

星载海洋激光雷达叶绿素剖面探测能力估算

朱培志¹, 刘秉义^{1,2}, 孔晓娟¹, 杨倩³

- (1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院 海洋技术系, 山东 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 为了评估和分析星载海洋激光雷达探测全球海洋光学参数的性能, 依据激光雷达方程和蒙特卡罗模型结果模拟计算激光传输信号, 开发了星载海洋激光雷达仿真模拟系统。仿真模拟系统由正向模拟、数据反演与误差分析三部分组成, 能够模拟激光发射、传输和探测的全过程。根据给定的激光雷达参数, 模拟了 443 nm、486.1 nm 和 532 nm 波长在地中海、印度洋、南大洋与太平洋四个典型海区的探测信号。研究表明, 443 nm 和 486 nm 波长的探测深度在各个海区均比较接近, 并且均比 532 nm 更深。在给定的激光雷达参数情况下, 486.1 nm 波长在太平洋和南大洋的探测深度分别为 120 m 和 70 m, 在地中海和印度洋的探测深度均为约 100 m。叶绿素 a 浓度在以上海区的探测深度分别约为 80 m、50 m 和 70 m。

关键词: 星载海洋激光雷达; 仿真模拟系统; 叶绿素 a; 探测深度

中图分类号: P714⁺.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200164

Estimation of chlorophyll profile detection capability of spaceborne oceanographic lidar

Zhu Peizhi¹, Liu Bingyi^{1,2}, Kong Xiaojuan¹, Yang Qian³

- (1. Department of Marine Technology, College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;
3. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to evaluate and analyze performance of spaceborne oceanographic lidar for global ocean optical properties detection, a simulation system for spaceborne oceanographic lidar was developed based on lidar equation and the results of Monte Carlo simulation model. The lidar simulation system consisted of three modules, forward simulation, data inversion and error analysis, which could simulate the whole process of laser emission, transmission and detection. According to the given lidar parameters, the detection signals of 443 nm, 486.1 nm and 532 nm in four typical areas, Mediterranean Sea, Indian Ocean, Southern Ocean and Pacific Ocean, were simulated. The results show that the detection depths of 443 nm and 486 nm are approximately the same and deeper than that of 532 nm. For the given lidar parameters, the detection depths of 486.1 nm wavelength in the Pacific Ocean and the Southern Ocean are 120 m and 70 m, respectively, and the detection depth in the Mediterranean Sea and the Indian Ocean is about 100 m. The detection depths of chlorophyll-a concentration in the above sea areas are about 80 m, 50 m and 70 m, respectively.

Key words: spaceborne oceanographic lidar; simulation system; Chl-a; detection depth

收稿日期: 2020-10-15; 修订日期: 2020-11-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1400905, 2016YFC1400904)

0 引言

海洋光学参数的观测对于海洋环境安全、水质生态监测具有重要意义,但由于海洋面积广阔、海况复杂,现场实测与浮标观测等观测技术难以满足对各种海洋光学参数的测量需求。卫星海洋遥感作为全球观测系统的重要组成部分,能提供全球范围的数据,同时具有较高的时间、空间分辨率,可以为全球海洋特性提供动态监测。但是被动观测卫星只能得到表层积分信息,无法获取剖面数据,而且需要进行较复杂的大气校正^[1-3]。

星载激光雷达作为一种具有垂直分辨能力的新型主动式光学卫星传感器,已经被应用在海洋与大气的探测^[4]。星载海洋激光雷达向海水发射激光脉冲,并接收来自海水的散射光信号,进而获取水体光学参数信息。作为主动式遥感观测系统,星载海洋激光雷达能够获取全天时的全球海洋光学参数信息,弥补被动观测系统在夜间和高纬度地区探测能力的不足。由于星载海洋激光雷达采用高功率脉冲激光作为探测光源,能够穿透海洋表层,并且具有时间分辨能力,从而能够获取水体光学参数的剖面信息,在海洋垂直分层的观测中具有突出的优势。目前,星载激光雷达在海洋探测方面已经有了成功的应用,如探测全球海洋表面粗糙度和风速^[5]、海洋次表层后向散射剖面^[6-7]、反演叶绿素 a(Chl-a)浓度^[8]、浮游植物生物量^[6]和颗粒有机碳储量^[8-9]等。

目前,国内外尚未报道为海洋探测而设计的星载激光雷达。与用于大气探测和高程测量的激光雷达相比,海水的吸收与散射作用会导致激光能量的快速衰减,激光波长和海水光学性质等因素也会显著影响水体回波信号的强度和信噪比,进而影响海洋激光雷达的探测深度及其探测海洋光学参数剖面的能力。为了评估星载海洋激光雷达在全球海洋的探测能力和水体光学参数剖面的测量精度,需要开展星载海洋激光雷达系统仿真模拟研究和测量能力分析。

文中结合激光雷达方程和蒙特卡罗仿真结果,根据给定的激光雷达参数,使用 BGC-Argo 测量的全球叶绿素 a 剖面数据作为输入,通过仿真模拟研究了星载海洋激光雷达叶绿素 a 剖面探测方法,分析了其在全球典型海区的测量精度。

1 星载海洋激光雷达仿真平台

星载海洋激光雷达发射激光脉冲,穿透大气、薄云、气溶胶与海气界面等进入海洋,经过海水及其他海水组分(如有机颗粒、无机颗粒和 CDOM 等)的散射和吸收后,部分后向散射光穿过海面 and 大气被激光雷达接收系统接收。星载海洋激光雷达仿真模拟系统主要包括正向模拟模块、数据反演模块和误差分析模块,仿真模拟系统的流程图如图 1 所示。

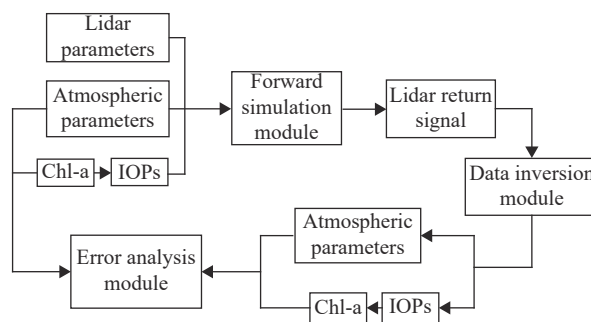


图 1 海洋激光雷达仿真模拟系统流程图

Fig.1 Flowchart of oceanographic lidar simulation system

正向模拟模块使用激光雷达方程和蒙特卡罗仿真模型结果,输入参数包括大气光学参数、海水固有光学参数(IOPs)和激光雷达系统参数等。通过模拟计算首先得到探测器接收之前的回波光光子数,该光子数加上太阳背景光子数,结合探测参数集,模拟激光雷达采集系统,得到单脉冲激光雷达回波信号。通过设置脉冲累加次数,可计算得到累加光子计数值以及信噪比数据,进而进行光子数波形信噪比分析,通过设置信噪比阈值可以估算海洋激光雷达系统在不同海区、不同激光雷达参数情况下的回波探测深度。在第 2 节对模型的组成和算法流程进行了详细的描述,第 3 节对激光雷达回波信号的计算过程和结果进行了详细介绍。

数据反演模块中,首先利用大气激光雷达中比较成熟的斜率法得到激光雷达消光系数 α 和 $\beta(\pi)$,再通过 $\beta(\pi)$ 与叶绿素 a 浓度的经验关系得到叶绿素 a 剖面。

误差分析模块中,将激光雷达 $\beta(\pi)$ 剖面 and 叶绿素 a 剖面的反演结果与初始输入的真值进行比对分析,分别模拟得到 $\beta(\pi)$ 和叶绿素 a 浓度的探测误差,分析各个输入条件对激光雷达测量误差的影响,评估

星载海洋激光雷达测量水体光学参数剖面的探测能力。第 4 节详细介绍了全球海洋后向散射系数、叶绿素浓度剖面探测结果并进行误差分析。

星载海洋激光雷达仿真软件界面如图 2 所示,包

含激光雷达系统参数、大气和海水光学参数等输入参数,通过软件界面可以设置不同的模拟条件,可以对星载、机载等多种激光雷达的探测信号进行仿真模拟。



图 2 星载海洋激光雷达模拟系统软件界面

Fig.2 Interface of simulation system of spaceborne oceanographic lidar

2 激光雷达回波仿真模拟算法

仿真模拟初始输入的水体参数可以是水体光学参数(水体和颗粒物的吸收光谱和散射光谱、散射相函数),也可以输入水体的叶绿素 a 浓度剖面,通过叶绿素 a 浓度与水体光学参数的经验关系计算得出各种水体光学参数,包括水体吸收系数 a 与散射系数 b ,由此计算激光雷达测量信号中的消光系数 α 与激光雷达后向散射系数 $\beta(\pi)$ (即 180° 体积散射函数),结合设定的雷达系统参数,代入激光雷达方程计算回波光光子数,并求得单光子探测深度。

文中假定大洋海水中的吸收和散射主要为浮游植物的贡献。由叶绿素 a 浓度剖面计算浮游植物吸收系数 a_{ph} 的计算方法为 1998 年 Lee 等给出的经验关系^[10]:

$$a_{ph}(\lambda) = [a_0(\lambda) + a_1(\lambda)\ln(a_{ph}(440))]a_{ph}(440) \quad (1)$$

式中: $a_{ph}(\lambda)$ 为浮游植物吸收系数; a_0 、 a_1 是与波长相关的经验系数(如图 3 所示^[11]); $a_{ph}(440)$ 为固定波长 440 nm 处的浮游植物吸收系数,可由 1998 年 Bricaud 等人提出的方法^[12] 计算,如公式(2)所示,式中 $\langle chl \rangle$

为叶绿素 a 浓度 (mg/m^3):

$$a_{ph}(440) = 0.0378 \langle chl \rangle^{0.627} \quad (2)$$

纯水吸收系数 a_w 为 1997 年 Pope 和 Fry 利用积分球测量的不同波长下的结果,表现为蓝绿光波段吸收系数较低,红光波段较高,如图 4 所示^[11]。

由叶绿素 a 浓度剖面计算颗粒物散射系数 b_p 的方法采用 1983 年 Gordon 与 Morel 提出的经验关系^[13],如公式(3)所示:

$$b_p(\lambda) = 0.3 \langle chl \rangle^{0.62} \left(\frac{550}{\lambda} \right) \quad (3)$$

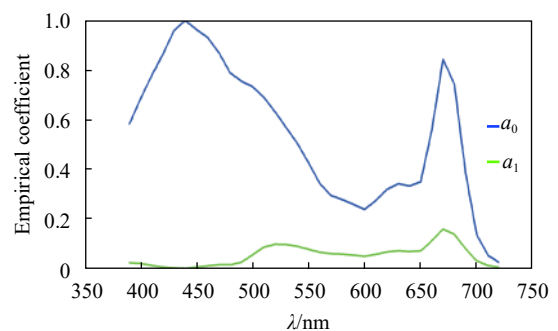


图 3 用于计算 a_{ph} 的经验系数 a_0 、 a_1

Fig.3 Empirical coefficient a_0 , a_1 for calculating a_{ph}

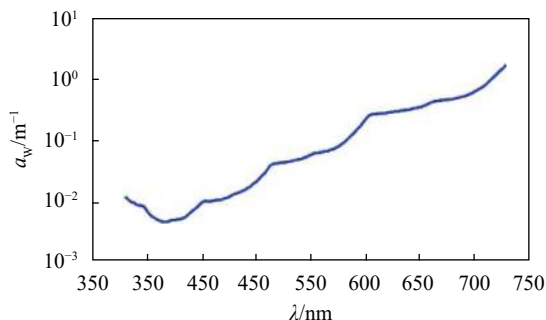


图 4 纯水吸收系数

Fig.4 Absorption coefficient of pure water

颗粒物相函数采用 1972 年 Petzold 给出的测量结果^[14], 如图 5 所示。

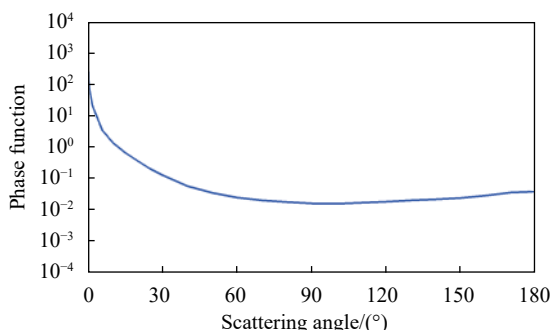


图 5 海水颗粒物散射相函数

Fig.5 Scattering phase function of seawater particle

纯水的散射系数为 1977 年 Morel 提出的散射系数模型^[15], 如图 6 所示。

纯水相函数为^[16]:

$$\tilde{\beta}_w(\phi) = 0.06225(1 + 0.835\cos^2\phi) \quad (4)$$

水体的 180° 体积散射系数 $\beta(\pi)$ 可由散射系数 b 与散射相函数的乘积计算。

激光雷达消光系数 α 可由 1972 年 Kattawar 基于蒙特卡罗模拟给出的经验关系式计算^[17]:

$$\alpha = K_d + (c - K_d)\exp(-0.85cD) \quad (5)$$

式中: c 为海水衰减系数; D 为海面接收光斑直径; K_d 为海水的漫射衰减系数, 可由 2005 年 Lee 给出的关系计算^[18]。

$$K_d = a + 4.18b_b [1 - 0.52\exp(-10.8a)] \quad (6)$$

将上述计算结果代入激光雷达方程即可求得星载海洋激光雷达接收的回波光子数^[19]:

$$N(z) = \frac{E_0}{h\nu} \frac{A_{rec}}{(nH+z)^2} T_{atm}^2 T_{sur}^2 \eta \Delta z \beta(\pi) \exp[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'] \quad (7)$$

式中: $N(z)$ 为探测器接收的深度 z 处的回波光子数; E_0 为发射的激光能量; h 为普朗克常数; ν 为激光频率; $\frac{E_0}{h\nu}$ 即为发射光子数, A_{rec} 为望远镜接收面积; H 为激光雷达所在高度; n 为海水折射率; $\frac{A_{rec}}{(nH+z)^2}$ 即为接收立体角; T_{atm} 为大气透过率; T_{sur} 为海气界面透过率; η 为光学系统的光学效率; Δz 为垂直分辨率。

利用此节描述的方法, 可以使用输入的叶绿素 a 浓度剖面模拟计算不同激光雷达参数情况下的星载海洋激光雷达海洋水体剖面回波信号, 用于激光雷达探测能力的评估和探测精度的分析。

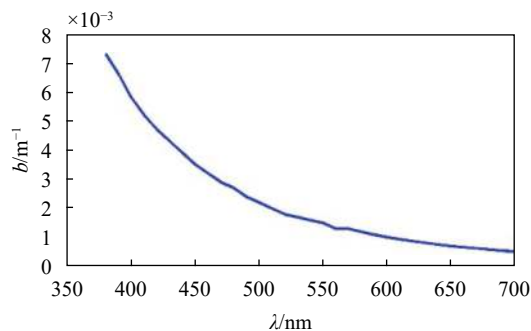


图 6 纯水散射系数

Fig.6 Scattering coefficient of pure water

3 激光雷达回波信号模拟结果

文中选择 443 nm、486.1 nm 与 532 nm 三个典型激光波长对激光雷达回波信号进行对比分析。三个典型波长中, 443 nm 是水色遥感的常用典型波长, 在最清洁的大洋水中穿透力较好; 486.1 nm 波长在大洋水中具有较好的穿透能力, 而且该波长对应一条太阳夫朗和费暗线, 可以有效降低太阳背景光对激光雷达探测性能的影响; 532 nm 是激光技术最成熟的蓝绿波长, 在沿岸海水比蓝光有更好的穿透能力。

使用 2009~2019 年的 Argo 全球海域叶绿素 a 剖面数据, 将数据进行质量控制与经纬度 $1^\circ \times 1^\circ$ 的空间网格化处理, 得到全球海域 1 m 垂直分辨率的叶绿素 a 浓度剖面。虽然 Argo 叶绿素 a 数据不足以覆盖全部海域, 但仍可以选择典型海域进行统计分析。根据连续 10 年的全球 Argo 叶绿素 a 浓度剖面数据得到

的地中海 (4°W~42°E, 32°N~46°N, 共 8 824 个剖面)、印度洋 (65°E~110°E, 30°S~10°N, 共 3 417 个剖面)、南大洋 (180°W~180°E, 80°S~40°S, 共 15 838 个剖面) 与太平洋 (170°E~120°W, 30°S~40°N, 共 2 000 个剖面) 四个海区的平均叶绿素 a 浓度剖面如图 7 所示。可以看出: 南大洋海域平均叶绿素 a 峰值浓度较高、峰值深度较浅, 太平洋峰值深度最深、峰值浓度较小。

根据表 1 所列的激光雷达系统参数以及所需的大气光学参数 (1976 年美国标准大气模型)、水体光学参数 (由叶绿素 a 剖面计算得到) 等, 通过公式 (7) 所示的激光雷达方程计算得到无背景光情况下的 1 s 累加回波光子数, 以 1 个回波光子作为阈值确定单光子探测深度, 图 8 为地中海 (a)、印度洋 (b)、南大洋

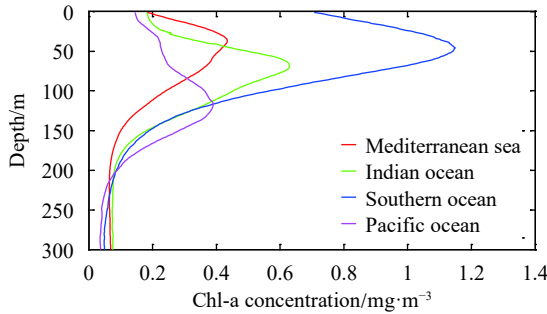


图 7 平均叶绿素 a 浓度剖面

Fig.7 Average Chl-a concentration profile

表 1 星载海洋激光雷达仿真模拟参数

Tab.1 Parameters for simulation of spaceborne oceanographic lidar

Input parameters	Value
Laser wavelength/nm	443, 486.1, 532
Repetition rates/Hz	20
Pulse energy/mJ	200
Pulse width/ns	10
Laser linewidth/nm	0.1
Laser divergence/mrad	0.2
Telescope diameter/m	1.2
Field of view/mrad	0.3
Receiving spectrum width/nm	0.2
Optical efficiency	0.6
Orbital height/km	550
Solar spectral irradiance/W·m ⁻² ·um ⁻¹	205
Sea surface wind speed/m·s ⁻¹	5
Solar altitude angle/(°)	60
Range resolution/m	1

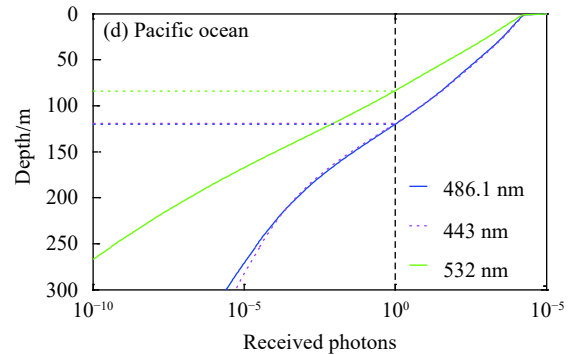
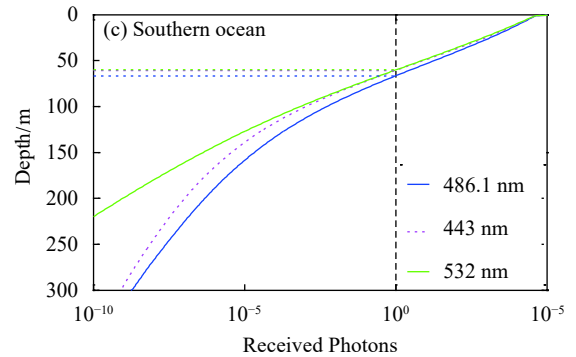
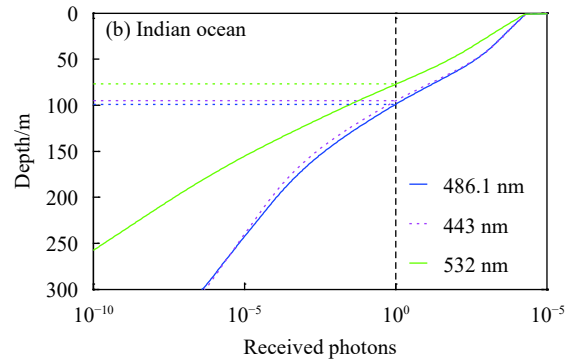
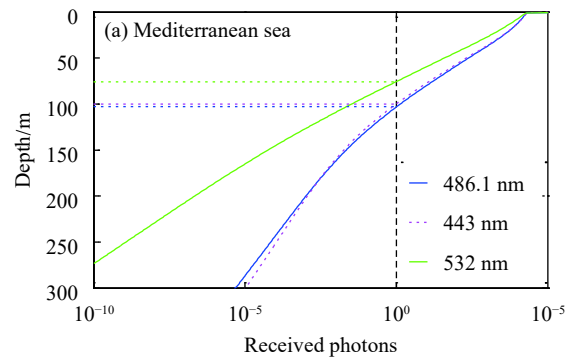


图 8 四个海区不同波长下的激光雷达回波光子数 (横向的虚线为单光子回波对应的探测深度)

Fig.8 Photon number of lidar echo at different wavelengths in four sea areas (the transverse dotted line is the detection depth corresponding to single photon echo)

(c)、太平洋 (d) 四个海区在三个典型波长下的激光雷达回波光子数剖面, 横向虚线为各个波长的单光子探测深度, 0 m 处尖峰为模拟的海面强反射信号。

由于太平洋海域水体最清澈, 叶绿素 a 浓度较小且峰值深度较深, 回波信号衰减较慢, 探测深度最深, 486.1 nm 与 443 nm 探测深度约为 120 m, 532 nm 探测深度较浅, 约为 80 m; 地中海和印度洋叶绿素 a 浓度高于太平洋且峰值深度较浅, 两海域探测深度结果类似, 486.1 nm 与 443 nm 探测深度约为 100 m, 532 nm 探测深度约为 75 m; 南大洋叶绿素 a 浓度较大且峰值深度较浅, 回波信号衰减较快, 各个波长的探测能力都相对较弱, 探测深度约为 65 m, 同时也能看出在较为浑浊的海域, 532 nm 的信号与其他两个波长更加接近, 486.1 nm 比 443 nm 衰减的更慢, 探测深度最深。图中 0 m 处尖峰为模拟的海面强反射信号。

在上述回波光子数曲线中加入背景光子数, 模拟经采集后得到的光子计数值, 并计算信噪比。以太平洋海域为例的光子计数值剖面与信噪比剖面如图 9 所示。

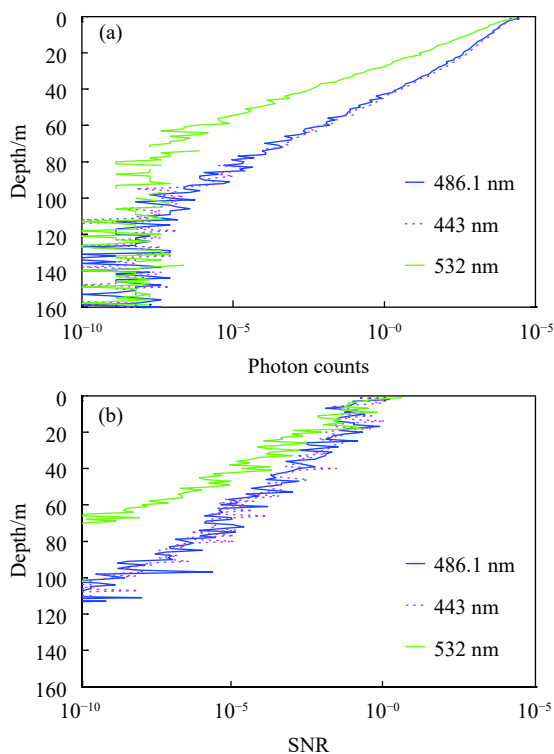


图 9 太平洋海域的激光雷达光子计数值剖面 (a) 和信噪比剖面 (b)
Fig.9 Lidar profiles of photon counts (a) and signal-to-noise (b) in Pacific ocean

从图 9 中可以看出 532 nm 波长采集光子计数值、信噪比都低于 486.1 nm、443 nm 波长。若以 SNR = 2 作为最大探测深度判据, 486.1 nm、443 nm 约能达到到 90~100 m 深度, 532 nm 只能探测到 60 m。

4 反演模型结果与分析

由于目前缺乏用于对比分析的星载海洋激光雷达的实测数据, 对模型误差的分析过程利用模型初始输入数据作为真实值, 通过加入背景光和随机噪声的方法得到叶绿素 a 的反演结果, 并与初始输入的真值进行对比分析, 同时进行不同的脉冲累加数量、不同海区 (不同水体光学参数剖面)、不同水深信号的相互对比。从而得到真实水体情况下的海洋参数剖面的探测精度, 并分析由背景光带来的误差随深度与累加数据量的变化。

此节以 486.1 nm 波长为例, 使用采集光子计数值剖面进行数据反演。首先对激光雷达探测的水体回波信号进行脉冲累加 (设定 1~200 累加脉冲数) 和深度累加 (设定 5 m 垂直分辨率), 然后利用常用的斜率法计算 180° 体积散射函数 $\beta(\pi)$, 再根据 $\beta(\pi)$ 与叶绿素 a 浓度的经验关系得到叶绿素 a 剖面信号, 并与初始设定的 $\beta(\pi)$ 和叶绿素 a 浓度剖面进行比较。相对误差随深度变化的曲线如图 10、图 11 所示, 图中横坐标为相对误差值, 纵坐标为水深, 右侧显示不同颜色代表相对应的 1~200 累加脉冲数, 从上到下分别为地中海 (a)、印度洋 (b)、南大洋 (c) 和太平洋 (d)。

如图 10 所示, 486.1 nm 波长下不同海区的激光雷达后向散射系数相对误差随脉冲累加数增加而相应减小; 若以 $\beta(\pi)$ 误差为 25% 作为阈值判断 (参考水色遥感 Chl-a 浓度业务化算法 30% 的反演误差要求, 此处以 25% 作为 $\beta(\pi)$ 的误差阈值), 波形累加 10 次的最大 $\beta(\pi)$ 反演深度, 太平洋最深可达约 65 m, 波形累加 50 次的最大 $\beta(\pi)$ 反演深度约 85 m; 地中海与印度洋反演深度大致相同, 波形累加 50 次的最大 $\beta(\pi)$ 反演深度约为 70~80 m; 南大洋波形累加 50 次最深可达 50 m 左右。

如图 11 所示, 486.1 nm 波长下不同海区的叶绿素 a 浓度相对误差随脉冲累加数增加而相应减小; 若以叶绿素 a 浓度误差为 30% 作为阈值判断 (参考水色遥感 Chl-a 浓度业务化算法 30% 的反演误差要求), 波

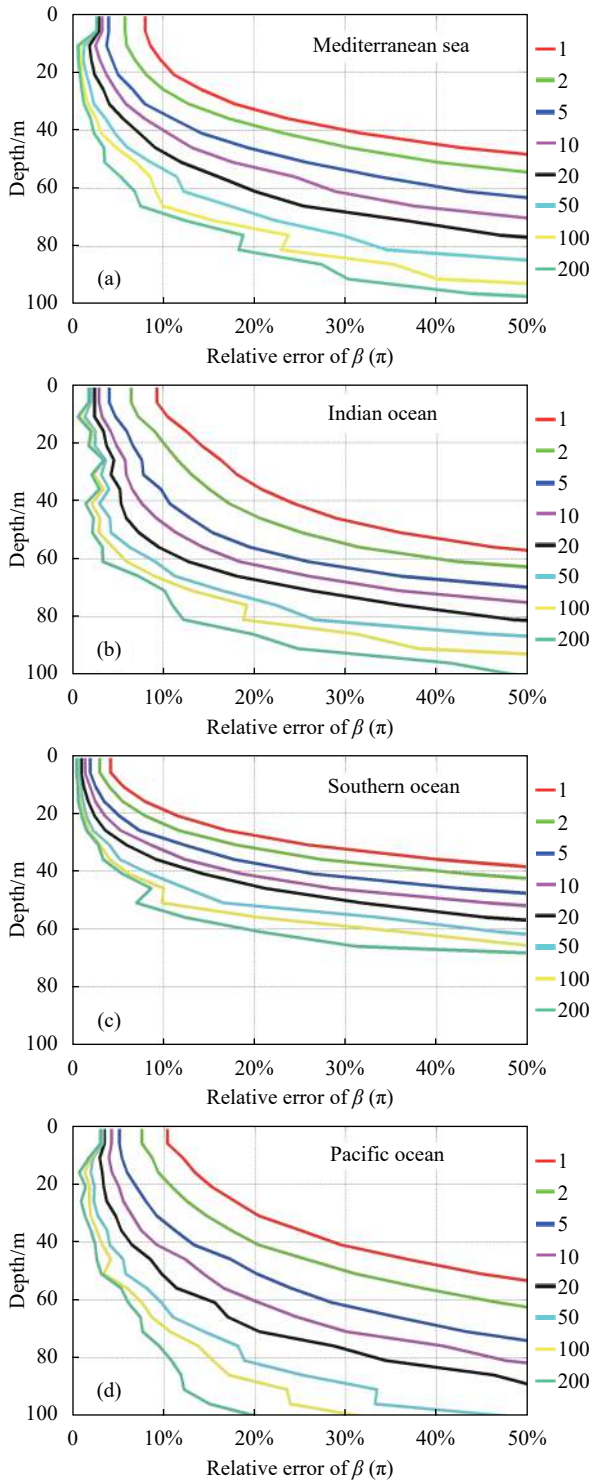


图 10 $\beta(\pi)$ 相对误差 (探测波长为 486.1 nm)

Fig.10 Relative error of retrieved $\beta(\pi)$ (detection wavelength is 486.1 nm)

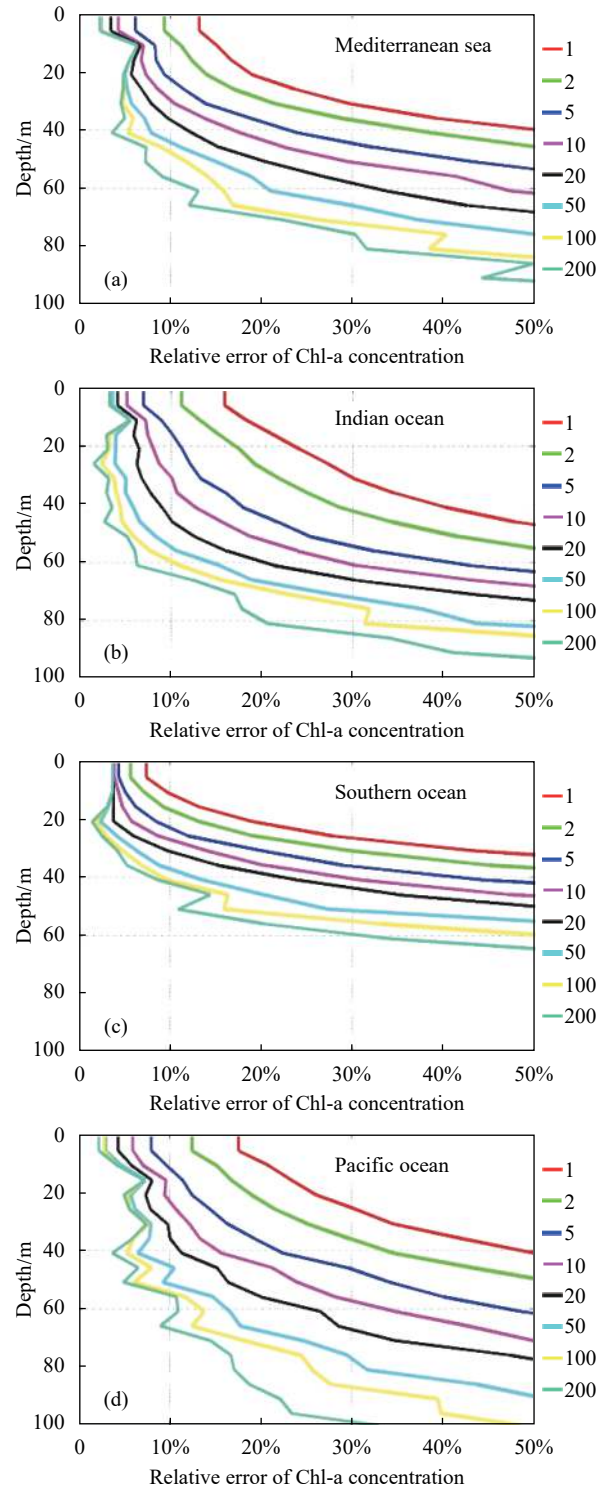


图 11 叶绿素 a 浓度相对误差 (探测波长为 486.1 nm)

Fig.11 Relative error of retrieved Chl-a concentration (detection wavelength is 486.1 nm)

形累加 10 次的最大水体叶绿素 a 浓度反演深度, 太平洋最深可达约 60 m, 波形累加 50 次的最大水体叶绿素 a 浓度反演深度约为 80 m; 地中海与印度洋反演

深度大致相同, 波形累加 50 次的最大水体叶绿素 a 浓度反演深度约为 65~70 m; 南大洋波形累加 50 次最深可达 50 m 左右。

5 总 结

文中结合激光雷达方程、蒙特卡罗仿真结果与给定的激光雷达参数,开发了一种激光雷达回波信号仿真模拟系统,介绍了总体仿真流程、各个模块的计算方法与使用的公式、数据等。

正向仿真模块基于激光雷达方程与 Argo 2009~2019 年全球叶绿素 a 剖面数据,计算星载激光雷达回波光光子数、采集光子计数值与信噪比剖面。给出不同海区在 486.1 nm、443 nm、532 nm 三个典型波长下的回波光光子数,结果表明太平洋海域单光子探测深度最深,约为 120 m。数据反演模块与误差分析模块进行 $\beta(\pi)$ 、叶绿素 a 浓度等水体光学参数剖面反演并进行误差分析。

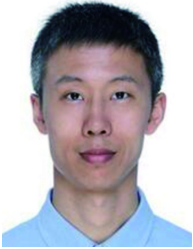
文中的仿真模拟研究分析了不同水体参数下的星载海洋激光雷达回波信号,并进行了探测能力评估和测量精度分析,对星载海洋激光雷达的指标论证和探测性能分析提供理论支持。

参考文献:

- [1] McClain C R, Charles R. A decade of satellite ocean color observations [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1(1): 19-42.
- [2] Wang M, Shi W. The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing [J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 15722-15733.
- [3] Lee Z, Shang S, Wang Y, et al. Nature of optical products inverted semianalytically from remote sensing reflectance of stratified waters [J]. *Limnology & Oceanography*, 2020(65): 387-400.
- [4] Hostetler C A, Behrenfeld M J, Hu Y, et al. Spaceborne lidar in the study of marine systems [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2018, 10(1): 121-147.
- [5] Hu Y, Stamnes K, Vaughan M, et al. CALIPSO Global ocean surface roughness and wind speed measurements and potential application[C]//The 89th Annual AMS Meeting, 2009.
- [6] Behrenfeld M J, Hu Y, O'Malley, et al. Annual boom-bust cycles of polar phytoplankton biomass revealed by space-based lidar [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 10(2): 118-122.
- [7] Churnside J H, Hair J W, Hostetler C A, et al. Ocean backscatter profiling using high-spectral-resolution lidar and a perturbation retrieval [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10: 2003.
- [8] Lu X, Hu Y, Trepte C, et al. Ocean subsurface studies with the CALIPSO spaceborne lidar [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4305-4317.
- [9] Behrenfeld M J, Hu Y, Hostetler C A, et al. Space-based lidar measurements of global ocean carbon stocks [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16): 4355-4360.
- [10] Lee Z, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(27): 6329.
- [11] Robin M P, Edward S F. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. integrating cavity measurements [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8710-8723.
- [12] Bricaud A, André M, Babin M, et al. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1998, 103(C13): 31033-31044.
- [13] Gordon H R, Morel A Y. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: A review[M]//Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [14] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters[R]. San Diego: Scripps Inst Oceanogr, 1972.
- [15] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color [J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(4): 709-722.
- [16] Kong Xiaojuan. Monte Carlo simulation of ocean optical property measurements with oceanographic lidar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2019.
孔晓娟. 海洋激光雷达测量海洋光学参数的仿真模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2019.
- [17] Kattawar G W, Plass G N. Time of flight lidar measurements as an ocean probe [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 662-666.
- [18] Lee Z-P, Darecki M, Carder K L, et al. Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C2): C02017.
- [19] Liu Bingyi, Li Ruiqi, Yang Qian, et al. Estimation of global detection depth of spaceborne oceanographic lidar in blue-green spectral region [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0106006. (in Chinese)
刘秉义, 李瑞琦, 杨倩, 等. 蓝绿光星载海洋激光雷达全球探测深度估算[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0106006.



第一作者简介：朱培志 (1994-), 男, 硕士生, 研究方向为海洋激光雷达探测与软件模拟的研究, 主要从事船载、机载与星载等多平台海洋激光雷达硬件系统实验与数据仿真反演研究。
Email: zhupeizhi@hotmail.com



导师简介：刘秉义 (1980-), 男, 副教授, 博士。主要研究包括大气和海洋激光雷达软硬件研发、系统仿真模拟、反演算法研究。Applied Optics、Remote Sensing Environment 杂志审稿人。在期刊 Applied Optics 等发表 SCI 论文 15 篇, EI 论文 8 篇, 专利 6 项。主持国家自然科学基金 1 项, 国家重点研发计划课题 1 项, 参与国防科工局××项目 1 项。获青岛市技术发明奖一等奖 (第 3 位)。Email: liubingyi@ouc.edu.cn