

太阳辐射计的衍射效应修正

刘国栋^{1,2}, 方伟^{1*}, 宋宝奇¹, 叶新¹, 王凯¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130039;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 太阳辐射测量是研究太阳活动与地球气候演变的重要方式之一, 对人类社会的可持续发展具有重要意义。衍射效应作为测量过程中系统误差的主要来源之一, 有必要进行精确的修正, 从而提高测量数据的精度。首先, 对衍射效应理论进行研究, 从 Kirchhoff 衍射理论出发, 在高斯光学近似下, 逐步确定点与点、点与面、面与面之间的能量传输关系, 推导出了衍射效应的一般公式; 接着, 根据衍射效应的渐近性质, 得到了一种简化的计算方法; 然后, 用简化的方法计算太阳辐照绝对辐射计(SIAR)的衍射效应以及衍射修正因子, 最后, 根据衍射修正结果, 计算相对于世界辐射基准(WRR)的定标系数。结果显示: SIAR的衍射效应以及衍射修正因子分别约为1.002 742和0.997 265。经过衍射修正后, SIAR对WRR的定标系数更接近于1, 表明衍射修正降低了系统误差, 提高了辐射测量的准确度。

关键词: 太阳辐射计; 衍射效应; 衍射修正; 计算方法

中图分类号: TH753 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20181105.0851

Diffraction effect correction of solar radiometer

LIU Guo-dong^{1,2}, FANG Wei^{1*}, SONG Bao-qi¹, YE Xin¹, WANG Kai¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130039, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: fangw@ciomp.ac.cn*

Abstract: Solar radiation measurement is one of the important way to study solar activity and evolution of Earth's climate, which is of great significance to the sustainable development of human society. As one of the main sources of systematic errors in the measurement, diffraction effect must be accurately corrected so as to improve the reliability of the measurement data. China has little research on the diffraction effects in solar radiometers, and there are currently no related corrections. With the increase demand of the accuracy of solar radiation measurements, it is necessary to systematically study the diffraction effect. Firstly, the diffraction effect theory is studied. According to the Kirchhoff diffraction theory as well as the Gaussian optical approximation,

收稿日期: 2017-12-18; 修订日期: 2018-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41474161); 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2015AA123703)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 41474161); National High Technology Research and Development Program of China(No. 2015AA123703)

the energy transfer relations between points and points , points and faces , and between faces is gradually determined , and the general formula of diffraction effect is derived. Then a simplified calculation method is obtained according to the asymptotic property of the diffraction effect. The diffraction effect of the Solar Irradiation Absolute Radiometer(SIAR) and the diffraction correction factor are then calculated through a simplified method. Finally , based on the diffraction correction results , the scaling factor relative to the World Radiation Reference(WRR) is calculated. As a result , the diffraction effects and diffraction correction factors of SIAR are about 1. 002 742 and 0. 997 225 , respectively. In addition , the calibration coefficient of SIAR for WRR is closer to 1 , indicating that the diffraction correction reduces the systematic error and improves the accuracy of the radiation measurement.

Key words: Solar radiometer; diffraction effect; diffraction correction; calculation method

1 引言

太阳辐射是地球最主要的能量来源 ,除了核能 ,火山爆发等 ,地球上大部分的能量都直接或间接地来自太阳辐射 ,太阳辐射对地球的生态和环境具有深刻的影响^[1]。为了自身的长久可持续发展 ,人类很早就开始了对太阳辐射的监测与研究。太阳辐射的测量主要是指太阳总辐照度(Total Solar Irradiance ,TSI) 测量和太阳光谱辐照度(Solar Spectral Irradiance ,SSI) 测量。这些太阳辐射的监测数据 ,可以应用到很多科学领域 ,如气候模型的推演、太阳物理研究、地球辐射收支平衡的研究等等 ,随着研究的深入 ,这些领域对太阳辐射数据的测量精度要求越来越高。

太阳绝对辐射计是一种对太阳总辐照度进行监测的仪器^[2] ,其测量精度直接影响太阳辐射数据的可信度。衍射效应是太阳绝对辐射计系统误差的主要来源之一 ,要获得精确的测量数据 ,必须对其进行修正。但是在辐射计量领域 ,衍射效应的修正一直是一个难以解决的问题。一方面是因为衍射效应广泛存在于光学系统中 ,几乎所有对光起限制作用的器件 ,都会引起衍射效应;另一方面 ,衍射效应难以用实验测量 ,即使能测量 ,实验中的不确定度也超过能容忍的范围。因此 ,对衍射效应的研究主要侧重于数学计算上。

辐射计量中衍射效应数学计算在国外有较多的研究。1962 年 ,C. L. Sanders 和 O. C. Jones 在用铂点黑体实现光单位时 ,用夫琅和费衍射理论证明了接收像面中心照度比通过几何光学计算结

果低大约 0. 25% ,证明了衍射效应对精密辐射测量的显著性影响。W. R. Blevin 在实测 Stefan-Boltzman 常数的工作中发现这项误差甚至可达到 0. 5%。此后 ,衍射效应成为黑体辐射测量中不可忽视的因素^[3]。近几十年来 ,随着人类活动走向太空 ,发射了各种太阳辐射监测仪器 ,由于对其精度的要求逐渐提高 ,衍射效应的数学计算 ,逐渐开展起来。目前在国外 ,衍射效应的修正已经开始应用于辐射计的测量结果 ,获得较高的辐射测量精度 ,然而国内却尚未开展该方面的工作 ,严重制约了我国在辐射计量领域的发展。本文根据对衍射效应问题的研究 ,提出一种实用化的计算方法 ,精度高 ,计算简便 ,实现了对太阳辐照绝对辐射计(Solar Irradiance Absolute Radiometer ,SIAR) 的衍射效应修正。

2 衍射效应计算方法

2.1 衍射效应公式的推导

为了便于论述 ,本文做如下定义: 衍射效应是指由于光的衍射 ,探测器接收的辐射通量与几何光学期望值的比 ,是一个与光的衍射有关的“物理量” ,用 F 表示。

根据 Kirchhoff 衍射理论和傍轴光学近似 ,点光源通过光阑衍射后的电场强度为:

$$U(x', y', z') = \frac{U_0 e^{iqL_0}}{i\lambda dd'} \iint_{A_p} dx' dy' \times \exp[iqC(x'' - x'_m)^2 + (y'' - y'_m)^2] \quad (1)$$

其中 , $C = (d^{-1} + d'^{-1})/2$ 是与结构有关的系数 ,相关参数如图 1 所示 ,它表示了 x' 与 x 电场强度

的相互关系。考虑到能量密度 $W = C |U(x, \rho)|^2$, 并做一定的坐标变换, 可以得到:

$$S(r') = | \frac{U}{U_0} |^2 = \frac{R^2 \exp [iq(I_0 + Cr^2)]}{i\lambda dd'} \times \int_0^1 d\rho \rho \int_0^{2\pi} d\theta \exp(iu\rho^2/2 - i\nu\rho \cos\theta) \quad (2)$$

其中 R 表示光阑的半径, r 表示 x' 到光轴的距离, $\rho = r''/R$, $u = 2qCR^2$, $\nu = |2qCRr|$ 。

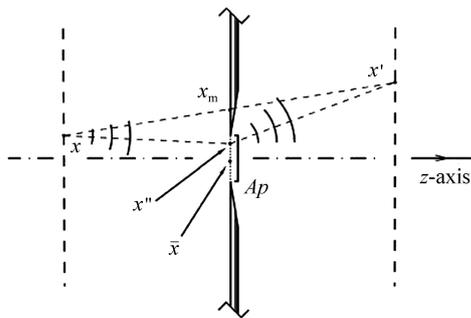


图 1 点光源衍射讨论中的参量

Fig. 1 Parameters in the discussion of point source diffraction

式(2)表示了 x' 与 x 之间能量密度的关系。而在几何光学中, x' 与 x 之间能量密度的关系如下:

$$S_C(r') = \frac{e^{iqL_0} \Theta(R/r' - 1)}{2Cdd'} \quad (3)$$

式中, $\Theta(x)$ 是 Heaviside 阶跃函数。

$$L(u, \nu_0) = \left(\frac{\nu_0}{u}\right)^2 \left[1 + \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{2s+1} \left(\frac{u}{\nu_0}\right)^{2s} Q_{2s}(\nu_0) \right] - \frac{4}{u} \left\{ Y_1(u, \nu_0) \cos\left[\frac{1}{2}\left(u + \frac{\nu_0}{u}\right)\right] + Y_2(u, \nu_0) \sin\left[\frac{1}{2}\left(u + \frac{\nu_0}{u}\right)\right] \right\} \quad (9)$$

式中, $Q_{2s}(\nu_0)$ 和 $Y_n(u, \nu_0)$ 表示如下:

$$Q_{2s}(\nu_0) = \sum_{p=0}^{2s} (-1)^p [J_0(\nu_0) J_{2s-p}(\nu_0) + J_{p+1}(\nu_0) J_{2s+1-p}(\nu_0)]$$

$$Y_n(u, \nu_0) = \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s (n+2s) (\nu_0/u)^{n+2s} J_{n+2s}(\nu_0)$$

设探测器平面上所有点的集合为 $\{x\}$, 探测

$$\Phi_\lambda(\lambda) = D \cdot L_\lambda(\lambda) \int_{-1}^1 dx \frac{\{(1-x^2) [(2+\sigma x)^2 - \sigma^2]\}^{1/2}}{1+\sigma x} \times L[u, \nu_0(1+\sigma x)] \quad (10)$$

因此, $|S(r')/S_C(0)|^2$ 就表示点 x' 处的衍射效应, 其表达式由 Lommel 函数^[4] 给出:

$$\left| \frac{S(r')}{S_C(0)} \right|^2 = U_1^2(u, \nu) + U_2^2(u, \nu) \quad (4)$$

$$\left| \frac{S(r')}{S_C(0)} \right|^2 = 1 + V_0^2(u, \nu) + V_1^2(u, \nu) - 2V_0(u, \nu) \cos\left[\frac{1}{2}\left(u + \frac{\nu^2}{u}\right)\right] - 2V_1(u, \nu) \sin\left[\frac{1}{2}\left(u + \frac{\nu^2}{u}\right)\right] \quad (5)$$

式中, $U_n(u, \nu)$ 和 $V_n(u, \nu)$ 可以用 n 阶贝塞尔函数来表示

$$U_n(u, \nu) = \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s (u/\nu)^{n+2s} J_{n+2s}(\nu) \quad (6)$$

$$V_n(u, \nu) = \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s (v/u)^{n+2s} J_{n+2s}(\nu) \quad (7)$$

式(4)和式(5)是等价的, 当 $r' > R$ 时, 式(4)更简便, 而当 $r' < R$ 时, 式(5)更简便。

实际的辐射测量, 是对整个探测平面的能量密度进行积分, 为此, 引入一个新的量 $L(u, \nu_0)$, 表示整个探测平面的衍射效应^[5], 它相当于 $|S(r')/S_C(0)|^2$ 在整个探测平面的积分, 类似于 $|S(r')/S_C(0)|^2$ 的推导, Wolf 给出了 $L(u, \nu_0)$ 的表达式:

$$\text{当 } \nu_0 > |u| \text{ 时, } L(u, \nu_0) = 1 - \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{2s+1} \left(\frac{u}{\nu_0}\right)^{2s} Q_{2s}(\nu_0) \quad (8)$$

当 $\nu_0 < |u|$ 时,

器边缘上的点满足 $\nu = \nu_0$, 探测器内部的点满足 $\nu < \nu_0$ 。显然 $L(u, \nu)$ 表示以探测平面中心为原点, 以 $\nu/(2qCR)$ 为半径的圆形区域的衍射效应。

实物光源常常可以看作无数个相互独立的点光源的集合, 在式(8)和式(9)的基础上, E. L. Shirley 推导出了适用于扩展光源的公式^[6]:

式中 $D = 4\pi^3 R^4 r_s^2 r_d^2 / [d_s^2 d_d^2 (\lambda v_m)^2]$, $\Phi_\lambda(\lambda)$ 表示探测器接收的总能量 $L_\lambda(\lambda)$ 表示光源的亮度。

若仅仅在几何光学范畴考虑,则可以很容易求得探测器接收的总能量 $\Phi_G(\lambda)$,其表达式跟具体的光学结构有关。因此,总的衍射效应就可以表示为:

$$F(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda(\lambda)}{\Phi_G(\lambda)}. \quad (11)$$

现在通过图 2 对式(10)的参数进行说明,可以看出,该光构中包含了扩展型朗伯光源(Source),光阑(Aperture)和探测器(Detector)三个要素, R, r_s, r_d, d_s, d_d 表示3个要素构成的几何参数。事实上,对该结构的研究是辐射计量中研究最多的问题之一,称为 SAD 问题。

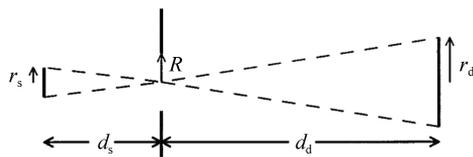


图 2 SAD 结构

Fig. 2 Structure of SAD

在 SAD 问题中常常引入如下的参数: $u = \frac{2\pi R^2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_s} + \frac{1}{d_d} \right)$, $v_s = \frac{2\pi R r_s}{\lambda d_s}$, $v_d = \frac{2\pi R r_d}{\lambda d_d}$

$v_m = \max(v_s, v_d)$, $\sigma = \frac{\min(v_s, v_d)}{\max(v_s, v_d)}$, 使用这 5 个

参数,可以将 SAD 的衍射问题分成 3 种,其衍射效应值分别用 F_1, F_2, F_3 表示。下式给出了 F_1, F_2, F_3 所对应的条件^[7]。

$$\begin{aligned} F_1: & \quad u < v_m(1 - \sigma) \\ F_2: & \quad y > v_m(1 + \sigma) \\ F_3: & \quad v_m(1 - \sigma) < u < v_m(1 + \sigma) \end{aligned} \quad (12)$$

对于 F_1 情况,光阑会限制光的几何传输路径,而在 F_2 中则不会。 F_3 情况会导致探测器边缘位于光束与阴影区域的交界附近,衍射效应分析复杂,是结构设计中需要避免的情况。式(8)和式(9)是 $L(u, \nu)$ 分别在 F_1 和 F_2 情况下的表达式,只不过取 $\nu = v_m(1 + \sigma x)$ 。在几何光学范畴内考虑, $\Phi_G(\lambda)$ 在 F_1 和 F_2 情况下可以表示为

$$\Phi_G(\lambda) |_{F_1} = \frac{u^2 \pi^2 r_s^2 r_d^2 L_\lambda(\lambda)}{v_m^2 v_m^2 (d_s + d_d)^2} \quad (13)$$

$$\Phi_G(\lambda) |_{F_2} = \frac{\pi^2 r_s^2 r_d^2 L_\lambda(\lambda)}{v_m^2 (d_s + d_d)^2}$$

综合式(10)、式(11)和式(13)可得总的衍射效应为:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 dx \frac{\{(1-x^2)[(2+\sigma x)^2 - \sigma^2]\}^{1/2}}{1+\sigma x} \times L[u, \nu_0(1+\sigma x)] \\ F_2 &= \frac{1}{\pi} \frac{R^2}{r_d^2} \int_{-1}^1 dx \frac{\{(1-x^2)[(2+\sigma x)^2 - \sigma^2]\}^{1/2}}{1+\sigma x} \times L[u, \nu_0(1+\sigma x)] \end{aligned} \quad (14)$$

该式表示了 SAD 结构对波长为 λ 的光的衍射效应,然而太阳辐射计中所测光源是太阳,是一个宽光谱的普朗克光源。实际操作中,可以将太阳辐射的等效波长 $\lambda_{\text{eff}} \approx 902.792\ 042\ 6\ \text{nm}$ 应用于式(14)^[8]。

2.2 简化的计算方法

由于 $L(u, \nu)$ 包含复杂的 n 阶贝塞尔函数,对式(14)直接积分是困难的。实际操作中,常常根据贝塞尔函数的渐近性质对 $L(u, \nu)$ 进行简化。

当 $\nu > |u|$ 时, Focke 在前人的工作基础上给出了 $L(u, \nu)$ 的渐近形式^[9],

$$L(u, \nu) \approx 1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\nu}{\nu^2 - u^2} \right) \quad (15)$$

当 $\nu < |u|$ 时,则 $w = \frac{\nu}{|u|} < 1$, $L(u, \nu)$ 的表达式依赖于 $Q_{2s}(v)$ 以及 $Y_n(u, \nu)$ 的渐近形式,具体如下^[10]:

$$\begin{aligned} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{2s+1} w^{2s} Q_{2s}(v) &= \frac{2\sigma_0}{\pi v} - \frac{\sigma_0 \cos(2v)}{\pi v^2} - \frac{16\sigma_4 + 32\sigma_3 + 8\sigma_2 - 8\sigma_1 - 3\sigma_0}{12\pi v^3} + \\ &\left(\frac{8\sigma_2 + 8\sigma_1 - \sigma_0}{4\pi v^3} \right) \sin(2v) + \frac{64\sigma_4 + 128\sigma_3 - 16\sigma_2 - 80\sigma_1 + 9\sigma_0}{32\pi v^4} \cos(2v) + O(v^{-5}), \end{aligned} \quad (16)$$

$$Y_1(u, \nu) = \frac{\nu^2}{2u} \left(\frac{2}{\pi\nu}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{2\sigma_0 + 4\sigma_1}{\nu}\right) \sin(\nu - \pi/4) + \left(\frac{3\sigma_0 + 22\sigma_1 + 48\sigma_2 + 32\sigma_3}{4\nu^2}\right) \cos(\nu - \pi/4) + \left(\frac{15\sigma_0 + 62\sigma_1 - 160\sigma_2 - 960\sigma_3 - 1280\sigma_4 - 512\sigma_5}{64\nu^3}\right) \times \sin(\nu - \pi/4) \right] + O(\nu^{-7/2}), \quad (17)$$

$$Y_2(u, \nu) = -\frac{\nu}{2} \left(\frac{2}{\pi\nu}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{4\sigma_1}{\nu}\right) \sin(\nu + \pi/4) + \left(\frac{-\sigma_1 + 16\sigma_3}{2\nu^2}\right) \cos(\nu + \pi/4) + \left(\frac{-9\sigma_1 + 160\sigma_3 - 256\sigma_5}{32\nu^3}\right) \sin(\nu + \pi/4) \right] + O(\nu^{-7/2}), \quad (18)$$

其中 σ_k 是由简单函数 $W_k(x)$ 决定的变量

$$\sigma_k = \sum_{s=0}^{\infty} s^k w^{2s} = \left(w^2 \frac{d}{d(w^2)}\right)^k \frac{1}{1-w^2} = \frac{W_k(w^2)}{(1-w^2)^{k+1}}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} W_0(x) &= 1, W_3(x) = x^3 + 4x^2 + x, \\ W_1(x) &= x, W_4(x) = x^4 + 11x^3 + 11x^2 + x, \\ W_2(x) &= x^2 + x, W_5(x) = x^5 + 26x^4 + 66x^3 + 2611x^2 + x \end{aligned} \quad (20)$$

通过上述渐近处理, 可以将 $L(u, \nu)$ 表示为简单函数, 则式(14)就转化为简单函数的线性积分, 大大简化了计算量。

为了验证上述简化方法的准确性, 本文参考国外一些已经进行过衍射修正的辐射计结构, 将使用本文方法计算的结果与其报告的结果进行对比。表 1 是国外几个辐射计的 SAD 结构参数以

及衍射效应的计算结果^[11]。计算过程是对公式(14)的数值计算, 该过程采用精确的 $L(u, \nu)$ (含有 n 阶贝塞尔函数), 计算结果较为精确。可以看出太阳总辐照度测量中衍射效应在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间, 已经成为精确测量中不可忽视的重要因素。

表 1 几种太阳辐射计的衍射效应

Tab. 1 Diffraction effects in some radiometers

Instrument	R_a /mm	d_d /mm	R_d /mm	Correction
PMO6V	4.25	95.4	2.5	1.001 280
DIARAD	6.52	144	4.001 5	1.000 833
ERBE	12.09	100.8	4.039	1.000 209
ACRIM				
Baf1	6.654 8	150.469 6	3.987 8	1.000 828
Baf2	6.311 9	76.352 4	3.987 8	1.000 466
Total				1.001 295
TIM	3.989 4	101.6	7.62	0.999 582

表 2 是采用本文简化方法计算得到的衍射效应, 也就是考虑 $L(u, \nu)$ 的渐近性质, 进行较为简便的线性积分。可以看出, 计算结果与表 1 的偏

差在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 之间, 远小于衍射效应值, 从而证明本文的方法在简化运算的同时兼顾了计算结果的准确性。

表 2 采用简化方法的衍射效应值

Tab. 2 Diffraction effects by using simplified method

太阳辐射计		F	衍射效应 $C_{\text{diff}} = F - 1$	δ
	RMO6V	1.001 229	0.001 299	+0.000 010
	DIARAD	1.000 807	0.000 807	-0.000 026
	ERBE	1.000 204	0.000 204	-0.000 005
ACRIM	Baf1	1.000 793	0.000 793	-0.000 035
	Baf2	1.000 450	0.000 450	-0.000 016
	Baf3	1.001 242	0.001 242	-0.000 053
	TIM	0.999 577	-0.000 423	-0.000 005

3 SIAR 衍射效应的修正

SIAR 是一种利用电替代原理对太阳辐射进行测量的仪器,其构造如图 3 所示,主要结构包括锥腔,光阑结构,热沉以及相关的电路模块^[12]。

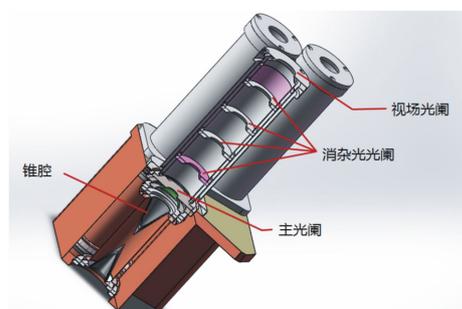


图 3 SIAR 剖面示意图

Fig. 3 Profile of SIAR

SIAR 的光阑有 6 个: 主光阑, 视场光阑, 4 个消杂光光阑。视场光阑在前, 主光阑在后并靠近锥腔, 半径为 4 mm。整体结构视场半角为 1° , 相邻光阑距离为 20 mm, 光阑分布如图 4 所示。

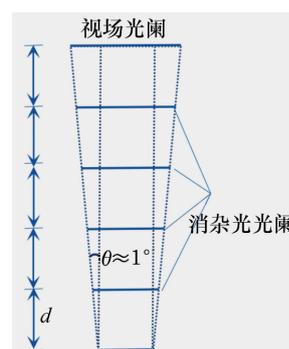


图 4 光阑的几何分布

Fig. 4 Positions of the apertures

应用上述 SAD 结构, 对 SIAR 的衍射效应进行分析。首先由于主光阑靠近锥腔, 认为通过主光阑的光都能到达锥腔, 则主光阑开口相当于 SAD 的探测器, 且 $r_d = 4$ mm; 太阳作为 SAD 结构中的扩展型朗伯光源, $r_s \approx 6.75 \times 10^{11}$ mm, 距离光阑距离 $d_s \approx 1.5 \times 10^{14}$ mm, 由于太阳到地球表面的视场半角约为 $32'$, 位置在前的光阑不会遮挡后面光阑的几何光学路线^[13], 因此视场光阑和 4 个消杂光光阑可以作为 SAD 结构中的非限制光

表 3 SIAR 的 SAD 参数

Tab. 3 SAD parameters of the SIAR

光阑	光阑半径 R/mm	光阑与探测器距离 d_d/mm	探测器(主光阑)半径 r_d/mm
Ap_1	5.75	100	4.00
Ap_2	5.40	80	4.00
Ap_3	5.05	60	4.00
Ap_4	4.70	40	4.00
Ap_5	4.35	20	4.00

阑,引起 F_2 类型的衍射效应。SIAR 的衍射效应问题可以分解为 5 个 SAD 问题。视场光阑与随后的 4 个消杂光光阑用 $Ap_x (x = 1, 2, 3, 4, 5)$ 表示,具体参数如表 3 所示。

根据 $L(u, \rho)$ 在 $v < |u|$ 时的渐近性质,利用式 (14) 进行数值积分得到每个光阑引起的衍射效应以及总的衍射效应,如表 4 所示。

表 4 SIAR 的衍射效应

Tab. 4 Diffraction effects in SIAR

光阑	衍射效应 F	$\varepsilon = F - 1$
Ap_1	1.000 785	0.000 785
Ap_2	1.000 692	0.000 692
Ap_3	1.000 577	0.000 577
Ap_4	1.000 435	0.000 435
Ap_5	1.000 252	0.000 252
Total	1.002 742	0.002 742

从表 4 可以看出,SIAR 总的衍射效应达到 0.274%,而根据 90 年代给出的太阳总辐照度为 $(1\ 365.4 \pm 1.3) \text{ W/m}^2$,不确定度占 0.095%,由此可见,由衍射效应引起的误差是相当显著的^[14],是精确测量中不可忽视的重要因素。另外由于前一级光阑不会遮挡后一级光阑的几何传输路径,衍射效应会随消杂光光阑个数的增加而逐级累加。

辐射计的衍射修正因子 C_{diff} 定义为^[15]:

$$C_{\text{diff}} = \frac{\Phi_G}{\Phi_\lambda}, \quad (21)$$

则 SIAR 的衍射修正因子 $C_{\text{diff}} = \frac{1}{F} \approx 0.997\ 265$,辐射计测量结果乘以 C_{diff} 就得到经过衍射修正后的太阳辐射数据。

太阳辐射计所测辐射数据,需要定标到国际辐射基准(WRR)。具体做法为:在相同时间,相同实验环境下,SIAR 与 WRR 同时对太阳辐射进行监测,得到的结果分别为 $\text{TSI}|_{\text{SIAR}}$, $\text{TSI}|_{\text{WRR}}$,则 SIAR 的定标系数为

$$\text{WRR Factor} = \frac{\text{TSI}|_{\text{WRR}}}{\text{TSI}|_{\text{SIAR}}}, \quad (21)$$

WRR Factor 越接近 1,则表明辐射计的测量准确度越高。表 5 是未经过衍射修正的 SIAR 的定标系数^[16]。

表 5 衍射效应未修正的 WRR Factor

Tab. 5 Diffraction effects uncorrected WRR Factor

SIAR 型号	定标系数 WRR Factor	WRR Factor-1
SIAR-2C	0.998 949	0.001 051
SIAR-4A	0.998 445	0.001 555
SIAR-4B	0.996 734	0.003 266
SIAR-4D	0.995 917	0.004 083

对 SIAR 进行衍射效应修正,则定标系数为

$$\text{WRR Factor}|_{\text{diff}} = \frac{\text{TSI}|_{\text{WRR}}}{C_{\text{diff}} \cdot \text{TSI}|_{\text{SIAR}}} = \frac{\text{TSI}|_{\text{WRR}}}{\text{TSI}|_{\text{SIAR}}} \cdot F. \quad (22)$$

表 6 是经过衍射修正后 SIAR 的定标系数,可以看出经过衍射修正后,SIAR-4B 和 SIAR-4D 的定标系数都明显地趋近于 1。而对于 SIAR-2C 和 SIAR-4A,衍射效应造成的系统误差,使得定标系数从小于 1 变成大于 1,之所以没能更接近 1,是由其他的系统误差导致的。因此,衍射修正降低了辐射计的一部分系统误差,提高了 SIAR 测量数据的准确度。

表 6 衍射修正过的 WRR Factor

Tab. 6 Diffraction effects corrected WRR Factor

SIAR 型号	定标系数 WRR Factor	WRR Factor-1
SIAR-2C	1.001 688	0.001 688
SIAR-4A	1.001 182	0.001 128
SIAR-4B	0.999 467	0.000 533
SIAR-4D	0.998 648	0.001 352

4 结 论

本文从 Kirchhoff 衍射理论出发,根据高斯光学近似,逐步推导出了衍射效应下点与点、点与面、面与面的能量传输关系,最终给出了衍射效应计算的一般公式。为了便于计算,构建了用于衍

射分析的 SAD 模型,重点分析了 F_1 和 F_2 两种衍射类型,最后根据渐近性质,提出了简便的计算方法。根据 SIAR 的光阑结构特点,将其衍射效应分解成 5 个 SAD 问题,使用简化的方法分别计算衍射效应,最后按照累加原则,得到总的衍射效应。由于衍射效应与辐射计的衍射修正因子互为

倒数关系,从而给出了衍射修正因子,这是国内辐射计首次实现对衍射效应的修正。根据衍射修正结果,计算 4 个型号的 SIAR 相对 WRR 的定标系数,结果表明四个 SIAR 中衍射效应引起的系统误差被修正,提高了测量结果的准确度。

参考文献:

- [1] 王玉鹏,方伟,弓成虎,等. 双锥腔互补型绝对辐射计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1662-1667.
WANG Y P, FANG W, GONG CH H, et al.. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1662-1667. (in Chinese)
- [2] 唐潇,方伟,骆杨,等. 低温绝对辐射计 ARCPR 热沉的热特性分析[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1012004.
TANG X, FANG W, LUO Y, et al.. Thermal analysis of an absolute cryogenic radiometer heat sink[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1012004. (in Chinese)
- [3] 李同保. 光辐射测量中的衍射修正问题[J]. 国外计量, 1979, 5: 42-46.
LI T B. Diffraction Correction in Optical Radiation Measurement[J]. *Foreign Measurement*, 1979, 5: 42-46. (in Chinese)
- [4] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. Oxford, UK: Pergamon Press Ltd., 1965.
- [5] WOLF E. Light distribution near focus in an error-free diffraction image[J]. *Proc. Roy. Soc.*, 1951, A204: 533-548.
- [6] SHIRLEY E L. Revised formulas for diffraction effects with point and extended sources[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37: 6581-6590.
- [7] EDWARDS P, MCCALL M. Diffraction loss in radiometry[J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42: 5024-5032.
- [8] SHIRLEY E L. Diffraction corrections in radiometry: Spectral and total power, and asymptotic properties[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2004, A21: 1895-1906.
- [9] FOCKE J. Total illumination in an aberration-free diffraction image[J]. *Optica Acta*, 1956, 3: 161-163.
- [10] OLVER F W J. *Asymptotics and Special Functions* [M]. Wellesley, USA: A. K. Peters, Ltd., 1997.
- [11] 方伟,禹秉熙,王玉鹏,等. 太阳辐照绝对辐射计及其在航天器上的太阳辐照度测量[J]. 中国光学, 2009, 2(1): 23-28.
FANG W, YU B X, WANG Y P, et al.. Solar irradiance absolute radiometers and solar irradiance measurement on spacecraft[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2009, 2(1): 23-28. (in Chinese)
- [12] BUTLER J J, JOHNSON B C, RICE J P, et al.. Sources of differences in on-orbital total solar irradiance measurements and description of a proposed laboratory intercomparison[J]. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2008, 113: 187-203.
- [13] 王玉鹏,方伟,禹秉熙. 宽视场绝对辐射计的杂散光特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 432-436.
WANG Y P, FANG W, YU B X. Stray light characteristics of WFOV absolute radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 432-436. (in Chinese)
- [14] KOPP G, LEAN J L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L01706.
- [15] MARKUS S. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports[R]. *Advances in Solar Radiometry*, 2014.
- [16] FINSTERLE W. International pyrheliometer comparison[R]. IPC-XII 2015.

作者简介:



刘国栋(1990—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事太阳辐射计衍射效应方面的研究。E-mail: Liugd0512@163.com



方伟(1965—),女,辽宁朝阳人,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间辐射计量方面的研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail: yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50元/期

网址:www.yjyxs.com