

# 基于布里渊后向散射的海水温度与盐度同步测量研究

马 泳 梁 琨 林 宏 冀 航

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

**摘要** 基于布里渊散射信号的检测可实现对海水温度等参量的监测。由于海水的布里渊频移量是关于温度和盐度的二元函数,故无法仅通过布里渊散射频移量的检测实现对海水温度和盐度两个独立变量的精确测定。研究表明布里渊信号的功率也是关于温度和盐度的二元函数,所以文章提出通过测量布里渊频移量和接收布里渊信号功率大小,通过两个二元函数反演出海水的温度与盐度数值,实现对海水温度和盐度两个独立变量的同步测量。

**关键词** 光学测量; 布里渊散射; 温度; 盐度

**中图分类号** P7333<sup>+1</sup> **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082808.1508

## Study on Simultaneous Measurement of Temperature and Salinity Based on Brillouin Scattering

Ma Yong Liang Kun Lin Hong Ji Hang

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

**Abstract** The parameters of seawater, such as temperature can be detected based on the detection of Brillouin scattering signal. Because Brillouin frequency shift is a function of two variables, temperature and salinity, the precise measurement about the two independent variables by Brillouin frequency shift is impossible. It is found power of Brillouin scattering signal is also a function of those two variables, so the method to simultaneously measure temperature and salinity by measuring the frequency shift and power is proposed and the synchronous measurement about temperature and salinity is realized.

**Key words** optical measurement; Brillouin scattering; temperature; salinity

### 1 引 言

采用布里渊散射信号检测技术进行海洋探测始于上世纪 60 年代<sup>[1~3]</sup>,随着激光及其相关技术的发展,特别是边缘探测技术<sup>[4,5]</sup>的应用,使布里渊散射信号检测方法在海洋环境监测中得到更为广泛应用。Fry 等<sup>[6,7]</sup>采用种子注入脉冲 YAG 激光器为光源,以<sup>127</sup>I<sub>2</sub> 分子吸收滤波器对布里渊散射的频移量进行了精确测量,并通过简化的海水温度与布里渊频移量关系模型,推算出海水温度。但是实际的理论研究表明,布里渊频移量  $V_B$  不仅仅只与温度  $T$  有关,还与海水的盐度  $S$  有关,即布里渊频移量

是关于温度和盐度的二元函数。由此可知仅根据测量出的布里渊频移是无法准确同时推算出海水温度或盐度的大小。Fry 等在实际应用中是将盐度设定为一个已知常数,非实际测量值,由此在推演海水温度时,势必影响温度测量的精确性。

研究发现布里渊散射信号的能量与布里渊频移量和温度有关,可构建为温度和盐度的二元函数,因此本文拟在布里渊频移量与海水温度、盐度关系模型的基础上,将布里渊测量能量与海水温度、盐度模型结合起来,通过两个二元方程推演出海水的温度和盐度。由此在实际应用中,通过检测接收到的布里渊散射信号的能量和频移量大小,就可实现对海

收稿日期: 2007-04-17; 收到修改稿日期: 2007-10-28

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z142)和湖北省自然科学基金(2006ABA084)资助项目。

作者简介: 马 泳(1971—),男,回族,博士,副教授,主要从事激光雷达探测和信号处理等方面的研究工作。

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

水温度和盐度的实时同步测量。

$$V_B = \pm \frac{2n}{\lambda}v, \quad (1)$$

## 2 理论模型

布里渊散射是入射光波场与介质内的弹性声波场相互作用而产生的一种光散射现象。散射光的频率相对于入射光的频率发生变化,产生布里渊频移  $V_B$ , 频移量的大小与散射角和散射介质内的声波场特性直接相关。当光散射角  $\theta=180^\circ$ , 即为可接收到的后向散射光,那么布里渊频移量为

式中  $n$  为介质折射率,  $v$  为声波速度,  $\lambda$  为入射波波长。

海水中的布里渊散射是由密度变化引起,而密度变化是由温度和盐度的变化引起。(1) 式中的  $n, v$  均受到海水温度  $T$  和盐度  $S$  的影响。

海水声速  $v$  和折射率  $n$  随海水温度  $T$  和盐度  $S$  变化的公式<sup>[8]</sup> 为

$$v(T, S) = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35), \quad (2)$$

$$n(T, S, \lambda) = n_0 + S(n_1 + n_2T + n_3T^2) + n_4T^2 + \frac{n_5 + n_6S + n_7T}{\lambda \times 10^9} + \frac{n_8}{(\lambda \times 10^9)^2} + \frac{n_9}{(\lambda \times 10^9)^3}, \quad (3)$$

式中  $n_0 = 1.31405, n_1 = 1.779 \times 10^{-4}, n_2 = -1.05 \times 10^{-6}, n_3 = 1.6 \times 10^{-8}, n_4 = -2.02 \times 10^{-6}, n_5 = 15.868, n_6 = 0.01155, n_7 = -0.00423, n_8 = -4382, n_9 = 1.1455 \times 10^6, \lambda$  为入射光波长。将(2)式、(3)式代入(1)式可得在海水中的布里渊频移与温度、盐度以及入射光波长的关系:

$$V_B(T, S, \lambda) = \pm 2 \left[ n_0 + S(n_1 + n_2T + n_3T^2) + n_4T^2 + \frac{n_5 + n_6S + n_7T}{\lambda \times 10^9} + \frac{n_8}{(\lambda \times 10^9)^2} + \frac{n_9}{(\lambda \times 10^9)^3} \right] \times \frac{1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35)}{\lambda}, \quad (4)$$

以上为海水布里渊后向散射频移量与海水温度和盐度的二元数学模型。由于布里渊频移量受两种因素共同作用,试图将由温度导致布里渊频移量的变化,从由盐度导致布里渊频移量的变化中孤立出来是不可能的。

经典电磁场理论中,在  $\hbar\omega_q \ll k_B T$  ( $\hbar, k_B$  分别是普朗克常数和波尔兹曼常数)条件下,已被激发了的介质和光电磁波可当作连续介质中的平面波来处理。且满足波长  $\Delta$  (声波波长)远大于晶格常数 ( $\alpha = 2\pi/q$ ) 的条件。用  $\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_s, \mathbf{k}_i, \mathbf{k}_s$  和  $\omega_i, \omega_s$  分别表示入射光、散射光的电场矢量、波矢和相应的频率,  $\mathbf{G}$  表示散射矢。介质的介电常数为  $\epsilon' = \epsilon + \delta\epsilon, \epsilon$  是无起伏时的介电常数。 $\delta\epsilon$  是介电常数作微小周期振动引起的增量,且  $\delta\epsilon \ll \epsilon$ 。根据麦克斯韦方程组,可以得到布里渊散射截面计算的开始方程:

$$\mathbf{E}_s = - \frac{\exp(i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{R}_0)}{4\pi\epsilon\mathbf{R}_0} \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{G}$$

式中  $\mathbf{R}_0$  是观察者的坐标。由于远场处的散射场是由球面波组成,其振幅由  $\mathbf{G}, \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{G}$  得极化强度确定。由该式可以计算出通过截面为  $(lh)$  的介质 (体积为  $V = ldh$ ) 从平面波  $\delta\epsilon \exp[i(\omega t - qr)]$  内散射的功率为  $P_s = [|\mathbf{k}_s|^2 \cdot |\delta\epsilon|^2 l^2 / 16\epsilon^2] \rho l$ , 再从振幅为  $\delta\epsilon$  的波散射的功率计算出散射功率之比。其

立体角  $d\Omega$  内总散射功率与入射光功率之比为

$$\frac{P_B}{P_0} = \frac{|\mathbf{k}_s|^2 l^2}{16\epsilon^2} \cdot \frac{hd d\Omega |\mathbf{k}_s|^2}{4\pi^2} \cdot |\delta\epsilon|^2 = \frac{|\mathbf{k}_s|^2 l^2 d\Omega h d}{64\pi^2 \epsilon^2} \cdot \frac{\epsilon^4 \rho^2 q^2 k_B T}{\omega^2 \rho h d},$$

其中  $\rho$  为散射介质的密度。又因为:  $|\mathbf{k}_s| \approx |\mathbf{k}_i| = 2\pi/\lambda, q = \omega/V_B$ , 最后有

$$\frac{P_B}{P_0} = \frac{\pi^2 \epsilon^2 \rho^2 k_B T l}{4V_B^2 \rho \lambda^4}.$$

由于介质中介电常数  $\epsilon$ 、泡克尔光弹常数  $p$ 、晶格常数  $l$ 、散射介质的密度变化很小,而波尔兹曼常数  $k_B$  和入射光波长  $\lambda_0$  为常数,因此令  $A = \frac{\pi^2 \epsilon^2 \rho^2 k_B l}{4\lambda^4 \cdot \rho}$ , 则上式即为

$$\frac{P_B}{P_0} = \frac{AT}{V_B^2}, \quad (5)$$

其中  $P_B$  表示布里渊功率,  $A$  为一个常数,  $T$  为海水的温度,  $V_B$  为布里渊频移量的大小,  $P_0$  为入射功率大小。由(5)式可知,在入射功率一定的情况下,布里渊散射功率与温度和布里渊频移量大小有关,由于布里渊频移量又是关于温度和盐度的函数,因此布里渊散射功率也是关于温度和盐度的二元函数。再结合布里渊频移量关于温度和盐度的另外一个二元函数即可推反演出海水的温度  $T$  与盐度  $S$  的数

值,实现双参量的同步测量。

在实际工程应用中,(5)式中入射光的功率除了与激光器的输出功率有关以外,还与具体的光程以及信道的光学特性有关。为了表达和计算方便,本文将布里渊功率归一化,即在入射功率一定的情况下,(5)式的左边用布里渊的散射功率与典型参量条件下散射功率的比值来代替,这样的话(5)式的左边即为布里渊散射功率的相对值。取典型值(盐度为35‰,温度为20℃)时的布里渊相对功率为1,其他参量下的相对布里渊功率  $P$  为该参量条件下的功率与盐度为35‰,温度为20℃时功率的比值,即

$$P = \frac{A'T}{V_B^2}, (P_{S=35‰, T=20℃} = 1) \quad (6)$$

式中  $A'$  为归一化以后的系数。在  $V_B$  和  $P$  已知的情況下,为了直观方便的求出海水温度、盐度的值,有必要推演出它们关于  $V_B$  和  $P$  的公式。由于(4)式和(6)式是二元多次方程,直接求解出温度和盐度比较困难,所以本文在大量数据的基础上通过拟合得到关于温度和盐度的表达式。

联立(4)式和(6)式,得到在不同温度和盐度的情况下,对应的布里渊频移量  $V_B$  和相对布里渊散射信号功率  $P$  的大小,分别如表1和表2所示。

表1 布里渊频移量  $V_B$ (GHz)与温度、盐度的关系

Table 1 Calculated data for Brillouin frequency shift as a function of salinity and temperature

| $S/10^{-3}$<br>$T/℃$ | 0       | 5       | 10      | 15      | 20      | 25      | 30      | 35      | 40      |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0                    | 7.04314 | 7.08208 | 7.12107 | 7.16011 | 7.19920 | 7.23833 | 7.27752 | 7.31676 | 7.35605 |
| 5                    | 7.16024 | 7.19788 | 7.23556 | 7.27329 | 7.31107 | 7.34890 | 7.38677 | 7.42469 | 7.46266 |
| 10                   | 7.26406 | 7.30040 | 7.33679 | 7.37322 | 7.40969 | 7.44621 | 7.48277 | 7.51938 | 7.55604 |
| 15                   | 7.35567 | 7.39072 | 7.42582 | 7.46096 | 7.49614 | 7.53136 | 7.56663 | 7.60194 | 7.63728 |
| 20                   | 7.43615 | 7.46993 | 7.50375 | 7.53761 | 7.5715  | 7.60544 | 7.63942 | 7.67344 | 7.7075  |
| 25                   | 7.50657 | 7.53909 | 7.57165 | 7.60424 | 7.63687 | 7.66954 | 7.70225 | 7.73499 | 7.76777 |
| 30                   | 7.56803 | 7.59931 | 7.63062 | 7.66196 | 7.69334 | 7.72475 | 7.7562  | 7.78769 | 7.81921 |
| 35                   | 7.62162 | 7.65166 | 7.68174 | 7.71185 | 7.74199 | 7.77217 | 7.80238 | 7.83263 | 7.86291 |
| 40                   | 7.66841 | 7.69724 | 7.72611 | 7.75500 | 7.78393 | 7.81289 | 7.84189 | 7.87091 | 7.89997 |

表2 布里渊散射信号功率  $P$ (归一化单位)与温度、盐度的关系

Table 2 Calculated data for Brillouin scattering signal power as a function of salinity and temperature

| $S/10^{-3}$<br>$T/℃$ | 0       | 5       | 10      | 15      | 20      | 25      | 30      | 35      | 40      |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0                    | 1.10597 | 1.09384 | 1.08189 | 1.07013 | 1.05854 | 1.04712 | 1.03588 | 1.02480 | 1.01388 |
| 5                    | 1.08969 | 1.07832 | 1.06712 | 1.05608 | 1.04519 | 1.03446 | 1.02388 | 1.01345 | 1.00316 |
| 10                   | 1.07781 | 1.0671  | 1.05654 | 1.04613 | 1.03585 | 1.02572 | 1.01572 | 1.00585 | 0.99612 |
| 15                   | 1.06970 | 1.05957 | 1.04958 | 1.03972 | 1.02998 | 1.02037 | 1.01088 | 1.00151 | 0.99226 |
| 20                   | 1.06484 | 1.05523 | 1.04574 | 1.03637 | 1.02711 | 1.01796 | 1.00893 | 1.00000 | 0.99118 |
| 25                   | 1.06279 | 1.05364 | 1.04460 | 1.03566 | 1.02683 | 1.01810 | 1.00947 | 1.00094 | 0.99251 |
| 30                   | 1.06314 | 1.05440 | 1.04577 | 1.03723 | 1.02879 | 1.02044 | 1.01218 | 1.00401 | 0.99593 |
| 35                   | 1.06554 | 1.05719 | 1.04892 | 1.04075 | 1.03266 | 1.02466 | 1.01674 | 1.00890 | 1.00114 |
| 40                   | 1.06966 | 1.06166 | 1.05374 | 1.04591 | 1.03815 | 1.03046 | 1.02286 | 1.01533 | 1.00787 |

根据表1和表2则可以拟合出盐度  $S$  关于布里渊频移量  $V_B$  和布里渊散射信号功率  $P$  的经验公式,如下所示:

$$S = m_0 + m_1 V_B + m_2/P + m_3 V_B^2 + m_4/P^2 + m_5 V_B/P + m_6 V_B^3 + m_7/P^3 + m_8 V_B/P^2 + m_9 V_B^2/P, \quad (7)$$

其中

$$m_0 = 1336.26853140284, \\ m_1 = -645.620578275937,$$

$$m_2 = 3632.39582224592, \\ m_3 = -68.200658320304, \\ m_4 = -3291.05190549247, \\ m_5 = 715.478779816609, \\ m_6 = 14.9379243419955, \\ m_7 = 984.655022063827, \\ m_8 = 126.807275199784, \\ m_9 = -116.673361554182.$$

而温度  $T$  的表达式可由(6)式直接得到

$$T = \frac{V_B^2}{A^7} \cdot P. \tag{8}$$

由(7)式,(8)式可以看出,若测量出布里渊频移量  $V_B$  和接收布里渊散射信号功率  $P$  的大小,代入(7)式和(8)式,则可以推演出海水的温度  $T(V_B, P)$  与盐度  $S(V_B, P)$  的数值,实现双参量的同步测量。由于盐度为实时测量值,即理想情况下盐度的不确定度为零,因此在布里渊频移量的测量精度为 1 MHz 的条件下,其温度的测量精度为  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[6]</sup>,远高于盐度的不确定为  $5 \times 10^{-4}$  的条件下  $0.2\text{ }^\circ\text{C}$  的测量精度。

### 3 实验与分析

依据布里渊频移量与海水的温度、盐度模型和接收布里渊散射信号功率与海水的温度、盐度模型,进行仿真实验。实验中采用波长为 532 nm 的激光作为入射光。海水的布里渊频移取在一般值 7~8 GHz 之间。

图 1(a)、图 1(b)分别仿真了海水的温度、盐度与布里渊频移及功率的关系。由图 1(a)、图 1(b)可知,只要测量出海水的布里渊频移和功率,就可以反演出海水温度和盐度的大小。即能够实现海水温度、盐度的同步测量。

如下仿真实验可更好地分析海水温度或盐度对布里渊频移量或功率的影响。

图 2(a)给出了在不同盐度下海水中布里渊频移与温度的关系,可以明显地看出布里渊频移随温度的增大而增大,而且增加量成减小的趋势;同时,在温度一定时,布里渊频移随盐度的增大而增大。

图 2(b)给出了在不同温度下海水中布里渊频移与盐度的关系,可以明显地看出布里渊频移随盐度的增大而增大,近似成线性关系,而且不同温度下,频移量的变化率基本相同;同时,在盐度一定时,布里渊频移随温度的增大而增大。这与图 2(a)的分析是相吻合的。

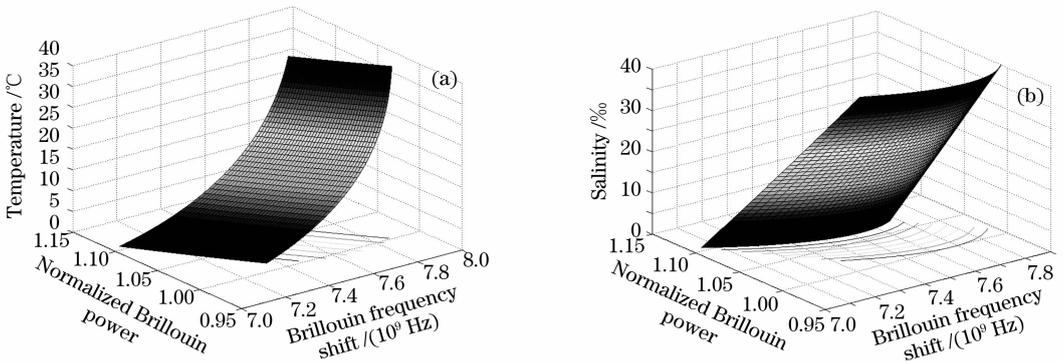


图 1 (a)海水温度,(b)海水盐度与布里渊频移量和布里渊功率的关系

Fig. 1 (a) Temperature, (b) salinity as the functions of Brillouin frequency shift and Brillouin scattering signal power in seawater

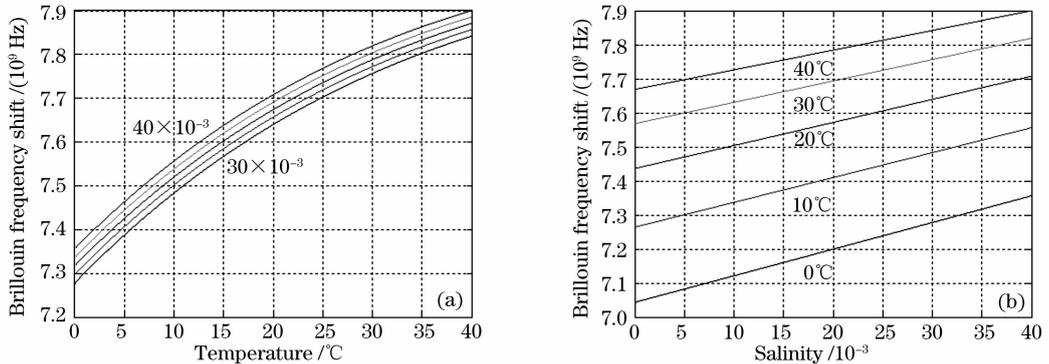


图 2 海水中布里渊频移与(a)温度,(b)盐度的关系

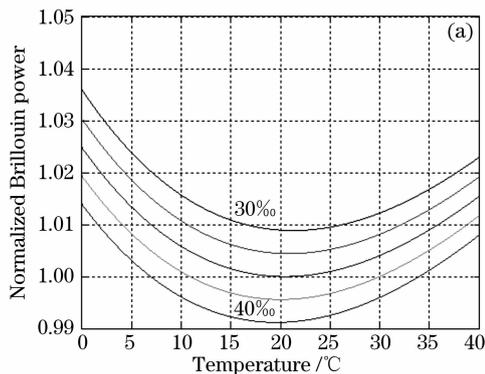
Fig. 2 Brillouin frequency shift as the function of (a) temperature, (b) salinity

图 3(a)给出了不同盐度下海水中布里渊功率与温度的关系。可以明显地看出布里渊功率从 0 °C 开始先随温度的增大而减小,在大约 20 °C 以后随温

度的增大而增大;在温度相同时,布里渊功率随盐度的增大而减小。

图 3(b)给出了不同温度下海水中布里渊功率

与盐度的关系。可以明显地看出布里渊功率随盐度的增大而减小,而且近似成线性关系,但是不同温度下,功率的变化率并不相同。在温度分别为 30 °C,



35 °C, 40 °C, 盐度一定的情况下,布里渊功率随着温度的增大而增大,这与图 3(a)的分析是相吻合的。

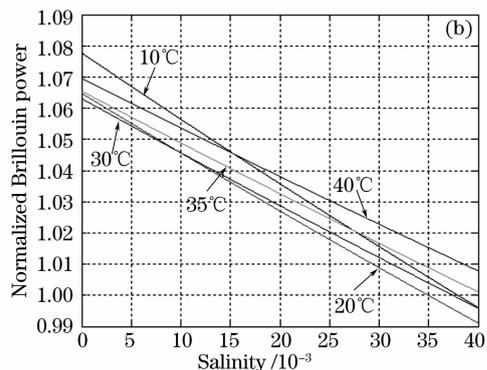


图 3 海水中布里渊功率与(a)温度,(b)盐度的关系

Fig. 3 Brillouin scattering signal power as the function of (a) temperature, (b) salinity in seawater

## 4 结 论

本文提出了一种能够对海水温度和盐度进行同步测量的方法。由于布里渊频移量和布里渊功率都与海水的温度和盐度有关,故通过检测海水布里渊频移量和功率的大小可以实现对海水温度和盐度的同步测量。本文分析了海水布里渊频移量和功率的模型,并对其进行了仿真实验,分析了海水温度、盐度与布里渊频移量、功率的具体关系。该方法能够实现海水温度、盐度的同步测量,对海洋环境监测具有重要的意义。由于文章所建立的数学模型忽略了海浪、泡沫等参量的影响,因此在以后的工作中还需对数学模型进行改进和进一步的分析。

## 参 考 文 献

- 1 Ren Xiaobin, Gong Wenping, Dai Rui *et al.*. Accurate measurements of Brillouin shift in water by the filters with resonating absorption of iodine molecules [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1429~1433  
任晓斌,弓文平,戴 瑞等. 用碘分子共振吸收滤波器精确测量水中的布里渊散射频移[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1429~1433
- 2 Xu Jianfeng, Li Rongsheng, Zhou Jing *et al.*. Measurements of bulk viscosity of water using Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1112~1115  
徐建峰,李荣声,周 静等. 用布里渊散射测量水的体粘滞系数[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1112~1115
- 3 Ma Yong, Liang Kun, Lin Hong *et al.*. Model of atmosphere

detection in based on Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 962~966

马 泳,梁 琨,林 宏等. 基于布里渊散射信号检测的大气探测模型[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 962~966

- 4 C. Laurence Korb, Bruce M. Gentry, Chi Y. Weng. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**: 4202~4213
- 5 Ma Yong, Lin Hong, Ji Hang *et al.*. Lidar system design based on brim detecting technology [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 170~175  
马 泳,林 宏,冀 航等. 基于边缘探测技术的激光雷达系统设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 170~175
- 6 E. S. Fry, Yves Emery, Xiaohong Quan *et al.*. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27): 6887~6894
- 7 Y. E. Emery, E. S. Fry. Laboratory development of a lidar for measurement of sound velocity in the ocean using Brillouin scattering[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2963**: 210~215
- 8 Herman Medwin. Speed of sound in water; A simple equation for realistic parameters[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975, **58**(6): 1318~1319
- 9 P. C. Wait, T. P. Newson. Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **122**: 141~146
- 10 T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 979~981
- 11 T. R. Parker, M. Farhadiroushan, R. Feced *et al.*. Simultaneous distributed measurement of strain and temperature from noise-initiated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(4): 645~659