

减小声光频谱仪频率测量方差算法研究

何其锐¹, 李立萍²

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;

2. 电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 声光器件衍射光峰值偏转位置与输入信号频率成正比是声光频谱仪测频的基本原理, 但实际中衍射的非线性效应会引起衍射光峰值偏转误差较大。为减小频率测量方差, 需对衍射光强数据做相应处理。对 CCD 背景噪声的数字特征分析, 以背景噪声数学平均值为阈值做去噪处理。根据最小二乘法原理, 对衍射光强数据做一次高斯函数拟合, 拟合数据与光强数据相关系数为 0.997 6。在现有测试光学平台下, 根据衍射光强峰值位置估计的频率测量方差为 542.5 kHz², 利用拟合高斯函数中心值估计的频率测量方差为 31.8 kHz²。为减小声光频谱仪频率测量方差提供了理论支持。

关键词: 测量方差; 声光测频; 高斯拟合法; 最小二乘法

中图分类号: TP802+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1564-05

Algorithm study on reducing frequency measurement variance of acousto-optic spectrum analyzer

He Qirui¹, Li Liping²

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Diffraction beam deflection peak position of the acousto-optic device is proportional to the input signal frequency. It is the basic theory for acousto-optic spectrum analyzer frequency measurement. But the non-linear effects in diffraction causes diffraction peak deflection error. To get better measurement results, the diffraction intensity data should be processed to reduce the frequency of measurement variance. After the digital features of CCD background noise were analyzed, the background noise mathematical average had been taken as the threshold when denoising the data of diffraction intensity. According to the principle of least square method, fitting the diffraction intensity data by Gaussian function, the correlation coefficient is 0.997 6. Under the existing optical experimental platform, the measure variance is 542.5 kHz² while the frequency was estimated by the diffraction peak position; the measure variance is 31.8 kHz² while the frequency was estimated by the middle value of Gaussian fitting function. It provides theoretical support for reducing the frequency measurement variance of acousto-optic spectrum analyzer.

Key words: variance of measured error; acousto-optic frequency measurement; Gaussian fitting method; least squares method

收稿日期: 2014-09-10; 修订日期: 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61379013)

作者简介: 何其锐(1975-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事声光信号处理方面的研究。Email: heqr@uestc.edu.cn

0 引言

随着电子技术的发展,电磁信号环境已被高密度大瞬时带宽信号充斥。在这种复杂电磁环境下对信号频谱检测,以声光器件为核心的频谱分析系统^[1-2]比传统的数字频谱分析系统,在实时并行高带宽频谱检测方面有着更大的优势,能接收多个同时到达的信号,截获概率几乎能达 100%^[3-4]。由于声光器件在实际工作中的非线性效应^[5],会造成衍射现象的非线性。在输入信号频率相同而功率不同的情况下,由于超声吸收引起衍射光光强峰值偏转位置有较大偏差^[6]。因此需对衍射光光强峰值偏转位置的数据进行分析处理,以减小声光频谱仪的频率测量方差。

1 声光器件测频基本原理

在布拉格衍射模式下,当射频信号作用在声光器件时,其压电换能器产生的超声波频率随输入信号频率改变而引起声光介质的光栅间隔发生改变,衍射光的偏转角度与光栅间隔成正比,即与输入信号频率成正比。这种偏转角度随输入信号频率变化而变化的现象就是声光器件测频的基本原理。

声光器件测频的基本原理框图如图 1 所示。入射光与声光器件角度固定的情况下,衍射光的出射角与输入信号的频率成正比关系。入射光与衍射光之间的夹角有^[7]:

$$\theta = \frac{\lambda \cdot f}{v} \quad (1)$$

式中: λ 为光在介质中的波长; v 为声速在声光介质中声速; f 为输入信号频率。

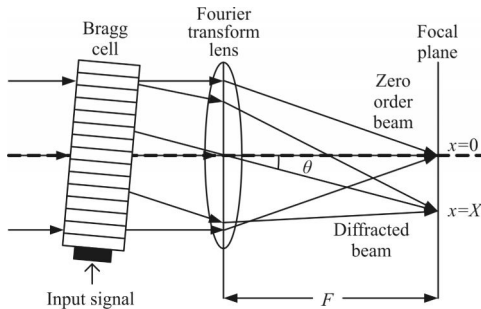


图 1 声光器件测频的基本原理框图

Fig.1 Acousto optic spectrum analyzer system

在傅里叶透镜焦平面处,衍射光聚焦在 $x=X$ 处,

傅里叶透镜焦距 F ,有:

$$X = F \cdot \frac{\lambda}{v} \cdot f \quad (2)$$

由此知道,输入信号的频率 f 与衍射光在傅里叶透镜焦平面 x 方向成像位置 X 成正比,若将光电探测器阵列置放在焦平面位置,则能测出输入信号频率。

设声光器件偏转带宽为 W ,根据公式(2),衍射光在傅里叶透镜焦平面偏转范围为:

$$\Delta X = F \cdot \frac{\lambda}{v} \cdot W \quad (3)$$

当在傅里叶透镜焦平面位置用一维 CCD 对光强信号进行采集处理时,设 CCD 两像素点中心距离为 d ,在频率测量中,一个像素点的偏差对应频率偏差为:

$$\Delta f = \frac{W}{\frac{\Delta X}{d}} = \frac{v \cdot d}{F \cdot \lambda} \quad (4)$$

通常,信号发生器在固定功率下,以不同频率输出信号作用在声光器件上,通过读取 CCD 采集的衍射光强数据,得到衍射光强峰值所在 CCD 像素位置和输入信号频率的对应关系,从而实现对输入信号频率的测量^[7]。

但由于声光器件中的超声换能器在输入信号不同驱动功率作用下,会造成超声吸收,引起衍射光指向偏差。在这种情况下,若以光强峰值对应像素点来测量频率,测量精度较差。

对 CCD 采集光强数据用高斯函数、sinc 函数、MARR 小波函数等函数进行数据拟合后,高斯函数的相关系数最大,与光强信号相似度最高。因此对光强数据做高斯函数拟合,分析其光斑中心,再做频率估计。

2 高斯函数拟合算法

拟合所采用的高斯函数表达式为:

$$G(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-B)^2}{C^2}} \quad (5)$$

A 、 B 、 C 是高斯函数拟合所求的参数。公式(5)两边取自然对数得:

$$\ln G(x) = (\ln A - \frac{B^2}{C^2}) + \frac{2B}{C^2} \cdot x - \frac{1}{C^2} \cdot x^2 \quad (6)$$

令 $\ln G(x) = \hat{y}$; $a_0 = \ln A - \frac{B^2}{C^2}$; $a_1 = \frac{2B}{C^2}$; $a_2 = -\frac{1}{C^2}$, 公式(6)

整理后得到:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (7)$$

拟合函数与 CCD 采集数据之间的差为:

$$Q(a_0, a_1, a_2) = \sum_{x=1}^m (\hat{y} - \ln y)^2 \tag{8}$$

式中: y 是 CCD 采集的光强数据值; m 是 CCD 采集数据的点数; x 是 CCD 像素点位置。

根据多元函数的极值定理^[8], $\min Q(a_0, a_1, a_2)$ 满足下式时, 均方误差最小。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = 2 \cdot \sum_{x=1}^m (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 - \ln y) \cdot 1 = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = 2 \cdot \sum_{x=1}^m (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 - \ln y) \cdot x = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_2} = 2 \cdot \sum_{x=1}^m (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 - \ln y) \cdot x^2 = 0 \end{cases} \tag{9}$$

此时求解公式(9)得高斯函数拟合参数 A 、 B 、 C 的结果为:

$$\begin{cases} C = \sqrt{-\frac{1}{a_2}} \\ B = -\frac{a_1}{2 \cdot a_2} \\ A = e^{-\frac{a_1^2}{4a_2}} \end{cases} \tag{10}$$

其中参数 B 是高斯函数中心, 也是光强数据处理后光斑中心。

3 声光测频测试系统

基于声光测频的原理, 设计了如图 2 所示的声光测频实验方案。

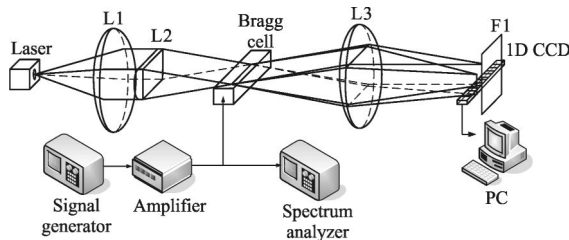


图 2 声光测频测试方案

Fig.2 Acousto-optic frequency measurement experimental setup

激光器产生的激光, 经凸透镜 L1 实现准直, 形成平行光束。平行光通过平凸柱面镜 L2 聚焦成线光束以最佳偏转角度入射声光器件晶体。声光器件在射频信号驱动下, 产生一级衍射光。零级光与一级衍射光通过凸透镜 L3 聚焦, 零级光被空间滤波器 F1 滤除, 一级衍射光在一维 CCD 探测阵列面上成像,

计算机通过 USB 端口对 CCD 成像数据进行采集。搭建声光测频光学测试平台如图 3 所示。

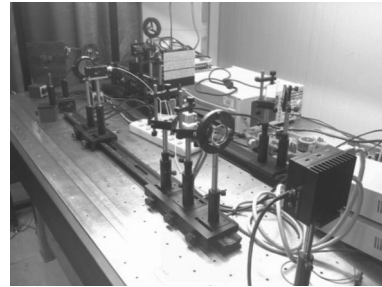


图 3 声光测频测试平台

Fig.3 Acousto-optic frequency measurement experimental platform

激光波长 635 nm, 声光器件为中电 26 所研制, 晶体材料是, 声速 617 m/s, 声光相互作用长度 9 mm, 中心频率 60 MHz, 带宽 40 MHz。傅里叶透镜 L3 焦距 30 cm。CCD 有效像素 2 048 点, 像素间距 14 μm , 有效感光长度 28.672 mm, 光谱响应范围 300~1 000 nm, 采用 USB2.0 数据输出。

4 实验数据采集分析与处理

4.1 声光器件偏转偏差

在信号发生器固定为 56 MHz 频率输出, 作用在声光器件功率通过频谱仪测量分别为 18.49 dBm、10.52 dBm、3.02 dBm 时, CCD 采集光强数据如图 4 所示。

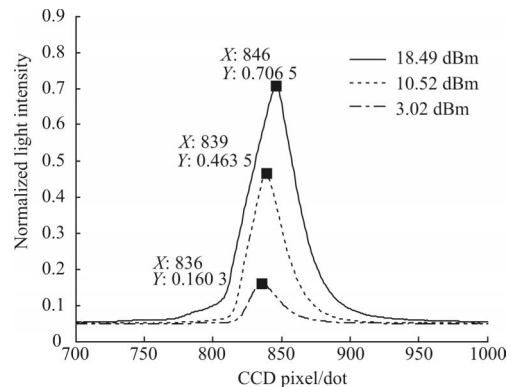


图 4 不同功率下光强数据

Fig.4 Diffracted beam intensity by the difference-power input signal

从图 4 明显看到, 在输入信号同频率、功率不同的情况下, CCD 采集的光强数据峰值所对应的像素点有较大偏移。

4.2 CCD 背景噪声分析处理

从图 4 看到, CCD 采集的光强数据有背景噪声的存在, 在对光强数据进行高斯函数拟合前要先去

除背景噪声。CCD 读出电路所引入的读出噪声、CCD 偏置电压所引入的背景暗电平、周围环境背景引入的光子噪声均可产生 CCD 的背景噪声^[9]。为了去除或减小 CCD 背景噪声的影响,常采用减阈值的去噪方法^[10],即根据 CCD 背景噪声的统计特性设置一个阈值,将 CCD 采集输出的光强数据统一减去该阈值并将负值置零。在无输入射频信号、无输入激光的条件下,CCD 采集的光强信号数据如图 5 所示。

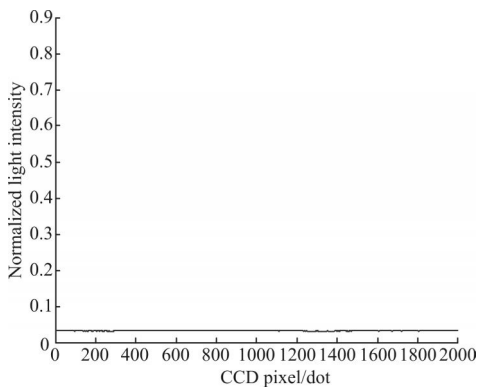


图 5 无激光条件下 CCD 背景噪声

Fig.5 CCD background noise without input beam

该信号的数学期望 0.323,方差 2.7376×10^{-7} ,最小值为 0.0307。从 CCD 背景噪声的数字特征结果知道,该信号为直流特征明显的随机信号。因此,选 CCD 背景噪声的数学期望值为阈值,将 CCD 采集的光强数据减去背景噪声的数学期望值后,再做高斯函数拟合分析。

4.3 光强数据做高斯拟合

在输入信号 15.74 dBm,信号频率 56.00 MHz 测试条件下,将 CCD 采集的光强信号去噪后,做高斯函数拟合,得到图 6 所示结果。

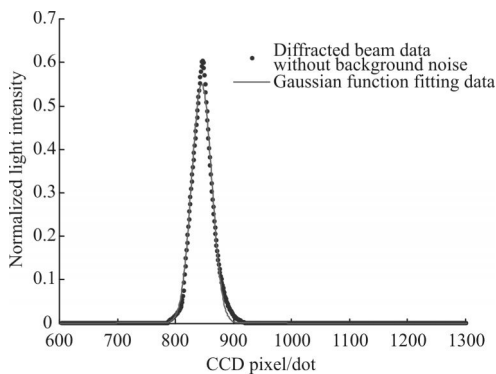


图 6 去噪后衍射光强数据与高斯函数拟合数据对比图

Fig.6 Contrast result between the diffracted beam data without background noise and the Gaussian function fitting data

去噪后光强数据与高斯函数拟合数据之间的相关系数 0.9976。显然,去噪后光强数据可以由高斯函数做很好的近似拟合。

4.4 高斯函数参数与光强峰值位置对比

输入信号频率 56.00 MHz,输入信号功率从 3.02 dBm 开始,到 18.49 dBm 结束,共测试 32 个点,得到 CCD 采集光强峰值位置对应像素点与输入信号功率的关系,以及相应高斯函数拟合数据参数与输入信号功率的关系,如图 7 所示。

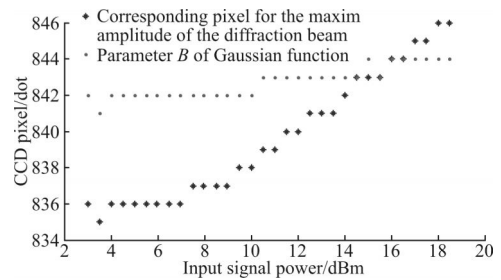


图 7 光强峰值位置对应像素点和高斯函数拟合参数 B 与输入信号功率关系图

Fig.7 Corresponding pixel for the maxim amplitude of the diffraction beam and the parameter B of Gaussian function by the difference-power input signal

根据公式(4)计算得到,在此测量系统下,CCD 采集光强数据一个像素点偏差对应测量频率偏差 45.3 kHz。

从图 7 知道,在输入信号频率保持不变的情况下,CCD 采集的光强数据峰值对应的像素点在输入信号不同功率的条件下,位置偏差很大,像素点的偏移范围为 12 个像素点,其数学期望值为 839.6563,方差为 11.9756,对应频率测量方差为 542.5 kHz^2 ;而高斯拟合函数的参数数值偏差很小,对应的像素点偏移范围为 4 个像素点,其数学期望值为 842.7188,方差为 0.7021,对应测量频率方差为 31.8 kHz^2 。根据高斯函数中心估计频率测量方差是根据光强峰值估计频率测量方差的 5.56%。显然,利用高斯拟合函数的参数来估计输入信号频率,受输入信号功率的影响更小,精度更高。

5 结论

在现有光学测试平台的条件下,提出了一种基于高斯拟合的减小声光频谱仪频率测量方差的算

法。该算法提高了声光频谱仪频率估计测量精度,且易于在 CCD 后端数据处理硬件平台实现,为提高声光频谱仪测频精度的工程实现提供了一定理论研究基础。

参考文献:

- [1] Proklov V V, Sindler Y B. AO-spectrum analyzer implementation into CDMA-telecommunications with enhanced SIR-factors [J]. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 2003, 50(7): 787-794.
 - [2] Bogdan O V, Pavlenko V K, Pashkevich G A, et al. Acousto-optical analyzers of microwave broadband spectrum [C]//Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2013 23rd International Crimean Conference, IEEE, 2013, : 940-941.
 - [3] Zhou Jiang, He Ning, Liao Xin, et al. Method of coherent detection with a shared line based on acousto-optic deflection [C]// International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011.
 - [4] Alexandre S Shcherbakov, Alexey M Bliznetsov, Abraham Luna Castellanos, et al. Acousto-optical spectrum analysis of ultra-high-frequency radio-wave analogue signals with an improved resolution exploiting the collinear acoustic wave heterodyning [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(16): 1497-1506.
 - [5] Ma Jing, Wang Jian, Song Yiwei, et al. Pointing deviation of abnormal acousto-optic deflector caused by the difference of wavelength between transmitting and receiving beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 901-904. (in Chinese)
 - [6] Ma Jing, Wang Jian, Tan Liying, et al. Research of pointing deviation of acousto-optic deflector due to ultrasonic attenuation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 805-809. (in Chinese)
 - [7] Wu Ran, Zhu Ji, Liu Biao, et al. Acousto-optic frequency spectrum analyzer achieving real-time frequency detection of the wide-band signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(10): 371-376. (in Chinese)
 - [8] Zhong Erjie, Huang Tingzhu. Numerical Analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 138-147. (in Chinese)
 - [9] Ma Xiaoyu, Rao Changhui, Zheng Hangqing. Error analysis of CCD-based point source centroid computation under the background light [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8525-8541.
 - [10] He Yuanxing, Li Xinyang. Influence of threshold method on calculation results of far-field spot quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1208001-1-1208001-7. (in Chinese)
- 马晶, 王健, 宋义伟, 等. 收发光波长差异产生的反常声光偏转器指向偏差[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 901-904.
- 马晶, 王健, 谭立英, 等. 超声吸收引起的声光偏转器指向偏差研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 805-809.
- 吴冉, 朱吉, 刘彪, 等. 实现宽带信号实时测频的声光频谱分析仪[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(10): 371-376.
- 钟尔杰, 黄廷祝. 数值分析[M]. 北京: 高等教育出版社. 2004: 138-147.
- 贺元兴, 李新阳. 阈值法对激光远场焦斑质量测量和计算的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1208001-1-1208001-7.