

量化噪声对 FBG 波长解调的精度影响及误差分析

李 跃¹, 祝连庆^{1,2}, 刘 锋¹, 庄 炜¹

(1. 北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100016;

2. 北京信息科技大学生物医学检测技术及仪器北京实验室, 北京 100192)

摘 要:为提高光纤布拉格光栅(FBG)波长解调精度,建立了“量化噪声-波长误差”转换模型,并通过蒙特卡罗方法,对模型给出的误差预测结果进行了仿真验证。采用16位高精度模数转换器(ADC)搭建波长解调实验电路,误差分析结果表明,当ADC位数从6位到16位均匀增长时,波长解调误差从41.37 pm到0.34 pm呈指数下降,与模型计算和仿真结果相吻合。仿真及实验均表明,所提出的“量化噪声-波长误差”转换模型能准确分析量化误差对FBG波长解调精度的影响,为FBG波长解调仪中模数转换分辨率的选择提供设计依据。

关键词:光纤布拉格光栅;量化噪声;波长解调

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.020

Influence of quantization noise on accuracy of FBG wavelength demodulation and error analysis

LI Yue¹, ZHU Lian-qing^{1,2}, LIU Feng¹, ZHUANG Wei¹

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

2. Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The “quantization noise-wavelength error” transformation model is proposed to improve the optical fiber Bragg grating (FBG) wavelength demodulation accuracy. The model is simulated and verified based on the Monte Carlo method. A wavelength demodulation experimental circuit is established by using a high precision 16-bit analog to digital converter (ADC). The error analysis show that the FBG wavelength demodulation error increases exponentially from 0.34 pm to 41.37 pm as the bit-length numbers of ADC decreases from 16 bits to 6 bits. The experiments and the simulation results show that the proposed model can accurately analyze the influence of quantization error on FBG wavelength demodulation accuracy, which provides a reference for the ADC resolution selection in FBG wavelength interrogator.

Key words: fiber Bragg grating; quantization error; wavelength demodulation

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划(No. IRT1212); 北京市科技计划项目(No. Z151100003615010); 北京市科技成果转化与产业化(No. TJSHG201510772016)资助。

作者简介: 李 跃(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事高速光纤光栅解调仪等方面研究。E-mail: liyue@mail.bistu.edu.cn

通讯作者: 祝连庆(1963-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密测量技术, 光纤传感技术, 光纤激光器技术及生物医学检测技术与仪器。E-mail: zhulianqing@sina.com

收稿日期: 2016-08-27

1 引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 是一种基于光敏性测量的新型传感器,它通过探测信号中心波长的漂移量来测量被测参数的变化。由于 FBG 具有抗电磁干扰、结构简单、质量轻和体积小等优点,因而广泛应用于建筑结构、桥梁和航空航天等领域的结构应变监测中^[1]。

FBG 应用于传感时,需要将待测量调制的 FBG 波长进行解调^[2]。为提升解调仪精度已经进行了广泛的研究并取得一定进展。Chen 等人通过自适应寻峰处理,解调精度达 1 pm^[3];Xia 等人通过光纤色散的光信息处理技术,应变解调精度可达 0.86 με^[4]。然而关于解调仪中模数转换器 ADC 的分辨率优化选择研究较少。

量化噪声的大小直接影响波长解调的精度,而较高分辨率的 ADC 又会带来数据量大、冗余数据过多的问题。因此 ADC 位数的选择是解调仪设计中的关键问题。本文针对基于线阵图像传感器的解调仪,对 ADC 位数的优化选择展开研究,建立了“量化噪声 - 波长误差”转换模型,并通过蒙特卡罗方法,采用均匀分布的随机数模拟量化误差,对采集光谱进行波长解调仿真,统计量化误差对 FBG 波长解调精度影响,并搭建实验电路进行验证。

2 波长解调系统中的量化噪声

基于线阵图像传感器的 FBG 波长解调系统如图 1 所示。

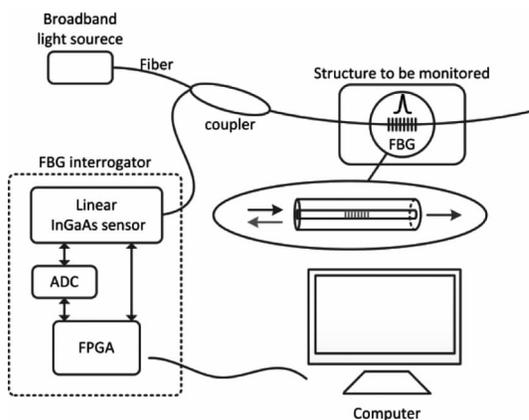


图 1 FBG 波长解调系统
Fig. 1 FBG interrogation system

由宽谱光源发出的光信号,经 FBG 反射,带有传感信息的反射信号经衍射分光后传输到线阵光电探测系统,由 ADC 转换后进入后续处理电路进行数据处理。

解调仪中的量化误差源于对图像探测器信号的数字化。由于图像探测器输出是与光强相关的模拟信号,必须将其进行 ADC 转换后,才能进行后续波长数据处理。线阵图像传感器的输出信号如图 2 所示,图中曲线为实际光谱信号。 N 代表第 N 位像素 (pixel) 点,每个像素对应的输出信号强度如直方图所示,一般通过高斯曲线拟合进行光栅反射谱中心波长的解调。

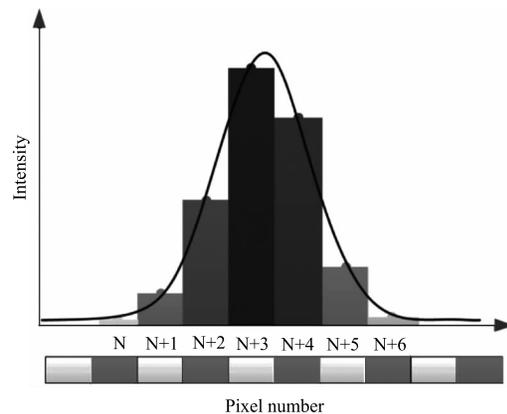


图 2 图像传感器输出信号示意图
Fig. 2 Output signal of CCD

3 “量化噪声 - 波长误差”转换模型

在解调仪中,每次对线阵图像传感器的扫描均得到一组像素位置与光强值的对应关系 $(X_n, Y_n)(X_{n+1}, Y_{n+1}) \dots (X_{n+i}, Y_{n+i})$, 假设光谱信号服从高斯分布,取高斯模板函数为:

$$y = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \tag{1}$$

其中, a, b, c 为待定参数,分别为高斯函数的幅度、中心位置、均方根脉宽。

对式(1)两边取自然对数变形整理得:

$$Y = Ax^2 + Bx + C \tag{2}$$

式(2)中:

$$\begin{cases} Y = -\ln(y) \\ A = \frac{1}{c^2} \\ B = -\frac{2b}{c^2} \\ C = \frac{b^2}{c^2} - \ln(a) \end{cases} \tag{3}$$

根据最小二乘原理,参数 A, B, C 由式(4)确定:

$$\begin{bmatrix} \overline{x^2} & \overline{x} & 1 \\ \overline{x^3} & \overline{x^2} & \overline{x} \\ \overline{x^4} & \overline{x^3} & \overline{x^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Y} \\ \overline{xY} \\ \overline{x^2Y} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)中:

$$\begin{cases} \bar{x}^j = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^j}{n} \\ \bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n} \\ \overline{x^m Y} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^m Y_i}{n} \end{cases} \quad (5)$$

综上所述,可求得各参数如下:

$$\begin{cases} a = \exp\left(\frac{B}{4A} - C\right) \\ b = -\frac{B}{2A} \\ c = \sqrt{\frac{1}{A}} \end{cases} \quad (6)$$

中心波长的像素(pixel)点位置即 b , 像素点位置 x 为固定整数, 用自变量为光强值 y 的复合函数表示为:

$$b = f[g(y_1), g(y_2), \dots, g(y_n)] \quad (7)$$

$$g(y_i) = Y_i \quad (8)$$

$$\Delta b = \frac{\partial f}{\partial g} \frac{\partial g}{\partial y_1} \Delta y_1 + \frac{\partial f}{\partial g} \frac{\partial g}{\partial y_2} \Delta y_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial g} \frac{\partial g}{\partial y_i} \Delta y_i \quad (9)$$

式中, Δb 为中心波长像素点的误差。令:

$$a_i = \left. \frac{\partial f}{\partial g} \frac{\partial g}{\partial y_i} \right|_{y_i}$$

函数的随机误差是用函数的标准差来进行评定。对各个 y 进行 N 次测量, 其相应的随机误差为:

$$y_1: \delta y_{11}, \delta y_{12}, \dots, \delta y_{1N}$$

$$y_2: \delta y_{21}, \delta y_{22}, \dots, \delta y_{2N}$$

$$y_n: \delta y_{n1}, \delta y_{n2}, \dots, \delta y_{nN}$$

函数 b 的随机误差为:

$$\begin{cases} \delta b_1 = a_1 \delta y_{11} + a_2 \delta y_{21} + \dots + a_n \delta y_{n1} \\ \delta b_2 = a_1 \delta y_{12} + a_2 \delta y_{22} + \dots + a_n \delta y_{n2} \\ \delta b_N = a_1 \delta y_{1N} + a_2 \delta y_{2N} + \dots + a_n \delta y_{nN} \end{cases} \quad (10)$$

将方程组中的每个方程平方所得相加可得:

$$\begin{aligned} (\delta b_1)^2 + (\delta b_2)^2 + \dots + (\delta b_n)^2 &= a_1^2 (\delta y_{11}^2 + \delta y_{12}^2 + \dots + \delta y_{1N}^2) + a_2^2 (\delta y_{21}^2 + \delta y_{22}^2 + \dots + \delta y_{2N}^2) + a_n^2 (\delta y_{n1}^2 + \delta y_{n2}^2 + \dots + \delta y_{nN}^2) \\ &+ 2 \sum_{1 \leq i < j}^n \sum_{m=1}^N a_i a_j \delta y_{im} \delta y_{jm} \end{aligned} \quad (11)$$

当 N 趋于无穷时:

$$2 \sum_{1 \leq i < j}^n \sum_{m=1}^N a_i a_j \delta y_{im} \delta y_{jm} = 0 \quad (12)$$

根据标准差公式可得:

$$\sigma_b^2 = a_1^2 \sigma_{y1}^2 + a_2^2 \sigma_{y2}^2 + \dots + a_n^2 \sigma_{yn}^2 \quad (13)$$

由于量化噪声为均匀分布, 其标准差为:

$$\sigma_y = \frac{\text{LSB}}{2\sqrt{3}} \quad (14)$$

LSB (Least Significant Bit) 为 ADC 最低有效位。波长解调标准差为:

$$\sigma_b = \frac{\text{LSB}}{2\sqrt{3}} \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (15)$$

4 仿真与实验

仿真实验采用叠加均匀分布的随机量化噪声高斯曲线来模拟现实 ADC 的转换信号。提取高斯曲线所对应的 N 位连续整数, 模拟图像传感器分离的像素点, 并把它们对应的值作为光强的精确取样值。对该叠加信号进行高斯拟合得到 FBG 峰值波长, 进行重复运算, 统计得到仿真 FBG 峰值波长的样本方差及概率分布。仿真过程如图 3 所示。

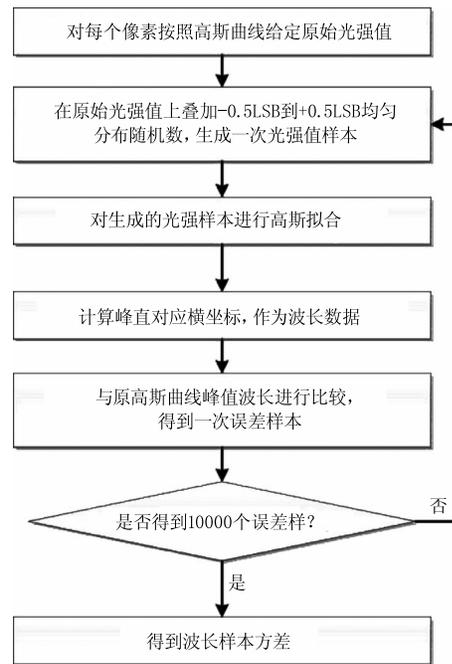


图3 波长解调仿真流程图

Fig. 3 Simulation flow chart of wavelength demodulation

实验系统采用高精度 16 位 ADC 搭建 FBG 解调系统, 如图 4 所示。

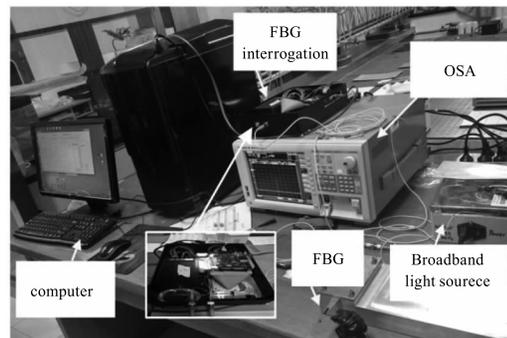


图4 FBG 解调的实验系统

Fig. 4 Experiment system of FBG interrogation

所使用 ADC 转换器为 AD7626, 积分非线性误差在 1 LSB 以内, ADC 转换误差主要为 ADC 转换编码的量化误差和增益误差。由于波长解调时, 对信号的整体幅度不敏感, 因此波长解调的误差主要与 ADC 量化误差相关。

实验系统由光谱仪、宽谱光源、3 dB 光纤耦合器、Ibsen 公司的 I-MON256HS 光学模块、模数转换器模块和 FPGA 主控板组成。由宽带光源发出宽带光谱, 经过 FBG 反射, 经过光纤和 3 dB 耦合器传输到 Ibsen 解调模块, 通过 FPGA 进行数据采集和寻峰处理。图 5 所示为 FBG 反射谱通过解调模块后, 线阵 InGaAs 输出的波形。

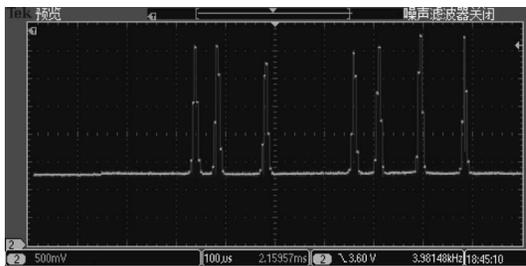


图 5 FBG 传感器的 CCD 输出信号
Fig. 5 FBGs reflection signal of CCD

5 结果与讨论

通过仿真得出在不同高斯函数标准差 ($\sigma = 0.5, \sigma = 1, \sigma = 1.49, \sigma = 2, \sigma = 5$) 下 (通过光谱仪采集 FBG 光栅反射谱, 拟合高斯函数标准差 $\sigma = 1.49$), ADC 位数对波长解调精度影响如图 6~8 所示。

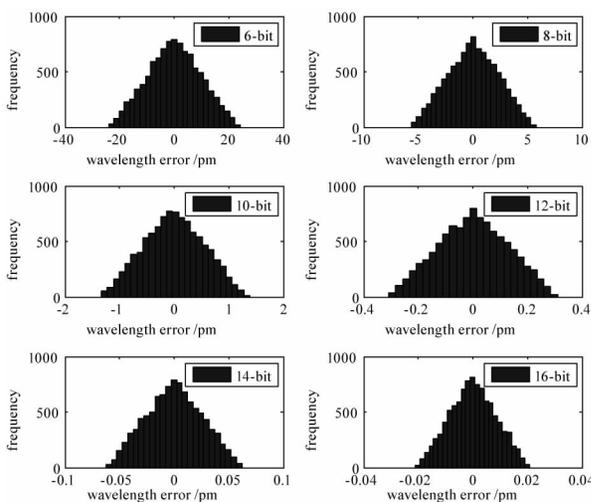


图 6 波长解调误差仿真统计图
Fig. 6 Bar chart of wavelength error simulation

图 6 显示在 $\sigma = 1.49$ 下中心波长对应 6 位, 8 位, 10 位, 12 位, 14 位和 16 位的 ADC 的偏移量统计。6 位 ADC 量化误差引起的波长解调误差最高可达

24.18 pm, 8 位为 5.77 pm, 10 位为 1.38 pm, 12 位为 0.31 pm, 14 位为 0.06 pm, 16 位为 0.02 pm。

其他四组不同标准差下的波长解调误差如图 7 所示。随着 σ 从 0.5 扩大到 5, 6 位 ADC 的波长解调误差逐渐从 12.29 pm 增加到 42.41 pm, 8 位从 2.88 pm 增加到 9.58 pm, 10 位从 0.66 pm 增加到 2.31 pm, 12 位从 0.15 pm 增加到 0.55 pm, 14 位从 0.03 pm 增加到 0.10 pm, 16 位从 0.01 pm 增加到 0.03 pm。

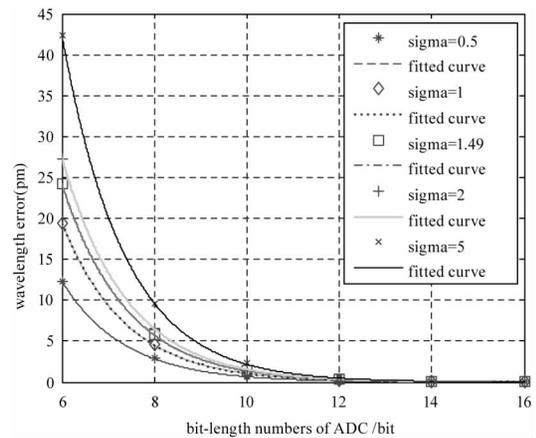


图 7 不同高斯方差下 ADC 位数与解调误差关系
Fig. 7 Wavelength error depend on bits of ADC in different sigma

通过图 6 可看出波长解调误差呈正态分布, 其标准差如图 8 所示。随着 σ 从 0.5 扩大到 5, 6 位 ADC 的解调误差分布标准差逐渐从 4.99 pm 增加到 14.07 pm, 8 位从 1.20 pm 增加到 3.39 pm, 10 位从 0.26 pm 增加到 0.77 pm, 12 位从 0.06 pm 增加到 0.18 pm, 14 位从 0.012 pm 增加到 0.035 pm, 16 位从 0.004 pm 增加到 0.012 pm。

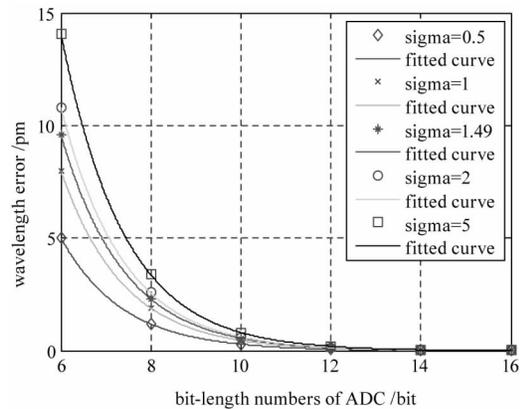


图 8 不同高斯方差下位数与误差分布标准差关系
Fig. 8 Wavelength error depend on bits of ADC in different sigma

搭建高精度 16 位 ADC 搭建 FBG 解调系统, 并对波长解调结果进行误差分析。当 ADC 位数从 6 位到 16 位均匀变化时, 波长解调误差从 41.37 ~

0.34 pm 呈指数下降,标准差从 15.49 ~ 0.10 pm 呈指数下降。实验结果与仿真和理论结果进行对比,如图 9 所示。

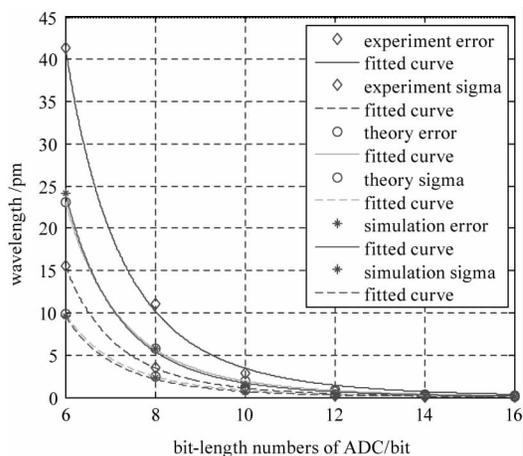


图9 仿真和实验结果与模型结果比较

Fig. 9 Model result, simulation and experiment

由于量化误差随着位数的均匀降低呈指数增长,所以量化噪声所导致的波长解调误差也呈指数增长。由于系统其他误差影响,实验误差结果高于模型与仿真结果。但是具有与理论结果一致的曲线形式。

6 结 论

对基于线阵图像传感器的解调仪 ADC 位数的优化选择展开研究,建立了“量化噪声 - 波长误差”转换模型。通过蒙特卡洛方法对光谱采集进行波长解调的仿真,并搭建高精度 16 位 ADC 实验电路进行验证。当 ADC 从 6 位到 16 位均匀变化时,模型所得的波长解调误差从 23.13 ~ 0.20 pm 呈指数下降,标准差从 9.92 ~ 0.08 pm 呈指数下降,与仿真结果十分接近,与实验结果具有一致的曲线形式。

所建立模型可精确描述量化噪声引起的波长解调误差。当 ADC 位数均匀增长时,波长解调误差呈指数下降,仿真及实验结果均与理论模型计算结果相吻合,可较为精准地预测出量化噪声对波长解调系统精度的影响,为 FBG 波长解调仪的模数转换分辨率的选择提供设计参考。

参考文献:

[1] Cusano A, Cutolo A, Albert J. Fiber bragg grating sensors [J]. Spine, 2011, 35(18): E904 - 7.
 [2] Kersey A, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442 - 1463.

[3] Chen Y, Yang K, Liu H L. Self-adaptive multi-peak detection algorithm for FBG sensing signal [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 1 - 1.
 [4] Xia H, Wang C, Blais S, et al. Ultrafast and precise interrogation of fiber bragg grating sensor based on wavelength to time mapping incorporating higher order dispersion [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(3): 254 - 261.
 [5] LI Hong, ZHU Lianqing, ZHANG Yumin, et al. Demodulation method for FBG reflection spectrum based on linear array InGaAs scanning [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(01): 224 - 228. (in Chinese)
 李红, 祝连庆, 张钰民, 等. 线阵 InGaAs 扫描 FBG 反射谱的传感解调方法 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(01): 224 - 228.
 [6] ZHONG Qiyuan, HUANG Xianxiang, TAN Lilong, et al. Effect of laser noise on the precision of fiber Bragg grating demodulation [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 956 - 960. (in Chinese)
 仲启媛, 黄先祥, 谭立龙, 等. 光源噪声对光纤光栅解调精度的影响 [J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 956 - 960.
 [7] Zhiqiang S, Qi H, Wang C, et al. Experimental Research of Thermal Effect in FBGs Fabrication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120602 - 981.
 [8] FEI Yetai. Error theory and data processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)
 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
 [9] LIU Feng, ZHU Lianqing, LOU Xiaoping, et al. Signal distortion analysis of high-speed fiber Bragg grating demodulation system [J]. Laser & Infrared, 2014(10): 1119 - 1122. (in Chinese)
 刘锋, 祝连庆, 娄小平, 等. 光纤光栅线阵探测器解调系统信号失真分析 [J]. 激光与红外, 2014(10): 1119 - 1122.
 [10] Widrow B, Kollar I, Liu M C. Statistical theory of quantization [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1996, 45(2): 353 - 361.
 [11] TANG Chong, HUI Huihui. Gaussian curve fitting solution based on matlab [J]. Computer & Digital Engineer, 2013, 41(8): 1262 - 1263. (in Chinese)
 唐冲, 惠辉辉. 基于 Matlab 的高斯曲线拟合求解 [J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(8): 1262 - 1263.
 [12] Chen Y, Yang K, Liu H L. Self-Adaptive Multi-Peak Detection Algorithm for FBG Sensing Signal [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2658 - 2665.