

船舶尾流模拟气泡的前向光散射特性研究

李能能

(西安航空学院 电子工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要: 传统船舶散射分析模型不能有效描述气泡的感知能力。为解决此问题, 设计基于船舶尾流模拟气泡的 Mie 前向光散射分析模型。通过散射元中波研究、衰减周期确定 2 个步骤, 完成船舶尾流模拟气泡散射属性分析。在此基础上, 通过散射系数确定、前向光与模拟气泡高斯拟合、反演参数确定 3 个步骤, 完成新型船舶 Mie 前向光散射分析模型的搭建。设计对比实验结果显示, 与传统模型相比, Mie 分析模型可以有效提升船舶尾流模拟气泡在横、纵 2 个方向的感知能力。

关键词: 船舶尾流; 模拟气泡; 前向光散射; 散射元中波

中图分类号: TP391 文献标识码: A

文章编号: 1672 - 7649(2018)8A - 0016 - 03 doi: 10.3404/j.issn.1672 - 7649.2018.8A.006

Study on forward light scattering characteristics of simulated bubbles in ship wake

LI Neng-neng

(School of Electronic Engineer, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Traditional ship scattering analysis model can not effectively describe bubble perception ability. To solve this problem, a Mie forward light scattering analysis model based on ship wake simulation bubble is designed. Through scattering medium wave research and attenuation cycle determination two steps, complete the ship wake simulation bubble scattering attribute analysis. On this basis, through the scattering coefficient determination, the forward light and simulated bubble Gauss fitting, the inversion parameters to determine three steps to complete the new model of the Mie forward light scattering analysis of the ship. The experimental results show that, compared with the traditional model, the Mie model can effectively improve the perception of the two directions of the bubble in the transverse and longitudinal directions.

Key words: ship wake; simulate bubbles; forward light scattering; scattered element medium wave

0 引 言

船舶尾流气泡是一种典型的声学特征现象。当空气中的声波发生改变时, 船舶尾流对气泡的吸收情况也会随之发生改变, 此时通过分析空气声波的振动特点即可得到船舶尾流气泡的散射属性。通常情况下, 根据声学变化规律、温度分布情况等属性的不同, 可将船舶尾流分为浑浊度尾流、热尾流、磁尾流、声尾流、放射性尾流、气泡尾流 6 种。其中气泡尾流是最为常见的船舶尾流形式, 且这种尾流中存在的模拟气泡通常具有较强的前向光散射特性。传统分析方法通过多次分析单个模拟气泡的散射特性, 得到气泡群散射特性, 并通过确定气泡群散偏振特性、能量分布特

性的方式, 达到强化前向散射修正参数的目的^[1]。对于计算过程中产生的脏气泡, 传统方法采取部分忽略的处理态度, 进而使船舶尾流模拟气泡的散射密度逐渐趋于稳定。但随着科学技术手段的发展, 这种方法逐渐显示出气泡感知能力描述准确性有限等弊端, 为解决此问题, 引入 Mie 散射原理, 通过拟合前向光与船舶尾流模拟气泡的方式建立一种新型分析模型。根据对比实验结果可知, 该新型船舶尾流模拟气泡前向光散射分析模型确实具备较强的实用性价值。

1 船舶尾流模拟气泡散射属性分析

船舶尾流模拟气泡散射属性分析过程包括散射元中波研究、衰减周期确定 2 个步骤。

收稿日期: 2018 - 06 - 13

作者简介: 李能能(1983 -), 女, 硕士, 助教, 研究方向为表面声波的光学检测及太阳能电池。

1.1 散射元中波研究

散射元中波是描述船舶尾流模拟气泡前向光属性的理论基础。在散射元中波理论中，船舶尾流模拟气泡的存在方程称为微分传输方程，前向光的辐射亮度是该方程中的变化常量。当空气中的声波发生改变时，船舶尾流模拟气泡的存在状态会发生改变，此时由这些气泡散射出的能量综合也会随之减小，光束在尾流气泡中不能保留固有的传输特性^[2]。散射元中波与船舶尾流模拟气泡同时出现，且二者始终保持相同的变化趋势，进而可以通过确定船舶尾流散射元中波的方式，代替复杂的模拟气泡存在状态确定步骤。具体运算公式如下：

$$f = 3\mu\alpha \frac{\exp(\kappa^2 u^2)}{l}, \quad (1)$$

其中， f 为船舶尾流散射元中波的稳定状态值； μ 为模拟气泡的输出周期； α 为前向光的散射变换角度； κ 为模拟气泡存在状态参数； u 为光束传播常量； $\exp(\kappa^2 u^2)$ 为船舶尾流散射元中波的固定求值算法； l 为 2 个模拟气泡输出周期的间隔时长。

1.2 模拟气泡在船舶尾流中的衰减周期确定

模拟气泡在船舶尾流中的衰减周期与前向光散射因子、透射密度等多个数值保持正向相关关系。在常温条件下，船舶尾流散射元中波的稳定参数会随着模拟气泡总含量的增加而降低。当前向光散射角度增加时，由船舶尾流模拟气泡发出的振动波长也会随之增加，此时光束传播常量等数值会产生明显的下降状态，进而使散射元中波的振动波长变为原有波长的几倍至几十倍不等。而模拟气泡在船舶尾流中的衰减周期与散射元中波振动波长保持反比关系，随着波长的增加，衰减周期呈现逐渐缩减的变化趋势。具体数值确定结果如下：

$$Z(f) = \frac{f^2}{n\chi} \cdot \frac{ws}{5\alpha^2}, \quad (2)$$

其中： Z 为模拟气泡在船舶尾流中的衰减周期； n 为前向光散射角度的变化次数； χ 为光波的散射密度； w 为散射亮度参数； s 为发生衰减行为的模拟气泡总量。

2 Mie 前向光散射分析模型的建立

在船舶尾流模拟气泡散射属性分析的基础上，可通过散射系数确定、反演修正等步骤，完成船舶 Mie 前向光散射分析模型的建立。

2.1 模拟气泡散射系数的确定

模拟气泡散射系数确定是新型 Mine 分析模型搭建的关键步骤。当船舶尾流中包含大量脏气泡时，模拟气泡的散射情况回收到一定影响，且脏气泡群会发生较强折射反应，在一定程度上降低前向光的散射波动极限值。而模拟气泡散射的系数在前向光的逆变周期中呈现规律性变化趋势，且其数值大小也不会随着前向光与尾流模拟气泡的拟合程度而发生变化^[3]。这也变相降低脏气泡折射反应对散射波动极值的影响。假设脏气泡数量为 M ，模拟气泡数量为 Q ，在前向光发生稳定散射的条件下，可将船舶尾流模拟气泡的散射系数表示为：

$$R(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} Q \cdot \pi y^2 dy - Z \int_{-\infty}^{+\infty} M \cdot \pi e^2 de, \quad (3)$$

其中， R 为船舶尾流模拟气泡的散射系数； π 为前向光的散射回归常量； y 为与模拟气泡相关的散射波动变量； e 为与脏气泡相关的散射波动变量。

2.2 前向光与尾流模拟气泡的高斯拟合

前向光与船舶尾流模拟气泡的高斯拟合充分利用散射系数的稳定性，并在此基础上以一种微体积元思想描述光粒子的空间分布特性。这种描述方法不需复杂的气泡群相函数计算过程，且在船舶尾流波动幅度不稳定的情况下，前向光束在气泡群中的传输特性也能得到完美体现^[4]。传统分析模型需要依靠光束辐射功率解析仪获取船舶尾流气泡的散射曲线，并通过高斯近似限定函数计算该曲线的波动上、下限数值，通过计算波峰、波谷间的位移相差得到前向光散射元的能量扩散角度，进而达到确定船舶尾流模拟气泡散射特性的目的。但这种方法的计算过程相对较为复杂，且不能明确表示每种散射元的微小扩散角度。为解决此问题，新型分析模型引入 Mie 理论完成船舶尾流模拟气泡的粒子相函数计算，在此基础上，通过不断缩短前向光散射角度的方式，确定最为合适的高斯拟合形式。具体拟合过程如图 1 所示。

2.3 反演分析系数的修正

为保证基于船舶尾流模拟气泡 Mie 前向光散射分析模型的顺利运行，还需在 Beer-Lambert 定律的支持下，对反演分析参数进行修正处理。Beer-Lambert 定律从固定光信号拟合角度推导测量误差因子的表达式，并通过调整尾流气泡尺度分布情况的方式，完成前向光束中无效信号的减除处理。这种反演分析参数的修正方式在一定传输过程中，可以保证模型始终较高的分析准确性，且能够有效提升气泡感知能力在横、纵 2 个方向上的兼容属性。具体反演分析系数的修正方

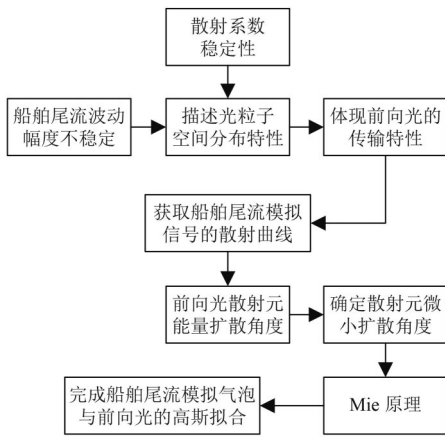


图 1 前向光与尾流模拟气泡的高斯拟合流程图
Fig. 1 Gauss fitting flow chart of forward light and wake simulation bubble

法如下式：

$$i = sR(Z) \cdot e. \tag{4}$$

式中， i 为反演分析修正系数； s 为前向光在横向维度上的散射特性参数； e 为前向光在纵向维度上的散射特性参数。

3 实验结果与分析

为验证基于船舶尾流模拟气泡 Mie 前向光散射分析模型的实用价值，设计如下对比实验。以 2 台配置完全相同的计算机作为实验对象，其中一台搭载新型分析模型作为实验组，另一台搭载传统分析模型作为对照组。

3.1 船舶尾流模拟气泡横向感知系数对比

图 2 反映了实验组、对照组模型描述船舶尾流模拟气泡横向感知能力的对比情况。

分析图 2 可知，随着船舶尾流模拟气泡数量的增加，对照组横向感知系数呈现平稳的波动状态，船舶尾流模拟气泡数量为 3.47 T 时，传统模型描述出的横向感知系数达到最大值 0.45；实验组横向感知系数呈现明显的波动状态，船舶尾流模拟气泡数量为 5.21 T 时，新型模型描述出的横向感知系数达到最大值 0.98，远超对照组。所以，可证明应用基于船舶尾流模拟气泡 Mie 前向光散射分析模型后，可以提升 46% 的横向感知能力。

3.2 船舶尾流模拟气泡纵向感知系数对比

图 3 反映了实验组、对照组模型描述船舶尾流模拟气泡横向感知能力的对比情况。

分析图 3 可知，随着船舶尾流模拟气泡数量的增加，对照组横向感知系数呈现先上升、再下降的变化趋势，船舶尾流模拟气泡数量为 4.32 T 时，传统模型

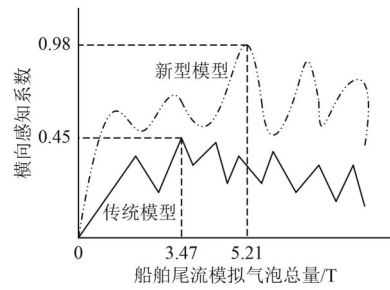


图 2 船舶尾流模拟气泡横向感知系数对比图
Fig. 2 Comparison of transverse perception coefficient of ship wake simulation bubble

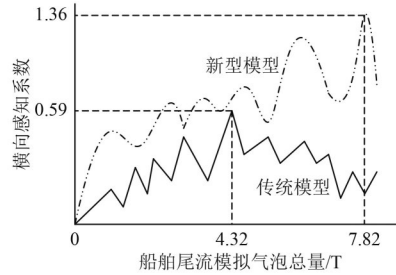


图 3 船舶尾流模拟气泡纵向感知系数对比图
Fig. 3 Comparison of longitudinal perception coefficients of simulated bubbles in ship wake

描述出的纵向感知系数达到最大值 0.59；实验组横向感知系数呈现逐渐上升的变化趋势，船舶尾流模拟气泡数量为 7.82 T 时，新型模型描述出的纵向感知系数达到最大值 1.36，远超对照组。所以，可证明应用基于船舶尾流模拟气泡 Mie 前向光散射分析模型后，可以提升 43% 的横向感知能力。

4 结 语

基于船舶尾流模拟气泡 Mie 前向光散射分析模型在保留传统模型应用优势的基础上，针对不足之处进行有效改进设计，且对比实验结果也证明该新型模型确实具备较强应用前景。

参考文献：

- [1] 田琪琛, 李智, 徐灿, 等. 基于实验测量与 OCS 仿真计算的卫星光学散射特性对比验证[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 165-171.
- [2] 曹慧, 高隽, 王玲妹, 等. 微粗糙基底上多层涂层光散射偏振建模与特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 640-647.
- [3] 陈思, 童晓茜, 何荟文, 等. 基于“丝瓜络”3D 凝胶网络超强液晶物理凝胶的可拉伸光散射显示器件[J]. 中国材料进展, 2016, 35(5): 361-364.
- [4] 童晓茜, 单天宇, 马猛, 等. 基于含 POSS-dendrimer 超强液晶凝胶的柔性可拉伸液晶光散射显示器[J]. 高分子学报, 2017, 14(10): 1652-1661.