

用扫描干涉法测定光电系统高频响应

叶培德 史 琚

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

提出了用扫描 Fabry-Perot 干涉仪对光电系统 10~500 MHz 的频率响应进行测试的方法. 用信号半值宽度 τ_m 来估计光电系统的高频截止频率 f_c , 讨论了 $f_c = 1/1.7\tau_m$ 的理论依据和适用范围. 本方法的特点是无需高频光源和高频信号源, 即可进行光电系统的高频响应测试.

关键词: 扫描 Fabry-Perot 干涉仪, 光电系统, 高频响应.

1 引 言

高频响应是光电系统的一个主要指标, 它反映了系统对光信号的时间响应特性. 一般光电系统是由光电传感器与电子学系统组成的, 两者的高频特性可以分别通过器件参数和测试得出, 但整个光电系统高频特性的测定却不能简单地由以上两部分直接测得.

一般的测量方式有交流测量和脉冲测量两种. 交流测量包括斩波器光调制和发光二极管光调制两种方法, 但二者均受到调制频率的限制, 前者最高达 kHz 数量级, 后者也只能达到几个 MHz 数量级^[1], 因此很难对工作在视频范围以上的光电系统进行高频特性的测定. 若采用脉冲方法, 一般脉冲激光器输出的激光脉冲的脉宽可达几~十几 ns, 甚至更短, 可以用来测定 1000 MHz 以内的光电系统的高频特性, 但这种脉冲激光器价格昂贵, 只在少量实验室使用. 本文提出一种新方法, 用实验室常用的激光光源、扫描 Fabry-Perot 干涉仪、信号发生器, 就可测定带宽 10~500 MHz 的光电系统的高频特性.

2 测量原理和方法

测量系统由激光光源, 信号发生器, 扫描 Fabry-Perot 干涉仪及 100 MHz 示波器组成, 系统结构如图 1 所示.

Fabry-Perot 干涉仪是一种多种光束相干的干涉仪器, 具有很高的分辨率, 是激光光谱实验中最常用的一种干涉仪. 由于球面反射镜的调节和加工精度比平面反射镜低, 所以扫描干涉仪采用球面共焦扫描 Fabry-Perot 干涉仪^[2].

根据光学理论^[3,4], 扫描 Fabry-Perot 干涉仪的输出光强为

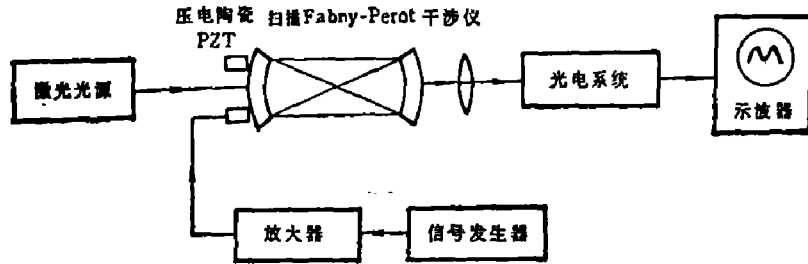


图1 光电系统测量系统

Fig. 1 System for measuring frequency of opto-electrical system

$$I_T = I_0 \frac{[T/(1-R^2)]^2}{1 + [2R/(1-R^2)]^2 \sin^2(\delta/2)} \tag{1}$$

式(1)中 R 是反射率, I_0 是输入光强. 当 $\delta = 2m\pi$ 和 $\delta = 2(m+1)\pi$ 时, 有最大透过强度. 两极大之间的频率间距 $\Delta\nu_f$ 称做干涉仪的自由光谱区, 在光近轴入射时,

$$\Delta\nu_f = \frac{c}{4r} \tag{2}$$

式(2)中 r 是球面共焦 Fabry-Perot 干涉仪反射镜半径, c 是光速.

最大强度的二分之一所对应的半值宽度 $\delta\nu_m$ 为

$$\delta\nu_m = \frac{c(1-R^2)}{4\pi r R} \tag{3}$$

精细度 F^* 定义为自由光谱区 $\Delta\nu_f$ 与半值宽度 $\delta\nu_m$ 之比:

$$F^* = \frac{\Delta\nu_f}{\delta\nu_m} = \frac{\pi R}{(1-R^2)} \tag{4}$$

对理想的情况, 其精细度仅由镜面反射率 R 来确定. 当 $R=0.85$ 时, $F^* \approx 10$; 当 $R=0.985$ 时, $F^* \approx 100$; 当 $R=0.997$ 时, $F^* \approx 500$; 当 $R=0.998$ 时, $F^* \approx 1000$.

图2表示了 Fabry-Perot 干涉仪相位 δ 和腔长 L 与输出光强的关系, 即不同反射率的爱里分布.

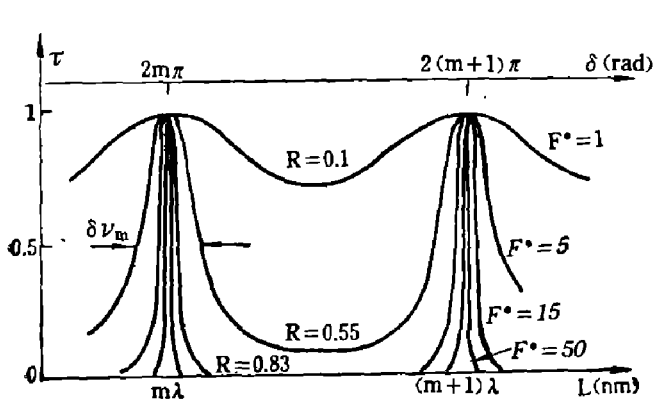


图2 不同反射率 R 的爱里分布

Fig. 2 Distribution of different reflectivity R

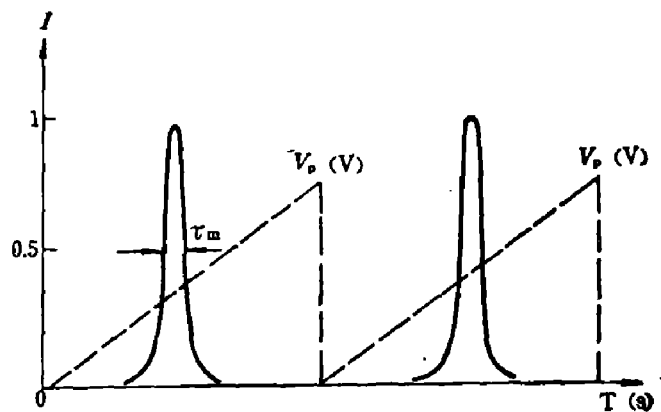


图3 扫描光强输出

Fig. 3 Scanning light intensity output

扫描干涉仪即是利用扫描电压能引进压电陶瓷长度的变化, 一般为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm/V}$, 从而实现对 Fabry-Perot 干涉仪的腔长控制, 进行锯齿波扫描. 扫描最大电压控制在使腔长变化稍大于一个波长 λ , 即 $V \geq (1.5 \times 10^{-6} \text{ cm/V})^{-1} \lambda$, 这样得到的归一化光强输出如图3

所示。图 3 中虚线表示对应的扫描锯齿形电压, 从 0 V 扫描到 $V_p \geq (1.5 \times 10^{-6} \text{ cm/V})^{-1} \lambda$ 。干涉仪输出信号半值宽度 τ_m 与加在压电陶瓷上的信号周期 T 的关系为

$$T/\tau_m = F^* \tag{5}$$

由式 (5) 可知, 提高信号发生器的频率和干涉仪镜面反射率 R 可减小干涉仪输出光信号的半值宽度 τ_m 。由于压电陶瓷的响应截止频率在 1 MHz 左右, 因此对 100 MHz 以上的光电系统的测量, 采用高反射率的 Fabry-Perot 干涉仪。压电陶瓷的截止频率是限制此方法进一步提高测量频率的主要因素。

若锯齿波的扫描频率为 1 MHz, 即扫描周期 $T = 1 \mu\text{s}$ 。当 $F^* = 10$, 时间半值宽度 $\tau_m = 0.1 \mu\text{s}$; $F^* = 100$, $\tau_m = 0.01 \mu\text{s}$; $F^* = 500$, τ_m 达 2 ns, $F^* = 1000$ 时, τ_m 达 1 ns。

3 测量与分析

实际测量中我们采用 DW 型单模稳频 He-Ne 激光光源; 扫描 Fabry-Perot 干涉仪采用 $r = 12.5 \text{ cm}$, $R = 0.985$ 的共焦球面扫描 Fabry-Perot 干涉仪, 信号发生器采用 XD19 函数发生器, 1 Hz~10 MHz 频率连续可调, 信号发生器能产生输出 0~5 V 的锯齿波扫描电压。但由于压电陶瓷使干涉仪腔长变化一个波长所需电压为 50 V 以上, 所以还需要对输出信号进行一级放大。

对以 PIN 硅光电二极管与跨导型前置放大器组成的光电系统进行高频测试, 得到如图 4 所示的电信号输出。

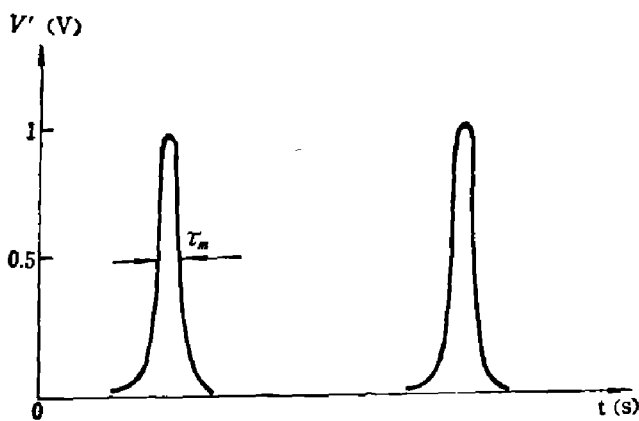


图 4 光电系统输出信号

Fig. 4 Output signal of opto-electrical system

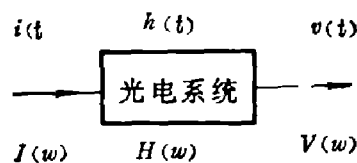


图 5 系统框图

Fig. 5 System architecture

根据线性系统理论^[5], 此光电系统也可以用图 5 来描述, 其中 $v(t) = h(t) * i(t)$, $*$ 为卷积运算; $V(\omega) = H(\omega) \cdot I(\omega)$, $V(\omega)$ 、 $H(\omega)$ 、 $I(\omega)$ 分别是 $v(t)$ 、 $h(t)$ 、 $i(t)$ 的傅里叶变换。

在理想情况时可认为 $F^* \gg 1$, $i(t)$ 锐利到近似可以用函数 $\delta(t)$ 来描述, 光电系统的频谱响应可以用矩形窗口

$$\begin{cases} \pi/\omega_0 & (|\omega| < \omega_0) \\ 0 & (|\omega| > \omega_0) \end{cases}$$

来描述, 如图 6 所示。

由于 $I(\omega) = \mathcal{F}[\delta(t)] = 1$, 所以

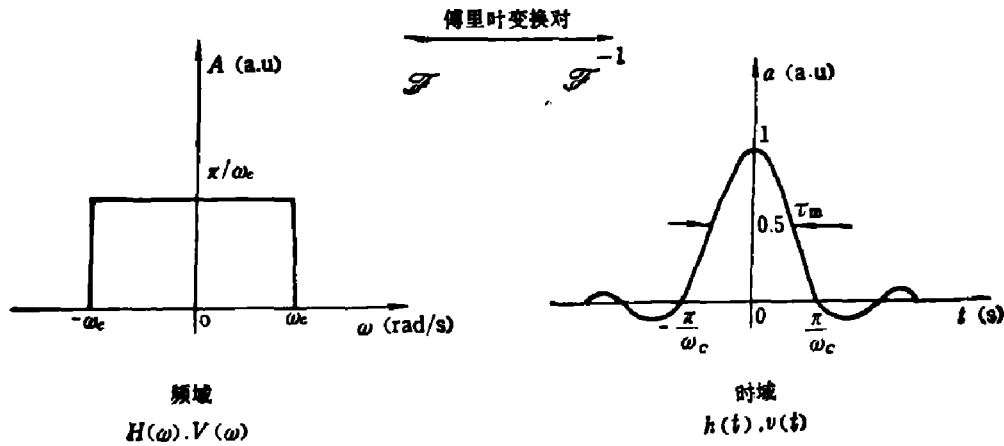


图 6 矩形窗傅里叶变换

Fig. 6 Fourier transform of rectangular window

$$v(t) = \mathcal{F}^{-1}[V(\omega)] = \mathcal{F}^{-1}[H(\omega) \cdot I(\omega)] = \mathcal{F}^{-1}[H(\omega)] = h(t) \tag{6}$$

而 $H(\omega)$ 如图 6 所示为矩形窗, 则 $h(t)$ 为抽样函数 $S_a(\omega_c t)$. 所以有

$$v(t) = h(t) = S_a(\omega_c t) = \frac{\sin \omega_c t}{\omega_c t}.$$

根据 $\frac{\sin \omega_c t}{\omega_c t} = \frac{\sin 2\pi f_c t}{2\pi f_c t} = \frac{1}{2}$. 可求得 $t \doteq \frac{1}{3.4 f_c}$, 所以 $v(t)$ 和 $h(t)$ 的半值宽度 τ_m

为

$$\tau_m = 2t = \frac{1}{1.7 f_c}; \tag{7}$$

式(7)中 f_c 为光电系统的响应截止频率, 即

$$f_c \doteq \frac{1}{1.7 \tau_m}. \tag{8}$$

式(8)表明在理想情况下, f_c 可以直接通过测量 $v(t)$ 的半值宽度 τ_m 来估算. 而实际情况(以字母右上角加“'”来表示), 光输入 $v'(t)$ 具有一定的时间宽度, 光电系统的截止频率也有一定的过渡频带宽度. $v'(t)$ 为 $h'(t)$ 与 $\hat{v}(t)$ 的卷积, 所以 $v'(t)$ 要比 $v(t)$ 的波形稍平坦些. 这样用理想情况下的式(8)来估计实际系统的截止频率必然存在着一定的误差.

对实际情况进行计算机模拟^[6, 7, 8], 输入光强为爱里函数, 即公式(1); 系统响应 $H(\omega)$ 为高阶 Butterworth 函数, 即 $H(\omega) = 1 + \epsilon \omega^{2N}$, 其中 $N=8$, ϵ 为参变量. 定义 $I(\omega)$ 的半值宽度与 $H(\omega)$ 的半值宽度之比为 σ ; 而相对误差 e 定义为实际测量的 $v(t)$ 的半值宽度 τ'_m 和理想情况下 $v(t)$ 的半值宽度 τ_m (即光电系统 $h(t)$ 的半值宽度)之差与 τ'_m 之比, 即

$$e = \frac{\tau'_m - \tau_m}{\tau'_m} \times 100\%.$$

计算机运算结果如图 7 所示. 由图 7 可知, 当 $\sigma=1$ 时, 误差在 10% 左右, 当 $\sigma=2$ 时, 误差在 5% 左右; 当 $\sigma=10$ 时, 误差在 2% 以下. 所以只要光信号带宽二倍于被测光电系统带宽, $f_c = 1/1.7 \tau_m$ 公式的测量误差就可在 5% 左右. 由于 $\tau'_m > \tau_m$, 所以 $f'_c < f_c$. 本方法误差估计偏小, 所以从测量精度看可达到一般的测量要求.

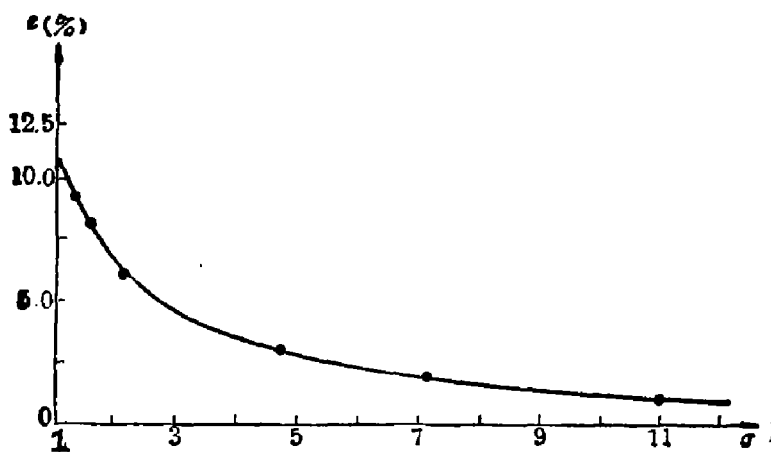
图7 误差 e 与带宽比 σ 关系

Fig. 7 The error versus frequency width ratio

4 讨 论

实验表明,用扫描 Fabry-Perot 干涉仪法进行光电系统的高频特性估计和测定是一种有实用价值的新方法.在精细度 F^* 为 100 时,可以测量 1~100 MHz 的光电系统的频率响应.当 F^* 达 1000 时,可测量达 500 MHz 的频率响应,测量误差在 5% 左右.特别对 10~500 MHz 高频带,本方法更显示出独特的优越性.

致谢:感谢匡定波、陈桂林老师对论文课题的热情支持和精心指导.

参 考 文 献

- 1 石保安 et al. 红外研究, 1990; 9(1): 57~62
- 2 强国威 et al. 激光光谱学原理与技术, 北京: 北京理工大学出版社, 1989: 60~63
- 3 Demtröder W. *Laser spectroscopy basic concept and instrumentation*, Springer-veriag, 1982
- 4 Michael Hercher. *Applied Optics*, 1968, 7(5):951~966
- 5 郑君里 et al. 信号与系统(上册), 北京: 人民教育出版社, 1981: 540~553
- 6 河田 聡 et al. $\gamma = \kappa - \text{左} - \text{ス}$, 1983; 69(1): 108~118
- 7 Oppenheim etc A. V. *Signal and system* prentice-Hall, Inc., 1983
- 8 Oppenheim etc A. V. *Digital signal processing*, prentice-Hall, Inc., 1975

MEASUREMENT OF HIGH FREQUENCY RESPONSE OF OPTO-ELECTRICAL SYSTEM USING SCANNING FABRY-PEROT INTERFEROMETER

YE PEIDE, SHI JUN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200083, China)

This paper provides a new method for measuring high frequency (10~500 MHz) response of opto-electrical system using scanning Fabry-Perot interferometer. Half-value width of signal τ_m is used to estimate high cut-off frequency f_c . The theoretical basis and applicable range of the equation of $f_c=1/1.7\tau_m$ are discussed. This method can be used to measure the high frequency response of opto-electrical system without high frequency light source and high frequency signal generator.

Key words: scanning Fabry-Perot interferometer, opto-electrical system, high frequency response.