

非均匀水体光学隐蔽深度模型建立与验证

朱海荣*, 朱海**, 蔡鹏, 李惟羽, 王旺

海军潜艇学院, 山东 青岛 266000

摘要 初始的光学隐蔽深度模型(OCD)是在海水光学性质均匀的条件下建立的,针对光学性质均匀水体假定条件下的光学隐蔽深度模型缺乏普适性的缺点,基于海水中对比度传输方程,在垂向方向上把海水划分为多个光学性质相似的均匀层,并依此建立非均匀海水条件下光学隐蔽深度(OCD_LAYER)模型。计算并分析了观测天顶角、海水体衰减系数和潜器表面反射率对非均匀海水条件下光学隐蔽深度模型的影响。使用潜模和光学隐蔽深度测量系统在近岸完成模型的实验验证和效果分析。使用 3 m 水柱漫衰减系数均值,OCD 模型的平均均方根误差为 1.19 m,平均绝对误差为 1.19 m,平均相对误差为 48.77%,OCD_LAYER 模型的平均均方根误差为 1.05 m,平均绝对误差为 0.89 m,平均相对误差为 36.18%。实验结果表明,OCD_LAYER 模型准确性更高,误差更低,结果更可靠。

关键词 海洋光学; 光学隐蔽深度; 非均匀海水; 对比度

中图分类号 TJ67; U666.16

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1001003

Establishment and Verification of the Optical Concealment Depth Model for Layered Water

Zhu Hairong*, Zhu Hai**, Cai Peng, Li Weiyu, Wang Wang

Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266000, China

Abstract The initial model of optical concealed depth (OCD) was established under the assumption of uniform optical properties of seawater, which had limited applications. Nonetheless, we developed a new model that views seawater as a non-uniform layered entity. Based on the contrast transfer equation, seawater was divided vertically into different areas, and each vertical division had multiple properties similar to the properties of homogeneous water. Subsequently, the new model of optical concealment depth for layered water (OCD_LAYER) was established. The observation zenith angle, attenuation coefficient of seawater, and surface reflectance of submarines were calculated and analyzed accordingly. The verification test and the effect analysis of the model were performed based on the latent model and measurement systems. As a result, the mean value of the diffusion attenuation coefficient is found to be 3 m. In the OCD model, the average root mean square error is 1.19 m, the average absolute error is 1.19 m, and the average relative error is 48.77%. Meanwhile, the OCD_LAYER model displays a better estimation system, as indicates by lower errors; the average root mean square error is 1.05 m, the average absolute error is 0.89 m, and the average relative error is 36.18%. The experimental results show that the proposed model demonstrates higher accuracy and provides more reliable results than the initial model.

Key words ocean optics; optical concealment depth; inhomogeneous sea water; contrast ratio

OCIS codes 010.4450; 040.1880; 230.0040

1 引 言

光学隐蔽是水下航行器最基本的保证航行安全的条件之一^[1]。水下潜器的光学隐蔽性与所处的海水光学参数、潜器形态、表面特性、海面状况及潜器

深度等因素密切相关^[2]。光学隐蔽深度的扩展定义是指在平静海面和大气能见度较好的情况下,在一定高度通过目力、望远镜、光学相机等光学探测手段能观测到水下潜器的最深深度。我国沿海区域处于宽广的大陆架上,水深较浅,大都在 200 m 以内,潜

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61573040)

* E-mail: 846770081@qq.com; ** E-mail: henlongjoy@163.com

艇出航必须要经过浅水区域,在浅水区域常规潜艇有时需要浮起进行充电,长时间的航行容易导致光学暴露,海上布雷、水下无人机执行任务时也要考虑所在海域的光学隐蔽性,因此,研究光学隐蔽深度、建立更加精确的光学隐蔽深度模型、实时测量获取光学隐蔽信息,具有十分重要的军事应用价值。

初始的光学隐蔽深度(OCD_LAYER)模型^[1-2]是在光学性质均匀的海水条件下建立的,国外没有公开的相关研究资料,国内朱海教授和姜璐教授在该方面进行了大量的理论研究^[3-8]。实际海水的光学性质是不均匀的,因此,初始的光学隐蔽深度模型缺乏普适性。本文在前期研究的基础上,基于光学性质非均匀海水,根据目标背景对比度的传输理论^[9-10],在分析目标背景对比度在海水、大气、海面传输特性的基础上建立非均匀海水条件下光学隐蔽深度模型,即 OCD_LAYER 模型;并基于实测的海水剖面光学参数数据对模型参数进行了仿真,分析了模型的影响因素;最后在三亚对模型进行海上实验验证,实验结果验证了非均匀海水条件下 OCD_LAYER 模型可靠和稳定,误差低,具有普适性。

2 非均匀海水光学隐蔽深度模型的建立

2.1 模型推导

本身不发光的水下潜器,其固有对比度可表示为

$$C_0 = \left| \frac{L_0 - L_{b0}}{L_{b0}} \right| = \left| \frac{R_t E_d - E_u}{E_u} \right| = \left| \frac{(R_t - R) E_d}{E_d R} \right|, \quad (1)$$

式中: L_{b0} 为距离水下潜器零处的背景辐亮度; L_0 为距离水下潜器零处的固有辐亮度; E_u 为海水上行辐照度; E_d 为海水下行辐照度; R_t 为潜器表面反射率; R 为水体漫反射率。

距离潜器 r 处的对比度为表观对比度,有

$$C_r = \left| \frac{L_r - L_{br}}{L_{br}} \right|, \quad (2)$$

式中: L_r 为距离潜器 r 处的辐亮度; L_{br} 为距离潜器 r 处的背景辐亮度。

根据海水中辐射传递方程,首先建立大气、海面及海水中的目标背景对比度传输关系:

$$\frac{dL}{dr} = -cL + L_*, \quad (3)$$

式中: c 为海水体积衰减系数,随波谱波长 λ 变化,公式中均采用简化表示; L_* 为辐射的总增量。

水下潜器辐亮度和背景辐亮度的辐射方程依

次为

$$\frac{dL_r}{dr} = -cL_r + L_*, \quad (4)$$

$$\frac{dL_{br}}{dr} = -cL_{br} + L_*, \quad (5)$$

两式相减得到:

$$\frac{d(L_r - L_{br})}{dr} = -c(L_r - L_{br}), \quad (6)$$

将(1)式、(2)式代人(6)式可得

$$\frac{C_r}{C_0} = \left| \frac{L_{b0}}{L_{br}} \right| \exp(-cr), \quad (7)$$

又因为 $L_{b0} = L_{br} \exp(-kr \cos \theta)$, 对比度传输方程可表示为

$$a_r = \frac{C_r}{C_0} = \exp[-(c + k \cos \theta) \cdot r], \quad (8)$$

式中: k 为海水漫衰减系数, θ 为观测天顶角。针对两个连续路径 r 和 s ,有

$$a_{r+s} = a_r a_s. \quad (9)$$

忽略太阳直射反射的影响,海面反射效应可表示为

$$\gamma = \frac{L_u(0^-)t}{L_u(0^-)t + L_{sky} \rho_s n_w^2}, \quad (10)$$

式中: $L_u(0^-)$ 为水次表面向上辐亮度; t 为海气界面的辐射透过率; ρ_s 为海面反射率; n_w 为海水折射率; L_{sky} 为天空光的辐射量。

根据 Preisendorfer 结论,海面折射及波浪效应为

$$\beta = 1 - \exp\left(-\frac{\tan^2 4\varphi}{2\sigma^2}\right), \quad (11)$$

式中: φ 为海水次表面潜器的半视角; σ^2 为海面光学状态。

消光^[11-12]是指大气对辐射强度的衰减作用,经过路径 r 传输后的大气光谱透射比 τ 表示为

$$\tau(r) = \frac{C_r}{C_0} = \exp(-\mu \cdot r), \quad (12)$$

一定高度处观测到的表观对比度可表示为

$$C_r = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot a_r \cdot C_0. \quad (13)$$

将潜器从海水背景中恰好能识别时的目标背景阈值对比度 C_t 可表示为^[13]

$$\lg C_t \approx (\lg \alpha + 0.5)^{-1} - 2, \quad (14)$$

式中: α 为目标视角,与潜器的特征尺度 l 、观察距离 H 以及探测的放大倍率 M 有关; M 为辅助目视器材的放大倍率,裸眼无助目视时 $M=1$ 。

$$\alpha \approx 3.44 \frac{Ml}{H}. \quad (15)$$

海水光学特性均匀条件下,垂向观察,当 C_r 下降到 C_t 时潜器的深度就是光学隐蔽深度,即 $r = D_{\text{OCD}}$,有

$$C_t = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot C_0 \cdot \exp[-(c + k \cos \theta) \cdot D_{\text{OCD}}], \quad (16)$$

化简后得^[1]

$$D_{\text{OCD}} = \ln \left[\left| \frac{R_t E_d - E_u}{E_u} \right| \cdot \gamma \cdot \beta \cdot 10^{2 - (\lg a + 0.5)^{-1}} \times \exp(-\mu H) \right] / (c + k \cos \theta), \quad (17)$$

式中: H 为侦察高度。

把海水在垂向方向上划分为 n 个光学性质相似的均匀层,根据(13)式,进行如下推导:

$$C_{r1} = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot a_{r1} \cdot C_0, i = 1 \quad (18)$$

$$C_{r2} = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot a_{r1} \cdot a_{r2} \cdot C_0, i = 2 \quad (19)$$

$$C_{rn} = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot (a_{r1} \cdot a_{r2} \cdot \dots \cdot a_{rn}) \cdot C_0, i = n \quad (20)$$

再根据(9)式,有

$$C_{rn} = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot (a_{r1} \cdot a_{r2} \cdot \dots \cdot a_{rn}) \cdot C_0 = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot a_{r1+r2+\dots+rn} \cdot C_0. \quad (21)$$

当 C_r 下降到 C_t 时,有

$$C_t = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot C_0 \cdot \exp \left[- \sum_{i=1}^n (c_i + k_i \cos \theta_i) \cdot D_i \right], \quad (22)$$

进一步可得

$$D_{\text{OCD_LAYER}} = n \bar{D}_i = \ln \left[\left| \frac{R_t E_d - E_u}{E_u} \right| \cdot \gamma \cdot \beta \cdot 10^{2 - (\lg a + 0.5)^{-1}} \cdot \exp(-\mu H) \right] / \left[\sum_{i=1}^n (c_i + k_i \cos \theta_i) \right], \quad (23)$$

$D_{\text{OCD_LAYER}}$ 即为光学特性非均匀海水条件下光学隐蔽深度。

忽略漫衰减系数随深度的变化,在两个深度上测量垂向下行辐照度,有

$$k_d(\lambda) = - \frac{1}{z_2 - z_1} \ln \frac{E_d(z_2, \lambda)}{E_d(z_1, \lambda)}, \quad (24)$$

因此,海水漫衰减系数 k 可以通过测量两个深度上的下行辐照度计算得到。

2.2 模型分析

2.2.1 观测者角度影响

观测天顶角是观测方向与水平法线方向的夹角,潜模的特征尺度为 0.75 m,观察高度为 2 m,基于实测的海水剖面光学参数数据,裸眼目视条件下,潜模的光学隐蔽深度与观测天顶角的关系如图 1 所示。

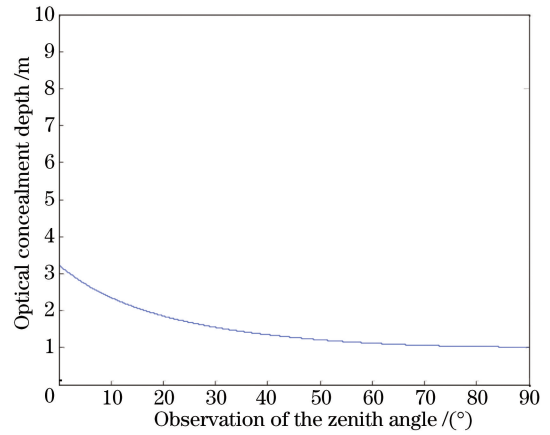


图 1 光学隐蔽深度与观测天顶角的关系

Fig. 1 Relationship between the optical concealment depth and the observation of the zenith angle

从图 1 可以看出,良好天气条件下,仿真得到的潜模的光学隐蔽深度随观测天顶角的增加而减小,观测天顶角为零时,潜模的光学隐蔽深度值最大,观测天顶角 90°时,潜模的光学隐蔽深度值最小。

2.2.2 体积衰减系数影响

观测天顶角为零时,潜模的光学隐蔽深度与海水体衰减系数的关系如图 2 所示。

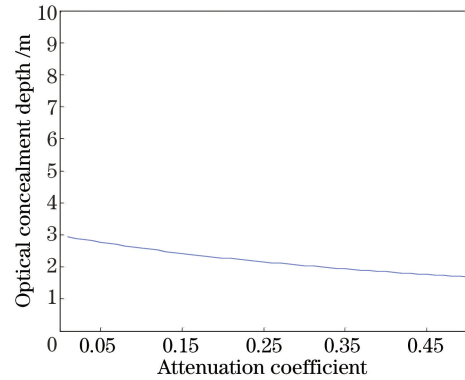


图 2 光学隐蔽深度与海水体衰减系数的关系

Fig. 2 Relationship between the optical concealment depth and the attenuation coefficient of seawater

根据图 2 得到,良好天气条件下,仿真得到潜模的光学隐蔽深度随海水体衰减系数的增加而减小。海水体衰减系数越大,光学隐蔽深度越小,越不容易暴露。

2.2.3 目标反射率影响

潜模的光学隐蔽深度与表面反射率的关系如图 3 所示。

根据图 3 得到,良好天气条件下,仿真得到潜模的光学隐蔽深度在反射率 0.1 左右处有个低点,随后反射率越大,光学隐蔽深度也随之越大,越易暴露,反射率在 0.1 处曲线有下凹,说明潜模表面反射

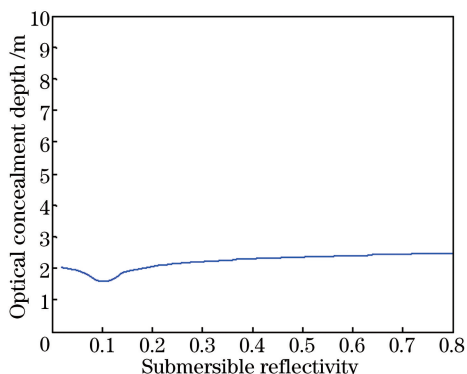


图3 光学隐蔽深度与潜模表面反射率的关系

Fig. 3 Relationship between the optical concealment depth and the submersible reflectivity

率与背景反射率越接近,光学隐蔽深度越小。

定量评估模型性能的统计参数有平均绝对误差 (AE, E_A)、平均相对误差 (RE, E_R)、均方根误差 (RMSE, E_{RMS})、偏差 E_{Bias} , 其定义分别如下:

$$E_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - x_i|, \quad (25)$$

$$E_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - x_i}{x_i} \right| \times 100\%, \quad (26)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}, \quad (27)$$

$$E_{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i), \quad (28)$$

式中: N 为测量次数; x_i 为潜模实测值; y_i 为光学隐蔽深度测量系统的测量值。

3 实验与结果

2017年11月23日16:00时,在某锚地进行模型的实验验证,实验原计划在远海处开展,但由于外海风浪很大,不具备甲板操作条件,且该实验航次主要保障其他项目的海试任务,因此本次海上实验在归港途中的锚地进行,测深仪测得锚地水深11.63 m,实验器材包括长为75 cm的涂黑潜模、光学隐蔽深度测量系统,依次通过潜模和测量系统测量潜模的光学隐蔽深度,用缆绳吊放,其中潜模吊放至刚好看不见的深度,测量系统吊放至海底。

光学隐蔽深度测量系统,共21个光学测量通道,中心波长分别为395,408,445,465,490,510,520,532,555,560,565,589,622,670,687,700,709,766,780,850,662 nm,带宽为10 nm,装置外径为10.4 cm,可以通过测量海水上行辐照度、海水下行辐照度实现光学隐蔽深度的测量计算。

光学隐蔽深度测量系统测量可直接吊放至水底

后再提至水面,重复3次测量,测量结果的平均值为2.44 m。

海水漫衰减系数在垂直剖面分布不均匀,因此根据测量的结果可以将水体划分为光学性质不均匀分布的24干层,将各层测量值代入OCD_LAYER模型计算,并将3,5,8 m水柱的海水漫衰减系数平均值作为均匀水体的漫衰减系数数值,代入OCD模型计算,结果见表1。

表1 3,5,8 m水柱的漫衰减系数均值

Table 1 Mean values of the diffusion attenuation coefficients of the 3, 5, and 8 m water columns

Wave band /nm	Height of water columns /m		
	3	5	8
490	0.038	0.033	0.061
520	0.015	0.019	0.055
532	0.027	0.025	0.058
555	0.025	0.024	0.057
560	0.039	0.036	0.074
662	0.013	0.013	0.030

使用3,5,8 m水柱漫衰减系数均值的OCD测量结果见表2~4。

表2 使用3 m水柱漫衰减系数均值的OCD测量结果

Table 2 Mean values of the diffusion attenuation coefficients under 3-m water columns measured based on the OCD model

Times	Wave band /nm					
	490	520	532	555	560	662
1	3.41	3.90	3.64	3.68	3.67	3.43
2	3.42	3.90	3.64	3.69	3.68	3.43
3	3.43	3.91	3.64	3.69	3.68	3.43
4	3.44	3.91	3.64	3.69	3.68	3.43
5	3.45	3.92	3.64	3.69	3.69	3.43
6	3.45	3.92	3.64	3.69	3.69	3.43

表3 使用5 m水柱漫衰减系数均值的OCD测量结果

Table 3 Mean values of the diffusion attenuation coefficients under 5-m water columns measured based on the OCD model

Times	Wave band /nm					
	490	520	532	555	560	662
1	3.50	3.81	3.68	3.71	3.69	3.49
2	3.51	3.81	3.68	3.71	3.70	3.49
3	3.53	3.81	3.68	3.71	3.70	3.49
4	3.54	3.82	3.68	3.71	3.70	3.49
5	3.54	3.82	3.68	3.71	3.71	3.49
6	3.54	3.83	3.69	3.71	3.71	3.49
7	3.54	3.84	3.69	3.72	3.72	3.49
8	3.54	3.84	3.70	3.72	3.72	3.49
9	3.54	3.85	3.70	3.72	3.71	3.49
10	3.54	3.85	3.70	3.73	3.72	3.49

表 4 使用 8 m 水柱漫衰减系数均值的 OCD 测量结果

Table 4 Mean values of the diffusion attenuation coefficients under 8-m water columns measured based on the OCD model

Times	Wave band /nm					
	490	520	532	555	560	662
1	3.04	3.14	3.09	3.11	3.11	2.89
2	3.05	3.14	3.09	3.12	3.11	2.89
3	3.06	3.14	3.09	3.12	3.11	2.89
4	3.07	3.15	3.09	3.12	3.11	2.89
5	3.07	3.15	3.10	3.12	3.12	2.89
6	3.07	3.16	3.10	3.12	3.12	2.89
7	3.07	3.16	3.11	3.12	3.12	2.90
8	3.07	3.17	3.11	3.13	3.12	2.90
9	3.07	3.17	3.11	3.13	3.12	2.90
10	3.07	3.17	3.12	3.13	3.12	2.90
11	3.07	3.18	3.12	3.14	3.13	2.90
12	3.07	3.18	3.13	3.14	3.14	2.90
13	3.07	3.19	3.14	3.15	3.15	2.91
14	3.08	3.19	3.14	3.16	3.16	2.91
15	3.08	3.20	3.15	3.16	3.16	2.91
16	3.08	3.20	3.15	3.16	3.17	2.92

根据实验数据定量评估 OCD 模型的平均绝对误差、平均相对误差、均方根误差和偏差,统计结果见表 5~7。

表 5 OCD 模型与潜模测量统计结果 (3 m 水柱漫衰减系数均值)

Table 5 Statistical results of mean values of the diffusion attenuation coefficients based on the OCD model and the submersible model under 3-m water columns

Wave band /nm	RMSE /m	AE /m	RE /%	Bias /m
490	0.99	0.99	40.70	0.99
520	1.47	1.47	60.26	1.47
532	1.20	1.20	49.94	1.20
555	1.25	1.25	51.10	1.25
560	1.24	1.24	50.91	1.24
662	0.99	0.99	40.58	0.99
Average value	1.19	1.19	48.77	1.19

表 6 OCD 模型与潜模测量统计结果 (5 m 水柱漫衰减系数均值)

Table 6 Statistical results of mean values of the diffusion attenuation coefficients based on the OCD model and the submersible model under 5-m water columns

Wave band /nm	RMSE /m	AE/m	RE /%	Bias /m
490	1.09	1.09	44.75	1.09
520	1.39	1.39	56.89	1.39
532	1.25	1.25	51.11	1.25
555	1.27	1.27	52.18	1.27
560	1.27	1.27	51.96	1.27

续表

Wave band /nm	RMSE /m	AE/m	RE /%	Bias /m
662	1.05	1.05	42.90	1.05
Average value	1.22	1.22	49.97	1.22

表 7 OCD 模型与潜模测量统计结果 (8 m 水柱漫衰减系数均值)

Table 7 Statistical results of mean values of the diffusion attenuation coefficients based on the OCD model and the submersible model under 8-m water columns

Wave band /nm	RMSE /m	AE /m	RE /%	Bias /m
490	0.63	0.63	25.74	0.63
520	0.73	0.73	29.84	0.73
532	0.68	0.68	27.66	0.68
555	0.69	0.69	28.41	0.69
560	0.69	0.69	68.94	0.69
662	0.46	0.46	45.94	0.46
Average value	0.65	0.65	37.76	0.65

将各分层海水的漫衰减系数代入 OCD_LAYER 模型,计算得到的潜模光学隐蔽深度如图 4 所示。

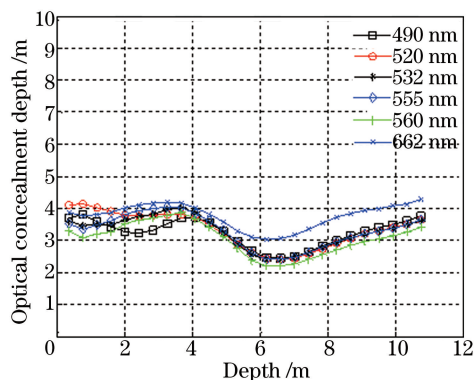


图 4 OCD_LAYER 模型计算结果

Fig. 4 Calculation results of the OCD_LAYER model

OCD_LAYER 测量结果见表 8。

表 8 OCD_LAYER 测量结果

Table 8 Measurement results of the OCD_LAYER model

Times	Wave band /nm					
	490	520	532	555	560	662
1	4.07	4.24	3.26	3.11	2.83	3.59
2	3.65	4.05	3.52	3.41	3.17	3.79
3	3.44	3.92	3.53	3.51	3.22	3.84
4	3.08	3.71	3.57	3.89	3.47	4.04
5	2.96	3.61	3.59	4.13	3.63	4.16
6	3.15	3.70	3.95	4.19	4.16	4.31
7	3.57	3.86	4.09	3.87	3.72	4.16
8	3.89	3.99	3.95	3.86	3.58	4.14
9	4.00	3.91	4.17	4.18	3.90	4.27

续表

Times	Wave band /nm					
	490	520	532	555	560	662
10	3.81	3.63	3.95	3.96	4.04	3.95
11	3.31	3.19	3.20	3.30	3.10	3.55
12	2.82	2.76	2.59	2.70	2.41	3.15
13	2.52	2.48	2.35	2.42	2.15	2.95
14	2.37	2.34	2.31	2.31	2.09	2.90
15	2.31	2.30	2.35	2.30	2.13	2.95
16	2.40	2.37	2.44	2.40	2.22	3.11
17	2.60	2.54	2.59	2.60	2.38	3.34
18	2.80	2.72	2.76	2.79	2.55	3.56
19	3.05	2.95	2.98	3.00	2.75	3.79
20	3.25	3.14	3.16	3.17	2.92	3.94
21	3.32	3.22	3.23	3.22	2.98	3.95
22	3.36	3.26	3.27	3.25	3.02	3.95
23	3.47	3.37	3.36	3.35	3.11	4.02
24	3.60	3.48	3.46	3.47	3.24	4.13

根据实验数据定量评估 OCD_LAYER 模型的平均绝对误差、平均相对误差、均方根误差和偏差,统计结果见表 9。

表 9 OCD_LAYER 模型与潜模测量统计结果
Table 9 Statistical results of the OCD_LAYER model and the submersible model

Wave band /nm	RMSE /m	AE /m	RE /%	Bias /m
490	0.95	0.80	32.83	0.80
520	1.07	0.89	36.35	0.89
532	0.99	0.82	33.75	0.82
555	1.03	0.85	34.86	0.85
560	0.85	0.62	25.26	0.62
662	1.39	1.32	54.04	1.32
Average value	1.05	0.89	36.18	0.89

结合表 1~表 9,可以得到晴天背景条件下,目标尺寸为 0.75 m 时,490, 520, 532, 555, 560, 662 nm波段的测量结果和潜模实测值的统计关系。使用 3 m 水柱漫衰减系数均值,OCD 模型计算的 $E_{\text{RMS}}=1.19$ m, $E_{\text{R}}=1.19$ m, $E_{\text{A}}=48.77\%$, $E_{\text{Bias}}=1.19$ m;使用 5 m 水柱漫衰减系数均值,OCD 模型计算的 $E_{\text{RMS}}=1.22$ m, $E_{\text{A}}=1.22$ m, $E_{\text{R}}=49.97\%$, $E_{\text{Bias}}=1.22$ m;使用 8 m 水柱漫衰减系数均值,OCD 模型计算的 $E_{\text{RMS}}=0.65$ m, $E_{\text{A}}=0.65$ m, $E_{\text{R}}=37.76\%$, $E_{\text{Bias}}=0.65$ m。OCD_LAYER 模型计算的 $E_{\text{RMS}}=1.05$ m, $E_{\text{A}}=0.89$ m, $E_{\text{R}}=36.18\%$, $E_{\text{Bias}}=0.89$ m。根据上述统计参数可以得到,使用 3 m、5 m 衰减系数均值的结果,OCD_LAYER 模型的平均均方根误差、平均绝对误差、平均相对误差、偏差都小于 OCD 模型计算结果。使用 8 m 衰减系数均

值,OCD_LAYER 平均相对误差小于 OCD,但其他性能劣于 OCD 结果,由于实际观测值只有 2.4 m,仪器测量计算 OCD 也不过 5 m,因此,根据 3 m、5 m 衰减系数均值的结果综合分析,OCD_LAYER 模型准确性更高,得到的结果更可靠,更具有普适性。

本次海上实验是在归港途中的锚地进行的,实验测量过程时间紧,且受太阳光照条件限制,本次实验一共观测量 3 次,存在数据量少且不具有代表性的缺陷。测量系统给出的是可见光波段范围内不同波段的光学隐蔽深度,人工观测是通过目视观测得到可见光波段的结果,且人工观测受观测者视力条件的影响较大,因此人工观测只是一种辅助测量方法,在今后研究中需加以改进。

4 结 论

针对光学性质均匀水体假定条件下的光学隐蔽深度模型缺乏普适性的缺点,基于海水中对比度传输方程,在垂向方向上把海水划分为多个光学性质相似的均匀层,建立了非均匀海水条件下光学隐蔽深度模型。利用实测的海水剖面光学参数数据,仿真分析了观测天顶角、海水体衰减系数和潜器表面反射率对非均匀海水条件下水下光学隐蔽深度模型的影响。使用潜模和光学隐蔽深度测量系统在近岸完成模型的实验验证和效果分析。实验得到 OCD_LAYER 模型的平均均方根误差为 1.05 m,平均绝对误差为 0.89 m,平均相对误差为 36.18%。与 OCD 模型相比,OCD_LAYER 模型的计算精度有所提高,普适性增加。实验条件的限制造成本次实验数据不足,下一步将在较深海域再次实验验证 OCD_LAYER 模型的可靠性。

参 考 文 献

- [1] Zhu H R, Zhu H, Liu J T, *et al.* Measurement system for optical concealment depth of underwater vehicle[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 2778-2784.
朱海荣, 朱海, 刘金涛, 等. 水下航行器光学隐蔽深度测量系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2778-2784.
- [2] Zhu H R, Cai P, Zhu H, *et al.* Miniaturization design of optical concealment depth measuring system [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 726-731.
朱海荣, 蔡鹏, 朱海, 等. 光学隐蔽深度测量系统的小型化设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 726-

- 731.
- [3] Zhu H, Jiang L, Liang B, *et al.* Retrieving optical concealment depth of underwater target by remote sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(5): 699-702.
朱海, 姜璐, 梁波, 等. 水下目标光学隐蔽深度遥感获取方法[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 699-702.
- [4] Jiang L, Zhu H, Li S. Influencing factor analysis of detecting underwater target in visible light condition [J]. Navigation of China, 2006, 29(1): 56-59, 63.
姜璐, 朱海, 李松. 可见光条件下探测水下目标影响因素分析[J]. 中国航海, 2006, 29(1): 56-59, 63.
- [5] Jiang L, Zhu H, Li S, *et al.* The relationship between max survey depth of airborne ocean lidar and secchi depth [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(6): 397-399.
姜璐, 朱海, 李松, 等. 机载激光雷达最大探测深度同海水透明度的关系 [J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 397-399.
- [6] Jiang L, Zhu H, Yu Y Z. Optical concealment analysis of underwater target based on Monte Carlo method of simulation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(4): 401-404.
姜璐, 朱海, 于运治. 基于蒙特卡罗方法的水下目标光学隐蔽性影响因素分析 [J]. 火箭与制导学报, 2006, 26(4): 401-404.
- [7] Jiang L, Zhu H, Li S. Analysis of underwater target optical concealment depth[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 810-815.
姜璐, 朱海, 李松. 水下目标可见光隐蔽深度分析 [J]. 火箭与制导学报, 2006, 26(1): 810-815.
- [8] Jiang L, Zhu H, Li S. The Monte Carlo calculation of anti-lidar-detection for the underwater target [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(3): 250-253.
姜璐, 朱海, 李松. 水下目标反激光雷达探测隐蔽深度的蒙特卡罗计算 [J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(3): 250-253.
- [9] Cai Y, Liu Y L, Dai C M, *et al.* Simulation analysis of target and background contrast in condition of cirrus atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0801001.
蔡熠, 刘延利, 戴聪明, 等. 卷云大气条件下目标与背景对比度模拟分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0801001.
- [10] Chen M, Hu S, Gao T C, *et al.* Study on the effect of inhomogeneous aerosol fields on radiative transfer process in near-infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101003.
陈鸣, 胡帅, 高太长, 等. 气溶胶空间非均匀性对近红外辐射传输的影响分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0101003.
- [11] Chen L W, Tang H T. Sliding mode control in the underwater vehicle roll attitude control[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(9): 55-57.
陈路伟, 汤华涛. 滑模控制在水下航行器横滚姿态控制中的应用研究 [J]. 舰船电子工程, 2013, 33(9): 55-57.
- [12] Zhao J P, Wang W B, Jiao Y T. Analysis for the high-frequency variation of the downwelling irradiance caused by different atmosphere and sea surface condition[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(4): 1-8.
赵进平, 王维波, 矫玉田. 海面大气和海洋条件变化引起的太阳辐照度高频变化分析 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(4): 1-8.
- [13] Chen L Z. Chinese sea vertically inhomogeneous ocean optical properties for further study[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 35-40.
陈立贞. 中国海垂直非均匀海洋光学特性进一步研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 35-40.