

文章编号: 1001-3806(2012)04-0493-04

气泡尾流光束衰减测量中的复散射校正

鲁刚¹, 孙春生², 张晓晖^{2*}

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为了分析复散射对气泡尾流光束衰减测量的影响, 采用小角度辐射传输方程, 引入了表征复散射效应强弱的校正因子, 通过数值求解分析了典型的尾流气泡尺度分布和数密度条件下复散射校正因子与接收视场角、光学厚度、光束大小和接收截面大小等参量之间的关系。结果表明, 接收视场角在前向小角度范围内的变化对复散射校正因子的影响很大, 而视场角较大时对复散射校正因子的影响基本相同; 光学厚度的变化对复散射校正因子的影响显著, 且在光学厚度小于1时, 影响更明显; 接收截面大小的变化在光学厚度小于1时对复散射校正因子的影响很小, 但在光学厚度较大时, 对复散射校正因子的影响比较明显; 光束大小的变化对复散射因子的影响相对较小, 且在光束束腰较大时对复散射因子的影响基本不变。该研究为尾流光束衰减测量条件的选择和优化提供了理论依据。

关键词: 物理光学; 复散射校正; 辐射传输方程; 光束衰减; 气泡尾流

中图分类号: O436.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.015

Multiple scattering correction to measurement of beam attenuation in bubble wakes

LU Gang¹, SUN Chun-sheng², ZHANG Xiao-hui²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For analyzing the influence of multiple scattering on measuring beam attenuation in bubble wakes, the correction coefficient was introduced which denotes the extent of multiple scattering, and its theoretical formulations was derived by means of a narrow angle approximation solution to the radiation transfer equation. Given a typical bubbles size distribution function and number density in bubbles wakes, the relation among the correction coefficient and detector field of view (FOV), wake optical depth, beam size, received section size were analyzed by numerical calculation. Analysis shows that the influence of FOV in forward small angle on the correction coefficient is great, but it has a little change when the FOV is wide; and the impact of optical depth on the correction coefficient is prominent, besides the impact is more prominent when the optical depth is less than 1; and the effect of received section size on the correction coefficient is very little when depth is less than 1, but it becomes visible as the optical depth increase; the influence of beam size on the correction coefficient is comparatively less, further the correction coefficient almost keeps changeless when the beam size is large. The research proposes a theoretical foundation for choice and optimization of conditions during measuring beam attenuation in bubble wakes.

Key words: physical optics; multiple scattering correction; radiative transfer equation; beam attenuation; bubble wake

引言

尾流是舰船运动时产生的一段包含大量气泡的湍流区域, 尾流区的视觉和物理学特征与周围的海水明显不同^[1-2], 尾流的几何形状、声学特性及尾流的光散射特性等已得到广泛的研究^[2-6]。研究尾流的光束衰减特性对尾流的水下探测和跟踪具有理论指导意义, 但关于尾流光束衰减特性的文献很少。测量光束衰减

一般采用简单的 Beer-Lambert 定理, 没有考虑前向散射光和复散射的影响。然而实际测量离散介质的光束衰减系数时, 由于探测系统总有一定的视场角, 视场角内的前向散射光不可避免地伴随着透射光束进入有限孔径的探测器, 从而带来测量误差^[7-9]; 同时, 由于尾流气泡群的相函数具有前向高峰值的特征^[10], 光束在尾流中传播时易产生复散射效应, 也会带来测量误差。参考文献 [11] 中曾研究了舰船尾流的前向散射光对光束衰减测量的影响, 在这里将进一步研究复散射对尾流光束衰减测量的影响和校正。

作者首先利用辐射传输方程的小角度近似解, 得到了垂直于光束传播方向的圆截面上接收到的未经 2

作者简介: 鲁刚(1970-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事激光探测方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: zhangxiaohui505@vip.sina.com

收稿日期: 2011-11-17; 收到修改稿日期: 2011-12-29

次以上散射(以下简称约化)和经2次以上散射(含2次,以下简称漫射)光功率的理论表达式,并引入了透射函数和复散射校正因子,然后通过数值计算分析了接收视场角、光学厚度、接收截面大小和光束大小等测量条件改变的情况下,复散射校正因子的变化规律,为尾流光束衰减测量条件的选择和优化提供理论依据。

1 理论模型

气泡可看作是海水中的离散“颗粒”,尾流区气泡的浓度远大于海水中其它颗粒的浓度,故在此忽略其它颗粒的影响,仅考虑尾流气泡对光束的复散射效应,将海水近似地视为均匀的背景介质。因尾流气泡的尺度远大于入射光波长,气泡的散射光大部分集中在前向小角度范围内,因此在这里辐射传输方程可作前向小角度近似。为便于计算分析,在此不妨设入射光束为平行高斯光束。

1.1 小角度辐射传输方程的解

光波在舰船尾流中传播时,辐射亮度分布函数 $L(\phi, \rho, z)$ 满足如下的小角度辐射传输方程^[12-13]:

$$\left(\phi \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{\partial}{\partial z} + c \right) L(\phi, \rho, z) = b \int p(\phi - \phi') L(\phi', \rho, z) d\phi' \quad (1)$$

式中 ϕ 为单位传输矢量在垂直于 z 轴的横向截面上的投影, ϕ' 为单位散射矢量在垂直于 z 轴的横向截面上的投影, ρ 为垂直于 z 轴的横向位置矢量, $L(\phi, \rho, z)$ 表示坐标点 (ϕ, ρ, z) 处的辐射亮度, b 和 c 分别表示气泡群的体散射系数和体消光系数, $p(\phi)$ 表示散射相函数且满足 $\int p(\phi) d\phi = 1$ 。

采用 FANTE 和 ZARBECKI 等人求解高峰值相位函数传输方程的方法^[12-13],将辐射亮度分为约化亮度 L^u 和漫射亮度 L^s 两个部分:

$$L(\phi, \rho, z) = L^u(\phi, \rho, z) + L^s(\phi, \rho, z) \quad (2)$$

式中 L^u 表示未经2次以上散射的那部分辐射。利用如下的傅里叶变换的形式:

$$\tilde{L}(\xi, \zeta, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} L(\phi, \rho, z) \exp[i(\xi \cdot \phi + \zeta \cdot \rho)] d\phi d\rho \quad (3)$$

$$\tilde{p}(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\phi) \exp(i\xi\phi) d\phi \quad (4)$$

式中 L 和 p 上端的 \approx 和 \sim 分别表示2维和1维傅里叶变换。通过傅里叶变换法可求得如下解:

$$\tilde{L}^u(\xi, \zeta, z) = \tilde{L}(\xi + z\zeta, \zeta, z=0) \exp(-cz) \quad (5)$$

$$\tilde{L}^s(\xi, \zeta, z) = \tilde{L}(\xi + z\zeta, \zeta, z=0) \times$$

$$\int_0^z \tilde{p}[\xi + \zeta(z-z')] \exp(-cz') dz' \times \exp\left\{ - \int_{z'}^z \left[\frac{c\omega}{4} \bar{\phi}^2 |\xi + \zeta(z-z'')|^2 + c(1-\omega) \right] dz'' \right\} \quad (6)$$

式中 $\omega = b/c$ 表示气泡的单散射反照率, $\bar{\phi}^2$ 定义为 $\bar{\phi}^2 = \int \phi^2 p(\phi) d\phi$ 。

尾流气泡的半径一般在几微米到几百微米之间,远大于入射的蓝绿激光波长,为便于公式推导和计算,可将尾流气泡的相函数 $p(\phi)$ 作如下高斯近似:

$$p(\phi) = \frac{\alpha^2}{\pi} \exp(-\alpha^2 \phi^2) \quad (7)$$

式中 α 可以通过对由 Mie 散射理论算得的气泡群的散射图像拟合得到。为简化计算过程,假设沿 z 轴传播的入射光为准直高斯光束,则 $z=0$ 处的辐射亮度为:

$$L(\phi, \rho, z=0) = P_0 \pi^{-1} \gamma^2 \delta(\phi) \exp(-\gamma^2 \rho^2) \quad (8)$$

式中 $\delta(\phi)$ 是狄拉克函数, P_0 为 $z=0$ 处的光功率, γ 与高斯光束束腰 w_0 满足关系^[6] $\gamma = \sqrt{2}/w_0$ 。

利用(7)式和(8)式的条件,对方程(5)式和(6)式进行反傅里叶变换,可以得到 $L^u(\phi, \rho, z)$ 和 $L^s(\phi, \rho, z)$ 的表达式如下:

$$L^u(\phi, \rho, z) = P_0 \pi^{-1} \gamma^2 \delta(\phi) \times \exp(-\gamma^2 \rho^2) \exp(-cz) \quad (9)$$

$$L^s(\phi, \rho, z) = \frac{P_0 b \exp(-cz)}{(2\pi)^2} \int_0^z dz' [\Delta(z')]^{-1} \times \exp(bz') \times \exp\left[- \frac{K(z') \rho^2 - L(z') \phi \rho + M(z') \phi^2}{\Delta(z')} \right] \quad (10)$$

式中 $K(z') = \frac{(1+c\omega z')}{4\alpha^2}$, $L(z') = \frac{2z'+c\omega z'^2}{4\alpha^2}$, $M(z') = \frac{z'+c\omega z'^3/3}{4\alpha^2} + \frac{1}{4\gamma^2}$, $\Delta(z') = 4KM - L^2$ 。

在极坐标 (θ, φ) 中,矢量 ϕ 可以表示为:

$$\phi_x + \phi_y = \theta \cos \varphi + \theta \sin \varphi \quad (11)$$

对具有 $2\theta_v$ 视场角、垂至于光轴且中心在光轴上的接收截面来说,接收到的漫射强度 $E^s(\theta_v, \rho, \tau)$ 和约化强度 $E^u(\theta_v, \rho, \tau)$ 可分别由(9)式和(10)式对角度 φ 在区间 $(\theta, 2\pi)$ 和角度 θ 在区间 $(0, \theta_v)$ 上积分得到:

$$E^u(\theta_v, \rho, \tau) = 2P_0 \pi^{-1} w_0^{-2} \times \exp(-2\rho^2 w_0^2) \exp(-\tau) \quad (12)$$

$$E^s(\theta_v, \rho, \tau) = \frac{P_0 b \exp(-\tau)}{2\pi} \times$$

$$\int_0^{\theta_v} \theta d\theta \int_0^{\tau} dz' [\Delta(z')]^{-1} \exp(bz') \times$$

$$\exp\left[-\frac{K(z')\rho^2 + M(z')\theta^2}{\Delta(z')}\right] I_0\left[\frac{L(z')\theta\rho}{\Delta(z')}\right] \quad (13)$$

若 R_d 为光束传播方向光轴上的接收截面的半径, 则接收到的光功率 P 为:

$$P(\theta_v, \pi, R_d, w_0) = 2\pi \int_0^{R_d} E(\theta_v, \rho, z) \rho d\rho = 2\pi \int_0^{R_d} E^u(\theta_v, \rho, z) \rho d\rho + 2\pi \int_0^{R_d} E^s(\theta_v, \rho, z) \rho d\rho \quad (14)$$

式中, 第 2 个等号后的第一部分表示约化功率 $P^u(\theta_v, \pi, R_d, w_0)$, 第二部分表示漫射功率 $P^s(\theta_v, \pi, R_d, w_0)$, 它们都是关于接收视场角 θ_v 、气泡光学厚度 τ 、接收截面半径 R_d 和高斯光束大小(以束腰 w_0 表征)的函数。

1.2 透射函数和校正因子

为便于分析复散射对气泡衰减测量的影响, 根据实际测量条件, 引入有尾流气泡时接收截面上接收到的光功率 $P^u(\theta_v, \pi, R_d, w_0)$ 和无尾流气泡时接收截面上接收到的光功率 $P^u(\theta_v, 0, R_d, w_0)$ 之比作为透射函数 $T(\theta_v, \pi, R_d, w_0)$:

$$T(\theta_v, \pi, R_d, w_0) = \frac{P(\theta_v, \pi, R_d, w_0)}{P(\theta_v, 0, R_d, w_0)} = \exp(-\tau) \cdot [1 + C(\theta_v, \pi, R_d, w_0)] \quad (15)$$

式中, $C(\theta_v, \pi, R_d, w_0)$ 为复散射校正因子, 无量纲, 它是对单散射条件下 Beer-Lambert 定理的复散射修正。无尾流气泡时 $P^s(\theta_v, 0, R_d, w_0) = 0$, 由(15)式可推得 $C(\theta_v, \pi, R_d, w_0)$ 的计算公式为:

$$C(\theta_v, \pi, R_d, w_0) = \frac{P^s(\theta_v, \pi, R_d, w_0)}{P^u(\theta_v, \pi, R_d, w_0)} \quad (16)$$

2 数值计算及分析

要分析尾流气泡光束衰减的复散射效应, 首先需要知道尾流气泡群的尺寸分布函数 $n(r)$ 或概率密度分布函数 $f(r)$, 以及尾流气泡群的数密度。在计算中, 尾流中气泡群的尺寸分布函数 $n(r)$ 采用了 Trevorrow 的研究结果^[14], 尺寸分布范围取 $10\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$, 最可几气泡半径取 $r_p = 20\mu\text{m}$, 气泡群的数密度 $N_0 = 10^9\text{m}^{-3}$, 且不考虑尾流深度的影响。根据所选参量利用 Mie 散射理论^[15] 可计算出的气泡群的相函数, 通过对气泡群的相函数按(7)式进行最小二乘拟和, 可以得到 α 值为 431.86。计算中取入射光波长为 532nm。

为研究校正因子 C 与接收视场角和光学厚度的关系, 取准直高斯光束束腰为 5mm、接收截面半径与高斯光束束腰相等, 根据(16)式计算了 3 种光学厚度 (τ 分别为 0.1, 1, 10) 条件下测量尾流光束衰减时复散射校正因子随接收视场角的变化关系, 如图 1 所示。为研究校正因子 C 与接收视场角和光束大小的关系, 本文中取接收截面半径与高斯光束束腰相等、光学厚

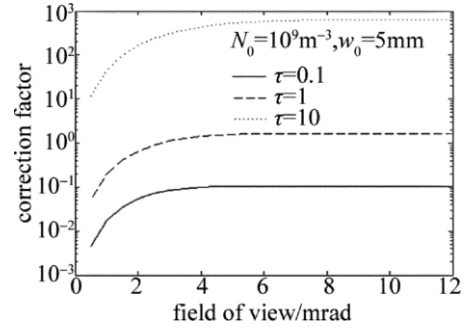


Fig. 1 Correction factor as a function of detector FOV and optical depth 为 1, 计算了 3 种光束大小(束腰 w_0 分别为 0.5mm, 5mm, 50mm) 条件下测量尾流光束衰减时复散射校正因子随接收视场角的变化关系, 如图 2 所示。为研究校正因子 C 与接收截面大小和光学厚度的关系, 取光束束腰为 5mm、接收视场角为 10mrad, 分别计算了 3 种接收截面半径大小 (R_d 为 $0.2w_0, w_0, 5w_0$) 和 3 种光学厚度 (τ 分别为 0.1, 1, 5) 条件下测量尾流光束衰减时复散射校正因子随光学厚度和接收截面大小的变化关系, 分别如图 3 和图 4 所示。

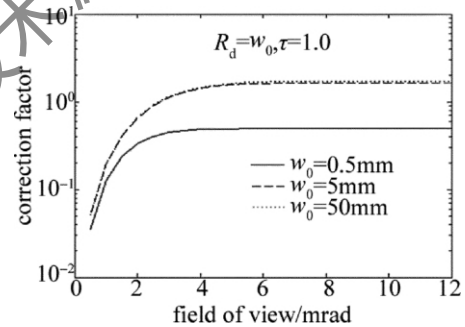


Fig. 2 Correction factor as a function of detector FOV and beam waist

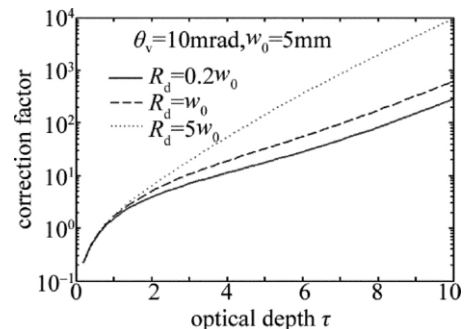


Fig. 3 Correction factor as a function of optical depth and radius of received section

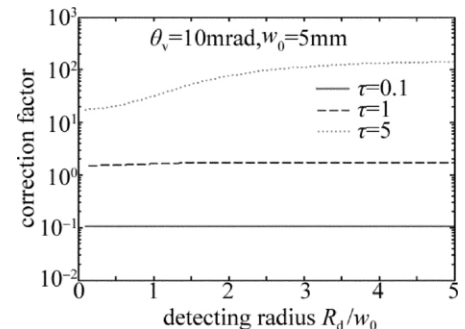


Fig. 4 Correction factor as a function of radius of received section and optical depth

从图1和图2可以看出,校正因子 C 随着接收视场角的增大在前向小角度范围内迅速增加,然后趋于饱和,光学厚度和光束直径越大,趋于饱和的速度越慢,对应的视场角越大。产生这种现象的原因可解释为气泡的散射光大部分集中在前向小角度范围内,导致复散射效应主要出现在前向小角度范围,且随着光学厚度和光束直径的增加而增加。

从图2可以看出,光束直径越大(束腰半径越大)校正因子 C 越大。但在光束直径较大时,校正因子 C 的差别已不显著。

从图3和图4可以看出,接收截面越大,校正因子 C 也越大。但在光学厚度小于1时,校正因子 C 随光学厚度的变化大而随接收截面的变化很小。

从图1、图3和图4可以看出,光学厚度越大,校正因子 C 也越大。这是因为光学厚度增加了,光子在到达接收截面之前经历的2次以上的散射也随之增加了。

3 结论

基于辐射传输方程,研究了4种测量条件对尾流光束衰减测量的复散射校正。研究表明,光束在尾流气泡中传输时复散射效应明显,当气泡的光学厚度达到1以上、光束束腰超过5mm时,复散射校正因子已超过100%,因此测量尾流的衰减时简单的Beer-Lambert已不适用,必须进行复散射校正。研究还表明,选择合适的激光束参量和测量条件可以减弱复散射的影响,反之,对给定的光束参量和测量条件,可以量化复散射的影响。本文中的研究结果对于尾流的水下激光探测和跟踪具有理论指导意义。

参考文献

- [1] TREVORROW M V, VAGLE S, FARMER D M. Acoustical measurements of microbubbles within ship wakes [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, 95(4): 1922-1930.
- [2] ZHANG X D, LEWIS M, BISSETT W P, *et al.* Optical influence of ship wakes [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(15): 3122-3132.
- [3] PELTZER R D, GARRETT W D, SMITH P M. A remote sensing study of surface ship wake [J]. *International Journal Remote Sensing*, 1987, 8(5): 689-704.
- [4] ZHANG X D, LEWIS M, JOHNSON B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(27): 6525-6536.
- [5] SU L P, REN D M, QU Y Ch, *et al.* Study of scattering properties by ship wakes [J]. *Laser Journal* 2007, 28(1): 70-71 (in Chinese).
- [6] WAN J, ZHANG X H, RAO J H. Application of wavelet threshold de-noising in the scattering optical wake flow signal processing [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(4): 468-468 (in Chinese).
- [7] DEEPAK A, BOX M A. Forward scattering corrections for optical extinction measurements in aerosol media. 2: Polydispersions [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(19): 3169-3176.
- [8] PISKOZUB J, STRAMSKI D, TERRILL E, *et al.* Influence of forward and multiple light scatter on the measurement of beam attenuation in highly scattering marine environments [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(24): 4723-4731.
- [9] VOSS K J, AUSTIN R W. Beam attenuation measurement error due to small-angle scattering acceptance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10(1): 113-121.
- [10] SUN Ch Sh, ZHANG X H, ZHU D H. Forward light scattering properties of bubble populations in ship far wakes [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(4): 40-41 (in Chinese).
- [11] SUN Ch Sh, ZHANG X H, ZHU D H. Influence of forward light scattered by ship wakes on the measurement of beam attenuation [J]. *Laser & Infrared* 2008, 38(3): 200-203 (in Chinese).
- [12] FANTE R L. Propagation of electromagnetic waves through turbulent plasma using transport theory [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1973, 21(5): 750-755.
- [13] ZARDECKI A, DEEPAK A. Forward multiple scattering corrections as a function of detector field of view [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(19): 2970-2976.
- [14] TREVORROW M V. Boundary scattering limitation of fish detection in shallow waters [J]. *Fisheries Research*, 1998, 35(1/2): 127-135.
- [15] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York, USA: Wiley, 1983: 83-129.