

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0140-07

高精度光纤功率计标准设计及不确定度评定

高业胜 全治科 郑光金 史学舜

(中国电子科技集团公司第 41 研究所, 山东 青岛 266555)

摘要 介绍了一种建立光纤功率计功率测量标准和非线性修正系数测量系统, 研究目的是建立一套光纤功率计标准装置, 以实现国内光纤功率计的量值统一。装置采用功率叠加法测量光纤功率计的非线性修正因子; 用低温辐射计与光陷型硅光电二极管、热电探测器配合解决宽光谱光纤功率准确度参数高精度测量问题。在研制过程中, 自行研制设计了光接口转换夹具, 解决了光输入接口转换问题, 减小了测量误差; 自行研制的非线性修正因子测控软件采用了特殊数据处理方法, 减小测量过程中激光功率的漂移、零点波动等诸多因素的影响, 提高了测量精度; 同时对标准装置进行了详细的测量不确定度分析评定, 给出了评定结果和结论。

关键词 测量; 光学测量; 标准; 光纤功率; 非线性; 测量不确定度

中图分类号 TB96 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0140

Standard Design and Uncertainty Evaluation of Optical Fiber Power with High Accuracy

Gao Yesheng Quan Zhike Zheng Guangjin Shi Xueshun

(The 41st Research Institute of China Electronic Technology Group Company, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract With a measurement system for power and nonlinearity calibration, a suit of calibration facility to measure optical fiber power meter has been established in this paper. The nonlinearity coefficient of optical fiber power can be measured with triplet superposition method. The wide spectrum fiber power meter accuracy is largely increased by cryogenic radiometer, silicon trap detector, thermopile detector cooperation. The optical input interface is solved by a conversion clamp. A special method is adopted in this software to eliminate the optical power drift and the fluctuation of zero power point in order to improve the measurement accuracy. The detailed measurement uncertainties are estimated and a conclusion is also made.

Key words measurement; optical measurement; standard; optical fiber power; nonlinearity; measurement uncertainty

1 引言

光纤功率计是光的最基本测量仪器之一, 广泛应用于光通信设备及光电武器装备的测试。典型的光纤功率计由光探测器将光信号转换为相应的电信号, 然后以适当倍数的电放大器进行放大, 结果以模拟或数字形式输出和显示。其中光信号的转化形式主要有两种。1) 热电转换方式, 这种光纤功率计的优点是光谱响应曲线平坦、准确度高; 缺点是成本高、响应时间较长, 通常用于建立计量标准。2) 半导体光电检测方式, 主要有 PIN 光电二极管和 APD 雪崩二极管组成。APD 因具有雪崩放大作用, 响应

度高, 但附加噪声大, 偏置电压高, 温度稳定性差, 所以很少使用。

光纤功率计主要技术参数有光功率测量准确度、非线性修正系数、波长范围和光功率测量范围 4 项^[1]。根据现行检定规程的要求, 在日常使用时需要对光功率测量准确度和非线性修正系数进行校准。而目前国内光纤功率标准测量不确定度仅为 2.5% (测量功率点为 100 μ W), 测量波长点也仅有 1310 和 1550 nm, 没有 780, 850, 980, 1480 和 1540 nm 等重要工作波长点的功率标准; 而且光通信用功率计线性度目前不能进行测量, 这不能满足光纤功率计的量值溯

作者简介: 高业胜(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事光电子行业测量标准方面的研究。

E-mail: gaoliuhong-001@163.com

源的要求,因此光通信功率计测量标准必须在测量波长、功率测量不确定度、测量参数等方面进行全面提升。为此,设计了一套高精度宽光谱的光纤功率计测量标准装置。整个系统主要有光纤功率标准和非线性测量系统两部分。

2 光纤功率测量标准设计

光纤功率计标准的设计不但要考虑高精度,而且要实现多波长。鉴于低温辐射计具有很高的空间光功率测量精度和很宽的光谱测量范围,通过适当的方法和系统设计可将光纤功率量值高精度地溯源到低温辐射计。为此设计了以低温辐射计为主体,光陷型硅光电二极管、热电堆、激光器、稳功率器、标准管等几部分为辅助设备的光纤功率测量标准,其量值溯源方法如图 1 所示。用低温辐射计在波长为 633 nm 激光功率点上标定光陷型硅光电二极管的光谱响应度^[2,3]。硅光电二极管的光谱响应范围比较窄,约为 400~1100 nm。为实现全波段光功率的测量,需将光陷型硅光电二极管的光谱响应度传递到无光谱响应的热电探测器上,然后传递到标准管;再配以不同的稳定光源,将测量工作波长范围覆盖到整个通信波段。在本部分的设计过程中重点解决了以下几个方面的技术问题:

1)光接口转换:在光纤功率量值的传递过程中要多次涉及到空间传输光与光纤传输光之间的转换

问题,如果光转换接口设计不完善,将会产生很大的转换误差,为此采用光纤准直器与自行设计的光学夹具相结合的方法解决了光接口的转换问题。

2)光学夹具的设计:为适应光功率计功率检定或校准的需要,InGaAs 标准管的光输入接口形式被设计成可拆卸式光纤输入,而标准装置中使用的热电堆为空间光输入,这样就存在光输入相互转换的问题,光纤光与空间光之间的相互转换采用光纤自聚焦透镜。光转换用夹具设计的原则是:在转换过程产生的功率转换误差不能超过 0.2%,其次是转换操作要方便简单。为避免由于光出口距离探测器接收面的远近不同而产生测量误差,在夹具设计时,使自聚焦透镜光的出射端面到光电管的接收面与到 14BIT 热电堆的接收面的距离相等,以减少光束的微小发散对测量结果造成的影响。

3)环境因素影响的消除:光纤功率计功率参数量值传递是从低温辐射计、热电堆到标准管直至用户功率计。其中的激光功率稳定器、光栅外腔波长可调半导体激光器和热电堆接收面对环境条件要求比较高,对如温度变化、气体流动、震动等比较敏感。为此,将整个测量系统置于恒温室内,在防震平台上进行热电堆光谱响应率测量,测量期间关闭空调等。为进一步减小气流对热电堆的影响,对热电堆进行了屏蔽保温处理,通过试验观察效果比较好。

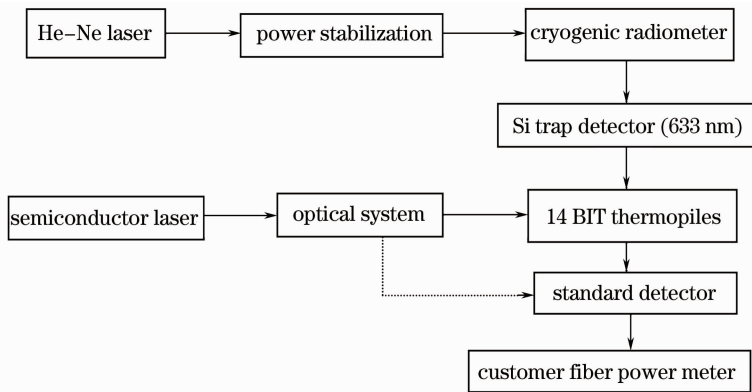


图 1 光纤功率量值传递关系

Fig. 1 Traceability chain for fiber optic power meter calibration

3 光纤功率计非线性测量系统设计

功率计非线性的测量方法很多,常见的有直接比较法、衰减法、差分法和功率叠加法等。其中功率叠加法^[4,5]具有不使用参考标准、原理简单、对测量结果的影响量少、数据准确等优点。虽然测试过程

比较复杂,数据采集量大,计算较复杂,但在计算机技术日益发展的今天,自动测试技术使功率叠加法的缺点变得微乎其微。

功率叠加法测量功率计的非线性系统如图 2 所示,由计算机对测量过程进行控制,并对测量数据进行分析处理、打印校准报告。

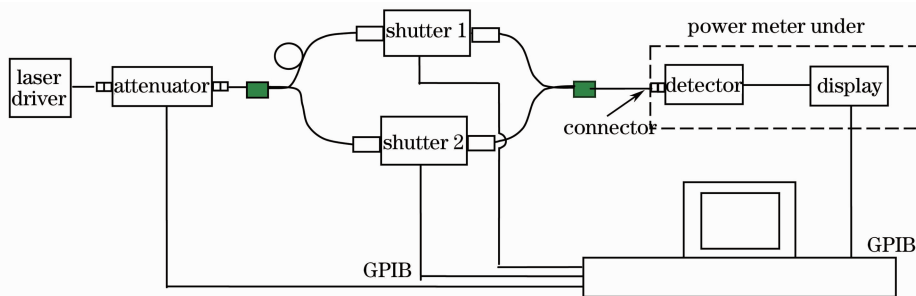


图2 功率计非线性测量系统

Fig. 2 Nonlinearity measurement system

采用双路叠加法进行功率计非线性测量,每组需要采集3个功率计读数:(1)快门1打开,快门2关闭;(2)两个快门同时开启;(3)快门1关闭,快门2打开。快门由计算机进行控制。对不同的功率点,重复以上测量步骤分别进行测量。如果功率计分别测量两路光功率值之和与两路光叠加后测量值相等,则功率计响应是线性的。对第*i*组的测量,可以建立3个等式:

$$\begin{cases} P_{1i} = V_{1i} + \sum_{k=2}^n b_k V_{1i}^k \\ P_{2i} = V_{2i} + \sum_{k=2}^n b_k V_{2i}^k \\ P_{1i} + P_{2i} = V_{3i} + \sum_{k=2}^n b_k V_{3i}^k \end{cases}, \quad (1)$$

式中 P_i 为未知入射光功率; V_i 为功率计显示值; b_k 为多项式系数。

由(1)式可得

$$(V_{3i} - V_{1i} - V_{2i}) + \sum_{k=2}^n b_k (V_{3i}^k - V_{1i}^k - V_{2i}^k) = 0. \quad (2)$$

(2)式中的系数 b_k 可以根据测量数据通过线性最小二乘法来得到。每组测量在很短的时间内完成,这有助于减少激光功率的漂移对测量结果的影响。

按照现行的检定规程的要求,功率计的功率校准点近似为 $100 \mu\text{W}$,至于功率计其他功率 P 可计算为

$$P = \frac{V}{F_c \cdot f_{\text{CF}}[m]}, \quad (3)$$

$$f_{\text{CF}}(m) = \frac{1 + \sum_{k=2}^n b_k [c] V_c^{k-1}}{1 + \sum_{k=2}^n b_k [m] V_c^{k-1}}, \quad (4)$$

式中 F_c 为校准点的校准因子; $f_{\text{CF}}(m)$ 为 m 量程非线性修正因子, $[m]$ 表示量程 m ($m = 1, 2, 3, \dots$), $[c]$ 为参考功率点; P 为参考点的校准功率;

V_c 为对应的校准输出值。

在本部分的设计中,重点解决了大功率半导体激光器输出功率和波长的稳定及激光干涉效应对系统测量精度影响的问题。另外在光路中采用 FC/APC 连接头以减小反射光对激光器和系统光学元件的影响。自行研制了测控软件和数学模型。下面介绍对上述问题的解决方法:

1) 大功率半导体激光器输出功率和波长的稳定: 半导体激光器的输出功率和波长的稳定度与其工作温度、工作电流的稳定与否关系密切。为此,自行研制设计了高精度半导体激光驱动源,其控温精度可达 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$, 电流长期稳定度为 7×10^{-5} , 完全满足非线性测量的要求。

2) 激光干涉效应消除: 在用功率叠加法测量光纤功率计的非线性修正时,光的干涉效应是影响测量结果的一个重要因素,必须消除。为消除干涉效应的影响,在非线形测量系统耦合器的一个臂中插入了一定长度的光纤,综合考虑半导体激光器的相干长度(约为几个厘米)与光纤插入损耗方面的因素,通过理论计算和试验,确定光纤的长度约为 100 m 已完全满足要求。

3) 软件和数学模型设计: 光纤功率计非线性的测量采用每个量程测量一个平均非线性修正因子(包含量程的不连续性),测量时将每个量程平均划分为 10 个部分分别进行测量,然后采用最小二乘法拟合计算非线性修正因子。并计算出平均非线性修正因子,如一台 7 个量程功率计(目前常用的光功率计都有 7 个以上量程)测量一台功率计的非线性大约需要采集 7000 个数据点,数据量很大,必须由计算机来完成。同时需要控制的仪器较多,在系统中需要控制的仪器有调谐激光器、光衰减器三台、被测光功率计等。根据非线性测量控制的仪器多、采集处理数据多的特点,同时考虑到便于调试和修改,软件在整体设计上采用模块化结构,即将整个软件分

为密码验证模块、接口设置模块、参数设置模块、测试模块、数据处理模块 5 部分,每个模块之间都具有相对独立性,模块与主程序之间、模块与模块之间通过临时性文件或注册表来联系。

4 测量不确定度分析

由于光纤功率计测量标准系统主要由功率测量标准和非线性测量系统两部分组成,因此对其测量不确定度也分别进行了评定。下面是详细的分析过程。

4.1 光纤功率测量不确定度评定

从光纤功率量值传递的过程来看,其过程主要为:首先将光陷型硅光电二极管在 633 nm 波长点的光谱响应率传递到 14BIT 热电堆;然后在其他波长点上将 14BIT 热电堆的光谱响应率传递到标准管,标准管用于日常计量校准。因此光功率测量不确定度主要从热电堆和标准管光谱响应度这两方面进行分析。

4.1.1 热电堆光谱响应率测量不确定度评定

本项是用光陷型硅光电二极管在 633 nm 波长点的光谱响应率值为标准来测量热电堆的光谱响应率,见图 1。光陷型硅光电二极管在 633 nm 波长点的光谱响应率值是用低温辐射计测量得到的,其测量不确定度为 0.05%。从这部分的工作过程来看,对测量结果有影响的因素主要有 He-Ne 激光功率不稳定性、光陷型硅光电二极管光谱响应率的测量误差、环境条件变化对热电堆响应率的影响等。其测量的数学模型为

$$P = \frac{V}{Rr} + \delta P, \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{V_1}{P} + \delta P, \quad (6)$$

式中 P 为激光功率; R 为光陷型硅光电二极管光谱响应率; r 为 $I-V$ 转换器的转换电阻, V 为数字电压表的读数; V_1 为纳伏表测量出的热电堆响应输出; R_1 为热电堆的光谱响应率值; δP 为激光功率的不稳定性的影响。

根据(5),(6)式,其中的各个参数之间按不相关处理,按照测量不确定度合成原则^[6]

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{u^2(R)}{R^2} + \frac{u^2(r)}{r^2} + u_{rel}^2(\delta P)}, \quad (7)$$

$$\frac{u(R_1)}{R_1} = \sqrt{\frac{u^2(V_1)}{V_1^2} + \frac{u^2(P)}{P^2} + u_{rel}^2(\delta P)}, \quad (8)$$

式中 $\frac{u(P)}{P}$ 为光陷型硅光电二极管测量 633 nm 波长的激光功率的相对标准测量不确定度; $\frac{u(R_1)}{R_1}$ 表示热电堆光谱响应率相对测量不确定度; $\frac{u(V)}{V}$ 为数字电压表测量相对不确定度,根据电压表在 1 V 档测量直流误差约为 0.004% 估算,假设为均匀分布,置信概率为 100%,由该项产生的测量不确定度大小为 $0.004\%/\sqrt{3}=0.0023\%$ 。 $\frac{u(V_1)}{V_1}$ 为数字纳伏表测量热电堆输出相对测量不确定度,根据电压表的说明书,其在 1 mV 档测量直流电压的误差约为 0.007% 估算,假设为均匀分布,置信概率为 100%,由该项产生的测量不确定度大小为 $0.007\%/\sqrt{3}=0.004\%$ 。 $\frac{u(R)}{R}$ 为光陷型硅光电二极管光谱响应率测量不确定度,其大小为 0.05%。 $\frac{u(r)}{r}$ 为 $I-V$ 变换器转换电阻的相对测量不确定度,电阻的允许误差限为 0.1%,假设为均匀分布,置信概率为 100%,由该项产生的测量不确定度大小为 $0.1\%/\sqrt{3}=0.06\%$ 。 $u_{rel}(\delta P)$ 为激光功率波动而产生的测量不确定度,He-Ne 激光器通过激光功率稳定器以后,激光功率的稳定度为 0.01%,假设为均匀分布,置信概率为 100%,由此产生的测量不确定度为 $0.01\%/\sqrt{3}=0.006\%$ 。将上述不确定度列于表 1 中。

表 1 热电堆光谱响应率测量不确定度评定表
Table 1 Measurement uncertainty evaluation

| list of thermopile spectral responsive | | | |
|--|---|------------------|----------------|
| Sequence number | Source | Uncertainty type | Uncertainty /% |
| 1 | Laser power measurement / (633nm) | / | / |
| | Measurement uncertainty of Si trap detector spectral responsive | B | 0.05 |
| | Voltage measurement error of digital voltage meter | B | 0.0023 |
| | Laser power instability | B | 0.006 |
| | $I-V$ resistance measurement error | B | 0.06 |
| 2 | Voltage measurement error nanovoltage meter | B | 0.004 |
| 3 | Laser power instability | B | 0.006 |
| | Combined standard uncertainty | / | 0.079 |

因此

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{u^2(R)}{R^2} + \frac{u^2(r)}{r^2} + u_{\text{rel}}^2(\delta P)} = \sqrt{(0.0023\%)^2 + (0.05\%)^2 + (0.06\%)^2 + (0.006\%)^2} = 0.078\%,$$

$$\frac{u(R_1)}{R_1} = \sqrt{\frac{u^2(V_1)}{V_1^2} + \frac{u^2(P)}{P^2} + u_{\text{rel}}^2(\delta P)} = \sqrt{(0.004\%)^2 + (0.078\%)^2 + (0.006\%)^2} = 0.079\%.$$

4.1.2 标准管光谱响应率及其功率测量不确定度评定

本项是用热电堆的光谱响应率数值为标准来标定标准管的光谱响应率值,其主要测量波长为 780, 850, 980, 1310, 1480 和 1550 nm。对测量结果产生影响的因素有:半导体激光器输出功率的不稳定、光纤连接器的影响、热电堆光谱响应修正不完善等。其测量的数学模型为

$$P_1 = \frac{V_1}{R_1} + \delta P_1 + \delta R_1, \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{V_2}{P_2 r} + \delta P_1 + \delta F, \quad (10)$$

式中 P_1 为被测的半导体激光功率; R_1 为热电堆光谱响应率; V_1 为纳伏表测量出的热电堆响应输出; δR_1 为热电堆光谱响应率修正不完善产生的影响; δP_1 为半导体激光器的不稳定性产生的影响; r 为 $I-V$ 转换器的转换电阻; V_2 为数字电压表的读数; R_2 为标准管的光谱响应率值; δF 为光纤连接器产生的影响。

根据(9),(10)式,其中的各个参数之间不相关。按照测量不确定度合成原则

$$\frac{u(P_1)}{P_1} = \sqrt{\frac{u^2(V_1)}{V_1^2} + \frac{u^2(R_1)}{R_1^2} + u_{\text{rel}}^2(\delta P_1) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_1)}, \quad (11)$$

$$\frac{u(R_2)}{R_2} = \sqrt{\frac{u^2(V_2)}{V_2^2} + \frac{u^2(P_1)}{P_1^2} + \frac{u^2(r)}{r^2} + u_{\text{rel}}^2(\delta P_1) + u_{\text{rel}}^2(\delta F)}, \quad (12)$$

式中 $\frac{u(P_1)}{P_1}$ 为用热电堆测量半导体激光功率的相

对测量不确定度; $\frac{u(R_2)}{R_2}$ 为标准管光谱响应率测量

不确定度; $\frac{u(V_1)}{V_1}$ 为数字纳伏表测量热电堆输出相对测量不确定度,根据电压表的说明书,其在 1 mV 档测量直流电压的误差约为 0.007%,假设为均匀分布,置信概率为 100%,由该项产生的测量不确定度大小为 $0.007\%/\sqrt{3} = 0.004\%$; $\frac{u(R_1)}{R_1}$ 为热电堆

光谱响应率相对测量不确定度,在以上分析评定的结果为 0.079%; $u_{\text{rel}}(\delta P_1)$ 为所用半导体激光器不稳定性产生的相对测量不确定度,实验中所用的半导体激光器的不稳定性小于 0.5%。假设为均匀分布,置信概率为 100%,由该项产生的测量不确定度大小为 $0.5\%/\sqrt{3} = 0.29\%$; $u_{\text{rel}}(\delta R_1)$ 为热电堆光谱响应率数值修正不完善而产生的测量不确定度。根据热电堆反射率测量报告,其大小为 0.25%; $\frac{u(r)}{r}$

为 $I-V$ 变换器转换电阻的相对测量不确定度,电阻的允许误差限为 0.1%,假设为均匀分布,置信概率为 100%,因此由该项产生的测量不确定度大小为 $0.1\%/\sqrt{3} = 0.06\%$; $\frac{u(V_2)}{V_2}$ 为数字电压表测量相对

不确定度,根据电压表在 1 V 档测量直流误差约为 0.004%估算,假设为均匀分布,置信概率为 100%,由该项产生的测量不确定度大小为 $0.004\%/\sqrt{3} = 0.0023\%$; $u_{\text{rel}}(\delta F)$ 为用光纤连接器产生的功率测量误差,一般小于 0.3%,假设为均匀分布,置信概率为 100%,由该项产生的测量不确定度大小为 $0.3\%/\sqrt{3} = 0.17\%$ 。则

$$\frac{u(P_1)}{P_1} = \sqrt{\frac{u^2(V_1)}{V_1^2} + \frac{u^2(R_1)}{R_1^2} + u_{\text{rel}}^2(\delta P_1) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_1)} = \sqrt{(0.004\%)^2 + (0.079\%)^2 + (0.29\%)^2 + (0.25\%)^2} = 0.39\%,$$

$$\frac{u(R_2)}{R_2} = \sqrt{\frac{u^2(V_2)}{V_2^2} + \frac{u^2(P_1)}{P_1^2} + \frac{u^2(r)}{r^2} + u_{\text{rel}}^2(\delta P_1) + u_{\text{rel}}^2(\delta F)} = \sqrt{(0.0023\%)^2 + (0.39\%)^2 + (0.06\%)^2 + (0.29\%)^2 + (0.17\%)^2} = 0.52\%.$$

标准管光谱响应率的测量不确定率列于表 2 中。

表2 标准管光谱响应率测量不确定度评定表

Table 2 Measurement uncertainty evaluation list of standard detector spectral responsive

| Sequence number | Source | Uncertainty type | Uncertainty /% |
|-----------------|---|------------------|----------------|
| 1 | Laser power measurement (thermopiles) | / | / |
| | Voltage measurement error nano-voltage meter | B | 0.004 |
| | Measurement uncertainty of thermopile spectral responsive | B | 0.079 |
| | Semiconductor laser power instability | B | 0.29 |
| | Value correction of thermopiles spectral responsive | B | 0.25 |
| 2 | Voltage measurement error of digital voltage meter | B | 0.0023 |
| 3 | Semiconductor laser power instability | B | 0.29 |
| 4 | I-V resistance measurement error | B | 0.06 |
| 5 | Fiber connector | B | 0.17 |
| | Combined standard uncertainty | / | 0.52 |

用标准管进行光纤功率测量时,其测量的数学模型为

$$P = \frac{V}{Rr} + \delta P, \quad (13)$$

式中 P 为待测光纤功率; R 为标准管的光谱响应率; r 为 $I-V$ 变换器的转换电阻; V 为数字电压表; δP 为所用半导体激光器输出功率的不稳定性。

光纤功率的测量不确定度的计算为

$$u_{rel} = \frac{u(P)}{P} = \sqrt{\frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{u^2(R)}{R^2} + u_{rel}^2(\delta P)} = \sqrt{(0.0023)^2 + (0.29)^2 + (0.52)^2} \% = 0.59\%.$$

相对扩展测量不确定度为: $U_{rel} = k u_{rel} = 2 \times 0.59\% = 1.2\%$ (按正态分布,置信概率为 95%,则 $k=2$)。

4.2 光纤功率计非线性测量不确定度评定

光纤非线性修正主要测量不确定度来源有:半导体激光器功率的不稳定,测量系统偏振态的变化,激光波长漂移引起光电探测器光谱响应率的变化,非线性计算时对高阶项进行的截取误差以及进行多项式拟合误差等。下面进行具体分析:

1)激光功率的稳定性:光纤功率计非线性的测量过程中,光功率的漂移或起伏将引起一定的误差。在每个非线性系数测量完成后大约 2 min 以内,在此期间光源输出功率的波动小于 $\pm 0.05\%$,因此光源不稳定性引起的测量标准不确定度为 $0.05/(\sqrt{3})=0.03\%$ 。

2)多项式截取:光纤功率计线性表达式的转换方程是由三阶多项式最小二乘法拟合得到的,由于舍去了高阶项而引起测量误差,通过理论计算,可得到产生的最大偏差在 0.007% 以内,由此产生的测量不确定度为 $0.007/(2\sqrt{3})=0.002\%$ 。

3)光电探测器光谱响应率随波长的变化:由于测量过程中激光波长的漂移,引起光功率计光谱响应率的变化,其受影响的大小取决于功率计探测器的吸收材料(Si,Ge 和 InGaAs),根据不同材料探测器的光谱响应率曲线,在 1310 nm 和 1550 nm 波长点,由该项引起的最大测量偏差为 0.014% ,由此产生的测量不确定度为 0.004% 。

4)方程的近似计算:由于在进行非线性系数计算时,假设非线性小于 1% ,由此产生的误差小于 0.01% ,具体测量不确定度大小与非线性的实际大小有关。

5)偏振:这一部分是由于每次测量中系统偏振变化而产生的影响,它跟非线性系统的偏振依赖损耗(PDL)有关,由于测试的次数很多,且系统中采样时间小于偏振状态的变化,可以认为这一部分引起系统的不确定度很小,测得系统的最大 PDL 值为 0.002 dB 或 0.05% ,标准测量不确定度为 $0.05/(2\sqrt{3})=0.014\%$ 。

光纤功率计非线性测量不确定度列于表 3 中。

表3 光纤功率计非线性测量不确定度评定表

Table 3 Measurement uncertainty evaluation list of optical fiber power nonlinearity

| Sequence number | Source | Uncertainty type | Uncertainty /% |
|-----------------|---|------------------|----------------|
| 1 | Laser power instability | B | 0.03 |
| 2 | Polynomial truncation | B | 0.002 |
| | Measurement error of optical power responsive | B | 0.004 |
| 4 | Approximate formula | B | 0.003 |
| 5 | Polarization | B | 0.014 |
| 6 | Repeatability | A | 0.070 |
| | Combined standard uncertainty | / | 0.077 |
| | Expanded uncertainty($k=2$) | / | 0.16 |

5 测量不确定度的验证

为验证系统的测量不确定度分析评定是否合理,

需要对测量不确定度的评定进行验证,系统的测量不确定度验证分为光纤功率和非线性测量两部分。

为验证功率测量不确定度,用3只标准管(评定的最大测量不确定度为1.5%)和81634B功率计(给定的测量不确定度为5%)分别测量1310 nm波长点半导体激光器的输出光功率(设定为-10 dBm),具体的测量数据见表4,其中的测量偏差绝对值均小于0.03 dB(相当于0.7%),因此测量不确定度分析基本合理。

表4 81634B功率计与3只工作标准测量数据一览表

Table 4 Power measurement datum of 81634B optical

fiber power and three standard detectors

| Standard detector serial number | 81634B power meter /dBm | Standard detector /dBm | Measurement error /dB |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 411G1 | -9.635 | -9.606 | -0.029 |
| 411G2 | -9.626 | -9.596 | -0.030 |
| 411G3 | -9.628 | -9.600 | -0.028 |

为验证非线性测量不确定度,用本系统对81532功率计的非线性进行测量,测量得到的最大非线性约为0.5%,根据81532的技术指标可知,在整个量程范围内的非线性约为0.015 dB,换算成百分数为0.4%,理论值与实际数值之间相差0.1%(小于0.16%),因此测量不确定度分析基本合理。

6 结 论

通过上面的测量不确定度分析的结果可以看出,用文中的方法建立的光纤功率计测量标准溯源系统在不考虑用户功率计本身影响情况下,其测量

不确定度可达1.2%($k=2$),非线性测量不确定度为0.16%($k=2$)。而目前国内相关单位所使用的光纤功率计功率扩展测量不确定度一般为5%左右,非线性扩展测量不确定度达到0.5%即可。所以该标准装置的测量精度高,能满足目前和将来很长一段时间光纤功率量值传递的要求,同时也解决了国内光纤功率计非线性的测量问题,改变了国内光纤功率计非线性无法真正测量的现状,该标准装置建立以来已经为国内多家单位的一千多台光纤功率计提供了校准服务,效果良好。

参 考 文 献

- 1 International Standard: Calibration of fibre optic power meters. [S]. CEI/IEC1315, 1995
- 2 L. Werner, J. Fischer, U. Johannsen *et al.*. Accurate determination of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 238 nm and 1015 nm using a laser-based cryogenic radiometer[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(4): 279~284
- 3 Li Shuang, Wu Haoyu, Li Zhaozhou *et al.*. Highly accurate calibration of optical radiation detectors at near infrared spectrum [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 498~501
李 双,吴浩宇,李照洲等. 光辐射标准探测器近红外高精度定标的实验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 498~501
- 4 S. Yang, I. Vayshener, X. Li *et al.*. Optical detector nonlinearity: Simulation [M]. Natl. Inst. Stand. Technol. Technical Note 1376, 1995
- 5 Chen Feng, Li Shuang, Wang Ji *et al.*. Linearity measurement of accurate photodetector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 889~893
陈 风,李 双,王 骥等. 高精度光电探测器的线性测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 889~893
- 6 B. N. Taylor, C. E. Kuyatt. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results [M]. Natl. Inst. Stand. Technol. Tech. Note 1297, 1994