

单光束扩束扫描激光周视探测系统参数对探测能力的影响

查冰婷 袁海璐 马少杰 陈光宋

Influence of single-beam expanding scanning laser circumferential detection system parameters on detection capability

Zha Bing-Ting Yuan Hai-Lu Ma Shao-Jie Chen Guang-Song

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 070601 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181860

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181860>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光探测平面目标特性对测距分布的影响

Effect of plane target characteristics on ranging distribution for pulse laser detection

物理学报. 2016, 65(21): 210601 <https://doi.org/10.7498/aps.65.210601>

大气风场和温度对无线电声波探测系统探测高度影响的数值研究

A numerical study of effects on detection height of a radio acoustic sounding system influenced by atmospheric wind and temperature

物理学报. 2015, 64(10): 100205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.100205>

超导单光子探测器暗计数对激光测距距离的影响

Enhanced laser ranging with superconducting nanowire single photon detector for low dark count rate

物理学报. 2016, 65(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.65.188501>

激光光源线宽对外差探测性能的影响

Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection

物理学报. 2016, 65(8): 084206 <https://doi.org/10.7498/aps.65.084206>

高频共振预探测多脉冲激光测距方法

Multi-pulse laser ranging method for pre-detection with high frequency resonance

物理学报. 2018, 67(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172079>

单光束扩束扫描激光周视探测系统参数对探测能力的影响*

查冰婷^{1)2)†} 袁海璐¹⁾ 马少杰¹⁾²⁾ 陈光宋¹⁾²⁾

1) (南京理工大学, 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

2) (南京理工大学常熟研究院有限公司, 常熟 215513)

(2018 年 10 月 16 日收到; 2019 年 2 月 4 日收到修改稿)

针对现有单光束激光同步扫描周视探测对脉冲重复频率要求较高, 难以实际应用的问题, 提出单光束扩束扫描激光周视探测方法. 基于单光束扩束扫描激光周视探测工作原理, 推导了最低扫描频率和脉冲频率解析式; 分析了圆柱目标回波特性及关键参数截面衰减系数, 建立了脉冲扩束激光圆柱目标回波功率数学模型, 讨论了系统参数对截面衰减系数的影响, 得到最大相邻脉冲光束夹角表达式; 重点分析了脉冲频率、光束角和光束入射角对不同直径目标的探测能力的影响; 得到了探测系统对典型条件下最大光束角、最低脉冲频率的计算方法. 结果表明, 对扫描光束稍加扩束可有效降低脉冲重复频率要求. 研究结果可为单光束脉冲激光周视探测系统设计、优化提供理论依据.

关键词: 单光束扩束扫描激光周视探测, 圆柱目标回波特性, 激光扩束, 脉冲频率

PACS: 06.30.Bp, 42.55.Px, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.68.20181860

1 引言

主动激光探测因受光源、环境、电磁辐射和干扰等因素影响较小, 在远距目标态势感知以及暗弱小目标探测方面有着重要优势^[1-4]. 由多个探测器组成的周视激光近炸引信除充分发挥主动激光探测的优势外, 还能够探测自身全周向 360°范围内的目标距离^[5-7], 将发射激光扩束, 能够扩大单个探测器的探测范围, 减少探测器个数^[8,9], 但是经过大角度扩束的激光光束将导致能量分散从而限制其探测距离. 单光束激光同步扫描周视探测能够在探测目标距离的同时探测目标方位, 通过旋转扫描实现对周视目标的探测, 然而没有经过被扩束的单光束激光同步扫描虽然提高了探测距离, 对激光脉冲重复频率却提出较高的要求^[10]. 对于单光束脉

冲激光扫描周视探测系统, 寻找满足探测距离的发射激光束最大光束角以及扫描周视探测不漏捕获目标的最低脉冲频率对周视探测系统降低激光脉冲频率、提高周视探测能力有着重要参考意义.

针对单光束脉冲激光扫描周视探测, 文献^[11,12]建立了单光束扫描激光引信目标回波功率计算模型, 获得了探测不同距离目标的最大捕获率和相应的激光扫描频率和脉冲频率; 文献^[13]运用蒙特卡罗算法分析了激光脉冲频率和电机扫描转速对周向探测系统探测目标概率的影响, 得到脉冲频率为 20 kHz 时, 能在探测距离为 3 m 内有效探测目标的结论, 但对脉冲频率的要求较高, 有一定的局限性. 文献^[14-16]建立了平面目标模型, 分析了激光探测空中目标回波特性, 但未分析圆柱目标在激光探测回波特性方面的问题^[17].

本文基于单光束扩束扫描脉冲激光周视探测

* 国家自然科学基金 (批准号: 51709147) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 309171B8805, 30918012201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhabingting@njjust.edu.cn

系统工作原理, 推导了最低脉冲频率解析式; 基于圆柱目标表面特性, 建立了脉冲激光近程探测目标回波方程和截面衰减系数 $K(R)$ 的数学模型, 分析了入射角、投影面上光束中心线偏角以及投影面光束角对 $K(R)$ 的影响并得到不漏捕获目标需要满足的最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max}$ 表达式; 分析了最小脉冲频率、激光入射角、光束角对不同直径目标的探测能力的影响; 通过理论仿真分析进行参数设计得到满足系统最小探测功率的最低扫描频率 $n_{\min}$ 、最大光束角 $\theta_{\max}$ 以及最低脉冲频率 $f_{\min}$.

2 最低扫描频率和脉冲频率条件

单光束扩束扫描激光周视探测安装于弹体前端用于探测和识别空中近程目标的方位和距离信息^[18,19]. 该系统包括激光器、激光器发射准直透镜、扩束透镜、光束扫描折转机构、接收聚焦透镜、光电探测器、放大滤波电路以及信号处理电路. 激光器发射的激光束经过发射准直透镜准直再经过扩束透镜扩束后, 由扫描折转机构折转后出射, 激光束照射到目标表面并发生反射, 目标回波光束再被扫描折转机构偏转进入接收系统经放大滤波后进行信号处理, 如图 1 所示.

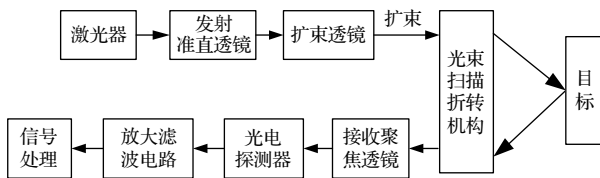


图 1 单光束扩束扫描激光周视探测系统结构

Fig. 1. The structure of a single beam expanding beam scanning laser periscope detection system.

采用扫描方法会导致探测场区域出现周期性的探测盲区, 这是同步扫描周视方案的固有缺陷. 只有当扫描频率足够快时, 由此产生的探测盲区才不会明显地影响探测系统的性能, 与此同时, 采用脉冲激光探测将在时间上出现间断性的盲区, 需要通过提高脉冲频率加以改善, 这对脉冲激光器提出了较高要求. 由于空气对激光束的衰减作用非常微弱, 为充分利用发射功率提高系统探测精度, 通过柱面镜将激光器出射的点光束单向扩束为窄带光束后再经扫描折转机构出射, 形成极薄的小扇形光束, 经过扩束后的激光束能够有效增大单光束的探测区域从而降低激光脉冲频率.

扩束扫描激光周视探测系统工作在弹体与目标的遭遇段, 且相遇时通常为迎面攻击目标. 假设弹体自身与目标均做匀速直线运动, 其速度矢量方向与各自轴线一致, 并且激光探测时先探测到目标的前端.

在弹体坐标系中, 单光束脉冲激光周向扫描探测系统探测目标情况如图 2 所示.

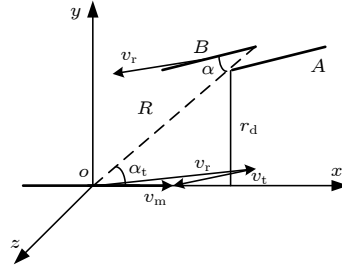


图 2 单光束脉冲激光周向扫描探测系统探测目标示意图^[11]

Fig. 2. Schematic diagram of detection target of single-beam pulsed laser circumferential scan detection system.

激光束与系统纵轴成 α_t 角度出射, 与目标夹角 α , 激光束扫描周期为 T , 在一个扫描周期内目标沿相对速度方向从 A 位置运动到 B 位置, 弹体速度为 v_m , 目标速度为 v_t .

基于周向扫描探测系统的工作原理, 在一个扫描周期中由多条激光束共同构成周向光束场, 从 x 轴正方向观察一个扫描周期内的脉冲光束如图 3 所示.

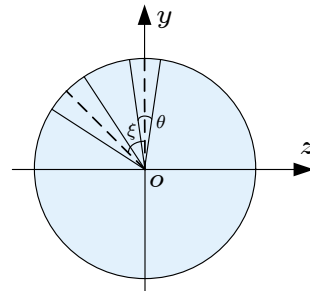


图 3 沿 x 轴正方向脉冲光束视图

Fig. 3. Pulse beam view in the positive direction of the x -axis.

在图 3 中, 各相邻光束间的夹角之和为 2π , 为保证每个扫描周期中的激光束数量相同且各相邻光束之间的夹角一致, 在扫描频率和脉冲频率设计时应使相邻光束之间的夹角 ξ 的整数倍恰等于 2π , 即:

$$k\xi = 2\pi, \quad (1)$$

其中, $k \in \mathbb{Z}$, 表示一个扫描周期内有 k 条激光束即 k 个探测点.

激光引信为提高探测距离和测距精度, 所用脉冲激光的占空比 q 非常小 ($\leq 1\%$), 若脉冲周期为 T_m , 则两次脉冲时间间隔 $t = (1 - q) T_m \geq 99\% T_m$, 故直接以脉冲周期 T_m 作为两相邻脉冲的时间间隔. 若扫描频率为 $n(\text{r/s})$, 脉冲频率为 $f(\text{Hz})$, 相邻脉冲间转过的角度 $\xi(\text{rad})$ 为

$$\xi = 2\pi n T_m = 2\pi n / f. \quad (2)$$

相邻光束之间的夹角称为目标方位识别激光探测系统的最低角度分辨率, 表示系统所能分辨的最小角度. 在单光束脉冲激光扫描探测系统中, 设计激光脉冲频率 f 大小为系统扫描频率 n 的整数倍. 为保证不漏捕目标单个扫描周期内至少需要有 $k_{\min}$ 条激光束:

$$k_{\min} = 2\pi / \xi_{\max}. \quad (3)$$

当探测系统与目标相对平行交会, 即 $\alpha = \alpha_t$ 时 $n_{\min}$ 取得极大值, 最低扫描频率为

$$n_{\min} = (v_t + v_m) / L_t, \quad (4)$$

其中 L_t 为目标长度^[11]. 最低脉冲频率为

$$f_{\min} = 2\pi n_{\min} / \xi_{\max}. \quad (5)$$

3 脉冲扩束激光束圆柱目标回波功率模型

3.1 圆柱目标的回波特性

弹体与目标距离 R , 在 R 处与面 oyz 平行的平面 M 和目标相交, 以 o 点在平面 M 的投影 o_m 为原点建立平面坐标系, 相邻脉冲激光束在面 M 上的投影如图 4 所示.

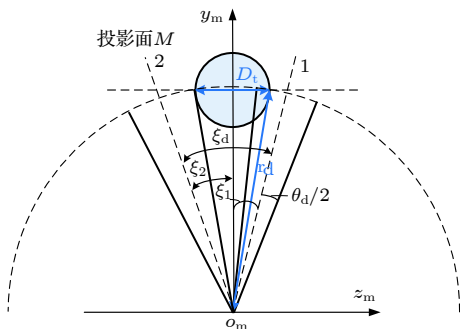


图 4 相邻脉冲激光束在面 M 上的投影
Fig. 4. Projection of adjacent pulsed laser beam on plane M .

图 4 所示为相邻脉冲光束探测圆柱目标时在投影面 M 上的示意图, D_t 表示目标直径, θ_d 表示

光束角 θ 在投影面 M 上的投影角, ξ_d 表示最大相邻脉冲光束夹角在投影面 M 上的投影角. 当回波功率满足系统最小探测功率时, 得到系统最低脉冲频率 $f_{\min}$, 最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max}$ 与最大光束角 $\theta_{\max}$. 激光束与目标圆相切时切点到 x 轴的垂直距离为 r_d , 有:

$$r_d = R \sin \alpha_t. \quad (6)$$

ξ_d 与弹体发射相邻脉冲激光束夹角 ξ 的关系如图 5 所示.

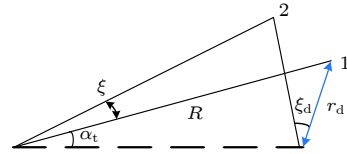


图 5 发射激光束与投影图像几何关系

Fig. 5. Geometrical relationship between the laser beam and the projected image.

根据几何关系有

$$R \sin(\xi/2) = r_d \sin(\xi_d/2), \quad (7)$$

因此有

$$\xi = 2 \arcsin(\sin(\xi_d/2) \sin \alpha_t). \quad (8)$$

同样地:

$$\theta = 2 \arcsin(\sin(\theta_d/2) \sin \alpha_t), \quad (9)$$

且设置约束条件 $0 < \xi < \xi_{\text{边界}}$, $0 < \theta < \theta_{\text{边界}}$.

假设探测区域内, 接收视场将发射视场完全覆盖, 激光束在 R 处只有部分照射到目标表面, 位于 R 处的激光束照亮的面积为 $S / \cos(\pi/2 - \alpha)$, 同时也是发射光束与接收视场角相交截面面积, S 为距离 R 处光束光斑截面面积. η 代表光学系统效率, 将照射到目标表面的光斑面积与位于 R 处的激光束光斑面积之比定义为激光扩束后部分照射造成的衰减, 用截面衰减系数 $K(R)$ 表示:

$$K(R) = S_1 / S_2, \quad (10)$$

式中 S_1 代表激光束照射到目标部分的截面积, S_2 代表发射视场在 R 处光束的截面积. 目标所受的激光照度 $E(R)$ 为

$$E(R) = \frac{P_t \eta \cos(\pi/2 - \alpha)}{S} K(R) e^{-2\sigma R}, \quad (11)$$

则接收视场角内目标的辐射通量 $\phi(R)$ 为

$$\phi(R) = E(R) S / \cos(\pi/2 - \alpha). \quad (12)$$

选用四参数单站 BRDF 模型 f_r 表示目标反射特性^[20]:

$$f_r = \frac{A}{\cos^6 \alpha} \exp(-\tan^2 \alpha / s^2) + B \cos^m \alpha, \quad (13)$$

式中第一项为镜面反射分量, 第二项为漫反射分量, α 为激光入射角. 由图 2 可知激光入射角为光束发射角与目标之间的夹角, 当探测系统与目标平行交会时有 $\alpha = \alpha_t$. A , B , s , m 是由目标表面材质决定的待定系数, 其中 A 为镜面反射幅度, B 为漫反射幅度, s 为表面倾斜系数, m 为漫反射系数. 目标表面为涂白漆铝板, 拟合得到的参数为 $A = 0.3$, $B = 0.25$, $s = 0.25$, $m = 1$ [1].

目标在视场角方向的辐射强度为

$$I(R) = f_r \phi(R) / \pi, \quad (14)$$

圆柱目标表面激光回波功率方程为

$$P_r = \frac{I(R) A_r}{R^2} = \frac{P_t \eta K(R) e^{-2\sigma R} f_r A_r}{\pi R^2}, \quad (15)$$

式中 P_r 表示接收功率, P_t 表示激光器发射功率, σ 代表大气衰减系数, A_r 代表接收机光学系统孔径面积. 由 (15) 式可知回波功率与 $K(R)$, R 和 α_t 有关, 截面衰减系数 $K(R)$ 随着激光束与圆柱目标的位置变化在 $[0, 1]$ 内变化.

假设激光器发射功率为 70 W, 大气衰减系数为 0.00054 m^{-1} [21], 圆柱目标表面激光回波功率与 $K(R)$, R , α_t 的关系如图 6(a)—图 6(c) 所示. 从图 6(a) 可知, 当截面系数恒定时, 目标回波功率随着探测距离增加在急剧减小, 当 $0 < R < 3 \text{ m}$ 时, 回波功率下降迅速; $3 < R < 10 \text{ m}$ 时, 回波功率随着探测距离增加下降速度减缓. 同时从图 6(a) 可知, 在探测距离一定时, 回波功率随截面衰减系数增加而增加. 当 $R = 6.7 \text{ m}$, 截面衰减系数 $K(R) = 0.1$ 时, 回波功率小于最小探测功率. 因此在一定的探测距离内, 增加截面衰减系数值可以有效增大回波功率. 对比图 6(a)—图 6(c) 可得, 当探测距离和截面衰减系数相同时, 回波功率随着激光入射角的增大而减小, 因此减小激光入射角有利于提高系统回波功率. 但是激光入射角太小会降低目标捕获概率, 因此选择合适的激光入射角对目标捕获十分重要.

3.2 截面衰减系数 $K(R)$ 的数学模型

目标回波功率低于系统最小探测功率激光引信无法探测到目标. 计算满足系统最小探测功率的最大 ξ 及最大 θ 值需要对探测过程中激光扩束后部分照射造成的截面衰减系数 $K(R)$ 进行分析.

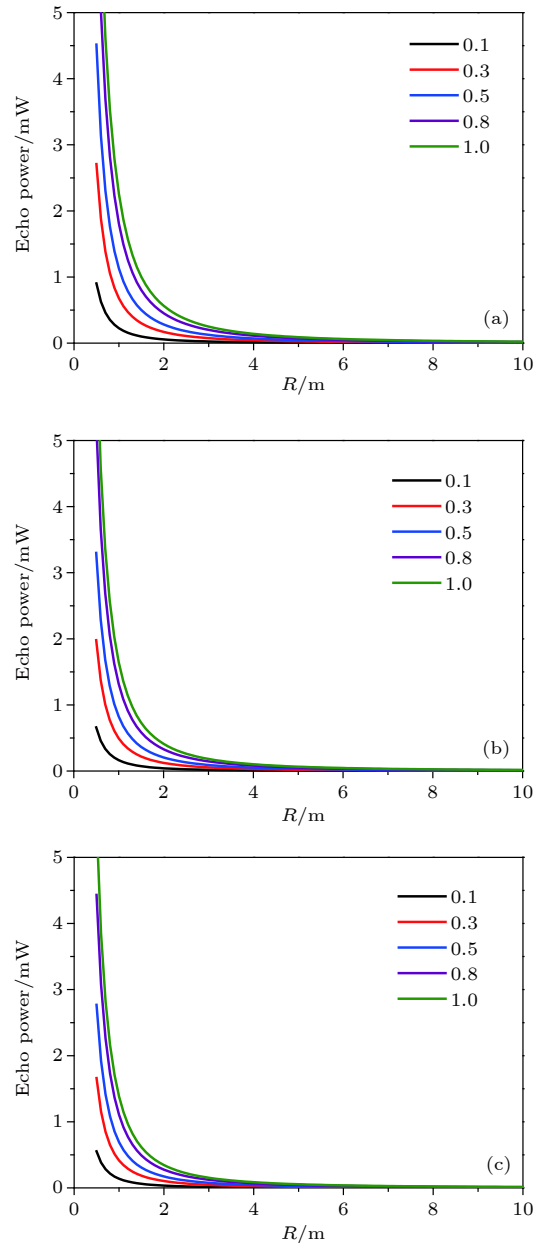


图 6 回波功率 P_r 与 $K(R)$, R , α 之间的关系 (a) $\alpha_t = \pi/6$; (b) $\alpha_t = \pi/4$; (c) $\alpha_t = \pi/3$

Fig. 6. The echo power with different $K(R)$, R and α : (a) $\alpha_t = \pi/6$; (b) $\alpha_t = \pi/4$; (c) $\alpha_t = \pi/3$.

$K(R)$ 数学模型如图 7 所示.

如图 7(a) 所示, 在投影面 M 上光束中心线与 $o_m y_m$ 轴夹角为 ξ_1 , 假设光束左边沿线与目标圆总是有交点. 当光束中心线在位置 1 时, 即 $0 < \xi_1 < \arcsin(D_t/2r_d)$, 若光束右边沿线与目标圆同样有交点, 则 $K(R) = 1$, 若光束右边沿线与目标圆没有交点, 有 $1/2 < K(R) < 1$; 当光束中心线在位置 2, 即与目标圆相切时, $\xi_1 = \arcsin(D_t/2r_d)$, $K(R) = 1/2$; 当光束中心线在位置 3 时, 即 $\arcsin(D_t/2r_d) <$

$\xi_1 < \pi/2$, 有 $0 < K(R) < 1/2$. 光束中心线在位置 3 处, 即 $K(R)$ 取值范围最小时, 得到光束左边沿与目标圆总是有交点的探测情况系统最小回波功率.

光束左边沿 f_1 与目标圆相交于两点, 取靠近原点 o_m 的交点 A , 过 A 点做光束中心线 f_3 的垂线, 交切线 f_t 于点 C , 交 f_2 于点 B , 交 f_3 于 O' 点, 在位置 1 和位置 3 的光束截面 $AO'B$ 如图 7(b) 所示.

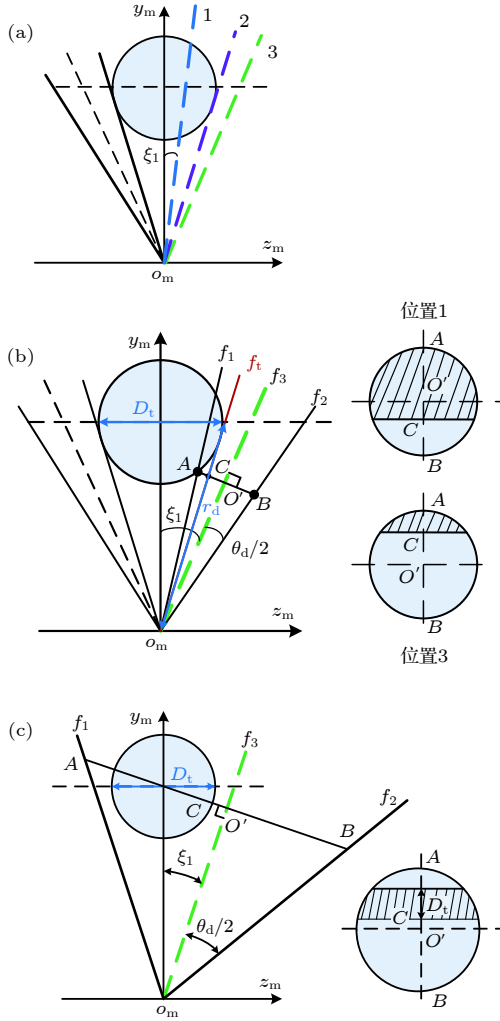


图 7 $K(R)$ 数学模型 (a) 光束中心线位置示意图; (b) 光束左边沿与目标相交时 $K(R)$ 模型; (c) 光束左边沿与目标相离时 $K(R)$ 模型

Fig. 7. Mathematical model of $K(R)$: (a) The position of the center line of the beam; (b) the $K(R)$ model when the left side of the beam intersects the target; (c) the $K(R)$ model when the left side of the beam is separated from the target.

若光束左边沿 f_1 与目标圆无交点, 如图 8(c) 所示, 在 $0 < \xi_1 < \pi/2$ 内, 过目标圆心做光束中心线 f_3 的垂线, 交光束边沿 f_1, f_2 于 A, B 两点, 与

目标圆的右交点为 C , 截面 $AO'B$ 中所示阴影部分为此时目标在光束中所占面积. 此时 $0 < K(R) < 1/2$.

综上所述, 当光束中心线在图 7(a) 中位置 3 处时可找到满足系统最小探测功率的最大 ξ 值, 以下研究均为光束中心线在位置 3 处且光束右边沿与目标无交点的情况下开展, 坐标系 $o_m z_m y_m$ 中, 目标圆方程为

$$z^2 + \left(y - \sqrt{r_d^2 - (D_t/2)^2} \right)^2 = (D_t/2)^2. \quad (16)$$

图 7(b) 中 f_t 表示过原点 o_m 与目标圆相切的直线, 表示为

$$y = z \sqrt{4r_d^2 - 2D_t^2}/D_t. \quad (17)$$

当光束左边沿 f_1 与目标圆总有交点时,

$$\begin{cases} \arcsin(D_t/2r_d) < \xi_1 < \pi/2 \\ \xi_1 - \arcsin(D_t/2r_d) \leq \theta_d/2 \leq \xi_1 + \arcsin(D_t/2r_d), \\ \theta < \theta_{\text{边界}} \end{cases} \quad (18)$$

图 7(b) 中阴影部分面积表示为 S_1 , 圆 O' 的总面积表示为 S_2 . 在图 7(b) 的位置 3 处有:

$$\begin{cases} S_1 = |O'A| \arccos\left(\frac{|O'C|}{|O'A|}\right) - \\ |O'C| \sqrt{|O'A|^2 - |O'C|^2}, \\ S_2 = \pi |O'A|^2, \end{cases} \quad (19)$$

此时

$$K(R) = \frac{S_1}{S_2} = \frac{\arccos(k)}{\pi |O'A|} - \frac{k\sqrt{1-k^2}}{\pi}, \quad (20)$$

其中 $k = \frac{|O'C|}{|O'A|}$, 当相邻激光束前一激光束照射到目标表面, 后一激光束与目标相切时得到相邻激光束不漏测目标的最大夹角 $\xi_{\max}$, 在投影面 M 上相邻脉冲激光束之间的夹角为

$$\begin{aligned} \xi_d &= \xi_1 + \xi_2 \\ &= \xi_1 + \arcsin(D_t/2r_d) + \theta_d/2. \end{aligned} \quad (21)$$

当光束左边沿 f_1 与目标圆没有交点时, 如图 7(c) 所示,

$$\begin{cases} \arcsin(D_t/2r_d) < \xi_1 < \pi/2 \\ \theta_d/2 > \xi_1 + \arcsin(D_t/2r_d) \\ \theta < \theta_{\text{边界}}. \end{cases} \quad (22)$$

此时有

$$K(R) = \frac{\arccos(k) - \arccos(k')}{\pi|AO'|} - \frac{k\sqrt{1-k^2} - k'\sqrt{1-k'^2}}{\pi}, \quad (23)$$

其中 $k' = (|CO'| + D_t)/|AO'|$, 此时相邻激光束最大夹角 $\xi_{\max}$ 在投影面 M 上相邻脉冲激光束之间的夹角为

$$\xi_d = \theta_d. \quad (24)$$

图 8 所示为 $K(R)$ 与参数 α_t , ξ_1 和 θ_d 的关系曲线, 图 8(a) 为光束中心线在图 7(a) 中的位置 3 处 α_t , θ_d 对 $K(R)$ 的影响曲线, 随着 α_t 的增大 $K(R)$ 值逐渐减小, 随着 θ_d 的增大 $K(R)$ 值逐渐增大. 图 8(b) 表示各参数对 $K(R)$ 的影响, 随着 ξ_1 增大 $K(R)$ 值逐渐减小, 结合 (8) 式和 (9) 式可知, 相邻脉冲光束夹角 ξ 与 ξ_d 成正相关, 光束角 θ 与 θ_d 成正相关, 结合 (21) 式可知 ξ_d 随着 ξ_1 的增大而增大, 若要得到较小的脉冲频率, 需要选择较大的 ξ_1 值与 θ_d 值.

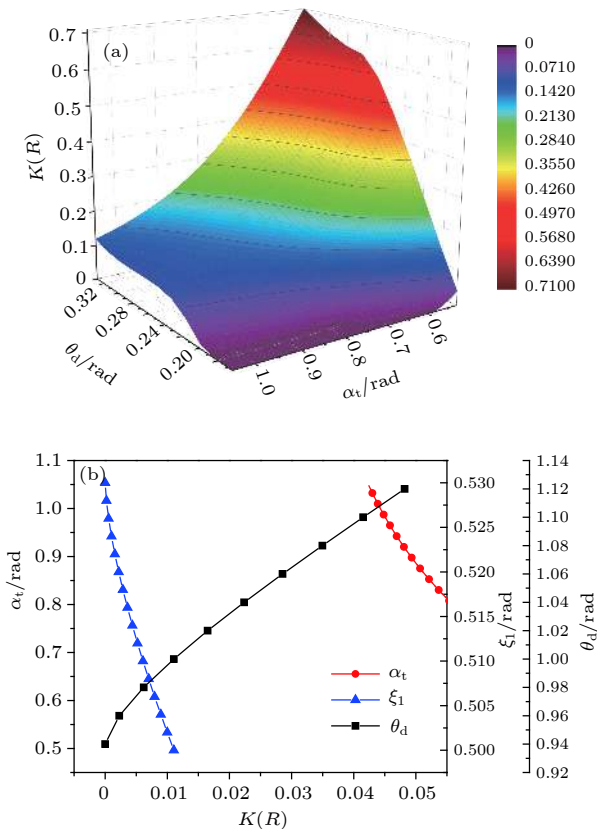


图 8 $K(R)$ 与 α_t , ξ_1 和 θ_d 之间的关系 (a) α_t , θ_d 与 $K(R)$ 的关系; (b) α_t , ξ_1 和 θ_d 对 $K(R)$ 的影响曲线

Fig. 8. The relationship between $K(R)$ and α_t , ξ_1 and θ_d : (a) The relationship between $K(R)$ and α_t , θ_d ; (b) the influence curve of α_t , ξ_1 and θ_d on $K(R)$.

4 系统探测能力影响分析

4.1 对不同直径目标的探测能力分析

单光束扩束扫描激光周视探测系统探测能力即激光脉冲频率 f , 激光入射角 α_t 和光束角 θ 对探测距离 R 、探测目标直径 D_t 的影响, 本文关注的重点是这些参数对不同探测目标直径的影响. 周视探测系统仿真参数如表 1 所列.

表 1 探测系统仿真参数

Table 1. Simulation parameters of the detection system.

Parameter	Value	Parameter	Value
P_t/W	70	$P_{\min}/\mu\text{W}$	5
$v_m/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	700	$v_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	200
L_t/m	3	η	0.9
A_r/m^2	0.00031	σ/m^{-1}	0.00054
$\theta_{\text{边界}}/\text{rad}$	0.26	$\xi_{\text{边界}}/\text{rad}$	$\pi/2$

单光束扩束扫描激光周视探测系统探测目标最低激光脉冲频率 f , 激光入射角 α_t 和光束角 θ 对能够探测的不同目标直径 D_t 的影响曲线如图 9 所示. 从图 9(a) 可知, 当光束角一定时, 随着激光脉冲频率增加, 可探测目标直径越来越小, 探测能力越来越高. 在某一脉冲频率下, 随着光束角增大, 系统探测能力也有所提高. 在图 9(a) 中, 当 $\theta < 0.05$ rad 时, 目标与激光束位置关系满足图 7(b) 中的位置 3 时能够得到探测到目标的最小脉冲频率, 当 $\theta > 0.05$ rad 时, 出现某些直径目标在与激光束位置为图 7(c) 所示情况时得到的脉冲频率相比于图 7(b) 中的位置 3 处更小, 如 $\theta = 0.1$ rad 时, 若脉冲频率达到 18850 Hz, 则探测系统可以探测直径小于 76 mm 的所有目标. 随着光束角增大, 满足探测要求的最小脉冲频率逐渐减小, 图 7(c) 中的位置得到的最小脉冲频率可满足探测能力的目标直径范围将逐渐扩大. 因此, 增大光束角即发射激光束扩束有利于降低最小激光脉冲频率. 对比图 9(a)—图 9(c) 可得, 随着激光入射角 α_t 增大, 某一确定光束角下探测目标直径所需的最低脉冲频率越来越大. 因此, 降低激光入射角有利于降低探测目标所需的最小激光脉冲频率. 但是光束角的增大会降低激光能量, 因此设计合适的光束角对降低激光脉冲频率以及有效探测目标极为重要.

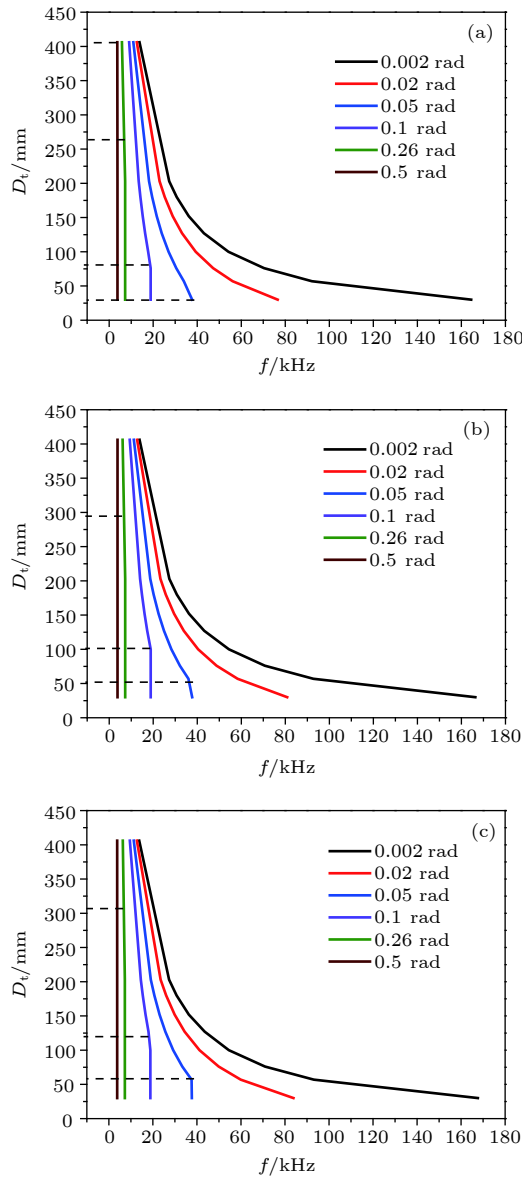


图9 脉冲频率 f 、光束角 θ 和光束入射角 α_t 对不同目标直径的影响 (a) $\alpha_t = \pi/6$; (b) $\alpha_t = \pi/4$; (c) $\alpha_t = \pi/3$
Fig. 9. Effects of pulse frequency f , beam angle θ , and beam incidence angle α_t on targets with different diameters: (a) $\alpha_t = \pi/6$; (b) $\alpha_t = \pi/4$; (c) $\alpha_t = \pi/3$.

4.2 光束角及最低脉冲频率计算

由表1并结合(4)式可得到 $n_{\min} = 300$ r/s, 当光束入射角 α_t 分别为 $\pi/3$, $\pi/4$ 和 $\pi/6$ 时, 在图7(b)所示的位置3处和图7(c)的位置讨论满足系统最小探测功率 $P_{\min} = 5 \mu\text{W}$ [7] 时的最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max}$ 、最大光束角 $\theta_{\max}$ 以及最小脉冲频率 $f_{\min}$. 考虑最大相邻脉冲光束夹角将影响最小脉冲频率的取值, 在选择 $\xi_{\max}$ 与光束角 $\theta_{\max}$ 时优先选择最大相邻脉冲光束夹角.

计算不同入射角 α_t 在探测距离为 6 m, 探测目

标直径为 0.18 m 时的最低脉冲频率及光束角. 在探测距离为 6 m 时, 不考虑扩束, 最低脉冲频率条件下目标回波功率 $P_r = 9.275 \times 10^{-5}$ W, 远大于最小探测功率 $5 \mu\text{W}$, 此时对激光束进行扩束, 在光束角逐渐增大的过程中, 必然存在回波功率逐渐降低, 当回波功率达到最小探测功率时则找到满足最小探测功率要求的最大光束角.

结合不等式组(18)式, 当光束左边沿线 f_l 与目标圆总有交点时, 得到某一光束倾斜角下 ξ_1 的取值区间, 从区间最大 ξ_1 开始试取值, 每一个 ξ_1 值对应一个 θ_d 取值区间, 将(19)式和(20)式代入目标回波功率方程(15)式, 得到目标回波功率为最小探测功率时最大 ξ_1 值与对应的 θ_{d1} 值, 代入(21)式得到 ξ_{d1} ; 当光束左边沿线 f_l 与目标圆总是没有交点时, 结合不等式组(22)式得到在同一光束倾斜角下 ξ_1 值区间, 从区间最大 ξ_1 开始试取值, 结合(23)式得到目标回波功率满足最小探测功率时的 θ_{d2} 值, 代入(24)式得到 ξ_{d2} , 比较 ξ_{d1} 与 ξ_{d2} , 取较大值代入(8)式和(9)式得到最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max}$ 与相应的最大光束角 $\theta_{\max}$. 计算中的系统参数值列于表2.

表2 计算最低脉冲频率及光束角系统参数

Table 2. Calculate the minimum pulse frequency and beam angle system parameters.

Parameter	Value	Parameter	Value
P_t/W	70	D_t/m	0.18
R/m	6	α_t	$\pi/3, \pi/4, \pi/6$

图10(a)表示同一 ξ_1 值下, f_l 与目标圆总有交点和没有交点时, θ_d 与回波功率的关系曲线, 中心线左侧曲线对应 f_l 与目标圆总有交点, 右侧对应 f_l 与目标圆没有交点, 图10(b)为不同 ξ_1 值下 θ_d 与回波功率的关系曲线, 如图10(b)所示, 回波功率随 ξ_1 增大而减小, 以最小探测功率为界可以把曲线分为三类, 第一类为 f_l 与目标圆总有交点时存在 θ_d 使回波功率满足最小探测功率; 随着 ξ_1 增大, 得到第二类曲线, 为 f_l 与目标圆总有交点时回波功率总小于最小探测功率, f_l 与目标圆没有交点的回波功率曲线恒大于最小探测功率, 随着 ξ_1 继续增大, f_l 与目标圆没有交点的回波功率曲线出现 θ_d , 使回波功率小于最小探测功率; 第三类曲线不论 f_l 与目标圆是否有交点回波功率恒小于最小探测

功率. 这三类曲线相交边界处的曲线所对应的 ξ_1 与 θ_d 分别表示满足边界条件的最大 ξ_1 与其对应的 θ_d .

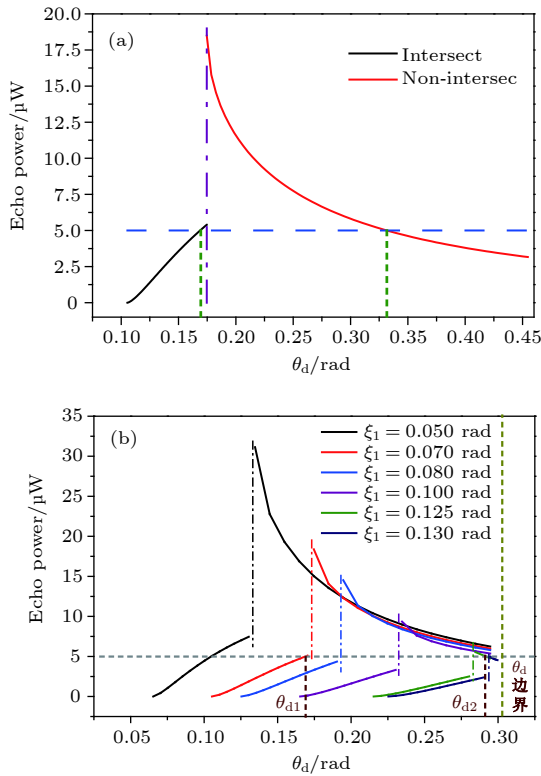


图 10 最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max}$ (a) f_1 与目标圆位置关系曲线; (b) θ_{d1} 与 θ_{d2} 取值计算

Fig. 10. Maximum angle $\xi_{\max}$ between adjacent pulse beams: (a) The relation curve between f_1 and the position of the target circle; (b) value of θ_{d1} and θ_{d2} .

当 $\alpha_t = \pi/3$ 时, 如图 11(a) 所示, 第一类曲线的最大 $\xi_1 = 0.07$ rad, 此时 $\theta_{d1} = 0.169$ rad, 结合 (21) 式得到 $\xi_{d1} = 0.1718$ rad, 第二类曲线的最大 $\xi_1 = 0.125$ rad, $\theta_{d2} = 0.2896$ rad, 结合 (24) 式得到 $\xi_{d2} = 0.2896$ rad, $\xi_{d2} > \xi_{d1}$, 取较大值 ξ_{d2} , θ_{d2} , 结合 (8) 式和 (9) 式得到最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max} = 0.2506$ rad, 结合 (3) 式, 为满足 $k_{\min}$ 取整数, 需调整 $\xi_{\max} = 0.2417$ rad, 此时 $k_{\min} = 26$, 光束角 $\theta_{\max} = 0.2417$ rad, 结合 (5) 式即可得到系统最小脉冲频率 $f_{\min} = 7798.74$ Hz. 当 $\alpha_t = \pi/4$ 及 $\alpha_t = \pi/6$ 时, 第二类曲线在 θ_d 取值边界之前都没有取到回波功率为最小探测功率的边界值, 在取值区间内取最大 ξ_1 值进行计算, 并结合 (3) 式对结果进行调整.

激光器发射激光光束角一般为 2—3 mrad, 根据文献 [12] 提供的计算方法可以得到满足最小探测功率的最低脉冲频率 f 、最大相邻脉冲夹角 ξ 以

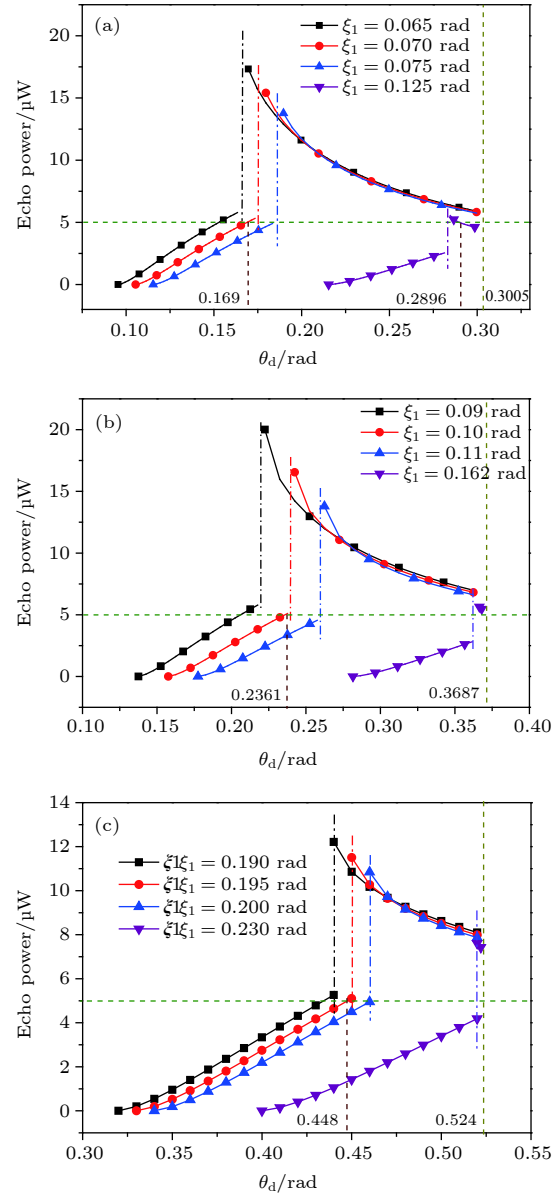


图 11 ξ_1 和 θ_d 对系统回波功率的影响 (a) $\alpha_t = \pi/3$; (b) $\alpha_t = \pi/4$; (c) $\alpha_t = \pi/6$

Fig. 11. Influence of ξ_1 and θ_d on echo power. (a) $\alpha_t = \pi/3$; (b) $\alpha_t = \pi/4$; (c) $\alpha_t = \pi/6$.

及单周期内激光数 k , 与文中对激光束进行扩束后计算得到最低激光束 $k_{\min}$ 、最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max}$ 、最大光束角 $\theta_{\max}$ 以及最低脉冲频率 $f_{\min}$ 的对比结果如表 3 所列.

表 3 为探测距离一定时, 满足最小探测功率的激光束扩束前后各参数的变化, 发射激光束经过扩束后对脉冲频率降低发挥了显著的作用. 扩束前后对系统探测精度基本没有影响. 设计单脉冲激光周向扫描探测系统的最大光束角 $\theta_{\max}$ 以及最低脉冲频率 $f_{\min}$, 在满足不等式组 (22) 式的 θ 可取区间内, 取小于 $\theta_{\max}$ 的任一 θ 值均可满足目标回波功率大于

表 3 不同入射角 α_t 下的 $n_{\min}$, $\xi_{\max}$, $\theta_{\max}$ 以及 $f_{\min}$
 Table 3. $n_{\min}$, $\xi_{\max}$, $\theta_{\max}$ and $f_{\min}$ at different incident angles α_t .

入射角		扩束前			扩束后			
α_t /rad	ξ /rad	θ /rad	k	f /Hz	$\xi_{\max}$ /rad	$\theta_{\max}$ /rad	$k_{\min}$	$f_{\min}$ /Hz
$\pi/3$	0.0345	0.0025	182	54411	0.2417	0.2417	26	7798.74
$\pi/4$	0.0422	0.0025	149	44425	0.2513	0.2513	25	7500.82
$\pi/6$	0.0598	0.0025	105	31411	0.2513	0.2513	25	7500.82

最低探测功率, 同样在确定光束角 θ 后, 脉冲频率 f 大于 $f_{\min}$ 的任一值均可满足目标回波功率大于最低探测功率.

5 结 论

本文基于单光束扩束扫描激光周视探测工作原理, 推导了最低扫描频率和脉冲频率解析式; 分析了圆柱目标回波特性, 建立了截面衰减系数 $K(R)$ 和脉冲扩束激光圆柱目标回波功率数学模型, 讨论了入射角 α_t 、光束中心线偏角 ξ_1 以及投影面光束角 θ_d 对 $K(R)$ 的影响并得到不漏测目标需要满足的最大相邻脉冲光束夹角 $\xi_{\max}$ 表达式; 重点分析了脉冲频率、激光入射角、光束角对不同直径目标的探测能力的影响; 对于典型探测条件, 计算得到了满足系统最小探测功率的最低扫描频率 $n_{\min}$ 、最大光束角 $\theta_{\max}$ 以及最低脉冲频率 $f_{\min}$. 分析和计算结果表明对于扫描周视激光探测系统采用激光扩束的方法能够有效降低脉冲频率要求, 通过系统参数优化能够提高脉冲激光周向扫描探测发射功率能量利用率、减小激光发射器的负担. 研究结果可为单光束脉冲激光周视探测系统设计、优化提供理论依据.

参考文献

- [1] Yang Y C, Tan B T, Long C, Cen L Z, Zhang J H, Chen J Y 2013 *Infrared and Laser Engineering* **42** 3228 (in Chinese) [杨雨川, 谭碧涛, 龙超, 陈力子, 张己化, 陈军燕 2013 *红外与激光工程* **42** 3228]
- [2] Huang T, Hu Y H, Zhao G, Zhao N X, Zhai F Q, Wu Y H 2011 *J. Infrared Millim. Waves* **30** 179 (in Chinese) [黄涛, 胡以华, 赵钢, 赵楠翔, 翟福琪, 吴永华 2011 *红外与毫米波学报* **30** 179]
- [3] Zhao N X, Hu Y H, Lei W H, He M 2009 *Infrared and Laser Engineering* **38** 748 (in Chinese) [赵楠翔, 胡以华, 雷武虎, 贺敏 2009 *红外与激光工程* **38** 748]
- [4] Xu X W 2004 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [徐效文 2004 博士学位论文 (长春: 中国科学院研究生院)]
- [5] Li Y, Li Y H, Li L, Guo H C, Zhang Y M, Wen Y Q 2015 *Acta Armamentarii* **36** 2073 (in Chinese) [李元, 李燕华, 李洛, 郭海超, 张彦梅, 温玉全 2015 *兵工学报* **36** 2073]
- [6] Lin Y B, Zhang G X, Li Z, Li X H 2002 *Chin. J. Lasers* **11** 1000 (in Chinese) [林永兵, 张国雄, 李真, 李杏华 2002 *中国激光* **11** 1000]
- [7] Zhang W, Zhang H, Chen Y, Zhang X J, Xu X B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 012901 (in Chinese) [张伟, 张合, 陈勇, 张祥金, 徐孝彬 2017 *物理学报* **66** 012901]
- [8] Zhang L, Guo J 2012 *Optics Precis Eng.* **20** 789 (in Chinese) [张磊, 郭劲 2012 *光学精密工程* **20** 789]
- [9] Zhao Y Z, Song F H, Sun H Y 2007 *Infrared and Laser Engineering* **36** 891 (in Chinese) [赵延伸, 宋丰华, 孙华燕 2007 *红外与激光工程* **36** 891]
- [10] Gan L, Zhang H, Zhang X J, Feng Y 2013 *Infrared and Laser Engineering* **42** 84 (in Chinese) [甘霖, 张合, 张祥金, 冯颖 2013 *红外与激光工程* **42** 84]
- [11] Tan Y Y, Zhang H, Zha B T 2015 *High Pow. Las. Part. Beams* **27** 73 (in Chinese) [谭亚运, 张合, 查冰婷 2015 *强激光与粒子束* **27** 73]
- [12] Zha B T, Zhang H 2014 *Infrared and Laser Engineering* **43** 2081 (in Chinese) [查冰婷, 张合 2014 *红外与激光工程* **43** 2081]
- [13] Xu X B, Zhang H 2016 *Chin. J. Lasers* **43** 201 (in Chinese) [徐孝彬, 张合 2016 *中国激光* **43** 201]
- [14] Kou T, Wang H Y, Wang F, Chen M, Xu Q 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 211 (in Chinese) [寇添, 王海晏, 王芳, 陈闽, 徐强 2015 *光学学报* **35** 211]
- [15] Zhang X S, Guo L, Huang Y, Luo Z T 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 20 (in Chinese) [张旭升, 郭亮, 黄勇, 罗志涛 2015 *中国激光* **42** 20]
- [16] Xu G, Zhang X Y, Su J, Li X T, Zheng A Q 2016 *Appl. Opt.* **55** 2653
- [17] Steinvall O 2000 *Appl. Opt.* **39** 4381
- [18] Cao T, Xiao A C, Wu L, Mao L G 2017 *Comput. Geosci.* **106** 209
- [19] Krása J, Delle S D, Giuffreda E, Nassisi V 2015 *Laser Part. Beams* **33** 601
- [20] Ma Y 2015 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [马圆 2015 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [21] Louis E 1964 *Appl. Opt.* **3** 745

Influence of single-beam expanding scanning laser circumferential detection system parameters on detection capability^{*}

Zha Bing-Ting^{1)2)†} Yuan Hai-Lu¹⁾ Ma Shao-Jie¹⁾²⁾ Chen Guang-Song¹⁾²⁾

1) (*Key Discipline Laboratory of Intelligent Ammunition Technology National Defense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

2) (*Changshu Research Institute Co.Ltd, Nanjing University of Science and Technology, Changshu 215513, China*)

(Received 16 October 2018; revised manuscript received 4 February 2019)

Abstract

Aiming at the high requirement for pulse-repetition frequency of the existing single-beam synchronous scanning circumferential detection, which is difficult to use practically. The method of single-beam expanding scanning laser circumferential detection is proposed. Based on the principle of single-beam expanding scanning laser circumferential detection, the mode of scanning has an inherent defect of periodic detection blind area in the detection field. The method of one-way spreading laser line beam into fan-shaped beam is proposed. The analytical expression of the lowest scanning frequency and the pulse frequency are derived. Echo characteristics of cylindrical target and the section attenuation coefficient are analyzed. Mathematic model of cylindrical target echo power of pulsed expanding laser beam is established. The mathematical model of section attenuation coefficient of cylindrical object is established, and the variation of the section attenuation coefficient when the center line and the edge of the beam have different positions relative to the cylindrical target is analyzed. The expression of the position having the smallest section attenuation coefficient and the expression of largest angle between the adjacent pulse laser beams are obtained, then the influence of system parameters on the section attenuation coefficient is also discussed. The emphasis is placed on the influence of pulse frequency, beam angle and incidence angle on the ability to detect different diameter targets. As the laser pulse frequency increases, the detectable target diameter is smaller and the detection ability is stronger. Increasing the beam angle and lowering the laser incident angle are beneficial to reducing the minimum laser pulse frequency required to discover the target. The methods of calculating maximum beam angle and minimum pulse frequency under typical conditions of the detection system are presented. When the incident angles are $\pi/3$, $\pi/4$ and $\pi/6$, the maximum beam angle and the lowest pulse frequency are calculated for a cylindrical target with a diameter of 0.18 m at a detection distance of 6 m, the minimum pulse frequency decreases effectively after beam expansion. The results show that the pulse repetition frequency will be effectively reduced by slightly expanding the beam. This study may provide theoretical basis for designing and optimizing the single-beam pulsed laser circumferential detection.

Keywords: single-beam expanding scanning laser circumferential detection, cylindrical target echo characteristics, laser expanding, pulse frequency

PACS: 06.30.Bp, 42.55.Px, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.68.20181860

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51709147) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant Nos. 309171B8805, 30918012201).

[†] Corresponding author. E-mail: zhabingting@njust.edu.cn