

# 基于舰船尾流激光雷达的 Monte Carlo 模型及方差消减方法研究\*

梁善勇<sup>1)†</sup> 王江安<sup>1)</sup> 张峰<sup>1)</sup> 吴荣华<sup>1)</sup> 宗思光<sup>1)2)</sup> 王雨虹<sup>1)</sup> 王乐东<sup>1)</sup>

1) (解放军海军工程大学电子工程学院通信系, 武汉 430033)

2) (中船重工第七一七研究所, 武汉 430033)

(2012年6月11日收到; 2012年8月8日收到修改稿)

对舰船尾流激光散射机理及探测过程的数值模拟是研究舰船尾流激光探测与制导的重要基础. 首先分析了 Monte Carlo 方法引入到尾流激光雷达数值模拟领域研究的可行性. 结合自行研制的尾流激光雷达实际参数, 建立了尾流激光探测的 Monte Carlo 数值仿真模型. 通过对仿真结果进行统计, 深入剖析了仿真结果方差大及光子利用率低等问题的成因. 为解决该问题, 基于有偏采样理论和分裂-轮盘赌基本原理提出了接收光学视场内光子强行碰撞方法和以光子自由程总长度为准则的光子分裂方法, 并进行了两方法的融合. 仿真与实验结果的对比分析表明, 提出的模型仿真结果与实验数据符合较好, 验证了模型的正确性; 提出的接收光学视场内光子强行碰撞方法和光子分裂方法能有效减小方差并提高光子利用率; 解决了 Monte Carlo 方法引入到尾流激光雷达模拟过程中的适用性问题.

**关键词:** Monte Carlo, 激光雷达, 方差消减, 气泡

**PACS:** 52.65.Pp, 02.50.Ng, 42.68.Sq, 47.55.Dz

**DOI:** 10.7498/aps.62.015205

## 1 引言

舰船尾流气泡是由螺旋桨空化、船体吃水线部分空气卷入等原因引起的, 它标注了舰船在水面运动的航迹<sup>[1]</sup>. 远场舰船尾流主要以 160  $\mu\text{m}$  以下的小尺度、低密度气泡为主<sup>[1,2]</sup>. 传统声自导鱼雷很难对其进行探测, 而水下激光雷达利用激光的超短波高灵敏特性可对尾流进行高精度探测. 该技术可用于新型激光自导鱼雷, 可实现更远距离的跟踪和制导. 另外, 尾流激光雷达还具有对抗能力强、受海洋环境影响小、同时具备反舰反潜性能等诸多优点, 具有重要的军事意义<sup>[2-5]</sup>.

目前, 对舰船尾流激光探测机理的研究方法主要有单次散射近似法<sup>[6]</sup>、离散坐标法<sup>[7]</sup>、辐射传输方程<sup>[8]</sup>和 Monte Carlo 方法<sup>[9]</sup>等. 单次散射近似模拟条件是衰减系数与传输距离之积小于 0.1, 而文献<sup>[10]</sup>通过实测指出即使是未考虑尾流存在的

清洁海水, 其在 514 nm 波长处的衰减系数也大于  $0.037 \text{ m}^{-1}$ , 因此该条件实际上很难满足. 离散坐标法只适用于直视条件下的光传输模拟, 很难处理水下高散射媒质的三维多重散射问题<sup>[7]</sup>. 辐射传输方程主要用于研究前向光传输, 对后向  $180^\circ$  散射的求解精度较差<sup>[8]</sup>. 基于随机抽样的 Monte Carlo 方法的优势在于可对水下等高散射媒质的三维深穿透问题进行研究, 并可同时考虑尾流、水体的多重散射效应<sup>[11,12]</sup>.

在尾流激光探测数值模拟这一研究领域, 文献<sup>[13,14]</sup>的研究成果比较有代表性, 利用 Monte Carlo 方法分别研究了机载海洋测深激光雷达的多次散射、脉冲展宽和辐射传输等方面的问题. 但这些研究成果只适用于视场立体角  $\Omega_r$  和接收空间  $V_r$  较大并且探测距离  $L_r$  较远的情况. 由于尾流激光雷达将搭载于光自导鱼雷雷体且工作于高散射的水下, 考虑体积及对水中杂质杂散光的抑制等问题,  $\Omega_r$  和  $V_r$  都被设计得极小, 且  $L_r$  只设计为 30 m, 上

\* 装备预研基金项目 (批准号: 9140A26030110JB11) 和国家自然科学基金 (批准号: 51109217) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: laser\_ocean@yeah.net

述方案在近距离、强衰减和强散射的水下应用背景下使用困难较大. 到目前为止, 没有适用于水下尾流激光雷达的成熟的 Monte Carlo 模拟解决方案.

本文结合自行研制的尾流激光雷达, 建立了尾流激光探测的 Monte Carlo 数值仿真模型, 剖析了仿真结果方差大及光子利用率低等问题的成因, 提出了提高 Monte Carlo 光子利用率及减小计算方差的方法, 最终解决了 Monte Carlo 方法引入尾流激光雷达模拟过程中的适用性问题.

## 2 尾流激光雷达简介

本单位自行研制的舰船尾流激光雷达系统样机<sup>[15]</sup>如图 1 所示. 该样机分水下探测器和水上数据处理系统两部分. 前者位于海水中, 利用其内置的脉冲激光器、接收器、同轴光学系统和高速采集卡等模块, 接收激光与气泡尾流发生散射产生的富含尾流信息的后向散射光, 从而实现对尾流的高精度探测. 后者位于测量船甲板上, 用于对尾流激光回波信号进行实时数据处理及监控水下探测器工作状态. 尾流激光雷达系统样机的设计探测距离 30 m, 激光波长 532 nm, 脉宽 10 ns, 探测精度 0.281 m, 锂电池持续供电时间 3 h.



图 1 舰船尾流激光雷达系统样机 (左: 水下探测器; 右: 水上数据处理系统)

## 3 Monte Carlo 方法的引入

### 3.1 尾流光散射模拟的 Monte Carlo 方法引入

描述激光在舰船尾流中的多重散射和传输事件的 Monte Carlo 模拟, 是建立在水体散射相函数随机抽样理论的基础上, 忽略光的相干性, 对后向 180° 散射回波信号强度 - 时间特性进行求解的过程<sup>[16]</sup>. 其本质是利用光束的粒子性, 将其等效为由

很多光子组成的光子束, 从而将光的传输问题转化为光子的传输问题. 根据介质粒子性质的不同, 碰撞时可能发生吸收或者散射. 若光子被吸收则该光子的运动终止, 如果光子发生散射, 则遵从标量相位函数或体积散射函数随机地改变它的运动方向. 因此众多光子运动的统计平均就体现了光在尾流中的传输和散射规律<sup>[17]</sup>.

### 3.2 引入过程中出现的问题及成因剖析

考虑到鱼雷导引头体积的限制, 又同时考虑到其工作环境是高散射的水下, 为抑制水中杂质的杂散光, 接收物镜半径  $R_s = 50$  mm, 发散角  $\alpha_f$ , 视场角  $\alpha_s$  取值都很小. 表 1 给出了  $\alpha_s = 2$  mrad 条件下, 传统 Monte Carlo 仿真得到的接收光子数量的统计结果. 从表 1 数据可知, 较小的  $R_f$ ,  $R_s$ ,  $\alpha_f$  和  $\alpha_s$  参数使光子能返回接收物镜从而形成回波能量的概率微乎其微. 这主要是因为: 1) 绝大多数光子在与水介质不断碰撞的过程中随着权重  $\omega_0$  的不断减小而最终被吸收; 2) 一些光子被散射出观测视场无法被接收. 总之, 返回的光子由于采样点过少而无法形成回波能量, 使 Monte Carlo 仿真因缺乏宏观统计特性而失败.

表 1 仿真接收光子的数量统计

序号	1	3	4	5	6	7
发射光子总数/个	$10^1$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
返回光子数量/个	0	0	0	1	2	30
光子利用率/%	0	0	0	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$

为解决上述问题, 利用文献 [17] 提出的改进型光子收集方法, 即认为接收视场内光子的所有碰撞都对回波信号有贡献, 从而提高了光子利用率. 但文献 [17] 的方法对精度的改善程度有限, 仍需改进. 其原因为:

1) 由光子自由程抽样函数  $\Delta l = -\ln(\xi)/\mu_t$  可知, 光子随机行走步长通常比较长  $\Delta l \in (0, +\infty)$ , 再加上较小的视场角, 使光源发射的光子在接收视场内某点处只发生一次散射就弹出接收视场的概率非常大, 造成仿真结果会低估 2 次及多次散射对回波信号形成所做的贡献, 如图 2 中路径  $a \rightarrow b \rightarrow c$ , 使返回光子的样本数较低, 方差较大, 仿真精度低;

2) 光子到达的距离越远, 视场区域就越大, 如图 2 中区域  $\Delta V_1 < \Delta V_2 < \dots < \Delta V_m$ , 从而远距离光子行走的路径多样性就增加, 远场光子返回接收物

镜在时间上就更加离散, 随时间的后移, 单位时间收集到的返回光子样本数更小、方差更大; 其次, 由于光子多次发生碰撞后将引起光子权重迅速减小, 而权重小于阈值  $10^{-7}$  的光子最终将被吸收, 因此能到达远距离视场区域  $\Delta V_m$  的光子占光子总数的比例非常小, 其中能在该区域发生碰撞并对回波信号产生贡献的数量就更少, 总之随着距离的增加, 返回光子的样本数急剧减小, 逐渐失去统计特性, 方差增大, 因此仿真精度随距离增加而迅速下降; 再次, 远距离返回的少量光子对回波信号贡献的问题属于小概率大贡献问题, 方差较大, 结果不可信.

因此对尾流激光雷达回波信号的仿真, 使用传统 Monte Carlo 方法无法得到能量 - 时间的精确分布, 仍需研究进一步提高 Monte Carlo 结果精度的方法.

## 4 方差消减方法

### 4.1 接收光学视场内光子强行碰撞方法的提出

为解决上述问题 1), 提出了接收光学视场内光子强行碰撞方法, 仿真示意如图 2,  $Q_1$  为接收透镜,  $a-c$  和  $P_n$  为光子碰撞点,  $\rightarrow$  表示光子行进方向,  $\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_m$  表示接收视场体积分块.

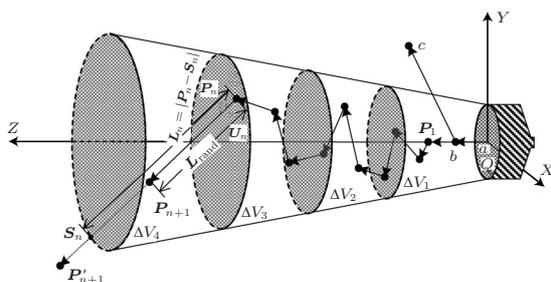


图 2 接收光学视场内光子强行碰撞方法的仿真示意图

设光子的第  $n$  个碰撞点坐标为  $P_n$ , 如图 2, 利用抽样函数 [18] 计算光子接下来的散射方向  $U_n$  和自由程  $\Delta l$ , 而  $U_n$  和  $\Delta l$  确定的散射点  $P'_{n+1}$  可能逃离出视场体积, 特别在稀疏尾流的小衰减系数条件下, 光子在  $b$  处只发生一次散射就弹出视场体积的概率非常大, 使返回光子的样本数减少. 本方法首先将自由程抽样的概率密度函数有偏化, 目的是强迫光子下一碰撞点  $P_{n+1}$  处于视场体积内, 然后在光子收集时乘以相应权重  $W(L_n)$ , 从而抵

消概率密度函数有偏化所引入的抽样偏差, 通过提高接收光子的样本数来提高 Monte Carlo 模拟精度 [19]. 计算过程为, 计算由  $P_n$  和  $U_n$  所确定的射线与接收视场边界的交点坐标  $S_n$ , 并求解  $P_n$  与边界交点  $S_n$  的长度  $L_n = |P_n - S_n|$ . 已知光子在光学路径长度  $l$  和  $l + dl$  之间被吸收和散射出光束的概率  $p(l)dl = e^{-l}dl$ , 传统 Monte Carlo 认为光子在前后两个碰撞点  $P_n$  和  $P_{n+1}$  之间行进的概率密度函数  $p(L) = \mu_t \exp(-\mu_t L)$ , 碰撞点的路径长度为  $L_{rand} = -\ln(1 - \xi)/\mu_t$ , 若强迫光子碰撞点位于接收视场内, 则认为 [19]

$$p(\mu_t L_{rand}) = \mu_t \exp(-\mu_t L_{rand})/C_1, \quad (1)$$

其中  $\mu_t$  表示尾流的衰减系数,  $C_1$  表示归一化强度, 其表达式可写为

$$C_1 = \int_0^{L_n} \mu_t \exp(-\mu_t l) dl = 1 - \exp(-\mu_t L_n), \quad (2)$$

因此接收视场内强迫碰撞方法的自由程抽样函数为

$$L_{rand} = -\ln(1 - C_1 \cdot \xi)/\mu_t, \quad (3)$$

相应权重表达式为

$$W(L_n) = 1 - e^{-\mu_t L_n}. \quad (4)$$

### 4.2 以光子自由程总长度为准则的光子分裂 - 轮盘赌方法

为解决上述问题 2), 提出了一种以光子自由程总长度为准则的分裂 - 轮盘赌算法. 将光子运动自由程总长度按从小到大划分并赋予逐渐增大的重要性权重, 然后采用光子分裂的策略将更多数量的光子引到远场区, 同时采用轮盘赌方法 [20] 降方差, 提高效率, 给出了一种针对远距离回波信号的 Monte Carlo 精度提升的计算策略.

用  $S = (P, U, W, L_{sum}, M_{orig}, N_{lad})$  表征发射的一个光子经过分裂后驻留在接收视场内的所有光子的状态, 其中  $P$  和  $U$  是  $n \times 3$  阶二维矩阵, 记录了分裂后的  $n$  个总光子数的光子碰撞坐标和运动方向矢量的历史.  $L_{sum}, M_{orig}, N_{lad}$  是  $n$  维数组, 分别表示当前  $n$  个光子的运动自由程总长度、分裂父光子的序号、分裂父光子的层数. 基本算法如下.

#### 1) 兴趣区域分割

将第  $i$  个光子行进的总自由程  $L_{sum}(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  以  $\Delta L$  划分为  $N$  个不同重要性的兴趣区

$[L_i, L_{i+1}]$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), 其中  $\Delta L = L_{i+1} - L_i$ . 并按照  $I_m = \kappa^m$  的概率设定区间  $[L_i, L_{i+1}]$  内光子的权重, 用于表征光子在该长度区间上的重要性. 为实现改善远距离回波信号精度的目标, 这里因子  $\kappa$  取  $\kappa > 1$  的值, 从而设定了对远距离区域的感兴趣程度高于近距离区域.

## 2) 光子分裂或轮盘赌

当光子  $S_i$  的总自由程与返回路径和从  $[L_i, L_{i+1}]$  进入到下一区间  $[L_{i+1}, L_{i+2}]$  时, 将对进入区域  $[L_{i+1}, L_{i+2}]$  的光子  $S_i$  进行一次分裂或轮盘赌.

针对光子第  $im$  个散射点, 可能运用分裂或轮盘赌两种策略之一<sup>[19,20]</sup>, 取决于当前光子  $S_{im}$  与其父光子  $S_{M_{\text{Orig}}(im)}$  各自所在感兴趣区间的重要性  $\kappa^m$  比率  $\lambda(im)$ , 即

$$\lambda(im) = \frac{\kappa^{\text{Floor}[L_{\text{sum}}(im)/\Delta L + 1]}}{\kappa^{\text{Floor}[L_{\text{sum}}(M_{\text{Orig}}(im))/\Delta L + 1]}}, \quad (5)$$

式中,  $M_{\text{Orig}}(im)$  为第  $im$  个光子的父光子的序号, Floor 表示下取整运算.

当  $\lambda(im) \geq 1$  时, 对该光子进行一次分裂, 分裂数的数学期望为  $\lambda(im)$ . 因为理论上利用 (5) 式计算得到的  $\lambda(im)$  存在非整数的可能性, 而 Monte Carlo 需要其取整, 这里采用随机抽样的方法保证  $E\{N_{\text{split}}(im)\} = \lambda(im)$ , 分裂点  $N_{\text{split}}(im)$  的随机抽样可表示为<sup>[19,20]</sup>

$$N_{\text{split}}(im) = \text{int}[\lambda(im) + \xi], \quad (6)$$

式中,  $\xi$  为  $[0, 1]$  均匀分布的随机数, int 表示取整运算. 分裂后的光子权重被赋予为

$$W(j) = \frac{W(im)}{N_{\text{split}}(im)}. \quad (7)$$

从 (6) 式可知, 分裂后产生的  $N_{\text{split}}(im)$  个光子总的权重之和仍然是  $W(im)$ .

对光子第  $S_i$  层中的全部光子按 (6) 式抽样, 理论上分裂总数的数学期望可表示为<sup>[20]</sup>

$$\begin{aligned} & E \left\{ \sum_{im=ii}^{jj} N_{\text{split}}(im) \right\} \\ &= E \left\{ \sum_{im=ii}^{jj} \text{int} \left[ \frac{L_{\text{sum}}(im)}{L_{\text{sum}}(M_{\text{Orig}}(im))} + \xi \right] \right\} \\ &= \sum_{im=ii}^{jj} E \left\{ \text{int} \left[ \frac{L_{\text{sum}}(im)}{L_{\text{sum}}(M_{\text{Orig}}(im))} + \xi \right] \right\} \\ &= \sum_{im=ii}^{jj} \left\{ \frac{L_{\text{sum}}(im)}{L_{\text{sum}}(M_{\text{Orig}}(im))} \right\} = nx. \end{aligned} \quad (8)$$

当  $\lambda(im) < 1$  时, 进行一次获胜概率为  $\lambda(im)$  的轮盘赌, 如果获胜, 光子的权重更新为  $W(im)/\lambda(im)$  的值, 否则该光子死亡. 实际上这种情况下的光子权重都比较小, 因此大部分光子在离开感兴趣区域后就被杀掉, 从而大大缩短了计算时间, 而本方法也保证了输运历史的无偏性.

综上, (5) 式的随机抽样确保了任一次光子分裂的概率恒定, (7) 式的数学期望确保了第  $S_i$  层所有光子总权重恒定. 因此, 实际分裂的样本分布与原来的初始第  $S_i$  层分布为同一概率分布, 因此该方法与直接模拟结果具有一致性<sup>[20]</sup>, 但却可以提高远场光子利用率, 提高远场返回光子样本数, 减小方差, 获得更高的仿真精度.

## 5 基于上述方差消减方法的尾流激光雷达 Monte Carlo 建模

基于上述两种方差消减方法, 可解决 Monte Carlo 引入到尾流激光雷达模拟领域的适用性问题, 从而建立尾流激光雷达的 Monte Carlo 模型, 关键步骤如下.

### 1) 散射碰撞点坐标 $P_{n+1}$ 的确定

光子在介质中的自由程可通过 (3) 和 (4) 式抽样确定, 当光子位于水介质中时,  $\mu_t = \mu_w$ ,  $\mu_w$  为水介质的体积衰减系数; 当光子位于尾流层时,  $\mu_t = \rho\sigma_t$ ,  $\rho$  为尾流气泡密度,  $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$  为单个气泡的消光截面,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_a$  分别为单个气泡的散射和吸收截面. 于是, 下一个碰撞点  $P_{n+1}$  坐标为

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + U_n \cdot \Delta L_n, \\ y_{n+1} &= y_n + V_n \cdot \Delta L_n, \\ z_{n+1} &= z_n + W_n \cdot \Delta L_n, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $(x_n, y_n, z_n)$  和  $(U_n, V_n, W_n)$  分别为第  $n$  次碰撞点的坐标位置和方向余弦;  $\Delta L_n$  是光子第  $n$  次到第  $n+1$  次碰撞之间的自由程.

### 2) 碰撞后光子散射方向 $U_{n+1}$ 的确定

第  $n$  次碰撞后光子的运动方向相对于碰撞前光子的运动方向的散射角为  $\theta_m$ , 方位角为  $\varphi_m$ . 方位角  $\varphi_m$  是在  $(0, 2\pi)$  上均匀分布函数的一个抽样值, 即

$$\varphi_m = 2\pi\xi. \quad (10)$$

散射角  $\theta_m$  的值则需根据光子所在的介质不同

而定. 若光子在水介质中时, 可由下式确定<sup>[18]</sup>

$$\theta_m = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[ (1+g^2) - \frac{(1-g^2)^2}{(1-g+2g\xi)^2} \right] \right\}, \quad (11)$$

式中  $g$  为水介质不对称因子, 满足 Henyey-Greestein 相函数公式

$$\beta(\theta) = (1-g^2)(1+g^2-2g\cos\theta)^{-2/3}, \quad (12)$$

$g$  的取值范围为  $[0, 1]$ ,  $g=0$  时表示介质对光子的散射是各向同性的,  $g=1$  时表示前向散射. 通常情况下海水介质的  $g$  值取值范围为  $(0.6, 0.9)$ .

### 3) 光子运动过程终止的判断

光子历史的终止有两种情况, 一种是光子跳出了模型的计算边界, 另一种情况是光子仍在介质中传输, 但它的权值逐渐衰减, 直至低于某一个阈值 (如  $10^{-7}$ ).

### 4) 探测器接收光子概率

首先判断光子的每个碰撞点位置是否在探测器视场角所在范围内. 如果光子不在探测器作用体积内, 则对光子继续跟踪; 如果光子在作用体积内, 则该光子返回概率可表示为

$$p = \frac{f(\theta)}{4\pi} (A/h^2) \exp(-\mu_w d_1 - \rho\sigma_t d_2) \omega_m, \quad (13)$$

式中  $A$  是探测器接收面积;  $f(\theta)$  是光子所在介质的散射相位函数, 根据介质性质的不同确定该散射相位函数的值;  $h$  是由当前散射点到探测器中心的距离;  $d_1$  是散射点到探测器中心的距离中经过水介质的距离;  $d_2$  则是经过气泡幕的距离.

## 6 结果与分析

### 6.1 Monte Carlo 数值仿真结果

为验证本文建立的 Monte Carlo 模型的正确性, 首先对比分析了 Monte Carlo 仿真结果和尾流激光雷达的实测结果, 其中仿真参数设置与尾流激光雷达样机的实际参数相同, 即激光脉宽 10 ns, 发射光束半径  $R_f = 10$  mm, 接收物镜半径  $R_s = 50$  mm, 发散角  $\alpha_f = 0.6$  mrad, 视场角  $\alpha_s = 2$  mrad, 水的衰减系数  $\mu_w = 0.1$  m<sup>-1</sup>, 单次散射率  $\omega_s = 0.8$ , 气泡平均半径 500  $\mu$ m, 尾流气泡数密度  $2 \times 10^6$  /m<sup>3</sup>, 模拟光子数  $5 \times 10^7$  个, 模拟结果进行了数学平滑处理.

图 3 分别给出了相同参数条件下实测和仿真的结果对比, 图 3(a) 为本文仿真模型结果, 图 3(b) 为尾流激光雷达实测结果, 气泡幕的位置分别取

$L = 2, 3, 4, 5$  m. 从图 3 可看出, 仿真和实测的结果符合得较好, 信号的第一个弱局部峰值是由近场水体散射形成的, 第二个较强的峰值是由尾流气泡形成的. 不同的气泡幕位置与其峰值的时间都满足  $t = 2nL/c$  关系 ( $n$  为入射介质的折射率,  $c$  为光在真空中的速度), 从而验证了本文模型的正确性.

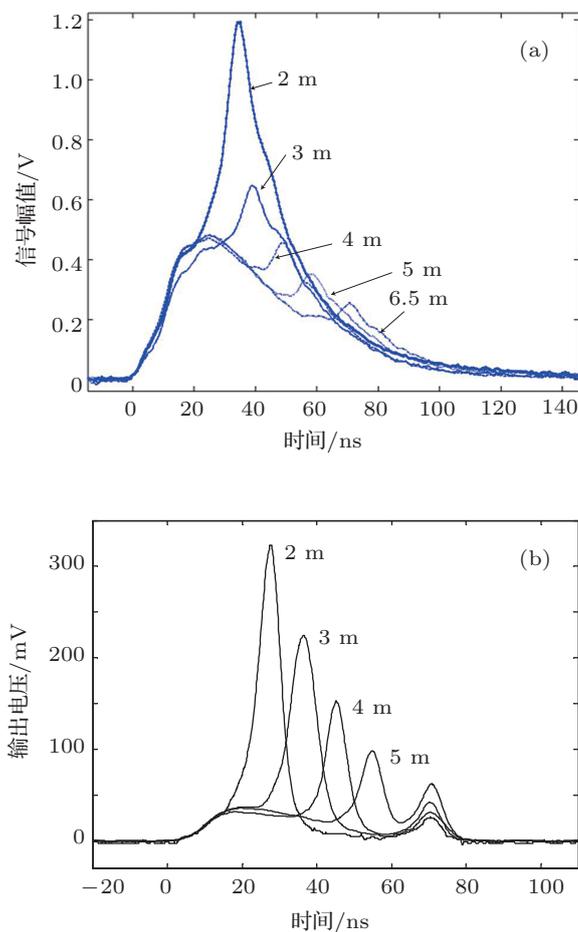


图 3 Monte Carlo 仿真与实验信号对比 (a) Monte Carlo 模拟结果; (b) 样机实测结果

### 6.2 方差消减算法对比与分析

为比较上述两种方法在小衰减系数  $\mu_t$  条件下回波信号的仿真精度, 进行了仿真实验. 图 4 为采用强行碰撞和分裂-轮盘赌算法前后不同距离处返回的光子数量统计图, 图 5 为对应的 2 次散射回波信号. 仿真参数的设置如下: 模拟光子数  $N = 2 \times 10^4$  个, 时间间隔  $\Delta t = 0.5$  ns, 水体衰减系数  $\mu_w = 0.1$  m<sup>-1</sup>, 单次散射率  $\omega_s = 0.8$ .

从图 4(a) 可看出, 直接模拟时, 返回光子数目随距离的增大而迅速减小. 原因是随着距离的增大, 视场区体积也增大, 远距离光子行走的路径多样性就增加, 远场光子返回接收物镜在时间上更加离散,

返回光子样本的时间密度减小、方差变大. 另一方面, 光子多次碰撞后权重迅速减小, 低于阈值  $10^{-7}$ , 最终将被吸收, 很少有光子能到达远处, 故远距离的仿真精度下降. 这一现象也可用图 5(a) 的 2 次散射回波信号看出, 回波信号已基本失去宏观特性, 说明上述两个原因使返回光子的样本数急剧减小, 逐渐失去统计特性, 方差增大, 仿真精度很低.

从图 4(b) 可看出, 在使用强行碰撞后, 返回光子数目在整体上明显高于直接模拟的结果, 特别是在近距离处效果更为明显, 远场光子占有所有返回光子的比例也有提高, 提高了远场模拟精度. 图 5(b) 给出的该方法得到的 2 次散射回波信号也可看出, 回波信号有了明显的统计特性, 方差减小, 仿真精度提高.

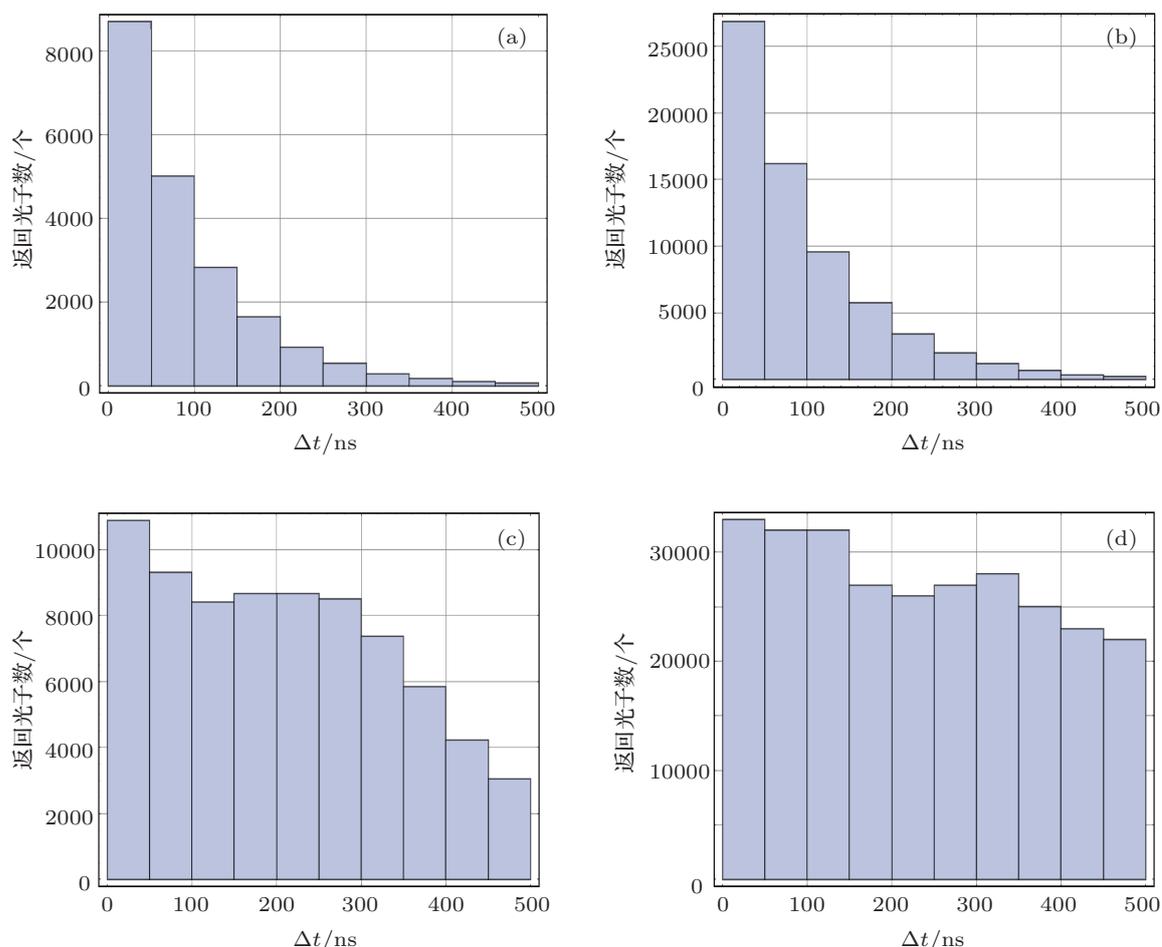


图 4 不同距离处返回的光子数量统计 (a) 直接模拟结果; (b) 强行碰撞模拟结果; (c) 分裂 - 轮盘赌算法结果; (d) 强行碰撞 + 分裂轮盘赌算法结果

图 4(c) 给出了分裂 - 轮盘赌方法的返回光子数目统计, 其中, 取  $\kappa = 1.2$ ,  $\Delta L = 2 \text{ m}$ . 为避免不合理的参数  $\kappa$  设置导致的效率低下, 这里设定单次最大分裂数为 12. 从图 4(c) 可看出该方法能明显增加远距离光子返回的概率, 提高远距离光子对回波信号的光子数和贡献, 降低方差. 图 5(c) 给出了该方法得到的 2 次散射回波信号也可看出, 该方法的优点在于通过合理设定参数  $\kappa$  可有效提高远距离感兴趣区域的光子返回数目, 从而提高远距离回波信号的精度.

图 4(d) 和图 5(d) 分别给出了强行碰撞方法和

分裂 - 轮盘赌方法融合计算的光子统计数目和回波信号能量曲线. 从图中可看出, 两方法的综合应用可极大地减小从近场到远场全区间的方差并提高光子利用率, 从而提高全局仿真精度.

## 7 结论

本文解决了 Monte Carlo 方法引入到尾流激光雷达模拟过程中的适用性问题. 以尾流激光雷达数值模拟的 Monte Carlo 方法引入为主线, 分析了可行性并指出传统 Monte Carlo 方法在该领域的应用

存在结果方差大及光子利用率低等问题. 提出了接收光学视场内光子强行碰撞的方法和以光子自由程总长度为准则的光子分裂 - 轮盘赌方法, 并进行了理论推导, 解决了光子首次散射后, 由于被弹出接收视场区域而造成的返回光子样本数低, 2 次及多次散射对回波信号形成所做的贡献被低估的问题. 在此基础上建立了适用于尾流激光雷达数值模

拟的 Monte Carlo 模型, 通过实验和仿真对比, 验证了模型的正确性. 提出的接收光学视场内光子强行碰撞方法和分裂 - 轮盘赌方法能有效减小方差并提高光子利用率.

该研究成果可应用于其他近距离、强衰减和强散射介质中以及小接收视场角激光雷达数值模拟和光散射机理的理论研究中.

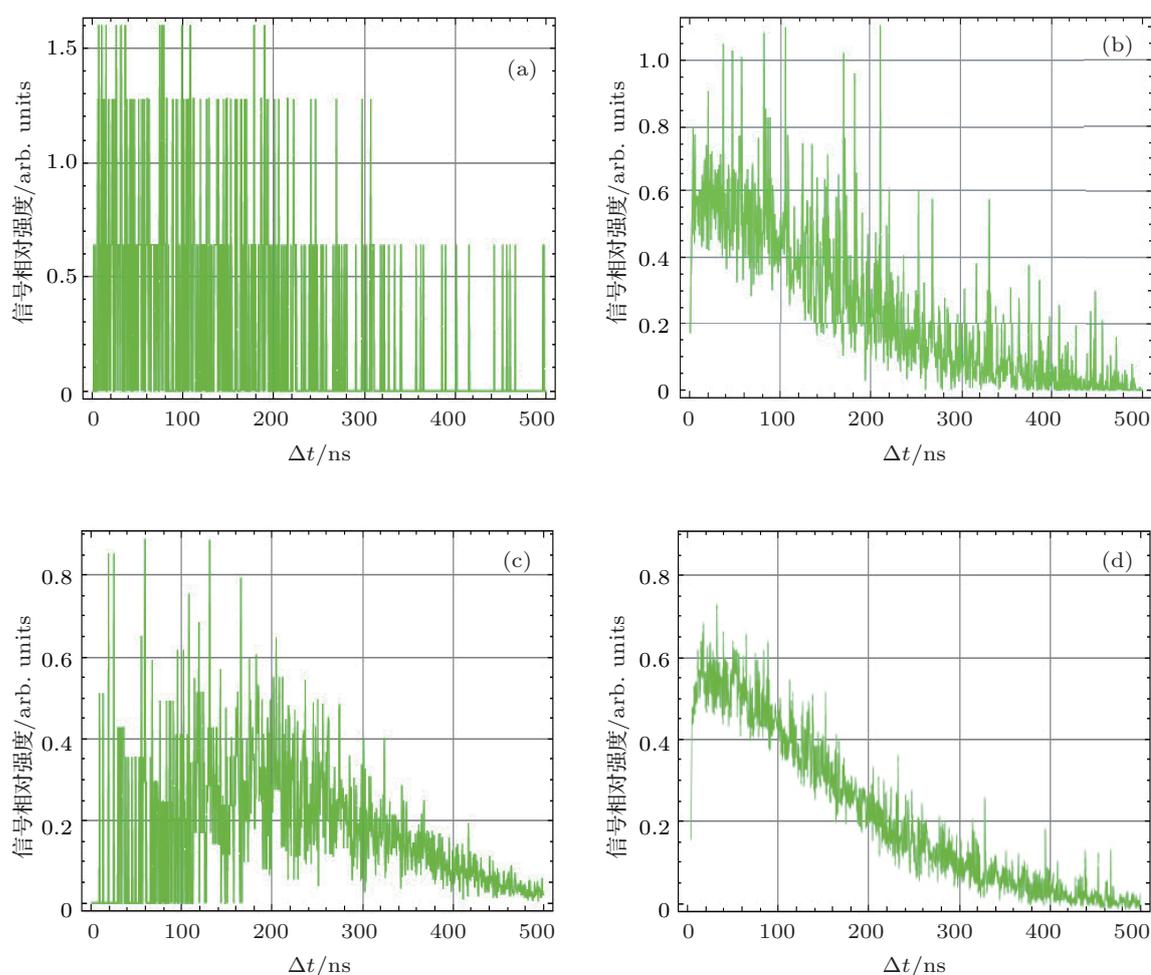


图5 不同算法的2次散射分量回波强度对比分析 (a) 直接模拟结果; (b) 强行碰撞模拟结果; (c) 分裂 - 轮盘赌算法结果; (d) 强行碰撞 + 分裂 - 轮盘赌算法结果

- [1] Stanic S, Caruthers J W, Goodman R R, Kennedy E, Brown R A 2009 *IEEE J. Oceanic Eng.* **34** 83
- [2] Ulloa O, Sathyendranath S, Platt T 1994 *Appl. Opt.* **33** 7070
- [3] Zhang X D, Lewis M, Johnson B 1998 *Appl. Opt.* **37** 6525
- [4] Qiu H H 2003 *J. Opt. Soc. Am. A* **20** 690
- [5] Kokhanovsky A A 2003 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **5** 47
- [6] Hulst V 1957 *Light Scattering by Small Particles* (New York: Wiley) pp107-185
- [7] Geller M, Johnson G B, Yen J H, Clapp G A 1986 *Proceedings of the Tactical Communication Conference* Fort Wayne, USA, April 2-6, 1986 p60
- [8] He X Q, Pan D L, Bai Y, Zhu Q K, Gong F, Mao Z H 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 618 (in Chinese) [何贤强, 潘德炉, 白雁, 朱乾坤, 龚芳, 毛志华 2010 *光学学报* **30** 618]
- [9] Ding H P, Chen G, Majumdar A, Sadler B M, Xu Z Y 2009 *IEEE JSAC* **27** 1535
- [10] Mobley C D 1994 *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters* (Vol. 1) (New York: Academic Press) pp112-115
- [11] Cheng T H, Gu X F, Chen L F, Yu T, Tian G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5323 (in Chinese) [程天海, 顾行发, 陈良富, 余涛, 田国良 2008

- 物理学报 57 5323]
- [12] Wang L, Xu Z H, Feng H J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2694 (in Chinese) [王凌, 徐之海, 冯华君 2005 物理学报 **54** 2694]
- [13] Chen W G, Huang B X 1996 *Acta Electron. Sin.* **24** 47 (in Chinese) [陈文革, 黄本雄 1996 电子学报 **24** 47]
- [14] Du Z F, Huang T X, Lu Y M, Yang Z K 2003 *Acta Electron. Sin.* **31** 1815 (in Chinese) [杜竹峰, 黄铁侠, 卢益民, 杨宗凯 2003 电子学报 **31** 1815]
- [15] Liang S Y, Wang J A, Zhang F, Shi S W, Ma Z G, Liu T, Wang Y H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 110701 (in Chinese) [梁善勇, 王江安, 张峰, 石晟玮, 马治国, 刘涛, 王雨虹 2012 物理学报 **61** 110701]
- [16] Xu L Q, Li H, Xiao Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6030 (in Chinese) [徐兰青, 李晖, 肖郑颖 2008 物理学报 **57** 6030]
- [17] Zhao T F, Ke X Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114208 (in Chinese) [赵太飞, 柯熙政 2012 物理学报 **61** 114208]
- [18] Shi S W, Wang J A, Jiang X Z, Ma Z G, Yu Y 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1861 (in Chinese) [石晟玮, 王江安, 蒋兴舟, 马治国, 余扬 2008 光学学报 **28** 1861]
- [19] Fan J J, Li J L, Cheng J P, Pei L C 2003 *Sci. China E* **33** 452 (in Chinese) [范佳锦, 李君利, 程建平, 裴鹿成 2003 中国科学 (E 辑) **33** 452]
- [20] Li S, Tian D F, Qeng L 2011 *J. Comput. Phys.* **28** 323 (in Chinese) [李树, 田东风, 邓力 2011 计算物理 **28** 323]

## Monte Carlo model and variance reduction method based on lidar of ship wake\*

Liang Shan-Yong<sup>1)†</sup> Wang Jiang-An<sup>1)</sup> Zhang Feng<sup>1)</sup> Wu Rong-Hua<sup>1)</sup>  
Zong Si-Guang<sup>1)2)</sup> Wang Yu-Hong<sup>1)</sup> Wang Le-Dong<sup>1)</sup>

1) (Electronic Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

2) (China Shipbuilding Industry Group No. 717 Research Institute, Wuhan 430033, China)

(Received 11 June 2012; revised manuscript received 8 August 2012)

### Abstract

The numerical simulation of ship wake laser scattering mechanism and the detection process are important foundations for the laser detection and guidance of the ship wake. The feasibility that Monte Carlo method is introduced into the numerical simulation of lidar of ship wake is analyzed firstly. The Monte Carlo simulation model of laser detection of ship wake is developed with the actual parameters of self-developed lidar of ship wake. The causes of the large variance and low photon utilization of simulation results are in-depth analyzed by statistics on the simulation results. To resolve this problem, the method of photon collision forced in the receive optical fields, the photon splitting method with the total free pach of photon serving as a criterion, and the combination of the two methods are put forward based on partial sampling theory and the basic principle of division-roulette bet. The comparative analyses of the simulation and the experimental results show that the proposed model simulation results fit to experimental data better, thus the correctness of the model is verified. The photon collision forced in the receive optical field and division-the roulette method can effectively reduce the variance and increase the photon utilization. In this paper, the Monte Carlo method is introduced into the simulation process of lidar of ship wake.

**Keywords:** Monte Carlo, lidar, variance reduction, bubble

**PACS:** 52.65.Pp, 02.50.Ng, 42.68.Sq, 47.55.Dz

**DOI:** 10.7498/aps.62.015205

\* Project supported by the Advanced Research Program of Weapon Equipment, China (Grant No. 9140A26030110JB11) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51109217).

† Corresponding author. E-mail: laser\_ocean@yeah.net