

ICS 16.120

CCS N 12

T/SSM

团 体 标 准

T/SSM XXX—XXXX

# 布拉格光纤光栅传感解调仪器校准规范

Technical specification for calibration of fiber Bragg grating demodulator

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

山东计量测试学会

发布



# 目 录

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 原理 .....	2
5 校准条件 .....	3
6 校准项目和校准方法 .....	4
7 校准结果表达 .....	9
8 复校时间间隔 .....	10
附录 A （资料性） 校准原始记录格式 .....	11
附录 B （资料性） 校准证书内页格式 .....	14
附录 C （资料性） 校准不确定度评定实例 .....	16

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东计量测试学会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 布拉格光纤光栅传感解调仪器校准规范

## 1. 范围

本文件规定了布拉格光纤光栅传感解调仪器的原理、计量特性、校准条件、校准方法、校准结果表达、复校时间间隔、校准证书等内容。

本文件适用于对布拉格光纤光栅传感器信号进行测量的仪器的校准。

## 2. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2421.1—2008 电工电子产品环境试验 概述和指南

GB/T 7665—2005 传感器通用术语

GB/T 39347—2020 空间用光纤光栅传感系统通用规范

DL/T 1736—2017 光纤光栅仪器基本技术条件

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1059.1—2012 规程测量不确定度评定与表示

JJF 1199—2008 通信用光衰减器校准规范

## 3. 术语和定义

引用文件界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 布拉格光纤光栅传感器 fiber Bragg grating sensor

布拉格光纤光栅传感器（fiber Bragg grating sensor，简称FBG传感器）是利用以光纤布拉格光栅作为敏感元件，基于光学技术和光学原理将被测物理信号转换成中心波长的传感器件。

### 3.2 中心波长 center wavelength

宽带光源发出的光经过FBG后会得到反射光谱，FBG中心波长为反射光谱中峰值的波长，单位为nm。

### 3.3 光纤光栅解调仪器 fiber Bragg grating sensing system

布拉格光纤光栅解调仪器（以下简称“解调仪器”）是利用FBG传感器中心波长随温度、应变等物理量的变化规律，通过解调电路对中心波长及其变化量进行采集和解算，实现对被测物体温度、应变等物理量测量的设备。

### 3.4 精确度 precision

被校准的解调仪器测得的传感器中心波长之间的一致程度以及与其“真值”的接近程度。

### 3.5 稳定性 stability

在FBG传感器的中心波长不改变情况下，解调仪器测量的传感器波长随时间不变化的能力。

### 3.6 重复性 repeatability

在同一工作条件下，短期内对解调仪器进行多个单次测试结果保持一致的能力。

### 3.7 动态范围 dynamic range

在同一工作条件下，解调仪器能够对FBG传感器反射光信号正确解调的光功率最小至最大的变化范围。

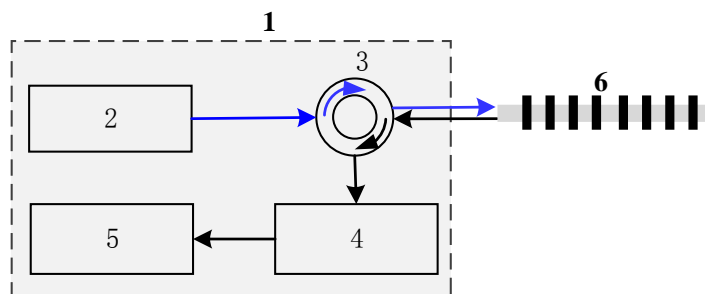
### 3.8 解调频率 demodulation frequency

单位时间内，解调仪器对FBG传感器中心波长的测量次数。

## 4. 原理

FBG传感器是监测各类动态或静态信号如温度、应变、机械波等物理参数的传感器。FBG传感器中心波长的变化反映了被测物理量的变化。目前FBG传感器被广泛应用于温度、应变、加速度等物理参量的测量，具有抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘性好等优点。

光纤光栅解调仪器是对FBG传感器中心波长进行监测和分析的仪器，解调原理见图1。



- 1——光纤光栅解调仪器  
 2——光源  
 3——光纤环形器  
 4——探测与解调单元  
 5——信号处理与显示单元  
 6——FBG传感器

图1 布拉格光纤光栅传感解调仪器解调原理图

解调仪器的光源发出激光，经环形器输出到FBG传感器上，其反射光经环形器进入光信号探测与解调单元，经信号处理并显示传感器的中心波长。

## 5. 校准条件

### 5.1 环境条件

5.1.1 环境温度：(23±2) °C，校准过程中环境温度波动≤1 °C/h。

5.1.2 相对湿度：≤80%。

5.1.3 电源：电压 AC (220±11) V，频率 (50±1) Hz。

5.1.4 周围环境无影响仪器正常工作及测试结果的机械振动和电磁场干扰。

### 5.2 仪器设备

标准仪器及其他设备见表 1。

表 1 校准所用标准仪器及其他设备

序号	设备名称	功能	技术要求
1	参考光纤光栅温度传感器	提供校准基准	中心波长范围：位于校准要求的波长范围内； 中心波长稳定性：±2 pm (10 min, 2 °C)； 反射谱-3 dB 带宽：<0.5 nm； 反射率：>75%； 反射谱边模抑制比：>10 dB。
2	参考光纤光栅加速度传感器	提供校准基准	中心波长范围：位于校准要求的波长范围； 中心波长稳定性：±2 pm (10 min, 2 °C, 无受力)； 反射谱-3 dB带宽：<0.5 nm； 反射率：>75%； 反射谱边模抑制比：>10 dB； 频率范围：0~50 kHz。
3	标准光波长计	测试光信号标准波长	波长测量范围：覆盖 1510 nm~1590 nm； 波长精度：±0.2 pm； 波长分辨率：±0.1 pm；

			输入功率范围：优于-30 dBm~10 dBm； 测量速度： $\leq 0.5$ s。
4	标准恒温装置	提供恒温环境	控温精度： $\pm 0.1$ °C； 控温范围：10°C~40 °C。
5	光纤环形器	实现光信号双向传输	波长范围：优于 1510 nm~1590 nm； 插入损耗： $\leq 1.2$ dB； 隔离度： $\geq 40$ dB。
6	宽带光源	提供宽带光源	输出波长范围：优于 1510 nm~1590 nm； 输出稳定性： $\pm 0.03$ dB，或 $\leq 0.5\%$ （10 min）； 输出光功率：满足校准要求的输出光功率。
7	可变光衰减器	衰减光强	衰减量：满足校准要求的衰减量，且衰减量连续可调； 插入损耗： $\leq 3$ dB； 回波损耗： $\geq 45$ dB。
8	标准振动实验台	提供振动环境	最高振动频率： $\geq 1$ kHz； 频率精度： $\leq 0.1$ Hz。

## 6. 校准项目和校准方法

### 6.1 一般要求

待校准的布拉格光纤光栅传感解调仪（以下称为“待校准解调仪器”）外壳上应有铭牌，标明产品名称、型号规格、制造厂家、出厂日期、设备编号及相应的警示标志等。仪器应带有必要的附件和说明书。仪器各部件应配置齐全、安装牢固，确保正常工作。

### 6.2 校准前准备

将待校准解调仪器和所有校准用设备置于工作台上，并按照说明书进行预热。整个校准过程中，连接光纤的位置应保持固定，光纤接头应使用酒精清洁。

### 6.3 示值误差校准

#### 6.3.1 校准点设置

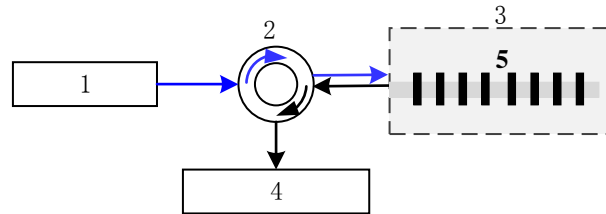
使用5个不同中心波长的参考光纤光栅温度传感器对待校准解调仪器的解调示值误差进行校准。

#### 6.3.2 校准数据采集

选择5个中心波长适当的参考光纤光栅温度传感器，可按照用户需求设置中心波长校准点，但待校准解调仪器解调范围的最低和最高波长为必选，依次进行下述实验。



a) 将宽带光源的输出端、标准光波长计的输入端和参考光纤光栅温度传感器通过光纤环形器连接，将传感器放入标准恒温装置中，见图 2。设定恒温装置的设定温度为 25 ℃，设备达到设定温度后，温度稳定 10 min，保证波长计的数值波动不超过 2 pm。



- 1——宽带光源  
2——光纤环形器  
3——标准恒温装置  
4——标准光波长计  
5——参考光纤光栅温度传感器

图2 参考光纤光栅温度传感器中心波长校准图

b) 读取标准光波长计的波长示值，重复  $n$  次，计算标准光波长示值的平均值均作为参考光纤光栅传感器的中心波长：

$$\overline{R_{si}} = \sum_{j=1}^n R_{sij} / n \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中：

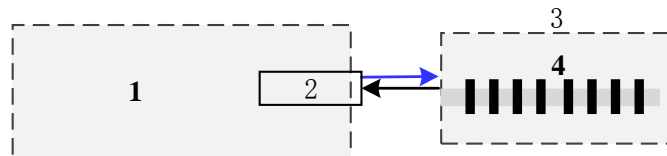
$i$ ——参考光纤光栅传感器的标号， $i \leq 5$ ；

$n$ ——测量次数， $n \geq 5$ ；

$\overline{R_{si}}$ ——第  $i$  个传感器的光波长计示值平均值，即传感器的中心波长，单位 nm；

$R_{sij}$ ——第  $i$  个传感器使用光波长计第  $j$  次测量得到的波长值，单位 nm。

c) 将参考光纤光栅温度传感器分别与待校准的解调仪器的解调通道连接，见图 3。



- 1——待校准解调仪器  
2——解调通道  
3——标准恒温装置  
4——参考光纤光栅温度传感器

图3 参考光纤光栅温度传感器中心波长测量图

d) 待校准解调仪器工作稳定后，读取仪器测量得到的传感器中心波长值，重复  $n$  次，计算仪器示值的平均值作为解调仪器测量的传感器中心波长：

$$\overline{R_{ui}} = \sum_{j=1}^n R_{uij} / n \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$i$ ——参考光纤光栅传感器的标号， $i \leq 5$ ；

$n$ ——测量次数， $n \geq 5$ ；

$\overline{R_{ui}}$ ——第  $i$  个传感器的待校准解调仪器测量的平均值，单位 nm；

$R_{uij}$ ——第  $i$  个传感器使用待校准解调仪器第  $j$  次测量得到的波长值，单位 nm。

### 6.3.3 校准数据处理

计算各中心波长下待校准解调仪器的解调示值误差  $\Delta R_i$ ：

$$\Delta R_i = |\overline{R_{si}} - \overline{R_{ui}}| \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$\Delta R_i$ ——第  $i$  个传感器的示值误差，单位 pm。

将  $\Delta R_1 \sim \Delta R_5$  5 个传感器的示值误差数据中的最大值，作为待校准解调仪器的解调示值误差  $\Delta R$ 。

## 6.4 稳定性校准

### 6.4.1 校准点设置

使用 5 个不同中心波长的参考光纤光栅温度传感器对待校准解调仪器的解调示值误差进行校准。

### 6.4.2 校准数据采集

a) 依据 6.3.2 节的步骤 a)~步骤 d) 搭建实验平台。

b) 待校准解调仪器工作稳定后，每隔 10 min 读取 1 次仪器测量得到的传感器中心波长值，重复  $n$  次。

使用公式 (2) 计算测量均值作为解调仪器测量的传感器中心波长  $\overline{R_{ui}}$ 。

### 6.4.3 校准数据处理

计算待校准解调仪器的解调稳定性  $s_i$ ：

$$s_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (R_{uij} - \overline{R_{ui}})^2 / (n-1)} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$s_i$ ——第  $i$  个传感器的解调稳定性，单位 pm；

$n$ ——测量次数， $n \geq 6$ ；

$\overline{R_{ii}}$ ——第  $i$  个传感器的待校准解调仪器测量的平均值，即测量到的传感器中心波长，单位nm；

$R_{uij}$ ——第  $i$  个传感器使用待校准解调仪器第  $j$  次测量得到的波长值，单位nm。

将  $s_1 \sim s_5$  5个传感器的解调稳定性中的最大值，作为待校准解调仪器的解调稳定性  $s$ 。

## 6.5 重复性校准

### 6.5.1 校准点设置

使用5个不同中心波长的参考光纤光栅温度传感器对待校准解调仪器的解调示值误差进行校准。

### 6.5.2 校准数据采集

a) 依据 6.3.2 节的步骤 a)~步骤 d)搭建实验平台。

b) 待校准解调仪器工作稳定后，读取 1 次待校准解调仪器测量得到的传感器中心波长值并将仪器重启，待仪器工作稳定后，再读取 1 次波长数据。重复  $n$  次，读取  $n+1$  次数据。使用公式 (2) 计算测量均值作为解调仪器测量的传感器中心波长  $\overline{R_{ii}}$ 。

### 6.5.3 校准数据处理

计算待校准解调仪器的解调重复性  $r$ ：

$$r_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n+1} (R_{uij} - \overline{R_{ii}})^2 / n} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$r_i$ ——第  $i$  个传感器的解调重复性，单位pm；

$n$ ——测量次数， $n \geq 5$ ；

$\overline{R_{ii}}$ ——第  $i$  个传感器的待校准解调仪器测量的平均值，即测量到的传感器中心波长，单位nm；

$R_{uij}$ ——第  $i$  个传感器使用待校准解调仪器第  $j$  次测量得到的波长值，单位nm；

将  $r_1 \sim r_5$  5个传感器的解调重复性中的最大值，作为待校准解调仪器的解调重复性  $r$ 。

## 6.6 动态范围校准

### 6.6.1 校准点设置

使用5个不同中心波长的参考光纤光栅温度传感器和可变光衰减器对待校准解调仪器的动态范围进行校准。

### 6.6.2 校准数据采集

a) 参照 JJF 1199—2008 中的 5.2，测量可变光衰减器的衰减量设置为 0 时的插入损耗，重复  $n$  次，计算测量均值作为衰减器插入损耗的平均值：

$$\overline{IL_0} = \sum_{j=1}^n IL_{0j} / n \dots\dots\dots (6)$$

式中：

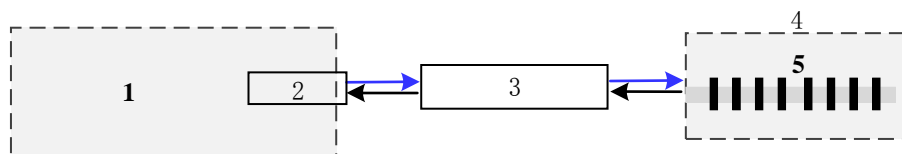
$\overline{IL_0}$  ——可变光衰减器的衰减度为0时，插入损耗的平均值，单位dB；

$IL_{0j}$  ——可变光衰减器的衰减度为0时，第  $j$  次测量到的插入损耗值，单位dB；

$n$  ——测量次数， $n \geq 5$ 。

b) 选择 5 个中心波长适当的参考光纤光栅温度传感器进行校准，可按照用户需求设置中心波长校准点，但待校准解调仪器解调范围的最低和最高波长为必选。依次使用 5 个参考传感器进行下述实验。

c) 将待校准解调仪的解调通道、可变光衰减器和参考光纤光栅温度传感器依次连接，将传感器放入标准恒温装置中，见图 4，保证恒温装置温度稳定，要求波长计的数值波动不超过 2 pm。衰减器的初始衰减设置为 0 dB。



- 1——待校准解调仪器
- 2——解调通道
- 3——可变光衰减器
- 4——标准恒温装置
- 5——参考光纤光栅温度传感器

图4 动态范围校准示意图

d) 逐渐增加衰减器的衰减量，记录仪器无法正常测量第  $i$  个传感器时的衰减器衰减度  $IL_i$ 。

### 6.6.3 校准数据处理

计算动态范围：

$$D_i = 2 \times (\overline{IL_0} + IL_i) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$D_i$  ——第  $i$  个传感器波长处，待校准解调仪器的动态范围，单位dB。

将  $D_1 \sim D_5$  5 个传感器的解调重复性中的最小值，作为待校准解调仪器的动态范围  $D$ 。

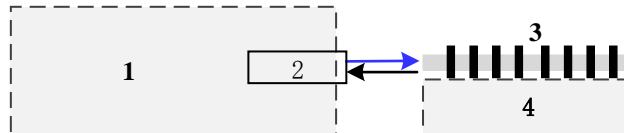
## 6.7 解调频率校准

### 6.7.1 校准点设置

使用 1 个参考光纤光栅加速度传感器和标准振动台对待校准解调仪器的解调频率进行校准。

### 6.7.2 校准数据采集

- a) 选择 1 个中心波长适当的参考光纤光栅加速度传感器，可按照用户需求设置中心波长校准点，进行下述实验。
- b) 将参考光纤光栅加速度传感器固定在标准振动实验台上，将传感器与待校准解调仪器的解调通道连接，见图 5。



- 1——待校准解调仪器  
2——解调通道  
3——参考光纤光栅加速度传感器  
4——标准振动实验台

图5 解调频率校准测量图

- c) 调整振动台的振动形式为正弦振动，振动频率  $f_a$  设置为预期校准解调频率的十分之一。
- d) 读取  $n$  个正弦振动周期时间以上的解调仪测量数据。
- e) 记录  $n$  个周期内，每个正弦振动周期仪器的解调数据量。

### 6.7.3 校准数据处理

计算解调频率：

$$f = (n \times f_a) / \sum_{j=1}^n N_j \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$N_j$ ——第  $j$  个周期中，待校准解调器测量到的数据个数；

$n$ ——测量周期， $n \geq 5$ ；

$f$ ——待校准解调仪器的解调频率。

## 6.8 解调范围校准

### 6.8.1 校准点设置

在 6.4 节的校准实验中，分别使用 5 个参考光纤光栅温度传感器进行校准，可通过调节标准恒温装置的温度微调传感器的中心波长，以实现对待校准解调仪器波长范围的校准。

### 6.8.2 校准数据处理

将以上各项实验及计算结果填入校准原始记录（见附录 A），得到仪器能够解调的最大和最小波长，

最终得到解调范围。

## 7. 校准结果表达

校准结果应在校准证书（报告）上反映，校准证书应准确、客观的报告校准结果。校准结果用校准数据的形式给出，并给出测量不确定。校准证书（报告）应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”或“校准报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 校准证书和校准报告签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

校准过程原始记录格式参照附录 A，推荐校准证书（报告）内页格式见附录 B，校准不确定度评定示例见附录 C。

## 8. 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器使用情况、使用者、仪器本身质量等因素所决定，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，建议不超过1年。更换重要部件、维修或对仪器性能有怀疑时，应对仪器重新校准。

附 录 A  
(资料性)  
校准原始记录格式

### 校准原始记录格式

委托单位：

地址：

仪器名称				证书编号		
制 造 厂			型号规格	出厂编号		
校准依据				温度：    ℃	湿度：    %RH	
校准日期			校准地点			
校准员				核验员		

校准用主要仪器设备

名称	测量范围	扩展不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	证书有效期至

1. 外观    正常； 其它

2. 解调示值误差校准：

校准通道：

传感器 编号 $i$	标准光波长计测量值 (nm)							待校准解调仪器测量值 (nm)						测量 误差 $\Delta R_i$	
	$R_{si1}$	$R_{si2}$	$R_{si3}$	$R_{si4}$	$R_{si5}$	$R_{si6}$	均值 $\overline{R}_{si}$	$R_{ui1}$	$R_{ui2}$	$R_{ui3}$	$R_{ui4}$	$R_{ui5}$	$R_{ui6}$		均值 $\overline{R}_{ui}$
1															
2															
3															
4															
5															

仪器的解调示值误差  $\Delta R$  :

3. 解调稳定性校准:

校准通道:

传感器 编号 $i$	待校准解调仪器测量值 (nm)							解调 稳定性 $s_i$
	$R_{ui1}$	$R_{ui2}$	$R_{ui3}$	$R_{ui4}$	$R_{ui5}$	$R_{ui6}$	均值 $\overline{R_{ui}}$	
1								
2								
3								
4								
5								

仪器的解调稳定性  $s$  :

4. 解调重复性校准:

校准通道:

传感器 编号 $i$	待校准解调仪器测量值 (nm)							解调 重复性 $r_i$
	$R_{ui1}$	$R_{ui2}$	$R_{ui3}$	$R_{ui4}$	$R_{ui5}$	$R_{ui6}$	均值 $\overline{R_{ui}}$	
1								
2								
3								
4								
5								

仪器的解调重复性  $r$  :

5. 解调仪动态范围校准:

校准通道:

	衰减器 插入损耗 $IL_{01}$	衰减器 插入损耗 $IL_{02}$	衰减器 插入损耗 $IL_{03}$	衰减器 插入损耗 $IL_{04}$	衰减器 插入损耗 $IL_{05}$	衰减器 插入损耗 $IL_{06}$	插入损耗 平均值 $\overline{IL_0}$
损耗值 /dB							

传感器编号 $i$	1	2	3	4	5
$IL_i$					
$D_i$					



仪器的解调动态范围  $D$  :

5.解调仪解调频率校准:

校准通道:

振动台频率  $f_a$  :

周期个数 $j$	1	2	3	4	5	6
每周期数据个数 $N_j$						

仪器的解调频率  $f$  :

6.解调仪解调范围校准:

仪器的解调范围:

附 录 B  
(资料性)  
校准证书内页格式

**校准证书内页格式**

证书编号 XXXXXX-XXXX

<校准机构授权说明>				
校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF1059.1 的要求。				
校准环境条件及地点：				
温 度	℃	地 点		
相对湿度	%	其 它		
校准所依据的技术文件（代号、名称）：				
校准所使用的主要测量标准：				
名 称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)

证书编号 XXXXXX-XXXX

# 校准结果

校准项目	校准结果
示值误差	
稳定性	
重复性	
动态范围	
解调频率	
解调范围	

**说明：**

根据客户要求和校准文件的规定，通常情况下\_\_\_\_\_个月校准一次。

**声明：**

1. 仅对加盖“XXXXX 校准专用章”的完整证书负责。
2. 本证书的校准结果仅对本次所校准的计量器具有效。

第 X 页 共 X 页

附 录 C  
(资料性)  
校准不确定度评定实例

依据《布拉格光纤光栅传感解调仪器校准通用技术规范》的各项计量特性及校准条件与校准项目的规定，对布拉格光纤光栅传感解调仪器进行了校准。下面针对布拉格光纤光栅传感解调仪器的测量结果的不确定度进行分析。

### C.1 示值误差的不确定度评定

#### C.1.1 波长示值误差的测量模型

$$\Delta R_i = \left| \overline{R_{si}} - \overline{R_{ui}} \right| \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

$\overline{R_{si}}$  —标准光波长计测量的第*i*个传感器中心波长的平均值，单位nm；

$\overline{R_{ui}}$  —待校准解调仪器测量的第*i*个传感器中心波长的平均值，单位nm。

#### C.1.2 测量不确定度来源

测量过程中的不确定度来源有：参考光纤光栅的不确定度、标准光波长计的不确定度、被校光纤光栅传感解调仪器测量重复性的不确定度、解调仪器波长分辨率引入的不确定度及其他影响因素的不确定度等。

#### C.1.3 测量不确定度评定

##### C.1.3.1 参考光纤光栅的引入的不确定度分量

参考光纤光栅引入的标准不确定度由其稳定性决定。参考光纤光栅稳定性为2 pm，按均匀分布，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。则该项引入的不确定度分量 $u_1 = 2/\sqrt{3} = 1.2 \text{ pm}$ 。

##### C.1.3.2 标准光波长计引入的标准不确定度分量

可溯源的标准光波长计测量不确定度 $U = 0.2 \text{ pm}$  ( $k = 2$ )，则该项引入的不确定度分量 $u_2 = 0.5/2 = 0.3 \text{ pm}$ 。

##### C.1.3.3 被校布拉格光纤光栅传感解调仪器测量重复性引入的标准不确定度分量

利用被校解调仪器对参考光纤光栅进行6次测量，结果如表C.1。

表C.1 中心波长示值测量数据

测量次数	中心波长 (nm)		
	1	1525.4259	1540.2812
2	1525.4244	1540.2803	1558.7204
3	1525.4246	1540.2797	1558.7196
4	1525.4259	1540.2799	1558.7192
5	1525.4244	1540.2803	1558.7189
6	1525.4259	1540.2807	1558.7206
平均值 (nm)	1525.4252	1540.2804	1558.7198
实验标准偏差 (nm)	0.38	0.55	0.69
不确定度 (nm)	0.16	0.22	0.28

由表C.1可知,测量重复性为0.7 pm,采用A类不确定度评定,该项引入的不确定度分量为0.28 pm,为简便运算取 $u_3 = 0.3$  pm。

#### C.1.3.4 被校布拉格光纤光栅传感解调仪器波长分辨率引入的标准不确定度分量

工程中常用的光纤光栅解调仪器波长分辨率一般在pm量级,为简便运算取1 pm。按均匀分布,取包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。则该项引入的不确定度分量 $u_4 = 1 \times 0.29 \approx 0.3$  pm。重复性不确定度分量小于分辨率,因此取分辨率引入的不确定度。

#### C.1.3.5 其他影响因素引入的标准不确定度分量

其他影响因素包括光纤中应力双折射引起的波长漂移、温度波长引入的波长漂移、光纤光栅参数校准装置和被校准光纤光栅解调仪器峰值算法的差异等,估计影响量 $u_5 = 1$  pm。

### C.1.4 不确定度合成

#### C.1.4.1 标准不确定度评定表

表C.2 标准不确定度评定表

序号	$u_i$	确定度来源	标准不确定度 $u(X_i)$ (pm)	概率分布	灵敏系数 $ c_i $	不确定度分量 $u_i(y)$ (pm)
1	$u_1$	参考光纤光栅引入的不确定度	1.2	均匀	1	1.2
2	$u_2$	标准光波长计引入的不确定度	0.3	正态	1	0.3
3	$u_3$	被校光纤光栅传感解调仪器测量重复性引入的不确定度	0.3	正态	1	0.3
4	$u_4$	被校光纤光栅传感解调仪器波长分辨率引入的不确定度	0.3	正态	1	0.3

5	$u_5$	其他影响因素的不 确定度	1.0	—	1	0.3
---	-------	-----------------	-----	---	---	-----

C.1.4.2 以上各项标准不确定度分量直接独立互不相关，合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 1.6 \text{ pm}$$

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子  $k = 2$ ，置信度为95%，则  $U = 2u_c = 4 \text{ pm}$ 。

C.2 动态范围的不确定度评定

C.2.1 动态范围的测量模型

$$D_i = 2 * (\overline{IL}_0 + IL_i) \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

$D_i$ —第  $i$  个传感器波长处，待校准解调仪器的动态范围，单位 dB。

$\overline{IL}_0$ —可变光衰减器插入损耗的平均值，单位 dB。

$IL_i$ —第  $i$  个传感器波长处，解调仪器无法正常测量传感器时，可变光衰减器正向输入输出衰减量，单位dB。

C.2.2 测量不确定度来源

测量过程中主要的不确定度来源有：可变光衰减器的不确定度、可变光衰减器插入损耗的不确定度以及参考光纤光栅发射率引入的不确定度。

C.2.3 测量不确定度评定

C.2.3.1 可变光衰减器的不确定度分量

可溯源的可变光衰减器测量不确定度为  $U = 0.20 \text{ dB}$  ( $k = 2$ )，则该项引入的不确定度分量  $u_1 = 0.20 / 2 = 0.10 \text{ dB}$ 。

C.2.3.2 可变光衰减器插入损耗的不确定度分量

对可变光衰减器的插入损耗进行3次测量，应用极差法计算实验标准差，结果如表C.3所示。

表C.3 可变光衰减器插入损耗的测量数据

测量次数	可变光衰减器插入损耗 (dB)
1	1.25
2	1.39
3	1.33

极差系数	1.69
实验标准差 (dB)	0.08
不确定度 (dB)	0.03

由表C.3所知，测量次数为3时，该项引入的不确定度分量为0.03 dB，则取 $u_2 = 0.03$  dB。

### C.2.3.3 参考光纤光栅反射率引入的不确定度

校准中用到的参考光纤光栅反射率 $>75\%$ ，反射率的差异导致不同的光纤光栅对应不同的动态范围，采用的参考光纤光栅反射率最大变化量为25%，则导致功率变化量为0.9 dB，按均匀分布，则取包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。则该项引入的不确定度分量 $u_1 = 0.4\text{dB}/\sqrt{3} = 0.26$  dB。

## C.2.4 不确定度合成

### C.2.4.1 标准不确定度评定表

表C.4 表 C.4 标准不确定度评定表

序号	$u_i$	不确定度来源	标准不确定度 $u(X_i)$ (pm)	概率分布	灵敏系数 $ c_i $	不确定度分量 $u_i(y)$ (pm)
1	$u_1$	可变光衰减器引入的不确定度	0.10	—	2	0.20
2	$u_2$	可变光衰减器插入损耗引入的不确定度	0.03	正态	2	0.06
3	$u_3$	参考光纤光栅反射率引入的不确定度	0.26	均匀	1	0.26

C.2.4.2 以上各项标准不确定度分量直接独立互不相关，合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.33 \text{ dB}$$

### C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，置信度为95%，则 $U = 2u_c = 0.7$  dB。

## 附件 2 《布拉格光纤光栅传感解调仪器校准规范》

### (征求意见稿)编制说明

布拉格光纤光栅传感器（简称 FBG）是近年快速发展的一种新型传感器，适合监测各类动态或静态信号如温度、应变、机械波等，待测物理参量的变化会导致传感器中心波长的变化。光纤光栅解调仪器能够实现光纤光栅传感器中心波长的解调以及对物理参量的测量。使用光纤光栅解调仪测量参考光纤光栅温度传感器的中心波长，并与标准光波长计的数值进行对比，以此对解调仪器进行多参量校准。

#### 一、工作情况

##### 1、任务来源

布拉格光纤光栅传感器是一种新型的光纤无源传感器，凭借抗电磁干扰、电绝缘性好、耐高温高压、可分布式测量等电类传感器不具备的特有优点，近年来被广泛应用于航空航天、隧道桥梁、油罐煤田、交通运输等领域，可实现对应变、温度等多种物理量的测量。光纤光栅传感器是波长调制型传感器，其中心波长反映了被测量的应变变量，使用解调仪器对其波长进行精确解调，是传感器应用的基础，是实现传感器准确测量的必要条件。

国内现有的光纤光栅解调仪校准标准有《JJF 1084-2020 布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范》，然而，该标准只对解调仪器的示值误差、重复性、动态范围进行了校准，且校准参量的标准较低。无法满足《GB/T 39347-2020 空间用光纤光栅传感系统通用规范》等标准中对解调仪器的参数要求。因此，需要对布拉格光纤光栅传感解调仪器进行更多参量、更加精密的校准以满足实际应用需求。

为此，山东大学牵头编制布拉格光纤光栅传感解调仪器校准的团体标准，2022 年 4 月在山东计量测试学会立项。

编制“布拉格光纤光栅传感解调仪器校准”的标准，将规范光纤光栅解调仪器的技术要求，实现在新的技术（环境）条件下的准确、公平、可靠计量。

##### 2、协作单位

山东大学

山东省计量科学研究院

中车青岛四方机车车辆股份有限公司

山东省航天电子技术研究所

山东学智测控技术有限公司

山东圣海光纤科技有限公司



### 3、主要工作过程

2022 年 1 月成立起草组，组织材料收集和信息汇总

2022 年 10 月完成草稿

2022 年 12 月完成标准征求意见稿

## 二、标准编制的原则

本标准自主研制的标准，以规范和推进产业发展为目的，遵循适用性、先进性、统一性、协调性原则。本标准内容按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定编写。

## 三、标准的主要内容

本标准规定了布拉格光纤光栅传感解调仪器参数校准规则等内容。适用于对布拉格光纤光栅传感器信号进行测量的仪器的校准。主要内容：

- 1、范围
- 2、规范引用文件
- 3、术语与定义
- 4、概述
- 5、计量特性
- 6、校准条件
- 7、校准项目和校准方法
- 8、校准结果表达
- 9、复校时间间隔

## 四、主要试验（或验证）情况，预期达到的经济社会效益、对产业发展的作用等情况

### 1、仪器校准特性：

- a) 示值误差：±5 pm；
- b) 稳定性：±5 pm（10min）；
- c) 重复性：±10 pm；
- d) 动态范围：≥20 dB；
- e) 解调频率：0~10 KHz；
- f) 解调范围：1510 nm~1590 nm。

## **2、装置铭牌信息包含内容：**

- a)仪器名称、型号、制造厂商、设备编号、出厂日期；
- b)性能参数；
- c)电源电压、功率；
- d)仪器尺寸；
- e)警示标志。

本标准可填补目前国内布拉格光纤光栅传感解调仪器的高精度校准空白，助力光纤光栅解调技术发展，实现对光纤光栅解调仪器的性能参数的精准测试与评价。在航空航天、轨道交通、船舶、电力等领域具有广阔的应用潜力。

## **五、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国内同类标准水平的对比情况，或与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况**

本标准所用术语，除在本标准中定义的外，均采用 JJF1001《通用计量术语及定义》和 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与标志》定义的术语。

与现有的校准规范 JJF 1804-2020《布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范》相比，本标准对布拉格光纤光栅解调仪器的校准参数更多，校准精度更高。

## **六、与有关的现行相关法律、法规和强制性标准的关系**

本标准符合国家有关法律、法规和相关强制性标准的要求，与现行的国家标准、行业标准相协调。

## **七、重大分歧意见的处理经过和依据**

无

## **八、标准中涉及专利的情况**

本标准不涉及专利。

## **九、废止现行有关标准的建议**

无

## **十、贯彻标准的要求和建议**

本标准发布后，由起草组向相关企业和科研院所等单位宣传、贯彻、推荐，并逐步引导实施。实施过程中出现的问题和好的改进建议反馈至标准起草组，以便进一步对标准进行修订完善。

## **十一、其他应予说明的问题**

无

标准起草组

2023年1月31日