

文章编号: 1002-3806(2004)03-0262-04

## 二维光学扫描中扫描角度非线性研究

杨志卿, 吴登喜, 郑永超

(中原电子技术研究所, 郑州 450005)

摘要: 分析了二维光学扫描角度非线性产生的原因, 给出了二维扫描中仰角、方位角、垂直角方程的数学推导, 对二维扫描的非线性进行了分析, 讨论了非线性对角度跟踪和扫描成像等应用中的性能的影响, 指出非线性修正的方法。

关键词: 激光扫描; 二维扫描; 扫描角度; 非线性

中图分类号: TN820.2 文献标识码: A

### Study of angular nonlinearity in 2D optical scanning

YANG Zhiqing, WU Dengxi, ZHEN Yongchao

(Zhong Yuan Institute of Electronics Technology, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: The reasons of angular nonlinearity in 2D optical scanner are analyzed. Equations of angular of elevation, azimuth and vertical in 2D scanning are demonstrated. Scanning nonlinearity is analyzed. Its influence on angular tracking and scanning imaging is discussed. Method of correction is pointed out.

Key words: laser scanning; 2D scanning; scanning angular; nonlinearity

### 引 言

在激光成像雷达中, 经常需要用到光学扫描器。光学扫描器的种类很多, 如转鼓扫描、摆镜扫描、旋转光楔扫描、全息光栅扫描、声光偏转扫描等。其中, 摆镜扫描是最简单、最基本的一种扫描方式, 它的特点是负载很轻、转动惯量小、扫描速度快, 扫描方式灵活, 既可以以光栅方式扫描 (raster), 又可以以矢量方式扫描 (vector), 还具有指向功能 (point)<sup>[1]</sup>, 定位精度很高, 一般可以达到 50Rad(10d) 以内。因此, 这种光学扫描器在对目标扫描成像、跟踪、目标指向定位等应用中具有广泛的用途。

激光扫描角度通常通过电机的角度编码器获得。在理想情况下, 反射式扫描的光学扫描角度是机械扫描角度的两倍。通过机械角的测量计算激光实际扫描角度及精确位置。在一维扫描中, 总能得到这种理想的角度关系。但在由两只扫描镜组成的二维扫描器中, 由于光束反射的固有特性, 这种理想的角度关系发生变化, 光学扫描角度出现了非线性。

作者简介: 杨志卿 (1970), 男, 硕士, 高级工程师, 现主要从事激光雷达、光电系统研究工作。

E-mail: yangzhiqing@sohu.com

收稿日期: 2003-06-11; 收到修改稿日期: 2003-12-02

这种非线性特性对于角度跟踪应用中引起的畸变, 与扫描成像中的畸变特性<sup>[2,3]</sup>是不同的。下面对扫描角度的非线性产生的原因、非线性的特点进行分析, 以便对角度非线性引起的畸变进行校正。

### 1 扫描非线性产生的原因

#### 1.1 一维扫描

根据光线反射原理, 当入射光线与反射镜的转轴垂直时, 光束转动的光学角度  $H_o$  始终为反射镜转动的机械角度  $H_m$  的两倍。如图 1 所示, M 为反射

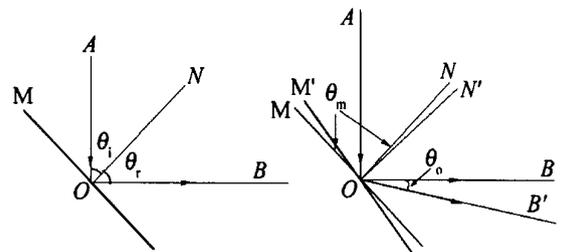


Fig 1 Schematic of optical scanning angle

镜, ON 为其法线, 法线 ON 垂直于反射镜 M。光线入射角为  $H_i$ , 反射角为  $H_r$ , 根据光线反射原理, 入射角等于反射角,  $H_i = H_r$ 。当反射镜 M 旋转一定的角度  $H_m$ , 到达  $OM_c$  位置时, 其法线 ON 也旋转同样  $H_m$  角度到达  $ON_c$  位置。反射光线扫过的角度为:  $H_o = \angle NOB_c$ 。根据反射角 = 入射角,  $\angle NN_c OB_c =$

NAONc, 即:  $H + H_m = NNcOB + H_b$ 。又因为  $NNcOB = H - H_m = H - H_b$ , 所以  $H_b = 2H_m$ 。由此得到, 反射光线扫描角度始终是反射镜旋转角度的两倍。该扫描是线性扫描。

当入射光线与反射镜的转轴不垂直时, 光学扫描角度与机械扫描角度的关系将出现非线性。详细计算公式见下一小节二维扫描结果。但当偏离角度很小时(主要由轴向安装误差引起, 偏离角小于  $1b$ ), 所引起的非线性很小, 可以忽略不计。所以一般情况下二维扫描能够保证较好的线性度。当偏离垂直位置角度较大时, 扫描的角度非线性也变大, 同时带有横向偏移, 即扫描线弯曲。

1.2 二维扫描

为了实现对二维空域的扫描, 通常由两只扫描电机组成二维扫描器, 分别沿俯仰、方位方向扫描。当入射光线垂直入射到第 1 只扫描镜上时, 反射后的光学扫描角度始终等于机械转动角度的两倍。扫描是线性的。当此反射光线入射到第 2 只扫描镜时, 不能保证入射光线始终与扫描镜转轴垂直, 这是扫描角度产生了非线性, 出现角度畸变。而且随着角度大小不同, 畸变量也不一样。这种非线性关系可以通过严格的几何光学计算得到。

如图 2 所示, 在直角坐标系  $xyz$  中, 第 1 只扫描镜  $M_1$  与  $z$  轴平行并沿与  $z$  轴平行的轴线旋转,  $PM$  为扫描镜  $M_1$  的法线。第 2 只扫描镜  $M_2$  与  $x$  轴平行, 沿  $x$  轴旋转,  $ON$  为  $M_2$  的法线。入射光线  $CP$  沿垂直于  $M_1$  的转轴方向入射, 反射后沿  $PO$  方向入射到扫描镜  $M_2$  上,  $OQ$  为第 2 次反射光线。反射光线  $OQ$  在水平面  $xOz$  和铅垂面  $yOz$  上的投影分别为  $OH, OG$ 。  $PLOAFNDB$  为长方体。

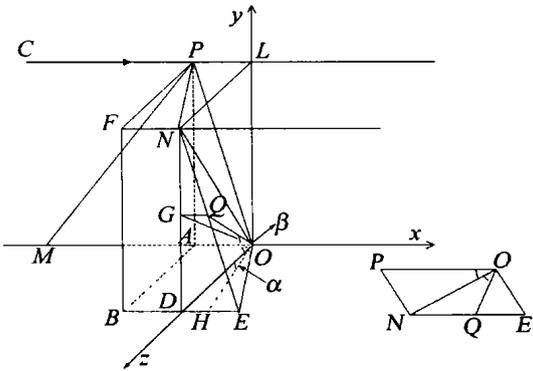


Fig. 2 2D scanning schematic

设  $NQCH = B, NHOD = A, NGOD = H$ 。根据仰角、方位角定义,  $B$  为仰角,  $A$  为方位角,  $H$  称为垂直角。设  $H_1$  为扫描镜  $M_1$  扫描的机械角度,  $H_2$  为扫描镜  $M_2$  扫描的机械角度。四边形  $OPNE$  为入射光

线、反射光线及反射镜法线组成的平面。

根据光线反射原理, 则有  $NOPA = 2H, NLON = 45b - H_1, H_1 = H_2 = NNCP = NNOQ$ , 根据  $\cos(NNOP) = \frac{ON^2 + OP^2 - NP^2}{2ON \cdot OP}$ , 计算得到  $\cos(H) = \cos(2H_1) @ \cos(45b - H_1)$ 。

四边形  $OPNE$  为平行四边形, 所以有:  $OE = NP, OP = NE = OL / \cos(2H), DE = OA, NEND = NOPA = 2H$ 。由于,  $NOQE = H_1 + H_2 = 2H = H_1 + NNOQ$ , 因此  $NNOQ = H$ , 所以  $NNOQ$  为等腰三角形。

又由于:  $NQ \cos(H) = ON / 2$  (1)

$NQ = \frac{ON}{2 \cos(H)} = \frac{OL}{2 \cos^2(45b - H_1) \cos(2H)}$  (2)

$\tan(H) = \frac{GD}{OD} = \frac{1 - \frac{OL \cos(2H)}{2 \cos^2(45b - H_1) \cos(2H)}}{OL \cdot \tan(45b - H_1)} = \frac{\tan(2H)}{\tan(2H_1)}$  (3)

因此得到:  $H = 2H_1$ 。

又根据  $\tan(A) = DH / CD, OD = NL = OL \tan(45b - H_1)$ , 得到方位角  $A$  的正切值为:

$\tan(A) = \frac{OL \sin(2H)}{2 \cos^2(45b - H_1) \cos(2H)} \cdot \frac{1}{OL \tan(45b - H_1)} = \frac{\tan(2H)}{\cos(2H)}$  (4)

仰角的正切值为:

$\tan(B) = \frac{QH}{CH} = \frac{OH}{\sqrt{OQ^2 - QH^2}} = \frac{\sin(2H) \cos(2H)}{\sqrt{1 - \sin^2(2H) \cos^2(2H)}}$  (5)

2 扫描非线性分析

通过以上分析, 可以得出以下几点: (1) 垂直角  $H$  等于机械角的两倍, 始终保持完全线性的关系; (2) 对于方位角  $A$  只有当  $H = 0$  时,  $A = 2H$ 。当  $H \neq 0$  时,  $A > 2H$ , 方位角为正畸变; (3) 垂直角是仰角  $B$  在  $yOz$  面上的投影, 所以仰角  $B [ H = 2H_1$ 。且只有当  $H = 0$  时,  $B = 2H_1 = H$ 。仰角为负畸变。

经计算机仿真计算出仰角  $B$  方位角  $A$  与机械转角  $H, H_1$  之间的关系(见图 3), 当扫描角度较小时, 扫描的线性较好。当扫描角度为  $10b @ 10b$  时, 边沿角度畸变方位角  $A$  为  $+ 0.38\% (+ 0.019b)$ , 仰角  $B$  为  $- 0.38\% (- 0.019b)$ 。扫描角  $30b @ 30b$  时, 边沿角度畸变方位角  $A$  为  $+ 3.36\% (+ 0.50b)$ , 仰角  $B$  为  $- 3.49\% (- 0.52b)$ 。方位角为枕形畸变

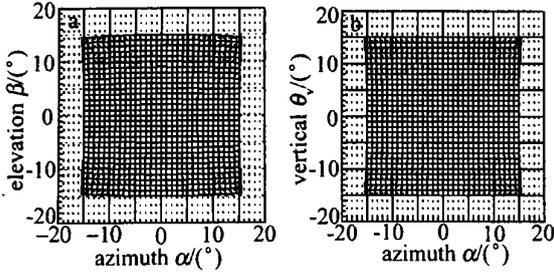


Fig. 3 Scanning angle(30b@30b)

(+), 仰角为桶形畸变(-)。如图 3a。再看方位角 A 与垂直角 H, 如图 3b。垂直角 H 无畸变, 垂直角  $H = 2H_1$ 。垂直角  $H_1$  是出射光线在铅垂面上的投影后与 z 轴的夹角, 在水平扫描中, 垂直角  $H_1$  固定不变表明水平扫描光线始终在一个倾斜的平面内。近距离时水平扫描线在正对的垂直面上的轨迹是一条水平的直线, 垂直扫描线的轨迹为双曲线形状的弧线。这与在实验室观察到的扫描线的形状相吻合。

垂直角与仰角的含义是不同的。垂直角是光线在 yOz 面上的投影与 z 轴的夹角, 方位角为光线在水平面 xOz 上的投影与 z 轴的夹角, 而仰角则是光线与其在水平面 xOz 上的投影的夹角, 也是光线与水平面 xOz 的夹角。垂直角是仰角在 yOz 面上的投影。

在成像系统中, 通常采用方位角和垂直角的概念。因此, 对如图 2 所示的扫描器结构形式中, 扫描图样为图 3b 所示的形状, 图像仅在水平方向有枕形畸变(+)。水平扫描线为直线, 竖直扫描线为类似腰形的曲线。

在角跟踪应用中, 通常采用方位角和仰角的概念。方位角为枕形畸变(+), 仰角为桶形畸变(-)。当扫描角度再增大时, 角度畸变急剧增加。图 4 中为 60b@60b 扫描角度时仰角 B 方位角 A 的变

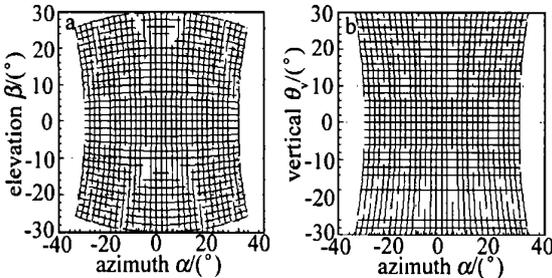


Fig. 4 Scanning angle(60b@60b)

化曲线。这时畸变量最大为: 仰角 B 畸变 - 14.47% (- 4.34b), 方位角 A 畸变 + 11.23% (+ 3.36b)。图 5 中为 120b@120b 扫描角度时仰角 B、方位角 A 的变化曲线。这时畸变量最大为: 仰角 B 畸变

- 57.235% (- 34.3b), 方位角 A 畸变 + 23.163% (+ 13.9b)。

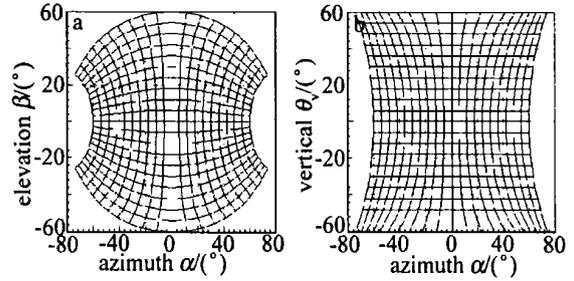


Fig. 5 Scanning angle(120b@120b)

通过二维扫描的计算公式再来分析一维扫描的非线性。一维扫描可以看作是二维扫描的一个特例。当第 1 只扫描镜  $M_1$  固定不变, 第 2 只扫描镜  $M_2$  按一定角度扫描,  $M_2$  的扫描可以看成是一维扫描。当  $H = 0$  时, 投射到扫描镜  $M_2$  上的光线与其转轴垂直, 这时扫描为线性。当  $H \neq 0$  时, 入射光线偏离扫描镜  $M_2$  垂直平面  $H = 2H_1$  角, 假设  $H_1 = 0$  时出射光线角度  $A_0, B_0$ , 以它为扫描的零点计算一维扫描角度  $A_1, B_1, H_1$ 。其中:  $A_0 = H_1, B_0 = 0; A_1 = A_0 - \arctan[\tan H_1 \cos(2H_1)] - H_1, B_1 = B_0 + \arctan[\sin(2H_1) \cos H_1 / \sqrt{1 - \sin^2(2H_1) \cos^2 H_1}]$ 。根据数学关系计算得到:

$$\tan H_1 = \frac{\tan B_1}{\cos(A_1)} = \frac{\sin(2H_1) \cos H_1}{\sqrt{1 - \sin^2(2H_1) \cos^2 H_1} \cos(A_1)} \quad (6)$$

经过计算机仿真计算出对于不同光线入射偏离角  $H$  情况下的扫描仰角 B、垂直角  $H_1$ 、方位角  $A_1$  见图 6 所示(其中  $H_1 = -30b \sim +30b$ )。可以看出当  $H \neq 0$  时, 扫描线并非一条直线, 产生横向偏移, 呈现为对称的腰形曲线, 仰角  $B < 2H_1$ 。由于投影的关系, 垂直角总略大于仰角。当  $H = 45b$  时,  $H_1 = 15b$ , 横向偏移  $A = 4.1b, B = 20.7b, H = 20.7b$ , 仅相当于  $1.4H_1$ , 远远偏离了光学扫描角为机械扫描角两倍的关系。

由此可见一维扫描  $H \neq 0$ , 扫描角度为非线性, 而且出现横向偏移。因此除非特殊情况, 为了得到线性的扫描, 设计时总使得入射光线垂直于扫描转轴(即  $H = 0$ )。一维扫描总能得到线性扫描。

二维扫描不同, 二维扫描的角度非线性是二维扫描器所固有的, 是无法避免的。只有在扫描的两条十字形中心线上, 扫描才是线性的。其它位置, 扫描总是有畸变的。而且扫描角度越大, 畸变越大。当非线性畸变超过角度精度要求时, 只有经过修正后才能使用。

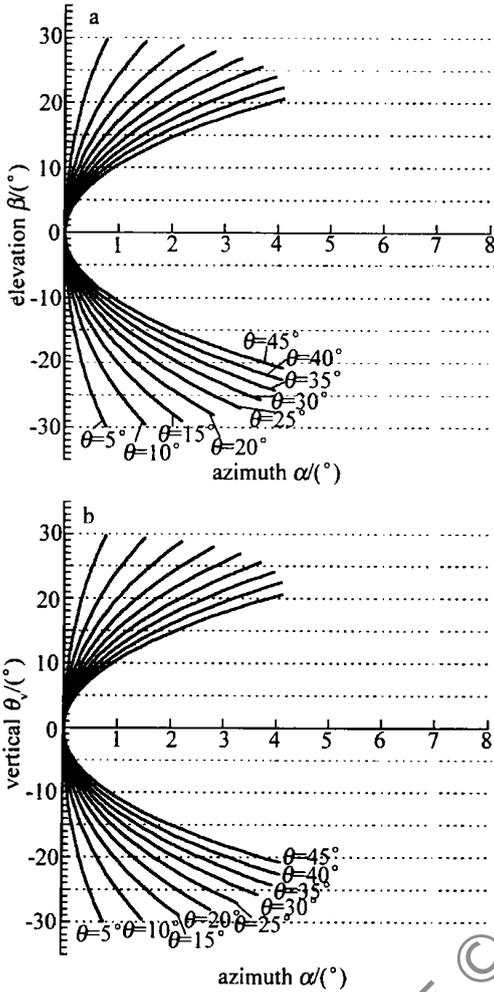


Fig. 6 Scanning non-linearity in one dimensional scanning with inclined incidence

### 3 扫描非线性的校正

扫描角度不大时,扫描的畸变对测量精度的影响不大,可忽略不计,当扫描角度较大时,扫描的畸变十分明显,必须对测得的角度数据进行修正。可以采用计算的方法,按照(4)式和(5)式分别计算出方位角和仰角的正确数据。也可以事先计算好,需要时采用查表的方法修正。图 7 中给出了角度从 0.1b@0.1b 到 30b@30b(正负角度畸变相同,负角度未画出)的角度畸变,分辨率为 0.1b。图 7a 为仰角的绝对畸变量,图 7b 为方位角的绝对畸变量。从图中可以快速的查出角度畸变量。

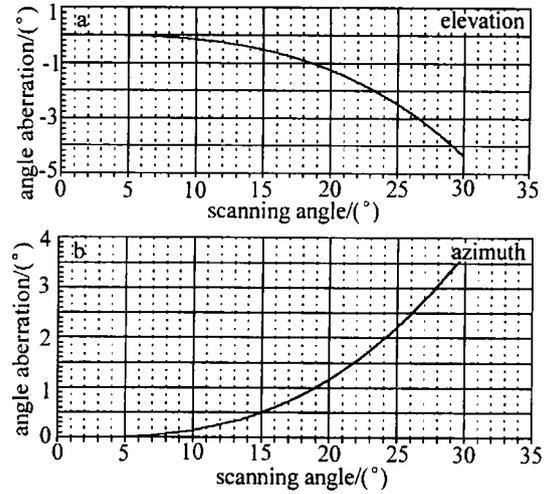


Fig. 7 Aberration of scanning angle

### 4 结论

旋转反射镜扫描和伺服电机带动光学镜头扫描的方法及效果是不同的。伺服扫描方式中,扫描电机角编码器输出的角度直接即为仰角和方位角,不存在坐标换算的问题。仰角不变时扫描一周形成的曲面为圆锥面。

旋转反射镜使光学扫描角度比机械转角扩大了 1 倍。在扫描角度不大的时候,扫描角度与机械转角存在较好的线性,但扫描角度较大时,扫描的非线性大大增加。扫描光线的角度与电机的转角存在复杂的换算关系。特定情况下其扫描线为直线,扫描形成的面是平面。但角度却非恒定,而非线性。

这也决定了伺服平台的扫描可以实现全周的扫描、搜索,而反射镜扫描只能在一定的角度范围内扫描。反射镜扫描较理想的扫描角度范围在 30b 以内,畸变在 3%~ 4%;最大不宜超过 50b~ 60b,畸变达到 10%~ 15%,非线性已经十分明显,需要对其非线性进行校正。再大的角度扫描效果变得较差,而无法使用。而永远也无法达到 180b 的角度范围。上述分析不仅适用于摆镜扫描。对转鼓扫描也同样适用。

#### 参考文献

- [1] PELSUE K. Precision postobjective two axis galvanometer scanning [J]. SPIE, 1983, 390: 230~ 235.
- [2] 虞孝舜. 双振镜扫描几何畸变的校正 [J]. 激光与红外, 1998, 28 (1): 45~ 47.
- [3] 罗必凯, 倪晓武, 陆建 et al. 转镜扫描的非线性研究 [J]. 中国激光, 1994, 21(7): 563~ 566.