

# 水下单光束扫描探测系统光路参数优化设计

谭亚运, 张 合, 张祥金, 查冰婷

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

**摘 要:** 针对水下单光束扫描探测系统探测水中近场目标的需求, 为抑制海水后向散射干扰, 提高系统信噪比, 对系统光路参数进行了优化设计。通过推导系统盲区距离公式、水中目标回波和后向散射功率方程, 分析了系统探测区域和信噪比同光路参数的关系。在不同水质条件下, 基于粒子群算法 (PSO) 对光路参数进行了优化计算。结果表明: 对探测区域为  $6^{-10}$  m 的系统, 当发射光束与接收视场平行, 接收视场半角为 9 mrad, 收发间距为 10.6 cm 时, 系统信噪比达到最佳。为验证理论模型的正确性, 设计了水下激光探测光路模拟系统, 测试不同光路参数下系统信噪比, 实验结果与理论值一致。优化结果可为水下单光束扫描探测系统光路设计提供理论依据。

**关键词:** 单光束扫描; 光路参数; 探测区域; 信噪比

**中图分类号:** TJ43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0612001

## Optimization design on optical parameters of underwater single-beam scanning detection system

Tan Yayun, Zhang He, Zhang Xiangjin, Zha Bingting

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the necessity of underwater single-beam scanning detection system detecting near field target, optical parameters were optimized to suppress the backscatter by sea and improve system SNR. Blind distance formula, echo power equation of underwater target and sea backscatter were derived to analyze the relationship among detection area, system SNR and optical parameters. The optical parameters were optimizationally calculated based on particle swarm optimization (PSO) under different water qualities. The results showed that, for the system detection area was  $6^{-10}$  m, when the transmitted beam was parallel to receiving field, half receiving FOV was 9 mrad, and the baseline distance was 10.6 cm, the system got the best SNR. To prove the correctness of the theoretical model, optical simulation system of underwater laser detection was designed to test system SNR under different optical parameters, the experimental result was consistent with theoretical result. The optimization results can provide theory basis for designing optical parameters of underwater single-beam scanning detection system.

**Key words:** single-beam scanning; optical parameters; detecting field; SNR

收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 国家部委基金(00404010503-3)

作者简介: 谭亚运(1990-), 男, 博士生, 主要从事水下激光探测方面的研究。Email: tyynjust@163.com

导师简介: 张合(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事智能探测与控制技术方面的研究。Email: hezhangz@mail.njust.edu.cn

## 0 引言

水下目标探测识别是现代鱼雷武器的基本功能。目前,鱼雷在弹目交汇时的近场目标探测多采用磁探测技术和声探测技术。磁探测由于消磁技术的不断发展,在新型鱼雷中的应用受到限制;声探测系统结构复杂、成本高、干扰源多,且难以在近距离分辨目标的方位,因此亟需一种新型物理场探测方式弥补上述探测方式的不足<sup>[1-2]</sup>。激光探测具有方向性好、精度高、抗干扰能力强等优点,能够可靠探测水中近场目标,准确提供目标方位和距离信息<sup>[3]</sup>。

目前对水下激光探测研究主要是针对水下激光成像和机载激光雷达水下探测领域。参考文献[4-5]计算了水下距离选通成像中海水后向散射功率,分析了后向散射与成像系统参数之间的关系;参考文献[6-8]分析了蓝绿激光水下成像信噪比与激光发射功率、系统光路和光谱接收带宽等参数的关系,提出可以通过减小接收视场角,准直发射光束,增大发射接收间距等方法减少海水后向散射干扰,提高系统信噪比。但对于非同轴激光探测系统,上述参数对系统探测区域分布有很大影响,其变化范围受系统探测区域限制而互相制约。对水下激光探测系统探测区域和信噪比的综合分析尚未见报道。文中分析了水下单光束扫描探测系统探测范围和系统信噪比同系统光路参数之间的关系。针对系统指标,在不同水质下,采用粒子群算法(PSO)对光路参数进行了优化计算,得到满足探测区域要求的系统最佳信噪比及其对应的光路参数,并进行了实验验证。

## 1 水下单光束扫描探测系统原理

水下单光束扫描探测系统通过发射脉冲激光照射水中目标,接收系统接收目标回波来获取目标的方位和距离信息。系统通常安装于鱼雷前端、声呐系统之后,系统结构如图 1 所示。系统工作原理为:高功率蓝绿激光器发射的脉冲激光束照射在发射全反射镜表面,与鱼雷轴成一定夹角射出;旋转扫描装置驱动发射和接收全反射镜旋转,发射光束随发射全反射镜的旋转实现绕鱼雷轴 360°全周向动态扫描,形成与鱼雷轴有一定夹角的圆锥状光束场,同时接收反射镜随电机旋转形成与弹轴有一定夹角的圆锥状接收

视场;当扫描光束照射到水中目标,激光回波通过同步扫描的接收反射镜反射进入激光接收系统;信号处理系统通过分析接收到的回波信号来判别目标方位和距离。由于激光发射和接收均与鱼雷轴成一定夹角且不同轴,为探测不同距离处目标,需调节发射激光束与圆锥形的探测视场相交,相交区域为系统探测区域。

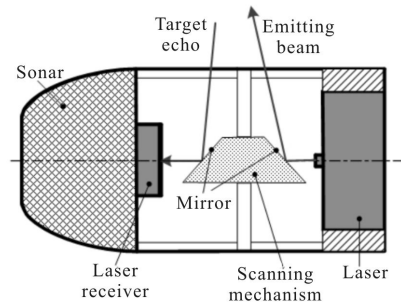


图 1 水下单光束扫描探测系统原理

Fig.1 Principle of underwater single-beam scanning detection system

## 2 系统探测区域与信噪比计算

水下单光束扫描探测方式一方面可以只用一台激光器和单个激光接收器实现全周向探测,压缩了探测系统体积;另一方面,非同轴同步扫描的探测方式减少了发射光束与接收视场的相交面积,抑制了近距离海水的后向散射噪声,但是其发射光束和接收视场的交会位置和探测区域分布情况,将对系统探测性能产生严重影响。

### 2.1 系统探测区域

水下单光束扫描探测系统发射光束和接收视场如图 2 所示。 $S_1S_2$  为扫描机构的轴线(与鱼雷轴重合),点  $S_1$ 、 $S_2$  分别为发射和接收反射面中心,发射窗口中心与接收窗口中心距离为  $d_0$ 。激光发射窗口半径为

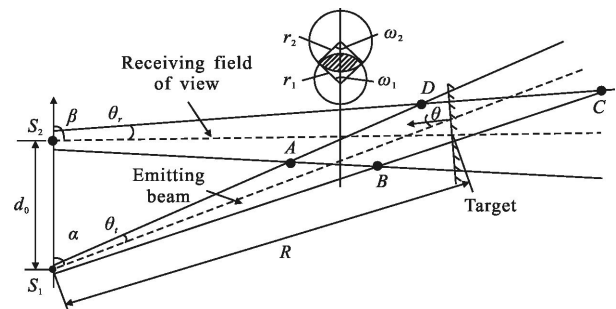


图 2 发射光束和接收视场示意图

Fig.2 Schematic of emitter beam and receiving view field

$r_t$ , 光束发散半角为  $\theta$ ; 激光接收口径为  $r_r$ , 接收视场半角为  $\theta_r$ 。规定向量  $\vec{S}_1 \vec{S}_2$  为鱼雷轴正方向, 则发射光束轴线与鱼雷轴方向的夹角为  $\alpha$ , 接收视场轴线与鱼雷轴方向的夹角为  $\beta$ 。

发射光束与接收视场相交于  $A, B, C, D$  四点, 四边形  $ABCD$  为系统探测区域, 即目标必须在  $ABCD$  范围内才能被探测,  $A$  点为探测区起始点,  $C$  点为探测区截止点。点  $A$  和  $C$  到发射中心  $S_1$  的距离分别为近端盲区距离  $R_A$  和远端盲区距离  $R_C$ , 则由几何关系可以计算得:

$$R_A = \frac{(d_0 - r_t - r_r) \sin(\beta + \theta_r)}{\sin(\beta + \theta_r - \alpha - \theta)} \quad (1)$$

$$R_C = \frac{(d_0 + r_t + r_r) \sin(\beta - \theta_r)}{\sin(\beta + \theta_r - \alpha - \theta)} \quad (2)$$

### 2.2 目标回波功率方程

假设发射脉冲激光的峰值功率为  $P_t$ , 光学系统总透射率为  $\eta$ 。目标上光斑中心到激光发射中心距离  $R$  为目标距离, 激光发射方向与目标平面法线之间所夹锐角为  $\theta$ 。水下单光束扫描探测主要是对水中近场目标探测(目标距离  $\leq 15$  m), 且光束发散角很小, 照射在目标上的光斑远小于水中目标的反射截面积, 因此水下单光束扫描激光探测的目标均为扩展目标。目标回波功率方程为<sup>[9]</sup>:

$$P_r(R) = \frac{P_t \eta S_1(R) \rho r_r^2 \cos \theta}{R^2 S(R)} e^{-2\alpha R} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为目标反射率;  $c$  为海水总衰减系数;  $S_1(R)$  为距离  $R$  处接收系统被照射截面积(图 2 中阴影部分);  $S(R)$  为距离  $R$  处激光光斑面积, 令  $K(R) = S_1(R)/S(R)$  为激光探测系统重叠系数。则公式(3)可以化简为:

$$P_r(R) = \frac{P_t \eta K(R) \rho r_r^2 \cos \theta}{R^2} e^{-2\alpha R} \quad (4)$$

由图 2 可以看出: 系统盲区内  $K(R) = 0$ , 充满区  $BD$  内  $K(R) = 1$ , 过渡区域  $AB, DC$  内重叠系数计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$K(R) = \begin{cases} \frac{r_1^2 (\omega_1 - \sin \omega_1) + r_2^2 (\omega_2 - \sin \omega_2)}{2\pi r_1^2} \dots \omega_1 \leq \pi \\ \frac{r_1^2 (\omega_1 + \sin \omega_1) + r_2^2 (\omega_2 - \sin \omega_2)}{2\pi r_1^2} \dots \omega_1 > \pi \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $r_1 = r_t + R \tan \theta$ ,  $r_2 = r_t + R \tan \theta$ , 分别为发射光斑和接收视场在距离  $R$  处的截面圆半径;  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为

重叠区域对光斑中心和接收视场中心的张角。

$$\begin{cases} \omega_1 = 2 \arccos \left| \frac{d^2 + r_1^2 - r_2^2}{2dr_1} \right| \\ \omega_2 = 2 \arccos \left| \frac{d^2 + r_2^2 - r_1^2}{2dr_2} \right| \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $d$  为距离  $R$  处发射光斑中心  $O_1$  与接收视场中心  $O_2$  的距离, 由于发射接收轴线夹角很小(mrad 级), 因此该系统中  $d$  可以近似为:

$$d = d_0 - R \tan(\beta - \alpha) \quad (7)$$

将公式(6)、(7)代入公式(5), 即可计算系统过渡区域重叠系数  $K(R)$ , 将计算结果带入公式(4)即可求得目标回波功率。

### 2.3 后向散射功率方程

激光在海水介质中传输时的后向散射对水下激光探测系统性能有很大影响<sup>[10]</sup>。在单光束扫描探测系统中, 激光发射光束和接收视场不同轴, 屏蔽了盲区距离内海水后向散射的干扰, 但是在系统探测区域内的海水后向散射仍然是探测系统主要干扰。假设激光光强在光斑内是均匀分布的, 则激光接收系统接收到的距离  $R$  处海水的后向散射功率为:

$$P_b(R) = \pi r_r^2 \beta(\pi) \eta \int_R^{R+v\tau} \frac{K(R) e^{-2\alpha R}}{R^2} dR \quad (8)$$

式中:  $\beta(\pi)$  为水体后向散射系数;  $v$  为光在水中传播速度;  $\tau$  为激光发射脉宽。从上述推导可以看出: 系统重叠系数  $K(R)$  对目标回波功率和海水后向散射功率均有较大影响, 而  $K(R)$  与系统发射束散角、接收视场角、发射接收间距、发射和接收与鱼雷轴夹角等光路参数有关。

### 2.4 系统信噪比模型

对水下单光束扫描探测系统进行优化设计, 探测信噪比是衡量系统性能最常用的评判准则。忽略探测器的热噪声, 激光接收系统噪声主要包括: 从光源与目标之间海水的后向噪声、水下背景辐射噪声、探测器电路噪声。因此水下单光束扫描探测系统信噪比为:

$$SNR = \frac{P_r}{\sqrt{P_b^2 + P_a^2 + P_e^2}} \quad (9)$$

式中:  $P_a$  和  $P_e$  分别为背景辐射功率和电路等效噪声功率。在实际应用中, 深水中背景辐射光很微弱且接收系统有窄带滤光片, 可以滤除大部分背景光; 电路噪声可以通过电路优化设计抑制, 且上述两类噪声

功率均为微瓦级,远小于后向散射噪声功率<sup>[11]</sup>。因此,影响系统探测距离的主要噪声为海水的后向散射,系统信噪比可简化为:

$$SNR \approx \frac{P_r}{P_b} \quad (10)$$

即系统的信噪比为目标回波功率与无目标时的海水后向散射功率之比。

### 3 信噪比分析及光路参数优化

由上述推导可知,系统探测区域和信噪比与光束发散角、接收视场角、发射接收倾斜角度和间距等参数有关。在系统设计时,为实现侧前方的全周向探测,发射光束与鱼雷轴夹角一般为固定值,光束发散角由激光器决定,探测系统需设计的参数有发射接收间距  $d_0$ 、接收倾角  $\beta$  和接收视场角  $\theta$ 。系统给定参数和水质参数如表 1 所列。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
$\alpha/(\circ)$	60	$\beta(\pi)$	0.0026
$P_r/\text{kW}$	10	$c/\text{m}^{-1}$	0.4
$\theta/\text{mrad}$	5	$v_r/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.26 \times 10^8$
$r_r/\text{cm}$	1	$\tau/\text{ns}$	10
$r_t/\text{cm}$	1.5	$\rho$	0.1
$\eta$	0.8	$\theta/(\circ)$	0

利用表 1 中给出的参数,分析计算系统信噪比随系统参数的变化。图 3 计算了发射接收间距  $d_0$  为 20 cm、接收倾角  $\beta$  为  $60.6^\circ$  和接收视场半角  $\theta$  为 17.4 mrad 时,系统信噪比随探测距离变化。此时系

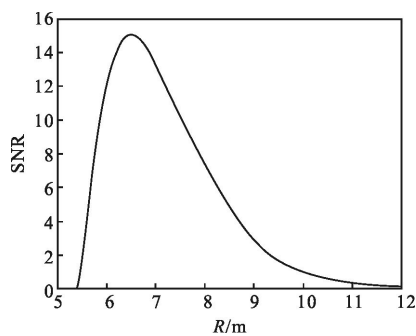


图 3 信噪比随距离的变化规律

Fig.3 Variation of SNR with detecting distance

统近端盲区距离  $R_A=5.5\text{ m}$ ,无远端盲区。从图中可以看出:目标进入探测区域后,由于近距离内系统重叠系数增长迅速,信噪比也随探测距离迅速增大,到达峰值后随探测距离下降明显,探测距离为 10 m 时,系统信噪比为 1.05,此时系统已经无法分辨目标回波与海水后向散射回波。

图 4(a)、(b)、(c)分别为固定  $d_0=20\text{ cm}$ 、 $\beta=60.6^\circ$  和  $\theta_r=17.4\text{ mrad}$  中两个参数不变,在探测距离 10 m 处的系统信噪比随接收视场角、收发间距、接收倾角的变化规律。由图 4 可知,当接收视场角与发射光束散角相当时,系统信噪比最大,随后信噪比随接收视场角增大迅速降低;系统信噪比随发射接收间距增加而增大;信噪比随接收视场与鱼雷轴夹角变大先增大后降低。不同参数对系统信噪比的影响规律不尽相同,要提高信噪比应当增大收发间距  $d_0$  和接收倾角  $\beta$ ,并设计激光接收视场角与发射光束散角相当。但由公式(1)和(2)可知,上述参数变化同时会导致系统探测区域的改变。参数设计时,在增大系统信噪比的同时也应满足系统探测区域设计要求。该系统用于探测 6~10 m 处的水中目标,因此设定  $R_A < 5.5\text{ m}$ ,  $R_C > 11\text{ m}$ 。

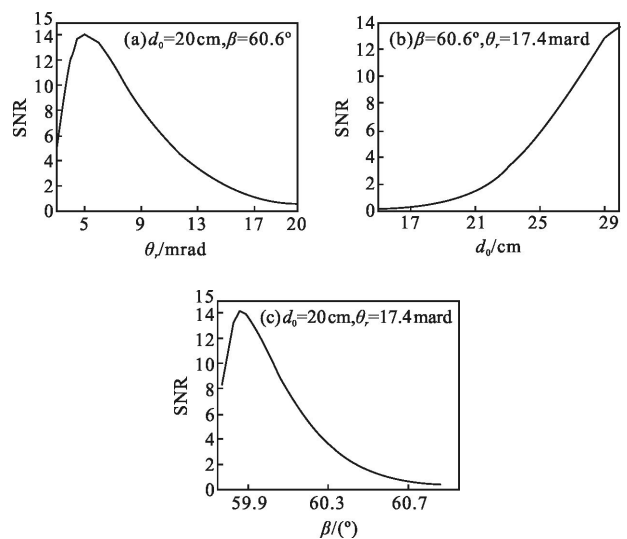


图 4 信噪比随光路参数的变化规律

Fig.4 Variation of SNR with optical parameters

应用于鱼雷的水下激光探测系统需要在不同海水条件下探测目标,设计的系统参数需要适用于不同水质条件。在 3 种海水水质条件下列出水质条件,即  $c=0.22$ ,  $\beta(\pi)=0.0016$ ;  $c=0.31$ ,  $\beta(\pi)=0.0020$ ;  $c=0.40$ ,

$\beta(\pi)=0.0026$ , 利用粒子群算法(PSO)对光路参数进行优化。由图 3 可知进入探测视场后系统信噪比很快达到峰值,且随探测距离下降很快,因此取探测距离 10 m 时的系统信噪比为目标函数,约束条件为  $R_A < 5.5$  m,  $R_C > 11$  m, 将  $d_0$ 、 $\beta$  和  $\theta_r$  作为设计变量进行优化,获得在满足系统探测区域要求前提下的最大信噪比及其对应的参数。优化时取学习因子为 1.49, 惯性权重为 0.73, 粒子数目为 60, 最大循环次数为 200, 具体优化过程如图 5 所示, 图中  $N$  为优化步数。

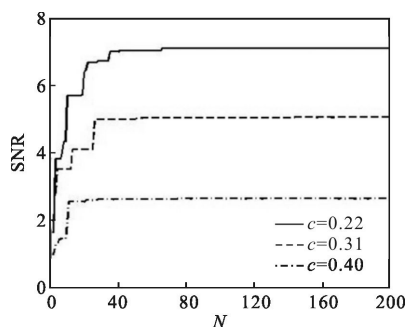


图 5 优化过程

Fig.5 Optimization process

各参数的优化结果如表 2 所示。

表 2 优化结果

Tab.2 Optimization results

$c, \beta(\pi)$	$SNR_{max}$	$d_0/cm$	$\beta/(^\circ)$	$\theta/mrad$
0.22, 0.001 6	7.1	10.60	60	9.01
0.31, 0.002 0	5.0	10.62	60	9.03
0.40, 0.002 6	2.6	10.62	60	9.02

由图 5 和表 2 可知, 随着海水吸收和后向散射系数变大, 系统信噪比下降明显, 但是不同水质参数条件下取得最大信噪比时的  $d_0$ 、 $\beta$  和  $\theta_r$  基本一致。对于不同的水质, 当发射接收间距  $d_0$  为 10.6 cm、接收视场半角  $\theta_r$  为 9 mrad, 且发射和接收轴线平行时, 系统信噪比达到最优。

## 4 实验

### 4.1 实验装置设计

为测试光路参数对系统信噪比的影响, 验证参数优化结果, 设计了如图 6 所示的水下激光探测光路模拟系统。该系统可以通过模拟单光束扫描系统中光学器件的位置和角度, 测试不同参数条件下激

光探测系统的探测性能。在图 6 中,  $A$  为激光接收模块,  $B$  为接收反射镜,  $C$  为发射反射镜,  $D$  为激光器,  $F$  和  $G$  为高精度转台,  $E$  是导轨,  $H$  和  $I$  为滑块。反射镜固定在转台上, 通过转台调节反射镜偏转角度(反射镜镜面与激光器中心和接收器中心连线的夹角)以控制激光发射和接收倾角, 调节精度为  $3'$ , 通过滑动滑块  $H$  和  $I$  的位置来调节发射和接收距离, 调节精度为 1 mm。由于激光接收系统制作完成后, 接收视场角为确定值, 难以连续调节, 因此实验时根据优化结果设计视场角为 9 mrad, 激光光源采用 532 nm 高功率脉冲激光器, 其参数见表 1; 激光接收模块采用雪崩光电二极管(APD)。

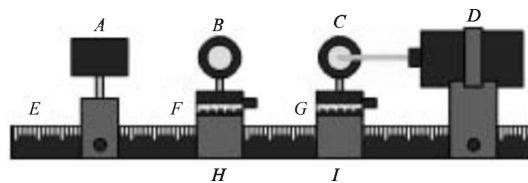


图 6 水下激光探测光路模拟系统

Fig.6 Optical simulation system of underwater detection

### 4.2 测试实验

利用上述模拟装置在水池中进行实验, 实验布置如图 7 所示。水池长 20 m, 宽和深均为 1.5 m, 水池两端为高透过率玻璃, 侧壁均用吸光材料覆盖。实验装置放置在水道一端的操作台上, 目标放置在水池中。实验时采用自来水添加粗制海盐模拟海水水质, 水池中水质参数为  $c=0.22$ ,  $\beta(\pi)=0.0016$ 。选取 10 组满足探测区域要求的  $d_0$  和  $\beta$  (包含优化结果), 测试不同参数条件下后向散射和目标回波信号, 计算系统信噪比, 验证理论模型和优化结果的正确性。

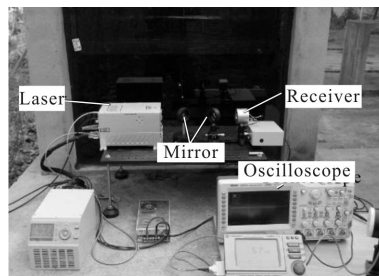


图 7 实验布置图

Fig.7 Experiment arrangement

系统具体实验过程为: 调节反射镜转台和滑块将系统参数调整到设定值, 激光器出射激光束, 光束

由发射反射镜反射后入射到水池中,先测试无目标时水体后向散射回波电压幅值  $V_b$ ,随后在水池 10 m 处放置木板目标,测试目标回波电压幅值  $V_t$ ,每组参数条件下重复测试 3 次取平均值。表 3 为不同光路参数条件下,系统信噪比实验值和理论计算值的对比,表中 SNR 为理论值,SNRE 为实验值。由表 3 中数据可知,系统信噪比实验值随光路参数的变化趋势与理论计算一致,且在优化结果处取得信噪比最优值。表中信噪比实验值均略低于理论计算值,这主要是由于理论计算时忽略了水下背景辐射噪声和探测器电路噪声。主要对比变化趋势和最大值位置,具体取值意义不大。

表 3 系统信噪比实验值和理论值对比

Tab.3 Comparison of experimental and theoretical values of SNR

$d_0/cm$	$\beta/(^\circ)$	$V_b/v$	$V_t/v$	SNR <sub>E</sub>	SNR
10.7	60.00	0.27	1.80	6.6	7.1
15.0	60.50	0.36	1.88	5.1	5.8
14.0	60.45	0.48	1.87	3.9	4.6
13.0	60.35	0.52	1.77	3.6	4.2
14.5	60.60	0.68	1.85	2.7	3.2
10.5	60.20	0.75	1.82	2.4	2.9
8.0	59.95	0.76	1.60	2.1	2.4
14.5	60.75	1.31	1.96	1.5	1.8
7.5	60.00	1.32	1.82	1.4	1.6
10.0	60.30	1.24	1.86	1.5	1.7

## 5 结 论

根据水下单光束扫描探测系统光路特征,推导了目标回波和后向散射方程,建立了系统信噪比模型,分析了系统探测范围和系统信噪比同系统光路参数之间的关系。结合系统的技术指标和给定参数,在不同水质条件下,采用粒子群算法(PSO)对光路参数进行了优化计算。结果表明:在满足系统探测区域要求前提下,当激光发射和接收间距  $d_0$  为 10.6 cm,接收视场半角  $\theta$  为 9 mrad,且发射和接收视场平行时,水下单光束扫描探测系统信噪比最大。为验证理

论模型的正确性,设计了水下激光探测光路模拟系统,在水池中测量不同光路参数下系统信噪比,实验结果与理论值吻合。建立的优化模型和结果可以为水下单光束扫描探测系统光路设计提供理论参考。

## 参考文献:

- [1] Luo Song. Study on application of blue-green laser in torpedo weapon[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010,8(6): 52-54. (in Chinese.)
- [2] Pan Shuguang, Deng Jiahao, Qiu Zhiliang. Characteristic analysis of detection environment of underwater laser fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2007, 29 (1): 44-47. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Huang Youwei, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1191-1197. (in Chinese)
- [5] Li Li, Gao Zhiyun, Wang Xia, et al. Optical backscatter calculations for an underwater range-gated imaging system [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(4): 488-491. (in Chinese)
- [6] Liu Xueming, Zhang Mingde, Sun Xiaohan. A new kind of underwater laser imaging system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(3):206-210. (in Chinese)
- [7] Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 220-226. (in Chinese)
- [8] Wang Lei, Xu Zhiyong, Zhang Qiheng, et al. Detection sensitivity analysis of underwater blue-green laser imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 79-84. (in Chinese)
- [9] Zha Bingting, Zhang He, Zhang Xiangjin, et al. Optimization design on angle parameters of single-beam pulsed laser orientation recognition underwater system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 895-899. (in Chinese)
- [10] Wan Jun, Liang Ruitao, Hu Qingping. Calculation of water backscattering signal and estimation of optical coefficient for underwater laser detection system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(6): 43-48. (in Chinese)
- [11] Xu Qiyang, Yang Kuntao, Wang Xinbing, et al. Blue-Green Lidar Ocean Survey[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2002: 60-113. (in Chinese)