

利用遥感数据反演海水光信道特性

敖 珺 刘静秋* 马春波

桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004

摘要 激光通信是水下无线通信的新热点,准确评估海水中激光的传输衰减是信道研究的关键。综合现有的QAA-RGR (Quasi-Analytical Algorithm Red-Green-bands-Ratio) 遥感反演算法和国家卫星海洋应用服务(NSOAS)模型,提出了一种新的遥感反演算法,可直接通过中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据反演得到海水衰减系数光谱。结合MODIS模型提供的L2级数据,对比反演所得的吸收系数光谱和散射系数光谱,验证了反演算法的可行性。该反演算法对动态分析和把握我国沿海地区的海水光学特性具有重要意义。

关键词 光通信; 光衰减系数; 遥感反演算法

中图分类号 P733.3+1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.120102

Inversion of Seawater Optical Communication Channel Characteristics Based on Remote Sensing Data

Ao Jun Liu Jingqiu Ma Chunbo

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

Abstract Laser communication is a new hot spot in underwater wireless communication. It's the key in channel research to evaluate the laser transmission attenuation under seawater environment accurately. A new remote sensing inversion algorithm is proposed by synthesizing the existed QAA-RGR (Quasi-Analytical Algorithm Red-Green-Bands-Ratio) remote sensing inversion algorithm and the national satellite ocean application service (NSOAS) model, which can evaluate the attenuation coefficient spectra based on moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land bands data directly. Compared the absorption coefficient spectrum and scattering coefficient spectrum, which is estimated by inversion algorithm with MODIS L2 level data, the feasibility of the inversion algorithm is verified. It is important to analysis and understand the optical properties of seawater at coastal areas dynamically.

Key words optical communications; light attenuation coefficient; sensing inversion algorithm

OCIS codes 010.0280; 010.4450

1 引言

海洋的开发和利用是21世纪全球性的研究课题。人类水下活动日益频繁,有效的水下通信成为亟待解决的问题。传统长波通信传输距离远、但容量有限,蓝绿激光具有较强的海水穿透力,成为学者们关注的新焦点。分析海水对特定波长激光信号的衰减特性成为水下激光通信运用研究的关键环节。海洋世界广袤无垠,无法全部通过现场测量的方式获取各区域的激光海水传输特性,综合有限站位现场测量结果和卫星遥感数据的水色遥感反演是克服上述问题的唯一办法。

海水光学特性包括表观光学特性和固有光学特性。其中表观光学性质由光场和水中的成分共同决定,

收稿日期: 2016-07-23; **收到修改稿日期:** 2016-08-19; **网络出版日期:** 2016-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61167006)

作者简介: 敖珺(1978—),女,博士,教授,主要从事通信信号处理和信源信道编码方面的研究。

E-mail: junjunao1@263.net

* **通信联系人.** E-mail: 1274287827@qq.com

可由遥感等方法测量得到;固有光学量只与水中成分的分布及其吸收和散射等光学特性有关,代表着海水的固有光学性质,与光场无关,是决定海水中激光传输特征的根本因素。海洋光学测量方法多由表观光学特性导出固有光学特性,传统海洋遥感反演采用的是经验统计算法,借助回归分析手段建立海水光学特性光谱与水体组分浓度之间的关系,再估算海水的衰减、反射特性^[1-3]。这些方法误差较大,且只适用于一类水体的深海水域。大陆沿岸海域是典型的二类水体区域,水体光学特性复杂,需要研究适用的遥感反演算法以满足大陆沿岸海域水下光通信应用的需要。1996年, Lee等^[4]根据大量沿岸水和大洋水的实测数据建立了440 nm波段总吸收系数与遥感反射比的经验关系;2000年, He等^[5]等采用 Hydrolight 数值模拟方法建立了适合于中国东部海域的总吸收系数和遥感反射率统计模型。这两种处理方法缺乏基本的物理基础,不具有普遍适用性。目前最具代表性并得到广泛接受和应用的是半分析方法,它首先由遥感观测所得表观光学量反演固有光学量,再通过固有光学量与水体组分浓度之间的关系来实现水色产品的反演^[6]。2002年, Lee等^[7]基于生物光学模型,根据大量的大洋水和沿岸水实测数据,提出了利用遥感反射率反演固有光学量的算法——准分析算法(QAA)。与传统的经验算法相比, QAA 无需叶绿素吸收光谱等先验参数,且具有可移植性,已作为 SeaWiFS 传感器业务化算法之一被 SeaDAS 数据处理软件包采纳。2007年, 王文琦等^[8]选择南海和福建沿海水体,对比了 QAA 和 GSM(Garver-Siegel-Maritorena)两种主流版半分析方法反演水体吸收系数的适用性,利用区域实测数据集对 QAA 算法中的经验系数作了适当的改进,进一步提高了其在中国沿岸水体的实用性。2015年, Chen等^[9]基于大量的海洋实测数据完善了 QAA,得到了更适用于反演沿岸海水的固有光学量,被称为 QAA-RGR (Quasi-Analytical Algorithm Red-Green-bands-Ratio)算法。

QAA 反演算法能给出某区域海水的吸收系数和后向散射系数,但研究海洋光学传输特性还需要掌握其总的散射特性。很多学者对二类水体海水散射系数与后向散射数据之间的拟合关系模型进行了仔细的研究,常用的有 Petzold 提出的 Haltrin 模型^[10]与宋庆军等提出的 NSOAS 模型^[11]。航测实验结果表明,对我国沿海海域而言,后者准确性更高。

本文基于经典的 QAA-RGR 算法,利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据反演得到总吸收系数和后向散射系数,再结合 NSOAS 模型,建立遥感反射率与光衰减系数之间的联系,实现基于 MODIS 数据的二类水体光学传输特性反演。

2 MODIS 数据与光学遥感反演

MODIS 传感器是美国宇航局(NASA)发射的 Terra 和 Aqua 极轨环境卫星上新一代“图谱合一”的光学仪器,有 36 个光谱通道(波段),对海洋探测主要用 405~877 nm 波段,基本用于探测海洋颜色、水体表层性质、生物化学特征等^[12]。本文反演所用数据主要是为 555,645,531 nm 波段的遥感数据。

相对其他遥感数据,MODIS 数据具有全球免费、光谱范围广、数据接收简单、更新频率高等优点,文献^[12]给出了 MODIS 数据 L0~L4 等 4 级数据产品之间的关系。其中,L0 是原始数据包,包含大气、云层、海水等多种原始信息;L1 级数据由 L0 级数据进行时间和地理位置配准,并添加数据注解得到,包含了各个波段的遥感反射率以及叶绿素浓度等数据。L2~L4 数据则是对 L1 数据进行各种应用处理之后所生成的特定应用数据产品,L2 级数据与 L1 级数据具有相同的空间分辨率和地理覆盖范围,包含叶绿素浓度、吸收系数和后向散射系数等数据,其中吸收系数和后向散射系数是通过 QAAv5 算法反演所得,文献^[9]将 QAAv5 算法的反演结果与航测数据进行了对比,其相对误差为 22.9%。

3 基于 QAA-RGR 算法的海水固有光学特性反演

文献^[13]给出了计算水表面下遥感发射率的公式:

$$r_{rs}(\lambda) = R_{rs}(\lambda) / [0.52 + 1.7R_{rs}(\lambda)], \quad (1)$$

式中 $R_{rs}(\lambda)$ 为传感器接收到的遥感反射率, $r_{rs}(\lambda)$ 为刚好在水表下的遥感反射率,两者波长均为 λ 。基于生物光学模型,可以建立遥感反射率与固有光学量之间的关系式:

$$r_{rs}(\lambda) = g_0 u(\lambda) + g_1 |u(\lambda)|^2, \quad (2)$$

式中 $u(\lambda)$ 可表示为

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (3)$$

其中 $a(\lambda)$ 是吸收系数, $b_b(\lambda)$ 是后向散射系数, g_0 和 g_1 是经验常数, 与文献[7]中的一致, 本文取 $g_0 = 0.089$ 。借助 IOCCG 数据集拟合分析方法, Chen 等^[9] 发现总吸收系数 $a(555)$ 可以通过 645 nm 和 555 nm 两个波段的遥感反射比 $[R_{rs}(645)/R_{rs}(555)]$ 估算得出:

$$a(555) = 0.0596 + 0.52 [R_{rs}(645)/R_{rs}(555)]^{1.432} - 0.04782. \quad (4)$$

将 MODIS 的 555 nm 波段遥感数据代入(1)式计算得出 555 nm 波段的水下遥感反射率 $r_{rs}(555)$, 进一步就可得到 $u(555)$, 结合(4)式得出总吸收系数 $a(555)$ 。后向散射系数 $b_b(555)$ 则通过将总吸收系数 $a(555)$ 代入(3)式反演得出。

由(5)式, 可通过 555 nm 波段的后向散射系数计算出所有光谱的后向散射系数光谱:

$$b_b(\lambda) = b_b(555) \left(\frac{555}{\lambda} \right)^Y, \quad (5)$$

式中 Y 表征后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 的光谱分布, 与 555 nm 波段后向散射存在如下的经验关系:

$$Y = \begin{cases} 0.08687 \times [\lg b_b(555)]^2 + 1.4451 \lg b_b(555) + 0.6057, & b_b(555) > 0.03 \\ 0.4, & b_b(555) > 0.03^\circ \end{cases} \quad (6)$$

借助(5)~(6)式, 便可以通过 555 nm 波段的后向散射系数得到后向散射光谱 $b_b(\lambda)$ 。如果其他波段的遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 已知, 还可以通过(7)式反演出总吸收系数光谱:

$$a(\lambda) = \frac{[1 - u(\lambda)][b_b(\lambda)]}{u(\lambda)}. \quad (7)$$

4 基于 QAA-RGR 算法的衰减系数反演

反演海水中激光传输衰减特性, 不但要了解海水的吸收特性, 还要了解其对激光的散射特征。海水激光散射分为后向散射和前向散射, 前者远小于后者。而 QAA 反演得到的只是海水的后向散射系数光谱, 不能直接反演出其散射系数光谱, 因此上述反演过程还不是激光传输衰减反演的全过程。

2006 年, 宋庆军等^[11] 通过航站定点测量方式对多个海区的水体固有光学量测量数据进行分析, 拟合得出了后向散射系数光谱 $b_b(\lambda)$ 与散射系数光谱 $b(\lambda)$ 的关系:

$$b_b(\lambda) = 0.0142 \times b(\lambda)^{1.323}. \quad (8)$$

这一关系式是通过黄海和东海海域的散射系数数据拟合而得出的, 称为 NSOAS 模型。关系式中的系数 0.0142 与仪器 HS6 数据校正所得的系数接近。宋庆军等^[11] 将黄海、东海海区秋季仪器 AC9 实验测得的表层散射系数分别代入 Haltrin 模型与 NSOAS 模型, 将其结果与同航次相应站位的后向散射系数进行比较, 结果表明, NSOAS 模型反演出的数据更接近航测数据值; 此外, 用 NSOAS 模型反演得到的后向散射系数计算得出海水的叶绿素浓度和悬浮物浓度, 其反演结果与航测数据也相差无几。上述情况表明, NSOAS 模型适用于二类水体中固有光学量的反演。

将 QAA-RGR 算法与 NSOAS 模型结合, 就可以通过 MODIS 数据反演得出总吸收系数光谱 $a(\lambda)$ 和后向散射系数光谱 $b_b(\lambda)$, 并进一步推算出总光衰减特性, 具体步骤如下:

- 1) 将 555 nm 波段的遥感数据代入(1)~(3)式中, 求解得到 $r_{rs}(555)$ 、 $u(555)$;
- 2) 将 645 nm 和 555 nm 两个波段的遥感反射比 $[R_{rs}(645)/R_{rs}(555)]$ 代入(4)式得出 $a(555)$, 再联合 $u(555)$ 计算得出 $b_b(555)$;
- 3) 将所求 555 nm 波段的后向散射系数 $b_b(555)$ 代入(5)~(6)式, 计算得出后向散射系数光谱 $b_b(\lambda)$;
- 4) 将后向散射系数光谱 $b_b(\lambda)$ 代入(7)式得到吸收系数光谱 $a(\lambda)$;
- 5) 将后向散射光谱 $b_b(\lambda)$ 代入(9)式, 求得总散射系数光谱 $b(\lambda)$;
- 6) 计算光衰减系数光谱 $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ 。

5 仿真结果及分析

5.1 反演结果与 L2 数据对比

选择 2016 年 3 月 16 日台湾海峡的 MODIS L1A 数据,利用 QAA-RGR 算法反演得到台湾海峡总的吸收系数分布图,如图 1(a)所示。台湾海峡的吸收系数 $a(531)$ 的取值范围为 $[0, 0.2 \text{ m}^{-1}]$,其平均取值为 0.036 m^{-1} ;图 1(b)则为同一时间 MODIS 数据提供的台湾海峡的总吸收系数,其数值分布均匀,且平均取值为 0.0464 m^{-1} 。对比两幅图可以看出,反演得到的吸收系数分布与 MODIS 提供的数据吻合,反演所得的吸收系数比 MODIS 提供的数据小,两者之间的平均绝对误差值为 22.1% ,基本吻合。

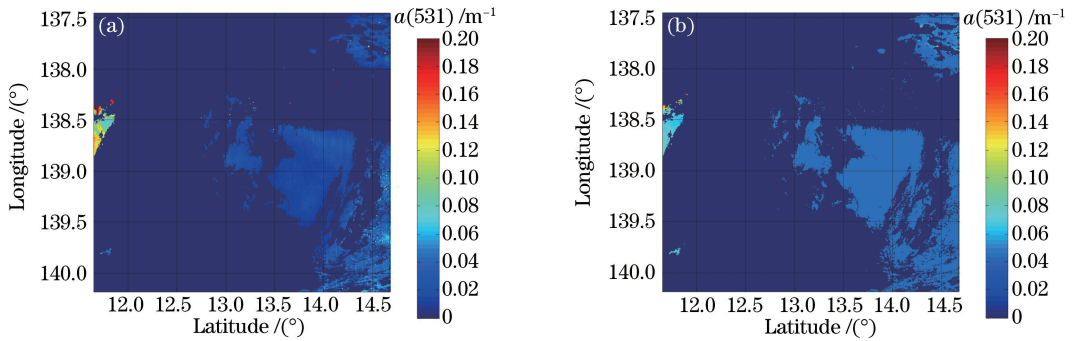


图 1 台湾海峡总吸收系数。(a)反演所得吸收系数图;(b)MODIS 提供的吸收数据图

Fig. 1 Total absorption coefficients in Taiwan Strait. (a) Absorption coefficient by inversion algorithm; (b) absorption coefficient provided by the MODIS data

图 2(a)、(b)分别为文中算法反演和 MODIS 提供的两种后向散射系数。可以看出,反演得出的后向散射系数的变化趋势与 MODIS 提供的数据相吻合,两者取值范围均为 $[0, 0.006 \text{ m}^{-1}]$ 。反演所得的后向散射系数均值为 0.025 m^{-1} ,MODIS 数据提供的均值为 0.029 m^{-1} ,符合程度很高。QAA-RGR 算法的结果比 MODIS 数据提供的结果小 13.79% ,与 Chen 等^[9]的结论一致。

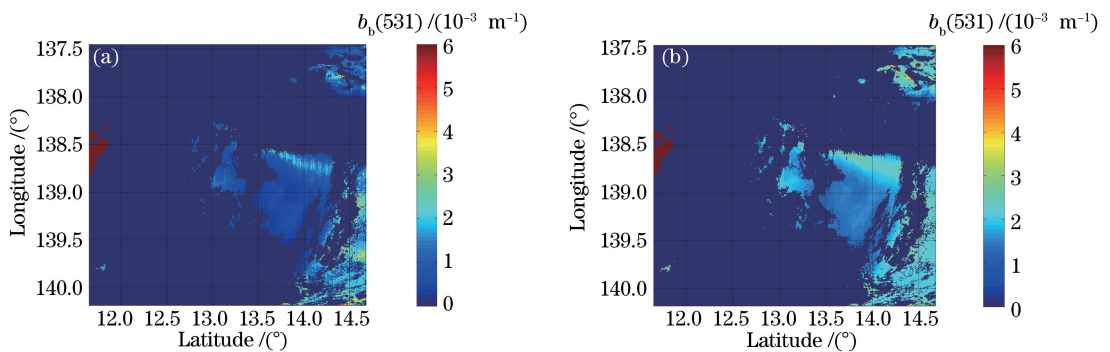


图 2 台湾海峡后向散射系数。(a)反演所得后向散射系数;(b)MODIS 提供的后向散射系数

Fig. 2 Back scattering coefficients in Taiwan Strait. (a) Back scattering coefficient by inversion algorithm; (b) back scattering coefficient provided by the MODIS data

5.2 反演结果分析

基于 NSOAS 模型的准确性,以本文的算法为基础,对 MODIS 提供的 L2 数据进行反演,得出我大陆沿岸地区的激光传输总衰减系数。以台湾海峡为例,反演结果如图 3 所示。台湾海峡的遥感最大深度为 60 m ,属于浅岸海水,其光衰减系数最高达到 0.5 m^{-1} ,并且最大值点出现在沿岸海域,这是因为近岸海域海水较为浑浊,激光传输过程中损耗大;而远海海域的海水较为清澈,其光衰减系数取值范围为 $[0.05 \text{ m}^{-1}, 0.1 \text{ m}^{-1}]$,远小于沿岸海水水体的取值。台湾海峡的反演结果表明,在这个区域使用激光通信将面临更大挑战,需要增加光通信系统发射功率,或设法提升接收设备的灵敏度。

统观图 3 全局可以看出整个台湾海峡的光衰减系数的分布特性。自台湾海峡沿海处到远海处,光衰减系数逐渐减小;台湾海峡东南部以及中部光学衰减系数相对其他海域较小,且这片海域的光衰减系数取值分

布均匀。本文处理得到的海水衰减系数分布特性与文献[14]的实测结果相符合,间接验证了本文算法的可行性。

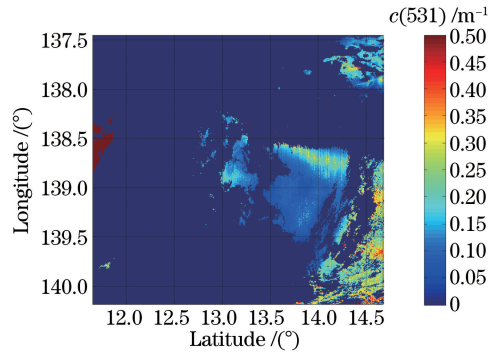


图3 台湾海峡光衰减系数

Fig. 3 Light attenuation coefficient in Taiwan Strait

6 结 论

无论是军事运用还是一般的经济活动,高效的水下激光通信均具有非常高的实用价值。MODIS 传感器提供的数据覆盖面广、获取方便、更新迅速,是了解各海区固有光学特性的重要手段。本文所提出的算法能够直接由 MODIS 传感器提供的数据解算得到各海区激光的传输衰减特性,并动态监测其变化规律,对研究激光海水光学信道特性具有很重要的意义。受限于实测数据的缺乏,本文经验部分特别是某些系数的运用还有待深入研究和提升。

致谢 本文得到中国海洋大学的陈树果老师的大力协助,在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Bricaud A, Babin M, Morel A, *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1995, 100(C7): 1-13.
- 3 Smart J H. Underwater optical communications systems part 1: variability of water optical parameters [C]. *Military Communications Conference*, 2005, 2: 1140-1146.
- 4 Lee Z P, Carder K L, Peacock T G, *et al.* Method to derive ocean absorption coefficients from remote-sensing reflectance [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(3): 453-462.
- 5 He M X, Liu Z S, Du K P, *et al.* Retrieval of chlorophyll from remote-sensing reflectance in the China seas[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(15): 2467-2474.
- 6 Cui T W, Zhang J, Tang J W, *et al.* Satellite retrieval of inherent optical properties in the turbid waters of the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(8): 721-725.
- 7 Lee Z P, Carder K L, Amone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- 8 Wang Wenqi, Dong Qiang, Shang Shaoling, *et al.* An evaluation of two semi-analytical ocean color algorithms for waters of the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(5): 35-42.
汪文琦, 董强, 商少凌, 等. 基于两种半分析算法的水体吸收系数反演[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(5): 35-42.
- 9 Chen S, Zhang T. Evaluation of a QAA-based algorithm using MODIS land bands data for retrieval of IOPs in the Eastern China Seas[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 13953-13971.
- 10 Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters[R]. *Scripps Institution of Oceanography*, 1972.
- 11 Song Qingjun, Tang Junwu. The research of scattering properties of Yellow Sea and East China Sea [J]. *Acta*

- Oceanologica Sinica, 2006, 28(4): 56-63.
- 宋庆军, 唐军武. 黄海东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 56-63.
- 12 Deng Jing, Tang Junwu, Lin Mingsen. Acquisition and products processing of MODIS water color remote data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(4): 263-268.
- 丁 静, 唐军武, 林明森. MODIS 水色遥感数据的获取与产品处理综述[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(4): 263-268.
- 13 Gordon H R. Radiative transfer in the atmosphere for correction of ocean color remote sensors [M]. Ocean Colour: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience. Berlin: Springer Netherlands, 1993: 33-77.
- 14 Zhang Caiyun, Shang Shaoping, Hu Jianyu, *et al.* The distribution of the sea water optical attenuation coefficient from August 1997 to August 1999 in Taiwan [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20(1): 127-131.
- 张彩云, 商少平, 胡建宇, 等. 台湾海峡 1997 年 8 月至 1999 年 8 月份海水光学衰减系数的分布特征[J]. 台湾海峡, 2001, 20(1): 127-131.