

文章编号: 1001-3806(2007)05-0469-04

基于边缘探测技术的激光单稳频指标分析

马 泳, 林 宏, 冀 航, 董天临

(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: 基于边缘探测技术的激光雷达实际应用中, 激光器在工作中发射光信号的中心频率会发生漂移, 激光频率的漂移过大, 会直接影响边缘探测系统的测量精度。采用仿真计算的方法得到碘分子吸收滤波器在 470nm ~ 550nm 范围内的吸收光谱谱线, 以基于边缘探测技术的激光雷达监测大气信道和海洋水下信道环境参数为例, 得到适合大气和海洋探测吸收谱线并确定发射激光信号的中心频率。通过理论分析, 给出了满足探测要求的激光发射信号单稳频指标, 为实际探测系统的设计奠定基础。

关键词: 激光技术; 单稳频指标; 边缘探测技术; 碘分子吸收滤波器

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Analysis of laser's monochromatic and stable frequency indexes based on edge detecting technology

MA Yong, LN Hong, JI Hang, DONG Tian-lin

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

Abstract: In the application of the lidar system based on edge detecting technology, the laser's central frequency will drift. If the excursion of the central frequency is too big, it will influence the measuring precision of edge detecting system. Through simulation and calculation, the absorption spectrum of molecule iodine absorption filter from 470nm ~ 550nm was obtained. Taking the atmospheric parameters and the underwater parameters as an example, based on the lidar system using edge detecting technology, the absorption spectrum of molecule iodine absorption filter, meeting the requirement of the detecting system, was obtained and the center emission frequency of laser emitter was determined. Based on the above results, the proper monochromatic and stable frequency, meeting the detecting system's demand, was determined and the results can be used as the guideline of laser emitter's choice in the practical systems.

Key words: laser technique; monochromatic and stable frequency indexes; edge detecting technology; iodine molecule absorption filter

引 言

基于边缘探测技术^[1~3]的激光雷达系统的设计主要包括:分子吸收滤波器吸收谱线的选择和激光器性能指标的确定。选定吸收谱线后,两个对称的吸收谱线中心频率就是激光器发射中心频率。如果激光的输出线宽过宽,接收到的中心频率分量的谱线就相应过宽,这使得回波信号中的瑞利散射信号淹没了布里渊散射信号,形成较大的误差。激光器输出线宽的大小表征激光器输出光信号的单频性能^[4]。激光器在实际工作中发射光信号的中心频率会发生漂移,激光

频率的漂移过大,会直接影响边缘探测器的测量精度,满足探测需要的激光中心频率漂移的范围表征激光的稳频性能指标^[5]。目前,在基于边缘探测技术的激光雷达实际应用中,均采用现场测试的方法寻找分子吸收滤波器合适的吸收谱线和激光器的输出中心频率。由于无法事前确定分子吸收滤波器的吸收谱线和激光器的单稳频性能指标,现场测试的方法不仅极大地耗费人力、物力与时间成本,而且也限制了雷达系统的应用。

1 分子吸收滤波器吸收谱线的选择

分子的量子结构决定了其对光的某些特定谱段具有吸收作用,其吸收可以认为是由“超精细作用”和“多普勒效应”共同作用构成的^[6]。多普勒效应主要确定吸收谱线的线型函数,超精细作用则主要对线型函数的斜率产生影响。以碘分子吸收滤波器为研究对象,其长度与吸收的能量之间由 FORKEY 给出的模型

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

E-mail: mayong@hust.edu.cn

收稿日期: 2006-08-14;收到修改稿日期: 2006-09-01

描述^[7]: $\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = \exp[-\Gamma_i g_i(\nu) l]$ (1)

式中, Γ 为吸收系数; $g_i(\nu)$ 为归一化线性函数; l 为吸收池长度; ν 为工作频率; $I_0(\nu)$ 和 $I(\nu)$ 分别是工作频率 ν 下的入射光和出射光的强度。

碘分子存在 3 个能级: 束缚态 $X(^1\Sigma_g^+)$, $B(^3\Pi_{0-u})$ 和非束缚态 $^1\Pi_u$ 。主要的吸收谱线是在发生 $X \rightarrow B$ 的电子能级跃迁时产生, 而 $X \rightarrow ^1\Pi_u$ 的电子能级跃迁则主要产生了背景吸收谱线。由量子物理知识通过对碘分子的 3 个能级状态进行分析可以得出^[8]:

$$\Gamma_i = \frac{8\pi^3}{3hc} \nu_i \frac{g'}{g''} \frac{s_{J'J''}}{2J'+1} \frac{N_{\nu''J''}}{g_{NS}} \times \mu_e(\bar{R})^2 \langle \nu''(J'') | \nu'(J') \rangle^2$$
 (2)

式中, h 为普朗克常数; c 为光速; ν_i 为传输中心频率, 由电子能级跃迁分析得出; $\left[\frac{g'}{g''} \right]$ 为高低能级之间跃迁比率; $s_{J'J''}$ 为 Honi-London 转动线强度系数; $N_{\nu''J''}$ 为 X 状态拥有 ν'' , J'' 光子数时的初始分子密度; g_{NS} 为分子回旋衰落; $|\mu_e(\bar{R})|^2$ 为平均电传输强度为波长的函数; $|\langle \nu''(J'') | \nu'(J') \rangle|^2$ 为 Franck-Condon 因数, GERSTENKORN 和 PLUC 1986 年详细地给出了该因数。

吸收特性曲线的归一化线性函数主要需要考虑 3 个物理作用对线型函数的影响: 自然寿命展宽作用; 压力展宽作用; 热力展宽作用。同时考虑 3 种作用, 利用高斯形函数来描述该归一化线性函数:

$$g_i(\nu) = \frac{2}{\Delta\nu_i} \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_i}{\Delta\nu_i}\right)^2\right]$$
 (3)

式中, $\Delta\nu_i$ 由下式确定: $\Delta\nu_i = \nu_i \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{m}}$ (4)

式中, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, m 为分子量。对碘分子吸收滤波器吸收特性曲线模型进行仿真, 仿真工作参数为: 工作温度是 80℃; 工作大气压是 70.931 kPa; 吸收滤波器长度是 25.28 cm; 工作波长范围是 470 nm ~ 550 nm。碘分子吸收滤波器的吸收特性曲线族仿真结果如图 1 所示。

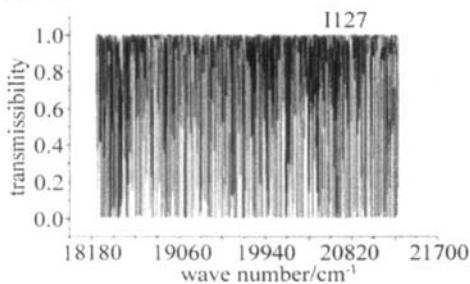


Fig 1 Absorption spectrum of molecule iodine absorption filter ranges from 470nm ~ 550nm

FORKEY 等人采用 Fabry-Perrot 干涉仪对碘 127

分子吸收滤波器 531 nm ~ 533 nm 区域范围内吸收谱线的进行了实际测量^[7]。将 FORKEY 等人实际测量的碘分子吸收谱线数据与仿真模型中相应光谱区间的的数据相比较, 可得出整个仿真模型的误差: 对于单吸收峰, 其位置误差小于 $\pm 0.011 \text{ cm}^{-1}$ (波数单位); 相邻吸收峰之间的距离误差小于 $\pm 0.04 \text{ cm}^{-1}$; 单吸收峰的线宽误差小于 $\pm 0.0055 \text{ cm}^{-1}$, 相对误差在 $\pm 6\%$ 以内; 单吸收峰最大边缘斜率值的误差在 $\pm 6\%$ 以内; 光学深度误差在 10% 以内。由此可知, 仿真模型的数据误差较小, 在可以接受的范围。

2 激光器中心频率的选择

在吸收谱线仿真的基础上, 将选择双吸收峰窗口的条件改为数学描述, 设计搜索程序, 得出最佳的双吸收峰窗口。碘分子吸收滤波器吸收峰窗口的选择应遵循的要求为: 吸收滤波器双吸收峰窗口之间的距离应为两倍的布里渊散射频移量; 吸收峰之间的距离应尽量大, 以减小瑞利散射分量的影响; 两吸收峰之外的空间内, 应尽量使之不存在其它吸收峰, 以减小干扰; 吸收峰应尽量对称; 吸收峰的边缘应尽量陡峭。

大气信道中, 布里渊散射频移量的范围一般为 1 GHz ~ 1.3 GHz, 谱线宽度为 500 MHz 左右^[9,10], 两个吸收峰间距应该选择在 2 GHz 到 2.6 GHz 范围内。搜索到以下两个最佳工作点, 见图 2 图 3。

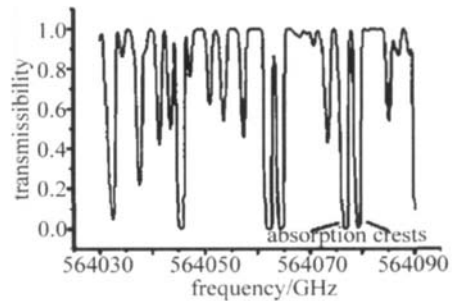


Fig 2 Double absorption crests symmetrically at 531.8412nm

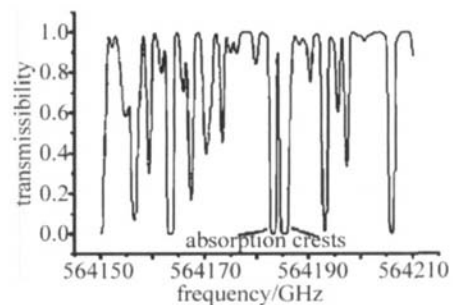


Fig 3 Double absorption crests symmetrically at 531.7413nm

图 2 对应的激光输出中心频率为 $5.6407812 \times 10^5 \text{ GHz}$ (其波长为 531.8412 nm), 双吸收峰之间的距离为 2.4 GHz 左右, 左侧吸收峰的线宽为 1.6 GHz 左右, 右侧吸收峰的线宽为 1.5 GHz 左右。图 3 对应的

激光输出中心频率为 5.6418411×10^5 GHz(其波长为 531.7413nm),双吸收峰之间的距离为 2.2GHz左右,左侧吸收峰的线宽为 1.5GHz左右,右侧吸收峰的线宽为 1.8GHz左右。

在海水中,布里渊散射频移量的范围一般为 7GHz~8GHz,谱线宽度为 500MHz左右^[3],双吸收峰间距应选择在 14GHz~16GHz 范围内。搜索到以下两个最佳工作点,见图 4、图 5。

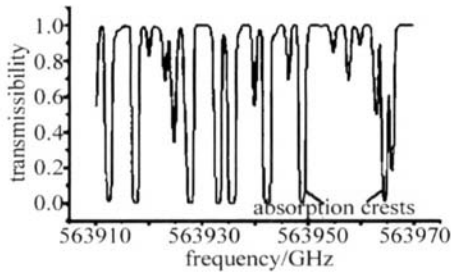


Fig 4 Double absorption crests symmetrically at 531.9578nm

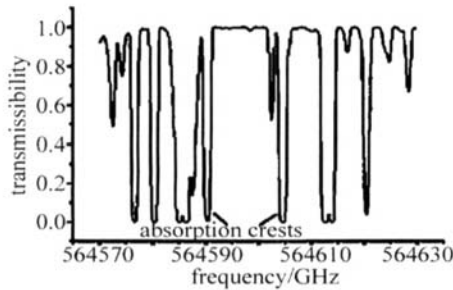


Fig 5 Double absorption crests symmetrically at 531.3526nm

图 4 对应的激光输出中心频率为 5.6395665×10^5 GHz(其波长为 531.9578nm),双吸收峰之间的距离为 15GHz左右,左侧吸收峰的线宽为 1.5GHz左右,右侧吸收峰的线宽为 1.4GHz左右。图 5 对应的激光输出中心频率为 5.6459679×10^5 GHz(其波长为 531.3526nm),双吸收峰之间的距离为 15.2GHz左右,左侧吸收峰的线宽为 1.4GHz左右,右侧吸收峰的线宽为 1.6GHz左右。

3 稳频指标分析

布里渊散射光谱和碘分子吸收滤波器的吸收光谱是对称的,激光中心频率发生漂移时,2个光谱一侧重叠面积的减小(或增加)必定伴随另一侧重叠面积等量的增加(或减小),从而保持透过的总光强不变(如图 6所示),通常选择将两个布里渊散射峰的位置分别定位在碘分子吸收滤波器吸收谱线的侧翼上。

边缘探测技术对激光中心频率漂移抑制作用,是与碘分子吸收滤波器吸收谱线的线宽,以及布里渊散射峰的线宽有关,即要求碘分子吸收滤波器吸收谱线的线宽必须大于布里渊散射峰的线宽。依据仿真结果可知,所选碘分子吸收滤波器吸收谱线的线宽为

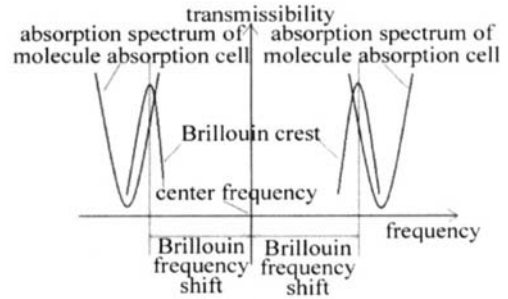


Fig 6 Schematic of double-brim detecting

1.4GHz~1.8GHz左右,而布里渊散射峰的线宽只有 500MHz左右,这样抑制激光中心频率漂移的能力就由布里渊散射峰的线宽来决定。当激光的中心频率向右侧移动 1/2个布里渊散射峰线宽,即 250MHz的时候,左侧的布里渊散射峰就相应的移出了碘分子吸收滤波器吸收谱线的侧翼(见图 7)。这时激光的中心频

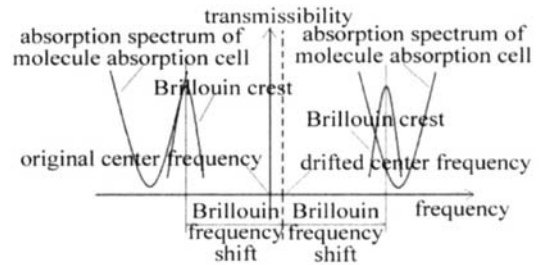


Fig 7 Schematic of double-brim detecting when the laser central frequency drift to right

率再向右侧漂移一点,就不能保持透过的总光强不变了。反之,当激光的中心频率向左侧移动 1/2个布里渊散射峰线宽,即 250MHz的时候,右侧的布里渊散射峰也相应的移出了碘分子吸收滤波器吸收谱线的侧翼(如图 8所示)。这时激光的中心频率再向左侧漂

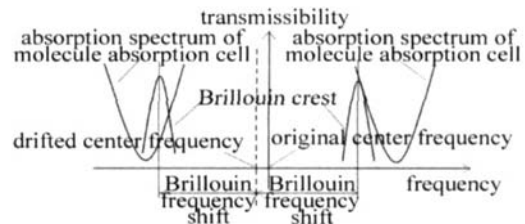


Fig 8 Schematic of double-brim detecting when the laser central frequency drift to left

一点,就不能保持透过的总光强不变了。由上述两种情况可知,在基于边缘探测技术的激光雷达系统中允许激光器的发射中心频率漂移的最大值为 250MHz,即要求激光器的稳频性能指标是小于 250MHz。由于上述讨论并没有涉及不同介质中具体的布里渊散射频移量数值,因此,上述情况对于大气信道和海水信道都是适用的。

4 单频指标分析

由边缘探测技术原理可知,布里渊散射频移量和

激光器中心频率之间的关系可以下式表示:

$$\nu_B = \frac{d_m}{2} + d_s + \frac{d_b}{2} + \Delta d \quad (5)$$

式中, ν_B 为介质中的布里渊散射频移量; d_m 为激光器单频指标, 即满足探测的激光器输出最大线宽; d_s 为激光器稳频指标, 即满足探测要求允许激光中心频率漂移的最大值; d_b 为布里渊散射峰的线宽; Δd 为由仿真结果得到的激光中心频率的位置误差。对 (5) 式进行变换, 可以得到满足探测需要的激光器输出线宽的为:

$$d_m = \nu_B - d_s - \frac{d_b}{2} - \Delta d \times 2 \quad (6)$$

大气信道中, 实际求满足探测要求的激光器输出线宽过程中应该取 1GHz~1.3GHz 中的最小值。同时, 激光器的发射中心频率漂移的最大值 $d_s = 250\text{MHz}$ 。确定激光器的输出中心频率的时候是根据碘分子吸收滤波器两个吸收峰窗口的中间频率来确定的。由碘分子吸收滤波器吸收谱仿真模型的误差可知: 对于单吸收峰, 其位置误差小于 $\pm 0.011\text{cm}^{-1}$ ($\pm 0.33\text{GHz}$)。因此, 由仿真结果得到的激光中心频率的位置误差 Δd 在 $\pm 330\text{MHz}$ 以内。由 (6) 式计算得到: $d_m = (1\text{GHz} - 250\text{MHz} - 500\text{MHz}/2 - 330\text{MHz}) \times 2 = 170\text{MHz} \times 2 = 340\text{MHz}$ 。即在大气信道中, 要求激光器的单频性能指标是小于 340MHz (见图 9)。

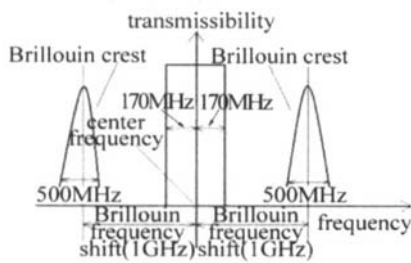


Fig 9 Laser's line width in atmospheric channel

对于海水信道中, 实际在求满足大气信道探测要求的激光器输出线宽过程中应该取 7GHz~8GHz 中的最小值。此时, 允许激光器的发射中心频率漂移的最大值 d_s 也为 250MHz。由碘分子吸收滤波器吸收谱线

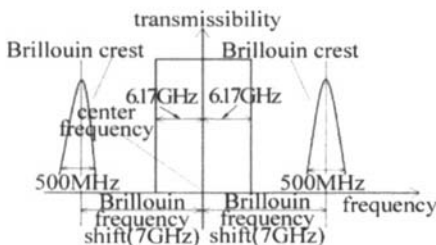


Fig 10 Laser's line width in oceanic channel

仿真模型的误差可得到, 激光中心频率的位置误差也在 $\pm 330\text{MHz}$ 以内。由 (6) 式计算得到: $d_m = (7\text{GHz} - 250\text{MHz} - 500\text{MHz}/2 - 330\text{MHz}) \times 2 = 6.17\text{GHz} \times 2 = 12.34\text{GHz}$ 。即在海水信道中, 要求激光器的单频性能指标是小于 12.34GHz (如图 10 所示)。

5 结论

通过对碘分子吸收滤波器在 470nm~550nm 区间的吸收光谱进行仿真计算, 搜索得到最佳的吸收谱线, 计算出满足测量要求的激光器输出中心频率, 给出了激光器的合理选择方案。同时, 以基于边缘探测技术的激光雷达在大气信道和海水信道中的具体应用为例, 在大气探测中, 要求激光器输出单频性能指标要小于 340MHz, 稳频性能指标要小于 250MHz; 在海水探测中, 要求激光器输出单频性能指标要小于 12.34GHz, 稳频性能指标要小于 250MHz。

参考文献

- [1] HICKMAN C D, KATTAWAR G W, FRY E S Aircraft laser sensing of sound velocity in water: Brillouin scattering [J]. Remote Sensing of Environment, 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] LU D H, KATZ J W. Edge technique for the measurements of Brillouin scattering in water [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(4): 307~311 (in Chinese).
- [4] LU Zh Sh, SONG X Q, LU J T. Speed measuring system of non-coherent pulse Doppler lidar [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(24): 2080~2085 (in Chinese).
- [5] LI J, BAIX D, SHEN N Ch. The parameters optimization of Doppler-broadened iodine at 532nm Nd:YVO₄ laser frequency stabilization [J]. Laser Technology, 2003, 27(1): 50~52 (in Chinese).
- [6] FLESA C, LKORB C. Theory of the double edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Appl Opt, 1999, 38(3): 432~440.
- [7] FORKEY J N, LEMPETW R, MILES R B. Corrected and calibrated I₂ absorption model at frequency-doubled Nd:YAG laser wavelengths [J]. Appl Opt, 1997, 36(27): 6729~6738.
- [8] BREWER L, TELLENGHUSEN J. Quantum yield for unimolecular dissociation of I₂ in visible absorption [J]. Chem Phys, 1972, 56(8): 3929~3928.
- [9] WANG L L, REN G, ZHANG Y. Study of Brillouin scattering in atmosphere [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 365~367 (in Chinese).
- [10] HUANG Zh H, REN G, CAIB W. Calculation of detecting spatial object based on Brillouin scattering [J]. Laser Technology, 2004, 27(4): 518~520 (in Chinese).