

一种测量弱光拍频的方法*

侯岩雪 马海强 吴令安

(中国科学院物理研究所光物理实验室,北京 100080)

(2004 年 7 月 2 日收到,2004 年 7 月 21 日收到修改稿)

提出一种基于光子相关测量技术的弱光拍频测量方法. 与传统的方法不同,该方法不依赖于频谱分析仪,不受探测器和前置放大器响应时间的限制,所测拍频能达到 10GHz 量级,并且可对非常弱的光进行测量.

关键词:拍频,自相关函数, Hanbury Brown-Twiss 实验,弱光

PACC: 0630F, 4250, 1480A

对于拍频的研究与应用一直都是一个活跃的领域. 现在不仅可以测量两个相干光之间的拍频,也可以测量两个独立的光源之间的拍频^[1]. 文献 [1] 中描述的利用相对延时产生光致双光栅的方法来观测两个独立光源之间的拍频,其时间分辨率可达到 10^{-12} s 的量级. 但该方法需要一种三阶非线性介质,在介质中形成两套独立的光栅,因此通常需要高功率密度的脉冲激光光源. 而传统的测量光源拍频的方法是用一个探测器接收具有一定强度的光,其输出信号经过前置放大器后,用频谱分析仪通过电路对光电信号进行分析,由此获得光源的拍频. 该探测过程要求光源要有一定的强度,且对于高频的拍频要求探测器、前置放大器、频谱分析仪都有至少与拍频频率一样快的响应速度,目前的测量范围一般在 GHz 量级内. 针对以上方法的局限性,我们提出一种测量弱光拍频的方法,该方法既不依赖于频谱分析仪,又不受探测器和前置放大器的响应速度的限制,可对强度为单光子流的极弱光源的拍频进行测量,所测拍频能达到 10^{10} Hz 量级. 当然,此方法也可用于经过衰减后的强光源.

我们知道, Hanbury Brown-Twiss 实验^[2]是用来测量两个不同时空点光场强度起伏的关联,其量子光场的二阶相关函数为

$$C_{12}(t, t + \tau) = \langle I_1(t) I_2(t + \tau) \rangle, \quad (1)$$

其中 $I_i(t)$ 为光场强度, $i = 1$ 或 2. 经过推导^[3]可得

$$C_{12}(t, t + \tau) \propto \cos[(\omega_1 - \omega_2)\tau], \quad (2)$$

式中 ω_1, ω_2 为光场的角频率, $\omega_1 - \omega_2$ 即为两光场的

拍频. 若一束光含有多个频率的光场,那么,对该光作自相关运算,其结果将包含拍频信息. 也可以利用相关函数的特性^[4],即相关运算是比较两个函数的相似性,在相似处会出现峰值. 所以,自相关运算 $C_{11}(\tau) = \int I_1(t) I_1(t + \tau) dt$ 的结果将包含光强随时间变化的信息,见图 1 所示. 因此,对一束光作自相关测量就可以获得时域下该光源的拍频数据,再对拍频数据作数值傅里叶分析即可得到频域下的拍频.

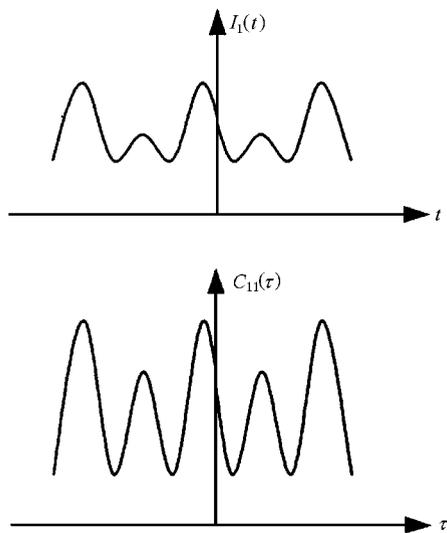


图 1 自相关运算

我们利用 Hanbury Brown-Twiss 实验的方法,用时幅转换仪(time amplitude converter, TAC)和多道分

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2001CB309301)、国家自然科学基金(批准号 60178013)和中国科学院创新方向性项目(批准号: 1731230300009)资助的课题.

析仪(multi-channel analyzer , MCA)代替相关器 ,对待测光束进行测量 ,可证明该测量为自相关测量 .

假定将一系列单脉冲组成的两路光电信号分别输给 TAC 的开始(Start)和停止(Stop)端 ,再将 TAC 输出的一系列幅度与 Start 和 Stop 的时间间隔 τ 成正比的电压脉冲输进 MCA. MCA 每接收一个信号 ,与此信号的电压幅度对应的 MCA 道址上则增加一个计数 .设 TAC 的 Start 端在 t 时刻接收到一个光电信号的概率为 $P_1(t)$,在 $t + \tau$ 时刻 Stop 端接收到一个光电信号的概率为 $P_2(t + \tau)$,MCA 上对应延时为 τ 的道址宽度为 $2\tau_c$,则在 T 时刻该道址记录一个计数后 ,在 ΔT 时间内增加一个计数的概率为

$$P_{12}(\tau) = \int_T^{T+\Delta T} dt \int_{-t_c}^{t_c} P_1(t)P_2(t + \tau + t')\lambda t' \quad (3)$$

式中

$$P_i(t) = \eta_i P'_i(t) \quad (i = 1 \text{ 或 } 2), \quad (4)$$

其中 η_i 为第 i 个单光子探测器的探测效率 , $P'_i(t)$ 为第 i 个单光子探测器在 t 时刻接收到一个光子的概率 .

这里 $P'_i(t) = DI_i(t)$, (5) 其中 D 为比例常数 ,与被探测光的波长和所用单光子探测器的性质有关 ,见文献 [5] .由 (2) — (4) 式得

$$P_{12}(\tau) = \int P_1(t)P_2(t + \tau)\lambda t \propto \int I_1(t)I_2(t + \tau)\lambda t \quad (6)$$

可见 ,用 TAC 和 MCA 代替相关器 ,对一束光所作测量为自相关测量 .在 MCA 上所得计数随道址变化的图像 ,即计数随延时 τ 变化的图像 ,将含有时域下该光源的拍频信息 ,对该拍频图像进行数值傅里叶分析后即可获得频域下的拍频 .

实验装置见图 2 所示 .光源是波长为 632.8nm 的线偏振的 He-Ne 激光 .用 50/50 的分束器(BS)将光束分成两路后 ,分别经过两端带有准直器的等长光纤进入单光子探测器 D_1 和 D_2 (Perkin Elmer SPCM-AQR-12) .两路光的光学路径相等 .由于单光子探测器不能探测强光 ,所以在 BS 前加上一组衰减片 ,使光束衰减成强度为单光子流的极弱光 .在探测器前加透过 632.8nm 的干涉滤光片 ,以滤掉杂散光 .探测器输出的信号为正的 TTL 信号 .TTL 信号先经过倒相盒 ,再经过鉴别放大器成为标准的 NIM 信号后 ,分别输进 TAC(EG&G ORTEC 567)的 Start 和 Stop 端 .在信号进入 Stop 端前 ,加任意一个适合时幅转换仪量程的延时 .然后将 TAC 输出的正的矩形波

信号输进 MCA(北京核仪器厂 BH1224) ,最后用计算机进行存储 .

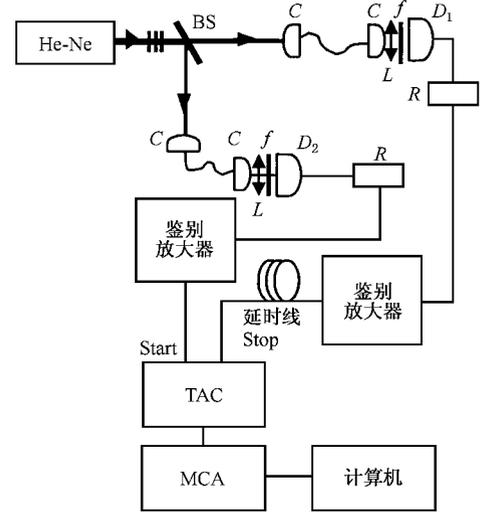


图 2 实验装置 BS 分束器 ,C 准直器 ,L 透镜 ($f = 1\text{cm}$) ,f 干涉滤光片 , D_1 , D_2 单光子探测器 ,R 倒相盒

分别测量两台 He-Ne 激光器 HN1200 和 HN270 的激光纵模在频域下的拍频 .激光器的参数 ,探测器 D_1 和 D_2 的计数率及 TAC 的量程设置分别列于表 1 中 .

表 1

模式	(a) HN1200	(b) HN270
	单横模 ,多纵模	单横模 ,多纵模
腔长/cm	117	25.4
功率/mW	约 12	约 1
D_1 计数/ 10^3	约 80	约 400
D_2 计数/ 10^3	约 80	约 110
TAC 量程/ms	100	50

MCA 置于 4096 道址 .经过一段时间的积累 ,在 MCA 上所得到的时域下光源的拍频图像见图 3 .对延时 τ 与 MCA 道址的关系作出以下标定 (a) $\tau = 12.02478 + 0.0152925x$ (b) $\tau = 4.83231 + 0.00752x$, x 为 MCA 的道址 .将图 3 中的横坐标换作延时 τ 后 ,再对上图中的数据进行数值傅里叶分析 ,可以得到光源在频域下的拍频 ,见图 4 .

从图 4 中可以看到 (a) 有 4 个峰 ,相应位置和幅度 (任意单位) 分别为 (127.74MHz , 6.73) , (255.48MHz , 11.44) , (383.22MHz , 3.64) 和 (510.95MHz , 1.47) .这表明用该实验方法可分辨出激光器有 4 个拍频 ,相应地有 5 个纵模 (b) 只有 1

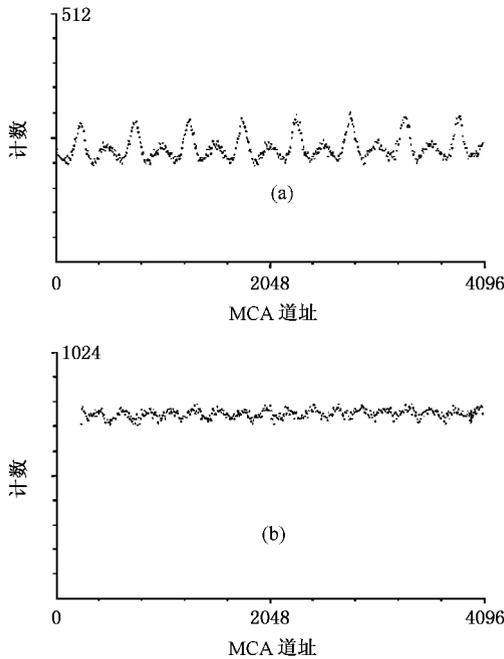


图 3 时域下激光器的拍频 激光器的腔长(a)117cm (b)25.4cm

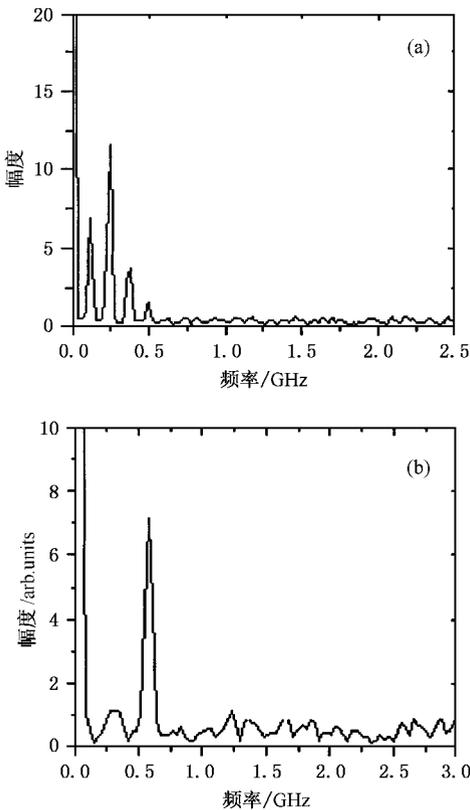


图 4 频域下激光器的拍频 激光器的腔长(a)117cm , (b)25.4cm

应地有两个纵模.而理论上的拍频值分别为

$$\Delta\nu_a = \frac{c}{2L_a} = 128.40\text{MHz} ,$$

$$\Delta\nu_b = \frac{c}{2L_b} = 590.55\text{MHz} ,$$

其中 $L_a = 117\text{cm}$, $L_b = 25.4\text{cm}$.可见我们的测量结果与理论值符合得很好.测量值与理论值间的偏差分别为

$$\delta_a = 0.66\text{MHz} ,$$

$$\delta_b = -6.17\text{MHz} .$$

相对误差分别为

$$\frac{\delta_a}{\Delta\nu_a} = 0.514\% ,$$

$$\frac{\delta_b}{\Delta\nu_b} = -1.045\% .$$

这是由以下几个原因造成的:1)理论计算中没有考虑激光器腔中的两个布儒斯特窗;2)理论计算中没有考虑腔中气体引起的折射率变化;3)由于电子系统的抖动,对于不同的计数率,同一幅度的信号会有可能对应 MCA 几个不同道址,结果表现为 MCA 上的线型有一定的宽度.其中前两个原因引起腔的有效长度增加,使得实际理论值应小于计算值,但影响不大,而第三个原因是使测量值偏离理论值的主要原因.

我们用频谱分析仪对腔长为 117cm 的激光器的纵模拍频进行测量,由于所用频谱分析仪的测量范围在 400MHz 内,所以只能看到三个拍频,分别为 129.6MHz, 259.2MHz, 390.4MHz.可见,我们的测量方法所得结果更准确些,范围更宽些.

我们用 632.8nm 的 Fabry-Pero(F-P)标准具分别观察两台激光器的纵模.腔长为 25.4cm 的激光器有两个纵模,这与我们的测量结果一致;而腔长为 117cm 的激光器有 8 个纵模,比我们测量的结果多.这是因为用 F-P 标准具进行测量时,激光器本身功率的涨落只影响纵模的强度;而在 Hanbury Brown-Twiss 实验中,功率的涨落将形成噪声,使那些强度较弱的纵模淹没在噪声中.图 4 中在 638.70 MHz, 766.43 MHz 等位置也发现了一些小峰,其强度与可分辨出的 4 个拍频的强度相比小很多.

用自相关测量的实验方法来测量光源的拍频具有以下优点:1)可对光强极弱的光进行测量;2)不需要频谱仪;3)不受探测器和前置放大器的响应时间的限制;4)对于现有的一般技术水平, MCA 的档取 4K 道址, TAC 取最小测量范围为 50ns, 则 MCA 的每

个道址对应约 10ps 的延时 ,可测的拍频频率能达到几十 GHz. 如果提高 MCA 的分辨率 ,可以测量更高频率的拍.

感谢张达同学编写的提取程序.

-
- [1] Mi X , Jiang Q , Yu Z H and Fu P M 1991 *Optics Letters* **16** 1526
 [2] R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss 1956 *Nature* **177** 27
 [3] Scully M O and Zubairy M S 1997 *Quantum Optics* (Cambridge University Press)121—124
 [4] Yang G G and Song F J 1991 *Advanced Physical Optics* (University of Science and Technology of China Press)449—451 (in Chinese)
 [5] Bachor H A 1998 *A Guide to Experiments in Quantum Optics* (WILEY-VCH)42
- [羊国光、宋菲君 1991 高等物理光学 (中国科学技术大学出版社)第 449—451 页]

A method to measure the beat frequency of weak light *

Hou Yan-Xue Ma Hai-Qiang Wu Ling-An

(*Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 ,China*)

(Received 2 July 2004 ; revised manuscript received 21 July 2004)

Abstract

A method is proposed for measuring the beat frequency of weak light based on photon correlation measurements. In contrast to conventional techniques this method is not limited by the response time of the detector or preamplifier , and can measure frequencies on the order of 10GHz without the need of a frequency spectrum analyzer. Moreover , extremely low light intensities may be measured.

Keywords : beat frequency , self-correlation function , Hanbury Brown-Twiss , weak light

PACC : 0630F , 4250 , 1480A

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant No. 2001CB309301) ,the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60178013) and the Innovation Program of Chinese Academy of Sciences , China(Grant No. 1731230300009) .