

10.6μm 激光光斑跟踪系统总体研究

林 新

摘要：本文研究的激光光斑跟踪系统包括一台发射波长为10.6μm的脉冲激光发射装置（包括扫描系统）和一台与之匹配的光电接收转换装置以及信息处理装置，用以接收激光回波脉冲，并控制激光光束，将其峰值功率对准被跟踪目标。文章对该系统进行了全面、系统的分析计算与研究。涉及大气传输、光学系统、激光探测、信息处理以及光电扫描、激光偏转等多个领域。

一、引 言

自从六十年代激光技术问世以来，就被广泛用于测距及雷达跟踪系统。本文所研究的激光光斑跟踪技术是一种更高层次的测量、跟踪手段，目前只在美国的个别文献中有简单介绍。

二、系统功用与工作原理

由激光角跟踪或电视跟踪等系统精跟踪到的目标，由于10.6μm强激光在大气传输中的角偏移及大气抖动的影响，在目标距离较远时，并不能保证将激光功率高斯分布的最大值击中目标。采用激光光斑跟踪，就可以通过直接测量激光在目标上的漫反射回波，来控制激光光束，将高斯分布的峰值功率对准目标。

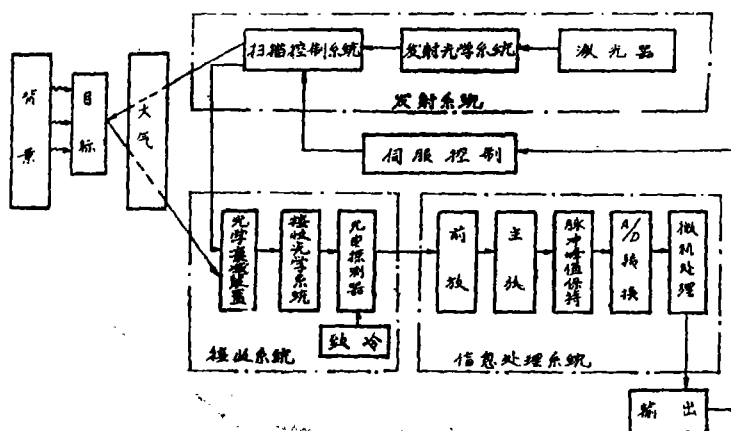


图 1 全系统原理框图

注：本文作者的导师为史济成

系统整机包括一台发射波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的脉冲激光发射装置（包括扩束光学系统、扫描控制系统）和一台与之匹配的光电接收转换装置，以及信息处理装置三大部分。全系统原理如图 1 所示。

由激光器发出的高能激光，穿过大气，经扩束后通过扫描控制机构射向目标，由运动目标反射回来的回波信号被接收光学系统会聚在光电探测器上，探测器把光信号转变为电信号，经电子学处理后实时输出并显示。对应于不同的扫描时刻 t ，将得到不同强度的回波功率信号 P_r ，同时也对应着不同的扫描相位角。通过伺服系统，自动调整扫描系统的零位，使激光功率的最大值对准目标，这样就实现了光斑自动跟踪。

由此可知，在整个系统的信息传递与转换过程中，除了牵涉到系统本身的内部参数外，还与大气、目标和背景的性质等外部参数有关，这使它成为一个受多种因素制约的复杂系统。

三、发射系统

在发射系统中，需要解决的关键问题是如何保证扫描系统有足够的振动频率。因为频率过低，采样精度不够，将给光斑跟踪带来误差，然而满足一定采样精度的振动频率所对应的角加速度，又给伺服传动系统的设计带来困难。通过详细的分析论证，作者提出采用声光偏转器代替扫描转镜，并对使用声光偏转器的可行性做了理论上的分析。

四、系统的工作距离

在军用激光测距、跟踪系统中，作用距离是衡量该系统性能的一个综合性指标。因为它是战术上所必备的硬指标，也是受多种因素制约，难以确切定量的软指标。它与总体光学系统的性能参数及透过率、探测器的性能参数、信息检测系统的信噪比有着直接的关系，并且受目标特性，大气传输情况的影响。因此作为一个完善的激光红外系统，其作用距离方程能够同时反映出以上诸因素的作用。

考虑到激光的大气传输效应，通过对目标在不同仰角时作用距离方程的详细分析和推导，得出目标的回波功率 P_r 与系统作用距离 L 满足以下关系：

$$\begin{cases} P_r = P_T \frac{A_0 A_R \cdot \rho}{2\pi^2 (a_0^2 + a_1^2) L^2} K_T \cdot K_R \cdot T^2 & (A_0 < A) \\ P_r = P_T \frac{A_R \cdot \rho}{2\pi L^2} \cdot K_T \cdot K_R \cdot T^2 & (A_0 \geq A) \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

其中：
$$\begin{cases} a_0^2 = L^2 \cdot \theta^2 \\ a_1^2 = (2.01 \cdot C_n^{6/5} \cdot \lambda^{-1/3} \cdot L^{8/5})^2 \quad (C_n \text{—湍流结构系数；} \lambda \text{—激光波长})。 \end{cases}$$

对于大气传输透过率 T ，在参考文献中通常只分别给出了水平情况下及仰角大于 10° 情况下的计算公式，在仰角为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的范围内缺乏明确的计算公式。作者经过推演，导出了适应于不同仰角的大气传输透过率公式，即：

当目标相对地表面的天顶角 $\varphi > 80^\circ$ 时：

$$T = \exp \left[- \frac{2RL}{L^2 + 2RL \cos \varphi} \int_{\frac{L^2}{2R}}^{\frac{L^2}{2R} + L \cos \varphi} \beta(h) dh \right]$$

$$\text{当天顶角 } \varphi < 80^\circ \text{ 时: } T = \exp[-\sec\varphi \int_0^{L \sec\varphi} \beta(h) dh]$$

式中: P_T ——激光器发射功率,

θ ——激光发散角,

A_0, A_R, A ——目标、接收光学系统、光斑的有效面积,

K_T, K_R, T ——发射光学系统、接收光学系统、大气的透射率,

ρ ——目标漫反射系数,

$\beta(h)$ ——大气沿高度 h 分布的衰减系数。

五、接收系统的设计论证

接收系统是整个系统的核心部分,它由光学系统和探测器系统组成。对接收系统的要求是尽可能多的接收光能,减小噪声,提高接收信号的信噪比,以提高测距和跟踪精度,该系统是一个远红外接收系统,因此在设计中,运用了红外光学工程的理论。

在接收系统的设计中,首先对目标的特性进行了分析,当作用距离较远时,目标可为一个点光源,而当作用距离较近时,应根据朗伯反射特性,对不同方向的人射情况,给出相应的计算模型。接着通过理论上的分析计算,从用PW方法解初始结构入手,使用CAOD软件在计算机上反复优化,得到了一个用很少的光学元件(两片),获得很高像质的接收物镜。

因为激光红外系统属于光电子系统,它的接收器不是人眼或底片,而是光电接收器件,所以还应考虑光学系统与探测器的匹配。文章从以下两个方面进行了相应的分析计算:1.探测器的光敏面积与视场角 ω 的关系;2.衍射作用与探测器光敏面积的关系。

通过一系列的分析计算,选定了探测器与光学系统的各项性能参数,并使其达到了合理的匹配,满足了使用要求。

最后将这些参数代入方程式(1)、(2),用计算机算得了 P_R 值,它是光斑跟踪所依据的主要数值。

六、信号预处理系统

从探测器输出的信号,必须经过相应的预处理,如限制带宽,控制当信号的强度变化时,仍能线性工作的动态范围,保证信噪比等等。只有经过预处理才能从信号中分离出目标信息,提供给 A/D 转换装置,经计算机处理后实时输出。

在信息处理系统的设计中,首先根据信号的特点与系统要求,设计了一个低噪声前置放大器。同时讨论了系统的信噪比,当忽略背景噪声时(背景噪声属外部噪声,可用小孔光阑抑制),系统经过前放后的输出信噪比为:

$$S_0/N_0 = \frac{P_s D_i^2}{F_{\min} \sqrt{\Delta f} A_d} \quad (3)$$

式中: D_i ——探测器比探测率, Δf ——电路带宽,

A_d ——探测器光敏面积, F_{\min} ——前放最小噪声系数。

将所有选定参数代入(3)用计算机算得 S_0/N_0 值。这是反映系统探测能力及工作距离的主要数值。

通过对探测概率和虚警概率的分析, 得出实际工作所需要的最小信噪比为 b , 显然这给探测远距离目标带来困难, 为此必须改善系统的信噪比, 如在前放之后加同步累积积分装置, 增强信号, 然后加一级瞬时浮点增益主放, 以满足信号随距离的大幅度变化。

七、结 束 语

在激光光斑跟踪系统的设计与研究中, 主要围绕以下 4 个问题展开:

1. 采用高精度、高稳定性的扫描装置, 提高跟踪精度;
2. 建立起包括大气传输效应及系统各有关参数的作用距离方程;
3. 以最大限度地接收光能量为目标, 对接收光学系统及探测器系统进行分析论证;
4. 通过信号的预处理提高信噪比。

由于本课题尚处在方案论证阶段, 一些结论无法通过实验验证, 因此在分析计算中, 很多参数的选择是用计算机程序控制的, 以便修改, 同时对每一个环节, 每种不同情况都进行了尽可能接近实际情况的模拟。

A Study of a 10.6 μ m Laser Facula Tracing System

Lin Xin

Abstract

The laser facula tracing system described in this paper involves an installation emitting 10.6 μ m wavelength pulse laser, a matched photoelectrical receiving and transforming device and an information treatment device to receive the returned pulse, control the laser beam and make its peak power aim at the traced target. The paper also presents the detailed analysis and calculation of the atmosphere transmission, optical system, laser detection information treatment, optomechanical scanning and laser deflection and so on.