

相干瑞利散射海水水下温度测量技术的理论研究*

任秀云¹⁾ 田兆硕¹⁾ 杨敏²⁾ 孙兰君¹⁾ 付石友^{1)†}

1) (哈尔滨工业大学 (威海) 信息光电子研究所, 威海 264209)

2) (国家海洋局北海海洋技术保障中心, 青岛 266033)

(2013年10月23日收到; 2014年1月9日收到修改稿)

海水水下温度的快速大范围测量是海洋监测的重要内容, 在民用和军事领域都有着至关重要的意义. 本文提出了采用相干瑞利散射方法测量海水水下温度的新方法: 用宽带高速光电探测器接收本振激光和海水后向瑞利散射光相干产生的差频信号, 进行傅里叶变换分析获取海水瑞利散射展宽谱, 从而反演海水温度. 首先从海水的热力学特性出发, 对利用瑞利散射谱测量海水水下温度的基本原理进行了理论研究和软件模拟; 然后对采用相干探测测量海水瑞利散射谱的测量方法进行了理论分析和软件模拟; 在此基础上对瑞利散射海水水下温度测量精度进行了分析, 得出当水体瑞利散射频谱半宽度测量精度为1 MHz时, 测温精度约为0.35 K.

关键词: 水下温度, 瑞利散射, 相干探测

PACS: 33.20.Fb, 78.35.+c, 92.05.Hj, 42.62.Fi

DOI: 10.7498/aps.63.083302

1 引言

海水温度的三维分布是海洋监测的一个重要内容, 是认识和利用海洋环境的基础, 在民用和军事领域都有着至关重要的意义. 基于蓝绿激光在海水中散射的实时监测方法可以大范围快速获取次表层海水温度的三维分布, 近几十年越来越受到人们的重视.

当激光入射到海水中, 光与水分子的相互作用过程中会发生拉曼散射、布里渊散射和瑞利散射. 由于水分子的振动或转动形成分子感应电偶极矩随时间的周期性调制, 导致入射激光发生拉曼散射, 其散射光频率相对于入射光发生很大的移动. 恒熵条件下, 水分子的热布朗运动导致海水内始终存在着不同程度的压力涨落, 形成热声波场的传播, 产生多普勒效应, 从而引起散射光的较大的频移, 这种散射则称为布里渊散射. 而恒压条件下水分子的热布朗运动导致热熵的涨落, 从而产生多普

勒效应, 结果是瑞利散射光场以入射光频率为中心而展宽. 显然, 三种散射皆与海水温度有关, 因此皆可作为遥感海水温度的有力工具.

最早用于海水温度遥感的光散射技术是拉曼散射^[1,2], 但是由于其频移量比较大, 入射光和散射光无法同处海水透射窗口, 其探测能力受到极大限制. 而且, 拉曼散射回波信号易受背景辐射影响, 抗干扰性较差, 测量精度较低. 为了解决上述问题, 研究人员提出了应用布里渊散射测量次表层海水温度的想法, 并做了大量研究工作, 在改进激光光源^[3,4]和鉴频技术^[5-8]以及提高探测能力^[9,10]上取得了很多阶段性成果. 但由于扫描干涉仪所需测量时间长, 抗震能力差; 分子吸收滤波器要求激光器具极高的频率稳定性, 系统造价高; ICCD的像素尺寸较大, 限制了布里渊散射谱的测量精度, 因此目前的布里渊散射测温研究仍处于实验室阶段, 其现场温度遥测的实用化进程还有很长的路要走.

由于水分子的热布朗运动导致多普勒展宽效

* 国家自然科学基金 (批准号: 41306092)、山东省自然科学基金 (批准号: ZR2013DQ026)、山东省科技攻关 (批准号: 2011GHY11514) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: HIT.NSRIF.2013139) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fsytzs@126.com

应, 海水瑞利散射频谱的展宽程度是温度的直接函数. 由于瑞利散射频移量很小, 入射光和散射光同处海水透射窗口, 可以获得很好的探测深度. 并且作为一种频率探测方式, 具有信噪比高、抗干扰性强等优点. 近年来国内外很多研究者对基于瑞利散射的大气温度垂直剖面遥感探测技术进行了广泛的研究^[11,12], 采用边缘探测技术来测量瑞利散射光谱的多普勒线宽. 在此基础上, 本文提出一种新的遥感海水水下温度的瑞利散射激光雷达技术, 通过随机相干技术快速测量瑞利散射光谱和海水水下温度. 随机相干法通过宽带高速光电探测器接收本振激光和随机瑞利散射光相干产生的随机差频信号, 进行傅里叶变换分析获取展宽后的瑞利散射光谱, 从而达到海水温度测量的目的. 采用随机相干法的瑞利散射海水温度测量系统结构简单, 造价低, 降低了光路对准要求和发射激光的稳频要求.

2 测量原理

当光进入海水中时, 由于水分子的无规则热运动, 各个分子具有不同方向、不同大小的热运动速度, 使其瑞利散射光产生的多普勒频移也不尽相同. 这种水分子随机运动产生的散射光, 其总效果即是多普勒展宽. 温度越高, 分子平均热运动速度越快, 多普勒展宽光谱越宽. 根据统计物理理论, 海水的分子速度分布满足玻尔兹曼-麦克斯韦分布, 在温度为 T 的热平衡状态下, 海水分子热运动速度满足:

$$f(u_x)du_x = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} e^{-mu_x^2/(2kT)} du_x, \quad (1)$$

式中, u_x 为水分子热运动在 x 轴上的速度, m 为水分子质量, k 为玻尔兹曼常数, T 为海水的绝对温度. 结合多普勒频移公式,

$$\nu = \nu_0 \left(\frac{c + u_x}{c - u_x}\right), \quad (2)$$

其中 c 为光速, ν_0 为入射光频率, ν 为要观察的频率. 对 (1) 式进行处理, 可以推得在某一波长和压力下, 海水的近似瑞利谱为

$$R(\nu, \nu_0) = \frac{c}{\nu_0} \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} \times \exp\left[\frac{-mc^2(\nu - \nu_0)^2}{2kT\nu_0^2}\right], \quad (3)$$

瑞利散射光频谱的多普勒展宽半高全宽可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta\nu_D &= 2\nu_0 \left(\frac{2kT}{mc^2} \ln 2\right)^{1/2} \\ &= 2.9186 \times 10^{-20} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{m}} \\ &= \frac{8.7558 \times 10^{-12}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{T}{m}} \\ &= \frac{2.148 \times 10^2}{\lambda_0} \sqrt{\frac{T}{M}}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\Delta\nu_D$ 为瑞利谱半峰全宽, M 为水分子的分子量, λ_0 为入射光波长. 由 (4) 式可见, 对于给定波长的入射激光, 其海水瑞利散射谱半高全宽 (full width half maximum, FWHM) 仅由海水温度变量决定, 与海水盐度等其他参数无关. 图 1 给出了 532 nm 激光在不同温度的海水中散射形成的瑞利散射频谱归一化结构图, 其中实线对应的海水温度为 273 K, 虚线对应的海水温度为 303 K. 从图中可以看出, 随着温度升高, 瑞利散射光谱有所展宽. 对 (4) 式进行变形可得海水温度计算公式如下:

$$T = 2.61 \times 10^{22} m \lambda_0^2 (\Delta\nu_D)^2, \quad (5)$$

显然, 通过测量瑞利散射谱 FWHM 可以推得相应的海水温度. 图 2 给出了海水温度与其瑞利散射谱 FWHM 之间的对应关系. 从图 2 中可以看出, 瑞利散射光谱 FWHM 从 1.56 GHz 逐渐升高到 1.66 GHz, 对应海水温度从 269 K 变化到 305 K.

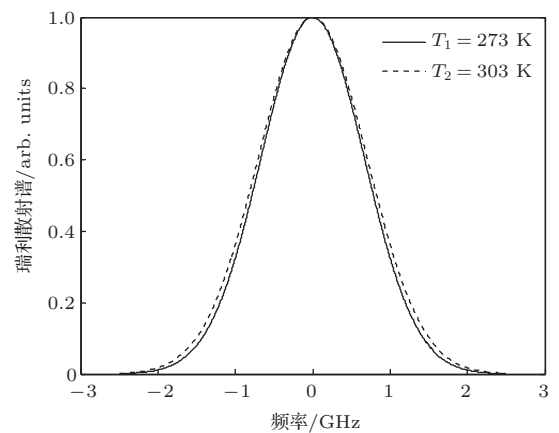


图 1 不同温度下的瑞利散射光谱

3 测量方法及系统设计

目前应用瑞利散射遥感大气温度的技术一般是采用边缘探测技术, 通过检测具有陡峭响应曲线的滤波器后的透过光强来测量瑞利散射光谱的

多普勒线宽,从而获取大气温度.本文提出了一种新的测量海水瑞利散射频谱的相干探测法,采用宽带高速光电探测器接收本振激光和瑞利散射光相干产生的随机差频信号,进行傅里叶变换分析获取展宽后的瑞利散射光谱,从而达到测量海水温度的目的.

采用相干方法测量海水后向瑞利散射光谱的遥感系统结构图如图3所示.种子注入倍频532 nm高功率单频激光经反射镜M1, M2反射后入射到水池中.后向瑞利散射光经卡塞格林望远镜接收后,与一部分连续种子本振激光在高速宽带光电探测器接收面相干产生随机相干信号,经光电转换变成电信号,由宽带示波器显示记录,经傅里叶变换分析可以获取瑞利散射谱,从而推演获得水温.采用距离选通技术,通过时序控制系统控制高

速宽带探测器的采集时间,可以接收不同深度水的瑞利散射相干信号,实现该位置的水温测量.该测量系统结构简单,造价低,降低了光路对准要求和发射激光的稳频要求.

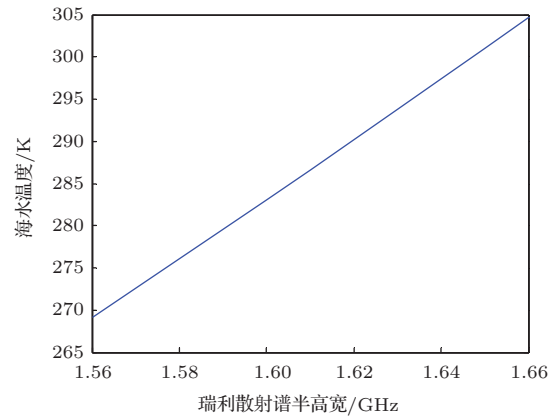


图2 海水温度与瑞利散射光谱 FWHM 的关系

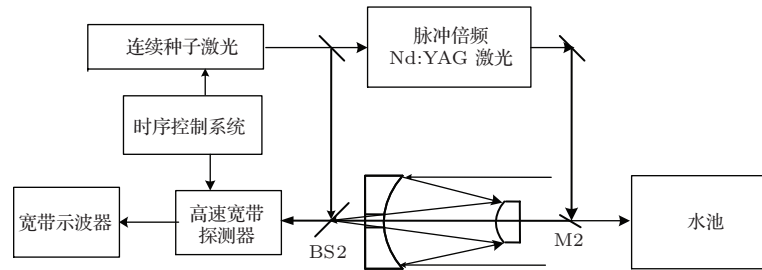


图3 基于相干技术的瑞利散射光谱测量系统结构图

相干探测中光电探测器起着光混频器的作用,它对信号光和本振光的差频分量响应,输出一个中频光电流.基于相干技术的瑞利散射光谱测量系统中,本振光是入射激光,其频率设为 ν_L ,信号光是水的瑞利散射光,由于多普勒效应的影响,瑞利散射光频率以入射光频率 ν_L 为中心展宽,设为 ν_s .则本振光和信号光的电场可以分别写为

$$E_L(t) = E_L \cos(2\pi\nu_L t + \phi_L), \quad (6)$$

$$E_s(\nu_s, t) = E_s(\nu_s) \cos(2\pi\nu_s t + \phi_s), \quad (7)$$

其中 ϕ_L 为本振光相位, ϕ_s 为信号光相位.根据光电探测器的平方律特性,其输出光电流应为本振光和信号光振幅叠加和的平方,包括直流分量、和频分量和差频分量,其中和频分量的频率太高,光电探测器不响应,滤除直流分量后,光电探测器的光电流输出为

$$i_{IF}(t) = \int_{\nu_L - \frac{\Delta\nu_D}{2}}^{\nu_L + \frac{\Delta\nu_D}{2}} \alpha E_L E_s(\nu_s) \cos[(\nu_L - \nu_s)t + (\phi_L - \phi_s)] d\nu_s, \quad (8)$$

其中 α 是探测器的光电转换因子, $\Delta\nu_D$ 是瑞利散射光谱宽度.对上式进行定义域扩展可得

$$i_{IF}(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \alpha E_L E_s(\nu_s) \exp[i2\pi(\nu_L - \nu_s)t + i(\phi_L - \phi_s)] d\nu_s. \quad (9)$$

对该信号进行傅里叶变换,可以得出瑞利散射光谱分布:

$$E_s(\nu_s) = \frac{2}{\alpha E_L} \int_{-\infty}^{\infty} i_{IF}(t) \exp[-i2\pi(\nu_L - \nu_s)t - i(\phi_L - \phi_s)] dt. \quad (10)$$

图4给出了当瑞利散射半宽度 $\Delta\nu_D = 1.6$ GHz时,采用相干方法测量海水瑞利散射谱的模拟结果与理论曲线,其中实线是瑞利散射光谱理论曲线,虚线是连续种子本振光和瑞利散射光相干产生的差频信号经傅里叶变换后得到的模拟曲线.模拟中时间分辨率设为 $\Delta T = 5 \times 10^{-11}$ s.

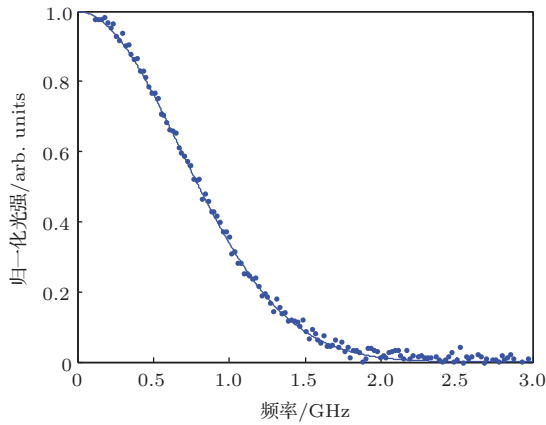


图4 相干方法测量瑞利散射光谱模拟结果

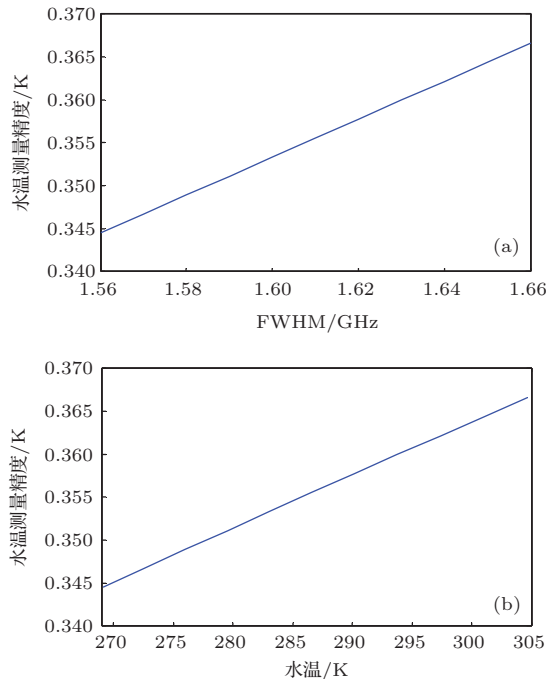


图5 瑞利散射测温法的水温测量精度 (a) 水温测量精度与瑞利谱 FWHM 的关系曲线; (b) 水温测量精度与水温的关系曲线

4 水温测量精度分析

对(5)式进行微分, 可得瑞利散射水温测量方法的测量精度表达式:

$$\begin{aligned} \delta T &= 2.61 \times 10^{22} m \Delta \nu_D \lambda_0^2 \delta(\Delta \nu_D) \\ &= 2.28 \times 10^{11} \lambda_0 \sqrt{mT} \delta(\Delta \nu_D), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\delta(\Delta \nu_D)$ 为瑞利散射频谱 FWHM 测量精度, 若取为 $\delta(\Delta \nu_D) = 1.0 \times 10^6$ Hz, 其余参数设置为 $m = 2.991 \times 10^{-26}$ kg, $\lambda_0 = 0.532 \times 10^{-6}$ m, 可以给出水温测量精度随着瑞利散射谱 FWHM 变化的关系曲线, 如图 5(a) 所示. 由图可以看出, 随着瑞利散射频谱宽度增大, 水温测量精度会有小幅度增

长. 图 5(b) 给出了水温测量精度随水温变化的关系曲线. 可以看出, 瑞利散射水温方法的测量精度在水温为 270 K 时最高, 约为 0.345 K; 随着水温升高, 测量精度有小幅度下降, 在 305 K 水温时可以达到 0.367 K 的测量精度. 进一步提高瑞利散射频谱 FWHM 测量精度 $\delta(\Delta \nu_D)$, 可以获得更好的测量精度.

5 结 论

本文分析了激光雷达海水温度遥感技术的发展现状, 提出了一种基于海水瑞利散射的水下温度遥感方式, 并对其测量原理进行了理论分析和模拟验证, 讨论了瑞利散射光谱的相干探测方法和方案设计, 在此基础上分析了瑞利散射激光雷达遥感海水水下温度的测量精度. 研究表明, 采用相干探测技术通过宽带高速光电探测器接收本振激光和随机瑞利散射光相干产生的差频信号, 进行傅里叶变换分析获取展宽后的瑞利散射光谱, 从而实现水下温度测量的方法具有较好的测温精度. 系统结构简单, 造价低, 是海水水下温度遥感测量的一条新的技术途径, 对实际海洋环境监测、预报、应急以及渔业资源开发、水下武器装备性能提高等有重要的意义和价值.

参考文献

- [1] Leonard D A, Caputo B, Hoge F E 1979 *Appl. Opt.* **18** 1732
- [2] Becucci M, Cavalieri S, Eramo R, Fini L, Materazzi M 1999 *Appl. Opt.* **38** 928
- [3] Hirschberg J G, Byrne J D, Wouters A W, Boynton G C 1984 *Appl. Opt.* **23** 2624
- [4] Schorstein K, Fry E S, Walther T 2009 *Appl. Phys. B* **97** 931
- [5] Rudolf A, Walther T 2012 *Opt. Lett.* **37** 4477
- [6] Gong W, Shi J, Li G, Liu D, Katz J W, Fry E S 2006 *Appl. Phys. B* **83** 319
- [7] Shi J, Ouyang M, Gong W, Li S, Liu D 2008 *Appl. Phys. B* **90** 569
- [8] Liu J, Bai J H, Ni K, Jing H M, He X D, Liu D H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 260 (in Chinese) [刘娟, 白建辉, 倪恺, 景红梅, 何兴道, 刘大禾 2008 物理学报 **57** 260]
- [9] Chen X D, Shi J W, Ouyang M, Liu B, Xu Y X, Shi J L, Liu D H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4680 (in Chinese) [陈旭东, 石锦卫, 欧阳敏, 刘宝, 许艳霞, 史久林, 刘大禾 2009 物理学报 **58** 4680]
- [10] Chen X D, Shi J W, Liu J, Liu B, Xu Y X, Shi J L, Liu D H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1047 (in Chinese) [陈旭东,

石锦卫, 刘娟, 刘宝, 许艳霞, 史久林, 刘大禾 2010 物理学报 **59** 1047
 [11] Piironen P, Eloranta E W 1994 *Opt. Lett.* **19** 234

[12] Zhu X P, Liu J Q, Chen W B 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 2005 (in Chinese) [竹孝鹏, 刘继桥, 陈卫标 2010 中国激光 **37** 2005]

Theoretical study on measuring underwater temperature based on coherent Rayleigh scattering*

Ren Xiu-Yun¹⁾ Tian Zhao-Shuo¹⁾ Yang Min²⁾ Sun Lan-Jun¹⁾ Fu Shi-You^{1)†}

1) (*Information Optoelectronics Research Institute, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China*)

2) (*North China Sea Marine Technical Support Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China*)

(Received 23 October 2013; revised manuscript received 9 January 2014)

Abstract

The rapid measuring of the underwater temperature on a large scale is very important for marine monitoring, and it has vital significances in the civilian and military fields. In this paper, a new coherent Rayleigh scattering method to measure underwater temperature is presented. A wide-band photodetector is used to receive the heterodyne signal combined by the local oscillator laser and water Rayleigh backscattering light, and the water Rayleigh scattering spectrum can be acquired by transform analysis, then the water temperature can be obtained. Firstly, theoretical study and simulation are made on the basic principles of measuring underwater temperature based on Rayleigh scattering. Secondly, theoretical analysis and simulation are made on how to measure water Rayleigh scattering spectrum using coherent detection. Finally, the water temperature measurement accuracy based on Rayleigh scattering is analyzed, showing that for 1 MHz measurement accuracy of Rayleigh scattering spectrum half-width, about 0.35 K temperature measurement accuracy can be achieved.

Keywords: underwater temperature, Rayleigh scattering, coherent detection

PACS: 33.20.Fb, 78.35.+c, 92.05.Hj, 42.62.Fi

DOI: 10.7498/aps.63.083302

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41306092), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2013DQ026), the Science and Technology Planning of Shandong Province, China (Grant No. 2011GHY11514), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. HIT.NSRIF.2013139).

† Corresponding author. E-mail: fsytzs@126.com