

水下目标激光周向扫描探测模型与仿真分析

彭波, 钟昆, 赵慧, 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精细探测中具有重要的应用前景。基于端面圆周的快速数值遍历算法, 通过建立扫描光束与运动目标的交会方程, 对水下目标的激光扫描探测过程进行了数值建模。结果表明: 目标穿越光束扫描区的最短时间并非出现在迎头相遇的交会情况中。其次, 通过采用蒙特卡罗模拟, 仿真分析了脉冲频率、扫描频率、扫描半角以及目标距离对探测概率的影响, 并得出扫描参数的最优设计。文中建立的数值模型可为水下激光探测系统的合理设计提供理论依据。

关键词: 水下激光; 目标探测; 蒙特卡罗仿真; 数值模型

中图分类号: P733.3+3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1205002

Laser circumferential scanning detection model and simulation analysis of underwater targets

Peng Bo, Zhong Kun, Zhao Hui, Li Zhongyun

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

Abstract: Blue-green laser has an important application prospect in the fine detection of underwater targets. Based on the fast numerical traversal algorithm of the head-tail circumferences, the laser scanning detection process of underwater targets was numerically modeled by establishing the intersection equation of the scanning beam and the moving target. The results show that the shortest time for the target to cross the beam scanning area does not occur in the case of the head-on encounters. Secondly, by Monte Carlo simulation, the effects of pulse frequency, scanning frequency, scanning half angle and target distance on the detection probability were simulated and the optimal design of scanning parameters was obtained. The established numerical model can provide a theoretical basis for the reasonable design of underwater laser detection system in this paper.

Key words: underwater laser; target detection; Monte Carlo simulation; numerical model

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61505184); 国家部委基金(61406190104)

作者简介: 彭波(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事水下目标超扩散成像与激光探测方面的研究。Email: pengb07@gmail.com

0 引言

水下目标精细探测在海事搜救、海洋勘探、军事侦察等领域都具有广泛而迫切的应用需求^[1-2],尤其是针对水下机动小目标的近程探测,更是近年来 UUV 等水下潜航器增强探测性能的迫切之需^[3]。海水中“蓝绿透光窗口”的发现,为水下目标精细探测开辟了一条新的技术途径——水下激光。与常规的水声、磁场、电磁三种探测技术相比,激光探测具有亮度高、分辨率高、准直性好以及抗干扰等优点^[4],用于水下目标近程探测可获得更高的测距精度和定位精度^[4]。因此,针对水下目标,甚至水下机动小目标的近程精细化探测难题,开展水下平台激光探测技术研究,在民用和军事上都具有良好的应用前景。

目前,针对水下目标激光探测的技术研究几乎都集中于机载平台和船载平台^[5],如机载海洋激光雷达^[6],而对 UUV 等水下平台激光探测的技术研究还很欠缺。由于水下环境复杂,载体资源有限,水下平台激光探测技术面临着诸多关键技术的制约,其中之一便是探测模型。在研制前期,一个精确的探测模型对确定系统参数、优化光路设计以及评估装置性能等都具有极其重要的理论意义和工程价值。近年来,虽然许多科研小组都对水下激光的传输特性进行过详尽的理论仿真^[7-11],但仅有少许学者对水下激光的目标探测过程进行过交会建模和仿真分析。查冰婷^[12-13]、谭亚运^[14-15]等针对设计的周向扫描探测装置,建立了相应的水下目标捕获概率模型。但由于支撑结构的光路遮挡缘故,该模型主要描述了光束遮挡所致的水下目标的探测概率,未能真实反映出扫描光束的周向探测概率。Yuan 等^[16]则基于回波信号的时间分辨问题,对水下目标的测距精度进行了建模分析和实验研究,理论模型也未涉及动态目标的交会探测。

文中对水下运动目标激光周向扫描的探测过程进行了数值建模和仿真分析。通过建立扫描光束与运动目标的交会方程,并采用快速数值遍历算法,精确计算了不同交会姿态下运动目标穿越光束扫描区的时间分布。其次,基于扫描光束和目标表面的相交约束,结合目标表面光学特性,建立扫描光束的回波功率方程,并采用蒙特卡罗方法模拟随机交会的探测过程,仿真分析了脉冲频率、扫描频率、扫描半角

以及目标距离对探测概率的影响。

1 扫描探测模型

借助灵巧的光学设计,笔者的水下激光装置实现了周向 360°无盲区的单光束扫描,其探测模型如图 1 所示。激光探测装置通过环形收发光学窗口旋转发射脉冲光束,并接收对应的目标回波,同时伴随自身航行而扫描形成半角为 ζ 的螺旋状探测区。假设目标为圆柱体,长度和直径分别为 L_t 和 D_t ;探测光束的传播距离为 d ,脉冲频率和周向扫描频率分别记为 f_p 和 f_s 。由于交会过程短暂,激光探测装置与目标均可视为沿各自轴向做匀速直线运动,速度分别是 v_d 、 v_t 。

如图 1 所示,以激光探测装置的光束发射中心为坐标原点建立探测坐标系 $O_d x_d y_d z_d$,其中 x_d 轴取探测装置中心轴线并指向头部, y_d 轴取垂直向上为正, z_d 轴取向与 x_d 轴、 y_d 轴构成右手坐标系。目标坐标系 $O_t x_t y_t z_t$ 则取目标头部端面几何中心为坐标原点, x_t 、 y_t 、 z_t 三轴的设定方式与探测坐标系一致。

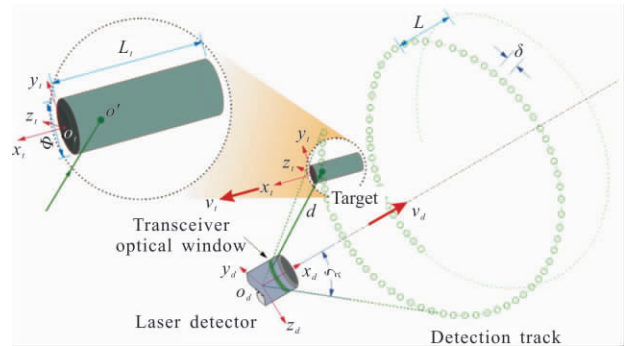


图 1 扫描探测示意图

Fig.1 Schematic of scanning detection

1.1 交会方程

考虑到交会姿态复杂多变,对激光探测装置而言,目标航向存在一定的俯仰角和偏航角,分别记为 θ 和 φ ,则探测坐标系到目标坐标系的变换可通过旋转矩阵 $C_a(\theta, \varphi)$ 进行转换:

$$C_a(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & \sin\theta & -\cos\theta\sin\varphi \\ -\sin\theta\cos\varphi & \cos\theta & \sin\theta\sin\varphi \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

即探测坐标系先绕 $O_d y_d$ 轴逆时针旋转 φ ,再绕 $O_d z_d$ 轴逆时针旋转 θ ,得到目标坐标系。激光探测装置

和目标在各自坐标系中的速度 $V_d=[v_d, 0, 0]^T, V_i=[v_i, 0, 0]^T$, 则探测坐标系中目标的相对速度为:

$$V=C_{dt}^T(\theta, \varphi)V_i-V_d \quad (2)$$

假设目标离激光探测装置的初始距离为 d_0 , 目标在探测坐标系中与 x_d 轴之间的天顶角为 α , 在 $o_d y_d z_d$ 平面上的投影与 y_d 轴之间的方位角为 β , 则探测过程中目标的相对位移矢量 s_d 可表示为:

$$\begin{cases} s_d(t)=M+V \cdot t \\ M=[d_0 \cos \alpha, d_0 \sin \alpha \cos \beta, d_0 \sin \alpha \sin \beta]^T \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为探测时间; 点 M 是目标坐标系原点 o_t 在探测坐标系中的初始位置。激光发射系统以前向视角 2ζ 旋转出射脉冲频率 f_p 的扫描光束, 则 t 时刻扫描光束的直线方程为:

$$L_d=\begin{pmatrix} d \cos \zeta \\ d \sin \zeta \cos (2 \pi f_s \cdot t+\Delta) \\ d \sin \zeta \sin (2 \pi f_s \cdot t+\Delta) \end{pmatrix}, t \in\left(0, \frac{1}{f_p}, \frac{2}{f_p}, \dots\right) \quad (4)$$

式中: Δ 为扫描光束的初始相位 (在 $o_d y_d z_d$ 平面上的投影与 y_d 轴之间的方位角)。将公式通过平移、旋转变换到目标坐标系, 则:

$$L_t(x_t, y_t, z_t)=C_{at}(\theta, \varphi) \cdot\left[L_d-s_d(t)\right] \quad (5)$$

在目标坐标系中, 扫描光束探测到目标时, 入射光点需满足圆柱体的表面方程或端面方程的约束:

$$\begin{cases} L_{t, y_t}^2+L_{t, z_t}^2=D_t^2 / 4 & \text{or} & \begin{cases} L_{t, y_t}^2+L_{t, z_t}^2 < D_t^2 / 4 \\ 0 > L_{t, x_t} > -L_t \end{cases} \\ 0 > L_{t, x_t} > -L_t & \text{or} & \begin{cases} L_{t, x_t}=0 & \text{or} & L_{t, x_t}=-L_t \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

联立公式(3)~(6), 并将探测时间 t 离散递增, 可求解出满足约束条件的传播距离 d 以及光束入射点 $[x_0, y_0, z_0]^T$, 进而计算出扫描光束对目标的入射角 ψ

$$\psi=\begin{cases} \left\langle C_{dt}^T(\theta, \varphi)\left[0, y_0, z_0\right]^T, L_d\right\rangle \\ \left\langle C_{dt}^T(\theta, \varphi)\left[1, 0, 0\right]^T, L_d\right\rangle \end{cases} \quad (7)$$

式中: 符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示求取矢量夹角。与目标距离相比, 由于激光探测装置中收发系统间距极小, 因而考虑光束照射到目标时接收系统对应的反射角近似等于入射角。其次, 由于扫描光束为直径极小的准直光束, 与目标尺寸相比, 入射光斑面积较小, 其反射截面可近似表示为:

$$\sigma \approx \pi \cdot \pi \phi_0^2 \cos (\psi) \cdot f \cos (\psi) \quad (8)$$

式中: ϕ_0 为光束直径; $f \cos (\psi)$ 为采用六参数 BRDF 模型表征的目标反射率。基于激光雷达方程, 并结合式可计算得出目标的回波功率:

$$P_r=\frac{P_0 \cdot \pi \phi_0^2 f \cos ^2(\psi) \cdot r_r^2 \cdot \mu \cdot \exp (-2 \kappa d)}{\phi_0^2 d^2} \quad (9)$$

式中: P_0 为激光器的发射功率; r_r 为接收系统的窗口半径; μ 则为探测装置的光学透过率; κ 为水体衰减系数。探测装置接收到目标回波后, 通过光电探测器将其转换为光电子:

$$n_{pe}=P_r \cdot T_p / (h c / \lambda) \quad (10)$$

式中: h 为普朗克常数; T_p 为激光的脉冲宽度。由于激光在水下传输衰减剧烈, 一般选用灵敏度较高的弱光探测器接收目标回波, 如光电倍增管。假定光电倍增管的阴极量子效率为 η , 则 $n_{pe} > 1 / \eta$ 才能保证可靠接收到目标回波。

1.2 扫描时间

在公式中, 光束能够照射到目标的时间范围取决于目标穿越扫描区所需的时间。参考文献[15]指出, 激光探测装置对目标的最短扫描时间出现在迎头相遇 ($\theta=0^\circ, \varphi=180^\circ$) 的情况中, 并且等于目标在相对速度 V 方向上的投影长度除以 V 。事实上, 这并不正确。不同的交会姿态下, 目标穿越光束扫描区的时间并不相同, 最短扫描时间也并不一定出现在迎头相遇的交会情况中。如图 2 所示, 分别标记目标的头部/尾部圆周为 c_1, c_2 , 则目标穿越扫描区所需的时间 τ 可通过求解圆周 c_1, c_2 与扫描圆锥面的相交时刻 t_{c_1}, t_{c_2} 得到, 即

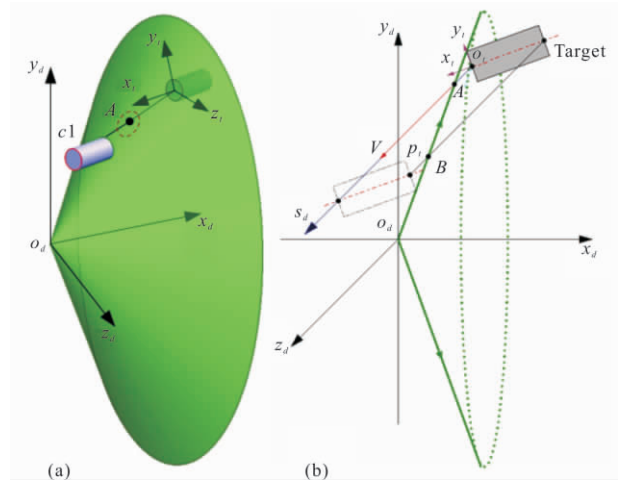


图 2 交会模型和坐标系(a)三维视图(b)二维视图
Fig.2 Intersection model and coordinate system of 3D view(a) and 2D view (b)

部/尾部圆周为 c_1, c_2 , 则目标穿越扫描区所需的时间 τ 可通过求解圆周 c_1, c_2 与扫描圆锥面的相交时刻 t_{c_1}, t_{c_2} 得到, 即

$$\tau(\theta, \varphi) = \max \begin{pmatrix} t_{c2}(\theta, \varphi)_{\max} - t_{c1}(\theta, \varphi)_{\min} \\ t_{c1}(\theta, \varphi)_{\max} - t_{c1}(\theta, \varphi)_{\min} \\ t_{c2}(\theta, \varphi)_{\max} - t_{c2}(\theta, \varphi)_{\min} \end{pmatrix} \quad (11)$$

求解过程是首先将半角为 ζ 的圆锥面参数方程:

$$\Lambda_d(\rho, \zeta) = \begin{cases} \rho \cos \zeta \\ \rho \sin \zeta \cos \zeta \\ \rho \sin \zeta \sin \zeta \end{cases} \quad \zeta \in [0, 2\pi), \rho \geq 0 \quad (12)$$

通过平移、旋转变换到目标坐标系:

$$\Lambda_t(\rho, \zeta, t) = C_{dt}(\theta, \varphi) \cdot [\Lambda_d - s_d(t)] \quad (13)$$

对于目标头部进入光束扫描区的情况, 利用 $x_t = 0$ 的平面约束以及 $y_t^2 + z_t^2 = D_t^2/4$ 的圆周约束

$$\begin{cases} \Lambda_{t,x}(\rho, \zeta, t) = 0 \\ \Lambda_{t,y}^2(\rho, \zeta, t) + \Lambda_{t,z}^2(\rho, \zeta, t) = D_t^2/4 \end{cases} \quad (14)$$

联立消去 ρ , 得到一个 t 关于 ζ 的二阶超越方程 $\Gamma(\zeta, t)$, 则圆周 $c1$ 与光束扫描区的交会时间为:

$$t_{c1}(\theta, \varphi) = t(\Gamma(\zeta, t): \Lambda_{t,y}^2(\rho(\zeta, t)_0, \zeta, t) + \Lambda_{t,z}^2(\rho(\zeta, t)_0, \zeta, t) = \frac{D_t^2}{4})_{\zeta \in [0, 2\pi)} \quad (15)$$

直接求解式极其困难, 这里笔者利用遍历 ζ 的数值方法求解 t 。然而, 由于目标只能相交于圆锥面的局部区域, 所以 $\Gamma(\zeta, t)$ 中 t 只有在范围极小的 ζ 内才有实数解, 尤其是目标距离较远的情况。例如, 当目标初始距离 $d_0 = 20$ m、俯仰角 $\theta = \pi/6$ 、偏航角 $\varphi = 2\pi/3$ 时, ζ 只有在极其狭小的范围内才能满足 t 有实数解的约束条件 ($b^2 - 4ac \geq 0$), 如图 3 所示。因此, 在 $[0, 2\pi)$ 的范围内遍历 ζ 将导致大量耗时的冗余计算。

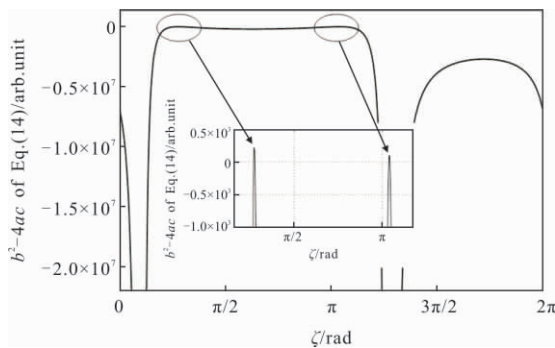


图 3 $\Gamma(\zeta, t)$ 中 t 有实数解的约束条件

Fig.3 Constraints in $\Gamma(\zeta, t)$ with real solutions t

考虑到端面圆周在圆锥面上的交点轨迹, 必定位于端面中心相对位移与圆锥面的交点周围。因此,

为了加快对式的遍历计算速度, 笔者以 o_t 的相对位移与圆锥面的交点 A 所对应的 ζ 为初值, 通过前后遍历 ζ 求解 $t_{c1}(\theta, \varphi)$ 。

同理, 可以计算得到目标尾部圆周 $c2$ 与光束扫描区的交会时间:

$$t_{c2}(\theta, \varphi) = t(\Gamma(\zeta, t): \Lambda_{t,y}^2(\rho(\zeta, t)_{-L}, \zeta, t) + \Lambda_{t,z}^2(\rho(\zeta, t)_{-L}, \zeta, t) = \frac{D_t^2}{4})_{\zeta \in [0, 2\pi)} \quad (16)$$

对于目标柱体穿越圆锥顶部的特殊情况, 可将柱体表面方程通过平移、旋转变换到探测坐标系, 再代入圆锥顶点 o_d 以判断是否满足方程约束, 并得出相应的离开时间 $t_{cyl}(\theta, \varphi)$ 。若目标柱体最后离开光束扫描区, 则利用 $t_{cyl}(\theta, \varphi)$ 替换修正式中 $t_{c1}(\theta, \varphi)_{\max}$ 或 $t_{c2}(\theta, \varphi)_{\max}$ 。

图 4 描述了目标初始距离 $d_0 = 20$ m、天顶角 $\alpha = 5^\circ$ 、方位角 $\beta = 60^\circ$ 、扫描半角 $\zeta = 60^\circ$ 时目标穿越扫描区的时间分布。由图可知, 穿越时间 τ 的局部极小值在 (θ, φ) 平面上呈带沟状分布, 其最小值 $\tau = 0.017$ s, 出现在 $\theta \approx -67.1^\circ$ 、 $\varphi \approx 147.3^\circ$, 显然并非出现在迎头相遇的情况中。恰好相反, 迎头相遇时目标的穿越时间几乎最大。原因在于, 虽然此时相对速度 V 最大, 但目标穿越光束扫描区的相对位移则更大。

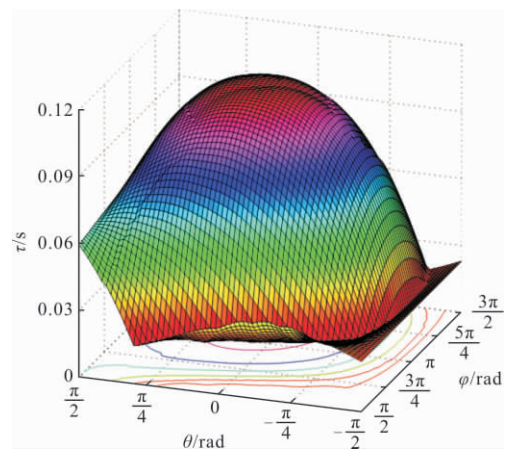


图 4 不同交会姿态下目标穿越光束扫描区的时间分布

Fig.4 Time distribution of target crossing beam scanning area under different intersection attitudes

1.3 蒙特卡罗仿真

由于探测装置与目标之间的交会姿态随机性较大, 文中采用蒙特卡罗方法模拟旋转扫描的探测过程, 算法流程如图 5 所示。

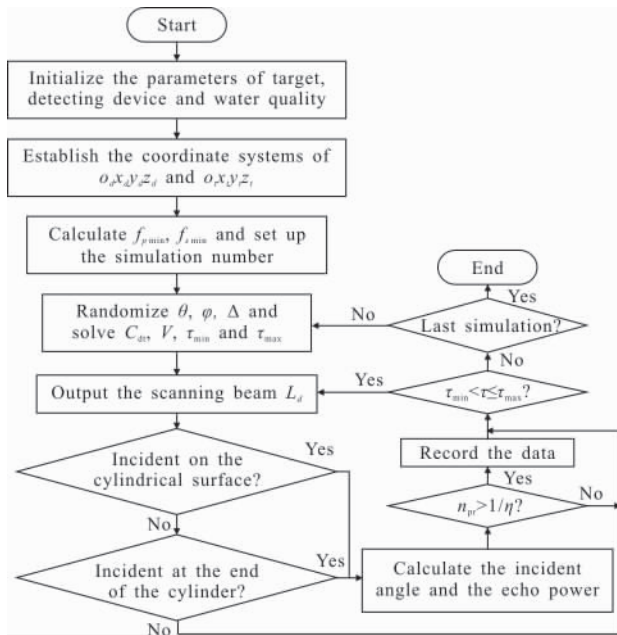


图 5 蒙特卡罗算法流程

Fig.5 Flow chart of Monte Carlo algorithm

首先是建立探测坐标系 $o_d x_d y_d z_d$ 和目标坐标系 $o_x y z$, 其次是设置目标、探测装置以及环境水质的参数, 如目标的尺寸大小、距离方位、速度矢量, 探测装置的激光功率、脉冲宽度、扫描转速以及水体衰减系数等, 并设置随机交会的仿真次数。之后, 采用蒙特卡罗算法框架随机抽样目标的俯仰角 θ 、偏航角 φ 以及扫描光束的初始相位 Δ , 进而计算旋转矩阵 $C_d(\theta, \varphi)$ 、相对速度 V 和每次交会的扫描时间 $\tau(\theta, \varphi)$ 。最后, 将探测时间 t 在扫描时间 $\tau(\theta, \varphi)$ 的最小值 $\tau_{\min}(\theta, \varphi)$ 与最大值 $\tau_{\max}(\theta, \varphi)$ 之间离散递增, 求解扫描光束方程和目标方程的空间相交问题, 以判断光束是否照射到目标, 并求出相应的入射角和回波功率。当根据回波功率得出的光电子数量 $n_{pe} > 1/\eta$ 时记录仿真数据, 标记本次仿真已探测到目标, 并继续进行下一次交会仿真, 直到完成所设仿真次数, 最后根据探测事件和仿真次数统计目标的探测概率 χ 。

2 仿真分析

2.1 参数设置

文中在蒙特卡罗仿真中考虑典型的迎面相遇的探测问题, 仿真参数设置如表 1 所示。其中, 符号 U 表示均匀随机分布。目标表面的光学特性采用某种镀漆金属板的六参数双向反射分布函数(Bidirectional

Reflectance Distribution Function, BRDF, $k_b=0.254\ 5$ 、 $k_d=0.367\ 6$ 、 $k_r=21.803\ 1$ 、 $a=0.670\ 5$ 、 $b=-27.572\ 1$ 、 $c=1.2$) 表征其空间反射率 $f_r \cos(\psi)$ 。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Parameter	Simulation value
L_d/m	4
Φ/m	0.3
$v_d/m \cdot s^{-1}$	20
d_d/m	20
μ	0.81
η	9.1%
$v_d/m \cdot s^{-1}$	20
$\xi/(\circ)$	60-80
Δ	$U[0, 2\pi)$
ϕ_d/mm	1.8
P_d/kW	50
T_p/ns	1
r_r/mm	8.5
$\alpha/(\circ)$	50
$\beta/(\circ)$	60
θ	$U[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$
φ	$U[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}]$
κ/m^{-1}	1/7

2.2 结果分析

文中首先分析了脉冲频率 f_p 和扫描频率 f_s 对探测概率的影响。为了模拟激光探测装置与目标交会的随机性, 每次仿真均对俯仰角 θ 、偏航角 φ 以及扫描光束的初始相位 Δ 进行随机抽样。笔者对扫描半角 $\zeta=60^\circ$ 时, 不同 f_p 、 f_s 的探测情况均进行 10 000 次仿真, 并统计出相应的探测概率, 结果如图 6 所示。可以看出, 脉冲频率 f_p 一定时, 探测概率 χ 随扫描频率 f_s 的增加, 先急剧增大, 之后缓慢上升并趋于平稳; 当扫描频率 $f_s > 70$ r/s 时, 随着 f_s 的增加, 探测概率 χ 起伏增大, 波动随之剧烈。出现上述分布形态的原因在于, 当 f_s 较小时, 由于目标在圆周方向出现的随机性, 探测光束往往还未到达目标时, 目标已经飞离扫描区域, 导致光束在很大概率上都无法照射到

目标,探测概率较低。随着 f_s 的增大,探测光束的扫描周期越短,目标在交会时间内被漏检的概率越小,因而探测概率增大。但由于光束入射角、目标距离以及目标表面光学特性等因素的影响,并非所有照射到目标的光束都能产生强度足够的回波信号,因而探测概率 χ 在一定范围的 f_s 中趋于平稳。之后,随着 f_s 的增加,扫描光束在圆周方向上的探测间距增大,出现目标从相邻扫描光束之间飞过的情況,导致探测概率起伏波动。

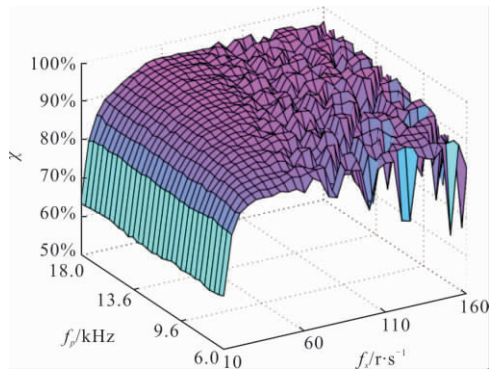


图 6 $\zeta=60^\circ$ 时探测概率随 f_p 和 f_s 的变化

Fig.6 Probability of detection vs the frequency of the pulse and the scanning with $\zeta=60^\circ$

另一方面,扫描频率 f_s 一定时,探测概率 χ 随脉冲频率 f_p 的增加而逐渐增大。究其原因在于,随着 f_p 的增加,扫描光束在圆周方向上的探测间距减小,在一个扫描周期中甚至会出现多次照射到目标的情况,增大了目标的探测概率。

图 7 描述了扫描半角 $\zeta=80^\circ$ 时,不同 f_p 和 f_s 所对应的探测概率分布。对比图 6 可以看出,两者具有相

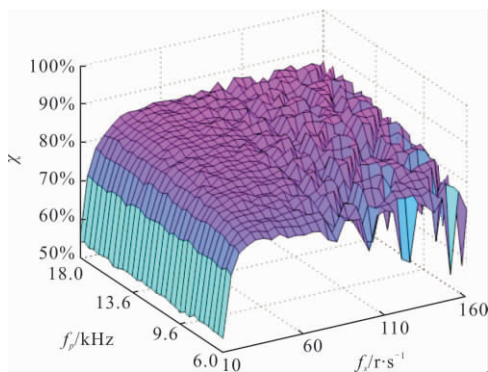


图 7 $\zeta=80^\circ$ 时探测概率随 f_p 和 f_s 的变化

Fig.7 Probability of detection vs the frequency of the pulse and the scanning with $\zeta=80^\circ$

同的分布形态,存在的唯一区别是,前者的探测概率 χ 总体上高于后者。分析发现原因在于, $\zeta=60^\circ$ 时扫描光束下在圆周方向上的探测间距小于 $\zeta=80^\circ$ 的情况,导致即使目标距离相同,前者的探测概率也明显高于后者。

考虑到脉冲频率 f_p 受制于激光器的工业水平,不可能无限增大,文中以目前峰值功率(P_0)50 kW 激光器的性能参数为依据,选取脉冲频率 $f_p=12$ kHz,研究扫描光束对不同距离水下目标的探测性能,结果如图 8 所示。

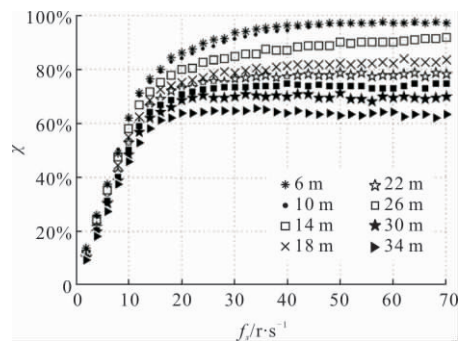


图 8 不同初始距离下目标探测概率随 f_s 的变化

Fig.8 Probability of target detection vs f_s under different initial distances

从图中可以发现,扫描频率 f_s 较小时探测概率 χ 较低;随着 f_s 的增加, χ 增大并趋于平稳。总体而言,对近距离目标的探测概率高于远距离目标,最佳扫描频率 f_s 应控制在 30~40 r/s 之间。但值得注意的是,即使目标距离较近,扫描频率 f_s 不断增大,探测概率 χ 也不能达到 100%,原因在于交会过程中,圆柱目标对入射光束的反射方向和回波强度具有不确定性。即使目标距离较近,入射光束较强,但由于交会姿态的随机性,存在扫描光束略入射等情况,导致激光探测装置难以接收到有效的回波信号,因而存在一定的漏检概率。

3 结论

文中对水下运动目标的激光扫描探测过程进行了数值建模和仿真分析。通过建立端面圆周、柱体表面与扫描锥面的交会方程,精确计算了不同交会姿态下目标穿越光束扫描区的时间分布。结果表明,最小穿越时间并非出现在迎头相遇的交会情况中,原因在于虽然此时相对速度最大,但目标穿越光束扫

描区的相对位移更大所致。

其次,基于扫描光束和目标表面的相交约束,结合目标表面 BRDF 特性,建立了扫描光束回波功率方程,并采用蒙特卡罗方法模拟了随机交会的探测过程。仿真发现,增大扫描半角时周向探测间距也增大,从而导致探测概率降低。同时,仿真分析了脉冲频率 f_p 和扫描频率 f_s 对探测概率的影响。结果表明,与前者相比,后者对探测概率有较大影响——随着扫描频率 f_s 的增加,探测概率急剧增大后趋于平稳,之后由于扫描过快、出现漏检而起伏波动。针对长度 4 m、直径 0.3 m、速度 20 m/s 的圆柱目标,通过对目标距离不同时探测性能的分析,最佳扫描频率应控制在 30~40 r/s 之间。

参考文献:

- [1] Chen Chao, Yang Hongru, Wu Lei, et al. Underwater target detection with electro-optical system [J]. *J Appl Opt*, 2011, 32(6): 1059–1066. (in Chinese)
- [2] Wang Lujun, Wang Qingcui, Wang Nan. Construction and enlightenment of American underwater early warning detection system [J]. *Acoust Electron Engineering*, 2015(1): 49–52. (in Chinese)
- [3] Yan Yu. The overview study of non-acoustic detection technology base on UUV application in searching target underwater [J]. *Ship Sci Tech*, 2017, 39(12): 10–13, 43. (in Chinese)
- [4] Zhang Leqi. Research on distance measurement accuracy and error analysis of underwater laser proximity detection system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] Hua Dengxin, Wang Jun. Research progress of ocean laser remote sensing technology (invited) [J]. *Infrared Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0903003. (in Chinese)
- [6] Matteoli S, Corsini G, Diani M, et al. Automated underwater object recognition by means of fluorescence LIDAR [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2015, 53(1): 375–393.
- [7] Lei Xuanhua, Cheng Jinfang, Xiao Dawei. Analysis calculation and simulation on signal to noise ratio for underwater laser alarm [J]. *Infrared Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3256–3261. (in Chinese)
- [8] Li S F, Wang R B, Chen G H. Monte Carlo based angular analysis of multiple scattered photons for underwater optical imaging [J]. *Opt Appl*, 2018, 48(2): 237–247.
- [9] Zhang Yingluo, Wang Yingmin, Huang Aiping. Influence of suspended particles based on Mie theory on underwater laser transmission [J]. *Chin J Lasers*, 2018, 45(5): 0505002. (in Chinese)
- [10] Liu Na, Ke Jieyao, Yang Suhui, et al. Simulation and analysis on underwater transmission characteristics of gaussian pulse lasers with car [J]. *Acta Optica Sin*, 2018, 38(4): 0406003. (in Chinese)
- [11] Zhang Y L, Wang Y M, Huang A P, et al. Effect of underwater suspended particles on the transmission characteristics of polarized lasers [J]. *J Opt Soc Am A-Opt Image Sci Vis*, 2019, 36(1): 61–70.
- [12] Zha Bingting, Zhang He, Zhang Xingjin, et al. Optimization design on angle parameters of single-beam pulsed laser orientation recognition underwater [J]. *Infrared Laser Engineering*, 2013, 42(4): 895–899. (in Chinese)
- [13] Zha Bingting. Research on synchronous scanning underwater laser panoramic detection for short-range target [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] Tan Yayun, Zhang Hui, 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] Tan Yayun. Research on underwater laser proximity circumferential scanning detection technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] Zha Bingting, Yuan Hailu, Tan Yayun. Ranging precision for underwater laser proximity pulsed laser target detection [J]. *Opt Commun*, 2019, 431: 81–87.