

文章编号: 1001-3806(2008)01-0030-03

基于边缘探测技术的布里渊散射测量误差分析

林 宏,董天临,马 泳*,梁 速

(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: 为了研究基于边缘探测技术的激光雷达探测布里渊散射过程中测量误差的大小,在分析海水信道的基础之上,推导出了激光雷达探测水下布里渊散射频移的测量误差公式,并对基于边缘探测技术接收到的布里渊散射回波信号的大小进行了估算,同时仿真出不同探测深度和不同水质参数条件下的布里渊散射频移测量误差,得到了在水质较好的情况下,水下 120m 处布里渊散射频移测量误差小于 5MHz 的结果。结果表明,边缘探测技术具有较高信噪比、较小测量误差。

关键词: 激光技术;边缘探测技术;布里渊散射;测量误差

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

The measure error analysis of Brillouin scattering based on edge detecting technology

L N Hong, DONG Tian-lin, MA Yong, LANG Su

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

Abstract: In order to study the measure error of detecting Brillouin scattering based on edge detecting technology, the measure error formula of detecting the Brillouin scattering signal was deduced after analyzing the underwater channels. At the same time, the Brillouin scattering signal was estimated based on the formula. The frequency drift of Brillouin scattering was simulated under the condition of different depth and the different water quality parameters. Under good quality water, the measure error of the Brillouin scattering frequency drift was less than 5MHz at 120m underwater. Based on the above results, a final conclusion is concluded that higher signal-to-noise ratio and smaller measure error could be acquired based on the edge detecting technology.

Key words: laser technique; edge detecting technology; Brillouin scattering; measure errors

引 言

早期的布里渊散射信号检测研究中,由于当时的激光器线宽和功率、F-P干涉仪的精度,以及光电接收设备的限制,致使布里渊散射频移量的检测精度一直不能满足实际应用的需要。20世纪90年代,美国海军海洋与大气研究实验室的 HICKMAN 博士与美国 Texas A&M 大学的 FRY 博士开展了激光布里渊散射测量海洋声速的合作研究^[1,2]。KORB 等^[3]首次采用边缘探测技术对激光在大气中的多普勒频移进行测量。PIRONEN 等^[4]利用碘分子滤波器发展了一种高光谱分辨率的激光雷达系统,用于大气的监测。目前,一种基于布里渊散射信号检测的边缘探测技术,成为激光雷达应用研究的前沿,在探测大气风、水下及水下

目标等方面具有广阔的应用前景^[5-8]。

作者在分析基于边缘探测技术的激光雷达系统探测水下目标或水下环境参数的基础之上,推导出了边缘探测技术在布里渊频移测量中的误差公式。通过设计 MATLAB 程序,仿真出在不同水质参数和不同探测深度下的探测系统测量误差。

1 基于边缘探测技术的激光雷达系统

目前,对于水下监测的布里渊散射激光雷达系统,通常使用倍频后波长为 532nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器,脉冲宽度通常为 10ns^[6,9]。考虑到各种实际因素,设计了如图 1 所示的激光雷达探测系统。激光雷达回

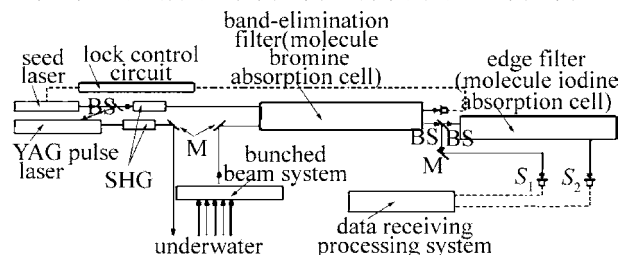


Fig 1 Brillouin lidar detecting system

项目基金:湖北省自然科学基金资助项目(2006ABA084)

作者简介:林 宏(1980-),男,博士研究生,现主要从事激光雷达探测方面的研究工作。

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

收稿日期:2006-10-20;收到修改稿日期:2006-12-07

波信号首先通过一个溴分子滤波器,滤除无频移的中央频率分量(主要是瑞利散射),而绝大部分布里渊散射分量可以通过这个分子滤波器。透射信号再通过一个 1:1 的分束器后,一半进入探测器 I 产生信号 S_1 。另一半通过一个碘分子滤波器后,进入探测器 II,产生信号 S_2 。由于溴的吸收谱线可滤除 532nm 波长的光,因此,用来滤除无频移的中央频率分量,而碘刚好具有两个对称的轮廓很陡的吸收谱线,且其位置恰恰位于 532nm 波长光的布里渊频移范围内,因此被用来滤除布里渊散射分量。

图 1 中 BS 为布里渊散射, M 为反射镜, SHG 为二次谐波光栅。图 2 和图 3 中分别给出了溴和碘在

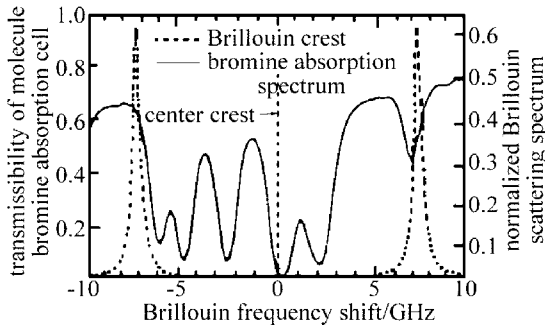


Fig 2 Absorption spectrum of bromine molecule filter

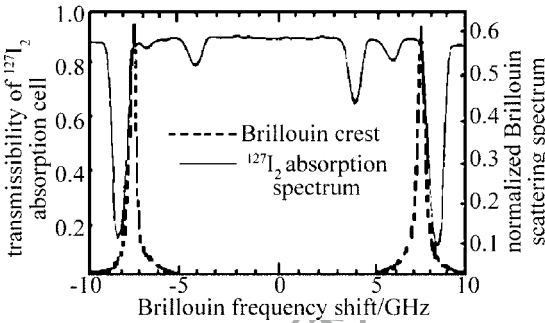


Fig 3 Absorption spectrum of iodine molecule filter

532nm 附近的吸收光谱。两个图中的零频均对应于激光器的中心频率(波长为 532nm)。

布里渊散射的线型函数为^[6,10]:

$$f(\nu, \nu_B) = \frac{1}{\pi \Gamma_B} \times \left\{ \frac{1}{1 + [2(\nu - \nu_B) / \Gamma_B]^2} + \frac{1}{1 + [2(\nu + \nu_B) / \Gamma_B]^2} \right\} \quad (1)$$

式中, ν 为频率, ν_B 为布里渊散射频移量, Γ_B 为布里渊散射光谱的线宽, 溴分子吸收光谱的线型函数 $g_{Br}(\nu)$ 和碘分子吸收光谱的线型函数 $g_I(\nu)$ 见图 2 和图 3。

设布里渊散射的光强为 I_0 , 则有:

$$S_1(\nu_B) = \frac{1}{2} I_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) d\nu \quad (2)$$

$$S_2(\nu_B) = \frac{1}{2} I_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) g_I(\nu) d\nu \quad (3)$$

定义系统归一化的布里渊信号为:

$$S(\nu_B) = \frac{S_2}{S_1 - S_2} \quad (4)$$

2 探测系统测量误差分析

令接收到的信号 S_1, S_2 表示为: $S_1 = \rho_1 I_0; S_2 = \rho_2 I_0$ 。

其中, $\rho_1 = (1/2) \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) d\nu, \rho_2 = (1/2) \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) g_I(\nu) d\nu$ 。则 S_1 和 S_2 的标准差为: $\Delta S_1 = \sqrt{S_1} = \sqrt{\rho_1 I_0}; \Delta S_2 = \sqrt{S_2} = \sqrt{\rho_2 I_0}$ 。 $(S_1 - S_2)$ 的标准差为: $\Delta(S_1 - S_2) = \sqrt{(\Delta S_1)^2 + (\Delta S_2)^2} = \sqrt{I_0} \sqrt{\rho_1 + \rho_2}$ 。

则归一化信号的相对误差为:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\sqrt{(\Delta S_2)^2 + [\Delta(S_1 - S_2)]^2}}{\frac{1}{I_0} \left[\frac{I_0}{\rho_2} + \frac{\rho_1 + \rho_2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} \right]} = \quad (5)$$

布里渊散射频移的测量误差为:

$$\Delta \nu_B = \frac{dS}{d\nu_B}^{-1} \Delta S = \frac{dS}{d\nu_B}^{-1} \left(\frac{\Delta S}{S} \right) S \quad (6)$$

将 S 和 $\frac{dS}{d\nu_B}$ 代入上式, 得到布里渊散射频移测量误差的公式为:

$$\Delta \nu_B = \frac{1}{\sqrt{I_0}} \frac{\sqrt{\rho_2}}{(\rho_1 - \rho_2)^2} \sqrt{\rho_1^2 - \rho_1 \rho_2 + 2\rho_2^2} \left(\frac{dS}{d\nu_B} \right)^{-1} \quad (7)$$

对于上式中的 I_0 , 可以用接收到的单个脉冲所产生的布里渊散射光子数 N_B 代替:

$$N_B = N_0 \beta(\theta) \Delta z d\Omega \epsilon_{PMT} \epsilon_{OS} T_1^2 T_h^2 \quad (7)$$

式中, N_0 为每个激光脉冲的输出光子数; $\beta(\theta)$ 为海水中布里渊体积散射函数, θ 为散射角; Δz 为深度分辨单元; $d\Omega$ 为接收立体角, 可表示为 $d\Omega = S / (z + h)^2$; ϵ_{PMT} 为光电倍增管的量子效率, ϵ_{OS} 为整个光学系统的传输效率, T_1 为水面透过率; T_h 为激光在水下传输的透过率, 可表示为 $T_h = \exp(-\gamma z)$, γ 为衰减系数; S 为接收面积; h 为飞行高度; z 为激光在水下传输的距离。

每个激光脉冲的输出光子数可由下式表示:

$$N_0 = \frac{E\lambda}{hc} \quad (9)$$

式中, E 为激光能量, 这里取 500mJ/pulse; λ 为激光波长, $\lambda = 532\text{nm}$; c 为光速, $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$; h 为普朗克常数, 其数值为 $6.62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。

深度分辨单元可由下式表示:

$$\Delta z = \frac{c\tau}{2n} \quad (10)$$

式中, τ 为激光脉冲宽度, 其值为 10ns; n 为海水中的折射率, 一般取为 1.33。

3 仿真结果及其分析

通过 MATLAB 设计仿真程序, 分别对 ν_B 为 7.5GHz, 7.6GHz, 7.8GHz, 7.9GHz, 8.25GHz 和 8.5GHz 时的情况进行仿真, 得到不同 γ 时布里渊频移测量误差 $\Delta\nu_B$ 与深度 z 的关系, 如图 4~图 9 所示。设置基本模拟参数为: $\beta(180^\circ) = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$; $\epsilon_{\text{PMT}} = 0.13$; $\epsilon_{\text{OS}} = 0.45$; $T_1 = 0.98$; $\gamma = 0.04 \text{ m}^{-1} \sim 0.06 \text{ m}^{-1}$; $S = 0.5 \text{ m}^2$; $h = 100 \text{ m}$; $z = 120 \text{ m}$ 。

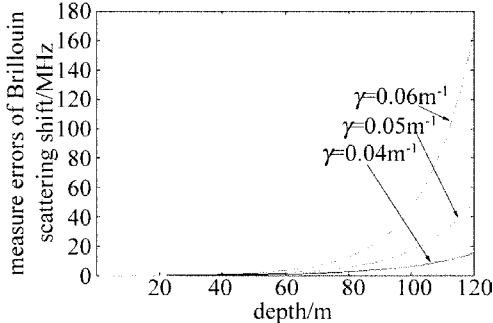


Fig 4 Measure errors vs depth, at $\nu_B = 7.5\text{GHz}$

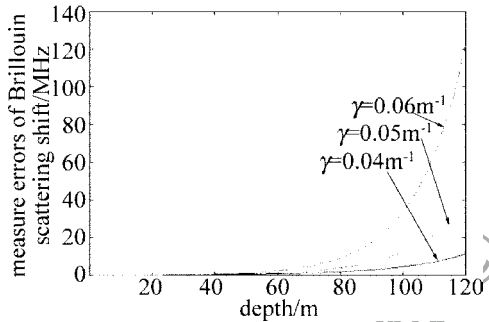


Fig 5 Measure errors vs depth, at $\nu_B = 7.6\text{GHz}$

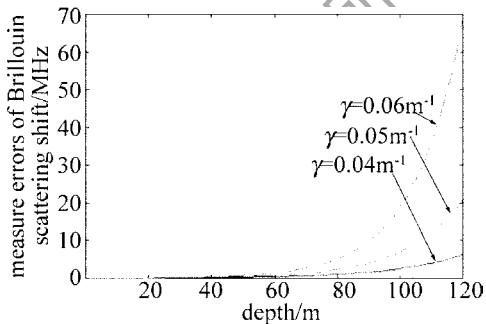


Fig 6 Measure errors vs depth, at $\nu_B = 7.8\text{GHz}$

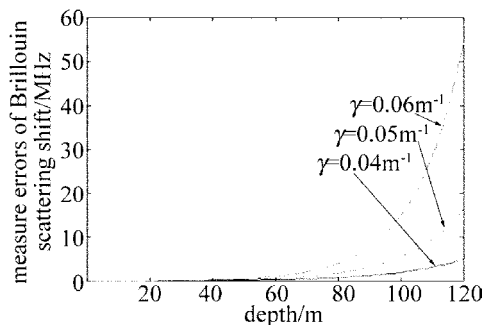


Fig 7 Measure errors vs depth, at $\nu_B = 7.9\text{GHz}$

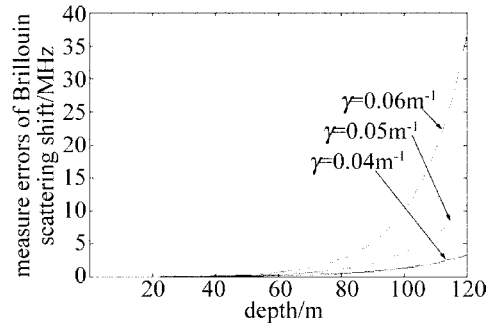


Fig 8 Measure errors vs depth, at $\nu_B = 8.25\text{GHz}$

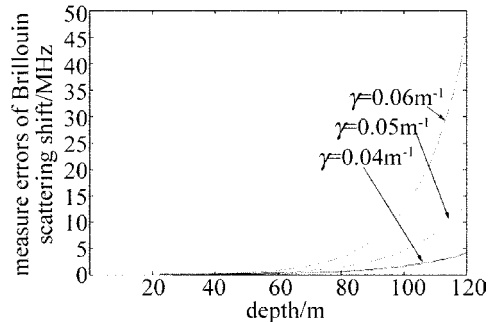


Fig 9 Measure errors vs depth, at $\nu_B = 8.5\text{GHz}$

由上述仿真结果可以看出: 随着海水的衰减系数的增大, 布里渊散射频移量的测量误差呈指数程度增加; 随着水下探测距离的增加, 测量误差也相应呈指数程度增加。在相同水质参数和相同探测深度的情况下, 当布里渊散射频移量在 8.25GHz 处的测量误差最小。但是由于在实际测量过程中, 海水中的布里渊散射频移量的范围在 7.5GHz~7.9GHz 之间, 因此, 实际的测量误差在 7.9GHz 处最小。对于 7.9GHz 处, 在水质较好的情况下, 如衰减系数为 0.04 m^{-1} 时, 采用边缘探测技术在水下 120m 处探测布里渊散射频移量的测量误差小于 5MHz; 在水质较差的情况下, 如衰减系数为 0.06 m^{-1} 时, 水下 120m 处的测量误差也达到 50MHz 左右。由此可以看出, 边缘探测技术具有较高的信噪比, 较小的测量误差, 能够有效地探测水面以下 120m 处的布里渊散射频移量。

另外, 测量误差理论最小值在 8.25GHz 处, 而由图 3 可知, 8.25GHz 恰好在碘分子滤波器吸收谱线右侧的一个吸收峰处, 这样就可以选择适合的碘分子滤波器吸收谱线, 使得其中的一个吸收峰位于 7.5GHz~7.9GHz 之间, 那么实际测量误差就可以在这个范围内达到理论上的最小值。

4 结论

以基于边缘探测技术的激光雷达在探测海洋环境参数的具体应用为例, 推导出基于边缘探测技术的布里渊散射频移测量误差公式。在估算接收到的水下布

(下转第 36 页)

为: 4.32nm 和 65.90dB。显然这些数据符合上面的设计指标,即成功设计出了符合性能指标的带通滤波器。

在上面的分析和仿真中,设计出了具有较大 FSR 的级联臂长差啁啾 MZI 型带通滤波器。FSR 较大有利于实现中心波长的大范围调谐。根据 (3) 式,可设定 L_0 和电极电流得到大范围双向调谐的性能,此调谐方案的实现过程与可调谐阶梯形滤波器基本一致^[12-13]。此类带通滤波器与可调谐阶梯形滤波器具有类似的应用前景,如调谐范围宽、响应速度快的可调谐光滤波器^[9],数字型波长可调谐激光器^[13]等。

4 结论

作者设计出基于级联臂长差啁啾 MZI 的带通滤波器。臂长差啁啾方案在 3dB 带宽基本保持不变的前提下极大地拓宽了 FSR。因而,采用本方案设计得到的带通滤波器具有大的 FSR 和小的 3dB 带宽的性能。文中还给出了级联 MZI 型带通滤波器设计实例,设计得到的滤波器结构参数为 $N = 16$, $m = 45$, $\gamma = 5$, 以及 4.32nm 的 3dB 带宽和 65.90dB 的边模抑制比,符合 3dB 带宽低于 4.5nm 以及 FSR (大于 100nm) 内边模抑制比高于 35dB 的给定指标。

参考文献

- [1] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al* Accurate analytical expression for reflection peak wavelengths of sampled Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18 (3): 529-531.
- [2] KUZNETSOV M. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filter for wavelength division multiplexed optical systems [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994, 12 (2): 226-230.

- [3] JI Y F, BA I L, XU D X A new OADM architecture for packet service [J]. Laser Technology, 2003, 27 (5): 393-395 (in Chinese).
- [4] LI J, TONG Zh R, MENG H Y, *et al* Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23 (1): 41-44 (in Chinese).
- [5] ZHANG R F, GE Ch F, WANG Sh H, *et al* Optimized design of all fiber interleaver [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14 (3): 496-500 (in Chinese).
- [6] XIAO Y Y, HE S L. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (3): 346-350 (in Chinese).
- [7] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al* Particle swarm optimization for design of cascaded Mach-Zehnder interferometer based filter [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16 (10): 1152-1156 (in Chinese).
- [8] QU R H, ZHAO H, FANG Z J. Analysis of optical multiplexer/demultiplexer based on cascaded non-balanced Mach-Zehnder interferometer [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12 (3): 254-257 (in Chinese).
- [9] MATSUO S, YOSHIKUNI Y, SEGAWA T, *et al* A widely tunable optical filter using ladder-type structure [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15 (8): 1114-1116.
- [10] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al* Optimization of a novel ladder-type structure tunable optical filter [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16 (2): 146-149 (in Chinese).
- [11] PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al* Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13 (6): 627-632 (in Chinese).
- [12] JEONG S H, MATSUO S, YOSHIKUNI Y, *et al* Tuning characteristics of chirped ladder-type filter for widely tunable laser [C] // The 17th Annual Meeting of the IEEE LEOS2004. Puerto Rico: IEEE, 2004: 304-305.
- [13] MATSUO S, SEOK-HWAN J, SEGAWA T, *et al* Digitally tunable ring laser using ladder filter and ring resonator [J]. IEEE J Q E, 2005, 11 (5): 924-929.

(上接第 32 页)

里渊散射回波信号的基础之上,通过设计 MATLAB 程序仿真出不同水质参数情况下,探测系统中布里渊散射频移测量误差与探测深度之间的关系,从理论上证明了边缘探测技术具有较高的信噪比、较小的测量误差的结论。在此基础之上,奠定激光雷达探测系统的测量误差分析,为基于边缘探测技术的激光雷达实际应用提供理论基础和技术支持。

参考文献

- [1] HICKMAN G D, KATTAWAR G W, FRY E S Aircraft laser sensing of sound velocity in water: Brillouin scattering [J]. Remote Sens Environ, 1991, 36 (1): 165-178.
- [2] EMERY Y E, FRY E S Laboratory development of a lidar for measurement of sound velocity in the ocean using Brillouin scattering [J]. SPIE, 1997, 2963: 210-215.
- [3] KORB C L, GENTRY B M, WENG C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. Appl Opt, 1992, 31 (21): 4202-4213.

- [4] PIIRONEN P, ELORANTA E W. Demonstration of a high - spectral - resolution Lidar based on an iodine absorption filter [J]. Opt Lett, 1994, 19 (3): 234-236.
- [5] LIU Zh Sh, SONG X Q, LIU J T. Speed measuring system of non - coherent pulse Doppler lidar [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (24): 2080-2085 (in Chinese).
- [6] LIU D H, JEFFEREY W K Edge technique for the measurements of Brillouin scattering in water [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (4): 307-311 (in Chinese).
- [7] WANG L L, REN G, ZHANG Y. Study of Brillouin scattering in atmosphere [J]. Laser Technology, 2003, 27 (4): 365-367 (in Chinese).
- [8] HUANG Zh H, REN G, CAI B W. Calculation of detecting spatial object based on Brillouin scattering [J]. Laser Technology, 2004, 27 (4): 518-520 (in Chinese).
- [9] LIU D H. Signal estimate and statistical error analysis for edge technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (8): 701-705 (in Chinese).
- [10] FLESA C, KORB C L. Theory of the double edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Appl Opt, 1999, 38 (3): 432-440.