

文章编号: 1672-8785(2020)03-0033-05

光通信光谱分析仪波长定标方法研究

张 冰 刘亚南 刘 磊 李志增

(中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)是光通信领域的重要测试分析仪器, 主要用于测试光源、光纤光缆以及光器件的光谱特性。在介绍 OSA 基本原理的基础上, 研究了波长精细定标方法。首先, 分析了波长与采样点及探测波段之间的关系; 然后基于可调谐激光器与波长计, 利用最小二乘法对几个特征波长进行了定标; 最后利用近红外光谱测试系统进行了验证实验。结果表明, 定标后的波长准确度控制在 ± 0.3 nm 以内, 满足产品指标要求。

关键词: 光通信; 光谱分析仪; 波长定标; 波长拟合

中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.03.005

Research on Wavelength Calibration of Optical Spectrum Analyzer Using for Optical Communication

ZHANG Bing, LIU Ya-nan, LIU Lei, LI Zhi-zeng

(China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: Optical spectrum analyzer (OSA) is an important test and analysis instrument in the field of optical communication. It is mainly used for testing the spectral properties of the light sources, fibers and optical elements. On the basis of introducing the basic principle of OSA, the elaborate calibration method of the wavelength is studied. Firstly, the relationship between the wavelengths and the samples as well as the detection band is analyzed. Then the tunable laser, the wavemeter and the least square method are used to calibrate several characteristic wavelengths. Finally, the verification experiments are made by using the near-infrared spectrum test system. After the calibration, the accuracy of the wavelengths is controlled within ± 0.3 nm, which can meet the requirement of the specifications.

Key words: optical communication; optical spectrum analyzer; wavelength calibration; wavelength fitting

0 引言

OSA 是光通信领域的重要测试分析仪器, 用于测试光谱信息和各谱段的功率值。它的主要特点包括动态范围大(一般可达 60~70 dB)、灵敏度好(一般可达 -90 ~ -70 dBm)、分辨率

高(一般最高分辨率小于 0.1 nm)、测试范围覆盖主要光通信波段(1250~1650 nm)等。OSA 不仅可以用于光源光谱测试、参考点通路信号光功率与光信噪比测试、光放大器各个波长的增益系数和增益平坦度测试, 而且还可

收稿日期: 2020-03-04

作者简介: 张冰(1983-), 男, 山东诸城人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事光电测量仪器的研发工作。E-mail: 113838507@qq.com

以用于偏振膜色散测试和新型超宽可调激光光源测试等^[1]。

根据分光形式的不同,目前常用的 OSA 主要有色散型和干涉型两种。其中,色散型 OSA 一般采用高密度刻线的全息闪耀光栅作为分光元件,可保证系统具有较高的分辨率并防止光栅鬼线出现。干涉型 OSA 一般采用动镜推扫式迈克尔逊干涉仪作为分光系统,能够获取较大行程的光程差,继而保证系统的光谱分辨率满足测试要求。由于存在旁瓣效应,它的动态范围受限,不满足光通信大动态范围的测试需求。而色散型 OSA 在成本、性价比、光信噪比测试等方面具有优势,因此目前市场上主流的电信测试通常采用色散型 OSA^[2]。

近年来,我们研发了 6362 型 OSA(见图 1)。该仪器采用基于准 Littrow 结构的单光栅双路结构,其动态范围达到 70 dB(峰值±1.0 nm),测试波段为 600~1700 nm,光谱分辨率可调(包括 0.05 nm、0.07 nm、0.1 nm、0.2 nm、0.5 nm 和 1 nm),功率测试范围为 -90~10 dBm。它实现了光通信测试用高性能 OSA 的国产化,填补了国内空白,能够满足绝大多数的光通信测试需求,且在成本方面具有优势^[3]。



图 1 6362 型 OSA

为满足密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统元器件及测试的应用需求,光通信 OSA 需要具有光谱分辨率高(≤ 0.05 nm)、分辨率与光谱扫描波段可调等特点。以国产 6362 型 OSA 为例,其工作波段为 600~1700 nm,这对光谱数据的波长定标提出了很高的要求。

本文针对上述问题开展研究工作,首先介

绍光通信 OSA 的基本原理,并分析 OSA 波长与采样点及探测波段之间的关系;然后利用可调谐激光器与波长计对几个特征波长进行定标;最后利用特征波长值反演不同采样点的波长数值,进而建立波长与采样点之间一一对应的关系。

1 基本原理

光通信 OSA 通常采用准 Littrow 结构的双通光路。光束两次经过光栅后提高了光谱分辨率,并通过合理设置多个狭缝,降低了光噪声,实现了大动态范围信号的测试^[4]。当采用离轴抛物面反射镜作为主镜时,我们研发的 OSA 系统的原理图如图 2 所示。该系统包括离轴抛物面主镜、平面反射光栅、入射狭缝、中间狭缝、出射狭缝以及平面反射镜 M1、M2 和 M3。光信号通过入射狭缝,发散后经过离轴抛物面主镜形成平行光束,并以准 Littrow 角入射到平面反射光栅;有效级的衍射光束返回到离轴抛物面主镜,然后被反射到反射镜 M1,并被会聚在中间狭缝上;光束经过中间狭缝后进入反射镜 M2,并再次被反射至抛物面主镜,经准直形成平行光束后射向光栅。根据光路可逆原理,光束经反射镜 M3 后聚焦在出射狭缝的位置上,然后通过出射狭缝消除杂散光后进入点探测器^[5]。

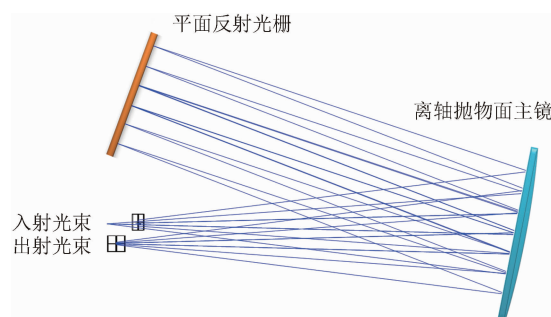


图 2 光通信 OSA 的基本原理

2 波长拟合方法

光通信 OSA 采用旋转光栅并配合高性能铟镓砷点探测器进行光谱探测。波长定标的主要工作是建立旋转角度值与波长之间的对应关系。该角度一般与高精码编码器或者步进电机

参数相关。通常认为输出信号的角度呈近似线性分布, 重复性可靠。采用 Littrow 结构的光谱仪的光栅方程可以表示为

$$2d\sin\theta = m\lambda \quad (1)$$

式中, d 为光栅常数, θ 为 Littrow 角, m 为衍射级次, λ 为波长值。对式(1)进行微分, 得到光谱分布间隔:

$$\delta\lambda = 2d\cos\theta\delta\theta \quad (2)$$

式中, $\delta\lambda$ 为波长间隔, $\delta\theta$ 为光栅角度间隔。在宽谱段扫描范围内, 理想情况下的光谱波长呈余弦函数分布。受扫描速度、读出速度波动等因素的影响, 光谱波长值会存在波动。在仪器研发过程中, 利用多项式逼近余弦函数, 则波长序列值可以表示为

$$\lambda(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + \dots + b_n \cdot x^m \quad (3)$$

式中, $\lambda(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ 为仪器输出的波长序列 (每个角度值对应一个输出波长), x 为仪器输出的角度序列, m 表示多项式阶数。为更加准确地拟合多项式, 采用最小二乘法对多项式进行拟合:

$$\begin{bmatrix} z+1 & \sum_{i=0}^z x_i & \dots & \sum_{i=0}^z x_i^z \\ \sum_{i=0}^z x_i & \sum_{i=0}^z x_i^2 & \dots & \sum_{i=0}^z x_i^{z+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=0}^z x_i^z & \sum_{i=0}^z x_i^{z+1} & \dots & \sum_{i=0}^z x_i^{2z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^z \lambda_i \\ \sum_{i=0}^z x_i \lambda_i \\ \dots \\ \sum_{i=0}^z x_i^z \lambda_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, z 为特征谱线的条数。在近红外光通信波段, 将可调谐激光器输出的多组标准波长值作为特征值, 并将其对应的谱线作为特征谱线。 x_i 为第 i 个特征谱线对应的曝光像元序号, λ_i 为第 i 个特征谱线的波长值。通过求解式(4), 可以求得拟合系数。利用最小二乘法拟合得到的曲线函数可以在整体上最大限度地

逼近被拟合的函数, 从而降低拟合误差。波长拟合的流程如图 3 所示。

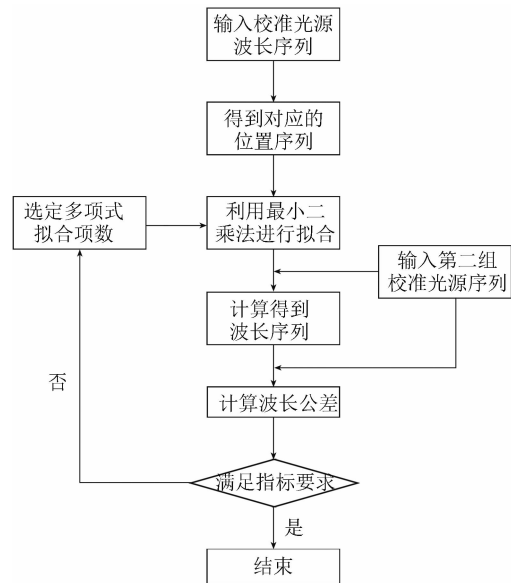


图 3 波长定标流程图

3 实验结果及分析

实验中采用是德科技公司的 1550 nm 可调谐激光器作为标准波长输入源, 用于标定自主研发的光通信 OSA 在 1450~1650 nm 区间内的波长输出值。实验系统装置如图 4 所示。可调谐激光器输出的激光经过单模光纤后进入 OSA。

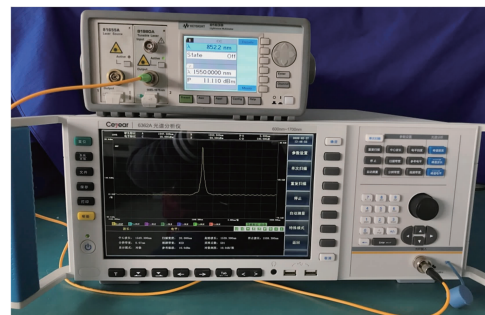


图 4 实验系统装置

OSA 的扫描范围为 1450~1650 nm。可调谐激光器覆盖了这个波长范围, 并且每隔 10 nm 输出一个波长值。将 OSA 设置成以最小分辨率(0.05 nm)进行扫描。激光器输出激光的线宽远小于采样间隔。表 1 列出了可调谐光源输出的 21 组波长值及其对应的输出序列。

利用上述波长来定标时, 采用三阶多项式

进行最小二乘法拟合, 得到波长分布方程:

$$\lambda = 1450 + 0.01374x - 7.701 \times 10^{-8}x^2 \quad (5)$$

根据式(5), 给出了 1525 nm、1535 nm、1545 nm、1555 nm 和 1565 nm 输入光信号的波长值(测量结果及数据见图 5 和表 2)。

实验结果表明, 利用该方法能够有效地对光通信 OSA 进行波长定标, 波长准确度控制在 ± 0.3 nm 以内, 可以满足指标要求。采用最小二乘法定标时, 精度除了受多项式的项数影响之外, 还与拟合的波段宽度有关。波段越宽, 拟合精度越低。在这种情况下, 可以采用分段式拟合方法来进行波长定标。

4 结束语

OSA 作为一种精密仪器, 易受温度、湿度、振动等因素^[4-5]的影响, 因此需定期对其进行定标。本文在 OSA 基本原理的基础上, 针对该类仪器光谱分辨率可调、探测波段与采样频率可设置、光谱分辨率高等特点, 研究了波长精细定标方法, 并利用特征波长值反演出了不同采样点的波长数值, 进而建立了波长与采样点之间的一一对应关系。利用近红外光谱测试系统进行了验证实验。结果表明, 定标后的系统波长准确度控制在 ± 0.3 nm 以内, 满足产品指标要求。

随着光通信技术的发展, DWDM 通道间

表 1 标准波长与输出序列位置的对应关系

波长/nm	1450	1460	1470	1480	1490	1500	1510
输出序列	9	738	1477	2221	2971	3729	4483
波长/nm	1520	1530	1540	1550	1560	1570	1580
输出序列	5262	6040	6824	7614	8414	9221	10038
波长/nm	1590	1600	1610	1620	1630	1640	1650
输出序列	10860	11696	12536	13394	14251	15123	16007

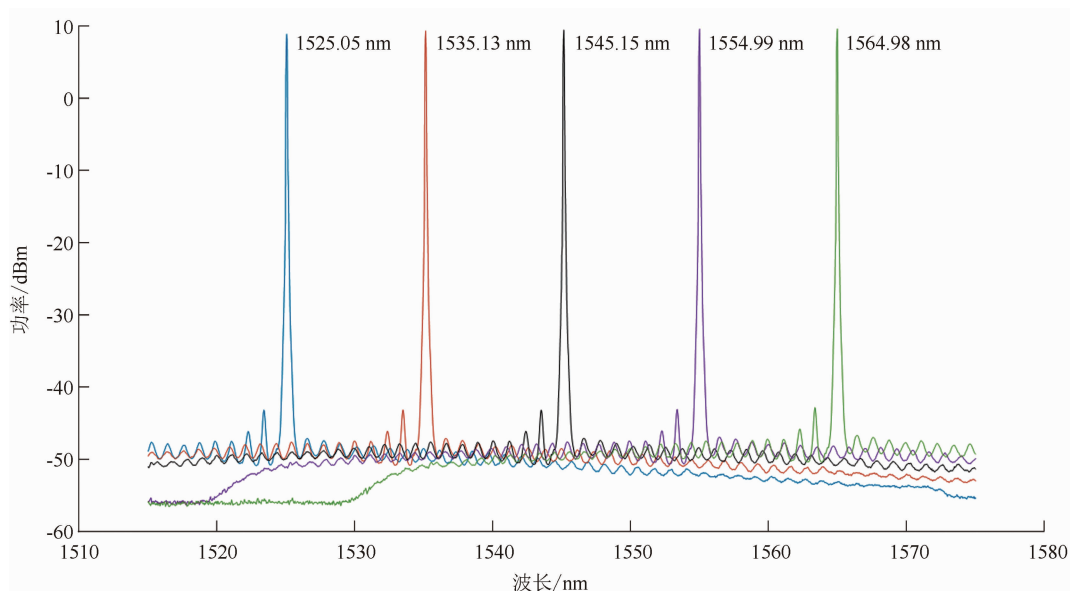


图 5 实验结果图

表 2 输入波长与测量波长及误差的关系表

输入波长/nm	1525	1535	1545	1555	1565
测试波长/nm	1525.05	1535.13	1545.15	1554.99	1564.98
误差/nm	0.05	0.13	0.15	-0.01	-0.02

隔越来越小, 由此对波长定标提出了更高的要求, 因此需要研究更高精度的波长定标方法。另外, 随着仪器的产业化, 需要实现自动波长校准。为此, 下一步将重点研究基于特征气体吸收峰的波长自波长校准方法, 从而提高波长校准精度并实现自动校准。

参考文献

- [1] Pasquini Celio. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2003, **14**(2): 198–219.
- [2] Marco Ferrari, Valentina Quaresima. A Brief Review on the History of Human Function Near-infrared Spectroscopy (fNIRS) Development and Fields of Application [J]. *Neuro Image*, 2012, **63**(2): 921–935.
- [3] 刘冬梅, 夏日辉, 潘永刚, 等. 基于电荷耦合器件的数字光谱分析仪的研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0107003.
- [4] 高国明, 李雪, 覃宗定, 等. 消除拉曼光谱荧光背景的新方法及其应用 [J]. *光学学报*, 2012, **33**(2): 258–266.
- [5] 孟鑫, 李立功, 韩顺利, 等. 基于准 Littrow 结构的高动态近红外光谱仪研究 [J]. *光学学报*, 2017, **37**(10): 1030002.