

载波调制高斯脉冲激光水下传输特性的仿真分析

刘娜¹, 柯杰耀¹, 杨苏辉^{1,2}, 赵长明¹, 张海洋¹

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 光在水中传输时的吸收和散射效应使得激光的水下传输特性变得复杂,尤其是后向散射会造成目标对比度降低,导致利用激光进行水下探测时面临挑战,而载波调制技术可以用来抑制水下激光雷达的后向散射。利用基于蒙特卡罗方法的计算机仿真技术建立余弦调制高斯脉冲激光水下传输模型,并讨论光载微波脉冲宽度、调制频率和调制深度等参数对探测结果的影响。结果表明:相比于传统脉冲激光雷达的仿真结果,载波调制相关检测技术可以有效提高水下目标对比度;脉冲宽度存在最佳值,调制频率对目标回波信号的信噪比和测距精度有影响,调制深度越大,目标回波信号的信噪比越高。

关键词 海洋光学; 水下传输; 蒙特卡罗方法; 载波调制; 频域滤波; 后向散射

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0401003

Simulation and Analysis on Underwater Transmission Characteristics of Gaussian Pulse Lasers with Carrier Modulation

Liu Na¹, Ke Jieyao¹, Yang Suhui^{1,2}, Zhao Changming¹, Zhang Haiyang¹

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Key Lab for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

Abstract Due to the absorption and scattering effects of light in water, propagation characteristics of lasers underwater become complicated. In particular, the backscatter causes the target contrast to decrease, which makes the use of lasers in underwater detection face a great challenge. Carrier modulation technique can be used to suppress the backscatter for underwater lidar. Computer simulation based on Monte Carlo method is used to establish an underwater detection model for photons of Gaussian pulse lasers modulated by cosine signal. The effects of parameters such as pulse width, modulation frequency, and modulation depth on detection results are discussed. The results show that, compared with traditional pulse lidar simulation results, carrier modulation technique with correlation detection can effectively improve the underwater target contrast. The pulse width has the optimum range. The modulation frequency has effect on the signal-to-noise ratio and ranging accuracy of the target echo signal. The greater the modulation depth, the higher the signal-to-noise ratio of the target echo signal.

Key words oceanic optics; underwater propagation; Monte Carlo method; carrier modulation; frequency domain filtering; backscatter

OCIS codes 010.4455; 060.4080; 030.5290

1 引 言

1963年,美国学者 Duntley^[1]在研究光波在海洋中的传播特性时发现,海水对波长为 470~580 nm 的蓝绿光衰减较小,证实了在海洋中也存在一个透

光窗口,这一发现使得利用蓝绿激光探测水下目标成为可能。激光在水下的吸收和散射使得激光在水下的传输特性变得很复杂,利用海水的透光窗口可以有效减小吸收损耗。海水(尤其是近海域的浑浊海水)中存在的前向及后向散射仍然是激光水下探

收稿日期: 2017-09-14; 收到修改稿日期: 2017-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(61275053)

作者简介: 刘娜(1991—),女,硕士研究生,主要从事脉冲激光水下传输方面的研究。E-mail: liuna1320@163.com

导师简介: 杨苏辉(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事固体及光纤激光器、激光雷达方面的研究。

E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn(通信联系人)

测和成像面临的主要挑战。其中后向散射的影响尤为严重,强的后向散射会将目标信号湮没其中,降低目标对比度,单纯增加发射光能量或提高量子效率并不能改善信噪比,因此必须通过一定的方法实现对后向散射的抑制^[2]。

近年来的研究表明,载波调制技术可以用来抑制水下激光雷达的后向散射。将发射波的强度进行调制,当调制频率大于水中的截止频率(100 MHz)时,由目标反射的光子可以保持发射信号的调制信息^[3],而在发射源与目标之间的不同距离处,水体散射的光子之间会产生相消干涉,导致高频信号消失。由目标反射的高频信号与由水体散射的低频信号可以通过在接收端加一个以调制频率为中心的带通滤波器进行分离,从而改善水下目标的探测性能,提高信号对比度^[4]。

最早将载波调制激光雷达技术用于水下探测的研究开始于1994年,美国学者Mullen等^[5]提出了调制脉冲Lidar系统,建立了载波调制激光雷达理论分析模型中的辐射传递方程,并对前向散射的影响进行了研究^[6],将脉冲内光强进行调制和编码^[7],在接收端进行相干检测,对不同水质下的目标进行探测和成像,并基于水箱实验验证了其水下探测及成像的能力^[8-10]。国内水下探测及成像的研究大多采用距离选通技术^[11],即设置距离选通开关只在目标回波到达的时间内开启,在其他时间关闭,配合使用短脉冲激光进行探测,去除水体的散射噪声,提高系统的信噪比。采用距离选通技术通常需要大能量、窄脉冲激光源和超快距离选通门,对于距离未知的目标则要对选通门开启时间进行扫描,从而导致目标距离信息未知的水下搜索难度很大,且无法克服前向散射的影响。此外,采用单元探测器配合距离选通技术也存在一定难度,要求窄脉冲蓝绿光源、高灵敏度的大动态范围探测器(通常使用光电倍增管)和宽带接收系统,而宽带接收系统会导致噪声增加。

载波调制技术是距离选通技术在频域的一种形式,时域内窄的选通门对应频域内的高频信号,载波调制加窄带滤波也可以有效提高水下探测的信噪比。与时域内距离选通技术相比,载波调制技术无需知道目标的距离信息,而且对所有距离内的水体散射都具有抑制作用。国内在这方面的研究开展的不多,只有冀航等^[12]建立了基于矩形激光脉冲的水下目标探测蒙特卡罗仿真模型,分析了不同条件下载波调制激光雷达的性能。而实际中的激光脉冲为高斯脉冲,对高斯脉冲进行余弦调制并改变其中的

参数来研究其对水下探测性能的影响对实际探测更具有指导意义。在以往的研究中,没有对调制波的调制深度这一参数加以讨论。在实际系统中,载波调制可以通过多种方式来实现,如直接电光调制的调制频率可以较容易地达到GHz以上,但是发射功率和调制深度受限。双频激光器的调制深度则可以达到100%,通过放大也可以实现高功率,但是调制频率不可能太高。在实际应用中,要根据具体情况对光源的参数进行折中选取,以便进一步确定方案。目前,关于双频激光参数对水下目标探测影响的研究较少。本文以水下探测光载微波光源的参数优化作为研究目标,建立高斯调制脉冲在水下探测中的传输模型,结合回波相关检测算法,讨论光载微波脉冲宽度、调制深度、调制频率等调制参数对探测结果的影响,从而为光载微波水下探测激光雷达系统的设计提供参考。

本文首先介绍了基于蒙特卡罗方法的光子水下传输模型和载波调制激光雷达的原理。利用计算机仿真得到传统脉冲激光雷达探测的模拟结果,并在此基础上考虑入射光为高斯脉冲,并进行余弦调制,模拟调制脉冲在水下的传输过程,利用自相关算法对接收信号进行频域滤波处理,得到载波调制激光雷达探测的模拟结果。分析载波调制激光雷达探测技术相比传统激光雷达探测技术在提高目标对比度上的优势,最后,改变不同的载波调制参数进行仿真,分析各调制参数对探测结果的影响。

2 光子在海水中传输的蒙特卡罗模拟

水中悬浮体和海水介质的不均匀性使得入射其中的光主要经历散射和吸收,是典型的随机性问题,而蒙特卡罗方法常用来模拟光在复杂几何形状和非均匀介质中的传输过程。该方法又称为随机抽样技巧,是一种采用统计抽样理论求解物理和数学问题的模拟方法^[13-17]。

根据光的粒子性,可以把入射的激光脉冲看成是由许多光子组成的光子束,其在海水介质中传输时不断地与各种悬浮粒子等发生随机碰撞,表现为吸收和散射^[18-20]。蒙特卡罗方法模拟光子水下传输的一般过程包括光子初始状态抽样、碰撞过程、边界判断、运动方向确定、终止判断等。

2.1 发射光子的初始状态

光子的初始状态包括光子的初始位置和初始方向。仿真程序中假设光子从坐标原点沿 z 轴向下入射为正方向,则光子的初始位置坐标为 $r_0 =$

(0,0,0), 初始方向余弦为 $D_0 = (0,0,1)$, 运动路径长度为 $l_0 = 0$, 光子能量权重因子为 $W_0 = 1$ 。

2.2 确定下一个碰撞点位置

假设光子已经经历了 N 次碰撞, 下一个碰撞点为 r_{N+1} , 这一过程包括 2 个方面: 单步步长计算和边界判断。根据光子上一次碰撞后的剩余步长 $\Delta l''_{N-1}$ 的不同, 可以得到不同的单步步长初值。当 $\Delta l''_{N-1} \neq 0$ 时, 取单步步长初值为剩余步长 $\Delta l''_{N-1}$; 当 $\Delta l''_{N-1} = 0$ 时, 取单步步长初值为光子的自由程 $\Delta l'_N$, 根据 Beer-Lambert 定律^[21], $\Delta l'_N$ 可由下式抽样得到:

$$\Delta l'_N = -\frac{1}{c} \ln \xi, \quad (1)$$

式中 c 为海水的衰减系数, ξ 为 (0,1) 上均匀分布的随机数。

然后进行边界判断: 若碰撞点位于边界内, 则按上述方法得到单步步长; 若碰撞点位于边界外, 则单步步长为当前光子位置到边界的距离。

2.3 确定碰撞后的运动方向

根据位置 $r_N = (x_N, y_N, z_N)$ 的不同, 采用不同的方法得到方向余弦 $D_N = (\mu_{x,N}, \mu_{y,N}, \mu_{z,N})$ 。海水中悬浮粒子引起的散射主要是米氏散射, 采用 Henyey-Greenstein 函数近似表示散射相位概率函数^[22-23], 即

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

式中 $\beta(\theta)$ 为散射相位概率函数, θ 为散射角, g 为非对称参量^[24]。

经抽样得到散射角和方位角分别为

$$\theta_N = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left(\frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\xi} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

$$\varphi_N = 2\pi\xi. \quad (4)$$

从碰撞点 r_N 到碰撞点 r_{N+1} , 变换坐标系得到 D_{N+1} 中各方向余弦的表达式为

$$\begin{cases} \mu_{x,N+1} = \sin \theta_N (\mu_{x,N} \mu_{z,N} \cos \varphi_N - \mu_{x,N} \sin \varphi_N) / \\ \quad \sqrt{1 - \mu_{z,N}^2} + \mu_{x,N} \cos \theta_N \\ \mu_{y,N+1} = \sin \theta_N (\mu_{y,N} \mu_{z,N} \cos \varphi_N + \mu_{y,N} \sin \varphi_N) / \\ \quad \sqrt{1 - \mu_{z,N}^2} + \mu_{y,N} \cos \theta_N \\ \mu_{z,N+1} = -\sin \theta_N \cos \varphi_N \sqrt{1 - \mu_{z,N}^2} + \mu_{z,N} \cos \theta_N \end{cases}, \quad (5)$$

当 $|\mu_{z,N}| > 0.99999$ 时, D_{N+1} 中各方向余弦可以写为

$$\begin{cases} \mu_{x,N+1} = \sin \theta_N \cos \varphi_N \\ \mu_{y,N+1} = \sin \theta_N \sin \varphi_N \\ \mu_{z,N+1} = \operatorname{sgn} \mu_{z,N} \cos \theta_N \end{cases}, \quad (6)$$

$$\text{式中 } \operatorname{sgn} \mu_{z,N} = \begin{cases} +1, & \mu_{z,N} \geq 0 \\ -1, & \mu_{z,N} < 0 \end{cases}$$

若光子位于目标表面或者海底时, 则有

$$\begin{cases} \mu_{x,N+1} = \mu_{x,N} \\ \mu_{y,N+1} = \mu_{y,N} \\ \mu_{z,N+1} = -\mu_{z,N} \end{cases}; \quad (7)$$

若光子位于海水表面, 则要判断光子是否逃逸出海水介质, 根据折射定律得:

$$\begin{cases} \mu_{x,N+1} = \mu_{x,N} \\ \mu_{y,N+1} = \mu_{y,N} \\ \mu_{z,N+1} = -\sqrt{1 - (n_{\text{sea}}/n_{\text{air}})^2 (1 - \mu_{z,N}^2)} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 n_{sea} 为海水的折射率, n_{air} 为空气的折射率。

2.4 判断光子的生存状态

根据每次碰撞后能量权重因子 W_N 是否大于阈值以及光子位置是否处于介质范围内来判断光子的生存状态。

初始源光子的能量权重因子 $W_0 = 1$, 若光子位于初始表面, 则判断光子是否发生全反射。若发生全发射, 则光子权重保持不变, 即 $W_{N+1} = W_N$; 若没有发生全反射, 则部分光出射海面, 部分光反射回海中, 出射光子的权重为 $W'_{N+1} = W_N T$, 其中 T 为海面透过率, 返回海水中的光子权重为 $W''_{N+1} = W_N (1 - T)$ 。

若光子位于海底, 则权重因子为 $W_{N+1} = W_N T_{\text{bottom}}$, 其中 T_{bottom} 为海底反射率; 若光子位于水下目标表面上, 则有 $W_{N+1} = W_N \omega_{\text{target}}$, 其中 ω_{target} 为目标反射率。

若光子位于海水介质中, 则每次碰撞前后权重因子关系为 $W_{N+1} = W_N \omega_0$, 其中 $\omega_0 = b/(a+b)$ 为单程反射率, a 为海水吸收系数, b 为海水散射系数^[25]。

随着光子传输距离的增加, 光子能量权重因子不断减小, 当减小到一定程度后, 对最终结果的影响可以忽略不计, 因此, 设定一个生存门限 W_{\min} 。为了减小误差, 引入轮盘赌机制: 当光子能量权重因子大于生存门限 W_{\min} , 即 $W_{N+1} > W_{\min}$ 时, 光子生存状态 $\Omega_{N+1} = 0$, 继续跟踪光子; 当 $W_{N+1} \leq W_{\min}$ 时, 进行抽取随机数 ξ 的试验, 确定概率阈值 P_r , 一般取 10^{-1} 或 10^{-2} 。当 $\xi < P_r$ 时, 光子生存状态 $\Omega_{N+1} = 0$, 继续跟踪光子, 光子权重增大 P_r^{-1} 倍; 反之, 光子生存状态 $\Omega_{N+1} = 1$, 终止光子历史。

2.5 光子的统计

将时间范围平均分成若干个间隔, 将每个时间间隔内接收到的光子能量权重因子累加, 即得到该时间段内的光能量。重复以上步骤, 直到所

有光子统计结束,则可得到脉冲激光在水下传输的蒙特卡罗模型。

3 载波调制激光雷达的原理及模型实现

3.1 载波调制激光雷达的原理

载波调制激光雷达系统利用微波信号对发射的光脉冲信号进行调制,经过传输介质后到达目标,由目标反射并经过同样的介质返回,被光电探测器接收,然后通过频域滤波处理接收的信号并进行分析。载波调制激光雷达系统的原理图如图 1 所示。

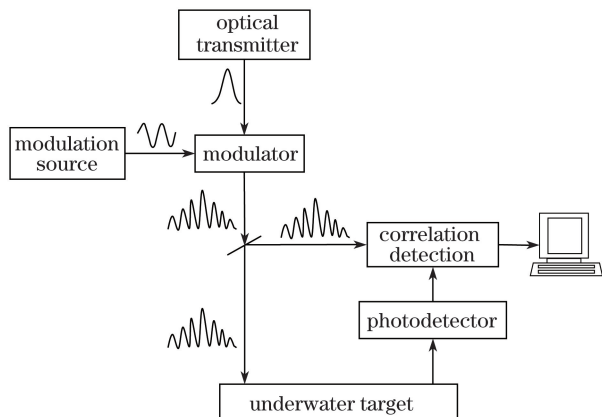


图 1 载波调制激光雷达系统的原理图

Fig. 1 Schematic of carrier modulated lidar system

载波调制技术是时域中距离选通技术的一个变化形式,时间与频率通过傅里叶变换相关联,在时域中通过振幅-时间特性来区分目标回波与杂散光,而在频域中则利用振幅-相位特性来区分目标回波与杂散光。多次散射后进入探测器的回波对发射脉冲在时域内有展宽效应^[2],这种时域内的展宽效应体现在频域中相当于高频信息的丢失,只有低频信息可以多次被散射波传输。与之相反的目标直接反射的信号将不会引起时域展宽,可以完全保留高频项。加上窄带滤波技术就可以有效抑制后向散射,窄带滤波可以通过回波与同频率的参考信号进行相关运算得到,相关运算的峰值对应时间延时以及目标的距离信息。

海水的后向散射可以看作是调制信号的低通滤波,存在截止频率 f_c ,根据 Mullen 等^[4]的理论模型可知

$$f_c = cv/(2\pi n), \quad (9)$$

式中 c 为海水的衰减系数, v/n 为光在海水中的传输速率。通常情况下, f_c 的值小于 100 MHz。当调制频率大于截止频率 f_c 时,可以有效抑制后向散射,提高信号对比度。

3.2 载波调制激光雷达模型的实现

与传统的脉冲激光雷达相比,载波调制激光雷达主要有 2 点不同:1)发射光是经过调制的脉冲序列;2)系统对接收信号进行了频域滤波处理。因此,在蒙特卡罗方法模拟传统激光雷达系统的仿真程序中,相应增加 2 个功能即可模拟载波调制激光雷达系统。

对应本研究所用的模拟程序,传统激光雷达系统使用的是未加调制的冲击脉冲,而载波调制激光雷达系统则是更接近实际情况的余弦调制的高斯脉冲,即

$$f(t) = \exp\left[-2\pi \frac{(t-\tau)^2}{\tau^2}\right] \{1 + m \cos[2\pi f_c(t-\tau)]\}, \quad (10)$$

式中 $f(t)$ 为余弦调制的高斯脉冲信号, t 为时间, f_c 为调制频率, m 为调制深度, 2τ 为脉冲宽度。

对于接收信号,要通过窄带滤波来提高水下目标的对比度,在计算机模拟时,采用自相关运算实现^[3]。自相关函数为

$$R_{f_0 f_1}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_0(t) f_1^*(t+\tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f_0(t-\tau) f_1^*(t) dt, \quad (11)$$

式中 $f_0(t)$ 为接收信号, $f_1(t)$ 为入射的余弦调制高斯脉冲, $f_1^*(t)$ 为 $f_1(t)$ 的复共轭。自相关运算和卷积运算之间存在一个简单的数学关系,即

$$R_{f_0 f_1}(t) = f_0(-t) * f_1(t). \quad (12)$$

4 仿真结果及分析

结合第 2 节的分析及实际探测环境参数^[23],利用 Visual C 语言编程实现基于蒙特卡罗方法的光子水下传输及载波调制激光水下传输模型。设置基本模拟参数如下:模拟光子数为 200 万,海水深度为 25 m,目标深度为 20 m,海水衰减系数为 0.1514 m^{-1} ,海水吸收系数 a 为 0.114 m^{-1} ,海水散射系数 b 为 0.0374 m^{-1} ,非对称参量 g 为 0.924,目标表面反射率为 0.03,海底反射率为 0.02,接收视场角为 50 mrad,接收孔径面积为 0.01 m^2 。将模拟结果以回波曲线形式给出,横坐标为光子水下传输距离,纵坐标为归一化的光子相对能量。

4.1 高斯调制脉冲与传统脉冲得到的结果

在海水吸收系数 a 为 0.114 m^{-1} 和散射系数 b 为 0.0374 m^{-1} 的情况下,模拟传统脉冲和余弦调制高斯脉冲的水下探测目标回波信号归一化强度和传输距离的曲线,如图 2 所示,其中余弦调制高斯脉冲

的调制频率为 0.5 GHz,脉冲宽度为 10 ns,调制深度为 1。由图 2 可知,当海水衰减系数较大时,传统脉冲的目标信号的信噪比很低,甚至会淹没在噪声中,造成检测困难,此时余弦调制高斯脉冲相比传统脉冲可以提高目标信噪比(约 8 dB)。

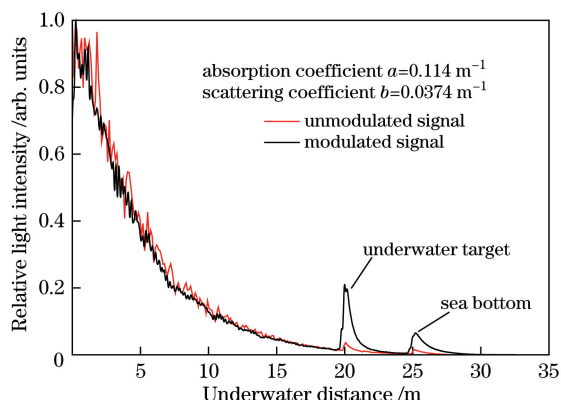


图 2 不同海水衰减系数时传统脉冲和余弦调制高斯脉冲的回波信号

Fig. 2 Echo signals of traditional pulse and Gaussian pulse modulated by cosine signal with different attenuation coefficients of sea

载波调制技术可以有效提高水下探测的目标信噪比,为了准确研究载波调制技术中各参数对探测结果的影响,按照控制变量的原则,分别改变脉冲宽度 2τ 、调制频率 f_c 、调制深度 m ,模拟不同参数时回波信号的相关处理,并对结果进行分析。

4.2 脉冲宽度对探测结果的影响

当载波调制技术的调制频率大于海水的截止频率 100 MHz 时可以有效抑制后向散射,因此在分析脉冲宽度对水下回波信号的影响时,调制频率至少应大于 100 MHz。高斯脉冲宽度和余弦调制频率的影响不是独立的,若调制频率 f_c 确定,则脉冲宽度 2τ 应大于或等于调制频率 f_c 的倒数。保持调制深度为 1 不变,在调制频率 f_c 分别为 0.1, 0.5, 1.0 GHz 的情况下,改变脉冲宽度 2τ 得到回波信号,如图 3 所示。靠近水面部分的回波随着脉冲宽度的增加有展宽和回波峰值位置后移的现象,导致这种后移的原因有 2 个:1)脉冲展宽;2)在窄带滤波时,与入射前的余弦调制高斯脉冲进行相关计算引入的脉冲宽度越大,展宽越严重,相关计算宽度越大,因此初始回波脉冲的峰越向后移。由图 3 可知,

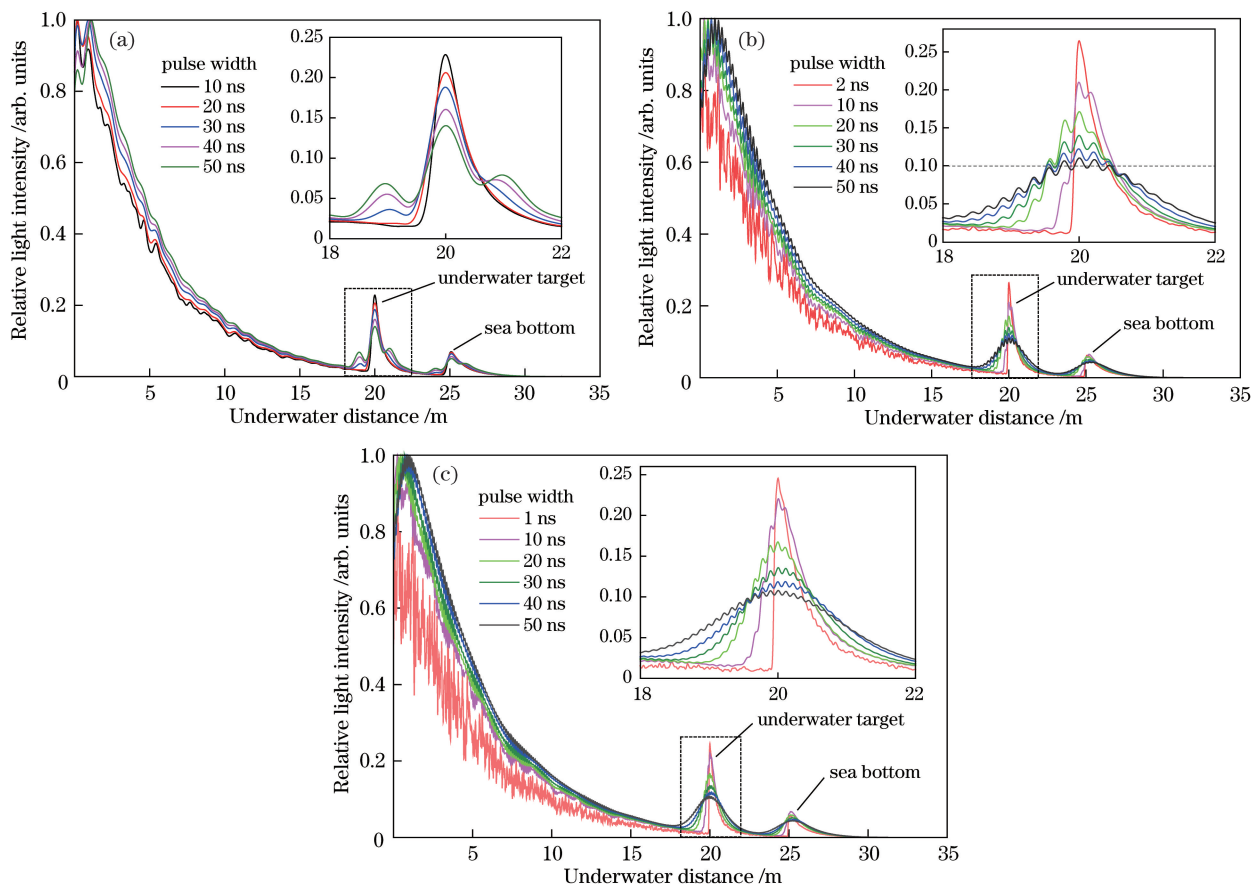


图 3 调制频率分别为(a) 0.1 GHz、(b) 0.5 GHz 和(c) 1.0 GHz 时不同脉冲宽度条件下的回波信号

Fig. 3 Echo signals with different pulse widths and modulation frequencies of (a) 0.1 GHz, (b) 0.5 GHz, and (c) 1.0 GHz

在同一调制频率下,随着脉冲宽度的增大,目标和海底的回波信号展宽变大,回波的调制脉冲数量变多,但是相对能量会减小,从而导致目标回波信号的信噪比降低。以图 3(b)为例,若要求回波信号的能量大于发射信号的 10% 才能被探测到,则在调制频率为 0.5 GHz 时,大于 50 ns 的脉冲回波信号能量因小于探测阈值而接收不到,脉冲宽度为 2, 10, 20, 30, 40 ns 时的目标回波信号相对 50 ns 时的信噪比分别提高了 3.72 dB, 2.74 dB, 1.89 dB, 1.03 dB, 0.43 dB。但是如果脉冲宽度太窄,调制效果就会不明显,测距精度会降低。考虑到目前双频激光器的研究水平,在实际探测中选择脉冲宽度为 10~40 ns。

4.3 调制频率对探测结果的影响

为了研究调制频率对探测结果的影响,保持调制深度为 1 不变,选择脉冲宽度为 40 ns,改变调制频率 f_c 分别为 0.1, 0.5, 1.0 GHz, 得到回波信号及目标回波信号的放大结果,如图 4 所示。由图 4 可知,由于脉冲宽度相同,因此回波信号展宽基本相同。随着调制频率的增大,高斯脉冲内的调制脉冲数量增加,调制内的脉冲宽度变窄,探测距离的精度提高。与调制频率为 0.1 GHz 时相比,调制频率为 0.5, 1.0 GHz 时的精度分别提高 83% 和 91%。但是调制频率的增加又会减小目标回波信号的相对能量,甚至可能会小于接收阈值,从而导致信噪比降低。与调制频率为 0.1 GHz 时相比,调制频率为 0.5, 1.0 GHz 时的信噪比分别降低 1.14 dB 和 1.32 dB。因此在实际探测中应在测距精度和信噪比之间折中选择调制频率。

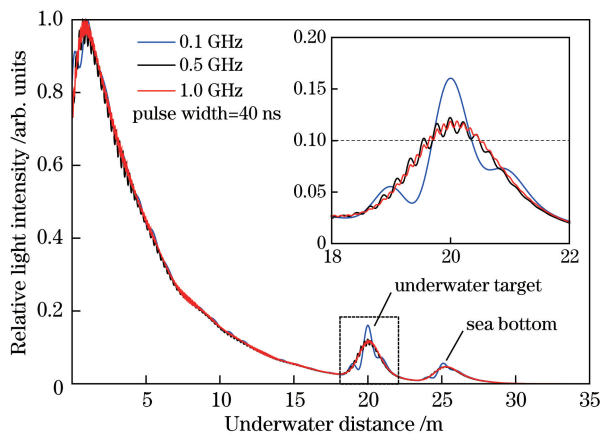


图 4 不同调制频率条件下的回波信号

Fig. 4 Echo signals at different modulation frequencies

4.4 调制深度对探测结果的影响

目前主要采用电光调制和双频激光器 2 个频率

之间的差频来实现深度调制,在常见的双频激光器中,若调制频率太高,则会涉及光学稳频的问题。结合实际情况并利用 4.2 和 4.3 节的结果,保持脉冲宽度 2τ 为 40 ns 和调制频率 f_c 为 0.5 GHz 不变,改变调制深度 m 分别为 0, 0.3, 0.5, 0.7 和 1.0, 得到回波信号及目标回波信号的放大结果,如图 5 所示。由图 5 可知,由于脉冲宽度和调制频率相同,因此回波信号展宽基本相同,且高斯脉冲内调制脉冲数量相同。随着调制深度的增加,自相关计算后回波信号的调制深度也增加。与调制深度为 0 时相比,调制深度为 0.3, 0.5, 0.7 和 1.0 时的目标回波精度均提高 74%, 信噪比分别提高 0.05 dB 和 0.14 dB。因此,实际探测时应尽量增大调制深度,以提高目标回波信号的信噪比。

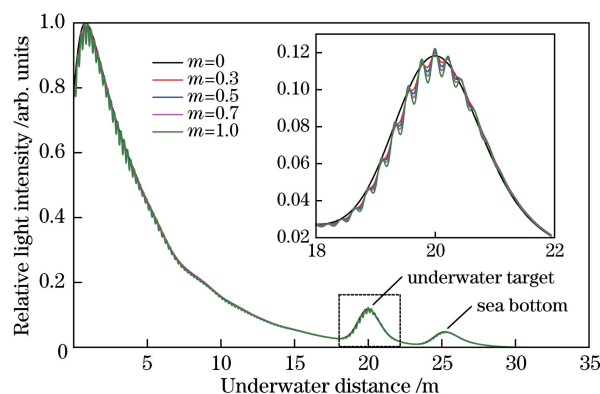


图 5 调制频率为 0.5 GHz 和脉冲宽度为 40 ns 时不同调制深度下的回波信号

Fig. 5 Echo signals at different modulation depths with modulation frequency of 0.5 GHz and pulse width of 40 ns

综上,载波调制激光雷达技术中参数的改变对回波信号均有影响,以上模拟结果对实验探测有重要的指导意义。与传统的激光雷达系统相比,载波调制激光雷达系统可以明显提高目标信噪比。在调制深度和调制频率一定的情况下,脉冲宽度增加,目标回波信号展宽增大且信噪比降低。结合实际情况可知最佳的脉冲宽度范围为 10~40 ns。在调制深度和脉冲宽度一定的情况下,调制频率增加,目标距离的探测精度提高,但信噪比降低,因此要在测距精度与信噪比之间折中选择。在调制频率和脉冲宽度一定的情况下,调制深度增加,目标回波信号的信噪比提高。

5 结 论

利用基于蒙特卡罗方法的计算机仿真技术,建立了余弦调制高斯脉冲光子水下传输模型。基于所

建立的模型,模拟了传统脉冲和余弦调制高斯脉冲激光雷达的水下探测回波信号。仿真结果表明,随着海水吸收和散射系数的增大,传统脉冲的目标回波信号的信噪比降低,甚至会淹没在噪声中,而载波调制技术可以明显提高目标回波信号的对比如。同时研究了载波调制中各参数对探测结果的影响,分别改变载波调制激光雷达系统中的脉冲宽度、调制频率和调制深度进行模拟并分析结果。仿真结果表明,随着脉冲宽度的增加,回波信号展宽变大,信噪比降低,最佳脉冲宽度范围为10~40 ns。在合理选择脉冲宽度后,发现调制频率越高,目标测距精度提高,但信噪比降低,因此实际探测中需要在信噪比与测距精度之间折中选择调制频率。此外,调制深度越大,目标回波信号的调制越明显,目标测距精度提高。本研究的建模和仿真结果可为实际的载波调制激光雷达水下探测提供参考,对提高检测目标回波信号的能力具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Duntley S Q. Light in the sea[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(2): 214-233.
- [2] Mullen L J, Contarino V M. Hybrid LIDAR-radar: seeing through the scatter[J]. IEEE Microwave Magazine, 2000, 1(3): 42-48.
- [3] Pellen F, Olivard P, Guern Y, *et al.* Radiofrequency modulation on optical carrier for target detection enhancement in seawater[C]. SPIE, 2001, 4488: 13-24.
- [4] Mullen L J, Vieira A J C, Herczfeld P R, *et al.* Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(9): 2370-2377.
- [5] Mullen L, Herczfeld P R, Contarino V M. Modulated pulse LIDAR system for shallow underwater target detection[C]. Proceedings of Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, 1994: 4851419.
- [6] Mullen L, Laux A, Cochenour B. Propagation of modulated light in water: Implications for imaging and communications systems[J]. Applied Optics, 2009, 48(14): 2607-2612.
- [7] Cochenour B, Mullen L, Muth J. Modulated pulse laser with pseudorandom coding capabilities for underwater ranging, detection, and imaging[J]. Applied Optics, 2011, 50(33): 6168-6178.
- [8] Mullen L J, Zege E P, Katsev I L, *et al.* Modulated lidar system: Experiment versus theory[C]. SPIE, 2002, 4488: 25-35.
- [9] Mullen L, Alley D, Cochenour B. Investigation of the effect of scattering agent and scattering albedo on modulated light propagation in water[J]. Applied Optics, 2011, 50(10): 1396-1404.
- [10] Mullen L J, Cochenour B, Laux A, *et al.* Application of radar technology to underwater detection, ranging and imaging[C]. Conference on Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications, 2015: LM4F.3.
- [11] Zhong W, Zhang X H, Han H W. Irradiance spatial distribution model of laser source for underwater range-gated imaging radar[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0401005.
钟炜, 张晓晖, 韩宏伟. 水下距离选通成像雷达激光照明模型[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0401005.
- [12] Ji H, Ma Y, Yang K C. Simulation analysis of modulated lidar on optical carrier for target detection in water[J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 648-650.
冀航, 马泳, 杨克成. 载波调制激光雷达水下目标探测的仿真分析[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 648-650.
- [13] Mobley C D. Light and water: Radiative transfer in natural waters[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [14] Liang J, Yang K C, Xia M, *et al.* Monte Carlo simulation for modulated pulse bathymetric light detecting and ranging systems[J]. Journal of Optics A, 2006, 8(5): 415-422.
- [15] Li J, Ma Y, Zhou Q Q, *et al.* Monte Carlo study on pulse response of underwater optical channel[J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 066001.
- [16] Du Y C, Yang L. Confirm of scattering direction and comparison of two modes in Monte Carlo photons tracking[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0829002.
杜永成, 杨立. 蒙特卡罗追踪光子的散射方向确定及两种追踪模式比较[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0829002.
- [17] Xia H, Lin X, Xiao Y Y, *et al.* Monte-Carlo simulation of photon's transport properties in highly scattering media[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3019-3024.
夏辉, 林旭, 肖元元, 等. 光子在高散射媒质中传输特性的蒙特-卡罗模拟[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3019-3024.
- [18] Liu J T, Chen W B. Feasibility study of laser communications from satellite to submerged platform[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(10): 1441-1446.
刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下目标通信可行性研究[J]. 光学学报, 2006, 26(10): 1441-1446.
- [19] Wu F P, Zhang X, Li P J, *et al.* Monte Carlo

- simulation analysis of underwater target detection by oceanic lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121401.
- 吴方平, 章曦, 李配军, 等. 海洋激光雷达水下目标探测的蒙特卡罗仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121401.
- [20] Li X L, Chen Y H, Yu F, *et al.* Comparison and analysis of inversion models for water optical property parameters by ocean lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001005.
- 李晓龙, 陈永华, 于非, 等. 海洋激光雷达水体光学特性参数反演模型对比及分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1001005.
- [21] Pellen F, Intes X, Olivard P, *et al.* Determination of sea-water cut-off frequency by backscattering transfer function measurement[J]. *Journal of Physics D*, 2000, 33(4): 349-354.
- [22] Toublanc D. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(18): 3270-3274.
- [23] Gabriel C, Khalighi M A, Léon P, *et al.* Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12.
- [24] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and scattering of light by small particles*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [25] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: Effects of multiple scattering[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(16): 2996-3001.