

## 基于脱靶量的水下目标激光扫描探测模型

钟 昆, 苏 伟, 彭 波, 黄莎玲, 李中云

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 蓝绿激光在水下目标非声探测中具有广泛的应用前景, 但现有的探测模型尚未考虑探测概率与自导系统的匹配问题。为了获得最佳探测效果, 建立基于脱靶量的水下目标激光周视扫描探测模型。仿真结果表明: 随脱靶量增加, 在相同发射频率下, 增大光束发射倾角能显著提高探测概率, 但减少了后续系统的处理时间; 此外, 随脱靶量增加, 为避免探测漏检, 应提高发射频率, 减小光束发射步进角度。最后, 通过仿真分析给出不同脱靶量下探测系统关键参数的最优设计。文中所建模型对探测系统、自导系统的匹配设计提供了一定的理论参考。

**关键词:** 弹目交会; 激光扫描; 测距系统; 水下探测

**中图分类号:** TJ430 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0203004

## Model of underwater target laser scanning detection based on undershoot distance

Zhong Kun, Su Wei, Peng Bo, Huang Shaling, Li Zhongyun

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** Blue-green laser has broad application prospects in non-acoustic detection of underwater targets. However, the existing detection models have not considered the problem of matching the detection probability with the self-guided system. A target detection model of underwater laser scanning detecting system was established based on undershoot distance to match the guiding precision. The simulation results shows that an increasing undershoot distance needs an increasing emit angle to get high detection probability at a certain emit frequency, which however leads to a decreasing acting time for the following system. In addition, an increasing undershoot distance needs an increasing emit frequency and a decreasing step angle to avoid missing the target. Finally, the simulation provides an optimal range for undershoot distance and system parameter. The model and the simulation results provide theoretic basis for the matching up design of guiding system and detecting system.

**Key words:** warhead/target encounter; laser scanning; ranging system; underwater detection

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61505184)

作者简介: 钟昆(1989-), 男, 博士生, 主要从事水下激光探测技术方面的研究。Email: zkwd314@163.com

导师简介: 苏伟(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要从事微机电系统方面的研究。Email: john4546@126.com

## 0 引言

水下探测在海洋研究领域占据重要地位。随着科学技术的发展,传统的声磁探测中面临着诸多挑战:消声技术和水声对抗技术的发展,导致水声探测效能下降;铝合金及复合材料在水下无人潜航器中的大量应用,导致磁/电磁技术难以对其有效检测<sup>[1-3]</sup>。水下蓝绿激光由于准直性好,定位精度高,抗干扰能力强等优点,逐渐得到水下探测领域研究者的重视和发展<sup>[4-7]</sup>。

蓝绿激光在水下的衰减远大于大气,其在水下工作的探测距离不足以比拟声自导系统。它主要被应用在水下照明成像<sup>[8-9]</sup>、海底地形扫描<sup>[10]</sup>、短途光通信<sup>[11-12]</sup>、近程交会探测<sup>[13]</sup>等方面。当其应用于近程交会探测时,探测系统实际工作在弹道末段,需要在在自导脱靶范围内精确探测目标位置。为了减少传输损耗,通常采用同步扫描的周视探测方法,利用准直光束集中激光能量,增大探测距离<sup>[14]</sup>。激光探测系统的探测概率与系统设计、探测场景以及水体环境等有关。查冰婷等通过理论计算,确定了周视扫描方案中迎击条件下的最低扫描频率,并计算了朗伯反射体在水下的回波功率<sup>[15]</sup>。谭亚运等考虑到水下目标的表面反射特性,引入 4 参数双向反射分布函数(Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF)模型,对反射回波功率进行了更准确的建模,得到 9 m 内不同发射频率和扫描频率下的捕获结果<sup>[16]</sup>。但上述研究中,激光作用距离作为固定参量,未考虑它与自导系统导引精度的匹配问题,无法给出一定脱靶量下的系统探测概率。文中将基于脱靶量建立探测模型,研究探测光束发射倾角、步进角以及发射频率与目标探测概率之间的关系,通过仿真分析获取最优参数设计。

## 1 回波功率探测模型

如图 1 所示,探测系统发射光束以前倾角  $\alpha$ ,间隔角  $\Delta\theta$  进行圆锥式周向扫描。假设在交会过程中,探测系统和目标均沿各自轴向保持匀速直线运动。以探测光束发射起点  $O$  作为弹体坐标系原点,将  $OX_m$  轴选为探测系统轴向,且以系统运动方向为正,

令  $OY_m$  轴垂直  $OX_m$  轴向上,则  $OX_m$  轴、 $OY_m$  轴同  $OZ_m$  轴构成右手坐标系  $OX_m Y_m Z_m$ 。类似地建立以目标几何中心为原点的目标坐标系  $O_i X_i Y_i Z_i$ 。将弹目相对速度坐标系的原点也设置在探测光束发射起点  $O$  处,以相对速度矢量方向为  $OX_r$  轴正方向, $OY_r$  轴垂直  $OX_r$  轴向上,建立弹目相对速度坐标系  $OX_r Y_r Z_r$ 。在弹体坐标系中,探测系统速度记为  $V_m$ ,相对运动速度记为  $V_{mr}$ ;在目标坐标系中,目标速度记为  $V_t$ ,相对运动速度记为  $V_{tr}$ ;在相对速度坐标系中,相对运动速度记为  $V_r$ 。坐标运算中第一个下标字母代表其所在坐标系。

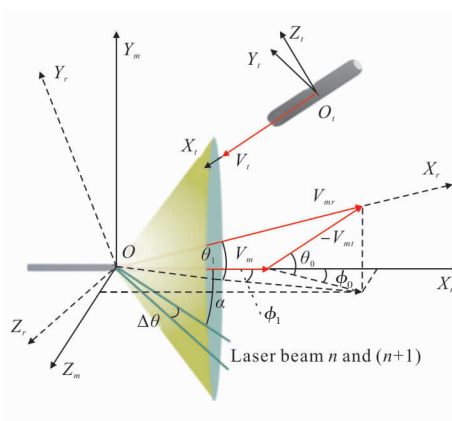


图 1 弹目交会坐标系

Fig.1 Coordinates of warhead/target encounter

目标的偏航角为  $\phi_0$ ,俯仰角为  $\theta_0$ ,则目标坐标系到弹体坐标系之间的转换矩阵为:

$$M_{mr} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 \cos\phi_0 & \sin\theta_0 & -\cos\theta_0 \sin\phi_0 \\ -\sin\theta_0 \cos\phi_0 & \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \sin\phi_0 \\ \sin\phi_0 & 0 & \cos\phi_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

弹体坐标系中,目标的相对速度为:

$$V_{mr} = V_m - M_{mr} V_t \quad (2)$$

在弹目相对速度坐标系中,相对运动速度方向与探测系统轴向并不一定平行,其与系统轴向有一定的“偏航角”和“俯仰角”。迎击条件下,在弹体坐标系中,相对运动速度矢量的  $x_m$  分量不为 0,两个角可定义为:

$$\begin{cases} \phi_1 = -\arctan\left(\frac{V_{mr}(z_m)}{V_{mr}(x_m)}\right) \\ \theta_1 = -\arctan\left(\frac{V_{mr}(y_m)}{|V_{mr}|}\right) \end{cases} \quad (3)$$

由此得到弹体坐标系和弹目相对速度坐标系的旋转转换矩阵:

$$M_{rm} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\phi_1 & \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \sin\phi_1 \\ -\sin\theta_1 \cos\phi_1 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \sin\phi_1 \\ \sin\phi_1 & 0 & \cos\phi_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于坐标原点相同, 相对运动速度矢量在弹体坐标系和弹目相对速度坐标系之间存在如下转换关系:

$$V_r = M_{rm} V_{mr} \quad (5)$$

### 1.1 基于脱靶量的回波功率模型

自导系统导引精度决定了脱靶量分布, 其参数可在弹目相对速度坐标系中给出, 如图 2 所示。设脱靶距离分布为  $f(R_t)$ ,  $R_t \in (0, R_{\max})$ ,  $R_{md} = \bar{R}_t$ , 脱靶方位角  $\beta \in (0, 2\pi)$ 。即在  $OY_r Z_r$  平面上, 脱靶点分布在以  $O$  为圆心, 最大脱靶量  $R_{\max}$  为半径的区域。

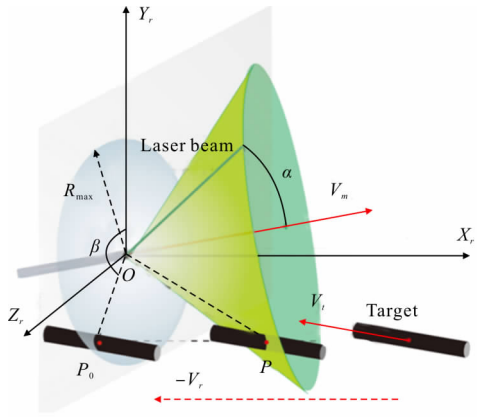


图 2 弹目相对速度坐标系中的交会场景

Fig.2 Intersection view in missile reference velocity coordinate

假设  $OY_r Z_r$  平面上, 某次交会的脱靶点位于  $P_0$ , 弹目相对速度坐标系中, 其坐标为  $x_{r_{p_0}}=0, y_{r_{p_0}}=R_r \cdot \cos\beta, z_{r_{p_0}}=R_r \cdot \sin\beta$ ;  $P_0$  沿相对速度方向  $OX_r$  延伸, 与探测光束扫描锥面相交于点  $P$ , 设  $|P_0 P| = x_{rp}$ , 则在弹目相对速度坐标系中, 探测光束向量  $\overrightarrow{OP}_r = (x_{rp} \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta)$ 。

利用公式(5)将  $\overrightarrow{OP}_r$  转换到弹体坐标系中:

$$\overrightarrow{OP}_m = M_{rm}^T \overrightarrow{OP}_r \quad (6)$$

位于圆锥母线上的  $P$  点满足方程:

$$\cos\alpha = \overrightarrow{OP}_m(x_{mp}) / |\overrightarrow{OP}_m| \quad (7)$$

联立公式(6)、(7)可求出未知参量  $x_{rp}$  并得到  $\overrightarrow{OP}_r$ , 进而通过公式(6)得到  $P$  点在弹体坐标系中的坐标  $\overrightarrow{OP}_m = (x_{mp}, y_{mp}, z_{mp})$ 。将目标中心经过  $P$  点的时刻作为计算的初始时刻, 此时探测光束可能旋转至扫描锥面任意方位。探测光束扫描锥面与目标中心的交会长度为  $L_1 = |\overrightarrow{OP}_m|$ 。

将目标几何中心从  $P$  点飞往脱靶面  $P_0$  点的时间, 作为预留给后级系统的处理时间:

$$t_r = x_{rp} / |V_r| \quad (8)$$

若发射倾角  $\alpha$  较大, 目标几何中心与探测光束的交会有一定概率发生在其经过脱靶面之后, 此时  $t_r$  取负, 不能为后级系统预留足够的处理时间。

基于  $\overrightarrow{OP}_m$  进行探测光束与目标表面交会位置的解算。根据速度、角度信息可解算得到目标头部进入扫描锥面到尾部穿过扫描锥面的交会时长为  $t_c$ , 探测光束与目标的交会一定发生在这一段时间内。由于目标中心与探测光束扫描锥面的交会并不一定发生在目标穿过扫描锥面的中间时刻, 为避免遗漏, 计算中令  $t \in (-t_c, t_c)$ , 则

$$[x_{iO} \ y_{iO} \ z_{iO}]^T = -M_{mi}^T \overrightarrow{OP}_m - M_{mi}^T V_r t, \quad -t_c < t < t_c \quad (9)$$

以交会时的光束传输长度  $L$  为待计算参量, 在目标穿越扫描锥面的时间  $t_c$  内, 在目标坐标系内得到的第  $n$  次扫描交会模型如下。

$$[x_{in} \ y_{in} \ z_{in}]^T = M_{mi}^T \begin{bmatrix} L \cos\alpha \\ L \sin\alpha \cos(\Delta\theta \cdot n + \delta) \\ L \sin\alpha \sin(\Delta\theta \cdot n + \delta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{iO} \\ y_{iO} \\ z_{iO} \end{bmatrix},$$

$$-ft_c < n < ft_c \ \& \ n \in \mathbb{Z}$$

$$z_{in}^2 - y_{in}^2 \leq \pi d^2 / 4, \quad x_n = \pm l / 2 \quad (10)$$

$$z_{in}^2 - y_{in}^2 = \pi d^2 / 4, \quad |x_n| < l / 2$$

式中:  $\Delta\theta$  为光束扫描的步进角度;  $f$  为光束发射频率;  $l$  为目标长度;  $d$  为目标直径;  $\delta$  为扫描初始方位角。若  $L$  存在正实数解, 则在  $-t_c < t < t_c$  时间内, 探测光束与目标发生交会。  $L$  可能存在多个正实数解, 即发生多次交会。设第  $n$  次交会时目标坐标系中光束起止点有向线段为  $\overrightarrow{OP}_{in} = [x_{in} \ y_{in} \ z_{in}]^T - [x_{iO} \ y_{iO} \ z_{iO}]^T$ , 可求得该次交会发生时光束中心与圆柱相交的夹角为:

$$\begin{cases} \psi_1 = \langle \overrightarrow{OP}_m, [0 \ y_m \ z_m]^T \rangle, |x_m| < \frac{l}{2} \\ \psi_2 = \langle \overrightarrow{OP}_m, [1 \ 0 \ 0]^T \rangle, |x_m| = \frac{l}{2} \end{cases} \quad (11)$$

准直光束初始发散角  $\theta_i$  为 1 mrad, 在无散射传播过程中直径增加极小。但由于水体散射, 准直探测光束直径将随探测距离的增长而逐渐增加, 在交会点的半径为  $r = r_0 e^{(bL/2)}$ 。其中,  $r_0$  是准直光束出射时的初始半径,  $b$  为海水散射系数。光束照射圆柱目标后形成的光斑在圆柱曲面不同位置的反射角不同, 而且目标表面并非理想的漫反射表面, 因此目标反射信号的强度将会存在差异。引入谭亚运的探测光束激光雷达散射截面模型  $\sigma(\psi, d)$ , 计算探测光束照射到目标后的激光回波功率<sup>[17]</sup>:

$$P_s(L) = \frac{P_t \sigma(y, d) r_r^2 \rho \exp(-2cL)}{4\pi r^2 L^2} \quad (12)$$

式中:  $P_t$  为峰值发射功率;  $r_r$  为接收窗口大小;  $\rho$  为光学窗口透射率;  $c$  为海水衰减系数。

在接收过程中, 目标有效回波信号和水体后向散射回波信号发生叠加。对后向散射已有成熟的蒙特卡罗仿真方法<sup>[17]</sup>, 可用以计算模拟一定发射功率下激光脉冲在设定水体条件下的后向散射。利用该方法计算后向散射最大功率  $P_b$ 。

得到两信号回波光子计数:

$$\begin{cases} n_s = P_r(L) \cdot t_{co} \\ n_b = P_b \cdot t_{co} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $t_{co}$  为采样时间宽度。若探测器件的量子效率为  $\eta$ , 则产生一个光电子至少需要满足  $n_s \cdot \eta \geq 1$ , 当考虑到后向散射时, 还必须满足  $n_s > n_b$ 。据此可以判断某次照射是否形成可探测的有效回波信号。

### 1.2 交会时间计算

参考文献[9]指出, 弹目交会时长  $t_c$  不大于目标长度在相对位移上的投影除以相对速度, 但是在某些交会过程中, 该结论并不成立。如图 3 所示, 当  $|V_m| = |V_t|$ ,  $\alpha$  为  $60^\circ$ , 偏航角为 0, 俯仰角为  $-30^\circ$ 。两次交会过程中仅位置不同, 但两次交会的位移长度仍存在显著差异。位移长度  $S$  为的交会过程中, 交会时长  $t_c$  不满足参考文献[9]的结论。

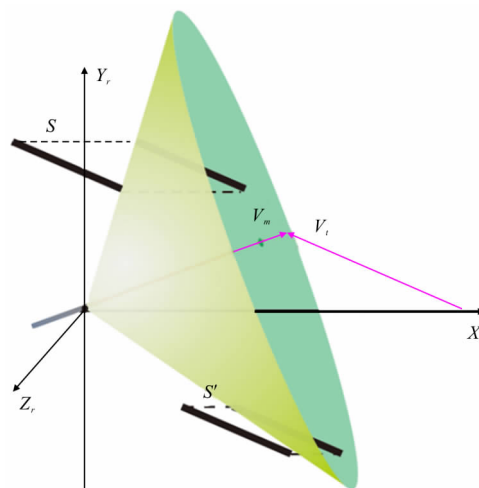


图 3 同俯仰偏航角下不同交会时长  
Fig.3 Different cross time at the same azimuth angle and pitch angle

根据交会模型, 在弹目相对速度坐标系中解算得到准确的交会时长, 如图 4 所示。

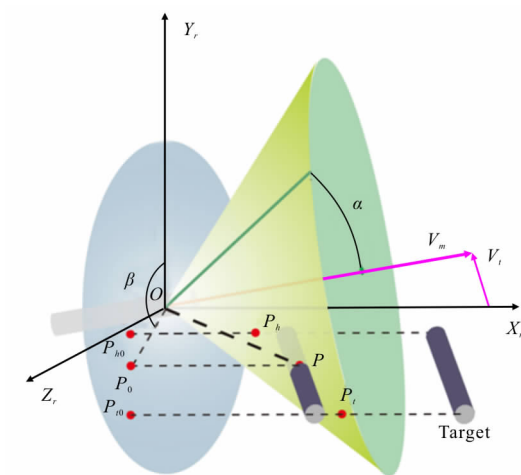


图 4 交会时长计算示意图  
Fig.4 Sketch for cross time calculation

在目标坐标系中, 目标几何中心到目标头部端面中心的距离向量为  $L_{hr} = (l/2, 0, 0)$ 。同理目标几何中心到目标尾部端面中心的距离向量为  $L_{tr} = (-l/2, 0, 0)$ 。通过公式(6)、(7)求得  $\overrightarrow{OP}_r$  后, 在弹目相对速度坐标系中, 可列方程计算两端面中心交会时交点向量  $\overrightarrow{OP}_{hr}$  和  $\overrightarrow{OP}_{tr}$ 。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OP}_{hr} &= \overrightarrow{OP}_r + M_{rm} M_{mt} L_{hr} \\ \overrightarrow{OP}_{tr} &= \overrightarrow{OP}_r + M_{rm} M_{mt} L_{tr} \end{aligned} \quad (14)$$

在弹目相对速度坐标系中,目标以速度 $-V_r$ 做刚体平动, $P_h$ 、 $P_{h0}$ 两点连线平行于 $OX_r$ 。故 $\overrightarrow{OP}_{hr} = (x_{hr}, \overrightarrow{OP}_{hr}(y_r), \overrightarrow{OP}_{hr}(z_r))$ ,其中 $x_{hr}$ 为未知量。 $P_h$ 也满足位于锥面的条件,类似公式(6)、(7)联立方程:

$$\begin{cases} \overrightarrow{OP}_{hm} = M_{rm}^T \overrightarrow{OP}_{hr} \\ \cos\alpha = \frac{\overrightarrow{OP}_{hm} \cdot (x_{mh})}{|\overrightarrow{OP}_{hr}|} \end{cases} \quad (15)$$

可求得目标头部端面中心与扫描锥面的交点在弹目相对速度坐标系 $OX_r$ 轴上的坐标 $x_{hr}$ 。同理求得目标尾部与扫描锥面的交点的坐标 $x_{hr}$ 。当尾部中心发生交会时,头部中心的位置坐标为:

$$(x_{hr}, \overrightarrow{OP}_{hr}(y_r), \overrightarrow{OP}_{hr}(z_r)) = \overrightarrow{OP}_{tr} + M_{rm} M_{ml} (L_{tr} - L_{hr}) \quad (16)$$

故整个交会中的目标轴 $l$ 的位移为:

$$S_1 = |x'_{hr} - x_{hr}| \quad (17)$$

类似的,对目标径向贡献的交会时长,可令 $L'_{hr} = (0, d/2, 0)$ ,  $L'_{tr} = (0, -d/2, 0)$ ,代入公式(14)~(17)进行计算。求得径向直径 $d$ 的位移为 $S_2$ 。故总的交会飞行时间为:

$$t_c = \frac{S_1 + S_2}{|V_r|} \quad (18)$$

## 2 仿真分析

文中主要考虑探测系统迎头截击目标的探测概率,仿真中的参数及取值范围如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameter

Parameter	Simulation	Parameter	Simulation	Parameter	Simulation
$l/m$	3	$P_t/kW$	50	$\rho$	0.9
$d/m$	0.3	$t_p/ns$	1	$\eta$	10%
$\theta_0/rad$	$[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$	$\alpha/rad$	$[\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{2}]$	$b/m^{-1}$	0.2
$\phi/rad$	$[-\frac{\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}]$	$\Delta\theta/rad$	$[\frac{\pi}{720}, \frac{\pi}{9}]$	$c/m^{-1}$	0.21
$v_r/knot$	45	$r_0/mm$	1	$R_{md}/m$	[3, 9]
$v_m/knot$	50	$r_r/mm$	12.7	$\beta/rad$	[0, $2\pi$ ]

利用高斯分布对脱靶量数据<sup>[18]</sup>进行拟合,改变

均值位置,模拟不同脱靶量下的探测概率。

### 2.1 蒙特卡罗仿真流程

利用蒙特卡罗方法对探测系统的目标探测概率进行建模分析,其流程如图 5 所示。

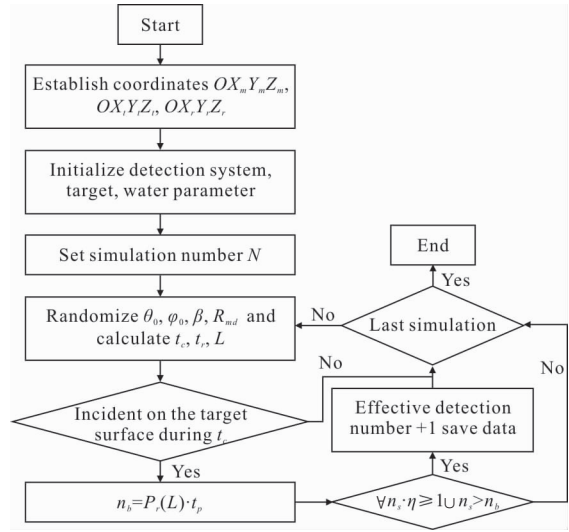


图 5 蒙特卡罗仿真流程

Fig.5 Flow chart of Monte Carlo simulation

当没有滤除后向散射方法时,必需同时满足 $n_s \cdot \eta \geq 1, n_s > n_b$ 。若具有良好滤波手段去除后向散射影响时,可简化为仅判断 $n_s \cdot \eta \geq 1$ 。

首先对系统,目标及水体参数进行初始化,如系统发射功率、脉宽,目标速度、长度、直径,水体散射系数、衰减系数等。然后建立弹体坐标系、目标坐标系和弹目相对速度坐标系,并得到相应的变换矩阵。设定总的蒙特卡罗仿真次数 $N$ ,在接下来的每次仿真中,均随机产生目标的俯仰角、偏航角,以及目标脱靶参量,代入坐标系中计算得到交会时间、处理时间、交会距离。若在交会时间内,交会距离存在实数解,则计算交会发生时接收器件所能探测的光子数量;若其超过探测灵敏阈值,则在该次交会中,系统成功探测到目标,此时,记录相关探测信息,并转入下一次仿真。完成所有交会仿真后,利用记录信息得到探测概率。

### 2.2 脱靶量对发射倾角的影响

设探测系统速度为 50 knot、目标速度为 45 knot,探测光束的步进角 $\Delta\theta$ 为 $1.5^\circ$ 。选择不同的探测光束发射倾角 $\alpha$ 和脱靶量,对 5、10、15 kHz 三种不同发射频率下的系统探测概率进行计算,结果如图 6 所示。

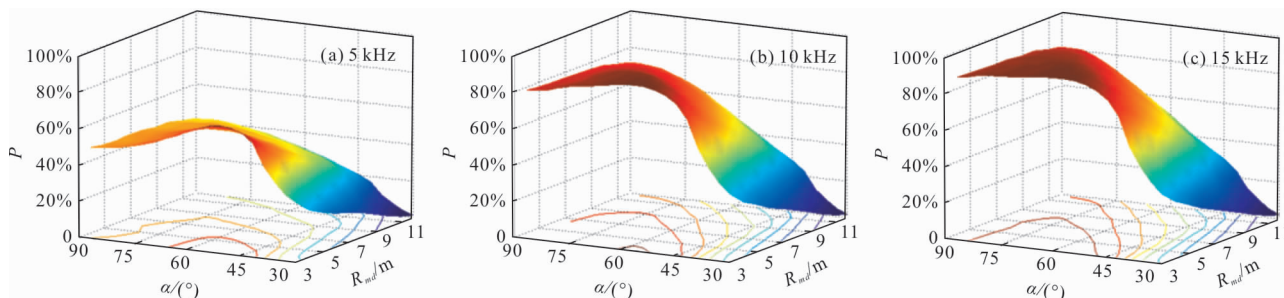


图 6 光束发射倾角  $\alpha$  与脱靶量对探测概率的影响

Fig.6 Affections of beam emit angle  $\alpha$  and mean undershoot distance on detection probability

在相同的探测光束发射频率和发射倾角下,较小的脱靶量容易得到较高的探测概率。但发射频率较低时,探测系统的总体探测概率上限较低。发射频率提高,脱靶量较小时的探测概率得到明显提高,但随着脱靶量的增加,探测概率提高的效果逐渐减弱,

仅在高倾角条件下提高较为明显。因此在大脱靶量条件下,要获得较高的探测概率,不仅需要提高探测光束的发射频率,还需要增大光束发射倾角。

固定脱靶量,考察不同角  $\alpha$  和不同探测光束发射频率下的探测概率,结果如图 7 所示。

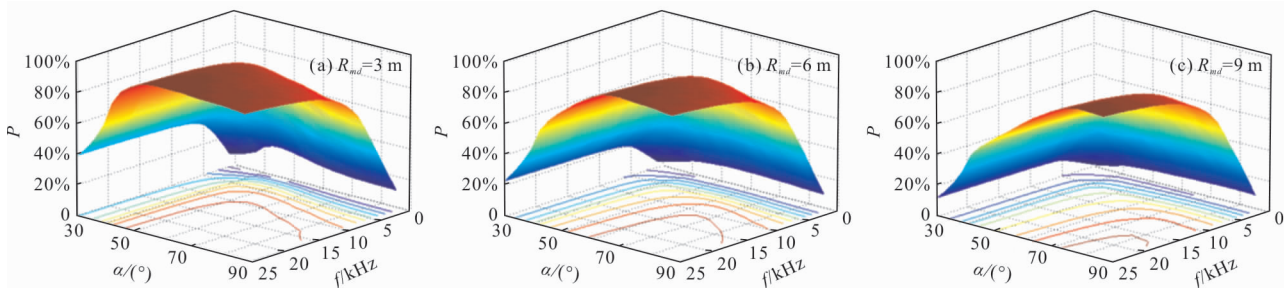


图 7 不同脱靶量下  $\alpha$  与光束发射频率对探测概率的影响

Fig.7 Affections of  $\alpha$  and beam transmit frequency on detection probability at certain undershoot distance

当脱靶量较小时,探测光束发射倾角  $\alpha$  和发射频率在较宽的取值范围内均可取得较高的探测概率。当脱靶量增加,探测光束则需要较大的发射倾角和较高的发射频率才能达到同样高的探测概率。脱靶量为 3 m 时,要达到 90% 以上的探测概率, $\alpha$  取值范围为  $50^\circ \sim 90^\circ$ ,发射频率最低可达 10 kHz;当脱靶量增加到 6 m,要达到 90% 的探测概率,则  $\alpha$  最少要达到  $60^\circ$ ,最低发射频率上升到 12 kHz。脱靶量为 9 m 时,要达到 90% 的探测概率,则  $\alpha$  需大于  $75^\circ$ ,发射频率达到 16 kHz 以上。

根据建模过程中公式(8)的结论,增大  $\alpha$  不利于后续系统及时处理。仿真给出脱靶量为 6 m 时,不同  $\alpha$  下,探测光束扫描锥面与目标交会时目标几何中心位置分布,以及给后续系统的预留处理时间  $t_r$  分布,如图 8 所示。

从两个分布可以看出,探测光束发射倾角收窄有利于获得较大的提前量,但同时也会导致同一脱

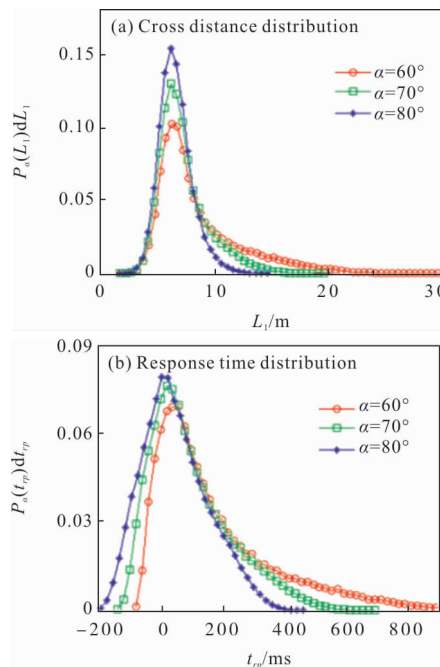


图 8 交会距离分布与预留反应时间分布

Fig.8 Cross distance distribution and response time distribution

靶方位截击时交会探测光束长度  $L$  的增长。考虑到后级系统响应处理需要一定的时间, 发射倾角  $\alpha$  不能取对脱靶分布具有最大覆盖的  $90^\circ$ (此时有 50% 的有效探测发生在目标中心飞离脱靶面时刻之后, 即  $P_\alpha(t_r > 0) = 50\%$ )。但为了保证较高的探测概率, 其取值不宜低于  $60^\circ$ (此时  $P_\alpha(t_r > 0) \approx 93\%$ )。

### 2.3 脱靶量对扫描步进角度的影响

为避免发生漏扫, 步进角  $\Delta\theta$  的选择理论上应满足: 首先保证在最远的交会位置相邻光束分开的距离小于目标直径; 同时保证在给定发射频率条件下, 在交会时间内扫描覆盖完整  $2\pi$  周期。

在 6 m 的脱靶量条件下, 设探测系统速度为 50 knot, 目标速度为 45 knot, 固定发射倾角为  $60^\circ$ , 进行 10 万次仿真实验。统计探测光束扫描锥面与目标中心发生交会时可测的交会距离  $L_1$  和交会时长  $t_c$ , 其分布曲线如图 9 所示。

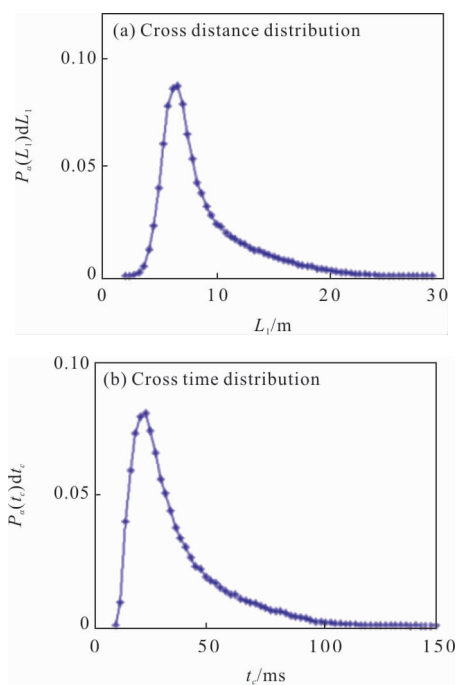


图 9 脱靶量为 6 m 时交会距离分布和交会时长分布  
Fig.9 Cross distance and cross time distribution when  $R_{md} = 6$  m

发生交会时的最大可探测距离可达 30 m; 统计得到的最短的交会时间约为 14 ms。在这一极端条件下,  $\Delta\theta$  应小于  $0.66^\circ$ , 扫描频率应大于 38.9 kHz。受限于器件水平, 高功率的激光器难以达到这样高的重频。因此通过仿真考察脱靶量  $R_{md}$ 、扫描频率  $f$ 、

扫描步进角  $\Delta\theta$  同探测概率之间的关系。

设探测系统速度为 50 knot, 目标速度为 45 knot, 固定发射倾角  $\alpha$  为  $60^\circ$ 。改变脱靶量, 仿真考察  $\Delta\theta \in [0.25^\circ, 5^\circ]$  时, 不同发射频率下的系统探测概率, 仿真结果如图 10 所示。

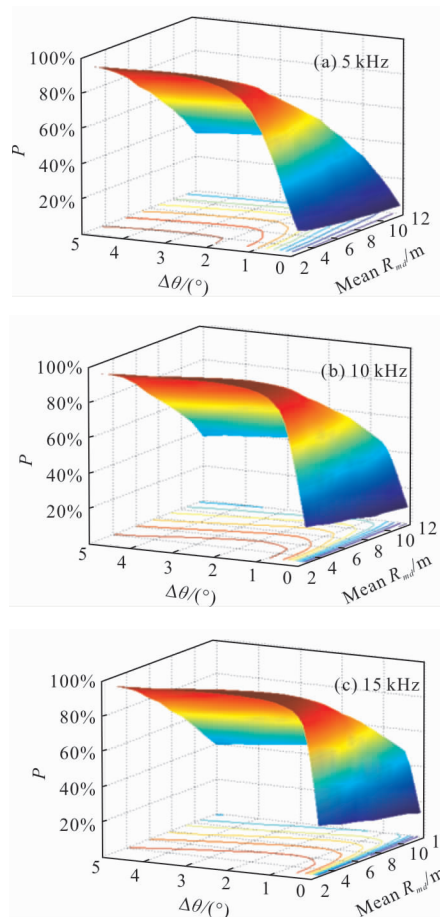


图 10  $\Delta\theta$  与脱靶量对探测概率的影响  
Fig.10 Affections of  $\Delta\theta$  and undershoot distance on detection probability

低发射频率条件下, 满足在目标穿过扫描锥面的时间内覆盖  $2\pi$  周期的  $\Delta\theta$  较大, 如在发射频率为 5 kHz 时, 至少要  $2.2^\circ$  以上的间隔才能保证完成探测光束铺满锥面。这意味着远离发射点的区域光束间隔变得稀疏, 因此, 仅在 2 m 以下的低脱靶量条件下, 探测概率能够超过 90%。随着发射频率的升高, 覆盖  $2\pi$  周期的  $\Delta\theta$  逐渐变小, 这意味着在远离发射点处, 相邻光束的间隔减小, 漏过目标的可能减小, 因此在脱靶量较大的条件下也能取得较高的探测概率。

在同一  $\Delta\theta$  和同一发射频率下, 探测概率随脱靶

量的增加加速下降。当不考虑后向散射时,10~15 kHz 的发射频率下要取得 90% 以上的探测概率,平均脱靶量最大可达 6 m。

固定脱靶量,考察不同步进角  $\Delta\theta$  ( $\Delta\theta \in [0.5^\circ, 20^\circ]$ ) 和不同发射频率 ( $f \in [1, 25]$  kHz) 下的探测概率,结果如图 11 所示。

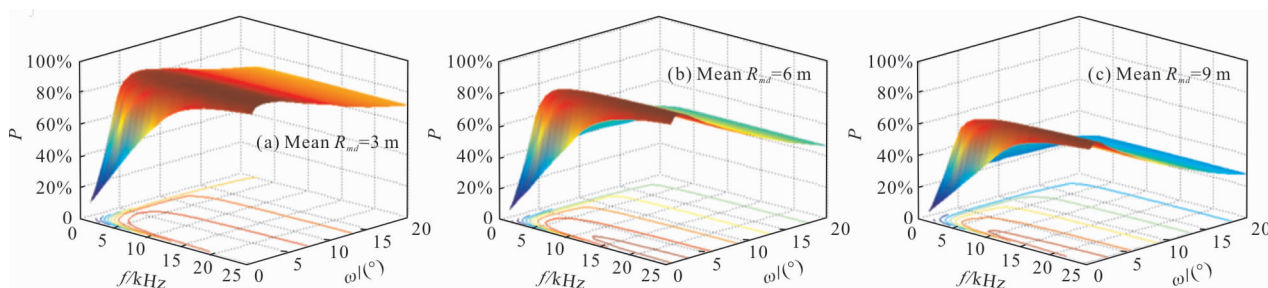


图 11 不同脱靶量下  $\Delta\theta$  与光束发射频率对探测概率的影响

Fig.11 Affections of  $\Delta\theta$  and beam transmit frequency on detection probability at certain undershoot distance

脱靶量较小时,可在较低的扫描频率和较宽的  $\Delta\theta$  范围取得较高的探测概率;随着脱靶量增加,要提高探测概率,需要提高扫描频率,收窄  $\Delta\theta$  范围。当最高扫描频率为 25 kHz 时,随着脱靶量增加,探测概率上限显著降低,当脱靶量为 3、6、9 m 时,探测概率上限分别约为 99%、93%、78%。

#### 2.4 后向散射对探测概率的影响

考虑后向散射时,仍使用表 1 的仿真条件,考察不同距离的平板目标回波信号及后向散射信号强度,结果如图 12 所示。

图中给出的目标信号分别为目标处于 2.5、3、3.5、4 个衰减长度时的回波信号。可以看出,随目标距离增加,目标信号强度依朗伯比尔定律指数下降。在较大的交会距离上,目标信号将小于后向散射信号。

因此,后向散射的影响主要体现在影响系统探测较远目标的微弱回波。在较大脱靶量下,后向散射将降低探测概率。

考虑后向散射时,图 13(a)~(c)给出了在不同扫

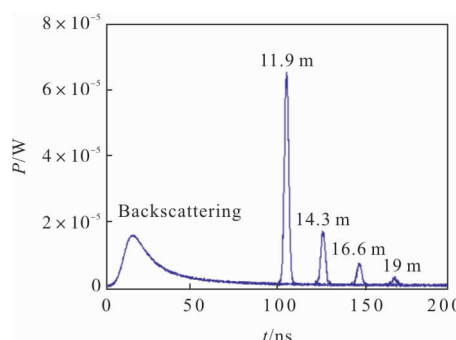
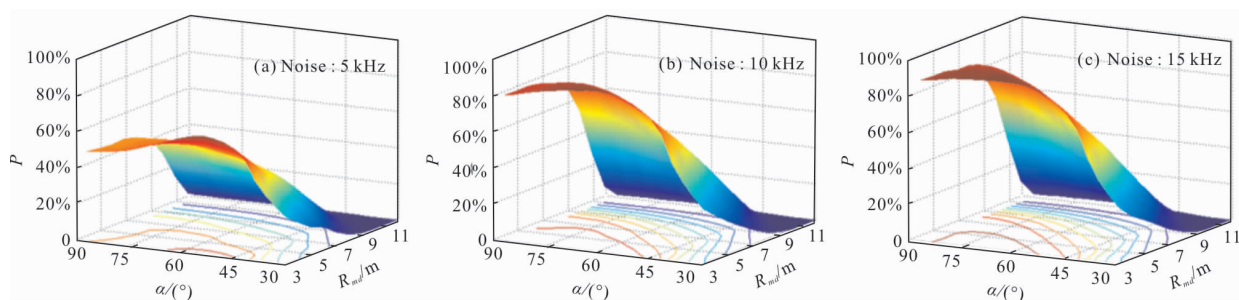


图 12 后向散射信号和不同距离的平板目标回波信号

Fig.12 Backscattering signal and plane target echo signal at different distance

描频率下,探测倾角和脱靶量变化与探测概率的关系;图 13(d)~(f) 给出了在不同扫描频率下,步进角和脱靶量变化与探测概率的关系。

从图中可以看出,当脱靶量为 3、6、9 m 时,探测概率上限分别约为 99%、80%、41%。由此可得出结论:当考虑水体带来的后向散射时,在较小的脱靶量条件下探测概率几乎没有变化;而在脱靶量增加时,探测概率出现了显著地下滑。





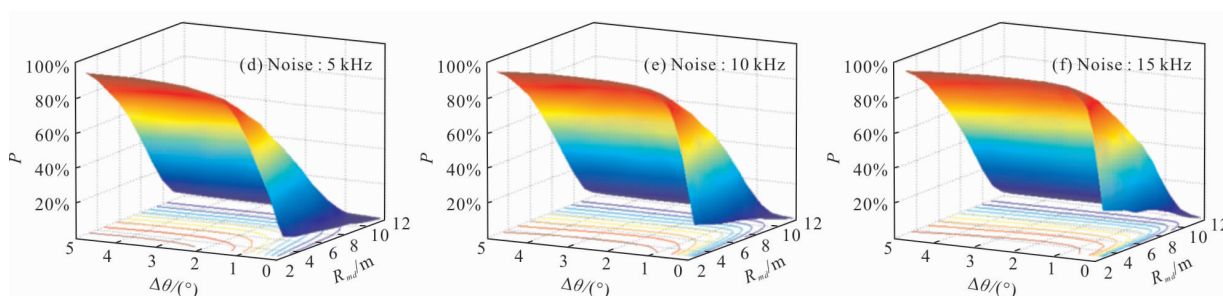


图 13 不同传输频率下  $\alpha$ 、 $\Delta\theta$  与脱靶量变化与探测概率的关系受后向散射噪声的影响

Fig.13 Affections of backscattering on the relation between  $\alpha$ ,  $\Delta\theta$ , undershoot distance and detection probability at different beam transmit frequency

### 3 结论

文中根据单光束周向扫描探测方案的工作原理,建立了基于脱靶量的扫描探测模型,并利用该模型,在一定脱靶量下对运动目标的捕获概率进行了蒙特卡罗仿真分析。

根据蒙特卡罗仿真结果分析不同脱靶量分布下探测光束发射倾角、步进角对探测概率的影响,并进一步讨论了在后向散射影响下探测概率结果的变化。脱靶量相同时,发射倾角越大,对目标探测概率越高。但是较大的发射倾角可能导致扫描锥面落于脱靶面之后,不利于后续系统发挥作用。故脱靶量不宜过高,避免使发射倾角超过  $60^\circ$ 。同时受激光器发射频率限制,为取得 90% 以上的探测概率,脱靶量不宜超过 6 m,此时步进角可取值范围  $1.2^\circ \sim 1.8^\circ$ ,最低的发射频率为 12 kHz,在步进角  $1.5^\circ$  时取得。

从仿真结果可以看出,后向散射主要对远离探测器目标的微弱信号造成影响。在 4 m 以下的脱靶量条件下,由于多数交会的距离较近,目标回波信号强于后向散射回波,因此探测概率几乎不受影响。而在平均脱靶量较大时,多数交会的距离较远,回波信号弱于后向散射,可能使探测器对后向散射产生虚警,导致探测概率的下降。若自导系统的脱靶量为 6 m,激光发射频率为 15 kHz。当探测系统速度 50 knot,对速度 45 knot,长 3 m,直径 0.3 m 的运动目标进行探测。若不考虑后向散射的影响, $\alpha$  取为  $60^\circ$ ,可保证较高的探测概率,也能为下一级系统在脱靶点的动作预留处理时间,最优的扫描步进角度  $\Delta\theta$  为  $1.5^\circ$ ,此时探测概率约 91.8%;当考虑后向散射时,同样的  $\alpha$

和  $\Delta\theta$ ,获得的探测概率约为 80%。

文中建立的交会探测模型,可用于判断某次交会中光束是否成功探测到目标,还可以计算预留给后续系统的处理时间。另外,基于该模型对目标飞越探测光束扫描锥面的交会时间提出了一种计算方法。

为减轻后向散射对探测概率的影响,下一步拟开展相关的滤波算法研究。

### 参考文献:

- [1] Qiang Chaochao, Wang Yuanbin. Current situation and development of underwater acoustic target recognition technology [J]. *Command Information System and Technology*, 2018, 9(2): 73-77. (in Chinese)
- [2] Yan Yi. The overview study of non-acoustic detection technology base on UUV application in searching target underwater [J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39 (12): 10-13, 43. (in Chinese)
- [3] Zhu Shicai, Mu Lan, Liu Zhijun, et al. A survey of foreign warship magnetic field characteristic research and warship protection techniques[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(9): 1-6. (in Chinese)
- [4] Song Hong, Zhang Yunfei, Wu Chaopeng, et al. Calibration method of underwater phase laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48 (4): 0406008. (in Chinese)
- [5] Cheng Zao, Yang Kecheng, Han Jiefei, et al. Improved time-of-flight range acquisition technique in underwater lidar experiments [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18): 5715-5726.
- [6] Aurora Maccarone, Aongus McCarthy, Ximing Ren. Underwater depth imaging using timecorrelated single-

- photon counting [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (26): 33911–33927.
- [7] Shawn O'Connor, Linda J Mullen, Brandon Cochenour. Underwater modulated pulse laser imaging system [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051403.
- [8] Zhong Wei, Zhang Xiaohui, Han Hongwei. Irradiance spatial distribution model of laser source for underwater range-gated imaging radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401005. (in Chinese)
- [9] Li Shengfu, Chen Guanghua, Wang Rongbo, et al. Monte carlo based angular distribution estimation method of multiply scattered photons for underwater imaging[J]. *Optics Communications*, 2016, 381(1): 43–47.
- [10] Ouyang Bing, Hua Weilin. Compressive line sensing imaging system in a controlled hybrid scattering environment [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58 (2): 023102.
- [11] Chen Jialin, Chen Zhenglin, Zhao Daomu. Experimental study of propagation properties of vortex beams in oceanic turbulence [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (12): 3577–3582.
- [12] Wang Yaochuan, Liu Dajun. Average intensity of a Lorentz beam in oceanic turbulence [J]. *Optik*, 2017, 144: 76–85.
- [13] Zha Bingting, Yuan Hailu, Tan Yayun. Ranging precision for underwater laser proximity pulsed laser target detection [J]. *Optics Communications*, 2019, 58 (2): 81–87.
- [14] Tan Yayun, Zhang He, Zha Bingting. Underwater single beam circumferentially scanning detection system using range-gated receiver and adaptive filter [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(16): 1648–1656.
- [15] Zha Bingting, Zhang He. Scanning frequency and pulse frequency of single-beam pulsed laser fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2081–2086. (in Chinese)
- [16] Tan Yayun, Zhang He, Zha Bingting. Simulation of underwater laser fuze echo based on bidirectional reflectance distribution function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 111012. (in Chinese)
- [17] Tan Yayun, Zhang He, Zha Bingting. Modeling and simulation of underwater single-beam scanning laser fuze acquisition rate[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 1207002. (in Chinese)
- [18] Qian Dong, Zhang Qi. Development of anti-torpedo torpedo in Europe[J]. *Torpedo Technology*, 2006, 14(5): 1–11.