

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2016 年 11 月 3 日 (03.11.2016)



(10) 国际公布号
WO 2016/173382 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01M 11/02 (2006.01) *G01B 11/26* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/078164
- (22) 国际申请日: 2016 年 3 月 31 日 (31.03.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201510217472.7 2015 年 4 月 30 日 (30.04.2015) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 朱鹤年 (ZHU, He'nian); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 肖志刚 (XIAO, Zhigang); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 郭旭波 (GUO, Xubo); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 陈强 (CHEN, Qiang); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

常缨 (CHANG, Ying); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

- (74) 代理人: 深圳新创友知识产权代理有限公司 (CHINA TRUER IP); 中国广东省深圳市福田区上步路佳兆业中心 A 座 2314, Guangdong 518031 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH,

[见续页]

(54) Title: METHOD FOR MEASURING FOCAL LENGTH AND ROTATING ANGLE USING FABRY-PEROT ETALON

(54) 发明名称: 一种用法布里-珀罗标准具测量焦距和转角的方法

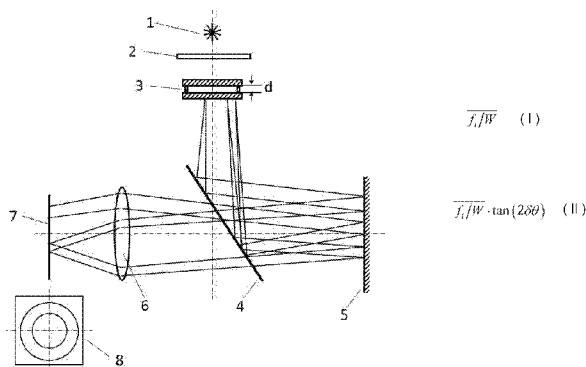


图 1

(57) Abstract: A method for measuring a focal length and a rotating angle using a Fabry-Perot etalon, comprising: transmitting monochromatic light through a Fabry-Perot etalon (3) to generate a group of standard cone beams with regular and accurate cone angles θ_i , and reflecting the cone beams to a rotating mirror (5) by a half-transmitting and half-reflecting plane mirror (4); transmitting the beams, reflected by the rotating mirror (5), through the half-transmitting and half-reflecting plane mirror (4), passing through an objective lens (6), and forming a group of concentric circular rings (8) on the surface of an area array photoelectric device (7) located on a focal plane of the objective lens (6); selecting a plurality of point fields on each circular ring (8), and applying a photoelectric signal extreme value point location pixel coordinate fine-division method to a one-dimensional pixel in each point field; performing circle regression using a plurality of extreme value point location coordinates on the circular rings (8) to obtain a diameter D_i and standard deviation S_{D_i} of each circle; obtaining f_i/W from $D_i = 2(f_i/W)\tan\theta_i$ according to a distribution rule of the cone angles θ_i by means of the diameters D_i and standard deviations S_{D_i} of the concentric circular rings (8) of the cone beams, f_i/W being a ratio, calculated by the diameter D_i of a single circle, of a focal length f_i to an average pixel interval W of the area array photoelectric

[见续页]



WO 2016/173382 A1



CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

device (7); obtaining a weighted average value (I) of f_i/W so as to obtain a measured focal length f ; and rotating, when a rotating angle of the rotating mirror (5) is $\delta\theta$, central axes of the cone beams, emitted to the objective lens, by an angle of $2\delta\theta$ so as to make the centers of the concentric circular rings (8) to translate (II), and calculating the rotating angle $\delta\theta$ of the rotating mirror by means of a translation amount, taking W as a relative unit, of centers $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ of the concentric circular rings (8). The method can improve the measurement accuracy and precision of a focal length and a rotating angle.

(57) 摘要: 一种用法布里-珀罗标准具测量焦距和转角的方法, 包括: 用单色光经法布里-珀罗标准具 (3) 透射, 产生一组圆锥角 θ_i 规律准确的标准圆锥光束, 所述圆锥光束经过半透半反平面镜 (4) 反射向转镜 (5); 经转镜 (5) 反射后的光束透过半透半反平面镜 (4), 再经过物镜 (6), 在位于所述物镜 (6) 的焦平面的面阵光电器件 (7) 表面形成一组同心圆环 (8); 在各圆环 (8) 上选取多个点域, 对各个点域内的一维像元用光电信号极值点位像元坐标细分方法; 用圆环 (8) 上的多个极值点位坐标作圆回归求出各圆的直径 D_i 及其标准差 S_{Di} ; 由所述圆锥光束的同心圆环 (8) 直径 D_i 及其标准差 S_{Di} , 按圆锥角 θ_i 分布规律由 $D_i = 2(f_i/W)\tan\theta_i$ 求出 f_i/W , f_i/W 是由单个圆直径 D_i 算出的焦距 f_i 与所述面阵光电器件 (7) 的平均像元间距 W 的比值, 进而求出 f_i/W 的加权平均值 (I), 以得出被测焦距 f ; 转镜 (5) 转角为 $\delta\theta$ 时, 入射向物镜的圆锥光束中心轴将转过 $2\delta\theta$ 角, 使同心圆环 (8) 圆心平移 (II), 通过所述同心圆环 (8) 的圆心 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 的以 W 为相对单位的平移量计算出转镜转角 $\delta\theta$ 。该方法能提高焦距以及转角测量的准确度与精密度。

一种用法布里-珀罗标准具测量焦距和转角的方法

技术领域

本发明涉及光学领域及几何量测量领域，特别是涉及一种用法布里-珀罗标准具测量焦距和转角的方法。

背景技术

目前测小转角的自准直仪的原理方案中，准确度指标受到两方面的制约：(1) 多数自准直仪在测量小转角 $\delta\theta$ 时，用式 $U_{\delta\theta} = c_0 + c_1\delta\theta$ 表示的扩展不确定度中倍率项系数 c_1 受到焦距不确定度 U_f/f 的制约。运用由长度量正切关系设计的小角度发生器对自准直仪进行定度或给出检定曲线，虽能使一定周期、一定条件下的 U_{c_1}/c_1 小于 0.25%，甚至小于 1×10^{-3} ，但其检定周期内的稳定性、测量时温度等影响量的变动性误差等制约了角度 $\delta\theta$ 的实际测量范围及使用条件。(2) 有效分辨率及与重复性标准差相关联的 A 类不确定度受到线阵（或面阵）光电器件像元误差的限制。某型自准直仪测 $\delta\theta$ 的扩展不确定度达 0.05"（加和分量），采用控制较好的光束分布线型，用约 40 个连续像元信号做光束聚焦中心位置的像元坐标细分。温度一定时线阵（或面阵）光电器件像元的平均间距 $\#$ 准确度高，但是单个像元的等效几何中心的偏离误差与光电转换率的误差常常较显著，如一些线、面阵光电器件的像元光电转换率的误差限可达 $\pm 5\%$ 。

目前测物镜焦距 f 的方法或仪器，相对扩展不确定度 U_f/f 一般仅约 0.25%。虽有文献报道过 U_f/f 达 10^{-4} 量级的实验，但因其测量结果可溯源性差而受到另一些专业文献的质疑。

以上背景技术内容的公开仅用于辅助理解本发明的发明构思及技术方案，其并不必然属于本专利申请的现有技术，在没有明确的证据表明上述内容在本专利申请的申请日已经公开的情况下，上述背景技术不应当用于评价本申请的新颖性和创造性。

发明内容

本发明主要目的在于提出一种用法布里-珀罗标准具测量焦距和转角的方法，以解决上述现有技术存在的准确度较低的技术问题。

为此，本发明提出一种用法布里-珀罗标准具测量焦距的方法，其特征在于：包括如下步骤：第一步：用单色光经法布里-珀罗标准具透射，产生一组圆锥角 θ_i 规律准确的标准圆锥光束，所述圆锥光束经半透半反平面镜反射射向转镜，经转镜反射后透过半透半反镜，再经过物镜，在位于所述物镜的焦平面的面阵光电器件表面形成一组同心圆环；第二步：在各圆环上选取多个点域，对各个点域内的一维像元作细分；第三步：由所述圆锥光束的同心圆环直径 D_i 及其标准差 s_{D_i} ，按圆锥角 θ_i 分布规律由 $D_i = 2(f_i/W) \tan \theta_i$ 求出 f_i/W ， f_i/W 是由单个圆直径 D_i 算出的焦距 f_i 与所述面阵光电器件的平均像元间距 W 的比值，进而求出 f_i/W 的加权平均值 $\overline{f_i/W}$ ，以得出被测焦距 f 。

在一个实施例中，所述第二步具体包括：先找出所述同心圆环的近似圆心点 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ ，再在近似圆心点附近分别作至少 3 条水平线、至少 3 条垂直线，使所述水平线和垂直线与每个圆环相交形成 2 个线段，在每条线段上求出光电信号极值点位的、细分后包含小数的、以像元平均间距 W 为单位的坐标值。

本发明还提出了一种用法布里-珀罗标准具测量转角的方法，包括如下步骤：第一步：用单色光经法布里-珀罗标准具透射，产生一组圆锥角 θ_i 规律准确的标准圆锥光束，所述圆锥光束经半透半反平面镜反射射向转镜，经转镜反射后透过半透半反镜，再经过物镜，在位于所述物镜的焦平面的面阵光电器件表面形成一组同心圆环；第二步：在各圆环上选取多个点域，对各个点域内的一维像元作细分；第三步：由所述圆锥光束的同心圆环直径 D_i 及其标准差 s_{D_i} ，按圆锥角 θ_i 分布规律由 $D_i = 2(f_i/W) \tan \theta_i$ 求出 f_i/W ， f_i/W 是由单个圆直径 D_i 算出的焦距 f_i 与所述面阵光电器件的平均像元间距 W 的比值，进而求出 f_i/W 的加权平均值 $\overline{f_i/W}$ ；第四步：根据转镜产生转角 $\delta\theta$ 后，入射向物镜的圆锥光束中心轴将转过 $2\delta\theta$ 角，使同心圆环圆心平移 $\overline{f_i/W} \cdot \tan(2\delta\theta)$ ，通过所述同心圆环的圆心 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ 的平移量计算出转镜转角 $\delta\theta$ 。

在一个实施例中，所述第二步具体包括：先找出所述同心圆环的近似圆心点 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ ，再在近似圆心点附近分别作至少 3 条水平线、至少 3 条垂直线，使所述水平线和垂直线与每个圆环相交形成 2 个线段，在每条线段内求出光电信号极值点位的、细分后包含小数的、以像元平均间距 W 为单位的坐标值。

本发明与现有技术对比的有益效果包括：本发明用法布里-珀罗标准具，产生一组圆锥角规律准确的标准圆锥光束作为参考光束，在物镜焦平面上形成系列同心圆环。采用面阵光电器件的像元细分技术，采集多个圆环、每个圆取多个点域，每个点域含多个像元的信息。对这样大数量、大范围内的像元信号作统计计算，使单个像元的误差影响被充分随机化，能提高圆半径测量的准确度与精密度以及与圆锥轴方位角关联的同心圆环圆心坐标的准确度与精密度，即提高焦距以及转角测量的准确度与精密度。

附图说明

图 1 是本发明所使用的光学器件的结构图；
图 2 是本发明的用法布里-珀罗标准具测量焦距和转角的流程图。

具体实施方式

下面结合具体实施方式并对照附图对本发明作进一步详细说明。应该强调的是，下述说明仅仅是示例性的，而不是为了限制本发明的范围及其应用。
参照以下附图，将描述非限制性和非排他性的实施例，其中相同的附图标记表示相同的部件，除非另外特别说明。

说明书中量的符号、名称及单位见下表

量符号	W	d	λ_0	f	$\theta, \phi; \delta\theta$	n	k_0-i	ε	I_i
量的名称	平均像元间距	标准具间隔	真空波长	物镜焦距	角度;转角	空气折射率	级次整数	级次小数	像元光电信号量值
单位	mm	mm	mm	mm	rad	量纲为 1			量纲为 1
量符号	D, R	x, y	x_0, y_0	u_c	U	U_z/z	s	Re	ν
量的名称	直径, 半径	面阵点坐标	圆心坐标	合成标准不确定度	$p\approx 95\%$ 的扩展不确定度	z 的相对扩展不确定度	标准偏差	有效分辨率	自由度
单位	W	W	W						

下面对本发明再做进一步的详细说明。如图 1、图 2 所示,光源 1 发出已知真空波长为 λ_0 的单色光经过间距为 d 、隔圈为石英玻璃材料、间隔空气折射率为 n 的法布里-珀罗标准具 3,产生干涉级次为整数 K_i 的一组圆锥光束 ($K_i = k_0 - i$, 式中 $i = 0, 1, 2, \dots, i_{\max}$),圆锥光束的半圆锥角为 θ_i 。 θ_i 即圆锥面光束与垂直于标准具出射面的圆锥轴(简称圆锥轴)的夹角。这里 k_0 是标准具出射光束角 θ_i 最小时($i=0$)所对应的整数干涉级次,即 $2dn/\lambda_0 = k_0 + \varepsilon$ 的整数部分, ε 是级次的小数部分, $0 \leq \varepsilon < 1$ 。系列圆锥光束经过半透半反平面镜 4 反射射向平面转镜 5,经转镜 5 反射、再经光轴与圆锥轴平行的被测物镜 6,在焦距为 f 的物镜 6 的焦平面上的面阵光电器件 7 的表面产生一系列直径为 D_i 的同心圆环 8。在光源 1 和法布里-珀罗标准具 3 之间还可设置包含滤光片和漫射片的组合元件 2。

当圆锥轴与物镜光轴平行时,由 M. 波恩与 E. 沃尔夫的著作《光学原理》(科学出版社,1978, P429-444) 中的关系式可得

$$D_i = 2R_i = 2\frac{f}{W} \tan \theta_i = 2\frac{f}{W} \sqrt{\left(\frac{k_0 + \varepsilon}{k_0 - i}\right)^2 - 1} \approx 2\frac{f}{W} \sqrt{\frac{2(i + \varepsilon)}{k_0}} / \left(1 - \frac{3i + \varepsilon}{4k_0}\right) \quad (1)$$

$$\left(\frac{D_i/2}{f/W}\right)^2 = \tan^2 \theta_i = \left(\frac{k_0 + \varepsilon}{k_0 - i}\right)^2 - 1 \approx \frac{2(i + \varepsilon)}{k_0} / \left(1 - \frac{3i + \varepsilon}{2k_0}\right) \quad (2)$$

D_i^2 近似成等差级数。以 $-i$ 为因变量、以 D_i^2 为自变量的近似简化直线方程为

$$-i \approx \tilde{\varepsilon} - \frac{k_0}{8(f/W)^2} D_i^2 \quad (3)$$

对上式模型作直线拟合求出截距 $\tilde{\varepsilon}$, 此即 ε 的近似值。将 $\tilde{\varepsilon}$ 代入下式,以 D_i^2 为因变量、以 $i^* = \left(1 + \frac{1.5i + 2\tilde{\varepsilon}}{k_0} + \frac{2i^2}{k_0^2}\right)i$ 为自变量作加权直线拟合,模型方程为

$$D_i^2 = \frac{8(f/W)^2}{k_0} \varepsilon \left(1 + \frac{\varepsilon}{2k_0}\right) + \frac{8(f/W)^2}{k_0} \left(\left(1 + \frac{1.5i + 2\tilde{\varepsilon}}{k_0} + \frac{2i^2}{k_0^2}\right)i\right) \quad (4)$$

(4) 式的截距 b_0 与斜率 b_1 之比为 $\frac{b_0}{b_1} = \varepsilon \left(1 + \frac{\varepsilon}{2k_0}\right)$, 进而可得小数 ε 的值。

$$\varepsilon = b_0/b_1 \left(1 - \frac{b_0/b_1}{2k_0}\right) \quad (5)$$

计算小数 ε 的标准差 s_ε 。

上述 5 式反映当圆锥轴与物镜光轴平行时直径与锥角分布的规律。设圆锥轴平行与光轴时同心圆环圆心为 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 。当元平行光束与物镜光轴的夹角为 θ_l 时，元平行光束汇聚于焦平面的光点中心 (x_l, y_l) 到圆心点 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 的半径 $R_l = \sqrt{(x_l - \bar{x}_0)^2 + (y_l - \bar{y}_0)^2}$ ， R_l 只与夹角 θ_l 有关， $\theta_l = \arctan\left(\frac{R_l}{f/W}\right)$ 。在以焦平面为中心面的球坐标系中， z 轴垂直于焦平面。当圆锥轴与光轴有夹角 (ϕ_r, θ_r) 时，焦平面上的同心圆环圆心将平移到以 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 为极坐标原点、极坐标为 (ϕ_r, R_r) 的位置， $R_r = (f/W) \tan \theta_r$ 。平面直角坐标为 $x_{0r} = \bar{x}_0 + (f/W) \tan \theta_r \cdot \cos \phi_r$ ， $y_{0r} = \bar{y}_0 + (f/W) \tan \theta_r \cdot \sin \phi_r$ 。可用解析几何算法求出通过物镜像方主点、并和圆锥轴平行的光线与焦平面的交点 $(\bar{x}_{0r}, \bar{y}_{0r})$ 。

按照熊友伦的《精密测量的数学方法》（中国计量出版社，1989，P30）中的最小二乘求圆半径的方法作圆方程回归，能分别得出各个圆的直径 D_i 、 s_{D_i} 及自由度 ν_i 。在同心圆环回归时要用共圆心的约束条件，求出圆心坐标的平均值 $\bar{x}_0$ 、 $\bar{y}_0$ 及其标准差 $s_{\bar{x}_0}$ 、 $s_{\bar{y}_0}$ 。

由 (1) 式可得从单个圆直径 D_i 求 f_i/W 的单步算式

$$f_i/W = \frac{D_i}{2} \sqrt{\left(\frac{k_0 + \varepsilon}{k_0 - i}\right)^2 - 1} \quad (6)$$

由 (1) 式可得 $\sqrt{\left(\frac{k_0 + \varepsilon}{k_0 - i}\right)^2 - 1} \approx \sqrt{\frac{2(i + \varepsilon)}{k_0}}$ ，由式 $f_i/W \approx \frac{D_i}{2} \sqrt{\frac{k_0}{2(i + \varepsilon)}}$ 出发评定 f_i/W

的不确定度。因 $U_{k_0}/k_0 \leq 5 \times 10^{-6}$ ，忽略 k_0 的不确定度影响，可得

$$s_{f_i/W} = (f_i/W) \sqrt{\left(\frac{s_{D_i}}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{0.5s_\varepsilon}{i + \varepsilon}\right)^2} \quad (7)$$

求各个 f_i/W 的加权平均值 $\overline{f_i/W}$ 及其标准差 $s_{\overline{f_i/W}}$ 。

$$\overline{f_i/W} = \sum (f_i/W \cdot s_{f_i/W}^{-2}) / \sum s_{f_i/W}^{-2} \quad (8)$$

焦距的最佳估值为

$$f = W \cdot \overline{f_i/W} \quad (9)$$

f 的相对扩展不确定度为

$$\frac{U_f}{f} = t \cdot \frac{u_{c,f}}{f} = t \cdot \sqrt{\left(\frac{s_{f_i/W}}{f_i/W}\right)^2 + \left(\frac{U_W}{\sqrt{3}W}\right)^2 + \left(\frac{U_{fad}}{\sqrt{3}f}\right)^2} \quad (10)$$

上式中的 U_{fad} 是调焦的扩展不确定度的估值。确定 U_{fad} 时通常由取聚焦点极小值的判定误差限来导出。上式中的 t 是 t 分布因子。本发明中，由于在点域坐标细分时能使细分后坐标标准差小于 $0.1W$ ，也能同时求出圆环条纹分布线型的半峰值半宽度 HWHM，其有效分辨率一般能小于 $0.04W$ 。由于物镜孔径通常大于 30mm ， $W < 5\text{ }\mu\text{m}$ ，当物镜焦距 $f \geq 50\text{mm}$ 时不难做到使 $\frac{U_{fad}}{\sqrt{3}f} \leq 1 \times 10^{-4}$ 。

平面转镜转动角度 $(\phi_r, \delta\theta)$ 时，将使入射向物镜的圆锥光束的圆锥轴在 ϕ_r 方向转过 $\theta_r = 2\delta\theta$ 。通过物镜像方主点、并且和圆锥轴平行的光线与焦平面的相交点坐标为 $(\bar{x}_{0r}, \bar{y}_{0r})$ ，此即转镜转动后的准同心圆环圆心。设圆锥轴与物镜光轴平行时的同心圆环圆心为 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 。两维转角的大小与方向分别由同心圆环圆心的两维坐标平移量求出。转动前后焦平面上同心圆环圆心的位移量值为 $R_{0r} = \sqrt{(\bar{x}_{0r} - \bar{x}_0)^2 + (\bar{y}_{0r} - \bar{y}_0)^2}$ ，转角 $\delta\theta$ 为

$$\delta\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{R_{0r}}{f_i/W} = \frac{1}{2} \arctan \frac{R_{0r}}{f_i/W} \quad (11)$$

将 (8) 式结果的 $\overline{f_i/W}$ 代入作计算，本质上是用比较测量法，焦距误差与调焦误差这两个因素的影响被减消了大部分。其中转镜的一维转角为

$$\delta\theta_x = \frac{1}{2} \arctan \frac{\bar{x}_{0r} - \bar{x}_0}{f_i/W} \quad (12)$$

一维转角 $\delta\theta_x$ 的标准不确定度评定时只需计算以下两个分量项： $(\bar{x}_{0r} - \bar{x}_0)$ 的

标准差及 $s_{\overline{f_i/W}}$ 。通常 $|\delta\theta_X| < 0.05 \text{ rad}$, $(\bar{x}_{0r} - \bar{x}_0)$ 的标准差近似为 $\sqrt{2}s_{\bar{x}_0}$ 。因为独立分量标准差合成时 $\sqrt{s_{z1}^2 + s_{z2}^2} < s_{z1} + s_{z2}$, 稍加放大后可将 $\delta\theta_X$ 的不确定度 $U(\delta\theta_X)$ 写成如下形式

$$U(\delta\theta_X) \approx c_0 + c_1 |\delta\theta_X| = t_\nu \frac{\sqrt{2}s_{\bar{x}_0}}{2f_i/W} + \left(t_{\nu_{\text{eff}}} \frac{s_{\overline{f_i/W}}}{f_i/W} \right) \cdot |\delta\theta_X| \quad (13)$$

式中 t 是 t 分布因子, ν 是求 $s_{\bar{x}_0}$ 时的自由度, ν_{eff} 是按照《测量不确定度评定指南》中案例方法计算的有效自由度。将 $0.2c_0$ 作为一维转角的有效分辨率 $R_e(\delta\theta_X)$

$$R_e(\delta\theta_X) \approx 0.2c_0 \quad (14)$$

总转角 $U(\delta\theta)$ 的加和分量为 $c_0 = t_\nu \frac{\sqrt{2}\sqrt{s_{\bar{x}_0}^2 + s_{\bar{y}_0}^2}}{2f_i/W}$, 倍率分量系数 c_1 同 (13) 式。

下面通过一个具体例子对本发明做进一步说明。测量仪器与条件参量为: 汞灯黄线波长 $\lambda_{01} = 577.11984 \times 10^{-6} \text{ mm}$, $\lambda_{01}/n = 576.95981 \times 10^{-6} \text{ mm}$ 。标准具的间隔 $d = 2.032\ 056\ 2 \text{ mm}$, 物镜焦距 $\tilde{f} \approx 70.8 \text{ mm}$, $W \approx 0.004\ 70 \text{ mm}$, $k_0 = 7044$ 。

下表中列出了测量得到圆锥轴与物镜光轴平行时的 9 个连续的同心圆环参量, 每圆环用 20 点作圆回归。用后 8 组数据求出的焦距、圆心加权平均值也列于表中。

i	D	S_D	x_0	y_0	s_{x_0}	s_{y_0}	f_i/W	$s_{f_i/W}$
2	720.735	0.023	1369.291	1842.990	0.015	0.015	15069.988	3.710
3	882.573	0.030	1369.187	1843.012	0.021	0.021	15082.313	2.481
4	1018.205	0.049	1369.220	1842.958	0.035	0.035	15075.567	1.862
5	1138.021	0.020	1369.176	1842.974	0.014	0.014	15074.026	1.490
6	1246.494	0.028	1369.180	1842.971	0.020	0.020	15073.956	1.243
7	1346.182	0.041	1369.213	1842.947	0.029	0.029	15072.616	1.066
8	1439.422	0.049	1369.152	1842.897	0.034	0.034	15075.839	0.934
9	1526.631	0.024	1369.140	1842.933	0.017	0.017	15074.552	0.829
10	1609.290	0.075	1369.121	1842.881	0.053	0.053	15074.790	0.750
后 8 组加权平均			$\bar{x}_0$	$\bar{y}_0$	$s_{\bar{x}_0}$	$s_{\bar{y}_0}$	$\overline{f_i/W}$	$s_{\overline{f_i/W}}$
			1369.173	1842.961	0.0084	0.0108	15074.67	0.50

加温度测量部件后,对面阵成像器件基片温度估计的误差限可达 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,参考温度下像元平均间距 W 测量的最大允许误差估计为 $\pm 3 \times 10^{-5}$, W 的相对不确定度估计约为 $U_W/W \approx 5 \times 10^{-5}$,调焦不确定度一般不大于 $U_{f\text{ad}}/f \leq 1.7 \times 10^{-4}$

由(10)式可得

$$\frac{U_f}{f} \approx t \sqrt{\left(\frac{s_{f_i/W}}{f_i/W}\right)^2 + \left(\frac{U_W}{\sqrt{3}W}\right)^2 + \left(\frac{U_{f\text{ad}}}{\sqrt{3}f}\right)^2} \approx 2 \sqrt{\left(\frac{0.5}{15075}\right)^2 + \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{1.73}\right)^2 + (10^{-4})^2} \approx 2.3 \times 10^{-4}$$

该例说明:所用焦距 $f \approx 70\text{mm}$ 时,已经能使焦距的相对扩展不确定度小于 3×10^{-4} 。

按(13)式计算一维转角测量不确定度 $U(\delta\theta_x)$ 的两个分量

$$U(\delta\theta_x) \text{ 的加和分量 } c_0 = t_v \frac{0.71 \cdot s_{\bar{x}_0}}{\tilde{f}/W} = 2.36 \times \frac{0.71 \times 0.084}{15075.6} = 9.3 \times 10^{-7} \text{ rad} \approx 0.19''$$

$$\text{倍率分量系数 } c_1 = t_{v\text{eff}} \left(\frac{s_{f_i/W}}{f_i/W} \right) < 1 \times 10^{-4},$$

有效分辨率 $R_e(\delta\theta_x) \approx 0.2c_0 \approx 0.04''$ 。

加和分量 $c_0 = t_v \frac{0.71 \cdot s_{\bar{x}_0}}{\tilde{f}/W}$ 随着焦距的增加而减小。不难推论:当实施例的

$\tilde{f} \approx 70\text{mm}$ 增加到 500mm 时,加和分量 c_0 将减小到 $0.05''$ 以下,有效分辨率将达到 $0.01''$ 以下。

用真空波长相对不确定度 $U_{\lambda_0}/\lambda_0 \leq 2 \times 10^{-7}$ 的单色光经法布里-珀罗标准具透射,产生一组干涉级次为整数 K_i 、圆锥角 θ_i 的标准圆锥光束。光束经半透半反平面镜反射射向平面转镜,经平面转镜反射,再经过焦距为 f 的物镜,在位于其焦平面的面阵光电器件表面产生一组同心圆环。由同心圆环圆心 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 的位移量计算出转镜转角 $\delta\theta$ 。

石英间隔圈的法布里-珀罗标准具间隔 d 的稳定性和光束圆锥角规律的准确性,能保证测量转角 $\delta\theta$ 方法的可溯源性,同时为使转角测量的扩展不确定度 $U_{\delta\theta} = c_0 + c_1\delta\theta$ 中的倍率分量系数 $c_1 \leq 2 \times 10^{-4}$ 创造了条件。产生一系列倾斜角规律

准确度高、中心轴重复性高的已知标准光束，能减小焦距不确定度 U_f/f 对转角 $\delta\theta$ 的不确定度 $U_{\delta\theta}$ 的影响，为降低 $U_{\delta\theta} = c_0 + c_1\delta\theta$ 中的两个分量的量值创造条件。

按一定规律选取各圆环上的多个点域，具体做法是：对面阵光电器件采集的同心环信号，先找出近似圆心点 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ ，再在近似圆心附近分别作 3~5 条或更多的水平线，例如使 $(y_j - \tilde{y}_0)/W \approx \pm 0.2B, \pm 0.6B, \pm B$ ，再作 3~5 条或更多的垂直线，例如使 $(x_j - \tilde{x}_0)/W \approx \pm 0.2B, \pm 0.6B, \pm B$ 。这里 W 是平均像元间距。要求使 $B < 2\% D_{10}$ ， D_{10} 是由内而外 $i=10$ 的第 11 个圆环直径。通常有 $D_{10} > 1600W$ 。例如取 $B=30$ 时，如果圆心位于坐标原点，圆环上点的未细分的某坐标值由 $30W$ 改变至 $(30 \pm 0.5)W$ ，内圆 $D_2 \approx 720W$ 的圆半径的最大变化不超过 $\pm 0.042W$ ，这就是能用一维的光电信号极值点位像元坐标细分方法来高速地简化处理二维面阵信息的原因，因为锐角直角三角形斜边长度对短直角边长的变化不敏感。

对各个点域内（线段上）的某一维像元作细分计算，细分方法分三步。

(1) 删除过小信号以降噪并使计算简化。对线段上的连续像元信号（或 ± 45 度线段两侧两个像元角点重合于线段上的对称像元的信号均值），记像元信号峰值为 I_M ，保留峰值像元两侧 8~18 个连续像元；以这些像元信号 I_i 的函数 $Z_i = \frac{I_M}{I_i} - 1$ 为因变量、以像元序号 i （或对应值）及其平方 i^2 为自变量作二次回归；基本模型式为 $Z_i = b_0 + b_1i + b_2i^2$ 。

(2) 调和加权回归。由于因变量 Z_i 的标准差估值 $s_{Z_i} \propto s_{I_i} I_i^{-2}$ 变动大，常规权因子为 $w_i \propto s_{Z_i}^{-2} \propto s_{I_i}^2 \cdot I_i^4$ ，采用调和的加权二次回归， Z_i 的相对权因子取 $w_i^* \approx s_{I_i}^{2\beta} \cdot I_i^{2\alpha}$ ，这里 α 取 0.5~1.8 的数， β 取 -1~0 的数。标准具细度较小时 (α, β) 典型值为 (1, 0)，细度较大时典型值为 (1, -1)，介于等权因子 (0, 0) 与一般加权因子 (2, -1) 之间。回归方程为 $\sqrt{w_i^*} Z_i = b_0 \sqrt{w_i^*} + b_1 (i \sqrt{w_i^*}) + b_2 (i^2 \sqrt{w_i^*})$ 。

(3) 由回归所得系数 b_1, b_2 求出细分后极值点位坐标为 $x_j^* = \frac{-b_1}{2b_2}$ 。

平行于 Y 轴的点域内按类似方法定出整数像元坐标 x_j 及细分后坐标 y_j^* 。对

多个圆环（一般不少于 8 个）、同一圆环上用不少于 24 点的 (x_j^*, y_j) 、 (x_j, y_j^*) 等坐标值，作有同心约束的圆方程回归，求出各同心圆环的直径 D_i 及其标准差 s_{D_i} ，同时求出圆心坐标平均值 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 及其标准差 $s_{\bar{x}_0}$ 、 $s_{\bar{y}_0}$ 。

$\pm 45^\circ$ 度的点域内（线段上）信号处理方法也与上述类似，可以看作是坐标旋转 45° 后的新的平行于轴向的数据。对角线与线段重合的相邻像元间距为 $\sqrt{2}w$ 。如果内插入半整数序号的等效像元，光电信号取线段两侧的、像元角点重合于线段上的两对称像元的信号平均值，就会使 $\pm 45^\circ$ 度线段上的等效像元数增加一倍，相邻等效像元的间距减小到 $w/\sqrt{2}$ 。 $\pm 45^\circ$ 度线段上的细分后峰位点的坐标要经过平面几何计算，转化成直角坐标系中的值，再参与圆回归计算。

由于有 50% 的点坐标值经过用多个相邻像元量值的细分计算，用多个圆、每个圆用多个点作回归计算，参与坐标细分计算的原始像元数目大于 1.5×10^3 ，并且这些像元散布在面阵光电器件的很大范围内，就能使单个像元的几何误差与光电转换误差被充分随机化，使统计计算后圆心坐标的标准差 $s_{\bar{x}_0}$ 、 $s_{\bar{y}_0}$ 降低到 0.02 w 以下，也使圆直径平方 D^2 的标准差 s_{D^2} 减小到细分前的 1/3 以下。

本发明用法布里-珀罗标准具，产生一组圆锥角标准的圆锥光束作为参考光束，在物镜焦平面上形成系列同心圆环。采用面阵光电器件的像元细分技术对光电信号极值点坐标细分，采集多个圆环、每个圆取多个点域，每个点域含多个像元的信息。对这样大数量、大范围内的像元信号作统计计算，使单个像元的误差影响被充分随机化，能提高圆半径测量的准确度与精密度以及与圆锥轴方位角关联的同心圆环圆心坐标的准确度与精密度，即提高焦距以及转角测量的准确度与精密度。

本发明中的角度量值溯源到光谱灯单色光波长 λ_0 及标准具间隔 d ，已知 $U_{\lambda_0}/\lambda_0 \leq 2 \times 10^{-7}$ ，能较方便地用小数重合法测量并控制使 $U_d/d \leq 5 \times 10^{-6}$ ，进而使采用本发明方法的小角度测量仪器具有可溯源性和便于定度或检定的优点。

可溯源的焦距测量不确定度比已有典型方法的不确定度 $U_f/f \approx 2.5 \times 10^{-3}$ 减少到 40% 以下。光电信号极值点像元坐标细分技术同时为减少调焦误差限及调焦

自动化创造了条件。

以往多数光电自准直仪的测量线性度和测角准确度受物镜焦距不确定度制约，本发明中的（8）式到（9）式，用比较测量方法避开了这一难点，能使可溯源的转角不确定度中的倍率分量系数比常规仪器减小到 $2/5$ 以下。用单一光学系统及单一面阵光电接收器件实现二维转角的同时测量，也是本发明的优点之一。

用法布里-珀罗标准具与信号极值点位像元坐标细分技术准确测定焦距后，进而用一维的线阵 CCD 器件测量一维转镜反射光束偏转角，能实现非线性相对误差限小于 0.01% 的光束偏转角的高有效分辨率的准静态或动态测量。

本领域技术人员将认识到，对以上描述做出众多变通是可能的，所以实施例仅是用来描述一个或多个特定实施方式。

尽管已经描述和叙述了被看作本发明的示范实施例，本领域技术人员将会明白，可以对其作出各种改变和替换，而不会脱离本发明的精神。另外，可以做出许多修改以将特定情况适配到本发明的教义，而不会脱离在此描述的本发明中心概念。所以，本发明不受限于在此披露的特定实施例，但本发明可能还包括属于本发明范围的所有实施例及其等同物。

1.一种用法布里-珀罗标准具测量焦距的方法，其特征在于：包括如下步骤：

第一步：用单色光经法布里-珀罗标准具透射，产生一组圆锥角 θ_i 规律准确的标准圆锥光束，所述圆锥光束经半透半反平面镜反射到转镜，经转镜反射后透过半透半反镜，再经过物镜，在位于所述物镜的焦平面的面阵光电器件表面形成一组同心圆环；

第二步：在各圆环上选取多个点域，对各个点域内的一维像元作细分；

第三步：由所述圆锥光束的同心圆环直径 D_i 及其标准差 s_{D_i} ，按圆锥角 θ_i 分布规律由 $D_i = 2(f_i/W) \tan \theta_i$ 求出 f_i/W ， f_i/W 是由单个圆直径 D_i 算出的焦距 f_i 与所述面阵光电器件的平均像元间距 W 的比值，进而求出 f_i/W 的加权平均值 $\overline{f_i/W}$ ，以得出被测焦距 f 。

2.如权利要求1所述的测量焦距的方法，其特征在于：所述第二步具体包括：先找出所述同心圆环的近似圆心点 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ ，再在近似圆心点附近分别作至少3条水平线、至少3条垂直线和方位角是 $\pm 45^\circ$ 的至少各3条平行斜线，使所述每条水平线、垂直线或 $\pm 45^\circ$ 度线与每个圆环相交形成2个线段，在每条线段上运用光电信号极值点位像元坐标细分方法，求出包含小数的、以像元平均间距 W 或 $W/\sqrt{2}$ 为单位的坐标值。

3.如权利要求2所述的测量焦距的方法，其特征在于：所述的光电信号极值点位像元坐标细分方法包括如下步骤：对线段上的连续像元信号，或 $\pm 45^\circ$ 度线段两侧两个像元角点重合于线段上的对称像元的信号均值，记像元信号峰值为 I_M ，保留峰值像元两侧8~18个连续像元，含峰值；以这些像元信号 I_i 的函数 $Z_i = \frac{I_M}{I_i} - 1$ 为因变量、以像元序号 i 或对应值及其平方 i^2 为自变量作二次回归；由于 Z_i 的标准差估值 s_{Z_i} 变动大，采用调和的加权二次回归， Z_i 的相对权因子取 $w_i^* \approx s_{I_i}^{2\beta} \cdot I_i^{2\alpha}$ ，这里 α 取0.5~1.8的数， β 取-1~0的数。标准具细度较小时 (α, β) 典型值为 $(1, 0)$ ，细度较大时典型值为 $(1, -1)$ ，介于等权因子 $(0, 0)$ 与一般加权因子 $(2, -1)$ 之

间。回归方程为 $\sqrt{w_i^*} Z_i = b_0 \sqrt{w_i^*} + b_1 (i \sqrt{w_i^*}) + b_2 (i^2 \sqrt{w_i^*})$ 。细分后极值点位坐标为 $\frac{-b_1}{2b_2}$ 。

4.一种用法布里-珀罗标准具测量转角的方法，其特征在于：包括如下步骤：

第一步：用单色光经法布里-珀罗标准具透射，产生一组圆锥角 θ_i 规律准确的标准圆锥光束，所述圆锥光束经半透半反平面镜反射到转镜，经转镜反射后透过半透半反镜，再经过物镜，在位于所述物镜的焦平面的面阵光电器件表面形成一组同心圆环；

第二步：在各圆环上选取多个点域，对各个点域内的一维像元作细分；

第三步：由所述圆锥光束的同心圆环直径 D_i 及其标准差 s_{D_i} ，按圆锥角 θ_i 分布规律由 $D_i = 2(f_i/W) \tan \theta_i$ 求出 f_i/W ， f_i/W 是由单个圆直径 D_i 算出的焦距 f_i 与所述面阵光电器件的平均像元间距 W 的比值，进而求出 f_i/W 的加权平均值 $\overline{f_i/W}$ ；

第四步：根据转镜产生转角 $\delta \theta$ 后，入射向物镜的圆锥光束中心轴将转过 $2 \delta \theta$ 角，使同心圆环圆心平移 $\overline{f_i/W} \cdot \tan(2\delta \theta)$ ，通过所述同心圆环的圆心 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 的平移量计算出转镜转角 $\delta \theta$ 。

5.如权利要求4所述的测量转角的方法，其特征在于：所述第二步具体包括：先找出所述同心圆环的近似圆心点 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ ，再在近似圆心点附近分别作至少3条水平线、至少3条垂直线和方位角是 ± 45 度的至少各3条平行斜线，使所述每条水平线、垂直线或 ± 45 度线与每个圆环相交形成2个线段，在每条线段上运用光电信号极值点位像元坐标细分方法，求出包含小数的、以像元平均间距 W 或 $W/\sqrt{2}$ 为单位的坐标值。

6.如权利要求5所述的测量转角的方法，其特征在于：所述的光电信号极值点位像元坐标细分方法包括如下步骤：对线段上的连续像元信号，或 ± 45 度线段两侧两个像元角点重合于线段上的对称像元的信号均值，记像元信号峰值为 I_M ，保留峰值像元两侧8~18个连续像元，含峰值；以这些像元信号 I_i 的函数 $Z_i = \frac{I_M}{I_i} - 1$ 为因变量、以像元序号 i 或对应值及其平方 i^2 为自变量作二次回归；由于 Z_i 的标

准差估值 s_{Z_i} 变动大, 采用调和的加权二次回归, Z_i 的相对权因子取 $w_i^* \approx s_{I_i}^{2\beta} \cdot I_i^{2\alpha}$, 这里 α 取 0.5~1.8 的数, β 取 -1~0 的数。标准具细度较小时 (α, β) 典型值为 $(1, 0)$, 细度较大时典型值为 $(1, -1)$, 介于等权因子 $(0, 0)$ 与一般加权因子 $(2, -1)$ 之间。回归方程为 $\sqrt{w_i^*} Z_i = b_0 \sqrt{w_i^*} + b_1 \left(i \sqrt{w_i^*} \right) + b_2 \left(i^2 \sqrt{w_i^*} \right)$ 。细分后极值点位坐标为 $\frac{-b_1}{2b_2}$ 。

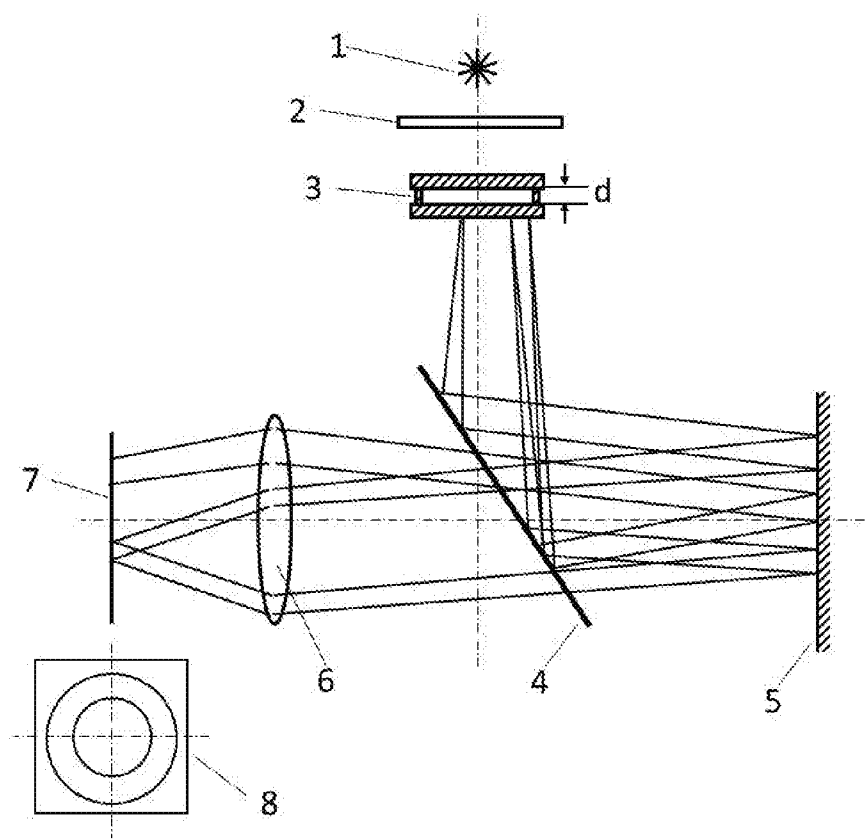


图 1

用单色光(如 Hg 灯双黄线, 真空波长 $\lambda_{01}=577.11984 \times 10^{-6} \text{ mm}$, $\lambda_{02}=579.22684 \times 10^{-6} \text{ mm}$) 经过法布里-珀罗标准具产生圆锥角 θ_i 的规律准确已知的系列圆锥光束。光束经平面转镜反射, 再入射到焦距为 f 的物镜, 在置于焦平面的面阵成像器件上产生系列同心圆环。由标准具间距 d 、空气折射率 n , 计算与 $\lambda_{01}, \lambda_{02}$ 对应的最小圆环干涉级次整数 k_{01}, k_{02} 。



调整圆锥轴与物镜光轴平行并调焦后, 摄取系列圆环图, 读取二维坐标及对应的光电信号值。按规则选取 3-5 (或更多) 对平行于水平、垂直轴的正交直线, 以及 ± 45 度方向的多对正交线, 定出正交线与各圆环相交的点域(短线段)。各线段上用光电信号极值点位像元坐标细分方法, 定出极值点位细分后坐标值。对各圆上的点坐标作圆方程回归, 求出系列圆的直径 D_i 及其标准差 s_{D_i} 、圆心坐标平均值 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 及其标准差 $(s_{\bar{x}_0}, s_{\bar{y}_0})$ 。下标取 $i=2, 3, \dots, i_{\max}$ 或 $i=3, 4, \dots, i_{\max}$ 。



求干涉级次小数 ε 。以 i 为因变量、以 D_i^2 为自变量直线拟合, 所得截距为 ε 的近似值 $\tilde{\varepsilon}$ 。再以 D_i^2 为因变量、以 $i^* = \left(1 + \frac{1.5i + 2\tilde{\varepsilon}}{k_0} + \frac{2i^2}{k_0^2}\right)i$ 为自变量直线拟合, 所得截距 b_0 与斜率 b_1 之比为 $\frac{b_0}{b_1} = \varepsilon \left(1 + \frac{\varepsilon}{2k_0}\right)$, 可得干涉级次小数 $\varepsilon = b_0/b_1 \left(1 - \frac{b_0/b_1}{2k_0}\right)$ 。同时可算出 s_ε 。

↓ 测焦距

测转角 ↓

从单个圆直径 D_i 求 f_i/W 及其标准差

$s_{f_i/W}$

$$f_i/W = \frac{D_i}{2} \sqrt{\left(\frac{k_0 + \varepsilon}{k_0 - i}\right)^2 - 1}$$

$$s_{f_i/W} = (f_i/W) \sqrt{\left(\frac{s_{D_i}}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{0.5s_\varepsilon}{i + \varepsilon}\right)^2}$$



由 f_i/W 及其标准差 $s_{f_i/W}$ 作加权平均, 得平均值 $\overline{f_i/W}$ 及其标准差 $s_{\overline{f_i/W}}$ 。

输入平均像元间距 W 及其不确定度 U_W 。焦距的最佳估值为

$$f = W \cdot \overline{f_i/W}$$



输入调焦的扩展不确定度估值

$U_{f \text{ ad}}$ 。焦距不确定度为

$$\frac{U_f}{f} = t \cdot \frac{u_{c/f}}{f} = t \cdot \sqrt{\left(\frac{s_{\overline{f_i/W}}}{\overline{f_i/W}}\right)^2 + \left(\frac{U_W}{\sqrt{3}W}\right)^2 + \left(\frac{U_{f \text{ ad}}}{\sqrt{3}f}\right)^2}$$

平面转镜转过小角度 $\delta\theta$ 后, 入射到物镜的光束圆锥轴转过角度为 $2\delta\theta$ 。同心圆圆心由 $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 平移到了 $(\bar{x}_{0r}, \bar{y}_{0r})$ 点。

计算新圆心坐标 $(\bar{x}_{0r}, \bar{y}_{0r})$ 及圆心位移量 $R_{0r} = \sqrt{(\bar{x}_{0r} - \bar{x}_0)^2 + (\bar{y}_{0r} - \bar{y}_0)^2}$



将 $\overline{f_i/W}$ 代入 $\tan(2\delta\theta) = \frac{R_{0r}}{f_i/W}$ 得

$$\delta\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{R_{0r}}{\overline{f_i/W}}\right)$$

一维转角 $\delta\theta_x$ 为 $\delta\theta_x = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\bar{x}_{0r} - \bar{x}_0}{\overline{f_i/W}}\right)$



一维转角的不确定度

$$U(\delta\theta_x) = c_0 + c_1 \cdot |\delta\theta_x|$$

$$= t_v \frac{\sqrt{2} s_{\bar{x}_0}}{2 \overline{f_i/W}} + \left(t_{v \text{ eff}} \frac{s_{\overline{f_i/W}}}{\overline{f_i/W}}\right) \cdot |\delta\theta_x|$$

式中 c_0 为加和分量, c_1 为倍率分量系数。有效分辨率 $R_e(\delta\theta_x) \approx 0.2c_0$ 。

图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/078164

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01M 11/02 (2006.01) i; G01B 11/26 (2006.01) i
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01M 11/-; G01B 11/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: tsinghua university, zhu henian, xiao zhigang, guo xubo, chen qiang, chang ying, fabry, perot, interfere+,
fringe?, concentric, homocentric, circle, ring?, focus, focal, distance, length, angle, inclination

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 104165758 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 26 November 2014 (26.11.2014) description, paragraphs [0051]-[0090], and figures 1-4	1-3
A	JP 2009145051 A (OPCELL CO., LTD.) 02 July 2009 (02.07.2009) description, paragraphs [0010]-[0012], and figure 1	4-6
A	CN 201463847 U (HUBEI TECHNOLOGY UNIVERSITY) 12 May 2010 (12.05.2010) the whole document	1-6
A	TW 200949192 A (NATIONAL YUNLIN UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 01 December 2009 (01.12.2009) the whole document	1-6
A	CN 103398799 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 20 November 2013 (20.11.2013) the whole document	1-6
A	CN 104111163 A (SHANGHAI INSTITUTE OF OPTICS AND FINE MECHANICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCE) 22 October 2014 (22.10.2014) the whole document	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 18 May 2016	Date of mailing of the international search report 07 June 2016
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer SUN, Xueting Telephone No. (86-10) 82245897

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2016/078164

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104165758 A	26 November 2014	None	
JP 2009145051 A	02 July 2009	JP 5305281 B2	02 October 2013
CN 201463847 U	12 May 2010	None	
TW 200949192 A	01 December 2009	TWI 366658 B1	21 June 2012
CN 103398799 A	20 November 2013	CN 103398799 B	20 January 2016
CN 104111163 A	22 October 2014	None	

A. 主题的分类 G01M 11/02 (2006.01) i; G01B 11/26 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01M 11/-; G01B 11/- 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC: 清华大学, 朱鹤年, 肖志刚, 郭旭波, 陈强, 常纓, 法布里, 珀罗, 法珀, 干涉, 条纹, 同心, 圆, 焦距, 角度, 转角, fabry, perot, interfere+, fringe?, concentric, homocentric, circle, ring?, focus, focal, distance, length, angle, inclination		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 104165758 A (南京理工大学) 2014年 11月 26日 (2014 - 11 - 26) 说明书第【0051】-【0090】段、附图1-4	1-3
A	JP 2009145051 A (OPCELL CO., LTD.) 2009年 7月 2日 (2009 - 07 - 02) 说明书第【0010】-【0012】段、附图1	4-6
A	CN 201463847 U (湖北工业大学) 2010年 5月 12日 (2010 - 05 - 12) 全文	1-6
A	TW 200949192 A (國立雲林科技大學) 2009年 12月 1日 (2009 - 12 - 01) 全文	1-6
A	CN 103398799 A (华中科技大学) 2013年 11月 20日 (2013 - 11 - 20) 全文	1-6
A	CN 104111163 A (中国科学院上海光学精密机械研究所) 2014年 10月 22日 (2014 - 10 - 22) 全文	1-6
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2016年 5月 18日		国际检索报告邮寄日期 2016年 6月 7日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		授权官员 孙雪婷 电话号码 (86-10) 82245897

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/078164

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	104165758	A	2014年 11月 26日	无	
JP	2009145051	A	2009年 7月 2日	JP 5305281 B2	2013年 10月 2日
CN	201463847	U	2010年 5月 12日	无	
TW	200949192	A	2009年 12月 1日	TW I366658 B1	2012年 6月 21日
CN	103398799	A	2013年 11月 20日	CN 103398799 B	2016年 1月 20日
CN	104111163	A	2014年 10月 22日	无	