

文章编号: 1001-3806(2008)05-0502-03

1. 064 μm 激光在海水中传输特性的研究

马 泳, 林 宏, 艾 青, 梁 琨

(华中科技大学 电子与信息工程系 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了实现激光雷达监测海洋赤潮的目的, 采用红外激光能较好地反映藻类悬浮粒子密度等信息。分别就海水中水分子、浮游植物、黄色物质、悬浮颗粒与 1.064 μm 激光的吸收和散射特性展开研究, 最终构建了 1.064 μm 激光在海水中的探测模型。通过对模型的仿真计算可知, 红外激光雷达能有效地探测水下 0.8m 内的海水水域。结果表明, 1.064 μm 激光水下探测深度可满足监测海洋表层藻类粒子密度的要求。

关键词: 大气与海洋光学; 激光雷达; 吸收; 散射; 海洋监测

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Transmitting characteristics of 1.064 μm laser in seawater

MA Yong, LIN Hong, AI Qing, LIANG Kun

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Department of Information and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to detect the oceanic red tides based on lidar, the infrared laser can be used to reflect the alga particles' density effectively. The interaction between 1.064 μm laser and several marine matters, including water, phytoplankton, yellow substance and suspended particulates was analyzed. The detecting model of 1.064 μm laser in the seawater was built. Based on the model and simulation, a conclusion is drawn that the infrared lidar can detect the underwater area within 0.8m effectively so that 1.064 μm laser can satisfy the need of detecting the oceanic alga particles' density.

Key words: atmospheric and ocean optics; lidar; absorption; scattering; marine monitoring

引 言

我国从 1986 年起开展赤潮航空监测工作, 根据赤潮海区的温度高于正常海水温度的特点, 通过检测海水温度实现对赤潮的监测和预报, 但是温度检测不能直接反映赤潮消长的信息, 存在较大的预报误差^[1,2]。机载海洋激光雷达可实现水下探测, 通常选择蓝绿光为探测信号, 由于生物藻类对蓝绿光具有强烈的吸收作用, 致使无法反演赤潮藻类密度信息^[3]。笔者提出采用波长 1.064 μm 激光作为探测光源, 不仅可实现海水表层的红外温度测量, 而且由于藻类对该波长的激光吸收几乎为 0, 可反演出藻体密度的信息。由于海水对 1.064 μm 激光具有很大的吸收, 水下探测深度有限, 导致目前对其水下探测能力的研究比较少。

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (2006ABA084); 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2006AA09Z142)

作者简介: 马 泳 (1971-), 男, 副教授, 现主要从事激光雷达探测和激光通信的研究。

E-mail: mayong@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2007-04-10; 收到修改稿日期: 2007-09-27

1.064 μm 激光在海水中的探测深度是能否实现机载激光监测海洋赤潮的关键, 也是本文中的研究内容。

1 海水光学特性

海水介质中各种成分对光场的作用, 均可归结为它们对光场的衰减, 表现为沿入射方向直线传输的光强度大小变化情况。光信号在水体介质中能量衰减的原因是两个^[4]: 一个是海水及海水中无机盐、溶解的有机物、浮游植物、碎屑对光的吸收。定义单色准直光在海水介质中通过路程为 d 时, 由吸收而引起辐射通量的损失 $dF = -aFd$, 比例系数 $a(\text{m}^{-1})$ 为海水总的吸收系数。另一个是海水及海水中无机盐、溶解的有机物、浮游植物、碎屑对光的散射。定义单色准直光在海水介质中通过路程为 d 时, 由散射而引起辐射通量的损失 $dF = -bFd$, 其比例系数 $b(\text{m}^{-1})$ 为海水的总散射系数。总衰减系数 $c(\text{m}^{-1})$ 的定义是: 总吸收系数与总散射系数之和 $c = a + b$ 。此外气泡、湍流等非均匀性因素对激光水下传输的影响不大, 本文中不予考虑。

1.1 海水的吸收特性

海水的吸收系数是黄色物质、浮游植物、非色素悬浮粒子的吸收系数以及纯水的吸收系数之和^[5]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_y(\lambda) + a_d(\lambda) \quad (1)$$

式中,下标 w, ph, y, d 分别代表水分子、浮游植物叶绿素、黄色物质和非色素悬浮粒子对光的吸收作用。纯水在任一给定波长上的吸收是一个常数,在 450nm ~ 580nm 光谱区间吸收最小,吸收系数在 $0.02\text{m}^{-1} \sim 0.05\text{m}^{-1}$ 之间。纯水在 1064nm 附近吸收系数很大,吸收系数为 18m^{-1} 左右。叶绿素具有能够大量反射近红外能量,吸收大部分的可见光波段能量的性质。故叶绿素在近红外波段的吸收很小,可忽略^[3]。

黄色物质即海水中的可溶有色有机物质,海水黄色物质光吸收系数与光波长成指数函数关系^[6]:

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (2)$$

式中, $a_y(\lambda_0)$ 为参考波长下的光吸收系数,一般取 $\lambda_0 = 440\text{nm}$ 。S 为光吸收谱的斜率,其值随波长及黄色物质的浓度的变化不大,与所用仪器、选取的波段范围及地区的不同存在一些差异,一般在 $0.011 \sim 0.0172$ 之间。研究中,取 $a_y(440) = 0.243\text{m}^{-1}$, S 取平均值 0.014 ^[6]。即:

$$a_y(\lambda) = 0.243 \exp[0.014(440 - \lambda)] \quad (3)$$

图 1 是上述给定参量下得到的黄色物质吸收系数与波长的关系。黄色物质在近红外波段的吸收系数非

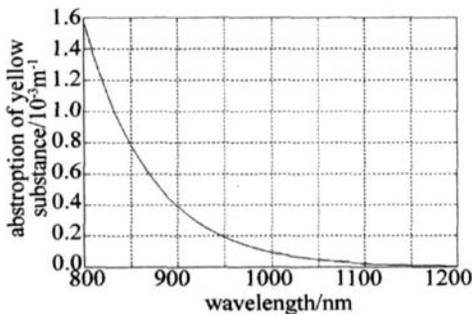


Fig 1 Relationship between the yellow substance absorption and wavelength
常小,由(3)式算得 $a_y(1064) = 3.9 \times 10^{-5}\text{m}^{-1}$,其值可认为趋近于 0。即采用 1.064μm 激光进行海洋探测时,可忽略黄色物质对光的吸收。

非色素悬浮粒子的吸收系数与波长也成指数关系^[7],可以表示为:

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[S'(\lambda_0 - \lambda)] \quad (4)$$

式中, $a_d(\lambda_0)$ 为参考波长下的光吸收系数,一般取 $\lambda_0 = 440\text{nm}$ 。S' 为光吸收谱的斜率,平均值为 0.01 ± 0.002 。研究中,取 $a_d(440) = 0.198\text{m}^{-1}$, S 取平均值 0.01 ^[7],即:

$$a_d(\lambda) = 0.198 \exp[0.01(440 - \lambda)] \quad (5)$$

图 2 是在上述给定参量下由(5)式得到的非色素悬浮粒子的吸收系数与波长的关系。非色素悬浮粒子在近红外波段的吸收系数很小,可算得 $a_d(1064) = 3.86 \times 10^{-4}\text{m}^{-1}$,其值可认为趋近于 0。即采用 1.064μm 激光

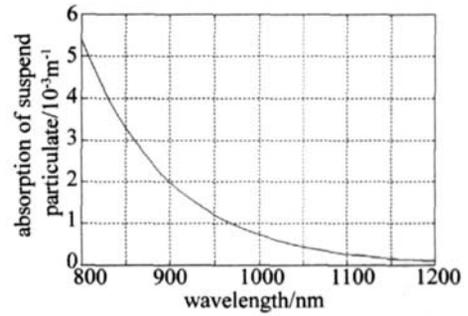


Fig 2 Relationship between the non algal particles absorption and wavelength
进行海洋探测时,非色素悬浮粒子对光的吸收可忽略。

1.2 海水的散射特性

海水的散射系数是浮游植物、非色素悬浮粒子以及纯水的散射系数之和:

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + b_d(\lambda) \quad (6)$$

式中, $b_w(\lambda)$ 为水分子散射, $b_{ph}(\lambda)$ 为浮游植物散射, $b_d(\lambda)$ 为非色素悬浮粒子散射。纯水的散射是一种分子散射,可用瑞利理论分析。依据 MOREL 的模型^[8]有:

$$b_w(\lambda) = 0.0028 \frac{\lambda^{-4.3}}{500} \quad (7)$$

容易算得 $b_w(1064) = 1.08862 \times 10^{-4}\text{m}^{-1}$,纯水对近红外波段的光的散射系数非常小,可忽略。

海水中的颗粒物包括浮游植物和非色素悬浮粒子,引起的散射一般可用米氏散射来处理^[9]。MOREL 给出浮游植物的散射系数与波长的经验关系^[8]为:

$$b_{ph}(\lambda) = \frac{550}{\lambda} b_{ph}(550) \quad (8)$$

式中, $b_{ph}(550) = B_c D^{0.62}$, B_c 为一个介于 $0.12 \sim 0.45$ 之间的常数,平均值取 0.3 ^[8]。D 表示浮游植物的浓度。依据浮游植物的浓度与海水富营养化以及赤潮发生的关系,取浮游植物的浓度范围为: $0.1\mu\text{g/L} \sim 160\mu\text{g/L}$ 。通过仿真可得到 1064nm 处不同浓度范围浮游植物的散射系数,如图 3 所示。

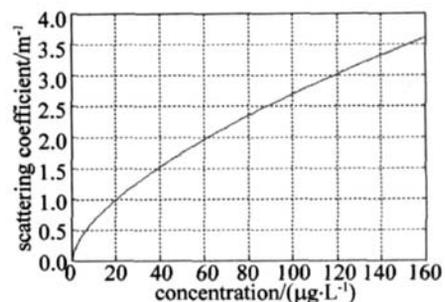


Fig 3 Relationship between the phytoplankton scattering and concentration $\lambda = 1064\text{nm}$

非色素悬浮粒子引起的散射与浮游植物引起的散射相类似,参照对浮游植物散射的分析,非色素悬浮粒子的散射系数^[8]为:

$$b_d(\lambda) = (550/\lambda) b_d(550) \quad (9)$$

式中, $b_d(550) = 0.125D'$, D' 表示海水中非色素悬浮粒子的浓度, 单位 mg/L 。研究中取非色素悬浮粒子浓度范围为: $0.01\text{mg/L} \sim 3\text{mg/L}$ 。通过仿真可知 1064nm 处不同浓度范围非色素悬浮粒子的散射系数, 如图 4 所示。

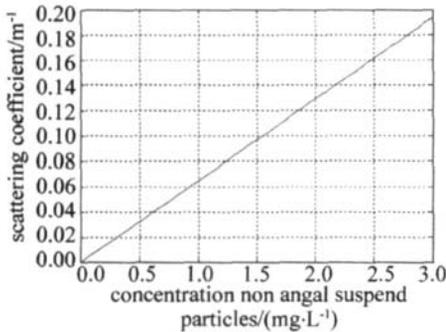


Fig 4 Relationship between the non algal particles scattering and concentration $\lambda = 1064\text{nm}$

2 仿真结果及其分析

理论上, 机载海洋激光雷达方程的一般表达式为^[31]:

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta \frac{A}{(H + \frac{R}{n})^2} \exp[-2 \int_0^R \sigma(r) dr] \quad (10)$$

式中, $P_r(R)$ 为激光雷达探测到的激光功率; P_1 为激光雷达发射的激光功率; γ_b 为海水后向散射率; n 为海水折射率; η 为激光雷达的效率; A 为探测器的有效接收面积, 即 $A = \frac{1}{4} \pi d^2$, d 为光学探测器有效孔径; H 为飞机高度; R 为空气海水界面下探测距离; $\sigma(r)$ 为激光束经过大气、海水界面和水下总的衰减系数, r 为激光束传输到某一点的距离。考虑到大气海水界面的激光衰减, 方程中就要加上一项 T^2 , T 是空气海水界面的透射率; 如果 $H \gg R$, 可认为 $(H + \frac{R}{n})^2 \approx H^2$, (10) 式可以简化为:

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta T^2 \frac{A}{H^2} \exp(-2cR) \quad (11)$$

式中, $c = a + b$ 为总衰减系数, a 为总吸收系数; b 为总散射系数。仿真过程中选用的参量为: 激光波长 $\lambda = 1064\text{nm}$; 激光脉宽 $\tau = 10\text{ns}$; 激光发射功率 $P_1 = 1000 \times 10^6\text{W}$; 激光在海水中传输距离 $R = 0\text{m} \sim 1.4\text{m}$; 接收天线口径 $d = 50\text{cm}$; 光学系统的传输效率 $\eta = 0.45$; 光束发散角 $\alpha = 0.01\text{mrad}$; 水面的透过率 $T = 0.98$; 飞机飞行高度 $H = 100\text{m}$; 海水中水分子后向散射率 $\gamma_{b,w} = 0.5^{[10]}$; 海水中叶绿素后向散射率 $\gamma_{b,ph} = 0.001 \sim 0.005^{[10]}$; 海水中非色素悬浮粒子后向散射率 $\gamma_{b,d} = 0.01 \sim 0.02^{[10]}$; 纯水的吸收系数为 $a_w(1064) =$

18m^{-1} ; 取浮游植物的浓度 $D = 1\mu\text{g/L}$; 非色素悬浮粒子浓度 $D' = 1\text{mg/L}$, 根据前面对其散射特性的分析, 可算得 $b_{ph}(1064) = 0.155\text{m}^{-1}$; $b_d(1064) = 0.065\text{m}^{-1}$ 。由于红外激光在水下衰减的比较显著, 为更好地显示结果, 采用对数坐标下的仿真结果, 如图 5 所示。

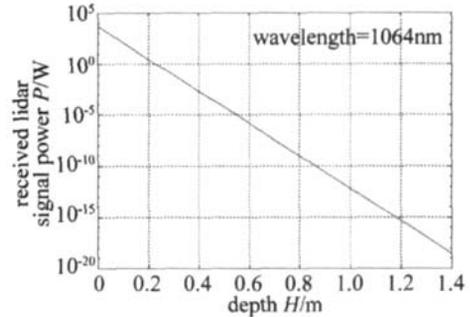


Fig 5 Received lidar signal on a log plot

由仿真结果可知: $1.064\mu\text{m}$ 激光在海水中传输过程衰减比较强烈, 在水下 0.8m 处衰减到 10^{-9}W 左右。通常光电接收器件的探测灵敏度为: 接收的单脉冲能量应不小于 10^{-14}mJ 。当接收的脉冲宽度为 10ns 时, 则应接收的最小功率为 10^{-9}W 。故采用机载红外激光雷达能有效地探测水下 0.8m 内的海水水域。

3 结论

研究认为, 浮游植物、黄色物质和非色素悬浮粒子在 $1.064\mu\text{m}$ 附近的吸收系数都很小, 相对于纯水的强烈吸收就更小, 可近似认为趋近于 0。纯水在 $1.064\mu\text{m}$ 附近的散射系数也很小, 可以近似认为趋近于 0。非色素悬浮粒子和浮游植物在 $1.064\mu\text{m}$ 附近的散射系数都是由它们的粒子密度来决定。其中, 非色素悬浮粒子的散射系数与粒子密度成线性正比关系。作者对 $1.064\mu\text{m}$ 激光探测能力进行了仿真研究, 结果证明采用 $1.064\mu\text{m}$ 激光可以实现对海面以下 0.8m 范围内的探测, 基本满足机载激光雷达赤潮监测应用需要。

参考文献

- [1] WANG X L, SUN P Y, GAO Zh H, *et al* Advances in red tide prediction method in China [J]. Advances in Marine Science, 2003, 21 (1): 93-98 (in Chinese).
- [2] CHEN J, ZHU X, YANG K C, *et al* Environmental noise analysis of airborne laser bathymetry [J]. Laser Technology, 1999, 23 (6): 360-363 (in Chinese).
- [3] MA Y, LIN H, JIH, *et al* A Scattering coefficient model for airborne lidar detection of red tide [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36 (2): 344-349 (in Chinese).
- [4] YAN X G, PENG F Y, XU G H, *et al* Analysis of temporal and frequency characteristics of fore-scattered laser in ocean channel [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 266-269 (in Chinese).
- [5] YANG D T. Analysis of optical properties of the Zhujiang Water [J]. Ecology Science, 2004, 23 (1): 1-4 (in Chinese).

(下转第 507 页)

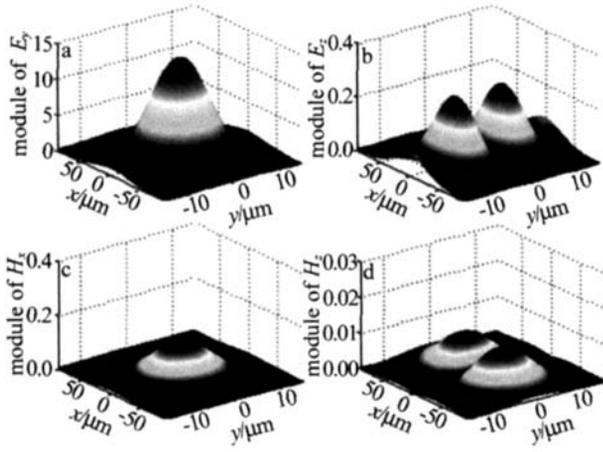


Fig 3 The amplitude distribution of electromagnetic components when $z = 50\mu\text{m}$

由图可以看出,半导体激光器的各电磁分量并不都如 E_y 分量那样均为基模高斯分布。其中 E_z 分量为 TE_{01} ,而 H_z 分量为 TM_{10} 分布。在只考虑半导体激光器的强度分布时,由于 $E_z \ll E_y$,这时可以忽略 E_z 分量对强度的影响。但是,当设计衍射光学器件时,由于各电磁分量之间的相互耦合,不得不考虑半导体激光的各个主要电磁分量的分布情况。图 4 为不同方向上的主要电磁分量的分布。由该图可知在 $y = 0$ 处(沿 y 方向) E_y 为基模分布时的各电磁分量的幅值分布,其中 E_z 恰好为 0,而 E_x, H_y 非常小,可以近似为 0,将主要电磁分量置于图 4 中,可见, $y = 0$ 处(沿 x 方向)可以近似为 TE 波。同理在 $x = 0$ 处(y 方向)近似为 TM 波。而当 x, y 均不为 0 时, TE 模和 TM 模不是独立存

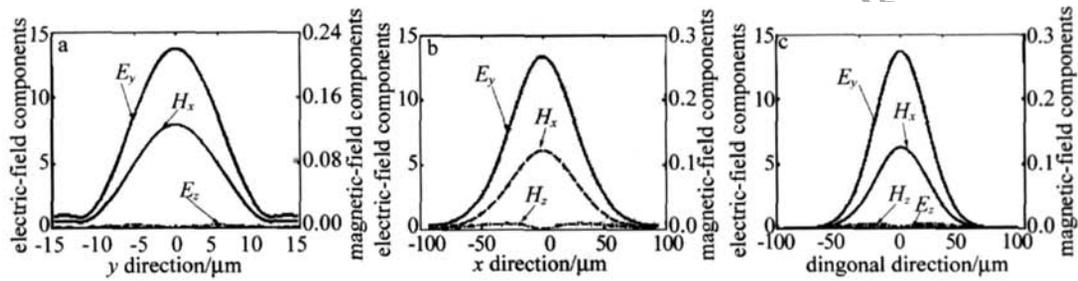


Fig 4 The electromagnetic components distribution in different direction

在的,而是混合模。

3 结 论

在满足衍射孔径远大于波长 ($3\lambda \sim 5\lambda$) 且在不太靠近孔径的地方观察衍射场的条件下可以对各电磁分量单独处理,从而得到其矢量光场分布。本文中运用非傍轴条件下的菲涅耳近似推导出了半导体激光器的矢量光场分布,并利用 MATLAB 语言编制了相应的数值计算程序包。实现了计算不同距离上半导体激光器各个电磁分量的分布情况的功能,对设计和分析半导体激光器衍射整形光学器件具有重要意义。

参 考 文 献

[1] BAO N K, CHEN Zh Y, ZHANG J J. Phase-only diffractive optical element for improving the beam quality of a vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Optik*, 2004, 115 (1): 23-27.
 [2] FORESIJ S, LEVY J, JACKSON J E. Intensity redistribution and collimation of laser diode arrays using binary optics [J]. *SPIE*, 1990, 1211: 253-257.

[3] ASFOUR J M, TSCHUD I T. Beam-shaping of laser diodes with binary diffraction optics [J]. *SPIE*, 1994, 2041: 312-317.
 [4] DU B X. The principle of semiconductor laser [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2004: 79-93 (in Chinese).
 [5] XUE H, ZHANG Q, LI P. The analysis of far-field light intensity characteristic of laser diode [J]. *Laser Technology*, 2004, 31 (4): 661-663 (in Chinese).
 [6] LI Sh Y, YU Y G, YE H Y, et al. The estimation of the parameters in the model of the self-mixing effect in semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (5): 519-521 (in Chinese).
 [7] LI Y. Initial research on near field light beam orthopedics design for semiconductor laser [J]. *Aero Weaponry*, 2007 (1): 51-52 (in Chinese).
 [8] HE X J, YANG H J, QU Q. The collimation design of the semiconductor laser array light beams [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (6): 658-660 (in Chinese).
 [9] WU X. Beam properties and beam combining technique for semiconductor lasers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 41 (in Chinese).
 [10] YANG G, SONG F J. Advance physical optics [M]. Hefei: Chinese Science and Technology Press, 1989: 75-68 (in Chinese).

(上接第 504 页)

[6] WARNOCK R E, GESKES W C. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea [J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 42 (3): 169-178.
 [7] ROESLER C S. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique [J]. *Limnol Oceanogr*, 1998, 43 (7): 1649-1660.
 [8] MOREL A. Optical modelling of the upper ocean in relation to its

biogenous matter content (case 1 waters) [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1988, 93 (9): 10749-10768.
 [9] GOULD R W, ARNONE R A, Jr. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters [J]. *Appl Opt*, 1999, 38 (12): 2377-2383.
 [10] HOWARD R. Diffuse reflectance of the ocean: influence of nonuniform phytoplankton pigment profile [J]. *Appl Opt*, 1992, 31 (12): 2116-2129.