

文章编号: 1001-3806(2008)04-0353-04

半导体激光器参量估计的改进算法

闫艳霞¹, 禹延光^{2*}

(1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 郑州 450002; 2. 郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052)

摘要: 为了精确估计带外腔半导体激光器的线宽展宽因数, 采用了光反馈自混合技术和梯度最优算法, 可以达到数据理论的最佳拟合, 同时提出了改进的梯度迭代公式, 并在参量迭代时引入可变步长, 取得了仿真和实验数据。该算法不仅测量精度较高, 而且抗噪声性能较好。仿真结果表明, 当信噪比大于 20dB 时, 线宽展宽因数的相对标准差小于 2.53%。实验数据处理结果表明, 线宽展宽因数的相对标准差小于 5.1%, 对半导体激光器的应用是有帮助的。

关键词: 激光器; 线宽展宽因数; 光反馈自混合干涉; 梯度最优算法

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

An improved algorithm for estimating parameters of semiconductor lasers

YAN Yanxia¹, YU Yanguang²

(1. Electronics and Informatics School Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Information Engineering Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract For the sake of accurately estimating linewidth enhancement factor of semiconductor lasers with external cavity, optical feedback self mixing interferometric technology and gradient based optimization algorithm were introduced to achieve best data theoretical fitting. In addition, an iterate formula was improved with alterable steps introduced. Simulation and experiment data were obtained. The accuracy of algorithm was higher and antinoise capability was better. The simulation result showed that the relative standard deviation of linewidth enhancement factor was less than 2.53% when signal to noise ratio was 20dB. Experiment data result showed that the relative standard deviation of linewidth enhancement factor was less than 5.1%.

Key words lasers; linewidth enhancement factor; optical feedback self mixing interferometry; gradient based optimization algorithm

引 言

光反馈自混合效应 (optical feedback self mixing effect OFSME) 指当激光照射到物体上时, 部分光被反射回激光器内腔与原腔内光混合, 改变出射光性能的效应。LAMB 等人对 OFSME 进行开创性研究^[1], 此后各国学者纷纷研究, 创建了著名的数学模型^[2], 涉及一个参量——线宽展宽因数 α 。 α 决定激光器多方面的性能, 如线宽的展宽、频率啁啾、注入锁定范围等。 α 的测量已有多种方法, 如增益和波长转换测量^[3], 频率幅度调制测量^[4,6], 线宽、线型测量^[7] 及注入锁定测量^[8] 等, 这些方法实验装置复杂, 需测量的参量多, 精度不高。2004 年 YU 提出基于适度光反馈自混合效应测量 α 的方法^[9], 通过测自混合信号波形尺寸估计

α 方法简单, 但易受噪声影响。2005 年 XI 提出了梯度最优算法^[10] 测量 α , 也是基于适度光反馈自混合效应, 运用数据拟合理论提高了参量测量的抗噪性, 但公式推导时, 忽略了隐函数的概念, 梯度求解误差较大, 且参量迭代时步长固定, 从而测量精度不高。作者对文献 [10] 中的算法进行改进, 提高了参量测量精度和抗噪性, 尤其提高了 $\alpha < 1$ 时的测量精度和抗噪性。

1 基本理论

弱光和适度光反馈自混合效应可用以下方程描述^[11]:

$$\phi_f(\tau) = \phi_0(\tau) - C \sin[\phi_f(\tau) + \arctan \alpha] \quad (1)$$

$$P[\phi_f(\tau)] = P_0 \{1 + mG[\phi_f(\tau)]\} \quad (2)$$

$$G[\phi_f(\tau)] = \cos[\phi_f(\tau)] \quad (3)$$

式中, $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau$; $\phi_f(\tau) = \omega_f \tau$; ω_f 和 ω_0 为有无反馈时激光角频率, $\tau = 2L/c$ L 为外腔长度, c 为光速, $\alpha = \frac{\partial n_r / \partial N}{\partial n_i / \partial N}$ 为线宽展宽因数, N , n_r , n_i 分别为激光器介质的载流子浓度、复折射率实部和虚部, $C = \epsilon \cdot L \cdot$

基金项目: 澳中国际合作项目基金资助项目 (LX0561454)

作者简介: 闫艳霞 (1980-), 女, 助教, 硕士研究生, 从事现代测试技术及传感应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yuyanguang@hotmail.com

收稿日期: 2007-04-12; 收到修改稿日期: 2007-08-20

$\sqrt{1+\alpha^2} \cdot \sqrt{R_{ext}} \cdot (1-R_2) / (l \cdot n \cdot \sqrt{R_2})$ 为光反馈水平因子, R_2 为激光器输出面的反射率, R_{ext} 为外部物体的反射率, l 为激光器谐振腔的长度, n 为激光器介质折射率, ϵ 为出射光和反馈光模式间的空间耦合系数, 典型值 $0.1 \sim 0.8$, $P[\phi_i(\tau)]$ 和 P_0 为有无外腔时激光器的辐射功率, $G[\phi_i(\tau)]$ 是干涉函数。

在 OFSME 实验中可观测到不同 τ 时的辐射功率 $P[\phi_i(\tau)]$ 。作者根据 $P[\phi_i(\tau)]$ 估计 C 和 α 。由 (2) 式可得 $G[\phi_i(\tau)] = \{P[\phi_i(\tau)] - P_0\} / (mP_0)$, m 是调制系数, m 是调制系数, 典型值 $m = 10^{-3}$, 因此用 $G[\phi_i(\tau)]$ 就可得到 α 和 C 。由 (1) 式和 (2) 式引入表达式: $G(\tau, \alpha, C) = \cos[\omega_0\tau - C \sin(\omega_0\tau + \arctan\alpha)]$ 。

2 参量估计算法

算法的基本思想是找到 C 和 α , 使 (1) 式和 (3) 式最佳拟合数据样本。为达到最佳拟合, 定义目标函数为 $F(\hat{\alpha}, \hat{C}) = \sum_{i=1}^N \{G(\tau_i) - \hat{G}(\tau_i, \hat{\alpha}, \hat{C})\}^2$, 其中, $\hat{G}(\tau_i, \hat{\alpha}, \hat{C})$ 由 (1) 式和 (3) 式及估计值 $\hat{\alpha}$ 和 \hat{C} 计算所得; $G(\tau_i)$ 是观测数据; 当目标函数最小时, $\hat{\alpha}$ 和 \hat{C} 是最优的。

2.1 建立观测数据

设外部物体做简谐振动, $L = L_0 + \Delta L \cos(2\pi ft)$, L_0 为激光辐射面和外部物体间的初始距离, ΔL 为振幅, f 为振动频率, t 为时间变量, λ 为波长, 则:

$$\phi_0(t_i) = 4\pi L_i / \lambda_0 = 4\pi [L_0 + \Delta L \cos(2\pi ft)] / \lambda_0 = \phi_0 + 4\pi \Delta L \cos(2\pi ft) / \lambda_0 \quad (4)$$

$\phi_0 = 4\pi L_0 / \lambda_0$, 为等效外腔初始相位, 通常也是未知的。由 (1) 式可得 $\phi_f(\tau_i)$, 但 (1) 式中的 $\phi_f(\tau_i)$ 无解析解, 需用以下迭代方程求解:

$$f_j(\tau_i) = \phi_0(\tau_i) - \hat{C} \sin[f_{j-1}(\tau_i) + \arctan\alpha] \quad (5)$$

选初始值 $f_0(\tau_i) = \phi_0(\tau_i) = \omega_0\tau_i$, 利用 (5) 式迭代 $f_j(\tau_i)$, 直到 $|f_j(\tau_i) - f_{j-1}(\tau_i)| < \delta$, δ 是小正数, 则 $\phi_f(\tau_i) = f_\infty(\tau_i)$, $f_\infty(\tau_i)$ 是稳态值。由 (3) 式得 $G[\phi_f(\tau_i)]$, 即 $G(\tau_i)$ 作仿真用的观测数据。

2.2 算法分析

作者利用梯度最优算法解决最优问题, 主要思想是朝着目标函数降低 (负梯度) 的方向更新 $\hat{\alpha}, \hat{C}$ 及 $\hat{\phi}_0$, 即:

$$\hat{C}_j = \hat{C}_{j-1} - \mu_c \frac{\partial F}{\partial C} \Big|_{\hat{C}=\hat{C}_{j-1}} \quad (6)$$

$$\hat{\alpha}_j = \hat{\alpha}_{j-1} - \mu_\alpha \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Big|_{\hat{\alpha}=\hat{\alpha}_{j-1}} \quad (7)$$

$$\hat{\phi}_0 = \hat{\phi}_{0(j-1)} - \mu_{\phi_0} \frac{\partial F}{\partial \phi_0} \Big|_{\hat{\phi}_0=\hat{\phi}_{0(j-1)}} \quad (8)$$

$\mu_c, \mu_\alpha, \mu_{\phi_0}$ 为步长, j 为迭代次数。 $F(\hat{\phi}_0, \hat{\alpha}, \hat{C})$ 对 $\hat{\alpha}, \hat{C}$ 和 $\hat{\phi}_0$ 的梯度如下:

$$\frac{\partial F}{\partial \hat{C}} = -2 \sum_{i=1}^N \{G(\tau_i) - \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]\} \times \frac{\partial \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]}{\partial \hat{C}} = -2 \sum_{i=1}^N \{G(\tau_i) - \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]\} \times \sin\{\phi_0[\tau_i(\hat{\phi}_0)] - \hat{C} \sin\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\} \times \sin\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\} \times \frac{1}{1 + \hat{C} \cos\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \hat{\alpha}} = -2 \sum_{i=1}^N \{G(\tau_i) - \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]\} \times \frac{\partial \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]}{\partial \hat{\alpha}} = -2 \sum_{i=1}^N \{G(\tau_i) - \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]\} \times \sin\{\phi_0[\tau_i(\hat{\phi}_0)] - \hat{C} \sin\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\} \times \cos\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\} \times \frac{1}{1 + \hat{C} \cos\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\}} \times \frac{1}{1 + \hat{\alpha}^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \hat{\phi}_0} = -2 \sum_{i=1}^N \{G(\tau_i) - \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]\} \times \frac{\partial \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]}{\partial \hat{\phi}_0} = 2 \sum_{i=1}^N \{G(\tau_i) - \hat{G}[\tau_i(\hat{\phi}_0), \hat{\alpha}, \hat{C}]\} \times \sin\{\phi_0[\tau_i(\hat{\phi}_0)] - \hat{C} \sin\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\} \times \frac{1}{1 + \hat{C} \cos\{\phi_f[\tau_i(\hat{\phi}_0)] + \arctan\hat{\alpha}\}} \quad (11)$$

2.3 步长分析与选择

由 (9) 式 ~ (11) 式可知, 参量估计精度不仅依赖梯度的精确计算, 而且依赖步长的选择, 若步长太大, 误差就较大; 反之, 更新速度太慢。作者根据被测参量的取值特点采用可变步长进行更新。被测参量取值范围: $0 < \alpha < \pi$ 目前文献中报道的取值都在此范围内; $0 < C < 1$, 作者的算法建立在弱光反馈水平条件下; $0 \leq \phi_0 \leq 2\pi$ 是 ϕ_0 的等效区间, 因 $G[\phi_f(\tau)]$ 是 ϕ_0 的周期函数, 周期为 2π 。可见 C 的范围较小, α 和 ϕ_0 的范围较大。因此作者对 α 和 ϕ_0 更新时采用可变步长。由目标函数可得, 估计精度由观测数据和估计数据间的误差控制, 不难想到, 迭代步长也可由该误差控制, 当误差较大时, 选较大步长; 反之选较小步长。步长变化如下: (1) 计算 $\hat{G}[\tau_i(\alpha_{j-1}, C_{j-1}, \phi_{0(j-1)})]$; (2) 计算误差 $\Delta G(\tau_i) = G(\tau_i) - \hat{G}[\tau_i(\alpha_{j-1}, C_{j-1}, \phi_{0(j-1)})]$; (3) 计算误差 $\Delta G(\tau_i)$ 的各项绝对值的和 $\sum |\Delta G(\tau_i)|$, 并求其均值, 记为 $\Delta G'$; (4) 选择合适的比例系数 k_α 和 k_{ϕ_0} , 步长为 $\mu_\alpha = k_\alpha \cdot \Delta G'$ 和 $\mu_{\phi_0} = k_{\phi_0} \cdot \Delta G'$ 。

算法流程如下: (1)设置 C, α, φ_0 的初值; (2)从初值 $f_0(\tau_i) = \omega_0 \tau_i$ 开始, 利用 (7) 式更新 $\phi_f(\tau_i)$, 直达到稳态值; (3)利用 (9) 式、(10) 式和 (11) 式计算梯度; (4)利用 (6) 式、(7) 式和 (8) 式更新 C, α 和 φ_0 ; (5)停止或返回第 (2) 步。

3 性能仿真

为验证算法性能, 做了大量仿真。首先建立观测数据, 令 $f = 20\text{Hz}$, $\Delta L/\lambda_0 = 3.3$ 则 $\phi_0(\tau_i) = 4\pi L_i/\lambda_0 = \varphi_0 + 41.45\cos(60\pi t_i)$ 。设 C, α 和 φ_0 已知, 对一个 t 周期 $[0, 1/30]$, 用算法流程中的第 (2) 步计算 $\phi_f(\tau_i)$, 由 (3) 式得数据样本 $G(\tau_i)$ 。

仿真时 C 采用定步长, $k_c = 0.001$; α 和 φ_0 采用可变步长, 系数 $k_\alpha = 0.004, k_{\varphi_0} = 0.006$ 迭代次数为 500 次。为评估算法的有效性和一致性, 对 C, α 和 φ_0 的任一组值, 利用数据样本做 15 次仿真, 每次仿真都加白噪声。用 15 次仿真 $\hat{\alpha}, \hat{C}$ 和 $\hat{\varphi}_0$ 的均值作最终结果, 即: $\hat{\alpha} = \left(\sum_{i=1}^{15} \hat{\alpha}_i \right) / 15, \hat{C} = \left(\sum_{i=1}^{15} \hat{C}_i \right) / 15, \hat{\varphi}_0 = \left(\sum_{i=1}^{15} \hat{\varphi}_{0i} \right) / 15$ 。将 $\hat{\alpha}, \hat{C}$ 和 $\hat{\varphi}_0$ 的标准差记为 δ_α, δ_C 和 δ_{φ_0} , 用 $\delta_\alpha/\hat{\alpha}, \delta_C/\hat{C}$ 和 $\delta_{\varphi_0}/\hat{\varphi}_0$ 描述一致性。

3.1 真实值对算法特性的影响

选初值 $C_0 = 0.5, \alpha_0 = 5, \varphi_{00} = \pi$, 信噪比为 20dB, 固定初值, 改变真值的仿真结果见表 1。可见算法可

Table 1 The results for fixed initial values and alternative true values

α	C	φ_0	$\hat{\alpha}$	$\delta_\alpha/\hat{\alpha}$	\hat{C}	δ_C/\hat{C}	$\hat{\varphi}_0$	$\delta_{\varphi_0}/\hat{\varphi}_0$
0.05	0.9	0.6283	0.0512	2.50%	0.9010	0.80%	0.6267	0.84%
0.3	0.9	2.5133	0.3006	1.97%	0.9006	0.34%	2.5125	0.87%
0.5	0.6	2.5133	0.4956	2.68%	0.6004	0.98%	2.5140	0.95%
0.8	0.4	5.0265	0.7948	1.80%	0.3997	1.02%	5.0264	0.88%
2.0	0.4	3.7699	2.0153	2.08%	0.4047	1.04%	3.7799	0.88%
4.0	0.9	5.0265	4.0412	1.89%	0.9006	0.86%	5.0250	0.89%
8.0	0.7	5.6549	7.9983	1.74%	0.6989	0.99%	5.6544	0.96%

估计参量的任意可能值, 且精度较高, α 的相对标准差小于 2.5%, C 的相对标准差小于 1.04%。与参考文献 [10] 相比, 本文中的 α 估计精度有明显的提高, α 的平均相对标准差提高了 1.9%, 尤其 $\alpha < 1$ 时, 能够较精确地进行参量估计, 这非常有意义, 因为目前已报道的文献中, 当 $\alpha < 1$ 时几乎不能精确估计参量。

3.2 初始值对算法特性的影响

参量真值不变, $C = 0.6, \alpha = 4, \varphi_0 = \pi/10$, 信噪比为 20dB, 改变初值的仿真结果见表 2。可见参量估计结果几乎不受初值的影响。

Table 2 The results for fixed true values and alternative initial values

α_0	C_0	φ_{00}	$\hat{\alpha}$	$\delta_\alpha/\hat{\alpha}$	\hat{C}	δ_C/\hat{C}	$\hat{\varphi}_0$	$\delta_{\varphi_0}/\hat{\varphi}_0$
0.5	0.2	1.2566	3.9848	1.75%	0.5982	0.75%	0.3144	0.83%
4.1	0.5	2.5133	3.9586	2.16%	0.5989	0.99%	0.3149	0.79%
1.2	0.8	0.6283	4.0090	2.08%	0.6013	0.98%	0.3139	0.93%
7.2	0.6	3.1415	3.9797	1.81%	0.6002	1.08%	0.3153	0.96%

3.3 噪声对算法特性的影响

真值 $C = 0.8, \alpha = 4, \varphi_0 = \pi/10$, 初值 $C_0 = 0.7, \alpha_0 = 5, \varphi_{00} = 2\pi/5$ 不变, 加不同量噪声的仿真结果见表 3。可见当信噪比大于 10dB 时, 结果仍令人满意, 与参考文献 [10] 相比, 本文中的算法抗噪性更好。

Table 3 The effect of the noise for parameter estimating results

signal to noise ratio/dB	$\hat{\alpha}$	$\delta_\alpha/\hat{\alpha}$	\hat{C}	δ_C/\hat{C}	$\hat{\varphi}_0$	$\delta_{\varphi_0}/\hat{\varphi}_0$
40	4.0041	0.16%	0.8003	0.11%	0.3141	0.10%
30	3.9982	0.67%	0.8006	0.20%	0.3142	0.35%
20	4.0014	1.62%	0.8009	0.58%	0.3138	0.83%
10	3.8949	5.31%	0.8030	2.69%	0.3199	3.01%
5	3.9325	8.76%	0.8011	4.65%	0.3140	4.92%

4 实验验证

实验装置见图 1。温度控制在 25°C; 半导体激光

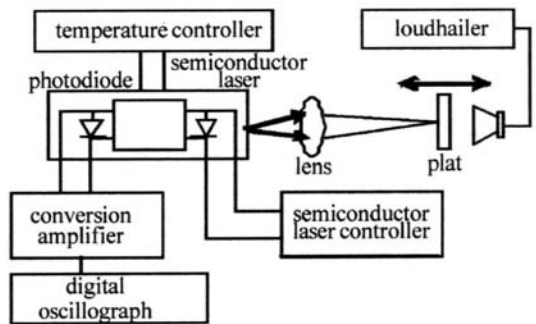


Fig 1 Experiment setup

管型号为 HL7851, 处于直流偏置状态, 偏置电流为 80mA; 透镜将激光聚焦在金属板上, 金属板放在由正弦信号 ($f = 195\text{Hz}$) 驱动的扬声器上; 自混合信号由光电二极管检测, 经转换放大后, 由示波器显示。自混合信号见图 2。

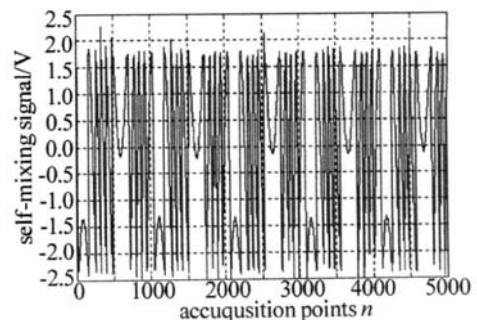


Fig 2 Self-mixing signal

经测量实验过程中,信噪比大约为 15dB,通过改变外部物体的初始位置可改变光反馈水平,从而改变激光器的输出功率。将实验所得自混合信号依本文中的算法处理,结果见表 4。可见当自混合信号的峰峰值不同时, C 不同。但同一台激光器,其 α 是相同的。

Table 4 The result of processing experiment data

self mixing signal peak value	1. 7V	1. 8V	1. 9V
$\hat{\alpha}$	3. 4290	3. 4338	3. 4371
$\delta_{\hat{\alpha}}/\hat{\alpha}$	5. 1%	4. 6%	4. 9%
\hat{C}	0. 5280	0. 5422	0. 5651
$\delta_{\hat{C}}/\hat{C}$	3. 4%	3. 9%	2. 9%

5 结 论

提出了估计线宽展宽因数的改进算法,改进算法提高了参量估计的精度和抗噪性能,但仍有一定的局限性,要求外部物体做理想的简谐振动,因此需进一步改进,以便当外部物体做各种周期运动时,都能进行参量估计。

参 考 文 献

[1] SPENCER M B, IAMBW E. Laser with a transmitting window [J]. Phys Rev, 1972, 27(2): 884-897.
 [2] DONATI S, GULIANIG, MERLO S. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. IEEE JQ E, 1995, 31(1): 113-119.

[3] HENRY C H. Theory of the linewidth of semiconductor laser [J]. IEEE JQ E, 1982, 18(2): 259-264.
 [4] SMPSON T B, DOFT F, STRZELECKA E. Gain saturation and the linewidth enhancement factor in semiconductor lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 776-778.
 [5] HARDER C, VAHALA K, YARIV A. Measurement of linewidth enhancement factor of semiconductor lasers [J]. A P L, 1983, 42(2): 328-330.
 [6] ARKAWA Y, YARIV A. Energy dependence of linewidth enhancement factor of GaAs buried heterostructures [J]. A P L, 1985, 47(11): 905-907.
 [7] SHTERENGAS L, BELENKY G I, GOUREVITCH A. Measurements of a factor in $2\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ type I In(A)GaAs Sb/GaSb high power diode lasers [J]. A P L, 2002, 81(24): 4517-4519.
 [8] LU G, JIN X, CHUANG S L. Measurement of linewidth enhancement factor of semiconductor lasers using an injection locking technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(5): 430-432.
 [9] YU Y G, GU DO G, SILVANO D. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self mixing effect [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 990-992.
 [10] XI J T, YU Y G, CHENCHARO J F. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self mixing interferometry [J]. IEEE JQ E, 2005, 41(8): 1058-1064.
 [11] YU Y G, GUO Ch J, YE H Y, et al. Pre-processing for the optical feedback self mixing interferometric signal [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 265-267 (in Chinese).

(上接第 339页)

Table 1 The optimum bandwidth of filter with different modulation frequencies

modulation frequency/GHz	0.6	1	2	3	4	5
bandwidth of filter/MHz	200	200	190	190	190	180

变窄的趋势,但所受影响不大。在其它探测环境下,可以采用同样的方法,求出当时环境下最适合的滤波器带宽大小。

3 结 论

关于频域滤波对海水后向散射的抑制作用,目前已有不少研究,证明了该方法的有效性,但是以往研究中对滤波带宽的取值存在一定的随意性,缺乏理论依据。作者利用海水后向散射模型和频域滤波的信号处理方法,通过仿真计算揭示了滤波带宽对载波调制脉冲激光雷达系统探测性能的影响。该计算方法能为系统选择合适的带宽取值,从而为系统的研制和完善提供了一些合理依据。

参 考 文 献

[1] CHEN W G, LIU Y M, HUANG T X, et al. The elimination of the backscatter envelope in laser underwater target detection system [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995, 23(4): 55-58 (in Chinese).

[2] MULLEN L J, CONTARNO V M, LAUX A, et al. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging [J]. Proc SPIE, 1999, 376E: 2-9.
 [3] LIY F, VERA JC. Rapidly tunable millimeter wave optical transmitter for lidar radar [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 2048-2054.
 [4] MULLEN L J, CONTARNO V M. Hybrid lidar radar seeing through the scatter [J]. IEEE Microwave Magazine, 2000, 1(3): 42-48.
 [5] CONTARNO V M, HERRCZFELD P R, MULLEN L J. Modulator lidar system: United States G01C 003/085822047 [P]. 1998-10-13.
 [6] ZHANG D W, LI G H. Principle of the determination system for 180° back scattering characteristic of the turbid media [J]. Laser Technology, 2003, 27(2): 110-112 (in Chinese).
 [7] XU Q Y, YANG K T, WANG X B, et al. Bluegreen lidar ocean survey [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002, 10 (in Chinese).
 [8] CHEN W G. The information processing in the airborne laser submarine detection experimental system [D]. Wuhan Graduate School of Huazhong University of Science and Technology, 1997, 37-68 (in Chinese).
 [9] ZHU X, WANG H, QIL J, et al. Frequency analyzing of backscattering signals in airborne laser bathymetry [J]. Laser & Infrared, 2003, 33(1): 25-27 (in Chinese).
 [10] LU Y M, DU Z F, HUANG T X, et al. Study on lidar receiver field of view [J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 46-50 (in Chinese).