

脉冲激光分布式扫描参数的优化分析

贾冰, 吕琼莹, 曹国华

长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出一种基于激光脉冲扫描测量体制下的高速点目标捕获、跟踪测量方法,应用匀速运动模型模拟仿真目标的轨迹及分布概率;考虑脉冲激光光斑分布的相关参数,建立脉冲激光扫描捕获点目标的理论模型。提出了一种基于时间序列法的捕获方法,用以求解针对目标模型脉冲激光在一帧扫描时域内的捕获次数。在此基础上对激光分布式扫描光斑布局的主要参量进行数值仿真分析,进而提出一种针对目标运动特性、激光传感器特性的最优化扫描方式,以提高一帧扫描时域内的捕获概率和捕获次数,缩短捕获时间;结合算例通过半实物仿真实验验证最优化扫描方式的可行性。所提方法为激光跟踪系统的脉冲频率、扫描频率与目标运动模型的最佳匹配提供了依据。

关键词 测量; 目标跟踪; 分布式扫描; 高速点目标; 光足; 捕获目标; 捕获效率

中图分类号 TN953

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1204008

Optimization Analysis of Pulse Laser Distributed Scanning Parameters

Jia Bing, Lü Qiongying, Cao Guohua

*College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A high-speed point target acquisition and tracking measurement method based on laser pulse scanning measurement system is proposed. The constant velocity motion model is used to simulate the target trajectory and target distribution probability; considering pulse laser spot distribution parameters, the theory model of pulse laser scanning capture point target is established. A capture method based on time series method is proposed to solve the number of capture of the target model pulsed laser in one frame scanning process. On the basis of this, the main parameters of the laser distributed scanning spot layout are simulated and analyzed. Then, an optimal scanning method is proposed to improve the capture probability, the capture number and the acquisition time for the characteristics of motion target and laser sensor. The feasibility of optimal scanning method is verified through the semi-physical simulation experiment combined with an example. The proposed method provides the basis for the best matching of the pulse frequency, scanning frequency of the laser tracking system and target motion model.

Key words measurement; target tracking; distributed scanning; high-speed point target; laser spot; acquisition target; acquisition efficiency

OCIS codes 120.1880; 280.3400; 100.4999; 070.7425; 280.3420

1 引言

新型常规兵器目标多具有“快、小、暗、远”的特点,针对这一特点提出了超高速、多参数、全弹道、高精度、实时化的试验测试需求。激光跟踪测量系统以其测量精度高、范围广、数据处理准确实时而被认为是新的测量体制。

收稿日期: 2017-06-12; 收到修改稿日期: 2017-08-07

基金项目: 国家 863 计划(2013AA2400)

作者简介: 贾冰(1987—),女,博士研究生,主要从事激光雷达及光电检测技术方面的研究。

E-mail: 13596154862@163.com

导师简介: 曹国华(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光雷达、光机电一体化、光学在线测量等方面的研究。E-mail: caogh@cust.edu.cn

激光跟踪测量系统常用的扫描方式有矩形扫描、矩形螺旋扫描、螺旋扫描和六边形螺旋扫描等,通常用于激光通信、卫星对接、机载雷达等的跟踪测量。轻武器暗小目标在弹道初始段时,弹丸姿态稳定,速度衰减减小,运动轨迹可近似为直线运动,直线弹道测量模型可以满足测量的精度要求,采用直线弹道光斑分布扫描可提高弹丸目标的捕获效率。因此,本文提出了针对轻武器目标弹道测量的脉冲激光分布式扫描捕获模型,即将弹丸目标当作质点,研究质点的运动轨迹。目标的运动为一个随机过程,暗小目标激光探测涉及到目标、脉冲激光器件、扫描系统和探测系统等多方面的相互作用,它们的配合程度直接影响探测效率。针对脉冲激光目标扫描方式及捕获效率进行分析和研究,对提高高速小目标激光跟踪测量系统的探测性能具有重要意义^[1-5]。

2 基本问题描述

2.1 机动目标的捕获条件

为提高脉冲激光跟踪测量系统的捕获效率,在有效的弹道测量范围内预设多个扫描光斑位置,并称这些位置为光足。脉冲激光器扫描光斑按照预设光足位置循环扫描,在机械扫描器件扫描频率与激光脉冲频率相匹配的基础上,建立激光扫描捕获模型。通过建模仿真分析光足布局的优化方法,以极大程度地提高捕获效率^[6-8]。

由于被探测目标的体积小,激光光斑可覆盖目标,因此将探测目标视为点目标。暗小高速运动目标的激光探测过程是指在脉冲激光器的有效脉宽范围内,目标穿越光斑,且探测器接收到回波信号的过程,这视为成功捕获一次点目标。为简化算法,以目标匀速运动模型^[9]为例建立目标捕获模型,预先设定 m 个扫描位置覆盖于目标轨迹上,脉冲激光器扫描光斑按照预设光足的位置循环扫描,定义 n 个扫描周期为一帧,在每帧扫描过程中求解探测目标回波个数最大时的光足位置参数及激光扫描方式。

2.2 单光足捕获概率模型

激光探测器发出的一个圆形投影光斑为一个光足大小,由于激光跟踪测量系统的光束能量在空间上的分布满足高斯分布,即光斑中心的能量较强,且能量随半径增加而递减,故探测器接收的回波信号也随光斑半径增大而递减。依据基模 TEM₀₀ 下高斯光束的一般表达式可知点目标的激光雷达方程为^[10-12]

$$P_r = \frac{P_t}{\pi^2 \theta_t^2 r^4} \sigma(A_r T_t T_A), \quad (1)$$

式中 P_t 、 P_r 分别为发射功率和接收功率, θ_t 为激光的束散角, r 为激光光斑半径, σ 为目标的激光雷达散射截面(LRDS), A_r 为雷达的有效接收面积, T_t 为接收装置的透射率, T_A 为大气传输效率。由(1)式可知,目标的有效探测能力与激光光斑半径成反比。因此,基于有效回波探测设定光足的光斑半径为 r , 脉冲频率为 T , 目标初始位置随机出现在 $(-r, r)$ 之间, 并均匀分布。单组激光光斑和机动目标的几何关系如图 1 所示 (D 为光斑直径, v 为速度), 表达式为

$$x \sim U(-r, r), \quad (2)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2r}, & -r \leq x \leq r, \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (3)$$

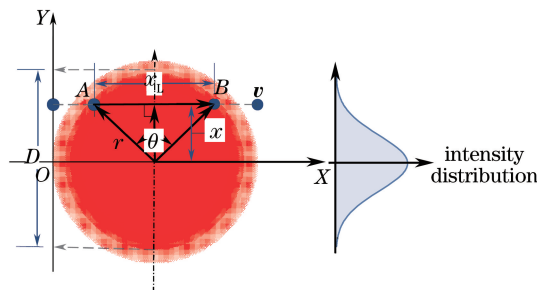


图 1 单足激光光斑和机动目标的几何关系

Fig. 1 Geometric relationship between single laser spot and point target

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \int_{-\infty}^{-x} 0 dx + \int_{-x}^x \frac{1}{2r} dx = \frac{x+r}{2r}, \quad (4)$$

式中 x 为 y 轴上任一点的纵坐标, $x \in (-r, r)$; $F(x)$ 为 x 的分布函数; $f(x)$ 为概率密度函数。

目标穿越光足边缘的两点 (A 点和 B 点, AB 两点构成的弦长为 X_L), 光足中心与弦长中心的连线必垂直于弦长, 由此可得

$$X_L = g_L(x) = 2\sqrt{r^2 - x^2}, \quad -r \leq x \leq r. \quad (5)$$

由上可知, X_L 的数学期望可以表示为

$$E(X_L) = \int_{-r}^r g_L(x) F(x) dx = \int_{-r}^x 2\sqrt{r^2 - x^2} \frac{1}{2r} dx = \frac{\pi r}{2}, \quad (6)$$

假设目标穿越光斑的时间为 t_c , 目标飞行速率为 v , 那么 t_c 的数学期望可以表示为

$$E(X_t) = E\left(\frac{1}{v} X_L\right) = \frac{1}{v} E(X_L) = \frac{\pi r}{2v}, \quad (7)$$

其中

$$X_t = g_t(X_L) = \frac{1}{v} X_L = \frac{1}{v} g_L(x) = \frac{2\sqrt{r^2 - x^2}}{v}, \quad -r \leq x \leq r. \quad (8)$$

假设脉冲激光器的脉冲频率为 T_p , 求得单个脉冲光足捕获概率的解析解为

$$P = \frac{E(X_t)}{T_p} = \frac{\pi r}{2T_p v}. \quad (9)$$

不难看出, 单个激光脉冲的目标捕获概率与激光器的脉冲频率、目标飞行速率负相关, 与激光器的光斑半径正相关^[13-15]。

3 脉冲激光分布式扫描的目标捕获模型分析

3.1 时间序列法

依据第 2.2 节所述模型, 预设 m 个光足, 脉冲激光器扫描光斑按照预设光足位置以循环扫描的方式捕获目标, 其几何关系如图 2 所示。在不考虑扫描电机损耗的情况下, 振镜的扫描频率 T_s 按照激光器的脉冲频率 T_p 进行匹配, 即 $T_s = T_p$ 。

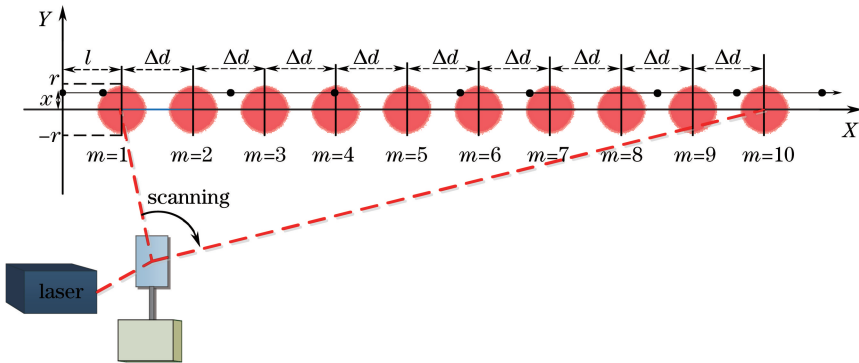


图 2 脉冲激光分布式扫描预设光足模型

Fig. 2 Pulse laser distributed scanning presetting spot model

图 2 中, l 为第一个预设光足中心距原点的距离; r 为扫描光斑半径; x 为目标初始位置距原点的距离, 也称之为脱靶量; Δd 为预设光足间的距离。

光斑按 $1/T_p$ 时间序列线性展开, 预设一帧扫描总脉冲数为 $N_t = n \times m$ (其中 n 为循环扫描次数), 扫描光斑的时间序列为

$$t_N = (N_t - 1) \times \frac{1}{T_p}, \quad (10)$$

式中 $N = 1, 2, \dots, N_t$ 。

按照预设光足的循环扫描规律,将一维的光斑脉冲时间序列 t_N 重组为 $m \times n$ 的时间序列矩阵 t' :

$$t' = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nm} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

(11)式矩阵中的每列为第 m 个光足对应光斑出现的时间,每行为第 n 次循环对应光斑的出现时间。

目标按一定的速度穿越每个预设光足前后边缘的两个时间序列分别为 T_1 、 T_2 ,两个时间序列内均有 M 个样本,其中 $M=1,2,3,\dots,m$ 。基于匀速运动模型及脉冲激光器的扫描方式可知, T_1 、 T_2 样本空间内的每个元素为

$$T_1(M) = \frac{l - \sqrt{r^2 + x^2} + \Delta d \times (m - 1)}{v}, \quad (12)$$

$$T_2(M) = \frac{l - \sqrt{r^2 + x^2} + \Delta d \times (m - 1)}{v}, \quad (13)$$

由此可得到 T_1 、 T_2 样本空间内的线性时间序列:

$$T_1 = \{T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, \dots, T_{1m}\}, \quad (14)$$

$$T_2 = \{T_{21}, T_{22}, T_{23}, T_{24}, T_{25}, T_{26}, \dots, T_{2m}\}。 \quad (15)$$

联立(11)~(15)式,对 t' 矩阵中的每个元素与 T_1 、 T_2 时间序列进行纵向比较,当 $t_{nm} \geq T_{1m} \cup t_{nm} \leq T_{2m}$ 时,记为捕获目标 1 次。当 N_i 个脉冲(即一帧)扫描完毕后,可以得到系统最终的捕获次数。

3.2 基于 MATLAB/Simulink 的仿真验证

为验证上述算法,采用 MATLAB/Simulink 仿真分析上述激光扫描目标的捕获模型,其核心思想是使用积分环节对动态系统建模。每一次循环积分环节时将保存历史信息,并对每次循环结果的有效性进行对比,判断每一次循环的捕获结果。所提及的系统为两个相互独立的系统,分别为目标运动系统及激光扫描系统,可将目标运动系统定义为连续系统,激光扫描系统为离散系统,按定义的光斑扫描频率与求解目标速度的微分步长进行匹配。光斑从前一光足跳跃至下一光足所需时间 $\Delta t = 1/T_p$,同时设此时间间隔为目标动态系统的时间变量。每一次循环后的目标动态位置即为 s ,可以得到 $s = \int v \Delta t$ 。预设光足的位置由系统参数设定,光斑按预设光足的位置顺序循环扫描,且时间间隔相等,每一次循环后求解两系统的当前位置,通过循环次数即可求解当前光斑的中心位置 s' ,当满足 $|s - s'| < X_L$ 时,即两者距离的模小于当前脱靶量的弦长时,视为成功捕获一次目标。

为验证时间序列法求解的正确性,结合算例将其与 MATLAB/Simulink 积分比较法的结果进行对比。定义目标以 $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率沿直线匀速运动,其脱靶量为 $(-r, r)$ 范围内的随机量,脉冲激光频率为 30 Hz ,光斑投影半径为 50 mm ,预设光足为 10 个,激光脉冲总数为 100 个(即循环 10 次),光足步长为 200 mm ,第一个光足距零点 500 mm ,当系统运行时间达到 3 s 时,即目标行进 3000 mm 时停止。为验证两种方法的准确性,采用蒙特卡罗法对两种方法分别进行 1000 次试验,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,Simulink 微分步长的选取使得结果存在误差,两种方法的结果存在 1.4% 的误差。上述算例中的捕获概率可达到 97.9% 以上,其中捕获超过两次的概率达到 85.5% 以上。

3.3 光足布局模型的优化分析

将上文所述模型的变量全部参量化,任意参量的选取都将对捕获次数的结果产生影响。假设激光的扫描频率与脉冲频率一致、目标运动(匀速运动模型)速率一定,目标脱靶量 a 为 $[-r, r]$ 内均匀分布的随机变量。由图 1 所示的几何关系可知,光斑半径越大,捕获概率越大。激光为高斯光束,当脉冲激光器的平均功率一定时,光斑越大,回波能量损耗越大,一味地增加光斑半径并不能达到理想的效果。这里不探讨如何选取光斑半径。为优化光足布局的相关参数,设有效光斑半径为定值,即 $r = 50 \text{ mm}$ 。

对速率为 $1000 \text{ mm} \cdot \text{ms}^{-1}$ 的运动目标模型进行仿真优化,通过 MATLAB 对不同目标的脱靶量和光足步长这两个参量依次按照变量范围进行迭代运算,分析不同参数下的捕获次数,收敛结果如图 4 所示。脱靶量越小,捕获次数越多,捕获概率越大。在脱靶量不变的前提下,光足步长的选取会对捕获次数产生较大影

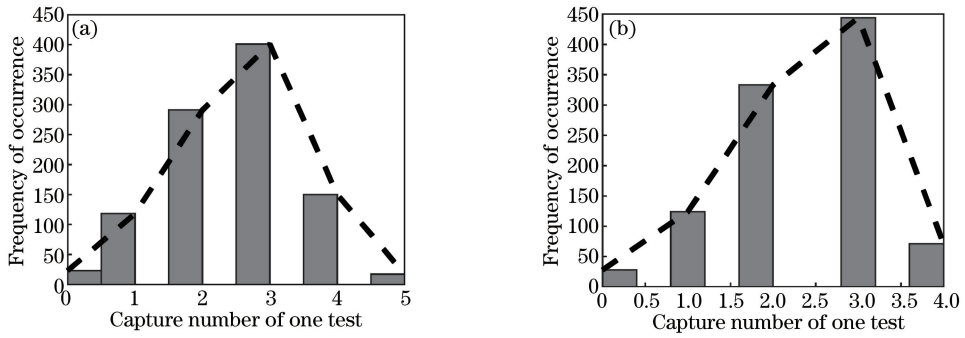


图 3 蒙特卡罗仿真验证结果。(a) MATLAB/Simulink 积分比较法；(b)时间序列法

Fig. 3 Monte Carlo simulation verification results. (a) MATLAB/Simulink integral comparison method; (b) time series method

响。可以看出,在光足步长选为 319 mm 时,捕获次数最多。

以此类推,在其他参数一定的情况下,求解目标在不同脱靶量下的光足个数 m 与捕获次数之间的匹配关系,结果如图 5 所示。在光足步长为 319 mm 的情况下,当光足个数达到 9 个时出现了突变,在光足个数等于 10 时捕获次数最多。

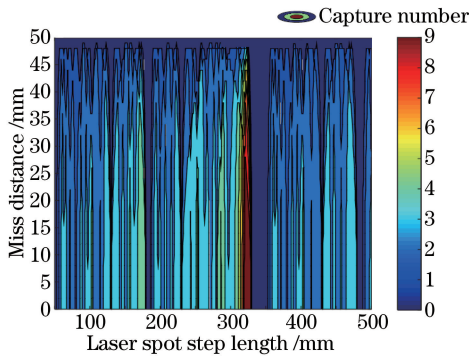


图 4 光足步长与捕获次数的关系

Fig. 4 Relationship between laser spot step length and capture number

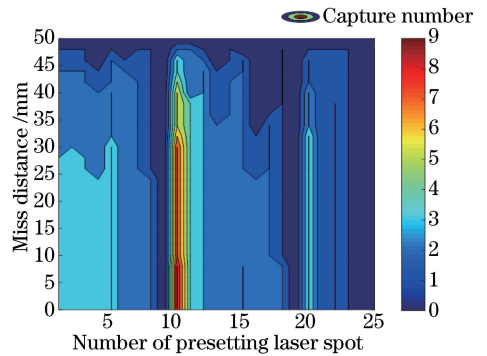


图 5 预设光足个数与捕获次数的关系

Fig. 5 Relationship between number of presetting laser spot and capture number

扫描光足模型的建立是以光足间距(即光足步长)相等为前提的,第一光足所在的目标弹道位置参数也会影响捕获次数,其参数优化结果如图 6 所示。其中 x 轴为起始光足的位置参数, y 轴为脱靶量, z 轴的颜色代表捕获次数。结果表明,光足的起始位置对于捕获次数的影响呈周期性分布,光足起始位置在 0, 300, 600 mm 处的捕获次数最多。

当光足个数与光足步长不变时,在不同脱靶量下激光脉冲频率的变化对捕获次数的影响如图 7 所示。

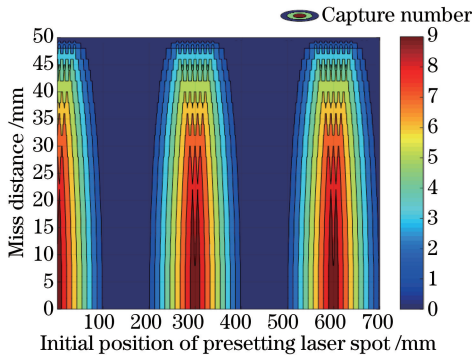


图 6 预设光足起始位置与捕获次数的关系

Fig. 6 Relationship between initial position of presetting laser spot and capture number

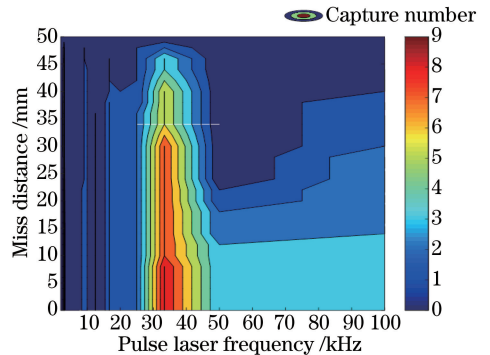


图 7 激光脉冲频率与捕获次数的关系

Fig. 7 Relationship between pulse laser frequency and capture number

从分析结果可知,按照上述模型,当激光脉冲频率为 32 kHz 时,探测目标的捕获次数最多。

脱靶量的变化会对上述分析产生线性影响,因此在不考虑脱靶量的情况下,找到了光足步长与预设光足个数、捕获次数之间的匹配关系,如图 8 所示。分析后可知,基于上述模型可以得到优化后扫描捕获的最佳参数:光足步长为 319 mm,预设光足个数为 9。可见,通过上述参数优化方法可在一帧扫描周期内增加捕获次数,有效提高捕获效率。

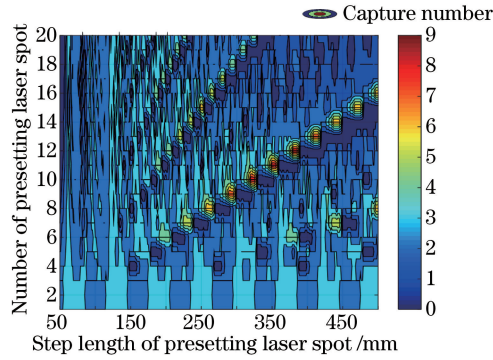


图 8 预设光足个数、光足步长与捕获次数的关系

Fig. 8 Relationship between number of presetting laser spot, laser spot step length and capture number

4 试验验证

采用图 9 所示的半实物仿真实验验证点目标脉冲激光分布式扫描结果,即目标速率与激光频率同时降低相同的数量级,仿真过程如第 3.1 节、第 3.2 节所述。根据仿真分析获得的激光脉冲频率、光足步长及预设光足个数的优化结果,选择基于激光脉冲飞行时间(TOF)测量法的激光测距系统(激光波长 905 nm,出瞳孔径 10 mm,发散角 3 mrad,分辨率 1 mm,测量精度范围 $\pm 20\text{mm}$)以及最大角度在 $\pm 12^\circ$ 内、最高频率达 70 Hz 的一维振镜(可接收最大光斑直径 30 mm)。采用振镜电机控制器控制振镜的扫描速度,按照两光足间隔 0.03 s 调整振镜频率,激光频率与振镜的线速度均可调。目标选用半径为 1 mm 的聚四氟乙烯圆片,在直线导轨带动下以 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率匀速前进。振镜在目标行程范围内循环扫描,调整激光测距系统到背景墙之间的距离,使最小光足半径等于 50 mm。通过调节目标中心的高度来仿真目标的脱靶量,按照表 1 所列的参数分别进行了三组试验。

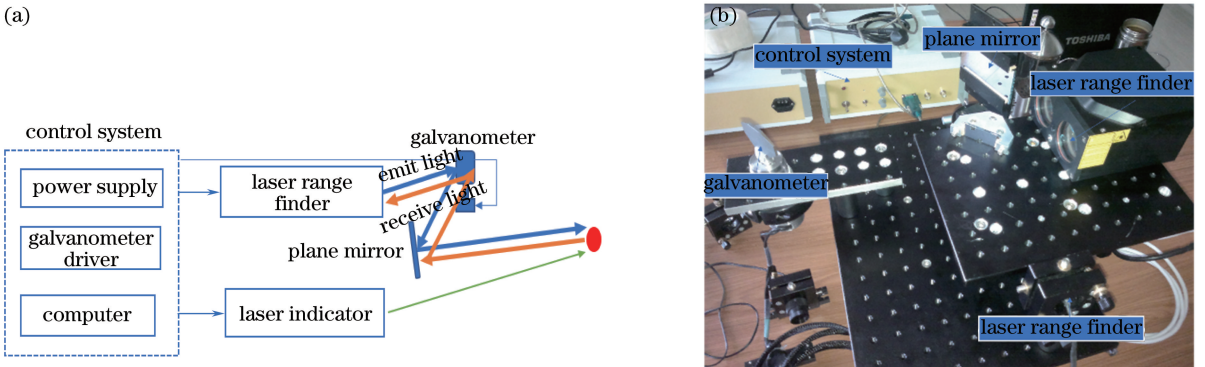


图 9 脉冲激光分布式扫描捕获的半实物仿真试验。(a) 系统结构示意图;(b) 试验装置

Fig. 9 Semi-physical simulation experiment of pulse laser distributed scanning and acquisition.

(a) Diagram of system structure; (b) experimental setup

试验中,每组改变一个光足布局参数,共改变三次,按照表 1 所列参数进行设置,表中每组的第三次试验采用优化仿真布局的参数设置。由于脉冲激光测量传感器选用的是激光测距传感器,扫描背景为光滑墙面,振镜带动激光测距系统循环扫描,因此回波幅值(即距离值)呈锯齿状,突出的幅值即为激光测距传感器探测到的目标回波信号,尖点个数即为捕获次数。得到的回波波形如图 10 所示,探测目标次数的结果如表 2 所示。

表 1 光足布局参数

Table 1 Laser spot layout parameters

Group	Number	Step length /mm	Number of laser spot /mm	Miss distance /mm	Simulated capture times
1	1	250	10	5	3
	2	330	10	5	0
	3	319	10	5	9
2	1	319	8	5	2
	2	319	12	5	3
	3	319	10	5	9
3	1	319	10	10	9
	2	319	10	30	8
	3	319	10	40	6

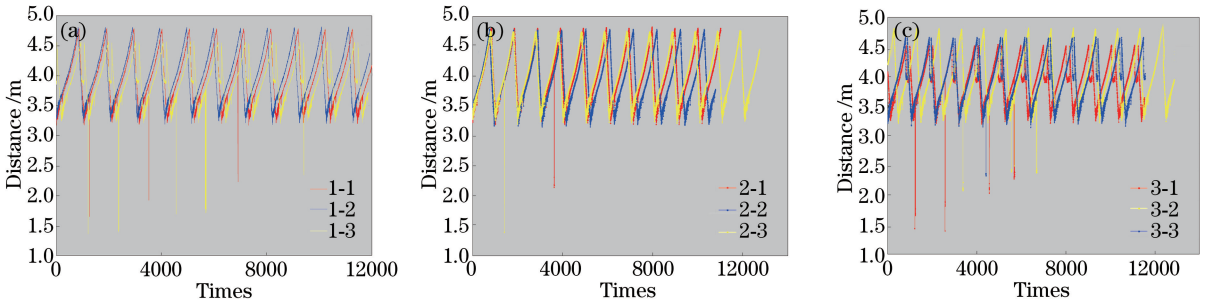


图 10 激光测距传感器扫描探测结果。(a)试验 1 组;(b)试验 2 组;(c)试验 3 组

Fig. 10 Analysis of laser range finder sensor scanning detection results. (a) First group of experiment; (b) second group of experiment; (c) third group of experiment

表 2 实验和模拟得到的探测次数

Table 2 Experimental and simulated capture times

Group	Number	Simulated capture times	Experimental capture times
1	1	3	3
	2	0	0
	3	9	5
2	1	2	1
	2	3	0
	3	9	1
3	1	9	4
	2	8	3
	3	6	1

结果表明,半实物仿真试验结果与计算机仿真结果的趋势相同。可见,按照优化算法得到的参数在一定条件下有效地提高了捕获次数及捕获效率。

5 结 论

根据点目标脉冲激光扫描探测的原理,在目标理论弹道上建立扫描模型,基于目标与探测系统的既定参数及几何关系,找到捕获效率最高的扫描布局方式,进而优化捕获跟踪系统。根据轻武器靶场目标的特点,在理论弹道上预设扫描光足,依据扫描捕获概率提出了一种计算捕获效率的计算方法,即时间序列法,并应用 MATLAB/Simulink 积分环节验证了计算方法的正确性。分别从光足步长、光足个数、光足起始位置、激光脉冲频率等方面进行分析及优化,通过算例及半实物仿真实验验证了按照优化方法得到的布局方式可以在一次测量中增加捕获次数,提高捕获效率。

通过搭建半实物仿真系统验证了所提分析方法的可行性,实验结果表明,所提出的点目标脉冲激光分布

式扫描捕获优化仿真结果与实验结果相符,为高速轻武器弹丸点目标轨迹测量提供了新方法,同时该方法为激光通信、激光对接、激光扫描等领域提高捕获概率提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Xue Zhengyan, Qi Bo, Ren Ge. Study on rapid acquisition technology for inter-satellite optical communications[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(6): 53-56.
薛正燕, 亓波, 任戈. 星间光通信中快速捕获技术研究[J]. *光通信技术*, 2015, 39(6): 53-56.
- [2] Tian Hui, Ni Jinping, Jiao Mingxing. Projectile flying parameter measurement model of parabolic trajectory and precision analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(1): 67-74.
田会, 倪晋平, 焦明星. 抛物线弹道弹丸飞行参数测量模型与精度分析[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(1): 67-74.
- [3] Yu Zhiliang, Zhou Naixin, Chen Xinglin, *et al.* Research on coarse-fine composite technology for scanning in inter-satellite laser communication [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(5): 158-162.
于志亮, 周乃新, 陈兴林, 等. 星间激光通信系统粗精复合扫描技术[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(5): 158-162.
- [4] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305005.
赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305005.
- [5] Xu Xiaobin, Zhang He. Optimal pulsed frequency and scanning speed of laser circumferential detection system [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(5): 0508002.
徐孝彬, 张合. 激光周向探测系统最佳脉冲频率与扫描转速[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0508002.
- [6] Huang J, Deng K, Yao Z S. Using top-hat beam to improve the performance of the inter-satellite laser communication [J]. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 137: 238-243.
- [7] Zhang G Y, Liu L J, Zhang C L. Study on single-photon acquisition probability based on Laguerre-Gaussian beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0101001.
- [8] Yang Yang, Yao Jianquan, Song Yukun, *et al.* Radar scattering cross section in different waveband for spherical targets[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 552-556.
杨洋, 姚建铨, 宋玉坤, 等. 球型目标在不同波段的雷达散射截面[J]. *激光与红外*, 2011, 41(5): 552-556.
- [9] Luo Yuan, He Yan, Geng Liming, *et al.* Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(5): 0514001.
罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0514001.
- [10] Li Xinzong, Tian Xiaomin, Wang Hui, *et al.* Study on properties of speckle field formed by Laguerre-Gaussian beam illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0726001.
李新忠, 田晓敏, 王辉, 等. 拉盖尔-高斯光束照射产生散斑场的特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0726001.
- [11] Ma Yue, Li Song, Yang Fanlin, *et al.* Model of waveform parameters for laser altimeter system under flattened Gaussian beams[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0413002.
马跃, 李松, 阳凡林, 等. 激光测高仪平顶高斯光束条件下的回波参数模型[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0413002.
- [12] Li Xinglong, Yu Jiyan, Yao Wenjin, *et al.* Optimization of launching angle based on hit probability for terminal correction mortar projectile[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 26(2): 90-94.
李兴隆, 于纪言, 姚文进, 等. 基于末段修正迫弹命中概率的射角优化[J]. *弹道学报*, 2014, 26(2): 90-94.
- [13] Zhang Yunqing. Capture probability and tracking algorithm of moving target in laser detection [D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 7-28.
张轹卿. 运动目标激光探测的捕获概率与跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 7-28.
- [14] Chen H M, Li P, Yan X P, *et al.* A design of mid-wave infrared integral catadioptric optical system with wide FOV [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(2): 142-147.
- [15] Cheng Zhenxuan, Lin Defu, Wang Hui. Analysis of the acquisition probability and hitting precision of laser-guided mortar bomb[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s3): 291-294.
程振轩, 林德福, 王辉. 激光制导迫弹捕获概率与命中精度分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(s3): 291-294.