

文章编号: 0253-2239(2003)01-67-04

像增强器噪声频谱特性测试技术研究*

钱芸生 常本康 童默颖 刘 磊

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 对一台进口的像增强器信噪比(SNR)测试仪进行改造,重新研制和设计了测试仪的信号处理模块、计算机系统 and 测试软件,采用硬件滤波、软件数字滤波和快速傅里叶变换(FFT)相结合的方法实现了像增强器噪声的频谱特性测试。利用所研制的测试仪对多种型号的进口和国产像增强器的噪声频谱进行了测试分析,并给出了分析测试结果。

关键词: 信号检测; 像增强器; 频谱特性; 信噪比; 噪声测试

中图分类号: TN16 文献标识码: A

1 引 言

像增强器通常工作在夜间微光条件下,输入的光信号非常微弱,这就要求像增强器有足够的亮度增益,以便把微弱的光辐射图像增强到人眼可以观察到的程度。与此同时,像增强器产生附加背景噪声,这个附加噪声使荧光屏产生一个背景亮度,从而使图像的对比度恶化,严重时可使目标信号淹没于该噪声中。像增强器产生附加噪声的主要因素是:输入光子噪声、光阴极量子转换噪声和暗发射噪声、微通道板的探测效率及二次倍增量子噪声、荧光屏颗粒噪声等等^[1,2]。像增强器的噪声特性主要用信噪比来表示,它是表征像增强器性能的一个重要参量^[1~4]。测试和分析噪声频谱有助于噪声特性的深入研究,也为信噪比的测试提供了理论依据。

像增强器噪声特性的测试涉及光学、光电技术、精密机械、电子学、信号处理和计算机及其接口技术,国内采用的测试设备均为进口设备,一般仅对信噪比进行测试,对噪声频谱特性的测试还是空白。本文研究像增强器的噪声频谱特性的测试技术,首先对一台进口的信噪比测试仪进行了改造,重新设计和研制了信号处理模块、计算机系统和测试软件,采用硬件滤波、软件数字滤波和快速傅里叶变换相结合的方法实现了像增强器噪声频谱特性测试。并利用研制的测试仪对多种型号的进口和国产像增强器进行了噪声频谱测试分析,并给出了测试分析结果。

2 像增强器噪声频谱特性的测试原理与实现

改造的信噪比测试仪为一台 20 世纪 80 年代中期进口的设备,经解剖分析,其光学部分仍能正常工作,信号处理部分和计算机系统已经不能工作。因此,在深入研究噪声特性测试理论和测试技术的基础上,对其信号处理部分和测试软件进行了重新设计和研制,并升级了计算机系统。测试仪原有的计算机系统采用的是 Z80 单片机系统,由于要进行频谱分析,已不能适应测试要求,因此重新设计后采用奔腾 III733 中央处理器的研华工控机系统;编程语言采用 Visual C++ 代替了原有的汇编语言。改造后的测试仪原理方框如图 1 所示。改造后的测试仪不仅能测试像管的信噪比,还能对像管噪声的频谱特性进行分析。对噪声的频谱分析的原理如下:

1) 测试仪光源由灯、滤光片和光阑组成。积分球(Integrating sphere)输出的光照射在一个直径为 0.2 mm 的小孔上,通过光学系统,小孔成像在测试盒(Testbox)中的待测像管的光电阴极面,其直径为 0.2 mm,照度为 1.29×10^{-5} lx。

2) 光点的像在像增强器的荧光屏得到亮度增强,光点像直径取决于像增强器的放大倍率,荧光屏上的光点像再经光学系统成像在光电倍增管的光电阴极上,直径不变。

3) 光电倍增管采用 EMI 公司制造的低噪声型倍增管,其输出的光电流信号约为 10^{-8} A 量级。信号处理模块对其放大并转换为电压信号。信号处理模块中包含有用作前置信号滤波器的硬件低通滤波器,其截止频率根据所分析的频谱范围可变,必须大

* 国防重点预研项目资助课题。

E-mail: yshqian@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2002-01-14; 收到修改稿日期: 2002-04-08

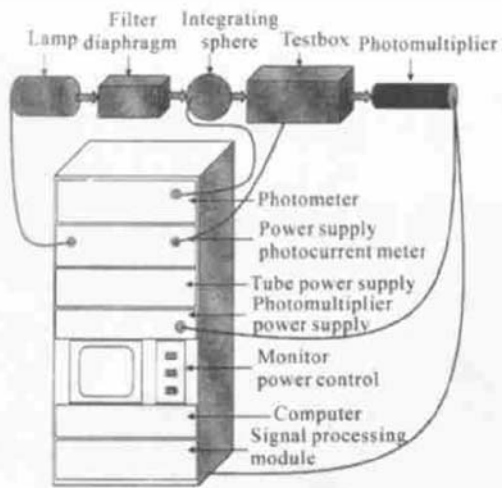


Fig. 1 Schematic diagram of SNR measurement system

于所要分析的频谱范围的最大值,但要受数据采集模块中的模拟/数字转换卡的带宽限制。

4) 数据采集模块对信号处理模块输出的信号进行模拟/数字转换,输入计算机。采样频率为 1 kHz、5 kHz 和 10 kHz 可选,采样时间间隔采用设计的硬件电路精确定时。

5) 计算机采集信号后,测试软件根据要求对信号处理,获得所要的信噪比值和噪声频谱分析结果。由于信噪比测试和噪声频谱分析需要进行不同频率的低通滤波,因此,采用了有限长单位脉冲响应数字滤波器(FIR DF)。和硬件滤波相比,数字滤波器具有使用灵活、滤波效果好和无附加噪声的优点。

6) 对像增强器进行噪声频谱分析时,首先根据所要分析的噪声频谱范围采用有限长单位脉冲响应数字滤波器进行数字滤波,然后采用快速傅里叶变换进行频谱分析。

3 像增强器噪声频谱分析的算法实现

3.1 有限长单位脉冲响应数字滤波器设计^[5]

设计数字滤波器技术指标为: $\omega_p = 10 \text{ Hz}$, $\omega_s = 15 \text{ Hz}$, $\delta_1 = \delta_2 = 0.05$ 。其中 δ_1 为通带纹波峰值, δ_2 为阻带纹波峰值, ω_p 为通带频率, ω_s 为阻带频率。要逼近理想数字滤波器,其通带放大倍数归一化后为 1,阻带放大倍数为零。假设有限长滤波器单位抽样响应的长度 $N = 127$,已知 ω_p 、 δ_1 、 δ_2 。而 ω_s 可小幅度改变,设频率子集 $F = [0, \omega_p] \cup [\omega_s, \pi]$ 。设计步骤如下:

第一步,根据交替定理,在频率子集 F 上指定一组等间隔的频率点 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{M+1}$ 作为最初猜

测的交错点组,利用范德蒙行列式的性质,计算第一次指定的交错点组的误差函数 ρ 值。再利用重心形式的拉格朗日内插公式,得到一个逼近滤波器的频率响应 $H_g(\omega)$,代入误差表达式可得误差函数 $E(\omega)$,若在 F 上,对所有的 ω ,都满足

$$|E(\omega)| \leq |\rho|. \quad (1)$$

这说明, ρ 是纹波的极值,初始猜定的 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{M+1}$ 恰是交错点组。如不是,需要交换上次猜测的交错点组中的某些点,得到一组新的交错点组。

第二步,对上次确定的交错点组 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{M+1}$ 中的每一个点,是否满足(1)式,如若否,再在该点找出局部极值点,用这一局部极值点代替原来的点。又得到一组新的交错点组 $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{M+1}$,重新求出 $\rho, H_g(\omega), E(\omega)$,这样就完成了一次迭代。通过交换算法,使得这一次的交错点组中的每一个 ω_i 都是由上一次的交错点组所产生的 $E(\omega)$ 的局部极值频率点,因此,用这次的交错点组求出的 ρ 将增大。

第三步,利用和第二步相同的方法,把在各频率处使满足式(1)的点作为新的局部极值点,从而得到一组新的交错点组。

重复上述步骤。因为新的交错点组的选择都是作为每一次求出的 $E(\omega)$ 的局部极值点,因此,在迭代中,每次的 $|\rho|$ 都是递增的。 ρ 最后收敛到自己的上限,再判断 ρ 与 δ_2 值的大小,若 $|\rho| > |\delta_2|$,小幅度改变 ω_s ,重复第一步。若不是就完成了迭代过程,也即 $H_g(\omega)$ 最佳地一致逼近 $H_d(\omega)$ 。因此,若再迭代一次,新的误差曲线 $E(\omega)$ 的峰值将不会大于 $|\rho|$ 。由最后的交错点组可得到 $H_g(\omega)$,将 $H_g(\omega)$ 附上线性相位后再作逆变换,便可得到数字滤波器的单位抽样响应 $h(n)$ 。

3.2 快速傅里叶变换算法实现^[5]

快速傅里叶变换有两种基本形式:第一种按时间抽取,即将时域信号 $X(n)$ 逐渐分解成较短的子序列;第二种按频域抽取,将频域信号-离散傅里叶变换(DDT)系数序列 $X(K)$ 分解成较短序列。两者在计算效率上是相同的。

在噪声频谱分析中采用的是基于时间抽取的快速傅里叶变换,采用此方法计算一个离散数据序列(要求序列长度为 2 的幂次方)的傅里叶变换,其基本步骤为:1) 输入离散数据序列,通常采用数组方式;2) 码位倒置以便正序输出;3) 进入主循环进行蝶形运算;4) 输出频域数据序列。由于 N 是 2 的幂次方,因此最终将原始数据系列逐步划分为计算大

小为 2 的离散傅里叶变换。

4 结果与讨论

利用研制的噪声频谱测试仪对国产的 1XZ20/30W-3 型像增强器和进口的 XX2052/Q 型等多种型号的像增强器进行了频谱分析。第一步取采样率为 5 kHz, 分析 0~1 kHz 范围的噪声频谱。第二步取采样率为 1 kHz, 分析 0~100 Hz 范围的噪声频谱。

图 2 显示的是两种像增强器在 0~1 kHz 范围内归一化后的噪声功率谱随噪声频率的变化趋势。总的来讲, 噪声的功率谱随频率的增加而降低, 其形状十分接近于 $1/f$ 噪声 (f 为噪声频率), 对其它型号 (如 XX1509/J 型) 像增强器同样呈这种趋势; 图 3 显示的是两种像增强器在 0~100 Hz 范围内归一化后的噪声功率谱随噪声频率的变化趋势。结果表明, 从 0~100 Hz 的局部范围来说, 噪声的功率谱尽管随频率的增加有降低的趋势, 但在 0~50 Hz 范围内下降比较平缓。

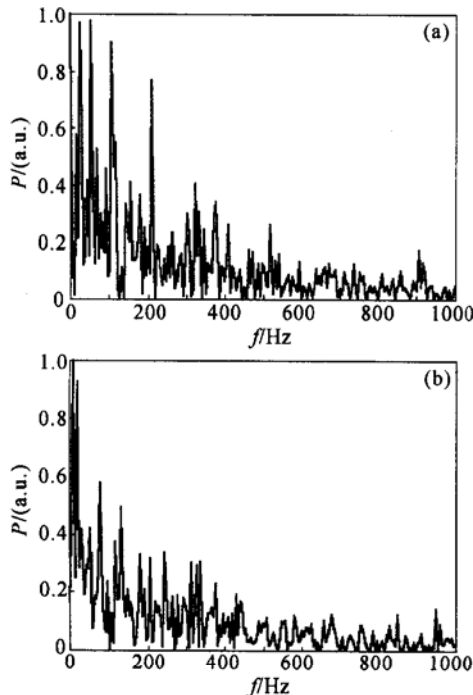


Fig. 2 The frequency spectrum of noise range from 0 to 1 kHz. (a) 1XZ20/30W-3 image intensifier; (b) XX2052/Q image intensifier

像管噪声产生的原因有很多种, 主要有量子涨落噪声、产生-复合噪声、电流噪声、荧光屏的颗粒噪声, 其中量子涨落噪声包括输入光子、光电阴极发射电子、微通道板倍增电子和荧光屏输出光子等的涨落噪声, 它们都具有泊松分布, 是白噪声。产生-复

合噪声是由于光敏面上载流子的产生及复合都具有随机性而引起的, 在 0~1 kHz 范围内可以认为是白噪声。半导体器件有电流时会产生电流噪声, 它是一种 $1/f$ 噪声。荧光屏在像管的噪声产生过程中起双重作用, 一方面, 由于荧光屏余辉的存在, 对噪声起着低通滤波的作用; 另一方面, 它将产生荧光屏输出光子涨落噪声和颗粒噪声, 后者是由于荧光屏结构具有的非均匀性产生的。从图 2 和 3 可见, 对所分析的像管来说, 在影响像管性能的低频部分 (< 100 Hz), 量子涨落噪声和产生-复合噪声起着主要作用, 但也包含着一定的电流噪声; 随着频率的增加, 荧光屏的低通滤波效果开始起作用, 从而使噪声的总体形状趋向于 $1/f$ 噪声。

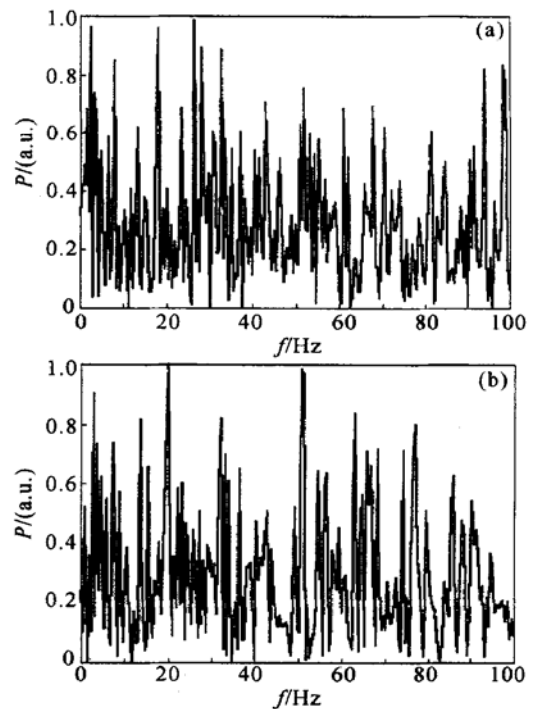


Fig. 3 The frequency spectrum of noise range from 0 to 100 Hz. (a) 1XZ20/30W-3 image intensifier; (b) XX2052/Q image intensifier

在测试信噪比时, 按测试标准应取 10 Hz 以下的交流信号作噪声信号, 但测试仪滤波器的截止频率并不一定是 10 Hz, 这时需要对所测信噪比乘以一个 K 因子进行带宽修正, 在所分析解剖的进口测试仪中也采用了这种方法, 该测试仪中的低通滤波器的截止频率约为 30 Hz, K 通常取下式^[1]:

$$K = \sqrt{f_0/10}, \quad (2)$$

式中 f_0 为测试仪低通滤波器的截止频率, 采用这种修正方法要求像增强器的噪声频谱在 0~ f_0 范围内是均匀分布的。根据对噪声的频谱分析, 这种测试方法并不十分合理, 但如果带宽修正小于 50 Hz, 误差

是较小的。较合理的方法是直接将滤波器的频率设计为 10 Hz, 但要保证滤波器有较好的频率响应特性。在改进后的测试仪采用了硬件滤波和软件数字滤波相结合的方法, 很好地解决了这个问题, 取得较理想的结果, 同时实现了信噪比测试和噪声频谱分析。

结论 本文研究了像增强器的噪声频谱测试技术。对一台进口的信噪比测试仪进行了改造, 重新设计和研制了测试仪的信号处理模块、计算机系统和测试软件, 采用硬件滤波、软件数字滤波和快速傅里叶变换相结合的方法实现了像增强器信噪比测试和噪声频谱特性测试。利用研制的测试仪对多种型号的像增强器进行了噪声频谱分析, 结果表明: 像增强器的噪声功率谱在 0~ 1 kHz 范围内随频率增加而下降, 呈 $1/f$ 噪声形状; 在 0~ 50 Hz 范围内, 下降趋势比较小, 基本呈均匀分布状。由噪声频谱曲线可知,

在测试像增强器的信噪比时, 测试仪的滤波器带宽应小于 0~ 50 Hz, 这样引起的修正误差可以控制在较小的范围内。

参 考 文 献

- 1 Fang Ruzhang, Liu Yufeng. *Photoelectric Devices* (光电器件). Beijing: National Defence Industry press, 1988. 151~154 (in Chinese)
- 2 Xiang Shiming, Ni Guoqiang. *The Principle of Photoelectronic Imaging Devices* (光电子成像器件原理). Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 300~302 (in Chinese)
- 3 Bosch Leon A. Image intensifier tube performance is what matters. *Proc. SPIE*, 2000, **4128**: 65~78
- 4 Thomas Nils. System performance advances of 18-mm and 16-mm subminiature image intensifier sensors. *Proc. SPIE*, 2000, **4128**: 56~64
- 5 Wang Shiyi. *Digital Signal Processing* (数字信号处理). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. 123~273 (in Chinese)

Frequency Spectrum Measurement of Noise of Image Intensifiers

Qian Yunsheng Chang Benkang Tong Moying Liu Lei
(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)
(Received 14 January 2002; revised 8 April 2002)

Abstract: An imported signal-to-noise ratio (SNR) measuring system for image intensifiers is reconstructed. The signal processing module, computer module and measurement software of the system are redeveloped. The frequency spectrum measurement of noise of image intensifiers is achieved by integrating Fast Fourier Transform (FFT) with hardware filter and digital filter. The improved system is used to analyze frequency spectra of noise of homemade and imported image intensifiers. The results are given and analyzed.

Key words: signal detection; image intensifier; frequency spectrum; SNR; noise measurement