

边缘探测技术的信号估算及误差分析*

刘大禾

(北京师范大学物理系 北京 100871)

提要 对边缘探测技术的信号估算及测量误差进行了详细的分析。给出了不同情况下误差因子的函数形式和具体数值。讨论了信号平均及背景信号对测量误差的影响。结论是:边缘探测技术具有高信噪比,很小的测量误差,较大的高精度测量范围,并对背景噪声有一定的抵抗作用。

关键词 布里渊散射,边缘探测技术,统计误差

1 引 言

边缘探测技术^[1]是近年来出现的一种新的光谱探测技术。它在基于多普勒频移的大气激光雷达遥感系统中得到了实际应用^[1-3]。本文作者尝试把边缘探测技术用于进行海洋监测的布里渊激光雷达系统^[4]。参考文献[4]给出了实际的边缘探测系统,分析了它的原理,并讨论了其特点。限于篇幅,参考文献[4]未对该技术的测量误差进行分析。

本文分析了边缘探测技术在布里渊频移测量中的误差,给出了一个误差因子,讨论了实际探测系统中误差因子的函数形式及数值。

2 信号估算

一个脉冲激光背向散射系统的接收器,对于单个脉冲所产生的输出布里渊散射光电子数,可用下式表示

$$N_{pe} = N_1 \sigma_B \Delta z \epsilon_{pm} \epsilon_{os} T_\lambda^2 d\Omega \quad (1)$$

式中, N_1 为每个激光脉冲的输出光子数,在波长为 532 nm,能量为 500 mJ/pulse 的条件下, $N_1 = 1.34 \times 10^{18}$; σ_B 为背向布里渊散射系数,其值为 $\sigma_B = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$,当激光每秒输出 10 个脉冲时,深度分辨单元为 1.1 m,取接收立体角为 $d\Omega = 0.5/(z + 200)^2$, $\epsilon_{pm} = 0.13$ 为光电倍增管的量子效率, $\epsilon_{os} = 0.4$ 为整个光学系统的效率, T_λ 为水对激光的透过率,可表示为 $T_\lambda = \exp(-\gamma z)$, γ 为衰减系数。将以上参数值代入(1)式,得

$$N_{pe} = \frac{9.2 \times 10^{12}}{(z + 200)^2} \exp(-2\gamma z) \quad (2)$$

对于 100 m 深度所产生的激光回波,我们有

* 国家 863 计划资助项目(818-09-02)。

收稿日期: 1998-01-20; 收到修改稿日期: 1998-05-18

$$N_{pe} = 1.02 \times 10^8 \exp(-200\gamma) \quad (3)$$

美国佛罗里达附近大西洋海水的衰减系数 $\gamma = 0.04 \text{ m}^{-1}$, 可求得 $N_{pe} = 34,000$ 。即, 回波信号是相当可观的。

3 布里渊频移测量的统计误差

布里渊散射激光雷达系统的重要应用之一是测量水中的声速。声速的测量精度主要取决于布里渊频移的测量精度。为了获得 1 m/s 的声速测量精度, 布里渊频移的测量精度应小于 5 MHz 。对于一个好的信号接收系统, 背景噪声和内部暗电流可以忽略, 则噪声仅为散粒噪声。它由信号产生的光电子数 N_{pe} 的平方根给出。信号的不确定性与系统的信噪比有关(信噪比 $\text{SNR} = N_{pe} / \sqrt{N_{pe}}$)^[5], 因此, 布里渊频移的测量误差可表示为

$$\Delta\nu_B = \alpha \frac{\Gamma_B}{\text{SNR}} = \alpha \frac{\Gamma_B}{\sqrt{N_{pe}}} \quad (4)$$

其中, $\Gamma_B = 500 \text{ MHz}$ 为布里渊散射线宽, α 是一个无量纲因子(与信号幅度无关), 它由测量技术的特性所决定。通常, α 具有 1 的数量级。我们始终希望它有最小值。在特定的测量装置中确定并使 α 值最小化, 即是本文所要讨论的问题之一。

由(2)式, 得到

$$\Delta\nu_B = \alpha \frac{\Gamma_B}{\sqrt{N_{pe}}} = 0.000165\alpha(z + 200) \exp(\gamma z) \quad (5)$$

对于 100 m 的水深,

$$\Delta\nu_B = 0.485\alpha \exp(100\gamma) \quad (6)$$

图 1(a) 给出了 γ 值不同时单个激光脉冲的 $\Delta\nu_B$ 与深度 z 的关系。图中取 $\alpha = 1$ 。可以看到对于衰减系数 $\gamma \geq 0.04 \text{ m}^{-1}$ 的水, 可在 100 m 深度处实现 1 m/s 的声速测量精度。

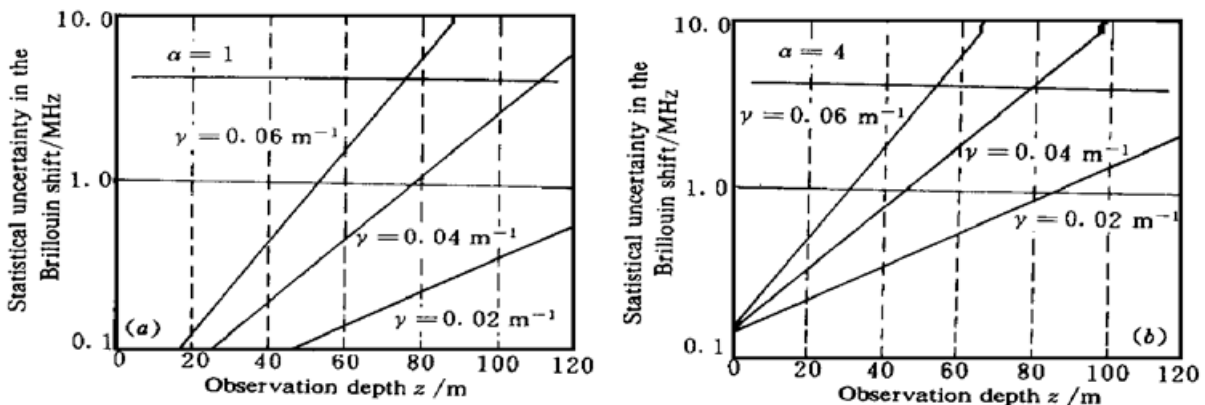


图 1 布里渊频移测量误差的深度依赖关系。图中给出了三个不同的衰减系数。图中的水平直线为声速测量精度为 1 m/s 时对应于 4.2 MHz 的布里渊频移测量精度。深度分辨率为 1.1 m 。(a) 误差因子 $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 4$

Fig. 1 Statistical uncertainty in the measured Brillouin shift $\Delta\nu_B$ as a function of observation depth for three values of the attenuation coefficient. The horizontal bar is at 4.2 MHz , corresponding to an accuracy in the velocity of sound of 1 m/s . The depth resolution cell is 1.1 m . (a) as indicated, the error parameter is $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 4$

4 对实际探测系统的分析

实际的探测装置已在文献[4]中给出。下面, 对该系统进行具体的分析。设两个探测器所接收到的回波分量分别为

$$\rho_1(\nu_B) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) d\nu \quad (7)$$

$$\rho_2(\nu_B) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) g_I(\nu) d\nu \quad (8)$$

式中 $f(\nu, \nu_B)$, $g_{Br}(\nu)$ 和 $g_I(\nu)$ 分别为布里渊散射、溴分子吸收池以及碘分子吸收池光谱的线型函数(见文献[4]中图3和图4)。则观察到的信号为

$$S_1 = \rho_1 N_{pe} \quad S_2 = \rho_2 N_{pe} \quad (9)$$

我们用下式定义归一化的布里渊信号

$$S(\nu_B) = \frac{S_2}{S_1 - S_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \quad (10)$$

根据(9)式, S_1 和 S_2 的标准差为

$$\begin{cases} \Delta S_1 = \sqrt{S_1} = \sqrt{\rho_1 N_{pe}} \\ \Delta S_2 = \sqrt{S_2} = \sqrt{\rho_2 N_{pe}} \end{cases} \quad (11)$$

($S_1 - S_2$) 的标准差为

$$\Delta(S_1 - S_2) = \sqrt{(\Delta S_1)^2 + (\Delta S_2)^2} = \sqrt{N_{pe}} \sqrt{\rho_1 + \rho_2} \quad (12)$$

则归一化信号的相对误差为

$$\frac{\Delta S}{S} = \sqrt{\left[\frac{\Delta S_2}{S_2}\right]^2 + \left[\frac{\Delta(S_1 - S_2)}{S_1 - S_2}\right]^2} = \frac{1}{\sqrt{N_{pe}}} \sqrt{\frac{1}{\rho_2} + \frac{\rho_1 + \rho_2}{(\rho_1 - \rho_2)^2}} \quad (13)$$

布里渊散射的测量误差由下式给出

$$\Delta \nu_B = \left[\frac{dS}{d\nu_B}\right]^{-1} \Delta S = \left[\frac{dS}{d\nu_B}\right]^{-1} \left[\frac{\Delta S}{S}\right] S \quad (14)$$

将(10)式和(13)式代入(14)式, 我们有

$$\Delta \nu_B = \frac{1}{\sqrt{N_{pe}}} \frac{\sqrt{\rho_2}}{(\rho_1 - \rho_2)^2} \sqrt{\rho_1^2 - \rho_1 \rho_2 + \rho_2^2} \left[\frac{dS}{d\nu_B}\right] \quad (15)$$

与(4)式比较, 得到 α 因子的函数形式为

$$\alpha(\nu_B) = \frac{1}{\Gamma_B} \frac{\sqrt{\rho_2}}{(\rho_1 - \rho_2)^2} \sqrt{\rho_1^2 - \rho_1 \rho_2 + \rho_2^2} \left[\frac{dS}{d\nu_B}\right] \quad (16)$$

由计算可得, 在水中布里渊散射的频移范围内(7.5~7.9 GHz), α 的值在3~4之间, 见图2。对于这个探测系统, 单个脉冲所产生的布里渊散射的测量误差 $\Delta \nu_B$ 作为深度 z 的函数表示在图1(b)中(由(14)式得到), 图中取 α 的上限值 $\alpha = 4$, 而 γ 则取不同的值。显然, 实际探测系

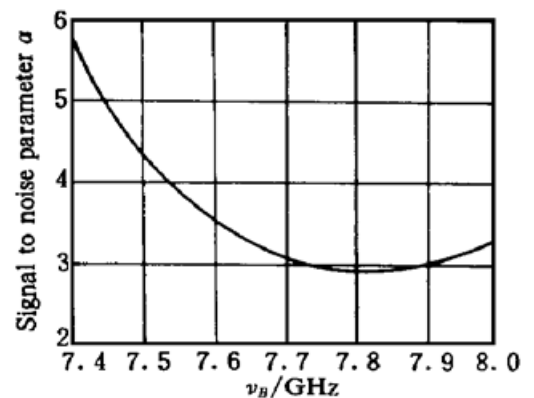


图2 实际探测系统的误差因子与布里渊频移的关系

Fig. 2 The error parameter α as a function of the Brillouin shift

统的性能不如 $\alpha = 1$ (见图 1(a)) 的理想探测系统。但是, 在衰减系数 $\gamma = 0.04 \text{ m}^{-1}$ 时, 在 80 m 深度处仍可得到小于 1 m/s 的声速测量精度。

频移变小时 α 值增加的一个重要原因是, 由于布里渊频移很小, 某些布里渊散射光子被溴吸收池吸收, 使得 ρ_2 减小; 另一个重要原因是, 当布里渊频移较小时, 布里渊散射光谱与碘吸收线重叠很少(见文献[4]中的图 4), 也使 ρ_2 减小。然而, 进一步的分析表明在 300 K (室温) 至 800 K 温度范围, 以及 7.4~7.9 GHz 频移范围内, 均有 $\alpha \leq 4$ 。

5 信号平均

信号平均技术在实际测量中是经常采用的。下面来分析信号平均对测量精度的影响。信号平均中首先要进行求和。假定激光的输出能量为 500 mJ/pulse, 且我们对 300 个连续脉冲 (用 $\Sigma = 300$ 表示) 求和, 则接收器中观察到的总光子数为

$$N_{pe}' = \Sigma N_{pe} = \Sigma \frac{9.2 \times 10^{12}}{(z + 200)^2} \exp(-2\gamma z) \quad (17)$$

由(5)式

$$\Delta v_B = \alpha \frac{\Gamma_B}{\sqrt{N_{pe}}} = 0.000165 \left[\frac{\alpha}{\sqrt{\Sigma}} \right] (z + 200) \exp(+\gamma z) \text{ (MHz)} \quad (18)$$

我们看到, 多个脉冲求和的效果是产生一个等效的 α' , 它刚好是 α 除以求和脉冲总数 Σ 的平方根。图 3(a) 示出了 $\alpha = 4, \Sigma = 300$ 时 Δv_B 与深度的关系 (γ 取不同值)。我们发现, 1 m/s 的声速测量精度可以在 $\gamma = 0.06 \text{ m}^{-1}$ 时, 在 100 m 深度处得到。这表明, 信号平均技术虽不能直接改善测量精度, 却可扩展某一测量精度的测量范围。这对实际测量是非常有用的。若取图 2 中 α 的下限值 $\alpha = 3$ (在 $v_B = 7.8 \text{ GHz}$ 处), 则 Δv_B 与深度 z 的关系如图 3(b) 所示。这时, 可获得更高的测量精度。

6 背景噪声的影响

考虑背景噪声的影响后, 系统信号(9)式可表示为

$$S_1 = \rho_1 N_{pe} + \frac{1}{2} N_{peB}, \quad S_2 = \rho_2 N_{pe} + \frac{1}{2} N_{peB} \quad (19)$$

则

$$S(v_B) = \frac{S_2}{S_1 - S_2} = \frac{\rho_2 + \frac{1}{2} \frac{N_{peB}}{N_{pe}}}{\rho_1 - \rho_2} \quad (20)$$

$$\frac{dS}{dv_B} = \frac{\rho_2'}{\rho_1 - \rho_2} - \frac{\left[\rho_2 + \frac{1}{2} \frac{N_{peB}}{N_{pe}} \right] (\rho_1' - \rho_2')}{(\rho_1 - \rho_2)^2} \quad (21)$$

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{\sqrt{N_{pe}}} \sqrt{\frac{1}{\rho_2 + \frac{1}{2} \frac{N_{peB}}{N_{pe}}} + \frac{\rho_1 + \rho_2 + \frac{N_{peB}}{N_{pe}}}{(\rho_1 - \rho_2)^2}} \quad (22)$$

在(14)式中利用(20)~(22)式的关系, 就可以确定布里渊频移的测量误差 Δv_B , 如图 3(c) 所示。图中取 $N_{peB} = 30$ 。可以看到, 图 3(b) 与图 3(c) 的差别很小。这是由于 N_{peB} 通常仅为 10^1 数量级, 而 N_{pe} 却达到 10^3 数量级, 至少也达到 10^2 量级。因此, 背景噪声的影响是不明显的。当然, 在大深度处, N_{pe} 减少。这表明, 在大深度测量时背景噪声会降低测量精度。

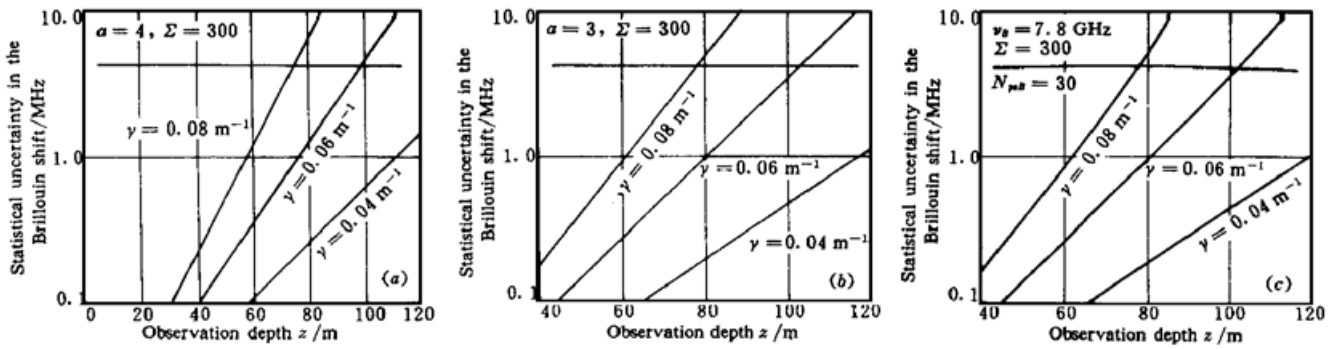


图3 布里渊频移测量误差的深度依赖关系。图中给出了三个不同的衰减系数。图中的水平直线为声速测量精度为 1 m/s 时对应于 4.2 MHz 的布里渊频移测量精度。深度分辨率为 1.1 m。本图所示的是对三百个脉冲求和的结果。(a) 误差因子 $\alpha = 4$; (b) $\alpha = 3$; (c) $\alpha = 3$ (考虑背景噪声后)

Fig. 3 Statistical uncertainty in the measured Brillouin shift $\Delta\nu_B$ as a function of observation depth for three values of the attenuation coefficient. The horizontal bar is at 4.2 MHz, corresponding to an accuracy in the velocity of sound of 1 m/s. The depth resolution cell is 1.1 m. The data in this Fig are summed for 300 pulses. (a) as indicated, the error parameter is $\alpha = 4$; (b) $\alpha = 3$; (c) $\alpha = 3$ (the back ground noise is considered)

致谢 作者感谢 E. S. Fry 教授的支持和帮助。在工作中同 Thomas Walther 博士进行了有益的讨论。谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Weng. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~ 4213
- 2 C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Weng. Spaceborne lidar wind measurements with edge technique. *SPIE*, 1994, **2310**: 206~ 213
- 3 P. Piironen, E. W. Eloranta. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on a iodine absorption filter. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 234~ 236
- 4 Liu Dahe, Jefferey W. Katz. Edge technique for the measurements of Brillouin scattering in water. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(4): 307~ 311 (in Chinese)
- 5 J. W. Goodman. *Statistical Optics*. New York: John Wiley & Sons, 1985. Chap. 9, 470~ 520

Singal Estimate and Statistical Error Analysis for Edge Technique

Liu Dahe

(Physics Department, Beijing Normal University, Beijing 100871)

Abstract The signal estimate and statistical error analysis for edge technique is made in details in this paper. The function and the value of an error factor are given in ideal and actual conditions. The effects of signal averaging and background noise on the statistical errors are discussed. The final conclusion is: edge technique has high signal-to-noise ratio, small statistical errors, large measuring range in high accuracy, and can prevent back ground noise in some way.

Key words Brillouin scattering, edge technique, statistical errors