢飘移, 在此可以认为它们是同一个随时间缓慢变化的随机过程, 即有 $x_i \approx x_i^*$; a_i 表示信号的大小, 在此它是一个随时间具有微小变化的量; ε_i 及 ε_i^* 表示涨落(即相对于 x_i 而言是频率较高的随机噪声)。根据上述差值数据为

$$y_i - y_i^* = a_i + \Delta\varepsilon_i \quad \text{或} \quad a_i = (y_i - y_i^*) - \Delta\varepsilon_i.$$

其中 $(y_i - y_i^*)$ 表示差值数据; a_i 表示信号的真值; $\Delta\varepsilon_i$ 表示 $[(\varepsilon_i - \varepsilon_i^*) + (x_i - x_i^*)]$, 即测量误差。

a_i 的平均值的估计为

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*).$$

5. 利用这列差值数据, 可估计出测量误差的均方误差 s 为

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^* - \bar{a})^2.$$

6. 从信号的大小及测量误差的均方误差, 可求出错误接收概率

$$p = 1 - H\left(\sqrt{\frac{N}{2}} \frac{a}{s}\right).$$

7. 以 No. 2030 为例, 可得到的结果为: 从噪声中迭加有信号的算术平均值 $\bar{a} = 0.0007$ (伏), 测量误差的均方误差 $s = 0.0050$ (伏), 错误接收概率为 5%。

8. 和信号位移与等效噪声位移相对应的输出电压之比为

$$\frac{a}{b} = 0.0026.$$

这一数值与加于压电陶瓷上的位移量为等效噪声位移量的 1/400 相符合。

为了进一步减小错误概率, 应该进一步增加累积次数。

从上可知, 当仪器在较长时间内工作的情况下, 具有慢飘移。我们可以求出差值的均方误差, 也即测量误差, 这样就扣除了慢飘移对数据的影响。在此可以把慢飘移看作是噪声直流分量的慢变化, 而并不认为它属于噪声的交流分量。

通过对 No. 2030 实验数据的处理可知, 本仪器能够从信号和噪声的混合中, 提取出 1×10^{-11} 米/赫芝^{1/2} 的信号。

用这种同步积累法, 若增加累积次数, 一般可以检测比噪声小三个数量级的弱小信号, 即我们的仪器可以检测相应于 10^{-16} 米/赫芝^{1/2} 数量级的信号。

若用同步积累法探测引力波, 除具有上述特点外, 它具有极好的排除性效果, 即它可对最终检验接收到的信号是否是引力波提供可靠的判据。

七、结 束 语

本文提出了双(多)激光光源干涉仪引力波探测器的原理, 并在实验上得到了验证。这对提高仪器灵敏度, 为今后探测引力波提供一条可供选择的途径; 同时也进行了同步积累的模拟实验, 使探测器可以检测比噪声更加弱小的信号。利用本实验装置, 可以检测的最小信号为 10^{-15} — 10^{-16} 米/赫芝^{1/2} 的数量级。

为了进行引力波探测的实践, 还需要进一步提高仪器对于引力波响应的灵敏度。若我们今后采用 100 毫瓦的单模稳频激光器, 则等效噪声位移可缩小到 10^{-16} 米/赫芝^{1/2} 的数量级; 若我们仍然采用同步积累技术, 则可达 10^{-19} 米/赫芝^{1/2} 的数量级(同时我们若采用碘吸收法稳频, 频率稳定性达 $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-12}$, 波长的变化量则可小于 10^{-19} 米); 若接收机带宽为 1 赫芝, 且转盘直径为 10 米, 采用光路在真空管道内多次反射, 使干涉仪的臂长为 100 米; 则可使探测水平达到 $\Delta L/L \approx 10^{-21}$ 的数量级。这一数量级已与现有理论对于在地球上接收蟹状星云中心残核所发出的引力辐射所作的乐观的估计值相接近。

目前, 国际上多数人认为: 蟹状星云的遗迹, 就是中国古代(宋朝)在公元 1054 年所记载的一起超新星爆发的结果。而当前, 我国正在开展批林批孔运动, 对儒家阻碍我国过去科学技术的发展进行猛烈的批判。

如果对我国历史上所记载的这起有名的超新星爆发的残核进行引力辐射的观测,应该说是极有意义的。

本文中所述的实验方法是在和中国科学技术大学物理系方励之、中国科学院北京天文台邹振隆、我所刘焯奋等同志共同讨论后提出的;数据处理部分是和中国科学院数学研究所的安鸿志、陈兆国、吴传义等同志共同完成的。



度规张量 在广义相对论中,四维空间两点距离的平方可以采用系数为变数(g_{ik})的坐标的齐次二次式来表示。 g_{ik} 量的集合构成所谓度规张量。符合 $g_{ik}=0$, $i \neq k$; $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$; $g_{44} = -c^2$ 条件的度规张量,叫做伽里略度规张量。

选模 通常,在激光谐振腔里不仅有沿着轴线方向的光存在,而且在稍稍偏离于轴线方向的光也可以发生振荡。在谐振腔的理论中,不同方向的光与不同频率的光都叫做模。在文中所说的选模,是指选出沿着轴线方向(单横模)和具有单一频率(单纵模)的光。

漂移 激光经过规定的预热时间(譬如两小时)后,最大功率变化 ΔP_0 相对于规定的时间内平均输出功率 P_0 的比值称为激光输出功率的漂移。电子仪器中,例如放大器的放大倍数随着时间作缓慢变化,称为电子仪器的漂移。

样点值 如果将一个连续信号 $S(t)$ 限制在一定的频带内(在实际的通信系统内这个条件总是成立的),则

参 考 文 献

- [1] 吕大炯、王国宗、周世织,《振幅为百万分之一埃的极微振动测量技术》,《物理》, 3-5 (1974), 300.
- [2] 蔡长年、汪润生,《信息论》,第二章第 65 页,第十一章第 300—305,人民邮电出版社(1962).

不需要将 $S(t)$ 上所有的点连续地由接收机送出,只要每间隔一定的时间给出 $S(t)$ 上相应的点就可以唯一地确定 $S(t)$ 。这些点被称为样点, $S(t)$ 在这些点的值称为样点值。

同步积累法 这是一种抗干扰技术。其目的就是要从强噪声和弱小信号的混合中将后者“提取”出来。这种方法实际上是把接收机的接收端重复收到的信号按某种方法(譬如相加)总合起来,故称为积累法。如果将信号重复,实际上是给它一种噪声所不具备的周期性。这里所说的周期性,并不是严格定义的周期性。只要信号具备这一特征,我们就能把它从噪声中分离出来。所谓同步就是指接收机的接收特征具备和信号特征有相同的周期性。例如,接收机中固定某一通道和所要接收的信号发生一一对应的关系,而其他通道只和噪声发生关系。

碘吸收法稳频 利用饱和吸收产生反兰姆下陷来稳定氦-氖激光器频率的技术可以达到很高的稳定性和重复性。目前已成功的有氦、甲烷和碘作为吸收室的。其中用碘来稳定氦-氖 6328 埃激光器,频率稳定度可达 2×10^{-12} ,重复性达 1×10^{-10} 。

(上接 214 页)

鼻侧。当即前房色素弥散,气泡出现,色素层消失,第二天,前房清,视力增为 0.1,矫正视力 0.6。激光治疗起到了增进视力的效果。

病例四:黄××,女,54岁,工人。左眼患白内障并发性青光眼,胀痛难忍,恶心呕吐。检查结果:左眼虹膜萎缩后粘连,前房浅,睫状充血,眼压很高,为 59 毫米汞柱。治疗经过:用 1.5 焦耳激光聚焦照射瞳孔下方五点钟位置,一次即形成虹膜穿孔。次日检查,眼压降为 26 毫米汞柱。第三天眼压降至正常范围,为 17 毫米汞柱。一周后检查,眼压仍维持正常。激光治疗

起到了降低眼压的效果。

参 考 文 献

- [1] 上海合力电机厂、激光技术试验站、第六人民医院眼科,《激光视网膜凝结核》,《物理》, 3-1 (1974), 24.
- [2] 上海第六人民医院眼科杨冠、卫焯,《视网膜激光凝固器的动物实验和临床应用初步报告》,《中华医学杂志》, 1 (1973), 45.
- [3] 沈阳市第八人民医院眼科,《应用激光治疗视网膜裂孔的初步报告》,《临床资料选编》, (1974), 36.
- [4] Watts, G. K., *Retinal Hazards During Laser Irradiation of the Iris*, *Brit. J. Ophthalm.*, 55 (1971), 60.