

光外差系统噪声等效功率的一种测量方法

谢小川

(西南技术物理研究所, 成都 610015)

摘要: 本文介绍了利用工作于 Bragg 衍射的 Ge 晶体声光调制器作为外差系统中的频移器来测量外差系统的噪声等效功率 (NEP) 的方法。该方法具有测试系统简单、信号光功率、偏频可调的优点。实验测试与理论分析吻合。

关键词: 光外差, 噪声等效功率 (NEP), 声光频移

Measurement of noise equivalent power of optical heterodyne system

Xie Xiaochuan

(South-West Institute of Technical Physics, Chengdu 610015)

Abstract: In this paper, the noise equivalent power (NEP) of optical heterodyne system has been measured with a method based on acousto-optic germanium crystal modulator working at Bragg diffraction mode as a frequency shifting device in heterodyne system. This method has the advantages of simple structure, easy change of signal power and shifted frequency. The experimental results are found in agreement with the theoretical analysis.

Key words: optical heterodyne, noise equivalent power (NEP), acousto-optic frequency shift

一、引言

激光外差探测技术为长距离激光通信和激光雷达等工程提供了极灵敏的检测方法, 受到人们的普遍关注。噪声等效功率 (NEP) 是反映光外差系统工作的基本物理量, 因此, NEP 的测量就显得十分必要。M. C. Teich^[1] 曾根据 Michelson 干涉原理, 利用一表面粗糙的旋转铝轮代替干涉仪其中一臂的反射镜, 从该铝轮漫反射产生的多普勒频移信号与干涉仪另一臂反射镜产生的本振光合束混频得到中频信号的方法测量 NEP。此法中频频率较低, 转轮不稳定将对激光束产生调制, 反馈辐射将进入激光器。因此, NEP 测量误差较大。C. J. Buczek^[2] 利用两只激光器产生的激光束外差拍频获得中频信号测量 NEP。此方法测试系统复杂, 需要繁琐的电子伺服系统来稳定中频信号频率的漂移, 且信号光功率、偏频不易调节。本

文介绍利用声光调制器作为外差系统中的频移器方法测量外差系统的 NEP 值。此方法具有测试系统简单、信号光功率、偏频可调的优点。

二、实验原理

外差系统 NEP 测量原理如图 1 所示。由信号源提供一定中频的频率信号加于驱动源上，驱动源对此信号进行功率放大后再加于声光调制器上。由 CO₂ 激光器产生的单横模、线偏振的激光经分束器分束，其中一束光经声光调制器与 Ge 晶体中的声波相互作用产生一级 Bragg 衍射光，此衍射光为信号光。为了防止声光调制器中声波从介质 Ge 后端面反射回来与光互作用形成驻波，必须增大 Ge 晶体端面的吸收系数^[3]。我们采用后端面磨成一定的倾角，并粘吸声材料来克服声波从后端面的反射^[4]。另一束光经折射后与信号光合束入射于光电探测器光敏面上混频转换成电信号，电信号经前置放大器放大后于示波器上显示。

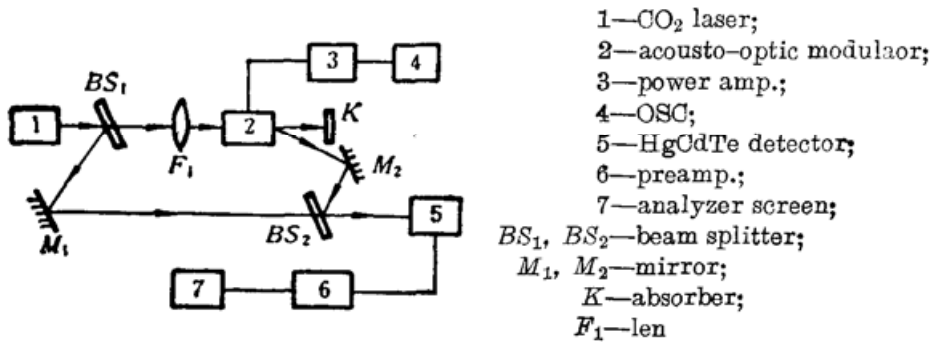


Fig. 1 Measurement system

外差探测中频信号的信噪比 SNR 在忽略了背景辐射和光电二极管的暗电流时，可写为

$$SNR = \frac{\langle \dot{i}_M^2 \rangle}{\langle \dot{i}_L^2 \rangle + \langle \dot{i}_J^2 \rangle} \quad (1)$$

式中，

$$\langle \dot{i}_M^2 \rangle = 2(\eta e/h\nu)^2 P_s P_L \eta_{het}$$

是均方外差中频电流。其中， P_s 、 P_L 分别为信号光、本振光功率， η 为探测器量子效率， e 为电子电量， $h\nu$ 为光子能量， η_{het} 为外差效率。

$$\langle \dot{i}_L^2 \rangle = 2 \left(\frac{\eta e^2}{h\nu} \right) B P_L$$

是功率为 P_L 的本振的直流光电流在中频带宽 B 内的散粒噪声。

$$\langle \dot{i}_J^2 \rangle = \frac{4K(T_R + T_{IF})B}{R}$$

是有效输入噪声温度为 T_{IF} 的中频放大器及物理温度为 T_R 的光电二极管的热噪声， R 是放大器输入阻抗。 K 为玻尔兹曼常数。

由 $\langle \dot{i}_M^2 \rangle$ 、 $\langle \dot{i}_L^2 \rangle$ 、 $\langle \dot{i}_J^2 \rangle$ 表达式可知，式(1)可化为

$$SNR = \frac{\eta \eta_{het} P_s}{h\nu} \left(\frac{1}{1+N} \right) \quad (2)$$

式中， N 是热噪声与本振散粒噪声功率之比。且有

$$N = \frac{\langle \dot{i}_J^2 \rangle}{\langle \dot{i}_L^2 \rangle} \quad (3)$$

外差系统噪声等效功率 NEP 可令式(2)中的 $SNR=1$ 得到:

$$NEP = \frac{h\nu B}{\eta\eta_{het}}(1+N) \quad (4)$$

若 $N = \langle i_s^2 \rangle / \langle i_L^2 \rangle \ll 1$, 则外差探测达到量子限, 式(4)在量子限下为

$$(NEP) = h\nu B / \eta\eta_{het} \quad (5)$$

在 $\eta=0.47$, $\eta_{het}=1$, $\nu=2.83 \times 10^{13}$ Hz 时, 量子限 $NEP=4.0 \times 10^{-20}$ W/Hz。

在实验室和工程应用中, 信噪比 SNR 的测量是通过测量中频信号的电压有效值 V_{IF} 表示的:

$$SNR = \frac{V_{IF}^2 / R}{P_N} \quad (6)$$

式中, P_N 是噪声功率。

而 NEP 的测量值为

$$NEP = \frac{P_s}{SNR \cdot B} \quad (7)$$

三、实验方法

采用图 1 所示的光路图。图中声光调制器使一级衍射光产生频偏, 通过改变声光调制器驱动源的频率、功率可方便地调节信号光频偏及光功率大小。为了获得较好的外差效果, 光路调整是实验中关键的一步。其主要是信号光与本振光的准直。欲使外差效率 $\eta_{het} > 90\%$, 则要求信号光、本振光的平行度^[5]

$$\theta < \frac{\lambda}{4D} \quad (8)$$

式中, θ 为两光束的夹角, λ 为本振光波长, D 为探测器光敏面直径。

实验中需要反复调整信号光与本振光方向, 使信号光、本振光打在合束镜上的同一点, 然后在光束准直方向上取另一点判断两光束是否重合。若两个位置上两光束重合, 则说明两光束是准直的。

入射到光电探测器光敏面上的光功率我们是这样确定的。由于探测器及功率计只取光束中的一部分, 这部分光斑可视为均匀分布。因此, 先用功率计测出整个光斑上的功率 P_1 , 若光斑面积为 S , 则测光敏面积为 S_0 的光电探测器获得的光功率为

$$P = \frac{S_0}{S} P_1 \quad (9)$$

探测器输出中频信号的功率可先测出中频放大器输出端中频电压有效值, 然后根据放大器输入输出阻抗、放大倍数折算到放大器的输入端而得到。

四、实验结果

我们在本振光功率为 0.5 mW、9.5 μ W 时对频偏 70 MHz 的中频信号 SNR 与信号光功率的关系进行了测试, 结果示于图 2。图中可知 SNR 值与信号光功率保持线性关系与理论分

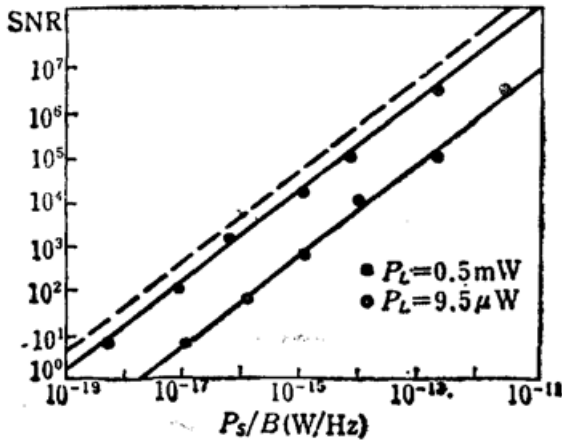


Fig. 2 Signal-to-noise ratio in the heterodyne system vs signal power at two different local oscillator power values

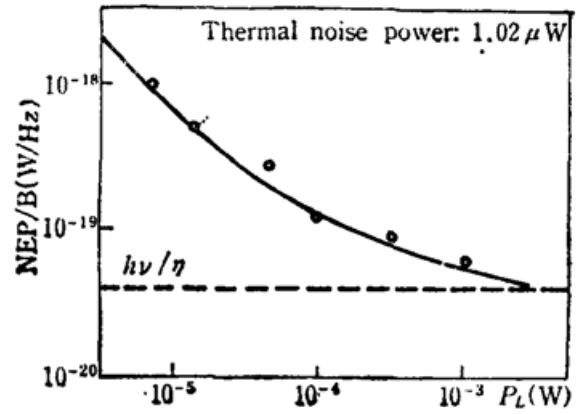


Fig. 3 The noise equivalent power (NEP) shown as a function of local oscillator power, the circles are the measured values. The solid line represents the theoretical curve

析式(2)一致。图中虚线为光外差系统工作于量子限且 $\eta_{het} = 1$ ，而实际测试时系统并非工作于量子限，且 $\eta_{het} \neq 1$ 。故实际测试结果与理论极限有一差别。

图3为70 MHz外差中频信号的NEP测试值在热噪声功率为 $1.02 \mu\text{W}$ 时与本振光功率的关系。图中“○”表示实验测试值，实线表示式(4)理论值。从图中可看出在较大的本振光功率下，NEP接近于理论限。本振光功率为 1 mW 时，最小NEP值为 $5.8 \times 10^{-20} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ，而理论限的NEP值为 $4.0 \times 10^{-20} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

图4为不同外差中频时，其外差信号NEP的实测值。从图中可以看出该系统的NEP值在 $70 \text{ MHz} \pm 4 \text{ MHz}$ 中频附近较为一致。外差系统在这段频率范围内NEP的最好值是 $8.2 \times 10^{-20} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。实验中本振光功率 $P_L = 0.5 \text{ mW}$ 。

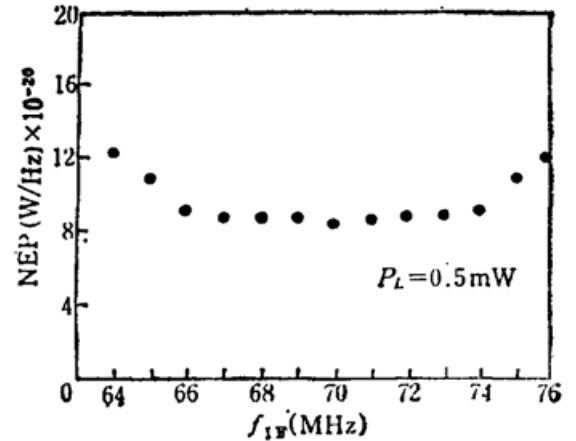


Fig. 4 The noise equivalent power(NEP) vs heterodyne IF frequency

五、误差分析

实验的误差主要来源于仪器测量误差、读数误差等。测量中频信号有效值 V_{IF} 的高频毫伏表，其相对误差在满刻度的3%内。激光器输出功率的起伏也会引起测量误差，实验中激光器的功率稳定度在5%内，本实验为了克服激光功率不稳的影响，采取测量多组数据然后取平均。用示波器法测噪声功率也会带来一定的误差，但这种方法在实际工程中普遍应用，本实验也采用该方法。

参 考 文 献

- 1 M. C. Teich, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **9**, 357(1966)
- 2 C. J. Buczek et al., *Appl. Phys. Lett.*, **11**, 125(1976)
- 3 除介平, 声光调制器原理及应用, 科学出版社, 1982, 第三、五章。
- 4 程哲源, 卢国伟, 激光杂志, **7**(2), 78(1986)
- 5 M. Ross, *Laser Receivers*, **5**, 87(1966)