

doi: 10.3788/gzxb20124101.0011

偏振光天文导航定位能力分析

王光辉¹, 郭正东^{1,2,3}, 朱海¹, 莫军¹

(1 海军潜艇学院, 山东 青岛 266044)

(2 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 基于天空光偏振特征的天文导航方式是最近发展起来的一种自动天文导航方式, 其定位能力直接决定了它的发展应用价值. 针对舰船偏振光天文导航方式, 从天空光偏振角的探测模型和单天体天文定位的船位误差模型出发, 建立了偏振光天文导航的误差模型. 利用该模型, 仿真计算分析了偏振光天文导航的定位能力. 分析表明: 当太阳位于探测装置的正横方向且天顶角较大时, 探测到的天空光偏振角对太阳方向的变化最敏感, 最有利于偏振光天文导航; 当偏振角的测角准确度达到角分水平时, 偏振光天文导航方式的自动定位准确度可达海里级, 可用于辅助惯性导航.

关键词: 偏振; 天空光; 天文导航; 惯性导航

中图分类号: U666.132

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0011-4

0 引言

惯性导航是舰船最重要的自主导航方式, 误差随时间累积的固有缺点要求通过其他导航方式来辅助导航. 基于地球物理场特征的重力、地磁和海底地形匹配导航是舰船辅助惯性导航领域的研究热点^[1-3]. 地球物理场匹配导航不仅需要高准确度、高空间分辨率的地球物理场数据支持, 而且导航定位能力受物理场空间变化特征的影响明显, 目前尚不具备应用条件. 因此, 舰船自主导航需要其他导航方式辅助惯性导航来实现.

偏振光导航是一种基于天空光的偏振特性, 通过在两个或多个方向上测量天空光的偏振方向, 利用惯性导航系统提供的舰船姿态和航向信息实现的自动单天体天文定位系统^[4]. 偏振光导航系统不需要地球物理场数据的支持, 同时具有天文导航可靠性好的优点, 在辅助惯性导航方面将具有广泛应用前景, 而定位准确度则是影响偏振光天文导航方式发展的关键. 本文拟在偏振光定位原理的基础上, 进行偏振光辅助导航的系统设计, 理论分析偏振光天文导航定位能力, 并给出应用偏振光实现自动天文定位的建议.

1 舰船应用偏振光天文导航的原理与传感器位置关系

太阳光受大气分子的散射作用所形成的天空光是部分偏振的, 该偏振信息包含了太阳的位置信息, 可用于导航^[5-14]. 目前, 在该领域的研究主要集中在天空光和水下散射光的偏振分布、最佳探测波长、动物对其的应用机理上, 并出现了利用大气散射光偏振特性研制偏振光罗盘和机器人偏振导航系统的报道, 用于提供航向信息. 在此基础上, 提出了将其应

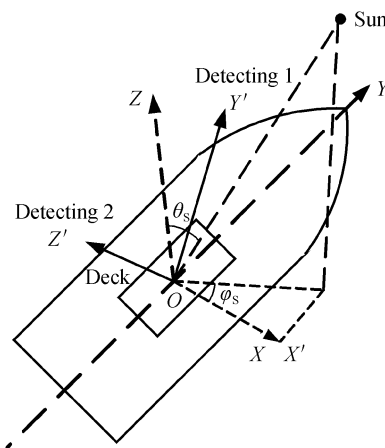


图 1 天空光测量装置示意

Fig. 1 The setting of skylight measurement

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2008AAJXX7)资助

第一作者: 王光辉(1971-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为水下导航和海洋光学. Email: wang6gh@163.com

通讯作者: 郭正东(1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为水下导航和物理海洋学. Email: g_zh_d@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-08-09; 修回日期: 2011-09-26

用于舰船定位的方式^[4].如图1所示,偏振光天文导航装置配置于舰船的纵中面内:探测方向1、2处于甲板坐标系OXYZ的YOZ平面内,且与OZ轴夹角均为45°,相应方向天空光偏振方向和太阳方向的单位矢量分别表示为 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 和 \mathbf{S} .

在地球坐标系中, \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 及 \mathbf{S} 可分别表示为当地经纬度、舰船航向、天空光偏振角和太阳星下点经纬度的函数.考虑到 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 均与 \mathbf{S} 方向垂直,故满足

$$\mathbf{S}(\varphi_s, \lambda_s) = \frac{\mathbf{P}_1(\varphi, \lambda, TC, \theta_1) \times \mathbf{P}_2(\varphi, \lambda, TC, \theta_2)}{|\mathbf{P}_1(\varphi, \lambda, TC, \theta_1) \times \mathbf{P}_2(\varphi, \lambda, TC, \theta_2)|} \quad (1)$$

式中: φ 、 λ 为当地纬度、经度; TC 为舰船航向; θ_1 、 θ_2 为 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 对应的偏振角; φ_s 、 λ_s 为太阳星下点纬度、经度. φ_s 、 λ_s 可由探测时间获取, θ_1 、 θ_2 可通过光电系统测量,因此,利用式(1)即可由 φ_s 、 λ_s 、 θ_1 、 θ_2 求取 φ 、 λ 和 TC .

2 偏振光天文导航的误差模型

利用天空光的偏振特性来进行天文导航是一种单天体定位、定向的过程,其受传感器灵敏度、天体位置和自然环境等因素的影响.其中,自然环境的影响主要体现在云雾等对天空光造成的退偏作用以及对天空光偏振方向最佳探测波长的选择等方面,影响的是该导航方式的应用策略(如:可用性、应用时机和波长选择).传感器灵敏度和天体位置均对偏振光天文导航的准确度有影响.

不考虑传感器灵敏度因素,偏振光天文导航的定位误差主要与天空光的偏振敏感性(天空光偏振方向随太阳方向变化的敏感性)有关.

2.1 偏振角探测模型

偏振光天文导航通过测量两个偏振角来实现定位和定向的.因此,船位的定位准确度除了与偏振角 θ_1 、 θ_2 的探测准确度有关外,还受偏振角对太阳方向变化敏感性的影响,偏振角对太阳方向变化越敏感,定位准确度就越高.在OXYZ坐标系中, \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 及 \mathbf{S} (由球坐标 θ_s 、 φ_s 描述)可分别表示为

$$\mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_2 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \sin \theta_s \cos \varphi_s \\ \sin \theta_s \sin \varphi_s \\ \cos \theta_s \end{pmatrix} \quad (4)$$

建立测量坐标系OX'Y'Z', \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 及 \mathbf{S} 可分别表示为

$$\mathbf{P}'_1 = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \\ 0 \\ \cos \theta_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}'_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{S}' = \begin{pmatrix} \sin \theta_s \cos \varphi_s \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_s \sin \varphi_s + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_s \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_s \sin \varphi_s + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

由式(1)~(7)可得 θ_1 、 θ_2 与 θ_s 、 φ_s 之间的关系可表示为

$$\begin{cases} \tan \theta_1 = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_s \sin \varphi_s - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_s}{\sin \theta_s \cos \varphi_s} \\ \tan \theta_2 = \frac{-\sin \theta_s \cos \varphi_s}{\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_s \sin \varphi_s + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_s} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 船位误差模型

对于单天体天文定位,船位误差与太阳方向误差之间满足

$$\begin{cases} \delta_r = R_E \delta_{\theta_s} \\ \delta_\varphi = R_E \theta_s \delta_{\varphi_s} \end{cases} \quad (9)$$

式中: δ_r 为纵向船位误差; δ_φ 为横向船位误差; R_E 为地球半径,平均值为6 371 km; δ_{θ_s} 为太阳天顶角误差; δ_{φ_s} 为太阳方位角误差.太阳方向误差 δ_{θ_s} 、 δ_{φ_s} 与天空光偏振方向的测角误差 δ_{θ_1} 、 δ_{θ_2} 之间满足

$$\delta_{\theta_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial \theta_1}\right)^2 \delta_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\partial \theta_s}{\partial \theta_2}\right)^2 \delta_{\theta_2}^2} \quad (10)$$

$$\delta_{\varphi_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_s}{\partial \theta_1}\right)^2 \delta_{\theta_1}^2 + \left(\frac{\partial \varphi_s}{\partial \theta_2}\right)^2 \delta_{\theta_2}^2} \quad (11)$$

由式(1)~(7)可得 θ_1 、 θ_2 与 θ_s 、 φ_s 之间的关系可表示为

$$\begin{cases} \cos \theta_s = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} (\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2)}{|\mathbf{P}_1 \times \mathbf{P}_2|} \\ \tan \varphi_s = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2)}{-\cos \theta_1 \sin \theta_2} \end{cases} \quad (12)$$

3 偏振光天文导航定位能力分析

仅考虑偏振灵敏性因素,在对偏振光天文定位

能力进行仿真分析的基础上,确定偏振光天文导航定位能力和应用建议。

3.1 天空光偏振敏感性分析

由对称性可知,偏振角 θ_1 、 θ_2 随 θ_s 、 φ_s 的变化规律相同,只需分析其中之一即可。

利用式(8),分别对 φ_s 、 θ_s 每隔 5° 取值,计算了不同 θ_s 和 φ_s 对应的 θ_1 值,相应的变化曲线如图 2 (a)和(b)。

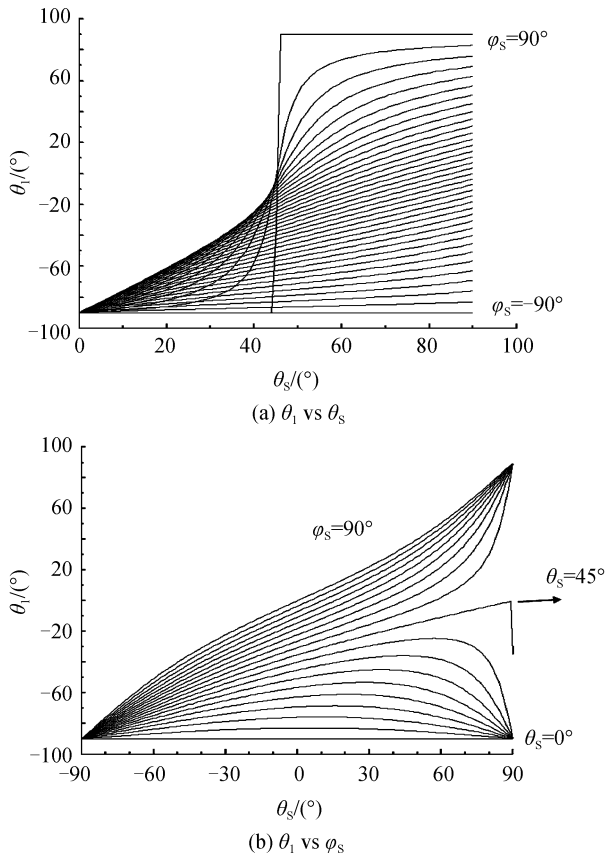


图 2 偏振角随太阳方向的变化曲线

Fig. 2 The relation curves of polarization angle and sun's orientation

由图 2(a)可见,当 φ_s 接近 -90° 时, θ_1 随 θ_s 的变化曲线斜率很小,对太阳高度的变化不敏感;当 φ_s 接近 0° 时, θ_1 与 θ_s 的线性程度最高,对太阳高度的变化敏感,且 θ_s 的取值范围对该敏感性影响不大;当 φ_s 接近 90° 时, θ_1 随 θ_s 的变化是非线性的,只有当 θ_s 在 45° 附近时,对太阳高度的变化敏感。因此,当 φ_s 接近 0° 时,对 θ_s 的测量最有利;当 φ_s 接近 $\pm 90^\circ$ 时,对 θ_s 的测量最不利。

由图 2(b)可见,当 θ_s 接近 0° 时, θ_1 随 φ_s 变化曲线的斜率很小,对太阳方位的变化不敏感;随着 θ_s 的增大, θ_1 随 φ_s 变化曲线的斜率随之增大,当 θ_s 接近 90° 时,曲线的斜率达到最大,对太阳方位的变化最为敏感。因此,当 θ_s 大于 45° 时,对 φ_s 的测量最有利。

3.2 偏振光定位能力分析

由式(9)~(12),在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 范围内对 φ_s 每

隔 5° 进行取值,假定天空光偏振方向测角误差为 $1'$,计算不同 θ_s 值所对应的船位误差 δ_r 、 δ_φ ,变化规律如图 3。

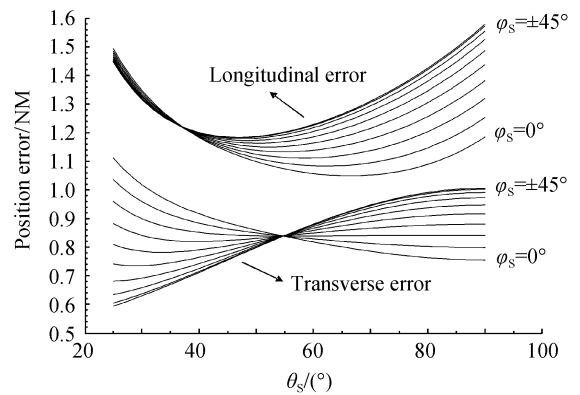


图 3 船位误差曲线(偏振角准确度为 $1'$)

Fig. 3 The curve of the ship fixing error curve($1'$ precision)

由图 3 可见,当天空光偏振方向的测角准确度一定时,在大多数情况下,船位的纵向误差大于横向误差,当太阳位于舰船的正横方向时,太阳的天顶角越大(忽略太阳光的折光影响),船位误差越小;当太阳偏离舰船的正横方向时,最佳太阳观测方向向天顶方向偏移,但是,当太阳天顶角太小时,会造成纵向船位误差的急剧增大。

3.3 舰船偏振光定位能力分析结论

太阳相对探测装置的方向直接影响到探测方向天空光的偏振敏感性:当太阳位于探测装置的正横方向,且天顶角较大时,两探测方向天空光偏振角随太阳方向的变化最敏感,对于偏振光天文导航最为有利。当偏振光探测传感器准确度达到角分级时,舰船定位误差理论上优于 1 海里,可应用于辅助舰船惯性导航。

4 结论

决定偏振光天文导航准确度的因素主要有传感器的灵敏度和探测方向天空光的偏振敏感性。本文通过选择合适的舰船航向使得太阳处于探测系统的正横方向或者相互正交地配置两套探测系统以确保该偏振敏感性;通过设计科学的偏振角测量方案,将偏振角的测量准确度提到角分水平之上,就能够实现海里水平的定位准确度,可在白天实现自动天文导航,具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] ZHOU Jun, GE Zhi-lei, SHI Gui-guo, et al. Key technique and development for geomagnetic navigation[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(5): 1467-1472.
周军,葛致磊,施桂国,等.地磁导航发展与关键技术[J]. *宇航学报*, 2008, 29(5): 1467-1472.
- [2] LI Lin. Present and development of ocean floor terrain matching technology for supplementary navigation[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(2): 17-19.

- 李临. 海底地形匹配辅助导航技术现状及发展[J]. 舰船电子工程, 2008, **28**(2): 17-19.
- [3] YUAN Shu-ming, SUN Feng, LIU Guang-jun, *et al.* Application of gravity map matching technology in underwater navigation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004, **12**(2): 13-17.
袁书明, 孙枫, 刘光军, 等. 重力图匹配技术在水下导航中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2004, **12**(2): 13-17.
- [4] WANG Guang-hui, ZHU Hai, MO Jun, *et al.* A kind of celestial navigation mode based on polarization of skylight[J]. *Navigation of China*, 2009, **32**(1): 14-16.
王光辉, 朱海, 莫军, 等. 一种基于天空光偏振特性的天文导航方式[J]. 中国航海, 2009, **32**(1): 14-16.
- [5] REPPERT S M, ZHU H S, WHITE R H. Polarized light helps monarch butterflies navigate [J]. *Current Biology*, 2004, **14**(2): 155-158.
- [6] WEHNER R. Desert ant navigation: how miniature brains solve complex tasks[J]. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 2003, **189**(7): 579-588.
- [7] LAMBRINOS D, MÖLLER R, LABHART T, *et al.* A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, **30**(1): 39-64.
- [8] SUHAI B, HORVÁTH G. How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study[J]. *JOSA A*, 2004, **21**(9): 1669-1679.
- [9] LEE R L. Digital imaging of clear-sky polarization [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(9): 1465-1476.
- [10] GAMBLING D J, BILLARD B. A study of the polarization of skylight[J]. *Australian Journal of Physics*, 1967(20): 675-681.
- [11] POMOZI I, HORVÁTH G, WEHNER R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, **204**(17): 2933-2942.
- [12] BRINES M L, GOULD J L. Skylight polarization patterns and animal orientation[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1982, **96**: 69-91.
- [13] WATERMAN T H. Polarization of marine light fields and animal orientation[C]. *SPIE*, 1988, **925**: 431-437.
- [14] COFFEEN D L. Polarization and scattering characteristics in the atmospheres of Earth, Venus and Jupiter[J]. *JOSA*, 1979, **69**(8): 1051-1059.
- [15] BARTA A, HORVÁTH G. Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2004, **226**(4): 429-437.

Capability Analysis of Polarized Light Celestial Positioning

WANG Guang-hui¹, GUO Zheng-dong^{1,2,3}, ZHU Hai¹, MO Jun¹

(1 Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266044, China)

(2 Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China)

(3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the polarization of skylight, the polarized light celestial positioning will have great application value when it has little position error. According to skylight polarization detection model and single body celestial positioning model, the polarized light celestial positioning error model was built. Based on this model, the sensitivity of skylight polarization angle and sun direction was given, and the precision of polarized light celestial positioning was calculated. Analyzing results show that: 1) polarized light celestial positioning result will be better if the polarized direction detected on ship changes faster, so the detecting sensor can be set in the right direction according to the course, sun's height and orientation; 2) the precision of polarized light celestial positioning system can reach NM level when the detecting precision of polarization angle achieves angle cent level.

Key words: Polarization; Skylight; Celestial navigation; INS