

激光精密跟踪 测角误差分析与计算

田铁印 孙世维

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 叙述了用四象限探测器进行激光精密跟踪测角的原理, 并对其误差进行了分析和计算

关键词: 四象限探测器; 激光跟踪; 误差分析

1 前 言

目前国内外激光跟踪系统大多采用技术比较成熟的四象限探测技术, 由于该系统激光回波不处在激光接收系统的焦面上, 需要离焦使用, 由于大气的影晌, 激光回波在探测器光敏面上的均匀性受到了较为严重的损害而影响了测角及跟踪精度。

四象限探测技术在理论上要达到较高精度是基于两个前提条件: 一是到达光敏面上的回波所形成的光斑形状为几何圆形且为常值; 二是光斑能量密度均匀。前者当系统象差校正好及目标在一定远的距离以上可以得到满足, 后者要求激光模式要好, 并处在好的大气条件下工作。

另外四象限探测系统的四路放大器要求较好的一致性, 四路放大器的不一致性, 包括: 器件四个象限响应度差别, 四路放大器要求较好的一致性, 包括: 器件四个象限响应度差别, 四路放大倍数差异, 放大器的非线性等因素。也是影响激光跟踪测角精度的主要误差源之一。

下面以四象限器件水平安置, 即“和差工作模式”为例, 分析计算使用四象限器件进行激光角跟踪系统的测角误差。

2 基本原理

其示意图如图 1 所示

方位角误差:

$$\Delta A = K\mu \left(\frac{A+D-B-C}{A+B+C+D} \right)$$

为简化起见,设光斑只沿水平方向移动,高低方向略。并令 $A+D=S_1, B+C=S_2, \Delta A$ 以 $\Delta\theta$ 代替。

$$\text{则} \quad \Delta\theta = K\mu \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right) \quad (1)$$

$K\mu$ 是比例因子,取决于系统焦距和光斑半径,光斑半径的最佳值取法如图 2 所示:

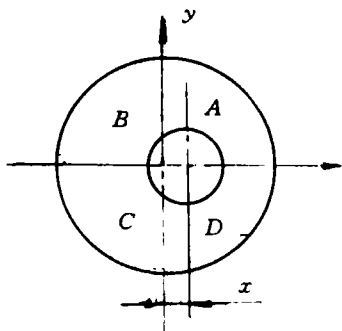


图 1 四象限探测器测角原理图
Fig. 1 The goniometric schematic diagram for using a quadrant detector

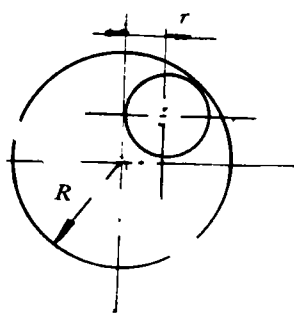


图 2. 激光光斑半径的最佳值取法示意图
Fig. 2 Sketch diagram of the optimum radius of laser spot

R : 四象限光敏面半径

r : 光斑半径

计算 $r=0.415R$ 采用 RCA 公司 YAG444 器件, $R=5.6$ mm, 可以算出 $r=2.35$ mm。

比例因子 $K\mu = \frac{r}{f}$, 焦距 f 与跟踪视场大小有关, 例如: 当要求 $2\omega_{跟踪} = \pm 2.5'$, 则 $f=3200$ mm, 此时接收系统视场 $\pm 6'$ 。 $\therefore K\mu = 0.73 \times 10^{-3}$ rad, 由(1)式不难导出可用解析式来。

$$\Delta\theta = \frac{K\mu(\pi r^2 - 2r^2 \sin^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{r} + 2x \sqrt{r^2 - x^2})}{\pi r^2} \quad (2)$$

用级数展开去掉高次项, 保留一次项,

$$\Delta\theta = K\mu \frac{4x}{\pi r} \quad (3)$$

可以看出(2)式是一个非线性方程, 当 x 比 r 小很多时(跟踪误差小时)才能用线性方程(3)式表示。

说明四象限跟踪误差在非线形校正问题, 该问题可利用计算机将算好的校正数据编成查询表, 存于计算机 RAM 中, 可以实时进行校正。

3 误差分析

由(1)式: $\Delta\theta = K\mu \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)$

设 $S_i = I_i + \epsilon_i$ [$i=1, 2$]

I_i : 为信号平均电流

ϵ_i : 为探测系统噪声电流

$\therefore \Delta\theta = K\mu \frac{I_1 - I_2 + \epsilon_1 - \epsilon_2}{I_1 + I_2 + \epsilon_1 + \epsilon_2}$

当不考虑系统误差, 并且目标被瞄准在轴上, 则 $I_1 = I_2 = I$, 又由于 $\epsilon_1 + \epsilon_2 \ll 2I$

$\therefore \Delta\theta = K_\mu \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2I}$

ϵ_1 和 ϵ_2 可看成独立的随机变量其方差相等, $\Delta\theta$ 的方差可由下式表示:

$$\overline{(\Delta\theta)^2} = \frac{K_\mu^2}{4I^2} (\overline{\epsilon_1^2} + \overline{\epsilon_2^2} - 2\overline{\epsilon_1\epsilon_2}/S \cdot N^{-1})$$

$$\text{其均方差} \quad \Delta\theta_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{(\Delta\theta)^2}} \leq K_\mu / S \cdot N^{-1} \quad (4)$$

$$S/N = \frac{2I}{\sqrt{\overline{\epsilon_1^2} + \overline{\epsilon_2^2} - 2\overline{\epsilon_1\epsilon_2}}} \quad (5)$$

从(4)式可以看出, 只要求出 S/N 就可以定量分析计算四象限探测系统的角度均方误差 $\Delta\theta_{\text{rms}}$ 。

4 噪声分析及 $\Delta\theta_{\text{rms}}$ 计算

探测系统中假定各项噪声被看成独立的随机噪声源并服从统计规律, 这样可把每项噪声均方相加, 文献[1]中给出总的均方噪声 N 为:

$$N = \left[2\Delta f \frac{KT}{R_L} + \Delta f e(i_B + i_D) + \frac{\pi\lambda^2 r_T^2}{4D^2 \Delta A} i_1^2 \right] + 4 \cdot 192 (\Delta A)^{1/6} r_T C_n^2 K^{-2} i_1^2 + \Delta f e i_{BS}^2 + \frac{\pi\lambda^2}{16\Delta A \varnothing} i_{BS}^2 \quad (6)$$

公式(6)中, 第一项为热噪声, 第二项为背景, 暗电流噪声, 第三项为光斑噪声, 它由目标漫反射而引起, 第四项为大气湍流噪声, 第五项为大气后向散射噪声, 第六项为大气散射引起的光斑噪声。

为计算方便将所用符号及其表示的意义和根据某一计算实例取值大小列表如下:

P_R : 四象器件的最小探测功率 4×10^{-6} W

R_0 : 器件(型号 YAG444)的响应度 0.65 A/W

Δf : 接收系统带宽 20×10^6 Hz

公式中(6)第二项噪声, $\Delta f \cdot e(i_B + i_D)$ 实际应为 $\Delta f \cdot e(i_B + i_D) M^{2+\alpha}$, 由于讨论的器件倍增因子 M 为 1, 所以只写成前面的形式。

K :玻尔兹曼常数 1.38×10^{-23} J/K

T :工作环境的绝对温度 298 K (25℃)

R_L :负载电阻,取 1000 Ω

e :电荷 1.6×10^{-19} C

D :目标尺寸 $\varnothing 0.3$ m

ΔA :接收系统面积 0.2 m² ($\varnothing 500$ mm)

C_n :大所湍流结构系数

弱湍流 $C_n: 10^{-9} \text{ m}^{-\frac{1}{3}}$

中湍流 $C_n: 10^{-8} \text{ m}^{-\frac{1}{3}}$

强湍流 $C_n: 10^{-7} \text{ m}^{-\frac{1}{3}}$

P_B :天空背景功率

晴天: $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Srad}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

阴天: $3.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Srad}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

K_μ :接收系统系数 0.73×10^{-3} rad

$\Delta\lambda$:窄带滤光片带宽 40 \AA

τ :接收系统透过率取 0.3

Ω :接收系统视场角 (2mrad) 3×10^{-6} sr

i_D :暗电流 2×10^{-7} A (型号 YAG444)

r_T 目标距离 10 km

φ :激光发射半角 0.0005 rad

P_T :激光发射功率 10×10^6 (10 MW)

σ :大气衰减系数 0.08 (大气能见度 23 km)

α :大气散射系数 0.07 (大气能见度 23 km)

c 光速 3×10^8 m/s

ΔT :接收系统响应时间 4×10^{-9} s

$F(\pi)$:散射函数 0.0152 (能见度 23 km)

M :位增系数,取 1.

1) 热噪声:

$$\text{噪声电流 } i_n = (2K\Delta f T / R_L)^{\frac{1}{2}} = \frac{2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 10^7 \times 298}{1000}^{\frac{1}{2}}$$

$$1.28 \times 10^{-8} \text{ A}$$

$$\text{信号电流 } i_s = P_o P_R = 0.65 \text{ A/W} \times 4 \times 10^{-6} \text{ W} = 2.6 \times 10^{-6} \text{ A}$$

$$S/N = \frac{i_s}{i_n} = 203$$

$$\Delta\theta_1 = K_\mu / S \cdot N^{-1} = 0.75''$$

2) 背景噪声:

$$\text{背景电流 } i_B = P_o P_B \Delta A \Delta \lambda \tau \Omega$$

$$= 0.65 \times 10 \times 0.2 \times 40 \times 10^{-4} \times 0.3 \times 3 \times 10^{-6} = 0.6 \times 10^{-8} \text{ A}$$

$$\text{背景噪声电流 } i_{nB} = (\Delta f \cdot e \cdot i_B)^{\frac{1}{2}}$$

$$= (20 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.6 \times 10^{-8})^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1.38 \times 10^{-10} \text{ A}$$

信号电流 $i_s = 2.6 \times 10^{-6} \text{ A}$

$$S/N = i_s / i_{Bn} = 1.88 \times 10^4$$

$$\Delta\theta_2 = 0.008''$$

3) 暗电流噪声 $i_{Dn} = (\Delta f \cdot e \cdot i_D)^{\frac{1}{2}}$

$$= (20 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^{-7})^{\frac{1}{2}} = 8 \times 10^{-10} \text{ A}$$

$$S/N = i_s / i_{Dn} = 3250$$

$$\Delta\theta_3 = K_\mu / S \cdot N^{-1} = 0.046''$$

4) 光斑噪声电流 $i_{Tn} = \left(\frac{\pi \lambda^2 r_T^2 i_1^2}{4D^2 \Delta A} \right)^{\frac{1}{2}}$

$$= \left(\frac{\pi \times (1.06 \times 10^{-6})^2 \times 10000^2 i_1^2}{5 \times 0.3^2 \times 0.2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.066 i_1$$

$$S/N = 2i_1 / 0.066 i_1 = 30.3$$

$$\Delta\theta_4 = K_\mu / 30.3 = 4.9''$$

该项误差由激光照射目标漫反射而引起 (speckle) 目标距离近误差减小, 当 $r_T = 5 \text{ km}$ 时,

$$\Delta\theta_4 = 2.3''.$$

5) 大气湍流噪声

$$i_{An} = [4.192 (\Delta A)^{-\frac{1}{2}} r_T C_n^2 K_c^{-2} i_1^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{取中湍流 } C_n = 10^{-8} \text{ m}^{-\frac{1}{3}}$$

式中 K_c 为目标比例系数 $0.3/10,000 \approx 1/30000$

$$i_{An} = 0.07 i_1$$

$$S/N = 2i_1 / 0.07 i_1 = 28.5$$

$$\Delta\theta_5 = K_\mu / 28.5 = 5.2''$$

6) 后向散射噪声

$$\text{后向散射电流 } i_{BS} = \frac{1}{2} R_o \tau P_T \Delta A \sigma F(\pi) \frac{\exp(-2\sigma r_T)}{r_T^2} \frac{\Omega}{\pi \varphi^2}$$

$$= \frac{1}{2} 0.65 \times 0.3 \times 10^7 \times 0.2 \times 0.08 \times 0.0152 \times \frac{e^{-2 \times 0.07 \times 10}}{(10000)^2} \frac{4 \times 10^{-6}}{\pi (5/10000)^2}$$

$$= 9 \times 10^{-8} \text{ A}$$

后向散射噪声电流 $i_{BSn} = (\Delta f \cdot e \cdot i_{BS})^{\frac{1}{2}}$

$$= (20 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 9 \times 10^{-8})^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0.5 \times 10^{-8} \text{ A}$$

$$S/N = \frac{2.6 \times 10^{-6}}{0.5 \times 10^{-8}} = 490$$

$$\Delta\theta_6 = K_\mu / S \cdot N^{-1} = 0.3''$$

7) 后向散射光斑噪声

$$\text{后向散射光斑电流 } i_{BR} = \left(\frac{\pi \lambda^2 M^2}{16 \Delta A \varphi^2} \right)^{\frac{1}{2}} i_{BS} = \left(\frac{\pi \times (1.06 \times 10^{-6})^2 \times 1}{16 \times 0.2 \times \left(\frac{5}{10000} \right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times 9 \times 10^{-8}$$

$$= 2 \times 10^{-3} \times 9 \times 10^{-8} = 1.8 \times 10^{-8} \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{后向散射光斑噪声电流 } i_{BP_n} &= (\Delta f \cdot e \cdot i_{BP})^{\frac{1}{2}} \\ &= (20 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.8 \times 10^{-8})^{\frac{1}{2}} \\ &= 2.4 \times 10^{-10} \text{ A} \end{aligned}$$

$$S/N = \frac{2 \times 10^{-6}}{2.4 \times 10^{-10}} = 10800$$

$$\Delta \theta_i = K \mu / S \cdot N^{-1} = 0.015''$$

$$\text{误差综合 } \Delta \theta_{rms} = \sqrt{\sum \Delta \theta_i^2} = 7'' \quad (i=1, 2, \dots, 7)$$

讨论:

1) 计算中可以看出,光斑噪声和大气湍流噪声是主要误差源。光斑噪声是由漫反射测量引起的,影响较大的因素是目标横向尺寸和目标距离。例如:目标距离 10 km,目标横向尺寸 0.3 m, $\Delta \theta_i = 4.9''$,而目标横向尺寸 0.6 m 时, $\Delta \theta_i = 2.4''$,此时目标距离缩短到 8 km 时, $\Delta \theta_i = 1.9''$ 。所以该项误差取决于目标大小和距离。

2) 关于大气湍流,上面计算是在中等湍流情况下的误差,如果气候条件中在弱湍流情况下,该项误差可小于 $1''$ 。为了减少湍流引起的误差,有文献报导,可在接收系统中加上消湍流措施,如在第一成像面上加上乳白玻璃(Frosted glass)再成像到四象限器件上,能使湍流影响抵消一半左右,这样在上述条件下 $\Delta \theta_{rms}$ 可以做到 $5''$ 以内,如果选择适当的目标(尺寸大于 $\varnothing 1000$ mm,在不大于 10 km 漫反射测量,选择好的天气等条件,激光模式为单横模,有可能达到较高的测角及跟踪精度。

5 关于四路不一致性误差

用四象限探测器做为激光角跟踪系统的接收器件,前面已指出需要对四路信号进行“和差”处理。

四路信号的不一致性,会带来系统的测角误差,四路信号的不一致性包括:四象限探测器各象限响应度的不均匀性,四路放大四放大倍数不一致,以及非线性等因素。

目前,高放大倍数,低噪声,宽频带的放大器,精心设计和较仔细的调整能使四路不一致性达到 3% 左右,当跟踪视场 ± 2.5 时,引入测角误差 $\pm 4.5''$,该项误差可事先测量出各通道的传输特性并存入计算机,在四路信号进行运算时,进行实时修正,该项误差修正后的残差可以做到小于 $1''$ 以内。

6 结束语

使用四象限探测器对飞行目标进行主动跟踪技术,在国外已装备于各种型号的测试装备上,如 PATS, EOTS-F 等系统,在国内也有几个型号加装了该项探测跟踪技术,经外场试验都取得了较好的结果,技术是成熟的。

存在的主要问题是:

1)对小目标漫反射跟踪测量,作用距离近。因此国外已研制了硅雪崩四象限探测器,该器件较一般使用的硅四象限探测器的灵敏度高两个数量级,作用距离可提高一倍以上

2)跟踪精度受光斑效应和天气条件影响较大。据国外文献报道^[1],合理地设计系统和探测器的参数,适当的选择天气和目标特性,在一定条件下,跟踪误差能够期望达到 $10 \mu\text{rad}(2'')$ 以内。

参 考 文 献

[1] Prospects for Precision Active Tracking Using a Quadrant Detector (J · F · WaLTER) AD A022714

Goniometric Error Analysis and Calculation for Laser Precision Tracking

Tian Tiejin, Sun Shiwei

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the goniometric principle for laser precision tracking using a quadrant detector, meantime, analyses and calculates its goniometric errors.

Key words: Quadrant detector, Laser tracking error analysis.

田铁印 男,1967年7月生,1989年毕业于哈尔滨工业大学光学仪器专业,1993年毕业于中国科学院长春光学精密机械研究所光学仪器专业(工硕士)。助研,从事光学总体和光学系统研究。