文章编号：2095-4980(2018)01-0071-05

采用相位法的激光跟踪系统设计

王选钢，左　丹，张　瑶，侯贵双，冯新华，岳　立

(成都航天通信设备有限责任公司，四川 成都 610051)

摘　要： 为提高激光跟踪精确度，采用相位法改进激光跟踪系统，发射机采用正弦信号调制激光功率，接收电路采用四象限雪崩光电二极管(APD)检测激光回波，通过快速傅里叶变换(FFT)计算失调角，稳定平台保持视轴稳定，并根据失调角跟踪目标。失调角误差是跟踪误差的主要因素之一，与信噪比和数据长度成反比，系统通过滤波、高速采样提高测量精确度。仿真时载体扰动幅度为 5°，信噪比为 0 dB，干扰信号为目标信号的 100 倍，系统能准确识别目标，跟踪误差为 0.033°，表明基于相位法的跟踪系统具有多目标、高精确度跟踪能力。

关键词： 激光跟踪；相位法激光测量；四象限探测器；视轴稳定；快速傅里叶变换

中图分类号： TN247　　**文献标志码：** A　　**doi：** 10.11805/TKYDA201801.0071

Design of phase-shift laser tracking system

WANG Xuangang, ZUO Dan, ZHANG Yao, HOU Guishuang, FENG Xinhua, YUE Li

(Chengdu Aerospace Communications Device Company Limited, Chengdu Sichuan 610051, China)

Abstract: In order to improve the tracking precision, a new laser tracking system is designed with phase-shift measurement. Laser power of transmitter is modulated by sinusoidal signals. A four quadrant detector is utilized to detect the laser echoes in receiving circuits. Missing angles are calculated through Fast Fourier Transform(FFT), and the measurement errors are inversely proportional to SNR and data length. The stabilized platform holds the optical axis and tracks the target according to the missing angles. Errors of missing angles have great effect on the tracking accuracy. Filters and high speed sampling circuits are designed to reduce errors. When the perturbation amplitude is 5°, the SNR is 0 dB, jamming signals are 100 times that of real signal, system can accurately identify the target, and the tracking error is 0.033°. Simulation results prove that the phase-shift laser tracking system can track multiple targets with high accuracy.

Keywords: laser tracking; phase-shift laser measurement; four quadrant detector; optical axis stabilization; Fast Fourier Transform

目前大尺度空间激光测量方法主要包括脉冲法和相位法，其中脉冲法作用距离较远，满足大范围跟踪需求，但近距离时跟踪精确度难以提高。相位法激光测量具有高精确度、高速率等优点，广泛用于手持式激光测距仪、全站仪、精密成像激光雷达等设备，精确度为毫米级甚至亚毫米级[1-2]，但其在激光跟踪领域的研究和报道较少。本文利用相位法测量技术，设计了一种新的激光跟踪系统，提高中近距离的跟踪精确度。发射部分采用连续波调制激光功率，并通过频率进行激光编码，可实现多目标跟踪；接收电路对回波信号进行自动增益控制和窄带滤波，并调整采样频率对信号进行整周期采样，通过 FFT 变换估算幅度和频率，用于失调角计算、目标识别。系统采用两轴稳定平台稳定视轴，并根据失调角转动视轴实现目标跟踪。该系统适用于主动跟踪和半主动跟踪，在几百米内的中近距离时跟踪精确度较高，可用于交会对接末段、机器人视觉、无人机精确着陆导航等领域。

1　相位法激光跟踪系统原理

相位法激光跟踪系统如图 1 所示，由激光调制、激光发射与接收光学组件、光电转换电路、信号处理电路、

收稿日期： 2016-06-10；**修回日期：** 2016-09-22
基金项目： 四川省科技厅应用基础研究面上项目(2017JY0092)

稳定平台等组成，其中光学组件安装在稳定平台上。电路采用 DDS 技术产生特定频率的正弦信号，调制激光器的输出功率；接收电路采用四象限 APD 进行光电转换，并通过自动增益、滤波、采样等步骤将其转换为数字信号；FPGA 对信号进行 FFT 变换，根据频率进行目标识别，根据幅度计算失调角。光学系统安装在稳定平台上，通过 PID 控制降低载体运动对视轴指向的影响。

失调角指目标偏离光轴的角度，测量失调角是跟踪系统的关键技术之一，其测量精确度直接影响跟踪精确度。激光跟踪系统常用四象限 APD 测量失调角，原理如图 2 所示[3-5]，光斑中心在光敏面上的坐标为(y,z)，激光回波的方位角为α，俯仰角为β。

假设方位向和俯仰向的脱靶量分别为 U_y 和 U_z，光斑位于光敏面中心附近，光斑半径为 r。采用和差法计算脱靶量[3-5]，通过线性法计算得坐标为：

$$\begin{cases} y=\dfrac{\pi r U_y}{4} \\ z=\dfrac{\pi r U_z}{4} \end{cases} \tag{1}$$

当光斑远离光敏面中心时，通过式(1)计算的误差较大。系统将光敏面划分为线性区和非线性区，线性区的误差较小。当目标处于非线性区时，平台快速转动使目标进入线性区，所以跟踪时采用式(1)计算。镜头焦距为 F，目标的失调角为：

$$\begin{cases} \alpha=\arctan\dfrac{z}{F} \\ \beta=\arctan\dfrac{-y}{\sqrt{z^2+F^2}} \end{cases} \tag{2}$$

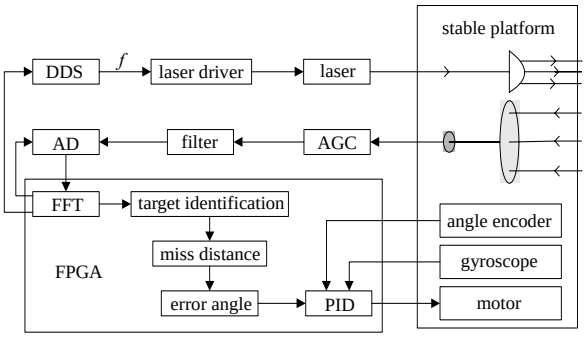

Fig.1 Block diagram of the phase shift laser tracking system
图 1 相位法激光跟踪系统框图

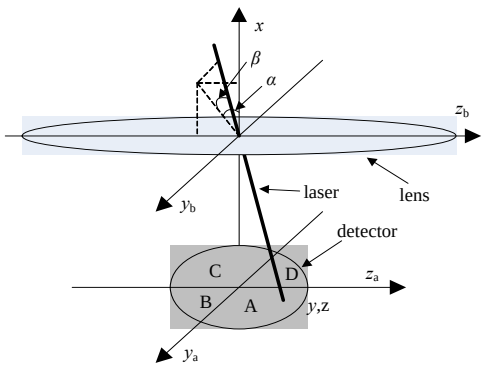

Fig.2 Error angle detection principle of four quadrant APD
图 2 四象限 APD 测量失调角原理

2 基于相位法的四象限 APD 测向方法

2.1 相位法测量失调角的性能

系统采用正弦信号调制激光器，回波信号为同频的正弦信号。假设回波信号的幅度为 A，接收电路在周期 T 内均匀采集 N 个数据，离散序列可表示为 $x(n)=A\cos(2\pi fTn/N+\theta)$，$n$ 为 0 到 $N-1$ 的整数。通过 FFT 变换[6-7]，信号的离散频谱为：

$$X(k)=\frac{A\sin(\delta\pi)}{2\sin(\delta\pi/N)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta+\frac{N-1}{N}\delta\pi)} \tag{3}$$

式中$\delta=fT-k$，表示谱线 k 的频率与信号频率的归一化间隔。FFT 计算的幅度受窗函数影响，当整周期采样时，$\delta=0$，FFT 测量幅度无偏差。

设白噪声 $g(n)$的均值为零，方差为 σ_n^2，其 FFT 离散频谱为 $G(k)$。$G(k)$为 $g(n)$的线性组合，所以 $G(k)$符合高斯白噪声特性，均值为零，方差为 $N\sigma_n^2$。含噪声的信号频谱为 $X'(k)=X(k)+G(k)$，主谱线 k_0 处信号的幅度远大于噪声的幅度，$|X'(k_0)|$可近似表示为$|X(k_0)|+R[G(k_0)]$，R 表示取实部，$|X'(k_0)|$的均值为$|X(k_0)|$，方差为 $N\sigma_n^2/2$。

假设各象限的信号谱线分别为 X_1,X_2,X_3,X_4，噪声谱线分别为 G_1,G_2,G_3,G_4，通过和差法计算得方位向的脱靶量为：

$$U_z^{'}\approx U_z+\frac{R(G_1)+R(G_2)-R(G_3)-R(G_4)}{|X_1|+|X_2|+|X_3|+|X_4|} \tag{4}$$

第一项为真实脱靶量，后一项为噪声。当光斑处于光敏面中心附近时，各个象限的信号功率、噪声功率近似相同，假设信号幅度均为 A，噪声方差均为 σ_n^2，信噪比 $S=A^2/(2\sigma_n^2)$，脱靶量的方差为：

$$\mathrm{var}(U_z^{'})=\frac{N\sin^2(\delta\pi/N)}{4S\sin^2(\delta\pi)} \tag{5}$$

结合式(1)和式(2)，方位角的测量方差为：

$$\sigma_\alpha^2=\frac{\pi^2r^2N\sin^2(\delta\pi/N)}{64F^2S\sin^2(\delta\pi)}\approx\frac{\pi^2r^2}{64F^2SN} \tag{6}$$

相位法测量失调角的方差与数据长度、信噪比成反比。采用脉冲法时，较高信噪比时失调角的测量方差为$(\pi r)^2/(64F^2S)$，为前者的 N 倍。同时相位法可通过增大 N 和 S 提高精确度，而脉冲法难以进行窄带滤波，且对窄脉冲进行峰值保持采样的误差较大，所以相位法的精确度高于脉冲法。

2.2 相位法的多目标测向方法

采用图 1 所示系统进行多目标跟踪时，可能接收到多个正弦信号，较强信号的旁瓣可能干扰、甚至淹没弱信号的主峰，引起目标识别与跟踪失败。同时，通过 FFT 计算信号离散频谱时，如果$\delta\neq0$，频谱泄露会降低主谱线的信噪比，从而降低测量精确度。为便于多个目标的同时跟踪，系统将调制频率设定为一系列特定值，采样频率为所有调制频率的整数倍。假设有 Q 组目标，令调制频率 $f=2^qf_0$，q=0,1,⋯,Q-1，采样频率 $f_s=m2^qf_0$，m 为大于 1 的整数。FFT 变换时，数据长度为所有调制信号的整周期数，即 N 为 $m2^q$ 的整数倍。

假设 Q=4，m=4，失调角的测量过程如图 3 所示，图中采样频率为 f_s，4 个目标的调制频率分别为 f_0,$2f_0$,$4f_0$,$8f_0$。接收电路首先进行预滤波，抑制大部分噪声和干扰信号，然后量化和下采样。待跟踪目标的调制频率为 f_0 时下采样速率为 8:1，$2f_0$ 时下采样速率为 4:1，$4f_0$ 时下采样速率为 2:1。当设定跟踪目标后，下采样速率也确定，此时数字信号的频率固定为 $f_s/4$，便于程序进行窄带滤波和 FFT 变换。较低调制频率的目标信号经下采样后，分为多组同频信号，通过平均提高测量精确度。

图 3 中滤波器为采用巴特沃斯带通滤波器[8-9]，中心频率为π/2，带宽为[0.45 π,0.55 π]，其传递函数为：

$$H(z)=\frac{0.02-0.04z^{-2}+0.02z^{-4}}{1+1.56z^{-2}+0.64z^{-4}} \tag{7}$$

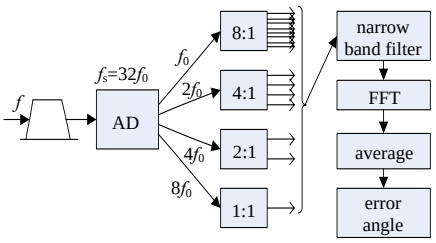

Fig.3 Error angle measurement process
图 3 失调角测量过程示意图

3 激光跟踪仿真与分析

3.1 失调角测量仿真

系统设定 4 组目标，调制频率取 10 kHz,20 kHz,40 kHz,80 kHz，采样频率设为 320 kHz。主谱线 $k_0=N/4$，所以 FFT 变换时只需计算主谱线。FFT 计算实部与虚部的过程如式(8)所示，仅通过加减法实现。

$$\begin{cases}R[X(k_0)]=\sum_{p=0}^{k_0-1}\left[x(4p)-x(4p+2)\right]\\ I[X(k_0)]=\sum_{p=0}^{k_0-1}\left[x(4p+3)-x(4p+1)\right]\end{cases} \tag{8}$$

仿真时选取 40 kHz 为待跟踪目标的信号，10 kHz,20 kHz 和 80 kHz 为干扰信号。程序按照 2:1 下采样，干扰信号的数字频率分别为π/8,π/4 和π，根据滤波器幅频特性，干扰信号分别被衰减 47 dB,32 dB 和 120 dB。根据激光雷达方程，激光能量与距离平方成反比，同时受大气衰减、反射率、接收角度等影响，为仿真较差环境时的测量性能，假设目标较远，4 个象限的幅度分别为 0.14 V, 0.09 V,0.09 V,0.08 V，信噪比从 0 dB 增加到 10 dB；同时干扰目标较近，其信号幅度均设为 10 V。令 N=1024,r=4 mm, F=50 mm，经过 1 000 次蒙特卡罗仿真，失调角测量标准差与信噪比的关系如图 4 所示。

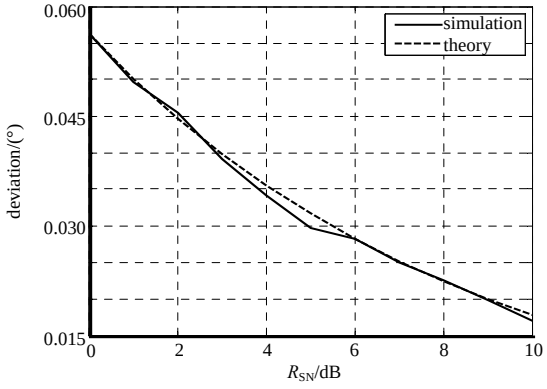

Fig.4 Standard deviation of error angle
图 4 失调角测量标准差

图中虚线根据式(6)计算，实线为仿真结果，两者较吻合，表明失调角测量误差分析合理。当信噪比为 0 dB 时，测量标准差为 0.055°；信噪比为 10 dB 时，测量标准差为 0.017°。如果采用脉冲法，当信噪比为 0 dB 时，已无法准确测量失调角，导致无法跟踪；当信噪比为 10 dB 时，测量标准差为 0.57°。表明相位法能应用于低信噪比情况下的目标跟踪，同时在具有较高信噪比时，测量精确度较脉冲法可提高 33.5 倍。

3.2 激光跟踪仿真

系统根据失调角、角速率和角位置信息建立位置、速率跟踪闭环，如图 5 所示，失调角和载体扰动均为正弦信号，

失调角包含加性白噪声。闭环采用 PID 控制[10-11]，使稳定平台既隔离载体扰动，又能根据失调角调整视轴指向。

根据 3.1 的仿真参数，失调角的真实值为 0.54°，信噪比为 0 dB 时的测量标准差为 0.055°，作为 PID 控制系统的失调角指令。陀螺仪噪声标准差为 0.05°/s，编码器噪声标准差为 0.006°。将载体扰动的频率设为 2 Hz，幅度设为 5°，Velocity 的比例系数为 5，Position 的比例系数为 15，积分系数为 1，跟踪仿真结果如图 6 所示，均值为 0.539 9°，标准差为 0.033 1°。

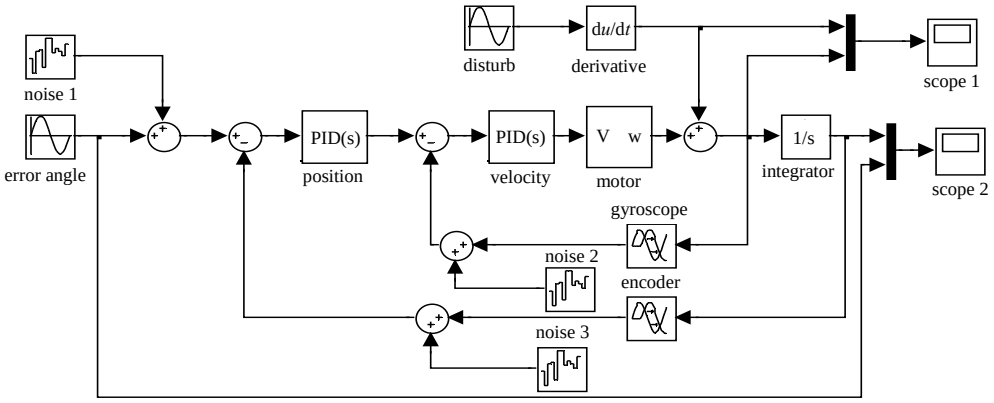

Fig.5 Control model of the laser tracking system
图 5 激光跟踪控制系统模型

在图 5 中仅加入失调角误差，仿真得误差为 0.026 8°；不加入任何噪声，仅加入载体扰动，仿真得误差为 0.029 5°，表明失调角测量和载体扰动是激光跟踪系统的主要误差源。采用相位法改进激光跟踪系统，可通过滤波、增大采样频率等方法提高失调角精确度，从而降低系统的跟踪误差，并在恶劣环境中也能跟踪目标。

4 结论

本文将相位法激光测距技术应用于激光跟踪系统，通过多组调制频率指示不同目标，系统通过 FFT 计算的频率和幅度信息进行目标识别与跟踪。分析表明失调角测量是跟踪误差的主要因素之一，相位法跟踪系统采用窄带滤波和数据累计提高失调角测量精确度，具有较高的跟踪精确度和抗干扰能力。仿真时设定信噪比为 0 dB，干扰信号强 100 倍，系统能准确提取真实目标信号的频谱，实现识别目标，同时测量失调角的标准差为 0.017°；当载体做大幅度扰动时，跟踪误差达到 0.033°，表明基于相位法的激光跟踪技术可用于高精确度跟踪。

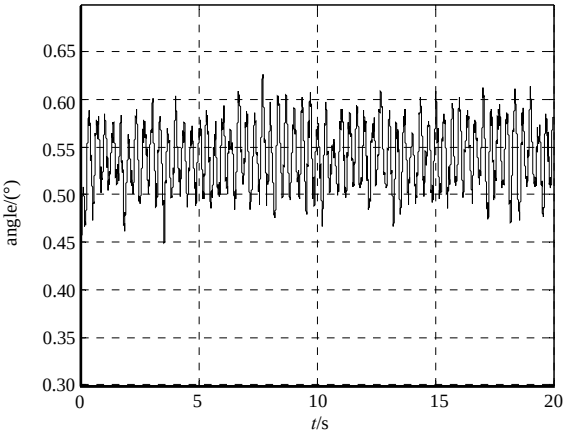

Fig.6 Laser tracking error
图 6 激光跟踪误差

参考文献：

[1] 郑大青,陈伟民,陈丽,等. 一种基于相位测量的快速高精度大范围的激光测距法[J]. 光电子•激光, 2014,26(2):303-308. (ZHENG Daqing,CHEN Weimin,CHEN Li,et al. A laser ranging method with high precision and large range in high speed based on phase measurement[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2014,26(2):303-308.)

[2] 刘邈,杨学友,刘常杰. 正交混频相位式激光测距方法与系统实现[J]. 中国激光, 2012,39(2):153-158. (LIU Miao,YANG Xueyou,LIU Changjie. Phase shift laser range finding with a novel quadrature modulation method and system implementation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012,39(2):153-158.)

[3] 付春,潘曦,宋承天. 调频连续波激光与无线电复合探测技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):40-45. (FU Chun,PAN Xi,SONG Chengtian. Frequency modulated continuous wave laser and radio compound detecting technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):40-45.)

[4] 韩文波,杨晓茂. 基于四象限探测器的红外导引头目标捕获和跟踪系统[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016,39(1):36-41. (HAN Wenbo,YANG Xiaomao. Target acquisition and tracking system of infrared seeker[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2016,39(1):36-41.)

(下转第 80 页)