

船舰尾流前向散射的缪勒矩阵特性研究

杨 郁 张建生

(西安工业大学数理系, 陕西 西安 710032)

摘要 从米氏散射理论出发,利用单次散射理论模型研究了船舰尾流前向散射缪勒矩阵(FSMMBSW)的分布模式,以及矩阵元与气泡数密度、气泡半径之间的关系。研究表明,气泡米氏散射缪勒矩阵元 m_2 和 m_4 在前向 90° 存在较大振荡,且振荡幅度随半径增大而增大;气泡幕前向散射缪勒矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 无方位变化,有方位变化的矩阵元随方位角正弦振荡分布,各 FSMMBSW 矩阵元随极径增大指数衰减;矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 随着气泡半径的增大而增大,随方位角振荡分布的矩阵元振幅随气泡半径增大而增大;在气泡数密度为 10^8 m^{-3} 附近矩阵元存在极大值,在极值点两侧矩阵元随数密度变化特性相反;对于不同的气泡半径和数密度,矩阵元 M_{12} 和 M_{13} 不仅可提供强度大小信息,还可以提供相位反转的信息。

关键词 应用光学;前向散射;米氏散射理论;尾流;缪勒矩阵

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1101006

Forward Scattering Müller Matrix Characteristics of Ship Wakes

Yang Yu Zhang Jiansheng

(Math-Physical Department, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract Using characteristic distribution pattern of forward-scattering Müller matrix belonging to ship wakes (FSMMBSW), relations among matrix element, bubble number density and bubble radius are discussed based on Mie scattering theory by use of single-scattering model, in which calculated results show that, m_2 and m_4 elements have relatively strong shocks for a single bubble with scattering angle ranging from 0 to 90° , and amplitudes of these shocks increase with rising radius. M_{11} and M_{44} of FSMMBSW for bubbles have no clear change with different azimuths. Distributions of elements changing with different azimuths are in accordance with the law of sine shocks, and elements of FSMMBSW decay with polar radius exponentially; M_{11} , M_{44} and their amplitudes change with different azimuths, increase with radius rising. Maximums of the elements occur at bubble number density of 10^8 m^{-3} . Characteristics between elements are opposite with different number densities around sides. Besides intensity, information of phase reversal with bubble radius as well as number density changing is reasonably contained in M_{12} and M_{13} .

Key words applied optics; forward-scattering; Mie scattering theory; ship wakes; Müller matrix

OCIS codes 010.4450; 010.7340; 290.4020; 290.5855

1 引 言

船舰尾流由包含大量气泡的海水组成,气泡物理参量的变化可以作为探测、识别和测量船舰尾流的依据^[1]。基于尾流光学效应进行自导,是鱼雷自导的一种新模式^[1,2],国内外已先后开展了这方面的研究工作^[1~7]。研究尾流气泡的光散射特性是研制光尾流自导鱼雷的基础。偏振作为散射光的一个

重要特性,可携带比光强更多的信息,已广泛应用于光散射相关领域^[8~11],而对船舰尾流气泡散射光的偏振特性的研究越来越受到重视。

对散射光偏振特性的研究方法主要有理论、实验和蒙特卡罗模拟三种,三种方法的最终目的都是为了获得介质的缪勒矩阵。缪勒矩阵的16个矩阵元,被称作散射介质的“指纹”,能完整的反应散射介

收稿日期: 2011-04-11; **收到修改稿日期**: 2011-06-03

基金项目: 武器装备预研基金(51448030101ZK1801)和陕西省教育厅专项科研计划项目(2010JK585)资助课题。

作者简介: 杨 郁(1980—),男,硕士研究生,助教,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: yangyu0506@126.com

导师简介: 张建生(1966—),男,博士,教授,主要从事光学工程及应用、水下光信息等方面的研究。

E-mail: zhangjsh@xatu.edu.cn

质的结构和功能信息,由介质的缪勒矩阵就可知介质对入射光的偏振转换作用^[8]。尾流气泡作为特殊的散射介质,其散射光能量主要集中在前向半球散射空间内,而且前向 4° 范围内的散射能量约占总散射能量的一半^[4],因此对尾流前向散射光偏振特性的研究具有很大的应用价值。

本文以米氏散射理论为基础,计算了单个气泡米氏散射缪勒矩阵随散射角的分布特性,并结合单次散射理论构造出气泡幕前向单次散射理论模型,利用该模型计算分析了气泡幕前向单次散射缪勒矩阵的空间分布,以及矩阵元与气泡数密度、气泡半径之间的关系,为进一步进行实验探测尾流气泡散射光偏振特性提供理论依据。

2 理论基础

2.1 单个气泡散射缪勒矩阵

水中单个气泡可看作一个表面被均匀介质包围形成的近球型的空气腔模型。如果入射光的斯托克斯矢量 \mathbf{S}_0 已知,则散射光的斯托克斯矢量 \mathbf{S} 与入射光斯托克斯矢量 \mathbf{S}_0 的关系为

$$\mathbf{S} = \mathbf{M}\mathbf{S}_0, \quad (1)$$

式中 \mathbf{M} 为散射体的缪勒矩阵^[2,8~14]

$$\mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} m_1(\theta) & m_2(\theta) & 0 & 0 \\ m_2(\theta) & m_1(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3(\theta) & -m_4(\theta) \\ 0 & 0 & m_4(\theta) & m_3(\theta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ 为散射角,且有

$$\begin{cases} m_1(\theta) = \frac{1}{2}(|S_1|^2 + |S_2|^2) \\ m_2(\theta) = \frac{1}{2}(|S_2|^2 - |S_1|^2) \\ m_3(\theta) = \frac{1}{2}(S_2 S_1^* + S_1 S_2^*) \\ m_4(\theta) = \frac{i}{2}(S_1 S_2^* - S_2 S_1^*) \\ S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)}(a_n \tau_n + b_n \pi_n) \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)}(a_n \tau_n - b_n \pi_n) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 S_1 和 S_2 分别为散射振幅函数, a_n 和 b_n 为米氏散射系数, τ_n 和 π_n 是连带勒让德函数的函数,仅与散射角有关。

2.2 前向单次散射缪勒矩阵

单次散射理论模型仅考虑光子发生单次散射的

情形,是一种具有典型意义的近似,多篇文献已对该模型有过阐述^[11~13]。假定散射体是球对称的,光的散射是非相干的,无限细光束沿 z 轴垂直入射到介质,前向单次散射几何模型如图1所示, xoz 为参考平面。

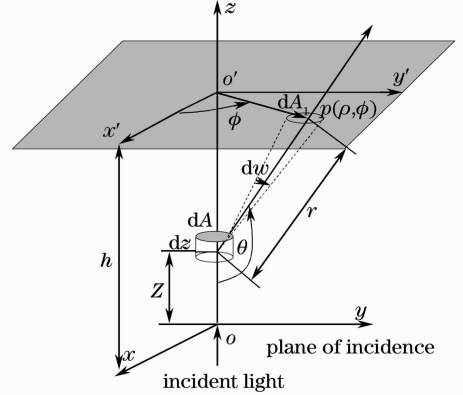


图1 前向单次散射模型示意图

Fig. 1 Geometric scheme of forward single-scattering

设 \mathbf{S}_0 为入射光相对于参考面的斯托克斯矢量,则到达深度 Z 的光强为

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 \exp(-u_t z), \quad (4)$$

式中 u_t 为消光系数 $u_t = a + \mu_s$, a 为介质的吸收系数, μ_s 为散射系数且 $\mu_s = n_b Q_b \pi r^2$, n_b 为气泡数密度, Q_b 为散射效率, r 为气泡半径。

在 Z 处发生散射,散射到 (θ, ϕ) 方向 $d\omega$ 立体角内的矢量元为

$$d\mathbf{S}' = u_s dA dr \mathbf{M}(\theta) \mathbf{L}(-\phi) \mathbf{S} d\omega, \quad (5)$$

式中 dA 为气泡散射截面, $\mathbf{M}(\theta)$ 为单个气泡散射缪勒矩阵, $\mathbf{L}(-\phi)$ 为旋转矩阵^[12,13]

$$\mathbf{L}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & -\sin 2\phi & 0 \\ 0 & \sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

经 r 距离到达接收面元 dA_1 的斯托克斯矢量为

$$d\mathbf{S}_1 = d\mathbf{S}' \exp(-u_t r), \quad (7)$$

从表面溢出的相对于参考面斯托克斯矢量元为

$$d\mathbf{S}_b = u_s dz [1/r^2 \exp(-u_t(r+z))] \cdot \mathbf{L}(\phi) \mathbf{M}(\theta) \mathbf{L}(-\phi) \mathbf{S}_0, \quad (8)$$

在介质表面 $p(\rho, \phi)$ 处获得的总的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{bs} = u_s \int_0^h dz [1/r^2 \exp(-u_t(r+z))] \cdot \mathbf{L}(\phi) \mathbf{M}(\theta) \mathbf{L}(-\phi) \mathbf{S}_0, \quad (9)$$

可得到气泡幕的前向单次散射缪勒矩阵元为

$$M_{ij}(\rho, \phi) = u_s \int_0^h dz [1/r^2 \exp(-u_t(r+z))] \cdot$$

$$L(\phi)M(\theta)L(-\phi) = \frac{u_s}{\rho} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left[-\rho u_s \cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] d\theta H_{ij}, \quad (10)$$

式中 H_{ij} 表达式为

$$\begin{cases} H_{11} = m_1(\theta) \\ H_{12} = m_2(\theta) \cos 2\phi \\ H_{13} = m_2(\theta) \sin 2\phi \\ H_{14} = 0 \\ H_{21} = H_{12} \\ H_{22} = m_1(\theta) \cos^2 2\phi + m_3(\theta) \sin^2 2\phi \\ H_{23} = m_1(\theta) \sin 2\phi \cos 2\phi - \\ \quad m_3(\theta) \sin 2\phi \cos 2\phi \\ H_{24} = m_4(\theta) \sin 2\phi \\ H_{31} = H_{13} \\ H_{32} = H_{23} \\ H_{33} = m_3(\theta) \cos^2 2\phi + m_1(\theta) \sin^2 2\phi \\ H_{34} = -m_4(\theta) \cos 2\phi \\ H_{41} = 0 \\ H_{42} = -H_{24} \\ H_{43} = -H_{34} \\ H_{44} = m_3(\theta) \end{cases}. \quad (11)$$

3 模拟与计算

3.1 单个气泡米氏散射缪勒矩阵特性

由(2)和(3)式可以计算得到不同半径单个气泡缪勒矩阵元随散射角的变化关系如图2所示。通过查阅文献[2]可知,在船舰尾流中半径小于 $10 \mu\text{m}$ 的气泡会迅速溶于水,半径大于 $150 \mu\text{m}$ 的气泡在几个数十秒之后会浮升到水面而破灭,尺寸范围在 $10 \sim 150 \mu\text{m}$ 的气泡能存活较长时间。相对于鱼雷自导的应用而言,在此范围内的气泡更具实践意义。因此计算单个气泡散射缪勒矩阵特性时气泡半径分别取为 $10, 80$ 和 $150 \mu\text{m}$ 。其他参数分别选取,入射光波长为 $0.532 \mu\text{m}$,气泡散射效率因子为 2 ,气泡相对于海水的折射率为 0.75 。

由图2可知,矩阵元 m_1 和 m_3 强度值在前向 1° 散射角范围内超出其他散射角 2 个数量级以上,在其他散射角没有振荡差异,不同半径气泡矩阵元 m_1 和 m_3 没有表现出差异;矩阵元 m_2 和 m_4 在前向 90° 范围内存在较大振荡,而且越靠近 0° 附近振荡幅度越大,随着角度增大到 90° 附近,振荡逐渐变小,在后向 90° 范围内基本上没有振荡;不同半径气泡表现出大致相同的震荡趋势,而且随着气泡半径的增大振荡幅度增大。

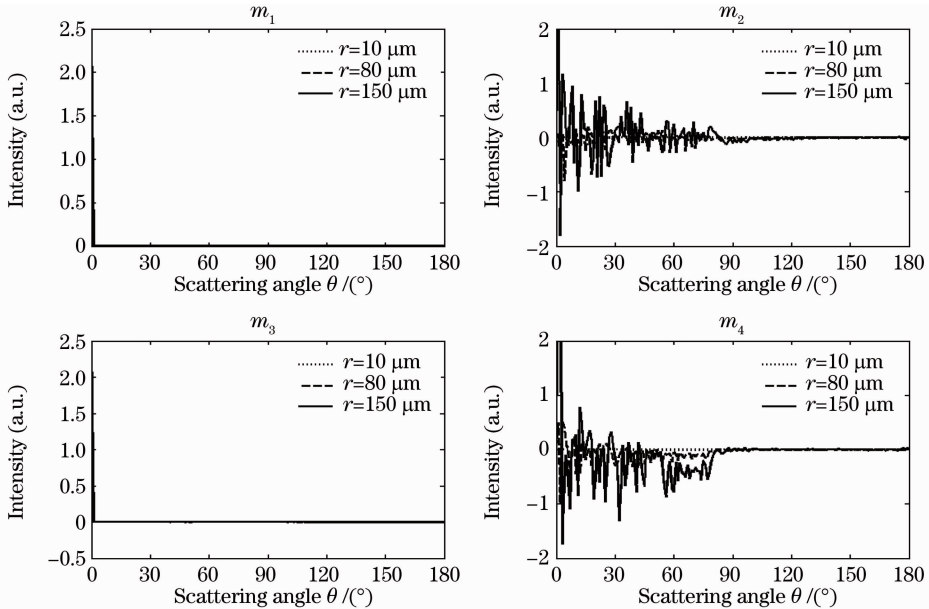


图2 单个气泡米氏散射缪勒矩阵随散射角的分布

Fig. 2 Distribution of Mie scattering Müller matrix for a bubble

3.2 气泡幕前向单次散射缪勒矩阵特性

3.2.1 缪勒矩阵空间分布特性

利用(10)和(11)式可以计算得到气泡幕前向单次散射缪勒矩阵随相位角和极径的变化关系如图3

所示。计算时所取的参数为,气泡半径为 $80 \mu\text{m}$,水的吸收系数为 0.04 m^{-1} ,气泡数密度为 10^8 m^{-3} ,极径分别取 $3, 5, 8$ 和 10 mm ,其他参数选取与单个气泡相同。

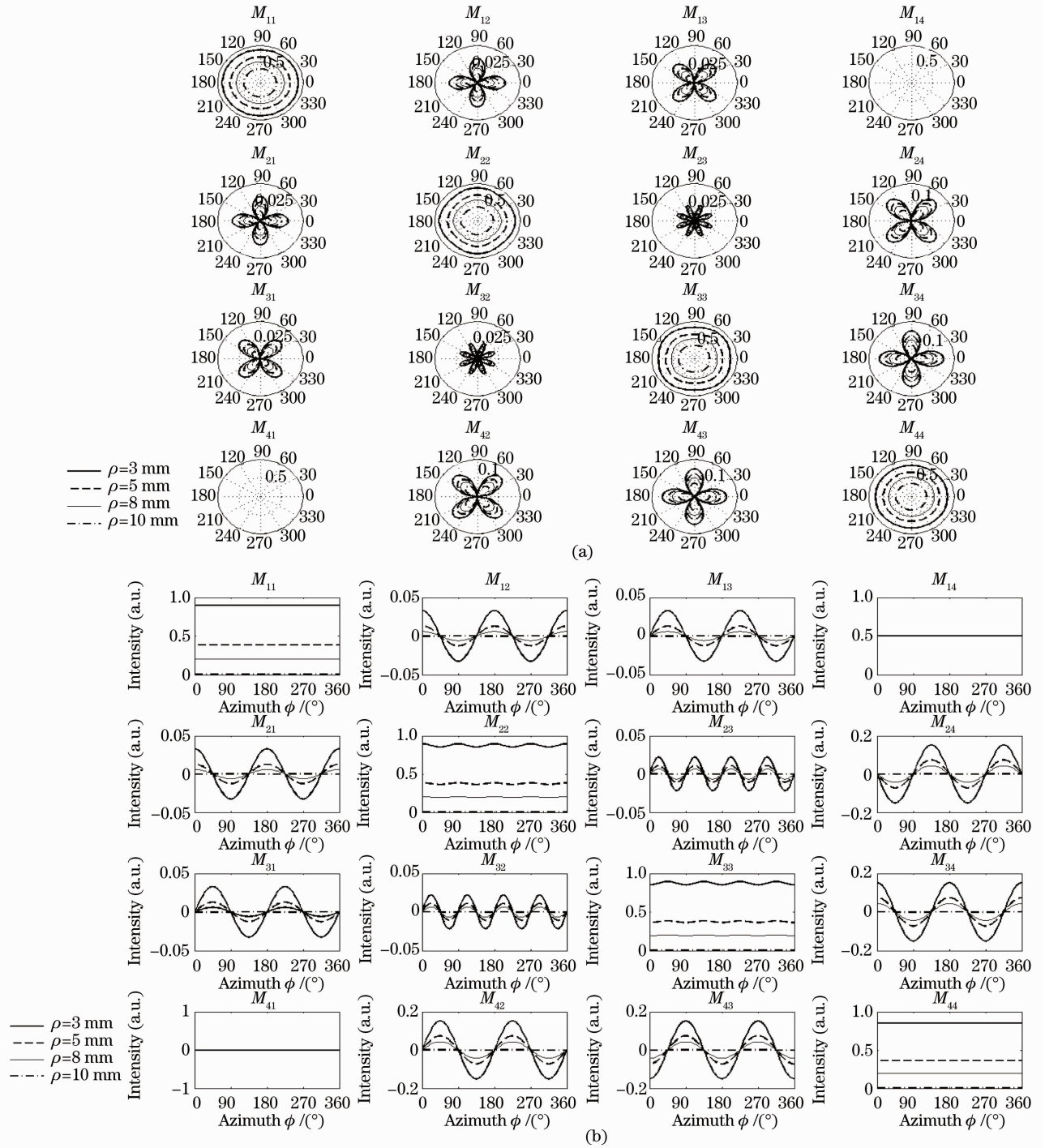


图 3 气泡幕前向单次散射穆勒矩阵空间分布。(a)极坐标系;(b)直角坐标系

Fig. 3 Spatial distribution of forward single-scattering Mueller matrix for bubbles. (a) Based on

Polar coordinates; (b) based on Cartesian coordinates

由图 3 可知,16 个矩阵元中 M_{11} 和 M_{44} 仅与径向 ρ 有关、与方位角 ϕ 无关,这与单个气泡穆勒矩阵元 m_1 和 m_3 随散射角变化是相似的; M_{12} 和 M_{21} , M_{13} 和 M_{31} 分布完全相同,当方位角在 0° 到 360° 发生变化时,其值发生周期为 180° 的变化; M_{23} 和 M_{32} 在二维平面内的分布也完全相同,方位角在 0° 到 360° 之间发生变化时,其值发生周期为 90° 的变化; M_{24} 和

M_{42} , M_{34} 和 M_{43} 的值相反,方位角在 0° 到 360° 之间发生变化时,其值发生周期为 180° 的变化; M_{14} 和 M_{41} 值为 0, M_{22} 和 M_{33} 随方位角的变化不明显。这与文献[10, 11]的结论一致,说明本文的算法可以用来进行偏振光尾流散射的模拟研究。

通过比较图 3 中不同极径矩阵元的数值,可以看出气泡幕前向单次散射穆勒矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 随

极径增大而指数衰减；有方位变化的矩阵元随方位角正弦振荡分布，振幅随极径增大指数衰减。存在负值是因为缪勒矩阵元是由斯托克斯矢量加减形成的。

3.2.2 不同半径气泡幕前向散射缪勒矩阵特性

图 4 为不同半径气泡幕前向散射缪勒矩阵分布特性，计算时气泡半径分别为 10, 40, 80 和 150 μm 。其他参数与 3.2.1 节计算时用到的参数值相同。

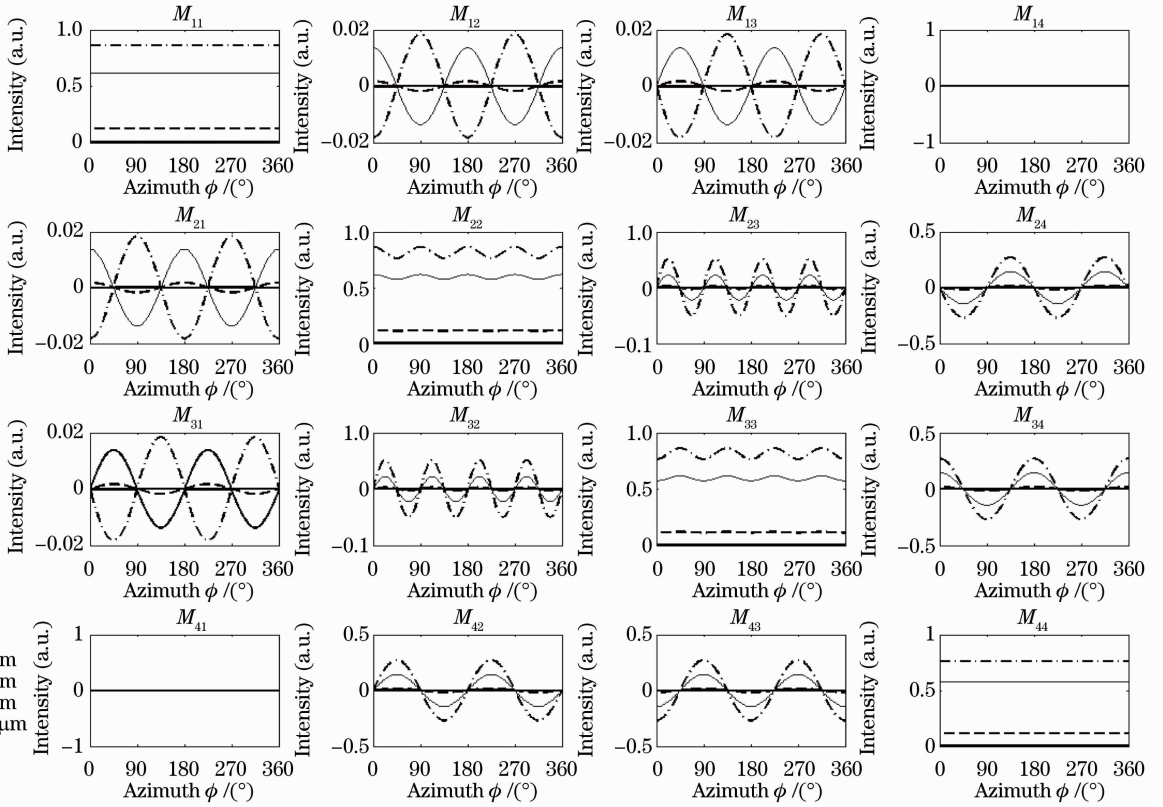


图 4 不同半径气泡幕前向散射缪勒矩阵分布

Fig. 4 Distribution of forward scattering Mueller matrix for different radius

由图 4 可以看出，当气泡半径在 10~150 μm 之间取不同值时，矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 随着气泡半径的增大而增大，近似符合指数增长规律；反映气泡幕二向色性的矩阵元， M_{12} , M_{13} 随方位角成正弦振荡分布，振幅随气泡半径增大而增大，小半径气泡和大半径气泡矩阵元 M_{12} , M_{13} 相位相反，因此反映气泡幕二向色性的矩阵元 M_{12} , M_{13} 对不同的气泡半径不仅可提供强度大小信息，还可以提供相位反转的信息； M_{23} , M_{24} 随方位角成正弦振荡分布，振幅随气泡半径增大而增大。 M_{22} , M_{33} 随半径的增大随方位角也逐渐表现出振荡特性，而且振幅随气泡半径增大而增大。

3.2.3 不同气泡数度缪勒矩阵元素特性

图 5 为不同数密度气泡幕前向散射缪勒矩阵分布特性。根据文献[15]中对 15 节(27.75 km/h)速度航行的驱逐舰尾流气泡的测量结果，驱逐舰驶过 1 min 后半径为 80~10000 μm 的气泡幕的数密度在 $6 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 以上，可以推得在相同条件下半径在

10~150 μm 的气泡数密度在 $2.12 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 以上。因此本文气泡数密度的考察范围为 $10^6 \sim 10^9 \text{ m}^{-3}$ 。计算时气泡数密度分别取为 2×10^6 , 6×10^6 , 2×10^7 , 6×10^7 和 4×10^8 , 6×10^8 , 8×10^8 , $1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 两组数密度区域的 8 个不同值，其他参数选取与 3.2.1 节计算时间用到的参数值相同。

从图 5(a)可以看出，在气泡数密度较小($10^6 \sim 10^8 \text{ m}^{-3}$)时，随着气泡数密度的增大，矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 随着气泡数密度的增加而增加；反映气泡幕二向色性的矩阵元 M_{12} , M_{13} 等随方位角成正弦振荡分布，振幅随气泡数密度增大而增大； M_{23} , M_{24} 随方位角成正弦振荡分布，振幅随气泡数密度增大而增大； M_{22} , M_{33} 随数密度的增大而增大，但随相位角振荡特性不明显。

从图 5(b)可以看出，在气泡数密度较大($10^8 \sim 10^9 \text{ m}^{-3}$)时，随着气泡数密度的增大，矩阵元 M_{11} , M_{44} 随着气泡数密度的增加而减小；反映介质二向色性的矩阵元， M_{12} , M_{13} 等随方位角成正弦振荡分

布,相位和数密度较小区域气泡幕相反,振幅随气泡数密度增加而减小; M_{23}, M_{24} 随方位角成正弦振荡分布,振幅随气泡数密度增大而增大; M_{22}, M_{33} 随数

密度的增大随方位角也逐渐表现出振荡特性,而且振幅随气泡数密度增大而减小。

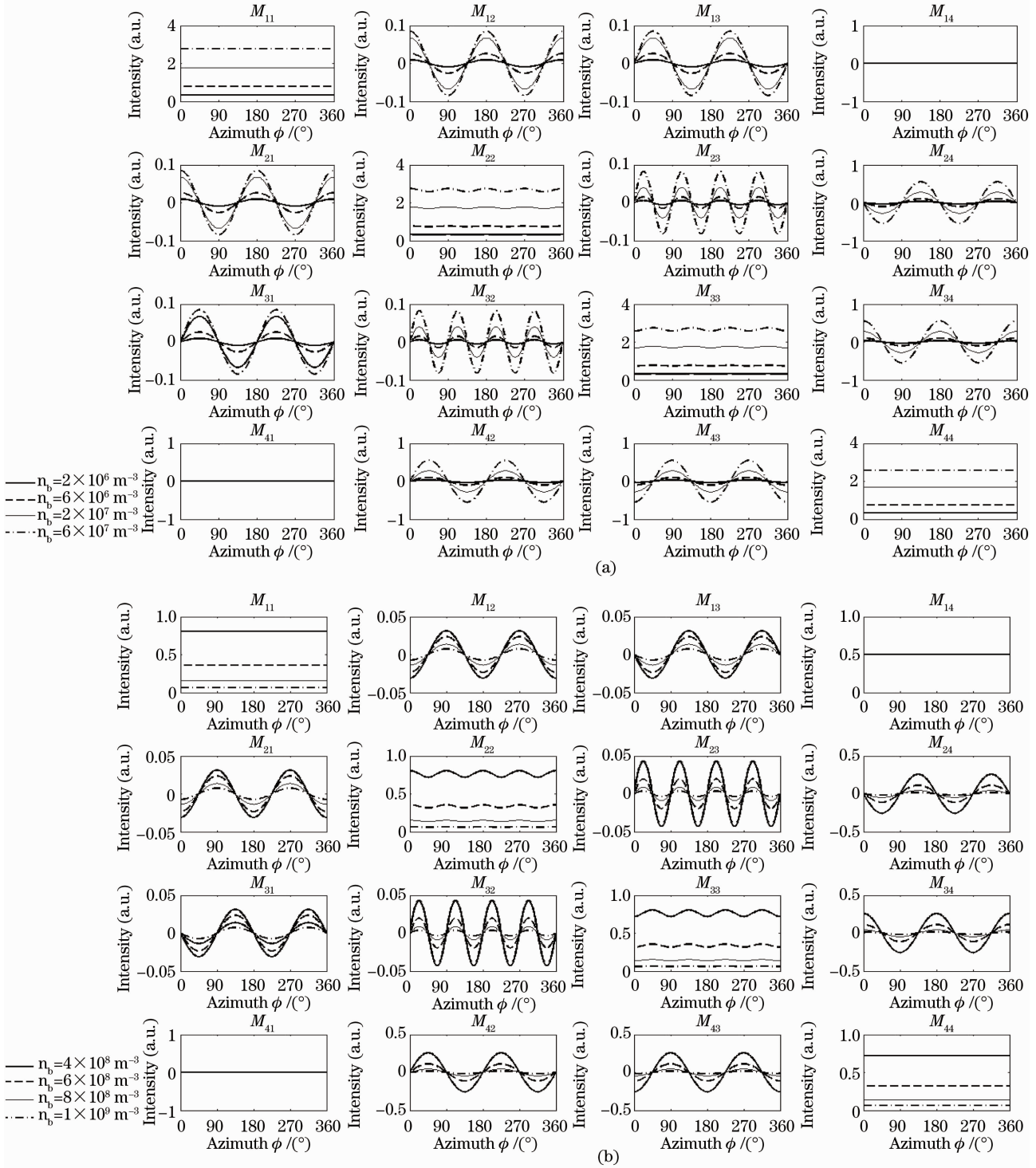


图 5 不同数密度气泡幕前向散射缪勒矩阵分布。(a)低数密度;(b)高数密度

Fig. 5 Distribution of forward scattering Müller matrix for different number density. (a) Low number density; (b) high number density

因此,气泡数密度在 $10^6 \sim 10^9 \text{ m}^{-3}$ 之间取不同值时,气泡幕前向散射缪勒矩阵元在气泡数密度为

10^8 m^{-3} 附近存在极大值,在极值点两侧缪勒矩阵元随数密度变化表现出相反特性:与相位角 ϕ 无关的

缪勒矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 在极值两侧随数密度变化趋势相反；随方位角 ϕ 正弦振荡分布的缪勒矩阵元 $M_{12}, M_{13}, M_{22}, M_{23}$ 和 M_{24} 在极值两侧振幅随数密度增加变化趋势相反；反映气泡幕二向色性的矩阵元， M_{12} 和 M_{13} 在极值两侧相位相反。反映气泡幕二向色性的矩阵元 M_{12}, M_{13} 对不同气泡数密度不仅可提供强度大小信息，还可以提供相位反转的信息。

4 结 论

以米氏散射理论为基础，计算了单个气泡米氏散射缪勒矩阵随散射角的分布特性，并结合单次散射理论构造出气泡幕前向单次散射理论模型，利用该模型计算分析了气泡幕前向单次散射缪勒矩阵的空间分布，以及矩阵元与气泡数密度、气泡半径之间的关系。研究表明，单个气泡米氏散射缪勒矩阵元 m_2 和 m_4 在前向 90° 存在较大振荡，且振荡幅度随半径增大而增大；气泡幕前向散射缪勒矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 无方位变化，有方位变化的矩阵元随方位角正弦振荡分布，各矩阵元随极径增大指数衰减；矩阵元 M_{11} 和 M_{44} 随着气泡半径的增大而增大，随方位角振荡分布的矩阵元振幅随气泡半径增大而增大；在气泡数密度为 10^8 m^{-3} 附近矩阵元存在极大值，在极值点两侧矩阵元随数密度变化特性相反；对于不同的气泡半径和数密度，矩阵元 M_{12} 和 M_{13} 不仅可提供强度大小信息，还可以提供相位反转的信息。

参 考 文 献

- Ji Bangjie, Zhou Deshan, Zhang Jiasheng. Control and guide torpedo based on optical effect of ship wakes[J]. *Torpedo Technology*, 2000, **31**(3): 29~31
冀邦杰, 周德善, 蒋建生. 基于舰船尾流光效应的制导鱼雷[J]. *鱼雷技术*, 2000, **31**(3): 29~31
- Sun Chunsheng. Investigation into the Forward Light Scattered by Ship Wakes and Its Detecting Technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 1~30
孙春生. 舰船气泡尾流的前向光散射特性及探测技术研究. 博士学位论文[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 1~30
- Shi Shengwei, Wang Jiangan, Jiang Xingzhou et al.. Analysis of scattering phase function and backscattering signal characteristic of bubble films in ship wake[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1862~1866
石晟玮, 王江安, 蒋兴舟等. 舰船尾流气泡层散射相位函数及其后向散射信号特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1862~1866
- Sun Chunsheng, Zhang Xiaohui, Zhu Donghua. Energy distribution properties of light scattered by far ship wakes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2006~2009

- 孙春生, 张晓晖, 朱东华. 舰船远程尾流的散射光能量分布特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 2006~2009
- Zhao Weijiang, Su Liping, Ren Deming et al.. Measurement on the angular scattering properties of wake bubbles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 744~747
赵卫疆, 苏丽萍, 任德明. 尾流气泡激光散射的测量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 744~747
- Su Liping, Zhao Weijiang, Ren Deming et al.. Processing methods for laser scattering signals of bubbles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 814~818
苏丽萍, 赵卫疆, 任德明等. 气泡激光散射信号处理方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 814~818
- Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wakes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 14~18
王向伟, 周田华, 陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 14~18
- Cheng Tianhai, Gu Xingfa, Chen Liangfu et al.. Multi-angular polarized characteristics of cirrus clouds[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 5323~5332
程天海, 顾行发, 陈良富等. 卷云多角度偏振特性研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 5323~5332
- Zhou Guahua, Liu Zhigang, Liu Qinhua et al.. Polarization information of ocean color remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, **12**(2): 322~330
周冠华, 刘志刚, 柳钦火等. 水色遥感中偏振信息的研究进展[J]. *遥感学报*, 2008, **12**(2): 322~330
- Cameron B. D., Rakovic M. J., Mehrbeoglum et al.. Measurement and calculation of the two-dimensional backscattering Mueller matrix of a turbid medium[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 485~487
- Ma Lizhen, Shi Peng, Zhang Wenzhao et al.. New forward scattering model for polarized light propagating in atmosphere[J]. *J. Appl. Opt.*, 2010, **31**(3): 503~507
马丽珍, 史鹏, 张闻钊等. 偏振光大气传输的前向散射新模型[J]. *应用光学*, 2010, **31**(3): 503~507
- Deng Yong. Polarization Method for Morphological Feature Recognition of Epithelial Tissue [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 83~97
邓勇. 上皮组织形态特征识别中的偏振方法研究[D]. 武汉华中科技大学, 2005. 83~97
- Zhang Lianshun, Tian Jianguo, Wen Hongsheng et al.. Polarized light Backscattering Mueller Matrix pattern from Biological tissue [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2007, **40**(4): 46~51
张连顺, 田建国, 温宏胜等. 生物组织对偏振光背向散射 Mueller 矩阵的分布[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2007, **40**(4): 46~51
- Xu Lanqing, Li Hui, Xie Shusen. Backscattered Mueller matrix patterns of optically active media and its application in noninvasive glucose monitoring [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 6024~6029
徐兰青, 李晖, 谢树森. 手性介质中后向散射米勒矩阵特性及其在血糖无创检测中的应用初探[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 6024~6029
- Sun Chunsheng, Zhang Xiaohui, Zhu Donghua. Influence of bubbles number density on measurement of beam attenuation in ship wakes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1516~1519
孙春生, 张晓晖, 朱东华. 气泡数密度对尾流光束衰减测量的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1516~1519