

文章编号: 1001-3806(2008)04-0346-04

载波调制激光雷达技术在海洋探测中的应用

马 泳, 冀 航, 梁 琨, 林 宏

(华中科技大学 电子与信息工程系 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 介绍了一种水下探测技术, 以激光脉冲信号为载波, 将微波信号加载到激光脉冲上进行调制编码, 调制编码信息由光信号携带进入水下。在接收端, 通过频率滤波实现对编码信号的提取, 由编码信号的信号处理实现激光雷达水下目标探测。将该技术与多种抑制海水后向散射的方法进行比较, 对载波调制激光雷达在海洋探测应用的特点和研究现状进行了综述。

关键词: 激光技术; 载波调制; 相干信号处理; 激光雷达; 海洋探测

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Application of modulated lidar on optical carrier for ocean exploration

MA Yong, JI Hang, LIANG Kun, LIN Hong

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A method of lidar for ocean exploration was presented, where microwave signal was modulated on laser pulses and the modulated optical pulses were transmitted into water. At the receiver, the modulated optical carrier was examined from a frequency filter to render target detection. Compared with other methods which could restrain the backscattering signal characteristics and current study situation of modulated lidar on optical carrier for ocean exploration were overviewed.

Key words laser technique; modulation on optical carrier; coherent signal processing; lidar; ocean exploration

引 言

蓝绿 (532nm) 激光雷达已应用于从水面和机载空中平台来探测水下目标^[1]。在该应用中, 光波长比声波的波长短, 具有更高的空间分辨率, 并且可实现高搜索速率及多次重复使用的特点^[2]。在利用激光雷达实现海洋探测中存在的最大问题是, 光通过海水信道时会被高度散射, 尤其是海水的后向散射尤为严重^[3]。在光学信号接收端, 由于后向散射光形成了强烈的背景噪声电平, 致使探测目标的分辨率降低, 对比度变差。在激光雷达实现对海洋环境参量的监测和水下目标探测中, 抑制海水的后向散射是核心问题。

1 现有技术概述

抑制海水后向散射的技术可划分为 3 个基本的方法: 空间滤波、极化敏感探测和时间门控, 这 3 种技术也

常被结合应用。这些方法基于多重散射和最低限度散射光在空间、极化状态或时间上的不同来实现。见图 1。

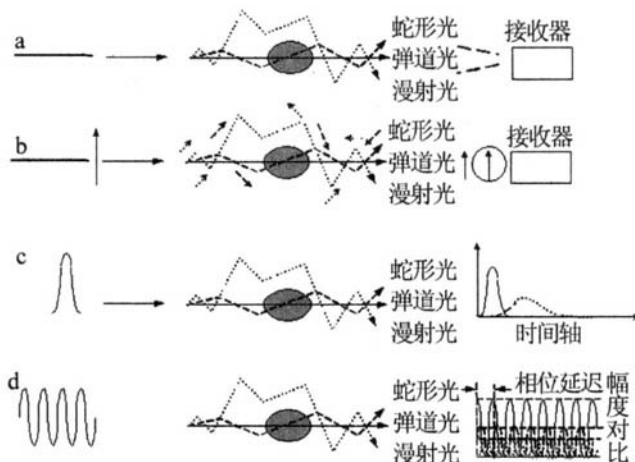


图 1 抑制散射的几种技术

a—空间滤波 b—偏振敏感探测 c—时间门控 d—频域滤波

图 1a 中所显示的是空间滤波方法^[4], 其原理是根据多次散射的光会朝随机方向传播, 未经散射或散射程度较小的光是直线或近似直线传播。通过缩小景象的接收场以及降低接收器的活动区域, 高度散射光子的影响就会减小。在实际应用中将光源和接收器分离, 这样校准过的光束和狭窄的景象接收场被排列在一个很远的点相交, 限制发射光束和景象的接收场之

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2006AA09Z142)

作者简介: 马 泳 (1971-), 男, 副教授, 现主要从事激光雷达探测和激光通信的研究。

E-mail: mayong@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2007-04-10; 收到修改稿日期: 2007-07-26

间的公共区域可以使散射光最少。这种技术的缺点是必须将发射光束和景象的接收场在远程目标上保持同步的逐一扫描。同步扫描技术的实现非常困难,同时严重降低了系统搜索速率,尤其是在海洋探测这样大区域监测的情况下。

图 1b 所示技术利用了返回光子的极化状态的不同^[5]。散射多次的线性极化光往往变得无极化,而沿更为直接方向的路径传播的光将会保持最初的极化状态。高度极化的发射器和极化敏感接收器结合使用,来分辨探测信号的同极化成分和交叉极化成分。接收偏光器只接收发射光的同极化光线,可以减少多次散射光子。然而,这种技术依赖于光子能保持最初的极化状态,当散射的光子数量增加时,保持最初极化状态的光子数量变得越来越少,以现有接收器的敏感程度很难感应到,导致这种技术变得不可行。

图 1c 所示的是时间门控的方法,在信道中直线传播的光先到达接收器,经过多次散射沿着较长的路径传播的光子则经过一段时间的延迟才到达。因此可以在接收器端设置高速的快门,使它打开较短的时间,让那些较早到达的光子能够通过,然后关闭快门,不接收那些时延较大的光子。门控技术采用一个参考脉冲用来控制快门的开与关,对于接收器,需要具有微秒级的门控时间和大约 10^4 的动态范围^[6]。这种技术是 3 种方法中最复杂的,但它能与其它方法结合起来以进一步抑制散射光。

2 基本原理

时间门控方法利用多重散射和没有发生散射的光子返回接收器的时间不同这一现象,对两者进行分辨,将这样的思想应用于频域,利用调制光学信号在相位上的差异来实现分辨多次散射的光子和没有发生散射的光子。经历了多次散射的光子导致了发射脉冲的时间扩展,在频域中,这种现象转化成高频信息的损失。没有发生散射的光子无失真的通过传输介质,保持了发射脉冲中存在的所有频率成分。如图 1d 所示,通过采用适当的调制频率,调制光学信号幅度和相位上的差异能将散射程度较大的光子与未经散射和最低限度散射的光子相区分。

在激光雷达水下探测中,海水后向散射信号的频域响应近似于低通滤波器响应,即主要存在于低频区域,当频率大于某个特定值后响应曲线幅度迅速减小,该频率称为海水后向散射信号的截止频率。据研究,截止频率一般在 $2\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$ 的范围内,较为清澈的水中,其数值更小。MULLEN 等人建立的海水后向散射模型和水下目标信号模型较直观地说明了这一问题^[7],该

模型的激光雷达回波信号幅频响应曲线见图 2。

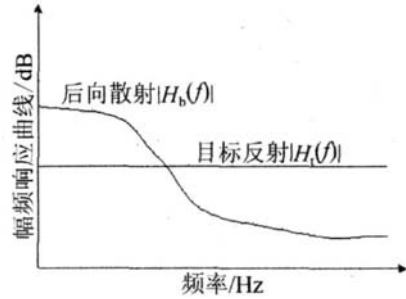


图 2 激光雷达回波信号的幅频响应曲线

图中, $H_b(f) = A \rho \frac{1 - e^{-2\alpha v t_d} e^{j\pi f t_d}}{\alpha v - j2\pi f}$ 是海水后向散射

的频域传递函数,海水后向散射的时域传递函数是 $H_b(t) = A \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-2\alpha v t_i} \delta(t - t_i)$, 因为在水体中微粒分布的非常紧密,所以在激光雷达的研究中,通常可以认为 $H_b(t)$ 为连续状态,即 $H_b(t) = A \rho e^{-2\alpha v t} [u(t) - u(t - t_d)]$, 由后者可以变换得到 $H_b(f)$ 。 $H_t(f) = A \rho_t e^{-2\alpha v t} e^{j\pi f t}$ 是目标回波信号的频域传递函数,由目标回波信号的时域传递函数 $H_t(t) = A \rho e^{-2\alpha v t} \delta(t - t_t)$ 变换得到。 $A = \frac{\eta F A_r}{d^2}$ 为一个常数,它是一个与光接收系统效率 η 截获因子 F 、光学接收装置有效孔径面积 A_r 和探测距离 d 有关的量; N 为探测光脉冲在海水中传输时发生的后向散射总次数; ρ 为光子发生第 i 次后向散射时的后向散射率,在浅水域中,单次后向散射率 ρ 可以统一为 $\rho \alpha$ 为海水衰减系数; v 为光在水中的传输速率; t_i 是光子发生第 i 次后向散射的时刻; ρ_t 表示目标反射率; t_t 表示光子到达水下目标的时刻。

应用载波调制方法时,调制频率应远大于后向散射信号频域响应曲线的截止频率,一般取值在 $10^8 \text{Hz} \sim 10^{10} \text{Hz}$ 之间。这样,从图 1d 所示的原理和图 2 所示的频域特性可以分析出,载波调制激光雷达系统的后向散射信号由于高频部分受到抑制,所以表现出低频特性。而直接由水下目标产生的回波信号能保持与探测信号一致的频域特性,是高频信号。因此,目标信号和后向散射噪声在频域特性上得到显著区分。

频域滤波法的信号处理流程图如图 3 所示。

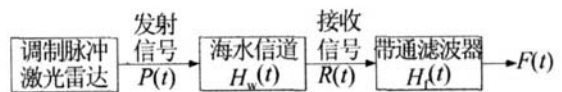


图 3 频率滤波方法的信号处理示意图

设激光雷达所发出的经过高频调制的探测信号为 $P(t) = P_0 u(t - t_p) \cdot [1 + m \cos(2\pi f_m t)]$, 其中, P_0 为激光脉冲的峰值功率, t_p 为调制前的脉宽, m 为调制深度, f_m 为调制频率,海水信道的传递函数为 $H_w(t) = H_b(t) + H_t(t)$, 接收到的回波信号为 $R(t)$ 。由于后向

散射能量主要集中在低频部分,利用一个传递函数为 $H_f(t)$ 带通滤波器,得到接收信号中保持了调制特性的部分,即 $F(t)$ 。

载波调制光信号的海水后向散射信号和水下目标反射信号的频域响应示意图如图 4所示。

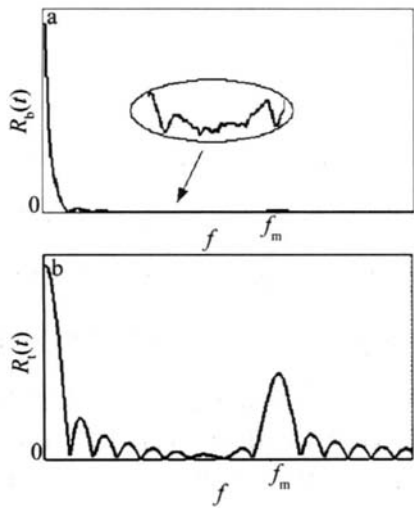


图 4 载波调制脉冲激光雷达系统接收信号的频域响应曲线
a—海水后向散射信号的频谱 b—目标反射信号的频谱

图 4反映了两种信号在频域上的能量分布情况。图 4a为海水后向散射信号的幅频响应曲线,其能量主要集中在低频部分,相比之下,高频部分的能量极为微弱。图 4b为目标反射信号的幅频响应曲线,由图 2所示的传递函数 $H_i(f)$ 性质可知,该响应曲线保持了探测信号中的所有频率成分,即调制频率 f_m 、调制前的脉冲频率 $1/t_p$ 及各次谐波分量,因此在 f_m 处存在一个能量较高的峰。图 4直观说明了当调制频率远高于截止频率时,利用带通滤波器就能抑制后向散射产生的噪声干扰,而目标反射信号不受太大影响。根据图 3所示的方法和图 4的幅频响应曲线,设计出载波调制激光雷达系统如图 5所示。用一个高速调制器,将微波

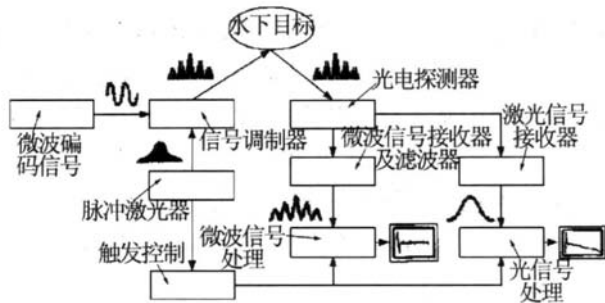


图 5 载波调制激光雷达系统结构框图

副载波加载到光脉冲上,使载波光脉冲可以携带微波信号在水下传输,经过水下目标反射,被一个高速光电探测器所接收,就形成了载波调制激光雷达系统。在接收端,系统接收信号由光学接收器输出后,被分为两路,一路经过低通滤波器,滤除保留了调制特性的信

号,另一路经过中心频率等于调制频率的带通滤波器,滤除散射噪声。两路信号在数字示波器的两个独立通道上被同时显示和数字化,可以分别检测到传统的激光雷达信号和调制脉冲信号。最后,由计算机对探测数据进行收集、存储和分析。该系统可以实现水下目标的探测和测距。

3 实验研究和技术发展概况

为了验证载波调制激光雷达系统的探测效果,近 10年来陆续有实验研究被报道。

美国费城 Drexel大学的 MULLEN 等人先后进行了多次实验,包括计算机仿真研究,以及利用光纤模拟海水信道环境进行的海后向散射研究实验,还有在大西洋进行的载波调制激光雷达系统实地探测实验。通过这些研究,MULLEN 等人得出了该技术对后向散射的抑制可达到 20dB以上的结论^[8]。

2002年法国 PELLEEN 等人宣称进行了载波调制激光雷达系统的水槽实验,对激光脉冲进行了 1.5GHz 的载波调制,利用添加粘土粉末的方法改变水质参量,实验验证了该方法在衰减系数不同的水中,都具有显著抑制后向散射的作用,目标对比度获得了显著增强^[9]。

实验研究中发现,载波调制脉冲激光雷达系统的技术关键,在于可调制激光器的研制。典型的激光雷达实验系统采用的是窄脉冲激光器。通常的激光雷达的激光脉宽范围是 5ns~20ns,如果需要在这样的脉冲上加载几个微波脉冲,则意味着调制频率要达到吉赫兹的数量级。目前有 4种调制方法。

(1)LD 直接调制。LD 直接调制方法通过调节注入电流的方式调制 LD 的输出光强,所以简单、方便。由于 LD 的注入电流和输出功率之间的关系是非线性的,该方法只能在特定的带宽范围内使用,以免在输出信号中引入非线性噪声^[10]。

(2)外调制。通过电子器件驱动光学 LNbO₃ 相位调制器,当激光光束经过相位调制器即被调制。外调制方式复杂、费用高、光损耗较大,但可以达到很宽的调制带宽^[11]。

(3)锁模。利用谐振腔内一个受外部信号控制的调制器,用一定的调制频率周期性的改变谐振腔的损耗或光程(振幅调制和相位调制)。当选择的调制频率与纵模的间隔相等时,对各个模的调制会产生边带,其频率与两个邻近纵模的频率一致。由于模之间的相互作用,使所有的模在足够强的调制下达到同步,各模将会发生相干叠加,形成锁模序列脉冲。相对外调制激光器和直接调制激光器,锁模激光器的相对强度噪

声要低约 5dB,并能产生功率更高的输出调制信号。目前设计出的 4 电极锁模激光二极管脉冲重复频率接近 $40\text{GHz}^{[12]}$ 。激光锁模方式带宽极窄,直接用于频率调制效果不佳。

(4) 两束单模激光外差法。用两个相同的光学谐振腔分别输出单模激光,当两束激光被混合、耦合进入单模光纤,发送到高速光电二极管中,由于光信号的自外差,产生微波信号。激光外差方法带宽很宽,若频率足够稳定,是较理想的可调微波副载波的产生方式^[13]。由于激光器本身的特性,输出信号会产生相位噪声。

作者经研究发现,在结合了锁模技术和 Q 开关技术的激光谐振腔中,内置一个电光调制器进行微波调制,是当前技术条件下相对较好的一种调制方案,适用于载波调制激光雷达探测方案,其优点主要为稳定性强、光效率高、峰值功率大和可调制带宽较宽。载波调制激光器的结构见图 6。图中, R 为镜面反射率, L 为腔长,它与调制频率 f_m 的关系为: $L = c/2f_m$, c 为光速。

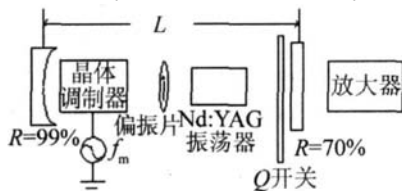


图 6 载波调制激光器结构原理图

4 发展方向与展望

载波调制脉冲激光雷达方法除了用于改善水下探测和成像系统的性能外,还可以在其它因光学散射而使图像对比度和分辨率降低的应用领域发挥作用,如研究激光脉冲在云、雾、烟和生物组织中的传输特性,采用合适的波长和光学器件,将这一技术应用到大气和生物医学光学成像系统。

对于载波调制脉冲激光雷达技术,今后的研究重点应在对传输介质和目前及今后的光器件发展都具备

深入彻底的认识的基础上,确定系统参量,以便对各种探测环境,都能使系统性能达到最优^[14]。并在此研究的基础上,确定究竟是信道环境还是技术因素,会成为系统性能进一步提升的瓶颈。

参 考 文 献

- [1] CHEN W G, HUANG T X, LU Y M. Survey of airborne oceanic lidar [J]. *Laser Technology*, 1998, 22(3): 147-152 (in Chinese).
- [2] XU Q Y, YANG K T, WANG X B, *et al*. Bluegreen lidar ocean survey [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2002, 1-3 (in Chinese).
- [3] MULLEN L J, CONTARNO V M. Hybrid lidar-radar seeing through the scatter [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2000, 1(3): 42-48.
- [4] WERNER C, STREICHER J, HERRMANN H, *et al*. Multiple scattering lidar experiments [J]. *Opt Engng*, 1992, 31(8): 1731-1745.
- [5] KOUZOUBOV A, BRENNAN M J, THOMAS J C. Treatment of polarization in laser remote sensing of ocean water [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(18): 3873-3885.
- [6] MCLEAN J W. High resolution 3-D underwater imaging [J]. *SPIE*, 1999, 3761: 10-19.
- [7] CONTARNO V M, HERRCZFELD P R, MULLEN L J. Modulator lidar system. United States G01C 003/08, 5822047 [P]. 1998-10-13.
- [8] MULLEN L, CONTARNO V M, LAUX A, *et al*. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging [J]. *Proc SPIE*, 1999, 3761: 2-9.
- [9] PELLEN F, OLIVARD P, GUERN Y, *et al*. Radiofrequency modulation on optical carrier for target detection enhancement in seawater [J]. *SPIE*, 2002, 4488: 13-24.
- [10] SMYTH F, BARRY L P. Effects of laser diode nonlinearities in hybrid fiber/radio systems [J]. *Proc SPIE*, 2003, 4876: 159-167.
- [11] LI Y F, VEIRA A J C. Rapidly tunable millimeter-wave optical transmitter for lidar-radar [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(10): 2048-2055.
- [12] VILCOT J, GARDEL S, ULLIAC G. Novel device concepts for microwave photonics functionalities [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6343: 63432E-1-63432E-6.
- [13] FRANCOIS D, CHITHANH N, ROLLAND H, *et al*. Optical to microwave conversion in a traveling wave electro-optic polymer based device [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6117: 130-140.
- [14] POPE R W, JOHNSON L P, LEJDEBRNK U, *et al*. Airborne lidar hydrography: vision for tomorrow [J]. *Sea Technology*, 2002, 43(6): 27-34.

(上接第 345 页)

- [3] ZENG Zh Q, XIAO X Y, GUI Zh L, *et al*. A $\text{La}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ composite ceramic membranes from sol-gel processing [J]. *Materials Letters*, 1998, 35(1/2): 67-71.
- [4] QUE W X, SUN Z, ZHOU Y, *et al*. Preparation of hard optical coatings based on an organic/inorganic composite by sol-gel method [J]. *Materials Letters*, 2000, 42(5): 326-330.
- [5] ZHOU W J, YUAN Y H, ZHANG D Y, *et al*. Research on damage of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ film induced by 1.064 μm CW laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 76-81 (in Chinese).
- [6] COUTIER C, AUDIER M, FICK J, *et al*. A sol-gel preparation of optically active layers in the system $\text{ErSiO}_2\text{-TiO}_2$ [J]. *Thin Solid Films*

2000, 372(1/2): 177-189.

- [7] KARTH KEYAN A, ALMEIDA R M. Crystallization of $\text{SD}_2\text{-TiO}_2$ glassy films studied by atomic force microscopy [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 274(1/3): 169-174.
- [8] HIROSE T, FOKINE M, SAITO K, *et al*. Waveguide writing by CO_2 laser annealing on sputtered silica film [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(6/7): 664-668.
- [9] LIX Y, LIH L, LIU J W, *et al*. Conductive line preparation on resin surfaces by laser micro-cladding conductive pastes [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233(1/4): 51-57.
- [10] HUANG J F. Principle and technology of sol-gel [M]. Beijing Chemical Industry Press, 2005, 116 (in Chinese).