

文章编号 1004-924X(2016)04-0726-06

光学隐蔽深度测量系统的小型化设计

朱海荣*, 蔡鹏, 朱海, 郭正东, 王旺
(海军潜艇学院, 山东青岛 266000)

摘要: 为了保障航行器水下航行时对可见光波段光学隐蔽的需求, 以及实时测量其所在位置的光学隐蔽深度, 设计了小型化可见光波段的光学隐蔽深度测量系统。根据光学隐蔽深度模型, 优化设计了海水上行辐照度、海水下行辐照度、海水漫衰减系数、海水体衰减系数的测量方法。优化设计后的系统有 21 个测量通道, 测量光谱为 390~667 nm, 工作深度可达 50 m。进行了海上试验, 试验结果显示: 在天气良好的条件下, 水下航行器在 520~560 nm 可见光波段内存在暴露窗口, 同时测得特征长度为 0.75 m 的模型的光学隐蔽深度为 3.5 m。得到的结果表明, 设计的小型化可见光波段光学隐蔽深度测量系统可以实现光学隐蔽深度的测量, 测量装置具有体积小、重量轻、系统性能稳定等优点, 适用于水下航行器搭载, 可为下一步实现可自主升降的光学隐蔽深度测量系统设计提供理论技术支持。

关键词: 水下航行器; 光学隐蔽深度测量系统; 小型化设计; 可见光波段

中图分类号: U674.76; U666.16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0726

Miniaturization design of optical concealment depth measuring system

ZHU Hai-rong*, CAI Peng, ZHU Hai, GUO Zheng-dong, WANG Wang

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266000, China)

* Corresponding author, E-mail: henlongjoy@163.com

Abstract: To guarantee the demand of an underwater vehicle in sailing for the optical concealment in the visible light band and to measure the optical concealment depth of the underwater vehicle in real time, a miniature optical concealment depth measuring system for the visible light band was designed. Due to a model for optical concealment depth, the measuring methods for seawater upward irradiance, seawater downwelling irradiance, the diffuse attenuation coefficient of sea water, and sea water body attenuation coefficient were designed optimally. After optimization, the system has 21 measuring channels with the measurement spectral range from 390 nm to 667 nm, and working depth up to 50 m. A test on the sea was performed, and the test results show that there is an exposure window in the visible light range of 520—560 nm for the underwater vehicle under good weather conditions, meanwhile, the optical concealment depth of the underwater model with a feature length of 0.75 m is 3.5 m. The test results indicate that the miniaturization design of the optical concealment depth measuring system realizes the measurement of the optical concealment depth in the visible light band. The measuring device has advantages on small size and light weight and the system is stable for carrying on the underwater vehicle and provides theoretical and technical supports for the design of the optical con-

收稿日期: 2015-12-22; 修订日期: 2016-01-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61573040)

cealment depth measuring system which can be independently lifted.

Key words: underwater vehicle; optical concealment depth measuring system; miniaturization design; visible light band

1 引言

近年来,随着水下航行器消音、消磁技术的不断提高,利用光学探测水下目标成为重要的、不可或缺的水下探测方法^[1]。由于我国近海海域水深较浅,水下航行器光学隐蔽是保证航行安全最基本的条件之一^[2]。水下航行器的光学隐蔽性与其所处海水的参数、航行器形态、表面特性^[3]、海面状况及航行深度等因素密切相关。军事上,潜艇的反光学探测手段主要有利用气象、水文条件来增加航行深度,减少上浮次数和通气管状态下的航行时间等^[4-5]。

目前,航空领域常用卫星遥感、航空侦察探测的手段获取海水的透明度,进而得到水下航行器的光学隐蔽性。海面上一般参照透明度盘深度来估计隐蔽深度,约30 cm直径的白色圆盘下沉到恰好看不到深度^[6]。但由于大气、海水性质的垂向分布复杂^[7],白盘和水下航行器表面的特征差异,以及卫星轨道、飞机航程的限制,现有的测量方法无法精确地获取较深处海水的性质及航行器的光学隐蔽深度。此外,受自身航行状态的限制,水下航行器也无法实时接收到发自水面舰船、卫星和飞机上的光学隐蔽信息。因此,在水下航行器上加载探测光学隐蔽深度的测量装置,自主地测量光学隐蔽深度,对保障航行安全、航路规划和作战指导具有重要意义。本文根据前期工作建立的光学隐蔽深度模型^[8],重新设计了小型化的光学隐蔽深度测量系统。该测量系统具有多个测量通道,体积小、重量轻,符合水下航行器的搭载和使用条件。

2 光学隐蔽深度测量系统的小型化设计

2.1 水下航行器光学隐蔽深度模型

根据已建立的光学隐蔽深度模型^[8]可知:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{r_1 E_d - E_u}{E_u}\right) \cdot \gamma \cdot \beta \cdot 10^{2 - (\ln\alpha + 0.5)^{-1}} \cdot e^{-\mu H}}{c + k \cos \theta} \quad (1)$$

式中: D 为航行器的光学隐蔽深度, E_u 是海水上行辐照度, E_d 是海水下行辐照度, r_1 是航行器表面反射率, k 为海水漫衰减系数, c 是海水体积衰减系数, γ 为海面反射效应, β 为海面折射及波浪效应, α 为目标视角, μ 为消光系数, H 为观测高度, θ 为光子流方向与天顶方向之间的夹角。

2.2 测量系统小型化

为了满足测量装置在水下航行器上搭载和使用的要求,本文在前期理论研究和初始测量系统的基础上^[9],对测量装置进行了小型化设计。小型化后的光学隐蔽深度测量系统具有21个通道,如图1所示。采用的滤色片的中心波长分别为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。



图1 小型化光学隐蔽深度测量系统的21个测量通道
Fig.1 Twenty-one measurement channels of miniaturized optical concealment depth measuring system

优化设计后最终集成的测量装置外形如图2所示,外直径为100 mm,长约180 mm。

2.3 自阴影效应分析

探测装置在水下探测使用时存在自阴影效应^[10-11]。该效应引起的百分误差 ϵ 、测量时的太



图 2 小型化后的光学隐蔽测量装置外形

Fig. 2 Photo of miniaturized optical concealment measuring system

阳天顶角 θ 、海水吸收系数 α 和传感器外径 r 的关系如图 3 所示,可近似表示为^[12]:

$$\epsilon = 1 - \exp\left(-\frac{2\alpha \cdot r}{\tan \theta}\right). \quad (2)$$

小型化设计前后自阴影效应产生的百分误差仿真对比如图 4 所示。可以看出,太阳天顶角在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 时,小型化设计后直径为 10 cm 的测量装置产生的自阴影效应误差远小于直径为 40 cm 的测量装置,且太阳天顶角越大,百分误差越小。

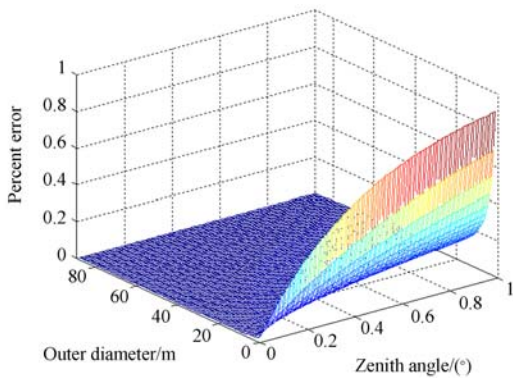


图 3 自阴影效应产生的百分误差

Fig. 3 Percent errors caused by self shadowing effect

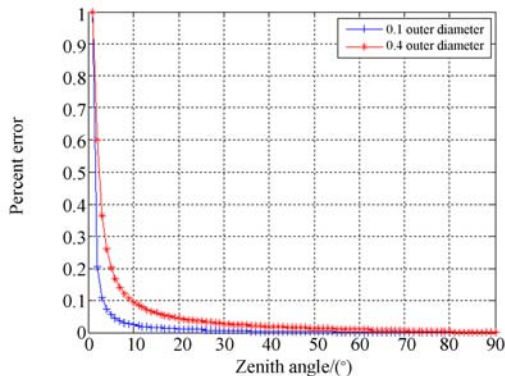


图 4 小型化前后自阴影效应百分误差对比图

Fig. 4 Percent errors of self shadowing effect before and after system miniaturization design

3 实验与结果

2015 年 11 月 15 日,在青岛某码头对小型化设计后的光学隐蔽深度测量装置进行了海上试验。将堵头插上后启动测量装置,探测装置利用缆绳吊放,同时,在测量装置下方 0.5 m 处同时吊有长度为 0.75 m 的水下航行器模型。在吊放过程中测量海水的下行辐照度、上行辐照度、深度及漫衰减系数。测量完成后,读取数据并进行分析处理。

海水下行辐照度测量现场如图 5 所示,海水上行辐照度测量现场如图 6 所示。



图 5 海水下行辐照度测量

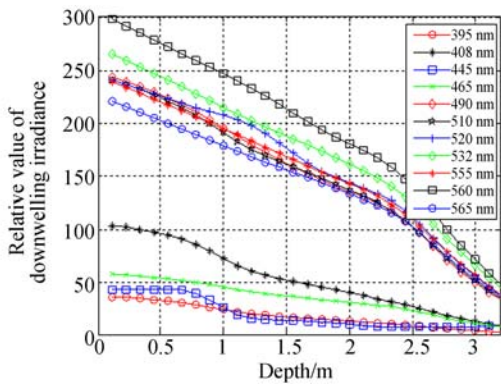
Fig. 5 Measurement of seawater downwelling irradiance



图 6 海水上行辐照度测量

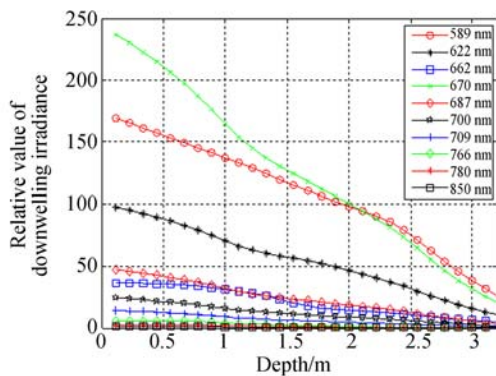
Fig. 6 Measurement of seawater upward irradiance

21 个测量通道得到的海水下行辐照度和海水上行辐照度分别如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出,在试验海区 $520 \sim 560$ nm 可见光波段得到的海水上行辐照度和海水下行辐照度比其它波段大,该波段的可见光在海水中传播衰减较小,水



(a)中心波长为 395~565 nm

(a)Central wavelengths in 395-565 nm



(b)中心波长为 589~850 nm

(b)Central wavelengths in 589-850 nm

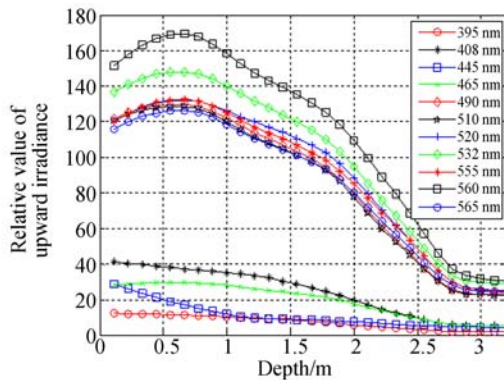
图 7 海水下行辐照度测量值

Fig.7 Measurement results of seawater downward irradiance

下航行器更容易暴露。

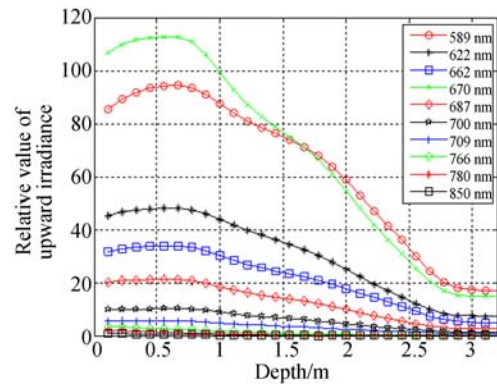
中心波长分别为 520,532,550,560 nm 4 个测量通道得到的海水漫衰减系数如图 9 所示。

良好天气条件下,中心波长分别为 520,532,550,560 nm 4 个测量通道得到的表面反射率为



(a)中心波长为 395~565 nm

(a)Central wavelengths in 395-565 nm



(b)中心波长为 589~850 nm

(b)Central wavelengths in 589-850 nm

图 8 海水上行辐照度测量值

Fig.8 Measurement results of seawater upward irradiance

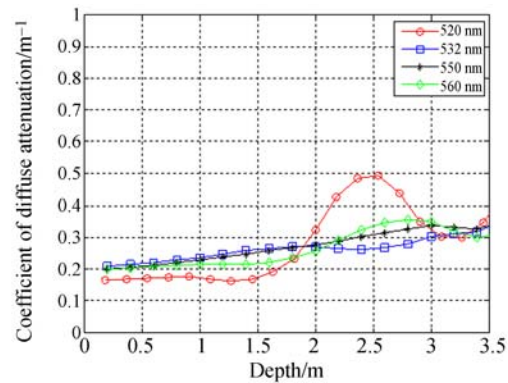


图 9 海水的漫衰减系数

Fig.9 Diffuse attenuation coefficients of seawater

0.02。特征长度为 0.75 m 的水下航行器模型的光学隐蔽深度统计如表 1 所示。

表 1 光学隐蔽深度测量结果

Tab.1 Measuring result of optical concealment depths

中心波长 /nm	海水漫衰减系数 /m ⁻¹	光学隐蔽深度 /m
520	0.314 3	3.909
532	0.312 5	3.647
550	0.326 1	3.579
560	0.302 2	3.708

由表 1 可知,520~560 nm 可见光波段内,在试验海区长 0.75 m 的水下航行器模型的光学隐蔽深度为 3.5 m。

4 结 论

本文实现了光学隐蔽深度测量系统的小型化,优化后的系统有 21 个测量通道,测量波段为 390~667 nm,装置直径为 100 mm,能够减小自阴影效应产生的误差。海上试验测量得到 21 个通道的海水上行辐照度、海水下行辐照度和海水漫衰减系数。实验结果表明,水下航行器的可见光暴露波段主要

在 520~560 nm,试验海区长 0.75 m 的水下航行器模型的光学隐蔽深度为 3.5 m。

小型化的光学隐蔽测量系统可满足水下航行器的搭载需求,改变了传统的出海前测量和浮起测量方式,并可根据实际海区测量出可见光的隐蔽深度,有助于水下航路规划和战术辅助决策,提高作战效能。下一步的主要工作是提高该系统的测量精度,并加载浮力控制装置实现自主升降功能,以进一步提高测量系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 崔国恒,于德新.非声探潜技术现状及其对抗措施[J].火力与指挥控制,2007,32(12):10-13.
CUI G H, YU D X. Non acoustic detection technology of submarine and its countermeasures [J]. *Fire and Command Control*, 2007, 32(12): 10-13. (in Chinese)
- [2] 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.
ZHU H, JIANG L, LIANG B, *et al.*. Optical concealment depth of underwater target by remote sensing method [J]. *Chinese Laser*, 2007, 34(5): 699-702. (in Chinese)
- [3] 付跃刚,邱旭,刘智颖,等.目标激光反射率测试方法研究[J].仪器仪表学报,2006,27(2):1215-1216.
FU Y G, QI X, LIU ZH Y, *et al.*. Method of target laser reflectivity measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(2): 1215-1216. (in Chinese)
- [4] 李家良.潜艇运动光电特性及隐蔽技术发展动向综述[J].现代防御技术,2010,38(5):145-149.
LI J L. A summary of the development of the photoelectric characteristics of the submarine and the development of the concealed technology [J]. *Modern Defense Technology*, 2010, 38(5): 145-149. (in Chinese)
- [5] 杨日杰,蒋志忠,陈建勇,等.航空搜潜研究综述[J].海军航空工程学院学报,2010,25(5):552-558.
YANG R J, JIANG ZH ZH, CHEN J Y, *et al.*. Overview of aviation search and research [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010, 25(5): 552-558. (in Chinese)
- [6] 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.
JIANG L, ZHU H, LI S, *et al.*. The relationship between the airborne laser radar maximum detection depth of seawater transparency [J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35(6): 397-399. (in Chinese)
- [7] 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.
CHEN L ZH. *Chinese Sea Vertically Inhomogeneous Ocean Optical Properties for Further Study* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)
- [8] 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.
ZHU H R, ZHU H, LIU J T, *et al.*. The design of measurement system for optical concealment depth of underwater vehicle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2778-2784. (in Chinese)
- [9] 王红,田铁印.5倍变焦距光学系统小型化设计[J].中国光学,2014,7(2):315-319.
WANG H, TIAN T Y. Miniature design of 5 zoom optical system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 315-319. (in Chinese)
- [10] 曹文熙,郭永飞,杨跃忠.多波段水下光谱辐射计[J].高技术通讯,2002,12(1):96-101.
CAO W X, GUO Y F, YANG Y ZH. Multi band underwater spectral radiometer [J]. *High Tech Communication*, 2002, 12(1): 96-101. (in Chinese)
- [11] 曹文熙,杨跃忠,柯天存,等.水下光谱辐射计光学

特性的测试与分析[J]. 热带海洋学报, 2004, 21 (1):1-10.

CAO W X, YANG Y ZH, KE T C. Test and analysis of optical properties of underwater spectral radiometer[J]. *Journal of Tropical Oceans*, 2004, 21 (1):1-10. (in Chinese)

[12] 李彩,柯天存,曹文熙,等. 锚链式水下多光谱辐射计的设计[J]. 光学技术, 2004, 30(6):665-668.

LI C, KE T C, CAO W X, *et al.*. Design of a moored underwater multi-channel radiometer[J]. *Optical Technology*, 2004, 30(6): 665-668. (in Chinese)

作者简介:



朱海荣(1988—),男,江苏南通人,博士研究生,2014年于海军潜艇学院遥感所获得硕士学位,主要从事海洋光学及潜艇航行安全方面的研究。E-mail: henlongjoy@163.com