

文章编号: 0258-7025(2007)05-0699-04

水下目标光学隐蔽深度遥感获取方法

朱海¹, 姜璐¹, 梁波², 陈卫标²

(¹ 海军潜艇学院, 山东 青岛 266071; ² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 针对用透明度盘深度(SD)估计水下目标的光学隐蔽深度(OCD)的方法缺乏科学性与准确性,提出了利用水色卫星遥感数据获取水下目标光学隐蔽深度的方法。在给出水下目标光学隐蔽深度概念的基础上,分析了水下目标对水中光传输的影响,并根据目标背景对比度传输方程建立了水下目标隐蔽深度与透明度盘深度的转换关系。建立了水下目标光学隐蔽深度的遥感获取模式,并对模式进行了实验验证。结果表明,黑色模型的理论计算和实测数据的相对误差小于 30%,而白色模型的理论计算和实测数据的相对误差小于 20%。

关键词 遥感;光学隐蔽深度;辐射传输;水色遥感

中图分类号 TP 722;P 731 **文献标识码** A

Retrieving Optical Concealment Depth of Underwater Target by Remote Sensing

ZHU Hai¹, JIANG Lu¹, LIANG Bo², CHEN Wei-biao²

¹ Navy Submarine College, Qingdao, Shandong 266071, China

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Because of the huge difference of optical characteristic between underwater target and Secchi-Disk, it was unscientific and inaccurate to estimate the optical concealment depth (OCD) of underwater target using Secchi-Disk depth (SD). A method to determine the optical concealment depth of underwater target by satellite remote sensing of ocean color is proposed. The influence of underwater target on light transmission in the water was analyzed on the foundation of the concept of underwater target optical concealment depth, and the semi-analysis transform model of the Secchi-Disk depth and underwater target optical concealment depth was obtained based on the transfer equation of contrast. Then the model of retrieving the optical concealment depth of underwater target by remote sensing of ocean color was setup. Finally, an in-situ experiment was implemented, and the results of experiment showed that the black model error of theoretical and experimental data was less than 30%, while for the white mode the error was less than 20%.

Key words remote sensing; optical concealment depth; radiation transmission; remote sensing of ocean color

1 引言

水下目标的航空探测及反探测一直以来都是侦察领域研究的关键技术。但在目前海军使用的资料中,没有水下目标光学隐蔽深度(OCD)的概念,它通常是参照海水的透明度盘深度(SD)来估计的。透明度盘深度是海洋光学测定水质的简单而传统的方法,由于这种方法所采用的白盘在体积及色彩上与水下目标差异很大,因此它与目标对海水中光的传输的影响可能完全不同。因此建立水下目标光学

隐蔽深度的概念,及利用水色卫星资料进行水下目标光隐蔽环境及隐蔽机制的研究对提高航空探测及保证水下目标隐蔽性意义重大。

水下目标光学隐蔽深度可通过分析目标对水下光传输的影响,利用海上实测的各层海水的剖面衰减参数计算获取。但由于海洋的高动态,使其在不同海区不同季节皆存在较大差异。在通过高代价海洋普查来获取目标光学隐蔽环境较为困难的情况下,卫星遥感便成了获取高时空分辨率的海洋光

收稿日期:2006-09-26;收到修改稿日期:2007-01-10

作者简介:朱海(1965—),男,江西兴国人,教授,博士生导师,海洋物理学博士,主要研究方向为海洋光学与水下导航技术。E-mail:seapeter@163.com

学隐蔽参数唯一的有效手段。美国的海洋水色卫星宽视场海洋遥感器(SeaWiFS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)以及我国 FY-1 与 HY-1 卫星的资料都可为本研究提供有效的技术条件^[1~5]。本文从理论和实验出发,对水下目标隐蔽深度的获取方法进行了探讨。

2 水下目标光学隐蔽深度的提取理论

2.1 基本理论

可见光条件下探测水下目标是在飞机上通过目力或望远镜借助于海水的透明度和目标的可见光辐射特征进行水下目标侦察。由此水下目标的光学隐蔽深度的定义为:在海况及能见度较好的情况下,从飞机上通过目力及望远系统能观测到水下目标的最深度。它与诸多因素有关,其中主要有太阳高度角、方向角、观察角度、海况及海水的固有与表观光学参数等^[6]。

海水透明度的本质是水中能见度的问题,它既与海水的固有光学特性有关,也与表观光学特性有关^[7]。水中目标的固有对比度 C_0 和表观对比度 C_r 可表示为

$$C_0 = \frac{L_0 - L_{b0}}{L_{b0}}, \quad C_r = \frac{L_r - L_{br}}{L_{br}}, \quad (1)$$

式中 L_0 和 L_{b0} 分别为零距离处目标的固有辐亮度和背景辐亮度, L_r 和 L_{br} 分别为距离目标 r 处的目标辐亮度和背景辐亮度。

根据海水光学辐射传递方程,可以推导出对比度传递方程

$$C_r = C_0 \exp[-(c + k \cos \theta)r], \quad (2)$$

式中 θ 为光子流方向与天顶方向夹角, r 为离目标的观察距离, c 为水体的衰减系数, k 为水体的漫衰减系数。当 $C_0/C_r = e$, 即 $r = r_e = 1/(c + k \cos \theta)$, 称为对比度衰减长度(单位 m)。清洁大洋水的对比度衰减长度为 20 m 左右;沿岸带水的对比度衰减长度为 5 m 左右;混浊水的对比度衰减长度仅为几个厘米。

透明度盘深度 H_{SD} 表示白盘的表观对比度已下降到人眼灵敏阈值 0.02^[8,9], 即

$$C_r = C_{SD0} \exp[-(c + k \cos \theta)H_{SD}] = 0.02, \quad (3)$$

而透明度盘的固有对比度为 $C_{SD0} = \frac{L_0 - L_{b0}}{L_{b0}} =$

$\frac{\varphi E_d - E_u}{E_u} = \frac{\varphi - R}{R}$, 式中 φ 为透明度盘的漫反射率, R 为海洋水体漫反射率, E_d 为向下辐照度, E_u 为向上辐照度。 φ 一般取为 0.3, R 一般取为 0.02, 故 C_{SD0}

$$= (0.3 - 0.02) / 0.02 = 14.$$

美国斯克里普斯海洋研究所能见度实验室用玻璃底壳船进行水中对比度观测。用光度计测量辐亮度,水中目标和光度计的距离可进行调节。在水体的衰减系数和漫衰减系数分别为 $c = 0.594 \text{ m}^{-1}$, $k = 0.216 \text{ m}^{-1}$ 时,得到水中目标表观对比度 C_r 与距离 r 的关系为 $C_r = C_0 \exp(-0.810r)$ 。

根据对比度传输的理论,可以建立水下目标光学隐蔽深度 H_{OCD} 的经验公式。当水下目标涂黑色,并沉入水中恰看不到的深度时

$$C_{OCD0} \exp[-(c + k \cos \theta) \times H_{OCD}] = 0.02, \quad (4)$$

而 $C_{OCD0} = (\varphi_s - R)/R$ 为水下目标的固有对比度,代入(4)式,可以得到

$$H_{OCD} = -\ln\left(\frac{0.02R}{\varphi_s - R}\right) / (c + k \cos \theta), \quad (5)$$

式中 φ_s 为水下目标漫反射率。

根据 c 与 k 的经验关系, $c \approx (2.7 \sim 3.3)k$, 各海区有所不同, H_{OCD} 可以表示为

$$H_{OCD} = -\ln\left(\frac{0.02R}{\varphi_s - R}\right) / (3 + \cos \theta)k. \quad (6)$$

2.2 遥感反演模型

对比(3)与(4)式,可以建立 H_{SD} 与 H_{OCD} 之间的转换关系

$$H_{OCD} = \frac{\ln C_{OCD0} - \ln C_{SD0}}{c + k \cos \theta} + H_{SD}. \quad (7)$$

若将 490 nm 示为大洋水体穿透窗口, 520 nm 为近岸水的窗口, 则水下目标光学隐蔽深度与透明度转换模型为

$$H_{OCD1} = \frac{\ln C_s - \ln C_t}{c + k(490) \cos \theta} + H_{SD} \quad (\text{大洋})$$

$$H_{OCD2} = \frac{\ln C_s - \ln C_t}{c + k(520) \cos \theta} + H_{SD} \quad (\text{近岸}), \quad (8)$$

其中 $k(490) = 0.022 +$

$$0.0883[Lw(443)/Lw(550)]^{-1.491} \text{ m}^{-1}$$

$k(520) = 0.044 +$

$$0.0663[Lw(443)/Lw(550)]^{-1.398} \text{ m}^{-1}, \quad (9)$$

根据(6)式,因此 H_{OCD} 也可由水色卫星的遥感参数直接获取,其模型为

$$H_{OCD1} = -\ln\left(\frac{0.02R}{\varphi_s - R}\right) / (3 + \cos \theta)k(490) \quad (\text{大洋})$$

$$H_{OCD2} = -\ln\left(\frac{0.02R}{\varphi_s - R}\right) / (3 + \cos \theta)k(520) \quad (\text{近岸}). \quad (10)$$

3 实验与结果

针对验证需要,根据实际的水下目标的等比例

模型制作了黑色实验目标,并利用海上现场进行实验验证。实验主要对白盘、黑色目标模型在水中能见度的综合测试,同时对水体的透射率及目标的光谱特性也进行了测量^[10~12]。实验中的透明度盘和模型目标的漫反射率参数为:目标漫反射率(φ_s)的实测值为0.06;白盘在水中的漫反射率(φ_t)为0.3;海洋水体漫反射率 R 取0.02。

主要实验站点如图 1 所示,在实验过程中,海水的漫衰减系数是通过实测得到的,数据由中国科学院南海海洋研究所提供,各实验站点的海水漫衰减

系数见表 1。根据理论和海上的实测结果,各实验站点的结果见表 2。

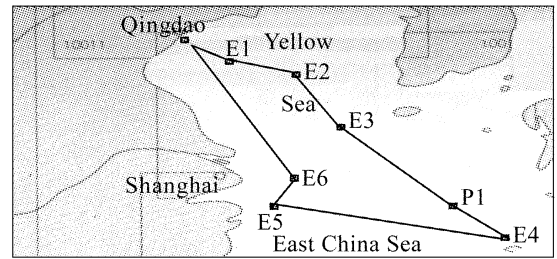


图 1 海上实验的考查航线

Fig. 1 Route line of in-situ experiments

表 1 实验站点的海水漫衰减系数

Table 1 Diffuse attenuation coefficients of seawater in stations

k	E1	E2	E3	E5	E6	P1
$k(490)$	0.1507	0.1195	0.3814	0.3446	0.1254	0.0361
$k(520)$	0.1555	0.1260	0.5406	0.3239	0.1300	0.0516

表 2 各站点的现场实验和理论对比结果

Table 2 Results of in-situ experiments and theory

Target	Stations				
	E1	E2	E5	E6	P1
Scchi-disk depth (experiment) /m	7.75	12.2	5.5	11.5	28
Scchi-disk depth (theory) /m	9.3	12.7	4.5	11.2	28.2
Relative error /%	20	4	18	2.6	0.7
Underwater target (experiment) /m	4.6	4.3	2.4	3.6	10.5
Underwater target (theory) /m	4.64	5.72	2.23	5.5	13.9
Relative error /%	0.8	33	7	52	32

从表 2 可以看出,白盘模式与实测的相对误差在 20%以内,而黑色目标的光学隐蔽深度模式与实测的相对误差比较差。相对误差的波动比较大,主要由人眼差异较大、测量环境较差、仪器测量误差及环境因子调节不够等因素引起。但是,总体上透明度盘的模式与实验数据的偏差要比光学隐蔽深度的模式与实验数据的偏差小,这可能与黑色目标的人眼观测误差更大有关。此外,白盘的水中漫反射比的取值还需通过实测验证,水体漫反射率也可以采用遥感方法进行提取或现场测量,对于误差产生的原因和提高模型的精度问题还需进一步深入研究和探讨。

4 结 论

在给出了水下目标光学隐蔽深度概念的基础上,根据目标背景对比度传输方程对水下目标的光

学隐蔽深度进行了理论推导,建立了水下目标隐蔽深度与透明度盘深度的转换模型;对利用海色遥感数据提取光学隐蔽深度的方法进行了研究,建立了水下目标光学隐蔽深度的遥感获取模式;开展了海洋现场实验,并将理论与实验数据进行了对比。结果表明,黑色模拟目标的理论计算和实验数据相对误差小于 30%,而白色目标的理论计算和实验数据比较吻合,相对误差小于 20%。

参 考 文 献

- 1 He Xianqian, Pan Delu, Mao Zhihua *et al.*. The study on the inversing model of water transparency using the SeaWiFS data [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **26**(5):55~62
何贤强,潘德炉,毛志华等. 利用 SeaWiFS 反演海水透明度的模式研究[J]. *海洋学报*, 2004, **26**(5):55~62
- 2 Cheng Shengtong, Kuang Chang, Wang Jianping *et al.*. Water color remote sensing model [J]. *Journal Tsinghua University (Sci. & Tech.)*, 2002, **42**(8):1027~1031
程声通,况 昶,王建平等. 水色遥感理论模型探讨[J]. *清华大学学报*, 2002, **42**(8):1027~1031

- 3 Li Sihai, Wang Hong, Xu Weidong. Research and progress in satellite ocean color remote sensing [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, **15**(2):190~196
李四海,王 宏,许卫东. 海洋水色卫星遥感研究与进展[J]. *地球科学与进展*, 2000, **15**(2):190~196
- 4 Pan Delu, Mao Tianming, Li Shujing *et al.*. Study on ocean color environment of China coast by satellite remote sensing [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, **20**(3):240~246
潘德炉,毛天明,李淑菁 等. 卫星遥感监测我国沿海水色环境的研究[J]. *第四纪研究*, 2000, **20**(3):240~246
- 5 Peng Wanglu. Remote Sensing Conspectus [M]. Beijing: High Education Press, 2002. 220~221
彭望球. 遥感概论[M]. 北京:高等教育出版社, 2002. 220~221
- 6 Jiang Lu, Zhu Hai, Li Song. Influencing factor analysis of detecting underwater target in visible light condition [J]. *Navigation of China*, 2006, (1):56~63
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, (1):56~63
- 7 Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. An Introduction to Marine Science [M]. Beijing: High Education Press, 1999. 372~387
冯士筵,李凤岐,李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京:高等教育出版社, 1999. 372~387
- 8 Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Glimmer and Infrared Imaging Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 10~26
张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995. 10~26
- 9 Shi Fenzhou, Wang Jue, Lu Yijun. Study on Naval Pilot's visual effectiveness in identifying moving targets of different contrast [J]. *Chin. J. Naut. Med. & Hyperbar Med.*, 2003, **10**(4):200~203
时粉周,王 珏,鲁毅钧. 海军飞行员对不同对比度运动目标的视觉识别效能研究[J]. *中华航海医学与高气压医学杂志*, 2003, **10**(4):200~203
- 10 Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong *et al.*. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. *J. Remote Sensing*, 2004, **8**(1):37~43
唐军武,田国良,汪小勇 等. 水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法[J]. *遥感学报*, 2004, **8**(1):37~43
- 11 Wang Xiangnan. The technique of the underwater spectrum radiation measurement [J]. *Ocean Technology*, 2003, **22**(2):12~18
王项南. 水下光谱辐射测量技术[J]. *海洋技术*, 2003, **22**(2):12~18
- 12 Li Tongji, Tang Junwu, Chen Qinglian *et al.*. A method for measuring water-leaving radiance using photometer [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, **20**(4):56~60
李铜基,唐军武,陈清莲 等. 光谱仪测量离水辐亮度的方法[J]. *热带海洋学报*, 2001, **20**(4):56~60