

基于 Argo 数据和 MODIS 数据的海水漫射衰减系数的垂直廓线研究

马春波, 郭允侠, 敖 珩

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:叶绿素浓度是反映海水营养状况的重要参数,光谱漫射衰减系数是反映水中表观光学特性的参数,且这两个参数之间关系密切。光谱漫射衰减系数的垂直分布反映了垂直方向的光衰减特性,对水下激光通信的信道特性研究具有重要意义。本文根据现有的 MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) 数据建立的叶绿素浓度垂直分布模型和单参数(叶绿素浓度)的光谱漫射衰减系数模型,提出了一种新的垂直方向的衰减模型,并建立了位于第二岛链日本附近海域的漫射衰减系数垂直分布。该分布与实际测量的关于叶绿素浓度垂直分布的 Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 数据并结合单参数的光谱漫射衰减系数模型所建立的漫射衰减系数垂直分布进行比较,其结果大致相同,验证了该模型的可行性。此外还对不同叶绿素浓度下的漫射衰减系数光谱进行了分析,结果表明浑浊海域采用绿色波段和清澈海域采用蓝色波段得到的衰减系数值最小。对比 Argo 数据,MODIS 数据实时性更高且更容易获得,因此本文提出的垂直分布的衰减模型应用更方便。

关键词:信道特性;叶绿素浓度;漫射衰减系数;垂直分布

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.06.024

Study on vertical profile of diffuse attenuation coefficient of seawater based on Argo data and MODIS data

MA Chun-bo, GUO Yun-xia, AO Jun

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: the concentration of chlorophyll is an important parameter to reflect the nutritional status of seawater, and the attenuation coefficient of spectral diffusion is a parameter to reflect the apparent optical properties of water, and the relationship between the two parameters is close. The vertical distribution of spectral diffused attenuation coefficient reflects the optical attenuation characteristics in the vertical direction, so it is of great significance to study the channel characteristics of underwater laser communication. In this paper, a new vertical attenuation model is proposed based on the existing vertical attenuation model of chlorophyll concentration established by MODIS data and the single-parameter (chlorophyll concentration) model of spectral diffuse attenuation coefficient. This distribution is compared with the diffuse attenuation coefficient vertical distribution established by the actual measured Argo data about the vertical distribution of chlorophyll concentration and the single-parameter spectral diffuse attenuation coefficient model. The results are roughly the same, which verify the feasibility of this model. In addition, the diffuse attenuation coefficient spectrum of different chlorophyll concentrations are analyzed, and the results show that the obtained attenuation coefficient is the minimum when green band is used in the turbidity sea and blue band is used in the clear sea. Compared with Argo data, MODIS data is more real-time and easy to obtain, so the attenuation model of vertical distribution proposed in this paper is more convenient to apply.

Key words: channel characteristics; chlorophyll concentration; diffuse attenuation coefficient; vertical distribution

基金项目:广西自然科学基金项目(No. 2018JJA170092)资助。

作者简介:马春波(1975-),男,博士,教授,主要研究方向为光通信技术、通信系统安全技术等。

通信作者:敖珩(1978-),女,博士,教授,主要研究方向信号处理,纠错编码,光通信技术等。

收稿日期:2018-11-28; **修订日期:**2018-12-26

1 引言

海水中的叶绿素成分对激光的吸收和散射效应极大,因此叶绿素浓度在海水信道特性研究中占据重要的地位^[1]。1989年,Morel等人^[2]对分布于全球的3806个色素浓度剖面进行分析,并建立了针对分层水的色素垂直分布模型,但并未对海水的光学特性做进一步研究。同样地,Johnson等人^[3]对2419个独立的叶绿素浓度剖面进行分析,并结合Haltrin提出的单参数衰减模型^[4],建立了基于单参数的海水衰减系数的垂直分布模型,但Morel等人采用的叶绿素浓度剖面数量比Johnson等人采用的剖面数量多,且剖面分布比较广泛,因此Morel等人建立的垂直分布模型更可靠。2001年,Morel指出在I类海水中采用单参量(叶绿素浓度)研究光学特性是可行的^[5],并在之

前研究^[6]的基础上对表观光学特性进行重新分析和评估。大多数的海水衰减模型仅能反映表层状况^[7-8],并不能反映垂直方向的信道特性。2017年,赵文静等人^[9]分别采用算法Muller^[10],Werdell^[11],Morel^[5],Lee^[12]和MODIS业务化算法KD2M计算南海海域的表层漫射衰减系数 $K_d(490)$,结果表明Morel算法最优。目前,对于海水垂直方向的衰减特性的研究非常少,因此本文所研究的垂直衰减模型对信道特性的研究具有重要意义。

2 海水的垂直衰减模型

利用卫星获取的数据仅能得到海水表层的衰减情况,而本文所建立的海水垂直衰减模型反映了可见光上行通信的信道衰减特性,为光通信系统的设计提供了重要的参考。

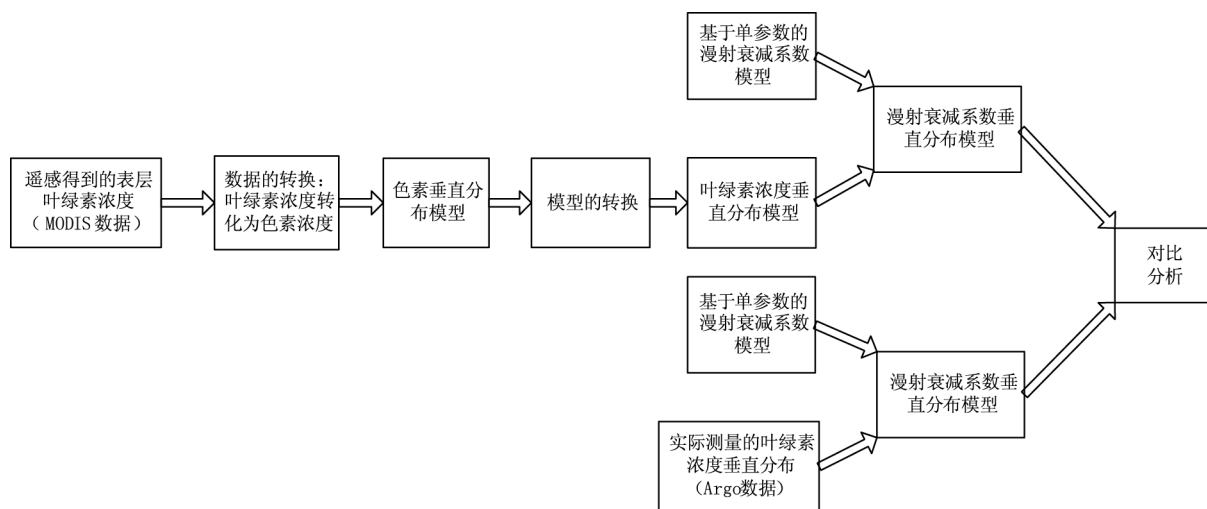


图1 利用MODIS数据和Argo数据建立海水垂直衰减模型的框图

Fig. 1 The block diagram of the vertical attenuation model of seawater established by MODIS data and Argo data

本文利用MODIS数据和Argo数据所建立的漫射衰减系数垂直分布模型框图如图1所示,首先利用遥感技术获得海域中某点的表层叶绿素浓度,然后参考文献[2]中表3将该数据转化为色素浓度,将色素浓度值代入色素垂直分布模型得到该点位置垂直方向的色素分布,根据同样的数据转换关系(参考文献[2]中表3),可得到该位置的叶绿素浓度垂直分布,将该垂直分布代入基于单参数(叶绿素浓度)的漫射衰减系数的模型,即得该位置漫射衰减系数的垂直分布。除此之外,通过实际测量的方式也可以获得海域中该点的叶绿素浓度垂直分布,并代入基于单参数的漫射衰减系数模型,同样可以得到该位置的垂直衰减情况。两种方式得到的垂

直衰减进行对比分析,结果大致相同。具体的分析过程如下所述。

2.1 叶绿素浓度垂直分布模型

Morel等人采用广义高斯剖面建立了针对分层水中叶绿素垂直分布的参数化模型,该模型限制在 $0 \sim 1.5 Z_e$ 和 $0.02 < \bar{C}_{pd} < 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 条件下,其中 Z_e 为透光层的深度, $\bar{C}_{pd}$ 表示某一剖面的表层平均色素浓度。其表达式如下:

$$C(\zeta)/\bar{C}_{Z_e} = C_b + C_{\max} \exp\{-[(\zeta - \zeta_{\max})/\Delta\zeta]^2\} \quad (1)$$

其中,

$$C_b = 0.768 + 0.087 \log c - 0.179 (\log c)^2 - 0.025 (\log c)^3 \quad (2)$$

$$C_{\max} = 0.299 - 0.289 \log c + 0.579 (\log c)^2 \quad (3)$$

$$\zeta_{\max} = 0.600 - 0.640 \log c + 0.021 (\log c)^2 + 0.115 (\log c)^3 \quad (4)$$

$$\Delta \zeta = 0.710 + 0.159 \log c + 0.021 (\log c)^2 \quad (5)$$

式中, c 代表 $\bar{C}_{pd}$; $C_{\max}$ 表示垂直方向的浓度最大值; $\log$ 是以 10 为底的对数; 归一化深度 $\zeta = Z/Z_e$; $\zeta_{\max}$ 表示归一化浓度 $C(\zeta)/\bar{C}_{Z_e}$ 最大值对应的归一化深度值; $\bar{C}_{Z_e}$ 为透光层中平均色素浓度。将公式(2)~(5)代入公式(1), 得到归一化的浓度 $C(\zeta)/\bar{C}_{Z_e}$ 随归一化深度 Z/Z_e 变化的表达式。同时, 将参考文献[2]中表3的第四行的统计值(Avg($\bar{C}_{pd}$))表示该类中所有剖面的 $\bar{C}_{pd}$ 值取平均)分别代入公式(1), 就得到每类的归一化的浓度随归一化深度变化的典型表达式, 对应的仿真如图2所示。

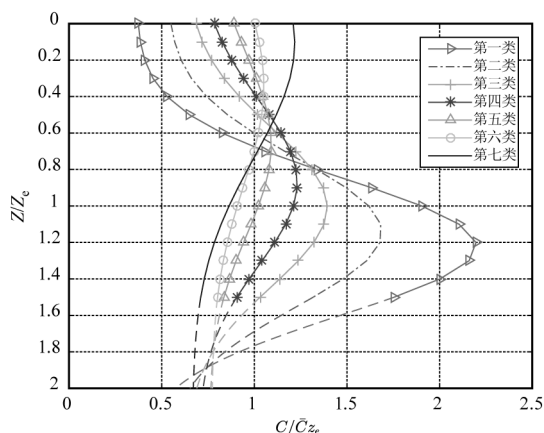


图2 归一化色素浓度随归一化深度的变化(虚线表示无效值)

Fig. 2 Change of normalized pigment concentration with normalized depth (dashed lines indicate invalid value)

由图2可得, 色素浓度剖面的归一化浓度最大值和表层色素浓度有关。当表层色素浓度逐渐增大时, 归一化浓度的最大值所对应的归一化深度逐渐减小直至为0(即位于水面), 最终导致曲线呈单调下降的趋势。同样的, 每条曲线的幅值也随着表层叶绿素浓度的增大而减小。在 $Z/Z_e = 1/2$ 附近存在一个特殊点, 无论表层色素浓度如何, 该处浓度 C 趋于透光层内平均色素浓度 $\bar{C}_{Z_e}$ 。

由于图2的横纵坐标都是归一化的参量, 因此在实际应用中, 需要求出 Z_e 和 $\bar{C}_{Z_e}$, 从而得到色素浓度 $C(Z)$ 随深度 Z 的变化。遥感技术可以获得海水表面的平均叶绿素浓度 $\overline{\text{Chl}}_{pd}$, 参考文献[2]中表3的第一行和第十四行确定其属于哪一类剖面, 进而

确定 ρ 值, 然后根据该类型的比值关系即 $\rho = \overline{\text{Chl}}_{pd}/\bar{C}_{pd}$, 可得到表层平均色素浓度 $\bar{C}_{pd}$ 。将表层平均色素浓度代入公式(6)或(7)得到透光层中总的色素浓度 $\langle C \rangle_{\text{tot}}$, 最后根据总的色素浓度大小带入公式(8)或(9)求出透光层深度 Z_e , 计算公式如下:

$$\langle C \rangle_{\text{tot}} = 38.0 \bar{C}_{pd}^{0.425}, \bar{C}_{pd} \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6)$$

$$\langle C \rangle_{\text{tot}} = 40.2 \bar{C}_{pd}^{0.507}, \bar{C}_{pd} > 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (7)$$

$$Z_e = 568.2 \langle C \rangle_{\text{tot}}^{-0.746}, \langle C \rangle_{\text{tot}} > 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \quad (8)$$

$$Z_e = 200.0 \langle C \rangle_{\text{tot}}^{-0.293}, \langle C \rangle_{\text{tot}} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \quad (9)$$

又因为 $\bar{C}_{Z_e}$ 和 $\bar{C}_{pd}$ 存在如下经验关系:

$$\bar{C}_{Z_e} = 1.12 \bar{C}_{pd}^{0.803} \quad (10)$$

即求得透光层内平均色素浓度。

将 Z_e 和 $\bar{C}_{Z_e}$ 代入公式(1), 即得到色素垂直分布模型, 并利用叶绿素和色素的比值关系对色素垂直分布模型进行转换, 最终得到叶绿素垂直分布模型。需要注意的是, 这种比值为常数的关系仅限于 $0 \sim Z_e$, 所以垂直分布模型也仅限于透光层深度内成立。

2.2 基于单参数(叶绿素浓度)的漫射衰减系数建模

文献[5]对一类海水中的表观光学特性(AOPs)进行了重新研究, 并修正了与叶绿素浓度相关的统计关系, 即在原有数据的基础上引入了小于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的低浓度叶绿素数据, 从而提高了数据拟合的相关性, 且在新、旧数据共同作用的基础上对漫射衰减系数 $K_d(\lambda)$ 的建模进行了修正。

假设 $K_d(\lambda)$ 是 $K_w(\lambda)$ 和 $K_{\text{bio}}(\lambda)$ 的和, 即纯水的漫射衰减系数与所有生物成分的漫射衰减系数的总和:

$$K_d(\lambda) = K_w(\lambda) + K_{\text{bio}}(\lambda) \quad (11)$$

纯水的漫射衰减系数 $K_w(\lambda)$ 的近似表达:

$$K_w(\lambda) = a_w(\lambda) + \frac{1}{2} b_w(\lambda) \quad (12)$$

其中, a_w 和 b_w 表示纯水的吸收和散射系数。

所有生物成分的漫射衰减系数 $K_{\text{bio}}(\lambda)$ 可表示为:

$$K_{\text{bio}}(\lambda) = \chi(\lambda) (\text{Chl})^{e(\lambda)} \quad (13)$$

其中, (Chl) 表示叶绿素浓度; $\chi(\lambda)$ 是由波长决定的系数; $e(\lambda)$ 同样是由波长决定的指数。

2.3 海水垂直方向的衰减建模

由以上分析得, 公式(1)可转换为叶绿素浓度 Chl 随深度 Z 变化的关系, 即:

$$\frac{\overline{\text{Chl}}/\rho}{1.12 \times (\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho)^{0.803}} = 0.768 + 0.087 \log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho) - 0.179 (\log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho))^2 - 0.025 (\log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho))^3$$

$$+ [0.299 - 0.289 \log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho) + 0.579 (\log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho))^2] \times \exp$$

$$\left\{ - \left[\frac{Z/Z_e - (0.600 - 0.640 \log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho) + 0.021 (\log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho))^2 + 0.115 (\log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho))^3)}{0.710 + 0.159 \log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho) + 0.021 (\log(\overline{\text{Chl}}_{pd}/\rho))^2} \right]^2 \right\} \quad (14)$$

其中, ρ 的值取决于遥感测得的表层叶绿素浓度 $\overline{\text{Chl}}_{pd}$ 的大小, 且由于 ρ 取值的局限性, 公式(14)仅在小于透光层深度 Z_e 成立; 式中 Z_e 可由表层叶绿素浓度并结合公式(6)~(9)计算得到。

公式(11)表示漫射衰减系数随叶绿素浓度变化的关系。本文取 $\lambda = 530 \text{ nm}$, 并参考文献[5]中表2得, 系数 $\chi(530) = 0.04829$, 指数 $e(530) = 0.67224$, 纯水的漫射衰减系数 $K_w(530) = 0.04454 \text{ m}^{-1}$, 则有:

$$K_d(530) = 0.04454 + 0.04829 \times (\text{Chl})^{0.67224} \quad (15)$$

同理, 可得其他波长对应的漫射衰减系数表达式。

最后, 将公式(14)代入公式(15)可得到 530 nm 波长下的漫射衰减系数随深度变化的表达式, 即海水垂直衰减模型。

3 仿真结果及分析

Argo 数据是利用 Argo 浮标采集得到的, Argo 浮标在海面上漂移, 在运动的轨迹中选取若干点进行剖面测量。根据浮标的经纬度信息得知, 位于第二岛链的日本附近海域的浮标为浮标 2902749、浮标 2902748 以及后期投放的浮标 2902754, 依次记为 buoy1、buoy2 和 buoy3。截止 2018 年 10 月 31 日, 三个浮标依次测得的剖面总数为 29 个、39 个和 29 个。记 buoy1 剖面依次为 A1 ~ A29, 相应的表面叶绿素浓度的 MODIS 数据记为 M1 ~ M29; 同样, 记 buoy2 剖面依次为 B1 ~ B39, 相应的表面叶绿素浓度的 MODIS 数据记为 N1 ~ N39; 记 buoy3 剖面依次为 C1 ~ C29, 相应的表面叶绿素浓度的 MODIS 数据记为 P1 ~ P29。对应的原则是保证表层叶绿素浓度数据选取的位置和时间都尽可能与实测的剖面相近。由以上分析得, 共有 93 个叶绿素浓度的剖面 and 93 个对应的 MODIS 数据。

3.1 基于 Argo 和 MODIS 数据的蓝绿光海水漫射衰减系数分析

将若干个剖面(这里选取四个)为一组, 每组包含四个图, 即来源于 Argo 数据且深度 300 m 的叶绿素浓度的垂直分布图, 对应的深度为 300 m 的漫射

衰减系数的垂直分布图, 截取后(截取的深度为透光层深度)的漫射衰减系数垂直分布图, 以及来源于 MODIS 数据且深度为透光层深度的漫射衰减系数垂直分布图, 如图 3 ~ 图 6 所示。

本文仅以 B1 ~ B4 为例, 每个剖面的经纬度以及测量时间如表 1 所示, 根据表中位置和时间信息查找相应的表面叶绿素浓度的 MODIS 数据, 查找的数据、时间、经纬度及计算得到的透光层深度如表 2 所示。基于两种数据仿真的结果如图 3 ~ 图 6 所示。需要注意的是, 由于 ρ 取值的局限性, 所以利用 MODIS 数据进行叶绿素垂直建模和漫射衰减系数垂直建模时, 其深度限制在透光层内, 如图 6 所示。

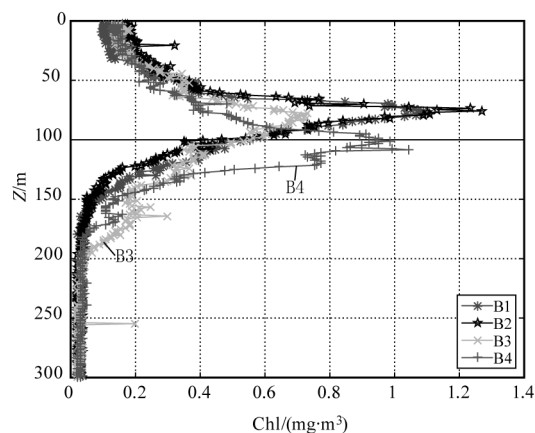


图3 B1 ~ B4 叶绿素浓度的垂直分布
Fig. 3 The vertical distribution of chlorophyll concentration of B1 ~ B4

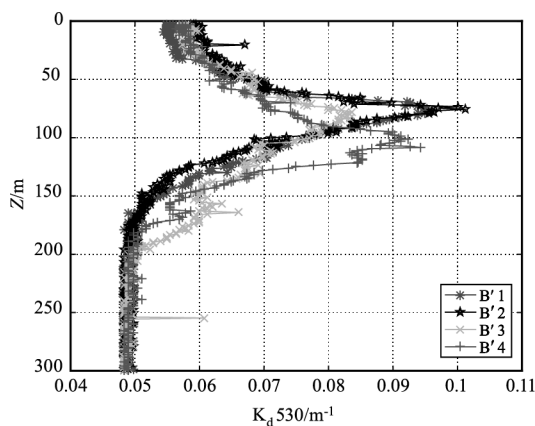


图4 B'1 ~ B'4 漫射衰减系数的垂直分布

Fig. 4 The vertical distribution of diffuse attenuation coefficients of B'1 ~ B'4

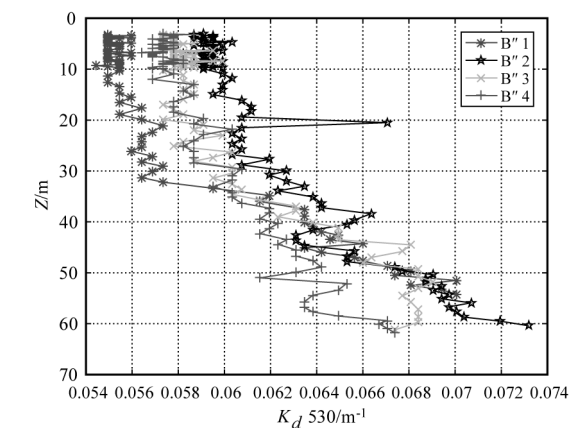


图5 B''1 ~ B''4 截取后的漫射衰减系数垂直分布
Fig. 5 Vertical distribution of diffuse attenuation coefficient after interception of B''1 ~ B''4

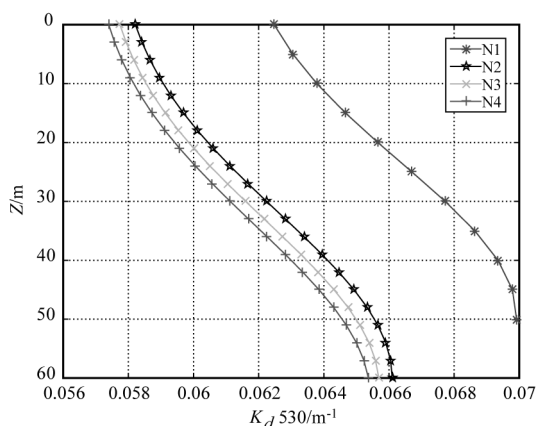


图6 N1 ~ N4 漫射衰减系数的垂直分布
Fig. 6 The vertical distribution of diffuse attenuation coefficients of N1 ~ N4

表1 B1 ~ B4 的经纬度及测量时间
Tab. 1 Longitude and latitude and measurement time of B1 ~ B4

剖面	纬度(°N)	经度(°E)	时间
B1	33.963	147.843	2018.05.31
B2	34.011	147.814	2018.06.01
B3	34.041	147.794	2018.06.02
B4	34.048	147.759	2048.06.03

表2 N1 ~ N4 的 MODIS 数据及相关信息
Tab. 2 MODIS data and related information of N1 ~ N4

剖面	表层叶绿素浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纬度 (°N)	经度 (°E)	时间	透光层 深度/m
N1	0.215	33.967	147.849	2018.05.06	54.27
N2	0.146	34.017	147.814	2018.06.08	60.48
N3	0.139	34.054	147.807	2018.06.08	
N4	0.134	34.048	147.762	2018.06.08	62.15

由图3得,叶绿素浓度在垂直分布中存在最大值,最大值对应的深度为70 m左右,其中曲线(B4)比较特殊,其最大值对应的深度在100 m左右;当深度大于200 m时,叶绿素浓度逐渐趋于0,但曲线(B3)在250 m左右存在一个特殊点,该点可能是测量的误差或由于该位置特殊性导致的。除此之外,由于漫射衰减系数仅与叶绿素浓度相关,所以图3和图4的变化趋势是一致的。图6是由MODIS数据建立的衰减,由于曲线(N1)对应的表层叶绿素浓度值最大,所以其衰减系数值最大;其他三条曲线的表层叶绿素浓度相差不大(约 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),所以三条垂直衰减系数曲线的取值和趋势变化几乎相同。为了和MODIS数据建立的漫射衰减系数垂直分布进行对比,截取透光层深度的由Argo数据建立的漫射衰减系数垂直分布(如图5所示),对比结果表明基于两种数据建立的漫射衰减系数垂直分布曲线在趋势上大致相同,在取值上都位于同一个量级内,验证了海水垂直衰减模型的可靠性。

其他分组仿真的结果与该组结果相似,这为本文建立的模型提供了更有力的证明。由于实际测量的随机性和测量结果的误差,选取的MODIS数据时位置和时间的误差以及叶绿素垂直模型中采用的剖面数量不足等问题,所以两种数据建立的垂直分布并不是完全一致的。

3.2 不同叶绿素浓度下的漫射衰减系数光谱对比和分析

海水对于不同波长光的衰减有很大的差别,其中蓝绿波段的光衰减最小,穿透海水的深度最大,因此,在利用可见光对海洋进行探测时,一般选择蓝绿波段。本文接下来研究在一定的叶绿素浓度下,漫射衰减系数随波长的变化关系。

参考文献[2]中表3的第四行的统计值(即该类中所有剖面的表层平均色素浓度取平均)并结合第十四行的参数值(即叶绿素和色素的比值关系)得到修正后的表层平均叶绿素浓度,如下: $\text{Chl1} = 0.0268 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{Chl2} = 0.0626 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{Chl3} = 0.1372 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{Chl4} = 0.2502 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{Chl5} = 0.5537 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{Chl6} = 2.1046 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{Chl7} = 7.3370 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。将其代入公式(11)得到分层水中每种类型的统计平均色素浓度所对应的漫射衰减系数光谱,如图7所示。

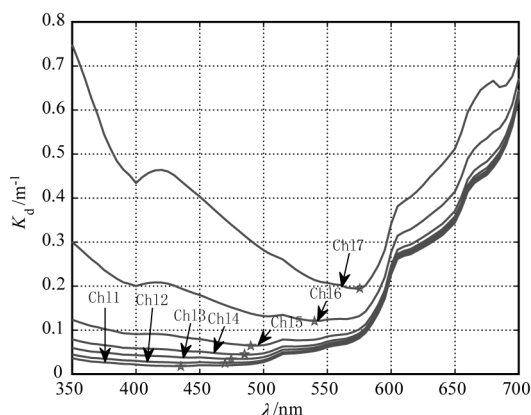


图7 不同叶绿素浓度下漫射衰减系数
随波长的变化(星号表示衰减最小值)

Fig. 7 Diffuse attenuation coefficient with wavelength under different chlorophyll concentrations (the asterisks represent the minimum)

叶绿素浓度可以反映该海域的营养情况,图7中曲线由下至上对应的叶绿素浓度依次为 Chl1 ~ Chl17,即叶绿素浓度逐渐增加,海域从清澈变为浑浊,对应的漫射衰减系数值也逐渐增加。除此之外,每条曲线都存在一个最小值点,该点表示衰减值最小,如图7中星号标记,对应坐标如表3所示,且随着叶绿素浓度的增加,最小值点从蓝色波段偏移到绿色波段。在浑浊海域(如近海岸),采用绿色波段进行无线光通信时信号的衰减程度比较小,如 Chl7对应的曲线所示;在清澈海域(如远海),采用蓝色波段进行光无线通信时信号衰减程度最小,如 Chl1对应的曲线所示。

表3 图7中星号对应的坐标

Tab. 3 The coordinates corresponding
to the asterisk in Fig. 7

Chl/(mg · m ⁻³)	min(K_d)/m ⁻¹	λ /nm
Chl1 = 0.0268	0.0180	435
Chl2 = 0.0626	0.0255	470
Chl3 = 0.1372	0.0344	475
Chl4 = 0.2502	0.0445	485
Chl5 = 0.5537	0.0648	490
Chl6 = 2.1046	0.1208	540
Chl7 = 7.3370	0.1938	575

综上,在水下无线光通信中通常采用蓝绿波段,因为该波段较其他波段的衰减比较小,接收到的信号质量比较高。

图8是以剖面B1为例,对不同波长下(350 ~ 700 nm之间,每间隔5 nm)的漫射衰减系数的垂直廓线进行仿真。由结果得,当波长大于约570 nm,

漫射衰减系数值随着波长的增加而增加,且在600 nm和650 nm附近增加的幅度最大;当波长小于约570 nm,漫射衰减系数随波长的不同而上下波动,但在400 nm和500 nm附近的衰减值最小;在波长350 nm至700 nm区间,蓝绿波段的衰减值最小,最大值的幅值比较大,即衰减系数值的动态变化范围比较大,但最大值所对应的深度以及曲线的变化趋势都不变。

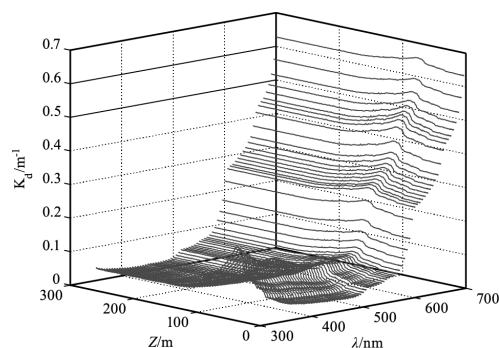


图8 漫射衰减系数光谱的垂直廓线图

Fig. 8 Vertical profile of the diffuse attenuation coefficient spectrum

4 总 结

发展水下激光通信在加强海洋科学研究和实施海洋科技战略上具有十分重要的意义,而水体对激光光束衰减特性的研究是该技术发展过程中非常关键的一环。MODIS 传感器提供的数据实时性比较高且覆盖面广,对海水表层光学研究提供了重要的数据来源。本文是利用现有的 MODIS 数据建立的叶绿素浓度垂直分布模型和单参数的漫射衰减系数模型,提出了一种新的海水垂直衰减模型,并验证了该模型是可行的。该垂直衰减模型是基于单参数所建立的,降低了对信道特性研究的复杂度,因此对推动水下激光通信技术的研究具有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] SMART J H. Underwater optical communications systems part 1: variability of water optical parameters [C]//Military Communications Conference. IEEE, 2005.
- [2] MOREL A, BERTHON J F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications [J]. Limnology and Oceanography, 1989, 34 (8): 1545 - 1562.
- [3] Johnson L J, Green R J, Leeson M S. Underwater optical

- wireless communications; depth dependent variations in attenuation [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (33): 7867 – 7873.
- [4] HALTRIN V I. Chlorophyll-based model of seawater optical properties [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (33): 6826 – 6832.
- [5] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106 (C4): 7163 – 7180.
- [6] Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters) [J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 1988, 93 (C9): 10749 – 10768.
- [7] ZHU Qiankun, HE Xianqiang, MAO Zhihua, et al. The remote sensing algorithm of spectral diffuse attenuation coefficient of ocean [C]// The 8th Symposium on Imaging Spectroscopy Technology and Applications and Interdisciplinary Forum, 2010. (in Chinese)
朱乾坤, 何贤强, 毛志华, 等. 水下光谱漫射衰减系数遥感反演 [C]// 第八届成像光谱技术与应用研讨会暨交叉学科论坛, 2010.
- [8] AO Jun, LIU Jingqiu, MA Chunbo. Inversion of seawater optical communication channel characteristics by using remote sensing data [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016 (12): 47 – 52. (in Chinese)
敖珺, 刘静秋, 马春波. 利用遥感数据反演海水光信道特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016 (12): 47 – 52.
- [9] ZHAO Wenjing, CAO Wenxi, HU Shuibo, et al. Comparison of diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance products derived from MODIS-Aqua in the South China Sea [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018 (1): 14 – 24. (in Chinese)
赵文静, 曹文熙, 胡水波, 等. MODIS-Aqua 漫射衰减产品 $K_d(490)$ 在南海海域的精度对比 [J]. *光学精密工程*, 2018 (1): 14 – 24.
- [10] Mueller J L. Sea WiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, $K(490)$, using water-leaving radiances at 490 and 555 nm [J]. *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses*, 2000, 3.
- [11] Werdell P J, Bailey S W. An improved in-situ bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98 (1): 122 – 140.
- [12] 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).