载波调制激光雷达滤波带宽的半实物仿真平台

周 波,梁 琨,马 泳,李少华,黎 静

(华中科技大学 电子与信息工程系,湖北 武汉 430074)

摘 要:将脉冲激光调制成更窄脉宽的脉冲串,并作为激光雷达信源信号用于水下探测,在接收端采用窄带滤波器的方案被证明可以有效抑制海水后向散射对水下探测的影响。在实际应用中,在调制频率一定的情况下,接收端滤波器带宽设计直接决定系统对海水后向散射抑制能力。在研究海水水质参数与脉冲激光频率展宽的基础上,构建"海洋载波调制脉冲激光雷达"半实物平台进行仿真实验研究。半实物仿真表明,随着滤波带宽增大,对比度提升呈现出了先增大后缓慢下降的趋势。最后通过实验结果的对比分析给出了一种滤波器带宽设计方法。

关键词:载波调制激光雷达; 频域滤波; 滤波带宽; 半实物访真平台

中图分类号:TN957.54 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)04-0930-05

Semi-physical simulation platform of filter bandwidth of modulated lidar on optical carrier

Zhou Bo, Liang Kun, Ma Yong, Li Shaohua, Li Jing

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

Abstract: It has been proved that backscatter can be significantly reduced under water detection when laser source was modulated to be of narrower pulse at the emitter and echo was detected by narrow-band filter at the receiver. In practical applications, filter bandwidth is the key parameter for suppression of backscatter when modulation frequency has been determined. Based on previous study on seawater parameters and pulse frequency expanding characteristics, an "ocean modulated lidar" semi-physical simulation platform was established to study filter bandwidth. It is concluded that target contrast will firstly increase and then decline slowly with the increase of filter bandwidth. By comparing the experimental results, a method of filter bandwidth design was presented.

Key words: modulated lidar on optical carrier; frequency domain filtering; filter bandwidth; semi-physical simulation platform

收稿日期:2012-08-11; **修订日期**:2012-09-21

基金项目:湖北省自然科学基金(2010CDB02702)

作者简介:周波(1976-),男,讲师,硕士生导师,博士,主要从事遥感探测方面的研究。Email:liangkun@hust.edu.cn

0 引　言

采用激光雷达探测海洋环境参数和水下目标,具有空间分辨率高、图像更为清晰的特点[1-5]。激光雷达海洋探测面临的主要问题是,光在水下传输过程中会产生严重的后向散射,后向散射光形成噪声信号严重影响探测灵敏度。对后向散射光的有效抑制,是实现高精度探测的关键[6]。美国 Drexel 大学 Mullen 等人提出了载波调制激光雷达[7-8]作为新的水下目标探测方案,这项技术是基于光传播介质海水的特殊物理特性。在后向散射模型中,海水信道具有低通特性,对应一个低通传递函数。与后向散射噪声相比,目标回波信号传递函数特性与频率无关,采用高频调制激光源并结合接收端窄带滤波器可以明显地减少后向散射噪声而不影响目标回波信号。这项技术可以显著提高目标对比度,并通过检测调制频率的脉冲调制激光信号得到水下目标的即时方位。

在载波调制激光雷达系统接收端的设计中,滤波器带宽是一个关键参数。滤波器带宽与目标信号的带宽是否匹配,直接影响了目标对比度的高低,以及目标信号信息量是否完整[9]。在进行系统设计时应该综合考虑各种因素,选择最优滤波器带宽。目前国内外在调制脉冲激光雷达方面所开展的研究中,对滤波器带宽的选择,一般是根据经验取值,其设计方案没有体现出滤波器带宽对探测性能的影响。文中将通过构建针对海洋水下目标探测和环境参数检测的"海洋载波调制脉冲激光雷达"半实物仿真原理平台,对滤波器带宽进行研究。

1 理　论

调制脉冲激光雷达系统结构框图如图 1 所示。

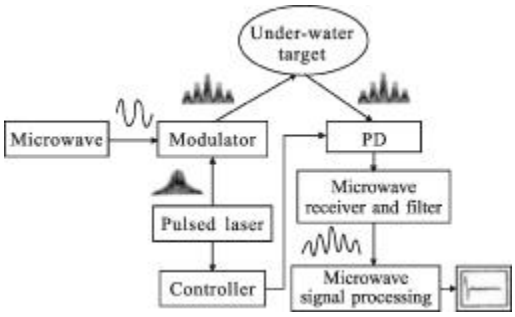

图 1 调制脉冲激光雷达系统结构框图

Fig.1 Block diagram of the modulated lidar

设经过微波调制的激光脉冲探测信号为:

$$\mathbf{P}_m(t)=\mathbf{P}_\theta(\mathbf{u}(t)-\mathbf{u}(t-t_n))[1+\mathbf{m}\cos(2\pi f_m t)] \tag{1}$$

式中:$\mathbf{P}_\theta$ 为激光脉冲功率;$\mathbf{u}(t)$为单位阶跃函数;t_n 为调制前的脉宽;$\mathbf{m}$ 为调制指数;f_m 为调制频率。由于海水后向散射信道系统函数表现出低通滤波特性,其冲激响应下降 3 dB,即半功率点对应的频率称为截止频率 f_c。调制激光雷达系统的调制频率 f_m 一般远高于截止频率 f_c[10],以便更好地抑制由海水后向散射产生的噪声干扰。

$\mathbf{P}_m(t)$经由海水信道传输,在接收端接收的回波信号 $\mathbf{P}(t)$可表示为:

$$\mathbf{P}(t)=\mathbf{P}_m(t)\otimes(\mathbf{H}_b(t)+\mathbf{H}_t(t))=\mathbf{P}_b(t)+\mathbf{P}_t(t) \tag{2}$$

式中:$\otimes$为卷积算子;$\mathbf{P}_b(t)$表示后向散射回波信号;$\mathbf{P}_t(t)$表示目标反射回波信号;$\mathbf{H}_b(t)$表示海水后向散射系统函数;$\mathbf{H}_t(t)$表示水下目标反射系统函数。$\mathbf{P}_b(t)$和 $\mathbf{P}_t(t)$均包含分别由低频探测信号和高频探测信号产生的回波信号。$\mathbf{P}_b(t)$的高频分量由大量频率相同的高频信号叠加而成,注意到各叠加信号由于产生于随机散射,其相位延迟具有随机性,当大量相位延迟不同的高频调制波形叠加在一起时就不能保持原来的频率特性,因此 $\mathbf{P}_b(t)$的高频特性将会被抑制,其能量主要表现在低频分量中。$\mathbf{P}_t(t)$的高频分量产生于目标反射,其相位延迟为某个确定值,原来的高频调制波形会在接收信号中得以保持,因此 $\mathbf{P}_t(t)$的高频特性不受影响,其能量同时表现在低频分量和高频分量中。

回波信号 $\mathbf{P}(f)$首先通过一个中心频率为 f_m、带宽为 Δf 的窄带带通滤波器 $\mathbf{H}_F(f)$,得到带有调制特性的回波信号 $\mathbf{F}(f)$,即:

$$\mathbf{F}(f)=\mathbf{P}(f)\cdot\mathbf{H}_F(f)=\mathbf{F}_b(f)+\mathbf{F}_t(f) \tag{3}$$

式中:$\mathbf{F}_b(f)$为后向散射信号滤波之后的部分;$\mathbf{F}_t(f)$为目标回波信号滤波之后的部分。$\mathbf{H}_F(f)$的理想频谱特性为:

$$\mathbf{H}_F(f)=\begin{cases}1, f\in[f_m-\Delta f/2, f_m+\Delta f/2]\\ 0, f\notin[f_m-\Delta f/2, f_m+\Delta f/2]\end{cases} \tag{4}$$

根据上述构建的滤波模型分析可见,在调制频率 f_m 一定的情况下,滤波器带宽 Δf 对系统的后向散射抑制能力起决定作用。实际激光雷达探测系统应尽量避免取过小的滤波器带宽,这主要是由于海水的自身衰减本来就较大,目标信号能量较低,过小的滤波器带宽可能造成滤波之后的信号能量微弱到无

法识别的程度,从而牺牲探测深度。同时后向散射信号的能量主要集中在低频部分，由于调制激光雷达系统的调制频率 f_m 远高于截止频率 f_c，可以推测滤波最优带宽具有较大的带宽范围。

2 半实物仿真平台

目前，载波调制脉冲激光雷达参数设计主要通过理论计算研究或采用光纤模拟海水信道实现[1-2]。由于实际工程中采用的模拟信号处理电路受器件分布参数等影响，与理论计算得到的仿真结果存在着较大差异,因此,单纯的理论计算并不能够准确指导实际电路的参数设计工作;另外,光纤模拟实验系统存在信道设计不够灵活、可以改变的参数有限等缺陷，难以凭借其来研究各种不同应用背景下的系统适用性及最佳设计问题。为了解决以上问题,文中提出一种针对海洋水下目标探测和环境监测的机载海洋载波调制脉冲激光雷达半实物仿真系统理论模型,并在此基础上搭建半实物平台实例。该系统采用光路软件仿真结合电路硬件实物的方法来实现,既能够保证可基于实际信号处理电路进行参数调整,使得参数设计结合实际系统特性，还能够通过光路仿真实现参数设计具有实时可调的灵活性。

如图 2 所示,文中所使用的“海洋载波调制脉冲激光雷达”半实物仿真原理平台以信号分析为主线,

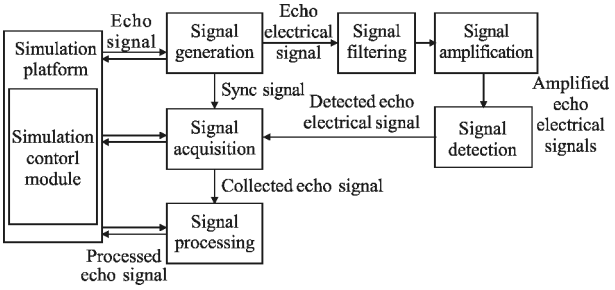

图 2 半实物平台结构

Fig.2 Structure of the semi-physical platform

对载波调制信号生成,光信号在信道中的传输、以及光电接收器进行计算机模拟仿真。将仿真输出的信号进行 D/A 转换,完成激光雷达系统信源和信道的计算机模拟。并进一步研制雷达系统的信号处理硬件电路，信号通过信号处理电路之后再经过实时数据采集输入到计算机进行后续分析显示，从而构建出激光雷达系统的半实物仿真平台，可在计算机上得到探测信号的波形,并实现对探测目标的分析。

带通滤波器是半实物仿真平台的信号处理部分,也是文中研究滤波器带宽设计的重点。实验设计了 3 组不同中心频率的带通滤波器以验证调制脉冲激光雷达调制频率对系统性能的影响,另外,在 3 组中心频率下分别设计了 3 组不同带宽的带通滤波器以通过硬件验证滤波器带宽对系统性能的影响,中心频率 f_m 分别设计为典型值 1 GHz,2 GHz,3 GHz,带宽 Δf 分别设计为典型值 50 MHz,100 MHz,200 MHz。在仿真时采样率为 7.5 MS/s，经过 100 MS/s 的 NI PXI5441 之后模拟的回波信号在频域上经过了 75 倍的线性压缩，这样得到 n=1,2，…,9,9 组硬件滤波器的设计参数如表 1 所示。

表 1 实际设计的 9 组滤波器参数

Tab.1 Parameters of the 9 filters

n	f_m/MHz	Δf/MHz
1	40/3	2/3
2	40/3	4/3
3	40/3	8/3
4	80/3	2/3
5	80/3	4/3
6	80/3	8/3
7	40	2/3
8	40	4/3
9	40	8/3

最终设计的 9 组带通滤波器为三阶巴特沃斯带通滤波器,分别组成 9 组信号处理通道,为了便于信号的传输，在每组滤波器两端增加 BNC 转接头,分别与任意波形发生器 NI PXI5441 和高速数据采集卡 NI PXI5152 连接。滤波器硬件电路实物图如图 3 所示。经反复调试,几组带通滤波器的中心频率已经

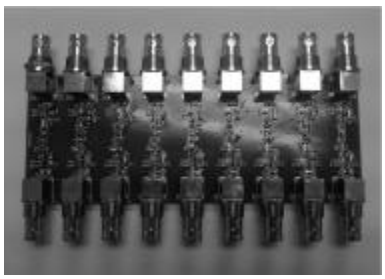

图 3 带通滤波器硬件电路实物图

Fig.3 Hardware of the band-pass filter

达到了最初设计的要求，但由于受到电感元件的 Q 值较低等因素的限制，实际滤波器的带宽均大于实验所需的带宽。考虑到系统稳定性等多方面因素,进而选择在数据采集后再进行实验所需带宽的滤波处理，即在计算机中做进一步的带宽可变的数字带通滤波。这样做不仅不会影响整个系统的性能,还使得基于该系统平台的实验更加灵活。

3 仿真及分析

为了研究滤波器带宽对系统性能的影响，需要设置其他系统参数为典型值并保持不变，然后通过改变滤波器带宽得到相应实验数据并进行分析。在文中对滤波器带宽的研究中，各系统参数的典型值取值如下:调制频率为 3 GHz;带宽为 200 MHz;脉宽为 10 ns;调制深度为 0.5;目标反射率为 0.2;目标深度为 10 m;衰减系数为 0.15;后向散射率为 0.002 7。激光信源为 sinc^2 脉冲。后向散射噪声模型为均匀分布模型。

该实验主要通过分析三项系统指标来评估滤波器带宽对系统性能的影响,即系统对噪声抑制、目标抑制以及由此得到的系统对目标对比度的提升能力,从中能够反映出系统的整体性能。载波调制激光雷达系统最主要的优势之一是其对海水后向散射信号具有极强的抑制能力。后向散射抑制能力的计算公式如下:

$$\mathbf{ATT}_b=10\lg(\mathbf{E}_b/\mathbf{E}_{bf}) \tag{5}$$

式中:$\mathbf{ATT}_b$ 为后向散射因频域滤波造成的衰减,dB;$\mathbf{E}_b$ 为激光雷达接收到的后向散射信号能量;$\mathbf{E}_{bf}$ 为调制脉冲激光雷达对后向散射信号进行频域滤波处理之后,剩余的后向散射能量。

在利用滤波器进行抑制后向散射噪声的处理时,目标信号也有一定程度的衰减。目标衰减的计算公式如下:

$$\mathbf{ATT}_s=10\lg(\mathbf{E}_s/\mathbf{E}_{sf}) \tag{6}$$

式中:$\mathbf{ATT}_s$ 为目标信号经滤波造成的衰减,dB;$\mathbf{E}_s$ 为激光雷达接收到的目标信号能量;$\mathbf{E}_{sf}$ 为调制脉冲激光雷达对激光雷达回波信号进行频域滤波处理之后,剩余的目标信号能量。

系统对后向散射噪声的抑制能力减去目标信号经过系统处理之后的能量衰减即得到系统对目标对比度提升的性能。对比度提升能力的计算公式如下:

$$\mathbf{ATT}_{con}=\mathbf{ATT}_b-\mathbf{ATT}_s \tag{7}$$

式中:$\mathbf{ATT}_{con}$ 为系统对目标对比度的提升,dB。

表 2 给出了滤波器带宽对系统性能的影响的理论仿真结果。由于目标信号有一定的有效带宽,滤波器带宽越窄,削减有效信号越多,目标对比度反而下降,因此,滤波带宽不能太小。但实际实验噪声在频域上较宽,因此,实际滤波器带宽不能太大,否则不能起到有效滤除噪声的作用。从理论仿真数据来看,滤波器带宽在 200~800 MHz 之间均为可选最优带宽。因此,系统最优带宽应设置为 200 MHz,后面的半实物仿真数据会验证这一结论。

表 2 不同滤波带宽对系统影响的理论仿真结果

Tab.2 Simulated ATT_s under different bandwidths

Δf/MHz	100	200	300	400	600	800
$\mathbf{ATT}_b$/dB	27.6	27.2	27.2	27.2	27.4	27.5
$\mathbf{ATT}_s$/dB	9.1	6.3	5.9	5.8	5.9	6.0
$\mathbf{ATT}_{con}$/dB	18.5	20.9	21.3	21.4	21.5	21.5

半实物平台仿真结果如表 3 所示，以下将通过分析该组数据来研究滤波带宽对系统性能的影响。从表 3 的 $\mathbf{ATT}_b$ 数据可以看出:随着滤波器带宽的减小,系统对后向散射噪声的抑制能力逐渐增强,当带宽减小到一定程度时(如 100 MHz),系统对后向散射噪声的抑制能力减弱。这是因为滤波器带宽远小于目标信号带宽，从而造成一部分信号能量经过滤波之后分散成为噪声能量,使得噪声能量增加,因此,噪声抑制能力减弱。从表 3 的 $\mathbf{ATT}_s$ 数据可知:滤波器带宽的变化基本不影响目标信号衰减大小，只有在滤波器带宽小于 200 MHz 的最优系统带宽时,由于

表 3 不同滤波带宽对系统影响的半实物平台仿真结果

Tab.3 ATT_s measured from semi-physical platform under different bandwidths

Δf/MHz	100	200	300	400	600	800
$\mathbf{ATT}_b$/dB	23.9	25.1	25.1	24.9	24.8	24.7
$\mathbf{ATT}_s$/dB	4.2	3.4	3.6	3.7	3.8	3.8
$\mathbf{ATT}_{con}$/dB	19.7	21.7	21.5	21.2	21.0	20.9

滤波器带宽远小于目标信号带宽,滤波之后目标信号失真,目标信号衰减增大。表 3 的 ATT_{con} 数据表明:目标对比度的提升能力在 200 MHz 时达到峰值。

根据目标对比度提升这一系统性能指标,将半实物平台仿真结果与理论仿真结果进行对比,如表 4 所示。对比理论仿真数据和半实物平台仿真数据可知,由于理论仿真数据是理想模型,没有系统噪声等随机因素影响, 具有一个较大的带宽范围,均可作为滤波最优带宽。但是半实物平台仿真显示,带宽越大,滤除噪声效果越差,反映了真实情况。这是因为实际实验中的噪声在频域上较宽, 因此,实际滤波器带宽不能太大,否则不能起到有效滤除噪声的作用。

表 4 半实物平台仿真与理论仿真结果的对比

Tab.4 Comparison of semi-physical platform and simulation

Δf/MHz	100	200	300	400	600	800
ATT_{con1}/dB	18.5	20.9	21.3	21.4	21.5	21.5
ATT_{con2}/dB	19.7	21.7	21.5	21.2	21.0	20.9
Sub/dB	-1.2	-0.8	-0.2	0.2	0.5	0.6

4 结 论

文中通过建立“海洋载波调制脉冲激光雷达”半实物仿真原理样机, 对载波调制激光雷达系统的滤波带宽进行了研究,得到了以下结论,频域滤波对海水后向散射信号有很强的抑制能力(23~25 dB),特别当滤波器带宽越窄时, 后向散射噪声的抑制能力越强,但是当滤波器带宽小于一定程度时,噪声信号的抑制能力减弱,同时目标信号的抑制加强,选择合适的滤波器带宽可以有效提高系统性能。不同于理论分析仿真结果所得到的滤波最优带宽具有较大的带宽范围的结论,在半实物仿真下,系统噪声被引入,带宽越大,滤除噪声效果越差,对比度提升随着带宽增大呈现出先增大后缓慢下降的趋势, 从而给出了一种滤波器带宽的设计方法, 即寻找对比度提升的拐点确定最佳滤波器带宽。

参考文献:

[1] Feng Longling. Method of simulated testing of pulse laser rangefinder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(2): 127-129. (in Chinese)
冯龙龄. 脉冲激光测距系统的仿真检测技术[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 127-129.

[2] Zhang Hongmin, Rong Jian, Li Tao, et al. Simulation analysis of modulated lidar on optical carrier for target detection in deep-ocean[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2409-2412. (in Chinese)
张洪敏, 荣健, 李涛, 等. 深海目标探测中载波调制激光雷达技术的仿真分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2409-2412.

[3] Strand M P. Underwater electro-optical system for mine identification[C]//SPIE, 1995, 2496: 487-497.

[4] McLean J W. High resolution 3-D underwater imaging[C]//SPIE, 1999, 3761: 10-19.

[5] Steinvall O K, Koppari K R, Lejdebrink U, et al. Depth sounding lidar-performance and models[C]//SPIE, 1996, 2748: 18-38.

[6] Malinka A V, Zege E P. Retrieving seawater-backscattering profiles from coupling Raman and elastic lidar data [J]. Applied Optics, 2004, 43(19): 3925-3930.

[7] Mullen L, Contarino V M, Herczfeld P R. Modulated lidar system[P]. USA: 5822047, 1998-10-13.

[8] Mullen L, Herczfeld P R, Contarino V M. Progress in hybrid lidar-radar for ocean exploration [J]. Sea Technology, 1996, 37(3): 45-52.

[9] Ji Hang, Ma Yong, Liang Kun, et al. Study of bandwidth for suppressing seawater backscattering based on frequency filtering[J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 337-339. (in Chinese)
冀航, 马泳, 梁琨, 等. 频域滤波抑制海水后向散射的带宽研究[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 337-339.

[10] Pellen F, Olivard P, Guern Y, et al. Radio frequency modulation on an optical carrier for target detection enhancement in sea-water[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(7): 1122-1130.