



机载海洋激光测深系统的自适应匹配滤波算法

胡思奇, 欧阳永忠, 刘会杰, 朱野, 赵灵峰, 董超

引用本文:

胡思奇, 欧阳永忠, 刘会杰, 等. 机载海洋激光测深系统的自适应匹配滤波算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(9): 1395–1403.

HU Si-qi, OUYANG Yong-zhong, LIU Hui-jie, et al. Adaptive Matched Filtering Algorithm for High-Precision Laser Bathymetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(9): 1395–1403.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

南极威德尔海西北区域冬季海冰龙骨形态分析

Keel Morphology Analysis on Winter Sea Ice in Northwestern Weddell Sea, Antarctica

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1386–1394 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190204>

GNSS水汽层析的自适应代数重构算法

Adaptive Algebraic Reconstruction Algorithms for GNSS Water Vapor Tomography

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1318–1327 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190387>

ICESat-2/ATLAS全球高程控制点提取与分析

Extraction and Analysis of Global Elevation Control Points from ICESat-2 /ATLAS Data

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 184–192 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200531>

顾及系统噪声和观测噪声的分级自适应信息滤波算法

Hierarchical Adaptive Information Filtering Algorithm Considering System Noise and Observation Noise

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 88–95 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190248>

顾及飞机姿态角的滩涂LiDAR强度数据修正法

An Intensity Correction Method for Shoaly Land LiDAR in Consideration of the Attitude Angles of the Aircraft

武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1249–1257 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170261>



机载海洋激光测深系统的自适应匹配滤波算法

胡思奇^{1,2} 欧阳永忠^{3,4} 刘会杰^{1,2} 朱野^{1,2} 赵灵峰^{1,2} 董超^{3,4}

1 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海, 201203

2 上海微小卫星工程中心, 上海, 201203

3 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州, 510300

4 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州, 510300

摘要:机载海洋激光测深系统发射的激光脉冲经由大气、海气界面和海水的复杂信道传播,信号功率随海水深度的增加呈指数衰减,同时脉冲波形随深度增加发生严重的脉冲展宽与波形失真,此两类传输特性分别限制了最大测量深度与测深精度。为了确保最大测量深度指标的前提下改进机载海洋激光测深系统的测深精度,首先结合实测水质数据与蒙特卡罗仿真方法,研究不同深度下的回波信号特性,揭示激光信号的传输特性,建立新的激光测深系统参数设计方法,可满足国际上现有机载海洋激光测深系统的指标;然后在系统参数确定的条件下,对不同深度回波信号的波形失真进行仿真,设计了自适应匹配滤波算法以提高测深精度。仿真结果表明,所设计的系统参数及自适应匹配滤波算法可以实现机载测绘性能为白天测深深度50 m、测深精度166 mm,夜晚测深深度70 m、测深精度172 mm。

关键词:激光海洋测深;跨介质激光传输;自适应匹配滤波;蒙特卡罗仿真

中图分类号:P229;P751

文献标志码:A

近年来,随着中国海洋经济的发展特别是南海海洋开发的不断深入,急需对岛礁、近海大陆架、暗礁等海区进行精确测绘。海底地形地貌测绘是通过覆盖一定海域、以一定测点密度分布的海深测量实现的。它以深度基准面或平均海平面作为基准,以海域具体坐标点的水深值作为量度来反映海底的地貌信息。只有全面、准确地获得目标水域的水深值,才能得到该水域准确的海底地貌信息,因此,发展快速、准确的海洋测深方法具有十分重要的意义^[1-4]。与传统的多波束声呐等回声测深技术相比,机载海洋激光测深系统不仅具有多波束测深系统的高精度、高分辨率、全覆盖特点,更具有快速高效的优点,尤其适用于船舶难以到达的浅海海域和岛礁水域作业,是实现海洋测绘经济、快捷、有效的手段^[5-8]。国外代表性的机载海洋激光测深系统主要有加拿大Optech公司的CZMIL^[9]、瑞士Leica公司的HAWK-EYE III^[10]和荷兰Fugro公司的LADS HD^[11],这些商业化系统不仅通过提升激光发射的频率实现测绘点密度提升,也增加了更多的接收通道以

提升对不同水深的探测能力,整体性能技术指标已实现测深深度达到50 m、测深精度达到0.36 m。中国的华中科技大学、中国海洋大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位分别进行了相关的技术研究和系统研制^[12-16],其中有代表性的国产机载海洋激光测深系统有LADM-I、LADM-II和Mapper-5000,产品性能已达到国际水平^[17]。国内外代表性机载海洋激光测深系统性能参数如表1所示。

与多波束测深系统的测量精度要求一致,机载海洋激光测深系统的水深测量精度需满足国际海道测量规范IHO-S44的要求,即对浅于30 m水深的测量精度应优于0.3 m;关于最大测深能力,目前国际上已有系统的指标为 $kD_{\max} = 3 \sim 5$ (白天为3~4,晚上为4~5),其中 k 为海水漫衰减系数, D_{\max} 为最大水深。在海水光束衰减系数为 0.2 m^{-1} 时,要求系统能够达到50 m的穿透能力^[18]。海洋测绘中,机载海洋激光测深系统的最大探测深度指标主要受接收信噪比(signal to noise ratio, SNR)的影响,综合考虑海浪影响、探

收稿日期: 2020-12-24

项目资助: 国家自然科学基金(41774021); 中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA15020400); 上海市市级科技重大专项资助(2019SHZDZX01)。

第一作者: 胡思奇, 博士, 助理研究员, 主要从事激光通信技术研究。siqi.hu@outlook.com

测器热噪声等因素后,可把海底可探测的最小信噪比定义为 $3^{[18]}$ 。本文以最小信噪比大于3为标准进行机载海洋激光测深系统参数设计,以满足最大探测深度指标。机载海洋激光测深的精度指标主要受回波信号的定位精度影响,海洋激光测深系统波形处理方法与陆地激光测绘系统不同,并且更加复杂^[18]。这是因为在进行陆地测绘时,空气对激光传播的影响几乎可以忽略,通常认为陆地波形是多高斯回波的叠加,而激光在海

洋中传播时,受到海气界面和水体吸收散射等影响,从而出现复杂的脉冲展宽,造成严重的波形失真,同时回波强度也随海水深度呈指数衰减。从波形失真的回波信号中准确定位激光信号的位置是确保机载激光测深精度的关键^[19],本文采用实测水质数据对回波信号进行蒙特卡罗仿真,利用蒙特卡罗仿真激光脉冲展宽结果设计自适应匹配滤波器,对不同深度的回波信号进行自适应匹配滤波,提高测深精度。

表1 国内外代表性机载海洋激光测深系统性能参数 /m

Tab. 1 Performance Parameters of Abroad and Domestic Representative Airborne Laser Bathymetry System /m

参数	CZMIL	HAWKEYE III	LADS HD	LADM-I	LADM-II	Mapper-5000
测深深度	[0.15, 50]	[0.15, 50]	[0.15, 50]	[0.5, 50]	[0.5, 50]	[0.25, 51]
测深精度	0.36	0.36	0.36	0.31	0.3	0.23

本文首先对机载测深系统的激光信号传输特性展开分析,详细分析激光信号经过大气-海气界面-海水-海气界面-大气的信道传输后的脉冲展宽、能量衰减和光斑扩展;其次根据激光传输特性的变化指导系统参数设计,以白天最大测深50 m为标准,设计机载激光测深系统参数以满足国际上已有系统的指标,并类推出系统的夜晚最大深度探测指标;然后根据不同深度回波信号特性设计对应匹配滤波器,并设计自适应匹配滤波算法;最后通过仿真对比分析自适应匹配滤波算法与固定匹配滤波的测深精度指标,为进一步提升机载海洋激光测深系统的性能提供新的技术途径。

1 激光信号传输特性分析

利用实测水质数据,对飞机高度500 m、水下深度10~70 m的回波信号进行蒙特卡罗仿真,分析不同海水深度下的激光传输特性变化。在机载海洋激光测深系统中,激光信号会依次经过大气、海气界面和海水到达海底发生反射,再经过海水、海气界面和大气传输至接收平面(飞机所处平面)。激光传输信道复杂,大气信道会对激光脉冲产生双程的吸收,海气界面由于海水和风的运动,海面通常处于波浪起伏的状态,在海平面不同位置光子包会根据海平面法线抽样发生折射进入海水,海气界面的仿真按照海气界面法线随风速抽样进行^[20]。海水信道对激光具有吸收和散射作用,这会造成远场激光空间分布展宽、发散角弥散、能量衰减以及脉冲展宽。针对激光信号在海水中的传输特性变化研究,目前广泛采用蒙特卡罗法进行光子包追迹,通过在接收

平面的光子包传输特性统计来描述激光信号经过海水传输后的传输特性变化。国内外已有研究发现,采用蒙特卡罗法追迹得到的激光传输特性变化可以有效模拟实测激光传输特性变化^[21-28]。因此,本文将采用实测水质数据对回波信号进行蒙特卡罗仿真,利用激光脉冲展宽仿真结果设计自适应匹配滤波器,对不同深度的回波信号进行自适应匹配滤波,达到提高测深精度的研究目标。海水信道传输蒙特卡罗仿真算法如文献[28-30]所述。

蒙特卡罗仿真时所需的参数主要分为激光脉冲参数、信道参数和接收条件3类。激光脉冲参数主要包括波长、峰值功率、光斑大小、远场发散角和初始脉冲宽度。为满足海洋测绘中的最大测深指标,波长应选择海水透射窗口的蓝绿波段,光源需要峰值功率高的激光器,结合脉冲激光器的研究现状,参考上海光机所机载测深系统参数,将光源参数设计为激光波长532 nm、激光峰值功率 1.5×10^6 W(其中初始脉冲宽度2 ns,单脉冲能量3 mJ)、激光发散角0.2 mrad^[31]。海底反射率0.1,大气光学厚度0.08,飞机高度500 m,海面风速10 m/s。与海水信道蒙特卡罗仿真有关的信道参数包括衰减系数 c_w 、吸收系数 a_w 以及不对称因子 g , $g=0.924$ 可以很好地符合绝大多数海水情况^[32-33]。水质参数采用实测水质,如图1所示,由于海水中的叶绿素悬浮层导致水深40~50 m水域衰减系数与吸收系数增加。

激光脉冲经过500 m大气传输,再经过海水的吸收和散射,最后经过500 m大气传输到达接收平面,光斑空域扩展仿真结果如图2所示。从

图2可以看出,由于受海水强吸收的影响,光斑总能量随海水深度的增加而呈指数衰减。光斑在10 m水深时半径为9.3 m,传输至70 m水深后扩展成半径为327.6 m的大光斑,光斑空域随海水深度的增加而快速扩展。光斑扩展的本质原因在于激光信号经过海水信道后的强散射使其发散角弥散,因此接收孔径和接收视场角都会对接收信噪比产生影响。图2所获得的接收平面光斑仿真结果将作为机载海洋激光测深系统接收参数设计的输入条件。

受海水信道强吸收与强散射的影响,回波信号除了强度随海水深度的增加呈指数衰减,光斑随深度的增加而扩展外,激光信号的回波波形也会出现展宽和失真。利用蒙特卡罗法进行激光传输仿真,不同深度下的回波信号波形如图3所示。从图3可以看出,脉冲展宽、失真随海水深度的增加而加剧,原始脉宽为2 ns,进入海水10 m水深时脉宽为25.4 ns,传输至70 m水深时脉宽展

宽到101.6 ns。根据脉冲展宽仿真结果,波形由原始的高斯波形逐渐变成上升沿陡、下降沿缓的波形,此时采用原始波形作为固定匹配滤波波形会产生较大的脉冲定位误差,影响测深精度。图3所获得的不同深度回波信号脉冲展宽将作为自适应匹配算法设计的输入条件。

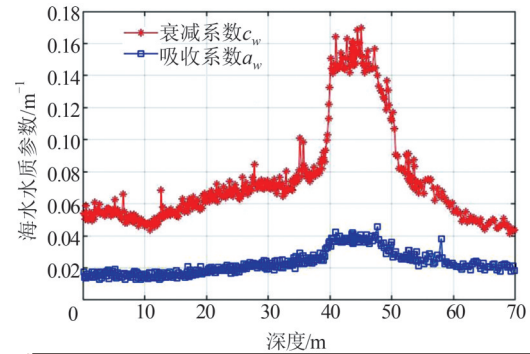


图1 不同深度海水衰减系数与吸收系数

Fig.1 Attenuation Coefficients and Absorption Coefficients of Seawater at Different Depths

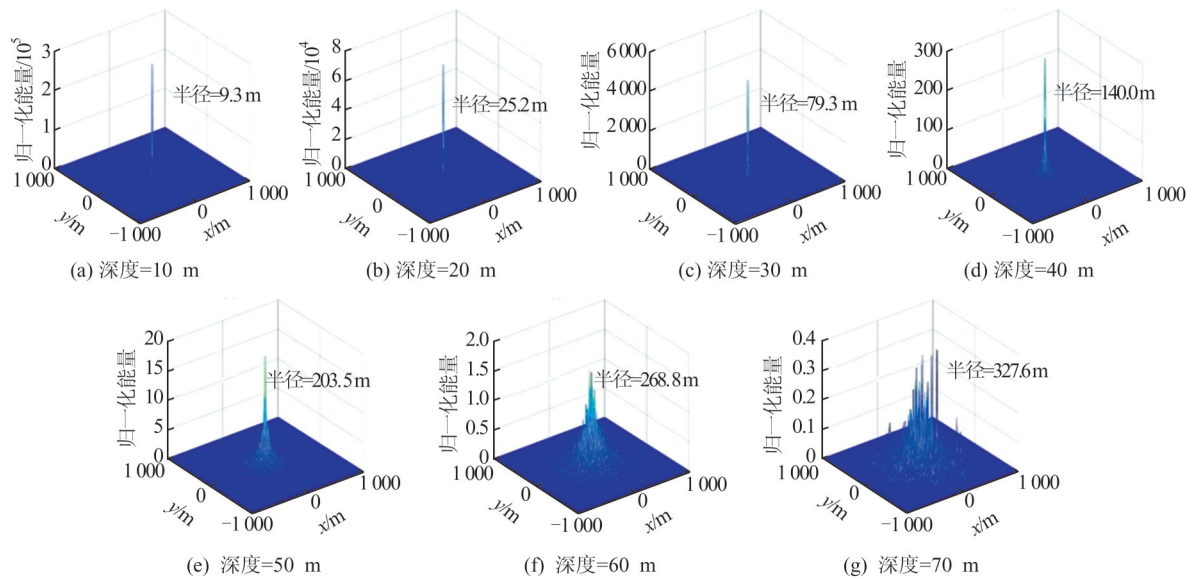


图2 接收平面光斑扩展

Fig.2 Spot Expansion on Receiving Plane

2 系统接收参数设计

机载海洋激光测深系统的最大测量深度由回波信号信噪比决定,根据§1的仿真分析,由于回波信号的光斑扩展及发散角弥散,接收信噪比受接收孔径及接收视场角的影响,同时也受噪声的影响。噪声主要由散粒噪声、暗电流、热噪声和背景光噪声构成。信噪比的计算式为^[18]:

$$\text{SNR} = \frac{P_s S(\lambda)}{\sqrt{2eB[S(\lambda)(P_s + P_b) + i_d] + \frac{4kTB}{R}}} \quad (1)$$

式中, P_s 为信号光功率,本文中回波信号功率通过蒙特卡罗仿真获得; e 为基元电荷; B 为探测器电子学频宽,其大小取 50 MHz; $i_d = 2 \text{ nA}$ 为探测器暗电流; $S(\lambda) = 0.4 \text{ A/W}$ 为探测器的响应度; k 为波尔兹曼常量; T 为探测器工作温度; R 为负载电阻; P_b 为背景光噪声功率,背景光噪声由大气辐射分析软件 Modtran 仿真得到。

背景光噪声功率计算式为:

$$P_b = I_B \times \pi r^2 \times \pi \theta_{\text{fov}}^2 \times \Delta \lambda \quad (2)$$

式中, I_B 为背景噪声辐射量; r 与 θ_{fov} 分别为接收

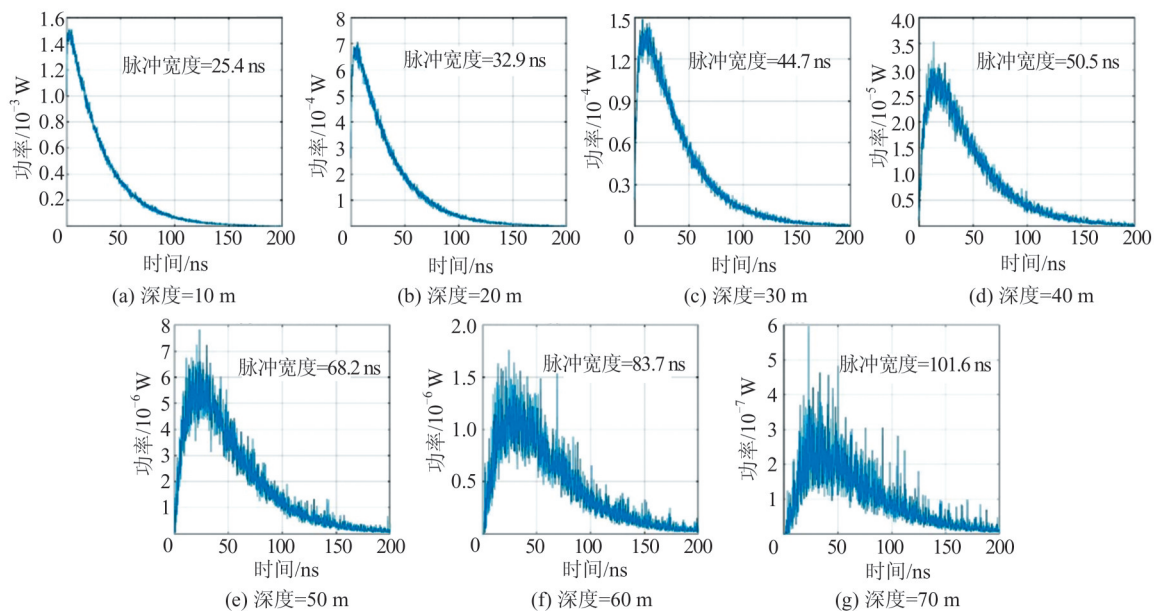


图3 不同深度下回波信号脉冲展宽

Fig.3 Pulse Stretching of Echo Signal at Different Depths

半径与接收视场角; $\Delta\lambda$ 为滤光片带宽,滤光片用于滤除带外背景光, $\Delta\lambda$ 越小越好,综合考虑目前窄带滤光片的工艺难度,选取带宽为0.5 nm的滤光片。

对于机载海洋激光测深系统选用的532 nm波段,其白天背景噪声辐射量为 $I_B = 0.034\ 29\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,夜间背景噪声辐射量为 $I_B = 0.034\ 29\ \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。白天时背景噪声辐射量光谱如图4所示。从图4可以看出,对于Jerlov IB、II类水质透射窗口的绿光波段^[34],当波长 $\lambda = 518.5\ \text{nm}$ 时,白天的背景噪声辐射量为 $I_B = 0.014\ 58\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,相较于 $\lambda = 532\ \text{nm}$ 波段,信噪比可以提升3.71 dB。对于优于Jerlov IB水质透射窗口的蓝光波段^[34],当波长 $\lambda = 486.2\ \text{nm}$ 时,白天的背景噪声辐射量为 $I_B = 0.018\ 69\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,相较 $\lambda = 532\ \text{nm}$ 波段,信噪比可以提升2.64 dB。上述两种波段都处于弗朗禾费暗线,可以通过波长的选择大幅改善信噪比,但目前在518.5 nm和486.2 nm波段,针对海洋测绘的高峰值功率脉冲激光器研发尚不成熟,可将其作为未来海洋激光测绘的激光器关键技术开展技术攻关,因此本文系统中仍选用 $\lambda = 532\ \text{nm}$ 波段激光器。

不同接收孔径和接收视场在不同测距深度下的信噪比如图5所示。从图5可以看出,随着深度的增加,接收信号功率呈指数衰减。从图5(a)、5(c)中可以看出,由于光斑扩展,增加接收口径

会增加信噪比,口径越大效果越好,但考虑机载、星载平台条件,接收口径不宜过大;从图5(b)、5(d)可以看出,白天视场角扩大,背景光接收也随之增多,信噪比几乎没有改善,夜晚增大视场角有明显改善。结合 $\text{SNR} > 3$ 的最大深度探测标准,当 $r = 30\ \text{cm}$, $\theta_{\text{fov}} = 50\ \text{mrad}$ 时,白天50 m深度信噪比为4.459,夜晚70 m深度信噪比为3.81,机载海洋激光测深系统可以实现白天50 m、夜晚70 m的最大探测深度。

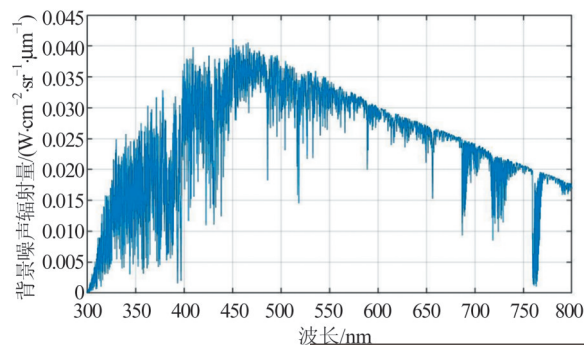


图4 白天背景光噪声辐射光谱

Fig.4 Solar Irradiance at Daytime

3 自适应匹配滤波算法设计

根据图3所示脉冲展宽仿真结果,波形由原始的高斯波形逐渐变成上升沿陡、下降沿缓的波形,匹配波形 $y(t)$ 可由二项指数函数叠加表示,计算式为:

$$y(t) = a \exp(bt) + c \exp(dt) \quad (3)$$

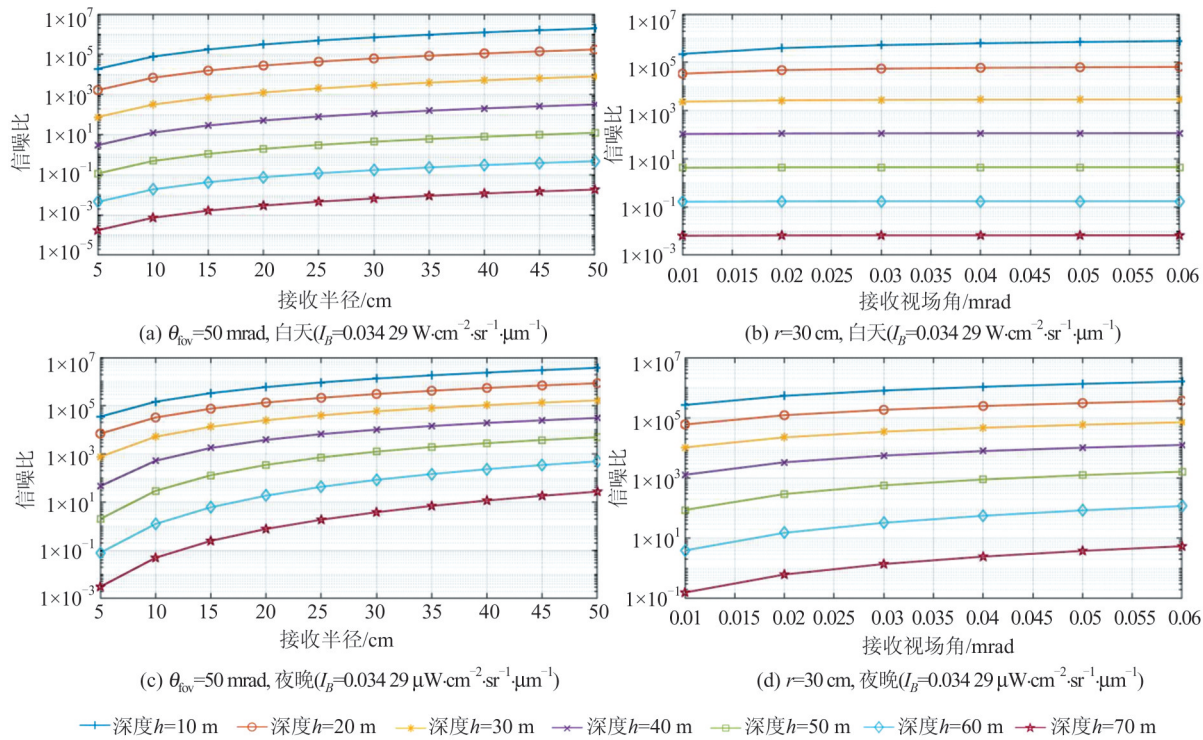


图5 不同接收参数、不同接收时间、不同深度下的接收信噪比

Fig.5 SNR of Different Receiving Parameters, Different Receiving Time and Different Depths

式中, t 为回波信号时间; a, b, c, d 均为二项指数函数拟合参数。 t 与深度 h 的换算关系为 $h = c_0 t / 2n$, 其中, n 为海水折射率, c_0 为真空中光速。

对海水深度 10~70 m 的回波波形进行最小绝对值残差法拟合, 各参数拟合结果如表 2 所示,

7 种深度拟合的均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 均小于 1×10^{-5} , 对应的脉冲展宽波形如图 6 所示。根据不同深度回波波形设计的不同匹配波形, 可以用于自适应匹配滤波算法, 提高机载海洋激光测深系统测深精度。

表 2 不同深度对应匹配波形参数

Tab. 2 Parameters of Matching Filters at Different Depths

深度 h/m	脉宽 t/ns	参数 a/W	参数 $b/10^{-2}s^{-1}$	参数 c/W	参数 $d/10^{-2}s^{-1}$	RMSE
(0, 15]	(0, 134]	5.3×10^{-4}	-3.8	1.1×10^{-3}	-2.7	4.2×10^{-8}
(15, 25]	(134, 223]	9.0×10^{-4}	-3.0	-3.2×10^{-4}	-14.17	1.1×10^{-7}
(25, 35]	(223, 313]	2.1×10^{-4}	-2.6	-1.5×10^{-4}	-14.97	1.4×10^{-7}
(35, 45]	(313, 402]	5.6×10^{-5}	-2.7	-5.3×10^{-5}	-11.20	3.8×10^{-7}
(45, 55]	(402, 491]	1.4×10^{-5}	-2.4	-1.4×10^{-5}	-7.8	4.2×10^{-7}
(55, 65]	(491, 581]	2.7×10^{-6}	-2.2	-3.1×10^{-6}	-7.9	1.7×10^{-6}
(65, 75]	(581, 670]	9.3×10^{-7}	-2.2	-9.8×10^{-7}	-4.5	3.2×10^{-6}

对任意时刻的回波信号, 计算回波波形与匹配波形在匹配窗口宽度内所有采样点的 RMSE^[35], 计算式为:

$$D(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(r\left(\frac{m}{N}\tau + t\right) - y\left(\frac{m}{N}\tau\right) \right)^2} \quad (4)$$

其中, m 为当前采样点, τ 为匹配窗口宽度, 根据脉冲展宽仿真结果, 取 $\tau = 200$ ns 可满足测距深度要求, $\frac{\tau}{N}$ 为采样间隔, 模数转换器每秒千兆采样

数为 10, 则 $N = 2000$; $y(t)$ 为匹配波形。测距精度计算式为^[36]:

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_s^2 + \Delta R_c^2} \quad (5)$$

式中, ΔR_c 为测时电路中的时间测量电路变化引起的测距误差, 激光测深系统采用飞行时间测量方法测量目标的距离, 采用高精度时间测量芯片测量激光脉冲的飞行时间, 测试精度可达 27 ps, 对应的海洋测距精度为 3 mm; ΔR_s 为探测器输出脉冲匹配的测距误差, 计算式为^[37]:

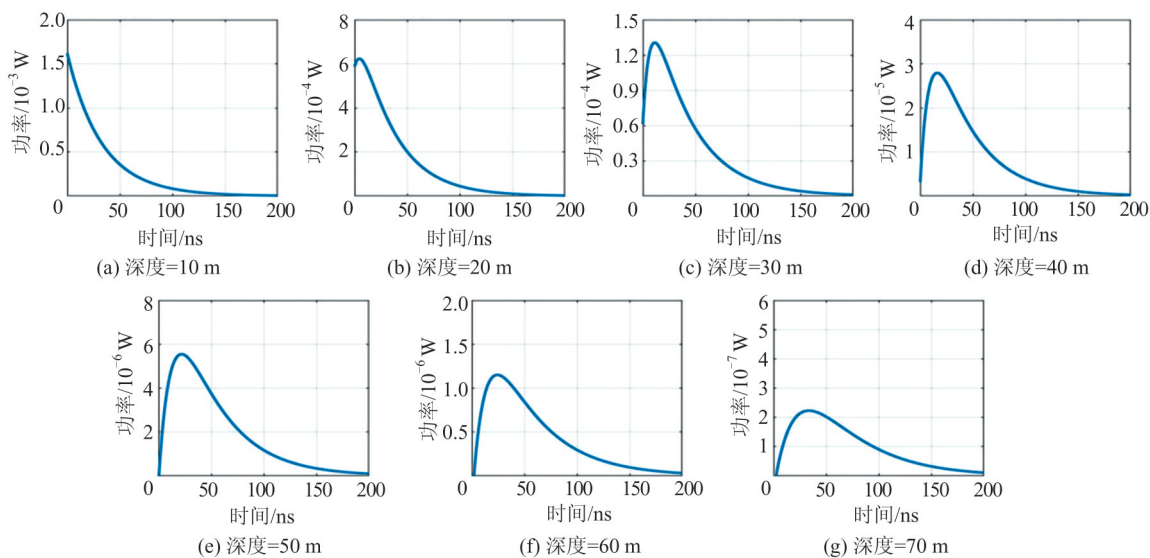


图6 不同深度匹配波形

Fig.6 Matching Filters at Different Depths

$$\Delta R_s = \frac{c_0 \Delta t}{2n} \quad (6)$$

$$\Delta t = |\arg_t \min D(t) - t_0| \quad (7)$$

式中, Δt 为回波信号的测时误差; $\arg_t \min D(t)$ 为选取 $D(t)$ 为最小值时的时刻; t_0 为回波信号的真值时间。

对 10~70 m 深度的回波信号进行仿真, 分别采用自适应匹配滤波算法与固定匹配滤波算法进行波形位置提取, 白天与夜晚的测深精度仿真如图 7 所示。从图 7 可以得出以下结论:

1) 对于深度小于 20 m 的浅海测绘, 由于信噪比较高, 且激光脉冲展宽不明显, 自适应算法与固定匹配滤波性能接近, 此时匹配算法对探测精度影响较小, 探测精度主要受限于测时电路中的时间测量电路变化引起的测深、测距误差和大气信道引起的测距误差。

2) 对于深海测绘, 激光衰减强烈导致接收信噪比降低, 且激光脉冲出现明显的波形展宽与失真, 测距精度开始明显下降。由于自适应匹配滤波器根据深度自适应选择波形进行匹配, 相较于固定匹配滤波有显著的测距精度提高, 且深度越大, 波形失真越大, 自适应匹配滤波器对测距精度的提升越明显。

3) 对于最大深度探测, 在白天 50 m 水深情况下, 自适应匹配滤波相较于固定匹配滤波算法可将测距精度从 206 mm 提高到 166 mm, 精度提高了 40 mm; 在夜晚 70 m 水深情况下, 自适应匹配滤波相较于固定匹配滤波算法可将测距精度从 239 mm 提高到 172 mm, 精度提高了 67 mm。

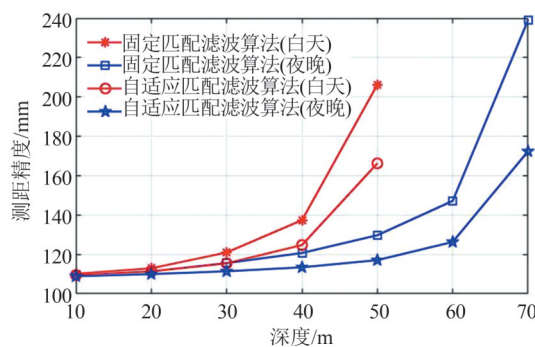


图7 自适应匹配滤波算法与固定匹配滤波算法在白天与夜晚的测深精度对比

Fig.7 Measurement Accuracy Comparison of Adaptive Matching Filter and Fixed Matching Filter at Day and Night

4 结 语

本文通过采用实测水质结合蒙特卡罗仿真分析了不同深度下回波信号空间扩展、能量衰减以及脉冲展宽, 并结合信噪比优于 3 的标准进行机载海洋测深系统参数设计。根据仿真结果, 所设计系统参数能实现白天最大测深深度 50 m, 夜间最大测深深度 70 m 的测深性能, 满足国际上现有机载海洋激光测深系统的指标。根据不同深度的回波波形设计了自适应匹配滤波算法, 在白天 50 m 水深情况下, 自适应匹配滤波相较于固定匹配滤波算法可将测距精度从 206 mm 提高到 166 mm, 精度提高了 40 mm; 在夜晚 70 m 水深情况下, 自适应匹配滤波相较于固定匹配滤波算法可将测距精度从 239 mm 提高到 172 mm, 精度提高了 67 mm。基于自适应匹配滤波算法的高精度

激光测深技术可以满足中国南海近海大陆架的测绘要求。

从背景光噪声辐射光谱的分析中可以看出,选用弗朗禾费暗线的 $\lambda=518.5\text{ nm}$ 和 $\lambda=486.2\text{ nm}$ 作光源可以大幅改善信噪比,开展 $\lambda=518.5\text{ nm}$ 和 $\lambda=486.2\text{ nm}$ 的高功率脉冲激光器关键技术攻关有望为未来海洋激光测绘提供更高的测绘深度和精度,进一步完善和提升机载海洋激光测深系统的性能。

参 考 文 献

- [1] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Liu Huanling, et al. Research Situation and Future Development of Satellite Geodesy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 48-54 (程鹏飞, 文汉江, 刘焕玲, 等. 卫星大地测量学的研究现状及发展趋势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(1): 48-54)
- [2] Zhao Jianhu, Wu Jingwen, Zhao Xinglei, et al. A Correction Model for Depth Bias in Airborne LiDAR Bathymetry Systems [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(3): 328-333 (赵建虎, 吴敬文, 赵兴磊, 等. 一种改进的机载激光测深深度偏差模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(3): 328-333)
- [3] Chen Feng. Airborne Laser Hydrography for Costal Water [J]. *Journal of Applied Optics*, 1999, 20(2): 18-23 (陈烽. 近海机载激光海洋测深技术[J]. 应用光学, 1999, 20(2): 18-23)
- [4] Wang Yue. Current Status and Development of Airborne Laser Bathymetry Technology [J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(3): 38-42 (王越. 机载激光浅海测深技术的现状和发展[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(3): 38-42)
- [5] Zhai Guojun. Application of Satellite Altimetry in Ocean Mapping [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2002, 22(4): 58-62 (翟国君. 卫星测高在海洋测绘中的应用[J]. 海洋测绘, 2002, 22(4): 58-62)
- [6] Ouyang Yongzhong, Huang Motao, Zhai Guojun, et al. On the Depth Reduction in Airborne Laser Hydrography [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2003, 23(1): 1-5 (欧阳永忠, 黄谟涛, 翟国君, 等. 机载激光测深中的深度归算技术[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 1-5)
- [7] Irish J L, White T E. Coastal Engineering Applications of High-Resolution LiDAR Bathymetry [J]. *Coastal Engineering*, 1998, 35(1/2): 47-71
- [8] Hu Shanjiang, He Yan, Zang Huaguo, et al. A New Airborne Laser Bathymetry System and Survey Result [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1 163-1 167 (胡思江, 贺岩, 臧华国, 等. 新型机载激光测深系统及其飞行实验结果[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1 163-1 167)
- [9] Tuell G, Barbor K, Wozencraft J. Overview of the Coastal Zone Mapping and Imaging LiDAR (CZMIL): A New Multisensor Airborne Mapping System for the US Army Corps of Engineers [C]// Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVI, Orlando, Florida, USA, 2010
- [10] Steinvall O K, Koppari K R, Karlsson U C M. Airborne Laser Depth Sounding: System Aspects and Performance [C]// Proceedings of SPIE, Ocean Optics XII, Bergen, Norway, 1994
- [11] Parker H, Sinclair M. The Successful Application of Airborne LiDAR Bathymetry Surveys Using Latest Technology [C]// Proceedings of Oceans, Yeosu, Korea (South), 2012
- [12] Zhu Xiao, Yang Kecheng, Li Zaiguang. The Experiment of Airborne Laser Bathymeter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(5): 470-472 (朱晓, 杨克成, 李再光. 机载激光测深试验[J]. 中国激光, 1998, 25(5): 470-472)
- [13] Yao Chunhua, Chen Weibiao, Zang Huaguo, et al. Accurate Measurement of Sea Surface in an Airborne Laser Bathymetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 351-355 (姚春华, 陈卫标, 臧华国, 等. 机载激光测深系统中的精确海表测量[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 351-355)
- [14] Zhang Kailin. The System Design and Experiments of the Airborne Fluorescence Ocean LiDAR [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005 (张凯临. 机载海洋激光荧光雷达软硬件设计与飞行实验[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005)
- [15] Zhai Guojun, Huang Motao, Ouyang Yongzhong, et al. Key Technologies Related to the Development of Airborne Laser Bathymetry System [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(3): 73-76 (翟国君, 黄谟涛, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深系统研制中的关键技术[J]. 海洋测绘, 2014, 34(3): 73-76)
- [16] Li Xiaolong, Chen Yonghua, Yu Fei, et al. Comparison and Analysis of Inversion Models for Water Optical Property Parameters by Ocean LiDAR [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001005 (李晓龙, 陈永华, 于非, 等. 海洋激光雷达水体光学特性参数反演模型对比及分析[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001005)

- [17] He Yan, Hu Shanjiang, Chen Weibiao, et al. Research Progress of Domestic Airborne Dual-Frequency LiDAR Detection Technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 82801 (贺岩, 胡善江, 陈卫标, 等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 82801)
- [18] Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian, et al. Analysis of Relationship Between Parameter Choice of Airborne Laser Bathymetry and Maximum Penetrability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1 255-1 260 (汪权东, 陈卫标, 陆雨田, 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1 255-1 260)
- [19] Huang Tiancheng, Tao Bangyi, Mao Zhihua, et al. Classification of Sea and Land Waveform Based on Multi-Channel Ocean LiDAR[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0610002 (黄田程, 陶邦一, 毛志华, 等. 基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610002)
- [20] Hu S Q, Mi L, Zhou T H, et al. The Down-Link Propagation Modeling for Underwater Laser Communication[C]//Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou, China, 2017
- [21] Yan Xuguang. Study on Characters of the Seawater Optical Channel Basing on Monte Carlo Simulation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004 (阎旭光. 基于蒙特卡罗模拟的海水光信道特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004)
- [22] Wu Fangping, Zhang Xi, Li Peijun, et al. Monte Carlo Simulation Analysis of Underwater Target Detection by Oceanic LiDAR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121401 (吴方平, 章曦, 李配军, 等. 海洋激光雷达水下目标探测的蒙特卡罗仿真分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 121401)
- [23] Li Jinwei, Bi Weihong, Ren Yanhui. A Method for Simulating Time-Domain Broadening of Laser Pulse in the Underwater Laser Communication[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(5): 569-572 (李仅伟, 毕卫红, 任炎辉. 水下激光通信中脉冲时域展宽的模拟计算方法[J]. 光学技术, 2012, 38(5): 569-572)
- [24] Jasman F, Green R J. Monte Carlo Simulation for Underwater Optical Wireless Communications[C]//2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), Newcastle Upon Tyne, UK, 2013
- [25] Bogucki D J, Piskozub J, Carr M E, et al. Monte Carlo Simulation of Propagation of a Short Light Beam Through Turbulent Oceanic Flow[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 13 988-13 996
- [26] Gjerstad K I, Stamnes J J, Hamre B, et al. Monte Carlo and Discrete-Ordinate Simulations of Irradiances in the Coupled Atmosphere-Ocean System[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2 609-2 622
- [27] Lerner R M, Summers J D. Monte Carlo Description of Time- and Space-Resolved Multiple Forward Scatter in Natural Water[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(5): 861-869
- [28] Hu S Q, Mi L, Zhou T H, et al. 3588 Attenuation Lengths and 332 Bits/Photon Underwater Optical Wireless Communication Based on Photon-Counting Receiver with 256-PPM[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21685
- [29] Li Yuanhui. The Monte Carlo Simulation of Laser Underwater Target Detection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009 (李源慧. 激光水下目标探测的 Monte Carlo 模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2009)
- [30] Hu S Q, Mi L, Zhou T H, et al. Viterbi Equalization for Long-Distance, High-Speed Underwater Laser Communication[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 076101
- [31] Liu Menggeng, He Yan, Chen Weibiao, et al. Adaptive Depth Extraction Algorithm for Ocean LiDAR[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1010001 (刘梦庚, 贺岩, 陈卫标, 等. 海洋激光雷达的自适应深度提取算法[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1010001)
- [32] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12
- [33] Hu Siqu, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Performance Analysis and Simulation of Maximum Ratio Combining in Underwater Laser Communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1206003 (胡思奇, 周田华, 陈卫标. 水下激光通信最大比合并分集接收性能分析及仿真[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206003)
- [34] Solonenko M G, Mobley C D. Inherent Optical Properties of Jerlov Water Types[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(17): 5392
- [35] Jacovitti G, Scarano G. Discrete Time Techniques for Time Delay Estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(2): 525-533
- [36] Luo Yuan, He Yan, Hu Shanjiang, et al. Three-Dimensional Video Imaging LiDAR System Based on

Acousto-Optic Laser Scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0802005 (罗远, 贺岩, 胡善江, 等. 基于声光扫描的三维视频激光雷达技术[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802005)

[37] Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua, et al. Simulation

of Space-Borne Altimeter Based on Pseudorandom Modulation and Single-Photon Counting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 21-26 (杨馥, 贺岩, 周田华, 等. 基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 21-26)

Adaptive Matched Filtering Algorithm for High-Precision Laser Bathymetry

HU Siqui^{1,2} OUYANG Yongzhong^{3,4} LIU Huijie^{1,2} ZHU Ye^{1,2}
ZHAO Lingfeng^{1,2} DONG Chao^{3,4}

1 Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China

2 Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China

3 Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China

4 South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China

Abstract: Objectives: The airborne laser bathymetry system transmitted laser pulse through the complex channel which consisted of atmosphere, air-sea interface and water channel. The signal power decreased exponential with the increment of the water depth, and the pulse waveform was stretched and distorted at the same time. These two types of transmission characteristics would limit the maximum detection depth and the measurement accuracy of depth, respectively. **Methods:** The purpose of the proposed algorithm is to improve the measurement accuracy of laser bathymetry system on the premise of ensuring the maximum detection depth performance. First, the water quality and Monte Carlo simulation method are used to study the different depth of echo signal characteristics. It reveals the propagation properties of laser signal and establishes a new parameter design method for laser bathymetry system, which can meet the requirement of international airborne laser depth bathymetry system. Then, the waveform distortion of echo signals at different depths are simulated under the specific system parameters. The adaptive matching filter algorithm is designed to improve the measurement precision. **Results:** The simulation results revealed that the designed system parameters and the adaptive matched filtering algorithm can achieve the performance with the maximum detection depth of 50 m with measurement accuracy of 166 mm in the daytime and with the maximum detection depth of 70 m with measurement accuracy of 172 mm at night for laser bathymetry system. **Conclusions:** The results show that the adaptive matched filtering algorithm can improve the measurement accuracy and serve the marine surveying and mapping of China.

Key words: laser bathymetry; cross-media laser transmission; adaptive matched filtering; Monte Carlo simulation

First author: HU Siqui, PhD, assistant researcher, specializes in free space laser communication. E-mail: siqi.hu@outlook.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41774021); the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDA15020400); Shanghai Municipal Science and Technology Major Project (2019SHZDZX01).

引文格式: HU Siqui, OUYANG Yongzhong, LIU Huijie, et al. Adaptive Matched Filtering Algorithm for High-Precision Laser Bathymetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(9): 1395-1403. DOI:10.13203/j.whugis20200402 (胡思奇, 欧阳永忠, 刘会杰, 等. 机载海洋激光测深系统的自适应匹配滤波算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(9): 1395-1403. DOI:10.13203/j.whugis20200402)