

文章编号: 1001-3806(2008)04-0337-03

频域滤波抑制海水后向散射的带宽研究

冀 航^{1,2}, 马 泳^{1,2*}, 梁 琨^{1,2}, 王宏远¹

(1. 华中科技大学 电子与信息工程系, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 在激光雷达探测海水水下目标的应用中, 基于频域滤波的信号处理技术可以抑制海水后向散射噪声。其中接收系统中滤波器带宽的大小不仅对后向散射起到抑制作用, 而且对目标信号产生抑制作用。为了确定带宽取值范围, 分析了调制脉冲激光雷达探测信号水上传输模型, 研究了海水后向散射信号以及目标反射信号的频域特性。通过对接收信号在频域上进行仿真, 归纳出接收系统滤波器带宽的最优设计方法。该研究结果为系统达到最佳信噪比奠定理论基础。

关键词: 激光技术; 带宽; 频域滤波; 后向散射; 激光雷达

中图分类号: TN957.54 **文献标识码:** A

Study of bandwidth for suppressing seawater backscattering based on frequency filtering

Ji Hang^{1,2}, Ma Yong^{1,2}, Liang Kun^{1,2}, Wang Hongyuan¹

(1. Department of Electronics and Information Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China; 2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract In the application of using lidar to detect undersea targets, a kind of signal processing technology based on frequency filtering is proved to be able to suppress the seawater backscattering effectively. The bandwidth of the filter in the receiving system doesn't only suppress the backscattering but also suppresses the target signal. In order to estimate the range of the bandwidth, the seawater transport model of the modulated-pulse lidar signal and the frequency characteristic of the seawater backscattering signal and target reflecting signal were studied. After simulating the received signal on frequency domain, the optimum design method on the bandwidth of the filter in the receiving system was found and the optimum signal-to-noise ratio of the system could be established by this result.

Key words laser technique; bandwidth; frequency filtering; backscattering; lidar

引 言

海水中光的后向散射效应, 导致接收到的水下目标的光信号强度被后向散射光强所淹没, 对激光探测造成很大困难。一种基于频域滤波的信号处理技术被证明可以有效抑制海水后向散射噪声^[1]。后向散射光信号的频率主要分布在低频段上。在激光器中采用频率较高的微波信号作为副载波^[2-3], 对光脉冲进行频率调制, 系统以这种被调制的脉冲激光进行水下目标探测, 并在接收端通过频域上的检波和带通滤波手段, 去除低频部分能量, 仅保留与调制频率相同的信号, 可

以实现目标反射信号和后向散射噪声干扰信号的分离, 达到提高信噪比的目的。

频域滤波的方法抑制海水后向散射的研究中, 滤波器带宽的设计是关键问题之一, 滤波器带宽与目标信号的带宽是否匹配, 直接影响了信噪比的高低, 以及目标信号信息量是否完整。美国 Drexel 大学 MULLEN 等人于 1995 年起展开对基于频域滤波检测的激光雷达的研究, 给出了简单的激光雷达系统设计方案^[4,5], 并且从理论和仿真实验方面验证了该方法在抑制后向散射噪声方面的有效性, 但目前尚没有对激光探测系统的系统参量的设计展开进一步的研究, 尤其对于滤波器带宽的选择, 仅是根据经验取值, 设计方案没有体现出滤波器带宽对探测性能的影响。

1 频域滤波方法

激光雷达海洋探测中, 水下目标反射光是准直光束, 经过目标反射的准直光信号具有一致的相位延迟,

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: 冀 航 (1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为信号处理和激光雷达探测。

* 通讯联系人。E-mail: mayong@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2007-04-10; 收到修改稿日期: 2007-11-20

其频率与探测信号的频率相同。后向散射信号起源于水中大量随机分布的散射体^[6],表现为各散射体的反射光的叠加作用。散射体上的反射光的相位延迟是随机的,它们叠加后相位趋于 0 后向散射光失去了探测信号的高频特性,转化为低频信号,因此,这两种信号在频域上可被区分开。频域滤波方法的流程图见图 1。

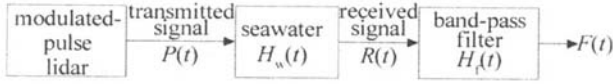


Fig 1 Flow chart of signal processing based on frequency filtering

经过高频调制的激光探测信号为 $P(t) = P_0 u(t - t_p) \cdot [1 + m \cos(2\pi f_m t)]$, 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, $u(t)$ 为单位阶跃函数。

由激光雷达方程^[7]构建光信号在海水信道中的传输模型 $H_w(t)$:

$$H_w(t) = H_b(t) + H_i(t) = A \sum_{i=1}^N \rho_i \exp(-2\alpha v t_i) \times \delta(t - t_i) + A \rho_i \exp(-2\alpha v t_i) \delta(t - t_i) \quad (1)$$

式中, $H_b(t) = A \sum_{i=1}^N \rho_i \exp(-2\alpha v t_i) \delta(t - t_i)$ 是海水的后向散射效应的传递函数, $H_i(t) = A \rho_i \exp(-2\alpha v t_i) \times \delta(t - t_i)$ 是目标回波信号的特性, $\delta(t)$ 为单位冲激函数。 $A = \frac{\eta F A_r}{d^2}$ 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传输时发生的后向散射总次数; ρ_i 为光子发生第 i 次后向散射时的后向散射率, 在浅水域可以近似为一个常数, 即 $\rho_i = \rho$ α 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, 在浅水域可近似为 $t_i = n_i t_d / N$, t_d 为光到达海底的时间, $n \in X$, X 是在 $[1, N]$ 区间上满足均匀分布的一组随机数; ρ 表示目标反射率; t_i 表示光子到达水下目标的时刻。

载波调制后的激光脉冲信号 $P(t)$ 经由海水信道传输, 在接收端接收的返回信号 $R(t)$ 可表示为:

$$R(t) = P(t) \otimes H_w(t) \quad (2)$$

将 (1) 式代入 (2) 式, 得:

$$R(t) = P(t) \otimes [H_b(t) + H_i(t)] = R_b(t) + R_i(t) \quad (3)$$

则载波调制脉冲激光雷达系统的海水后向散射信号为:

$$R_b(t) = P(t) \otimes [A \rho \sum_{i=1}^N \exp(-2\alpha v t_i) \delta(t - t_i)] = P_0 A \rho \sum_{i=1}^N \{1 + m \cos[2\pi f_m (t - t_i)]\} \times \exp(-2\alpha v t_i) \times [u(t - t_i) - u(t - t_i - t_p)] \quad (4)$$

载波调制脉冲激光雷达系统的水下目标回波信号为:

$$R_i(t) = P(t) \otimes H_i(t) = P(t) \otimes [A \rho \exp(-2\alpha v t_i) \delta(t - t_i)] = P_0 A \rho \exp(-2\alpha v t_i) \times \{1 + m \cos[2\pi f_m (t - t_i)]\} \times [u(t - t_i) - u(t - t_i - t_p)] \quad (5)$$

对 (4) 式、(5) 式作离散傅里叶变换, 可得载波调制脉冲激光雷达系统的海水后向散射信号频谱:

$$R_b(\omega) = P_0 A \rho \times \sum_{i=1}^N \left\{ \exp(-2\alpha v t_i) \left[\frac{1}{j\omega} \exp(-j\omega t_i) [1 - \exp(-j\omega t_p)] + \frac{m}{2j(\omega + \omega_c)} \exp(-j\omega t_i) [1 - \exp(-j(\omega + \omega_c) t_p)] + \frac{m}{2j(\omega - \omega_c)} \exp(-j\omega t_i) [1 - \exp(-j(\omega - \omega_c) t_p)] \right] \right\} \quad (6)$$

式中, $\omega_c = 2\pi f_m$ 。

载波调制脉冲激光雷达系统的水下目标反射信号频谱:

$$R_i(\omega) = P_0 A \rho \exp(-2\alpha v t_i) \times \left[\frac{1}{j\omega} \exp(-j\omega t_i) - \exp(-j\omega(t_i + t_p)) \right] + \frac{m}{2j(\omega + \omega_c)} \exp(-j\omega t_i) [1 - \exp(-j(\omega + \omega_c) t_p)] + \frac{m}{2j(\omega - \omega_c)} \exp(-j\omega t_i) [1 - \exp(-j(\omega - \omega_c) t_p)] \quad (7)$$

由 (6) 式和 (7) 式可得载波调制脉冲激光雷达系统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。需要说明的是, 后向散射信号的能量往往是目标回波信号的几十乃至几百倍, 即图 2a 的纵轴单位是图 2b 纵轴单位的几十至几百倍。

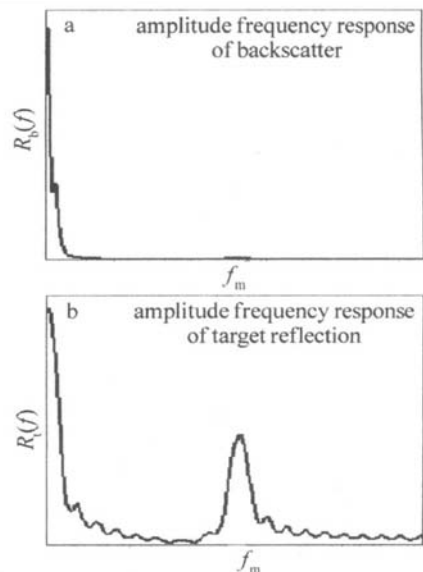


Fig 2 Amplitude frequency response of lidar return signal

从图 2a 可以看到, 海水后向散射信号的能量在频

域上主要分布在低频部分,相对而言高频部分的能量很微弱;图 2b 则表明水下目标回波信号的频域能量分布与探测信号相同,其中一大部分集中在调制频率 f_m 附近。因此,只要 f_m 足够高,通过选用带宽适当的带通滤波器,就可以有效抑制后向散射。

设接收到的回波信号 $R(f)$ 在信号处理时,通过一个中心频率为 f_m 、带宽为 Δf 的窄带带通滤波器,最终得到带有调制特性的光信号 $F(f)$, 即:

$$F(f) = R(f) \cdot H_f(f) \quad (8)$$

式中, $H_f(f) = \begin{cases} 1, f \in [f_m - \Delta f/2, f_m + \Delta f/2] \\ 0, f \notin [f_m - \Delta f/2, f_m + \Delta f/2] \end{cases}$, 为带通滤波器的系统函数。

从图 2 和 (8) 式分析,调制频率一定的情况下,滤波器带宽对系统的后向散射抑制能力起决定作用。带宽过大使较多噪声信号通过滤波器,带宽过小会滤除部分有用信号,影响探测能力。可见进行系统设计时应综合考虑各因素,选择最优滤波器带宽。

2 仿真计算

参考 1996 年 CHEN 在南海亚龙湾进行的机载激光探潜和测深实验的技术指标^[8],以及蒙特卡罗仿真的经验总结^[9-10],采用如下激光探测系统和海水典型参数,验证滤波带宽不同而造成的系统的后向海水散射抑制能力和信噪比的变化情况。

海水衰减系数 $\alpha = 0.15 \text{ m}^{-1}$; 海水中的光速 $v = 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$; 后向散射总次数 $N = 10^3$; 海水后向散射率 $\rho = 0.0027 \text{ m}^{-1}$; 水下目标反射率 $\rho_t = 0.01$; 探测信号到达目标的时间 $t_t = 50 \text{ ns}$; 探测信号到达海底的时间 $t_b = 100 \text{ ns}$; 激光脉冲峰值功率 $P_0 = 2 \text{ MW}$; 探测信号调制前的脉宽 $t_p = 10 \text{ ns}$; 光学系统效率 $\eta = 45\%$; 截获因子 $F = 1$; 光电探测器有效接收面积 $A_r = 0.2 \text{ m}^2$ 。

由仿真可知,频域滤波对海水后向散射信号有很强的抑制能力,调制频率较大时,后向散射衰减可达 20dB~30dB; 目标信号也在一定程度上被抑制,但衰减幅度相对较小,因此,信噪比相对滤波前得到了很大提升(10dB~15dB)。

由图 3 可知,随着滤波器带宽的减小,系统对后向散射的抑制能力逐渐增强,当带宽减小到一定程度时,后向散射衰减更是大幅度增加;带宽减小对目标信号衰减的影响存在类似的效果,但总体上信噪比呈现出随带宽减小而逐渐增大的变化趋势。理论上为了获得尽量大的信噪比,带宽越小越好。

不过在实际的激光雷达探测中,应尽量避免取过小的滤波器带宽。以 $f_m = 3 \text{ GHz}$ 为例,当带宽降低到一定程度时(200MHz 附近),系统对目标信号的抑制作

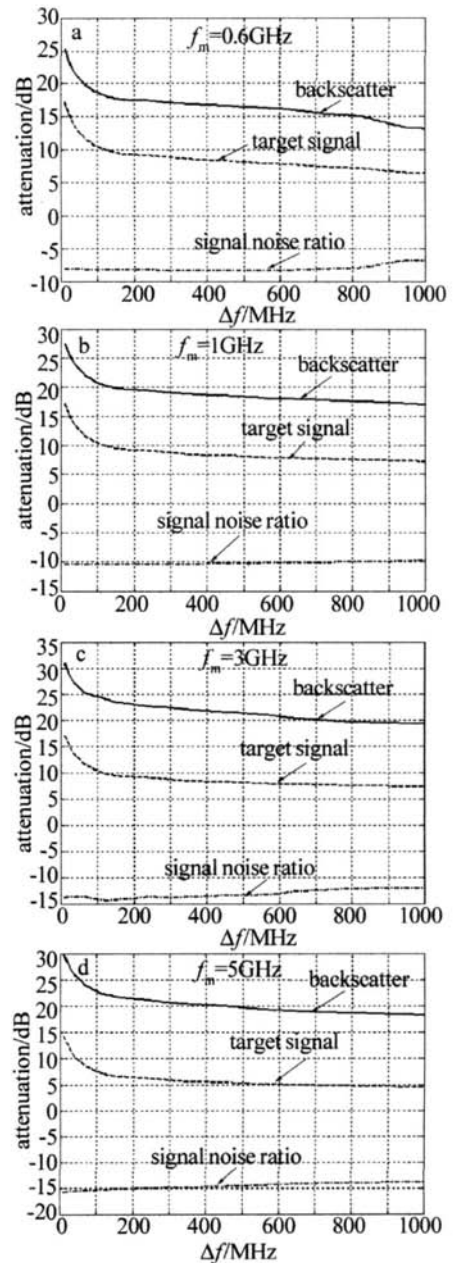


Fig 3 The influence of different bandwidths of filter on backscatter, target signal and SNR (signal-to-noise ratio)

用骤然增强,目标信号能量随带宽减小而出现 5dB~10dB 的大幅衰减,即相对于滤波前的目标信号,能量降低了几十倍。由于海水自身衰减较大的原因,目标信号能量本身就不高,过小的滤波器带宽可能造成滤波后的信号能量微弱到无法识别,从而牺牲了探测深度。因此在系统设计中,滤波器带宽要在避开目标信号强衰减区的前提下尽量缩小。可以在目标信号能量衰减突然增大的区域,计算出衰减曲线的曲率变化最大的点,就能确定系统的最佳滤波器带宽。在本仿真环境下,带宽的最佳取值如表 1 所示。

可见在本仿真实验的探测环境下,滤波器带宽的最佳取值在 200MHz 附近,随载波调制频率的增大有

(下转第 356 页)

经测量实验过程中,信噪比大约为 15dB,通过改变外部物体的初始位置可改变光反馈水平,从而改变激光器的输出功率。将实验所得自混合信号依本文中的算法处理,结果见表 4。可见当自混合信号的峰峰值不同时, C 不同。但同一台激光器,其 α 是相同的。

Table 4 The result of processing experiment data

self mixing signal peak value	1. 7V	1. 8V	1. 9V
$\hat{\alpha}$	3. 4290	3. 4338	3. 4371
$\delta_{\hat{\alpha}}/\hat{\alpha}$	5. 1%	4. 6%	4. 9%
\hat{C}	0. 5280	0. 5422	0. 5651
$\delta_{\hat{C}}/\hat{C}$	3. 4%	3. 9%	2. 9%

5 结 论

提出了估计线宽展宽因数的改进算法,改进算法提高了参量估计的精度和抗噪性能,但仍有一定的局限性,要求外部物体做理想的简谐振动,因此需进一步改进,以便当外部物体做各种周期运动时,都能进行参量估计。

参 考 文 献

[1] SPENCER M B, IAMBW E. Laser with a transmitting window [J]. Phys Rev, 1972, 27(2): 884-897.
 [2] DONATI S, GULIANIG, MERLO S. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. IEEE JQ E, 1995, 31(1): 113-119.

[3] HENRY C H. Theory of the linewidth of semiconductor laser [J]. IEEE JQ E, 1982, 18(2): 259-264.
 [4] SMPSON T B, DOFT F, STRZELECKA E. Gain saturation and the linewidth enhancement factor in semiconductor lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 776-778.
 [5] HARDER C, VAHALA K, YARIV A. Measurement of linewidth enhancement factor of semiconductor lasers [J]. A P L, 1983, 42(2): 328-330.
 [6] ARKAWA Y, YARIV A. Energy dependence of linewidth enhancement factor of GaAs buried heterostructures [J]. A P L, 1985, 47(11): 905-907.
 [7] SHTERENGAS L, BELENKY G I, GOUREVITCH A. Measurements of a factor in $2\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ type I In(A)GaAs Sb/GaSb high power diode lasers [J]. A P L, 2002, 81(24): 4517-4519.
 [8] LU G, JIN X, CHUANG S L. Measurement of linewidth enhancement factor of semiconductor lasers using an injection locking technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(5): 430-432.
 [9] YU Y G, GU DO G, SILVANO D. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self mixing effect [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 990-992.
 [10] XI J T, YU Y G, CHENCHARO J F. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self mixing interferometry [J]. IEEE JQ E, 2005, 41(8): 1058-1064.
 [11] YU Y G, GUO Ch J, YE H Y, et al. Pre-processing for the optical feedback self mixing interferometric signal [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 265-267 (in Chinese).

(上接第 339页)

Table 1 The optimum bandwidth of filter with different modulation frequencies

modulation frequency/GHz	0.6	1	2	3	4	5
bandwidth of filter/MHz	200	200	190	190	190	180

变窄的趋势,但所受影响不大。在其它探测环境下,可以采用同样的方法,求出当时环境下最适合的滤波器带宽大小。

3 结 论

关于频域滤波对海水后向散射的抑制作用,目前已有不少研究,证明了该方法的有效性,但是以往研究中对滤波带宽的取值存在一定的随意性,缺乏理论依据。作者利用海水后向散射模型和频域滤波的信号处理方法,通过仿真计算揭示了滤波带宽对载波调制脉冲激光雷达系统探测性能的影响。该计算方法能为系统选择合适的带宽取值,从而为系统的研制和完善提供了一些合理依据。

参 考 文 献

[1] CHEN W G, LIU Y M, HUANG T X, et al. The elimination of the backscatter envelope in laser underwater target detection system [J].

Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995, 23(4): 55-58 (in Chinese).
 [2] MULLEN L J, CONTARNO V M, LAUX A, et al. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging [J]. Proc SPIE, 1999, 376E: 2-9.
 [3] LIY F, VERA JC. Rapidly tunable millimeter wave optical transmitter for lidar radar [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 2048-2054.
 [4] MULLEN L J, CONTARNO V M. Hybrid lidar radar seeing through the scatter [J]. IEEE Microwave Magazine, 2000, 1(3): 42-48.
 [5] CONTARNO V M, HERRCZFELD P R, MULLEN L J. Modulator lidar system: United States G01C 003/085822047 [P]. 1998-10-13.
 [6] ZHANG D W, LI G H. Principle of the determination system for 180° back scattering characteristic of the turbid media [J]. Laser Technology, 2003, 27(2): 110-112 (in Chinese).
 [7] XU Q Y, YANG K T, WANG X B, et al. Bluegreen lidar ocean survey [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 10 (in Chinese).
 [8] CHEN W G. The information processing in the airborne laser submarine detection experimental system [D]. Wuhan Graduate School of Huazhong University of Science and Technology, 1997. 37-68 (in Chinese).
 [9] ZHU X, WANG H, QIL J, et al. Frequency analyzing of backscattering signals in airborne laser bathymetry [J]. Laser & Infrared, 2003, 33(1): 25-27 (in Chinese).
 [10] LU Y M, DU Z F, HUANG T X, et al. Study on lidar receiver field of view [J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 46-50 (in Chinese).