

文章编号: 1001-3806(2002)02-0147-03

激光跟踪雷达回波概率设计方法研究

郑永超 詹荣科 杨志卿

(信息产业部电子第二十七研究所, 郑州, 450005)

摘要: 论述了激光跟踪基本原理, 分析了影响激光跟踪回波概率的几种主要因素, 提出了保证跟踪回波率的几项基本措施和环路参数选择原则。所研制的激光跟踪系统的室内、室外实验和靶场实验结果验证了分析结果和设计方法的正确性。

关键词: 激光跟踪; 回波概率; 跟踪环路; 目标特性

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Design method of echo probability in a laser tracking system

Zheng Yongchao, Zhan Rongke, Yang Zhiqing

(The 27th Research Institute, Ministry of Electronics Industry, Zhengzhou, 450005)

Abstract: In the paper, the principle of laser tracking is described and the important factors affecting the echo probability of a laser tracking system are analyzed. The basic method and rules to choose circuit loop parameters to ensure a certain echo probability is introduced. The analytical results have been proved with a laser tracking system tested in room and outdoors and an army's ground.

Key words: laser tracking; echo probability; tracking loop; target characteristics

引言

激光雷达是传统雷达技术和光学技术相结合的产物, 其工作原理与传统微波雷达相同。但由于其工作在光频段, 与微波雷达相比, 激光雷达具有分辨率高、测量、跟踪精度高、抗电子干扰力强、隐蔽性好、超低空低仰角跟踪性能强、体积小、重量轻、功耗低等特点, 是低空机动飞行目标的理想跟踪测量设备。

激光跟踪雷达系统原理框图见图 1, 它由跟踪设备、(空间)大气、目标 3 部分组成。各部分的参数都会影响跟踪性能。通常, 激光发射机、接收机组合在一起固定安装在可转动的跟踪架上, 它与数据处理终端、伺服控制单元一起构成了机动目标跟踪系统。

激光跟踪雷达工作过程是: 引导设备把目标引导至激光跟踪雷达视场内, 激光发射机以重复频率 f 向空中目标发射激光脉冲, 激光接收机接收经目标反射的激光回波信号, 经滤波、放大、处理后送往

数据处理终端, 数据处理终端对接收到的信号进行量化、再通过滤波、运算、修正, 解算出距离 R 和目标脱靶量 A, E , 送跟踪伺服系统, 带动跟踪架跟踪目标, 激光雷达转入自跟踪状态。

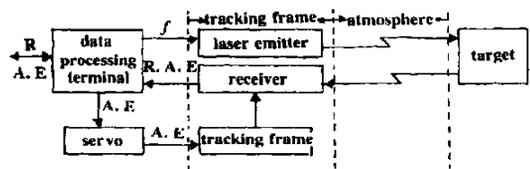


Fig. 1 Block diagram of the laser tracking system

激光跟踪系统转入自跟踪状态后, 激光跟踪系统的回波概率 (简称回波概率) 是影响系统跟踪性能, 维持系统稳定跟踪的关键因素之一。跟踪设备、大气和目标是影响回波概率的主要因素, 提高回波概率也要从这 3 个方面着手^[1]。只有合理设计跟踪环路及相关参数, 才能保证高的回波概率和良好的系统跟踪性能。

1 影响回波概率主要因素分析和系统设计方法

1.1 激光跟踪系统数学模型

根据自动调节原理, 图 1 的激光跟踪系统可用

作者简介: 郑永超, 男, 1963 年出生。教授级高工。从事激光雷达与光电系统研究工作。

收稿日期: 2001-01-16; 收到修改稿日期: 2001-04-29

图2的等效数学模型,即角跟踪环路数学模型来表示,以便于分析环路性能。

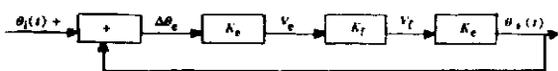


Fig.2 Equivalent model of the laser tracking system

图2中, $\theta_i(t)$ 代表目标角度位置; $\theta_o(t)$ 代表跟踪架角度位置; $\theta_e = \theta_i - \theta_o$ 代表角误差; K_e, K_f, K 分别代表角误差传感器、滤波器、伺服控制器函数。下面仅用跟踪环路理论的结论来分析角误差跟踪环路,了解其跟踪性能。

当跟踪目标时,应满足 $|\theta_o - \theta_i|$ 小, θ_o 接近 θ_i , 角误差 θ_e 小。

角误差跟踪环路闭环传递函数近似为二阶,即 $\theta_o(s)/\theta_i(s) = G(s) = w_n^2 / (s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2)$, 其中, w_n 为跟踪环路的无阻尼自然振荡频率, ζ 为其阻尼系数。 w_n, ζ 是 K_e, K_f, K 的函数。回波概率 P_r 与角跟踪环路参数 w_n, ζ 的关系为^[2]:

$$P_r = 1 - \frac{w_n}{2f} \exp\left[-\frac{(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})^2}{2}\right] + \exp\left[-\frac{(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})^2}{2}\right] \quad (1)$$

式中, θ_t 为激光发射机发射波束角宽度(半功率点), f 为激光发射机发射重复频率, ζ^2 为跟踪环路随机角误差均方值, 它为 w_n, ζ 的函数。

$$\zeta^2 = \frac{\rho_m w_n}{4} \quad (2)$$

式中, ρ_m 为随机干扰频谱密度。由(1)式,(2)式可知,回波概率 P_r 与环路参数 w_n, ζ 直接相关;同时还与激光发射机参数 f, θ_t 有关。故只要抓住跟踪环路的合理设计及其参数选择,就能获得满意结果。

例如,跟踪环路设计结果,当 $w_n/f = 1, \theta_t/\theta_e = 3, \zeta = 1.7$ 时,则 $P_r > 0.95$ 。

1.2 影响回波概率 P_r 的主要因素分析

1.2.1 来自跟踪设备的影响

1. 环路设计的基本过程描述。(1)根据给定的跟踪角误差 θ_e , 随机角误差 θ_e , 设计跟踪环路及其主要参数 w_n, ζ ; (2)由 K_e, K_f, K 与 w_n, ζ 的关系式,选择、设计环路部件参数 K_e, K_f, K ; (3)适当选择激光发射机发射重复频率 f ; (4)由(1)式计算出满足规定值 P_r 的激光发射波束角宽度; (5)上述各参数的优化筛选与确定。

2. 主要影响因素分析和参数选择。(1) w_n 的影响及选择。由(1)式和(2)式看出,要 P_r 大,则希望 w_n 要选小好。 w_n 小了,对 ζ 的减少有利。但由跟踪环路理论得到: w_n 小了,会使 θ_e 变大。故 w_n

的选择应在 P_r, θ_e 三者间折衷考虑;(2) θ_e 的影响及选择根据(1)式和(2)式,要 P_r 大,则要求 θ_e 小; θ_e 小引起 w_n 增大。由环路理论可知,若 θ_e 过大,将引起动态性能变差,即 θ_e 增大;对 θ_e 和 w_n 两者折衷有一最佳值,一般为 0.7 左右。(3)激光发射重复频率的影响和选择。重复频率 f 越高, P_r 越大。但实际上又不可选择过高。一般地,对 YAG 脉冲激光器,目前 $f = 100\text{Hz/s}$ 是可行的。(4)激光发射波束角宽度 θ_t 的影响和计算。由(1)式可知, θ_t 越大,则 P_r 越大,但也不能过大,否则会引起其它指标变差,如作用距离 R 等。故应根据计算结果和具体条件合理选择 θ_t , 一般 $\theta_t \leq 3$ 。

1.2.2 来自大气的影 响

大气折射率的随机变化将引起激光接收机回波信号的强度随机起伏,其结果导致跟踪环路的随机误差增大,从而引起回波概率降低,但只要增加量足够小,这是允许的。

大气随机变化引起的接收回波信号幅度起伏呈对数正态分布^[3], 其起伏程度用对数幅度方差 σ_x^2 表示: $\sigma_x^2 = 0.375 C_n^2 K^{7/6} R^{11/6}$ (3) 式中, $K = 2/\lambda$ 。为激光发射机工作波长, C_n 为大气折射率结构系数。

若 $C_n = 4 \times 10^{-8} \text{m}^{-1/3}, R = 20\text{km}, \lambda = 1.064\mu\text{m}$ 。并将此式代入(3)式得: $\sigma_x^2 = 0.0365$, 查表得损失因子 $L = 7\text{dB}$ 。

$L = 7\text{dB}$ 的含意是:在 $\sigma_x^2 = 0.0365$, 虚警概率 $g_f = 1.3 \times 10^{-12}$, 丢失概率 $g_m = 10^{-12}$ 的条件下,若保持跟踪性能不变,有大气随机变化影响时所需的接收回波信号功率比无大气影响时多 7dB, 或者激光接收机的线性动态范围也相应增加 7dB。对单脉冲四象限跟踪的角误差敏感器来说,线性动态范围增加 7dB 只是增加了敏感器难度,而对角误差的影响经跟踪环路的作用(过滤)就减少到允许程度。据资料报道,一般约为 7s。

1.2.3 来自目标的影响

(1)目标引起的激光斑点效应也带来激光接收回波信号随机起伏。影响分析亦可用前节方法。实验证明,激光斑点效应可通过如下措施来减弱到足够小的程度:(a)增大发射机的发射波束角宽度;(b)加大目标的反射面积;(c)选用大口径接收望远镜。(2)目标特性也是要考虑的。对于漫反射目标(如飞机),因其接收角、反射波发散角较大,只要等效反射面积设计足够大,一般能保证回波概率。但对于合作目标(如四棱锥角反射器)要保证回波概率,就必须恰当设计角反射器及其在运

动物体(如飞机等)上的安装位置。从应用角度看,主要是提出角反射器的设计要求和安装要求。当满足了提出的要求后,就可保证激光跟踪设备在规定的移动范围内准确瞄准目标,也即保证回波概率。

(a)角反射器接收角的影响和选择:角反射器接收角越大,跟踪设备瞄准目标的移动范围越大,即在目标移动的大范围内也能保证足够高的回波概率,故应选择大的接收角。但接收角过大将导致设计、制造困难,成本增高。一般在满足目标运动范围要求条件下,选择大的接收角。通常,角反射器阵列的接收角可达到 $\pm 75^\circ$ 左右。其它指标:角反射器面积(尺寸)、反射率、反射波束角宽度也是应用中重要的指标。限于篇幅,这里不作讨论。

(b)角反射器安装位置与方向:角反射器在目标上的安装位置与目标运动区域、跟踪设备的相互位置有关,若设计不当,则跟踪设备瞄不准目标,就接收不到回波,回波概率就无从谈起。安装设计考虑原则是:目标在规定的运动范围内,角反射器所处位置、方向,应使角反射器(阵列)的接收角能覆盖住跟踪设备。具体安装位置、方向可按具体使用要求,几何关系计算得到。

2 某型号激光跟踪雷达试验结果

某型号激光跟踪雷达的研制过程中,成功的运用了上述分析和系统设计方法。激光跟踪雷达具备

(上接第 155 页)

制参数 β 和高斯光束的束腰宽度 w_0 的函数,在调制参数较小时,束腰宽度随调制参数的变化是非单调的。当 β 值较大(如 $n=0$, $\beta=4.825$, $n=1$, $\beta=6.100$, $n=2$, $\beta=6.750$, $n=3$, $\beta=7.250$) 时,其束腰宽度等于其同阶的厄米-高斯光束的束腰宽度。

4 结 论

从二阶矩定义出发,推导出了厄米-双曲余弦-高斯光束束腰宽度的解析表达式,作为特例给出了厄米-余弦-高斯光束、双曲余弦-高斯光束、余弦-高斯光束及厄米-高斯光束束腰宽度的表达式。数值计算表明,HCsG 光束的束腰宽度是 HChG 光束的阶数 n 、离心参数 β 和高斯光束的束腰宽度 w_0 的函数,ChG 光束的束腰宽度是离心参数 β 和高斯光束的束腰宽度 w_0 的函数,就所计算的而言,HCsG 光束和 ChG 光束的束腰宽度随离心参数和阶数 n

测距、测角功能,在红外分系统引导下,自动转入自跟踪状态,跟踪体制上,采用单脉冲激光四象限跟踪。激光跟踪雷达在室内、外场、海军试验靶场进行了多次试验,部分试验结果为:(1)对 3km 处烟囱(直径约 2m),测量结果为:随机角误差 $\sigma_A = 6s$,回波率 $P_r = 98\%$ 。(2)对 5km 处靶标(角反射器),测量结果为:随机角误差 $\sigma_A < 13.6s$,回波率 $P_r > 95\%$ 。(3)对海面船只进行激光跟踪实验与测量,对海船跟踪能长时间(10min, $f = 20\text{Hz/s}$, 40Hz/s) 稳定跟踪目标,距离为 6~8km,回波率 $P_r > 98\%$,随机角误差优于 11s。(4)对 5km 处和 21km 处靶标(20cm² 角反射器)做跟踪实验,能稳定跟踪靶标,角误差为 13.8s 左右, P_r 优于 95%。

3 结 论

(1)激光跟踪雷达多次试验结果验证了激光跟踪雷达回波概率设计方法的正确性。(2)激光跟踪雷达回波概率优于 95% 是可行的,激光主动跟踪技术已趋于成熟,具备了向工程装备转化的条件,推广应用前景是光明的。

参 考 文 献

- [1] Jelalian A V. Laser Radar Systems. 第 1 版, Norwood MA USA, Artech House: Al Jelaian, 1991.
- [2] 詹荣科. 激光与红外, 1979(5): 1~5.
- [3] 宋正方. 应用光学基础. 第 1 版, 北京: 气象出版社, 1990.

的增大而增加;对 HC_sG 光束和 CsG 光束而言,在调制参数较小时,束腰宽度随调制参数的变化是非单调的。在调制参数较大时,HC_sG 光束的束腰宽度等于其同阶厄米-高斯光束的束腰宽度。我们虽然得到的是二维的结果,但推广到三维情况是直截了当的。

参 考 文 献

- [1] Casperson L W, Hall D G. J O S A, 1997, A14(12): 3341~3348.
- [2] Casperson L W, Tovar A A. J O S A, 1998, A15(4): 954~961.
- [3] Tovar A A, Casperson L W. J O S A, 1998, A15(9): 2425~2432.
- [4] Belafhal A, Ibnchaikh M. Opt Commun, 2000, 186: 269~276.
- [5] L ÜB D, Zhang B, Ma H. Opt Lett, 1999, 24: 640~642.
- [6] L ÜB D, Ma H, Zhang B. Opt Commun, 1999, 164: 165~170.
- [7] Siegman A E. Proc SPIE, 1990, 1224: 2~14.
- [8] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series and Products. New York: Academic Press, 1980.
- [9] 王喜庆, 柯尊平, 吕百达. 激光技术, 2001, 25(2): 121~125.
- [10] 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992.