

文章编号: 0258-7025(2007)06-0846-05

基于小波去噪和去卷积的半导体光放大器 增益系数谱测量方法

刘 磊, 张新亮, 黄德修

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了提高半导体光放大器(SOA)增益系数谱测量的准确性,减少光谱仪分辨率和系统噪声对测量结果的影响,提出了由传统的 Hakki-Paoli(HP)方法改进得到的基于小波去噪和去卷积过程的 Hakki-Paoli (HP-DD)方法,分析了其原理,并给出去卷积的算法和小波去噪的原理。在数值模拟中,对模拟的放大自发辐射(ASE)谱进行处理,表明 HP-DD 方法能较大程度地改善增益系数谱的测量准确度。在实验中,通过对半导体光放大器的放大自发辐射谱进行实际测量,分别用 HP-DD 方法和 HP 方法求得增益系数谱,验证了 HP-DD 方法的测量结果的精确度有很大程度的改善。

关键词 测量;半导体光放大器;Hakki-Paoli 方法;增益系数谱;小波去噪;反卷积

中图分类号 TN 303 文献标识码 A

Measurement Method for Semiconductor Optical Amplifier Gain Coefficient with Wavelet Denoise and Deconvolution

LIU Lei, ZHANG Xin-liang, HUANG De-xiu

(*Institute of Optoelectronic Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*)

Abstract For improving the measurement precision of the gain coefficient of semiconductor optical amplifier (SOA) and avoiding the influence of the optical spectrum analyzer's resolution and noise, a Hakki-Paoli (HP) method combined with the wavelet denoise and deconvolution (HP-DD) process was presented. The HP-DD principle including deconvolution algorithm and wavelet denoise was analyzed. Based on the simulated amplified spontaneous emission (ASE) spectrum and measured ASE spectrum, wavelet denoise and deconvolution process were demonstrated to improve the precision of the measurement and the noise tolerance.

Key words measurement; semiconductor optical amplifier; Hakki-Paoli method; gain coefficient spectrum; wavelet denoise; deconvolution

1 引 言

在全光信号处理中,半导体光放大器(SOA)是十分重要的器件^[1~5],它的性能参数中,小信号增益是一个十分重要的指标。通过半导体光放大器放大自发辐射(ASE)谱来测量增益系数谱是一种有效的

方法。利用放大自发辐射来测量增益谱主要有四种方法: Hakki-Paoli (HP) 方法^[6,7], Cassidy 方法^[8], 傅里叶变换方法(FTD)^[9,10]以及由傅里叶变换方法而来的去卷积过程的傅里叶变换方法^[11]。HP 方法通过测量放大自发辐射谱的调制深度来推测增益

收稿日期:2006-08-18;收到修改稿日期:2006-12-01

基金项目:国家 863 计划(2006AA03Z0414),国家自然科学基金(60407001)和教育部新世纪人才支持计划(NCET-04-0715)资助项目。

作者简介:刘 磊(1982—),男,湖北人,硕士研究生,主要从事基于半导体光放大器全光信号处理的研究。

E-mail: friendfriendok@sina.com

导师简介:张新亮(1971—),男,湖北人,教授,博士,主要从事高速光传输、全光信号处理关键技术及光电子/光子集成器件方面的研究。E-mail: xlzhang@hust.edu.cn (通信作者)

谱,对光谱的分辨率要求比较高,一般会低估实际的增益值,尤其在放大自发辐射谱纹波不是很大的情况下。Cassidy 方法在 HP 方法的基础上进行了修改,用一个纵模间隔内的积分平均值来代替最高值,从而计算调制深度。这种方法相对于 HP 方法有了一定的改进,降低了对分辨率的要求,提高了低电流下测量的准确性。傅里叶变换方法通过在频域和空间域上的两次变换,考虑发射谱的总体性质得到测量结果而不是在每个波长上进行考虑,这样更加快捷。但是傅里叶变换方法受光谱仪分辨率的影响仍然会低估实际值。Weihua Guo 等^[11]提出了通过在空间域上去卷积的傅里叶变换方法降低了对测量系统的分辨率的要求。本文提出了一种直接由 HP 方法改进得到的基于小波去噪和去卷积过程的 Hakki-Paoli(HP-DD)方法,在 HP 方法上加入去噪和去卷积的处理,通过直接对测量的光谱进行去卷积,降低了测量对光谱仪分辨率的要求,同时提高了测量系统的噪声容限。

2 原 理

增益系数谱与半导体光放大器本身的发射谱有很大的联系,通常可以利用放大自发辐射谱或自发发射(SPE)谱来测量增益谱。在文献[12~14]中提到由自发发射谱可以得到材料增益系数谱,进而可以得到增益系数谱。在文献[6]中首次提出可以由放大自发辐射谱的调制深度 t_i 测得净增益系数 g_{net} 的 HP 方法,这种方法主要基于

$$g_{\text{net}} = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{t_i^{1/2} - 1}{t_i^{1/2} + 1} \right) + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right), \quad (1)$$

式中 R 为半导体光放大器端面的总体反射率, L 为有源区长度。HP 方法对光谱测量准确度要求比较高,而实际测得的光谱会受到光谱仪分辨率和噪声的影响。通常,光谱仪的测量过程可以表示为^[15]

$$hr + n = f, \quad (2)$$

式中 h 为不同分辨率下光谱仪的响应函数, r 为真实的谱, n 为测量过程中的噪声, f 为光谱仪上观察到的测量结果。显然对应不同的分辨率响应函数会得到不同的测试结果。为方便说明去卷积算法,引入响应函数 h 的卷积矩阵 \mathbf{H} , (2) 式可表示为

$$\mathbf{H}r + n = f. \quad (3)$$

在文献[8,11]中指出可以通过去卷积的方法消除分辨率对测量结果的影响。本文用去卷积过程的傅里叶变换方法在傅里叶变换的长度域中进行去卷积处

理,直接对测量的光谱进行去卷积。在测量模型中 h 是低通函数,所以去卷积是一个病态问题,选用一个新算法^[15]来进行去卷积

$$r_{k+1} = P \cdot r_k, \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

式中 $r_0 = f$, P 为一种算子。 $r' = P \cdot r$ 等效于

$$r' = r + (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 1/\lambda \cdot I)^{-1} \mathbf{H}'(f - \mathbf{H}r), \quad (5)$$

式中 \mathbf{H}' 为 \mathbf{H} 的转置矩阵。这种算法使对低通函数的去卷积成为良态方程,同时由于在去卷积的过程中 h 是低通函数,即使很小的噪声也会给测量的结果带来很大的影响。如果在去卷积之前进行去噪,就可以减小噪声的影响。由于小波分析能够在多个频率尺度上对信号同时进行时频处理,因此选用 Haar5 小波函数进行去噪处理。经过光谱的去噪和去卷积处理之后,增益谱更加接近实际值。

3 模拟结果

由于半导体光放大器的器件结构与法布里-珀罗(F-P)腔半导体激光器的器件结构相似,半导体光放大器的放大自发辐射谱与法布里-珀罗腔半导体激光器的放大自发辐射谱类似,因此在数值模拟的过程中,一般用法布里-珀罗腔激光器的放大自发辐射方程来模拟理想的放大自发辐射谱。在理想情况下,法布里-珀罗腔激光器的放大自发辐射方程^[16]可表示为

$$I(\beta) = A \frac{(1-R)^2}{R} \frac{b}{1 + b^2 - 2b \cos(4\pi\beta NL)}, \quad (6)$$

式中 $b(\beta) = \exp[g(\beta)L]R$, A 为比例系数, NL 为半导体光放大器有源区折射率和腔长的乘积。模拟的放大自发辐射谱可以作为(3)式中实际的光谱 r 。为了更加接近实际测量过程,光谱响应函数应直接用实际光谱仪的响应函数,这可以通过对窄线宽分布反馈布拉格(DBF)激光器的光谱进行测量得到。在不同的光谱分辨率的情况下,将光谱仪测量得到的分布反馈布拉格激光器的光谱归一化后就得到了相应分辨率下的响应函数。

在光谱分辨率分别为 0.05 nm, 0.1 nm 和 0.5 nm 时,将 r 与光谱的响应函数卷积,同时为了考虑噪声对信号的影响,在卷积后的法布里-珀罗腔激光器的发射谱方程上叠加上高斯白噪声,这样就得到了(3)式中的 f , 用来模拟不同分辨率下测量得到的放大自发辐射谱。

对模拟的测量放大自发辐射谱用 HP-DD 方法

进行处理。首先对其进行小波去噪,选用 Haar5 小波对叠加有噪声的放大自发辐射谱进行 5 级分解。因为波长中心处和边缘处的小波系数中的噪声分量是不一样的,在去噪时将每一级的小波系数分成波长中心处和左右边缘处三段进行处理。每一段上选用软阈值法来进行阈值去噪,要注意的是虽然放大自发辐射的纹波在某种程度上也可以看成是噪声,但其分量主要在小波系数的高级次上占主导地位,所以去噪主要在小波系数的低级次上完成。

为了验证噪声对系统测量的影响,将模拟的理想放大自发辐射谱的 D1 级分量的均方根(RMS)值作为参考值,然后在放大自发辐射谱上叠加不同程度的噪声,噪声与参考值有不同的大小比例关系,再用 HP 方法求增益谱,将得到的增益系数谱与不叠加噪声情况下进行比较,所得误差对应图 1 中菱形空心点曲线,可见测量误差随着噪声的增加而逐渐增加。另一方面,对叠加了不同程度噪声的信号先进行去噪处理,再用 HP 方法求增益系数谱,将得到的增益系数谱再与不叠加噪声情况下进行比较,所得误差关系对应图 1 中点状曲线。对比两种情况下的误差曲线,可以看到去噪使测量精度得到很大的改善。

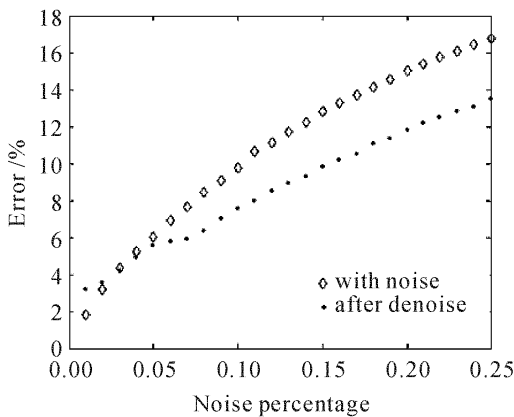


图 1 加噪和去噪处理得到的误差关系比较

Fig.1 Relative errors of the gain coefficients spectra obtained from the ASE spectra with noise and after denoise process

在 HP-DD 方法中,对于模拟的各分辨率下测量的放大自发辐射谱去噪后,再进行去卷积的处理。各分辨率下的响应函数类似于脉冲函数,图 2 是分辨率为 0.5 nm 时的响应函数。

对模拟的理想放大自发辐射谱和模拟的不同分辨率下测量的放大自发辐射谱分别用 HP 方法求增益谱,比较两者测量得到的增益系数值就可以看出

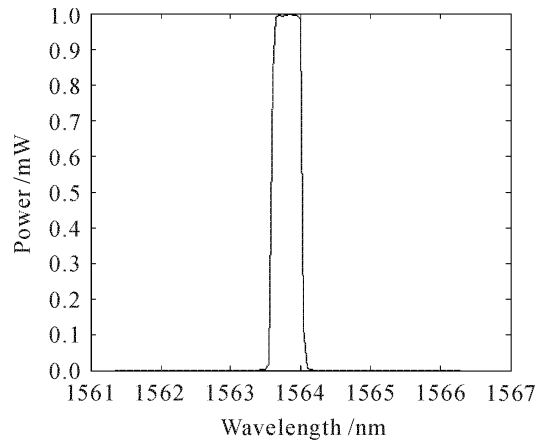


图 2 分辨率为 0.5 nm 时的响应函数

Fig.2 Response function when resolution was 0.5 nm

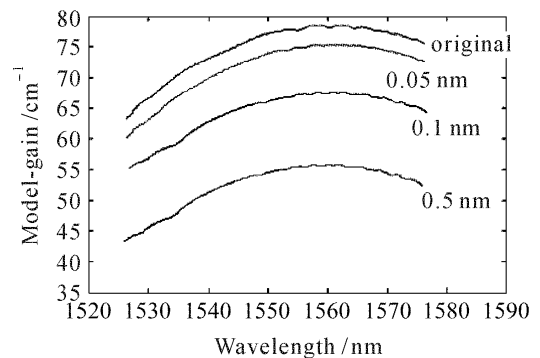


图 3 不同的测量分辨率得到的增益系数谱

Fig.3 Gain coefficient spectra obtained from the ASE spectra at different resolution

分辨率对测量结果的影响,如图 3 所示。

由图 3 可见,最上面的是由模拟的理想放大自发辐射测量得到的增益谱,其下依次为 0.05 nm, 0.1 nm 和 0.5 nm 分辨率下测量的增益谱。可以看出测量的分辨率越大,增益谱越小。在分辨率为 0.5 nm 时,所得的结果与理想值相差很大。这说明要得到正确的值,必须要去除分辨率的影响,对卷积之后的光谱(对应于实验测得的光谱)进行去卷积运算。

将模拟的理想放大自发辐射谱和去噪后的各个分辨率下的放大自发辐射谱分别用 HP 方法求增益谱,然后对去噪后的各个分辨率下的放大自发辐射谱进行去卷积运算后再求增益谱。以原始放大自发辐射谱测量得到的增益谱为标准,比较去卷积前后得到的误差平均值。表 1 给出了比较结果,可以看到各个分辨率下测量结果有很大改善。值得注意的是在 0.05 nm 时,由于分辨率已经足够小,所以对去卷积前后的影响不是很大,对于在 0.1 nm 和 0.5 nm 时,由于分辨率影响的加剧,误差加大,但是

在去卷积之后有明显的改善。去卷积运算使 HP 方法免除了分辨率的影响,去卷积后得到的增益谱基本一样,接近于真实值。

表 1 不同分辨率下去卷积前后的误差平均值

Table 1 Relative error at different resolution with and without deconvolution process

Resolution /nm	Error without deconvolution /cm ⁻¹	Error with deconvolution /cm ⁻¹
0.05	3.1	0.1
0.1	10.1	0.2
0.5	20.1	0.5

4 实验结果

实验中采用安立公司的 MS9710C 光谱分析仪,最小分辨率为 0.05 nm,还可以取的分辨率有 0.07 nm, 0.1 nm, 0.2 nm 和 0.5 nm 等;激光器是 New Focus 公司的 6300 系列可调谐分布反馈布拉格激光器。实验过程就是用光谱分析仪直接测量半导体光放大器的放大自发辐射谱或者是分布反馈布拉格激光器的光谱。

在实验中测量用的半导体光放大器是长度为 1 mm 的反射式半导体光放大器,注入电流为 230 mA,一端反射率为 10^{-6} ,另一端反射率为 0.3。测量了分辨率分别为 0.05 nm, 0.1 nm, 0.2 nm 和 0.5 nm 时的放大自发辐射谱和响应函数,以 0.5 nm 分辨率下的测量结果说明 HP-DD 方法对 HP 方法的改进。

首先对测量得到的放大自发辐射谱选用 Haar5 小波函数进行 5 级小波分解,在低级系数上用软阈值去噪,将原始数据去噪声,作为分析处理的放大自发辐射谱。然后对去噪后的放大自发辐射谱进行去卷积处理。经过处理后得到的光谱如图 4 所示,上部是 0.5 nm 分辨率时的放大自发辐射谱,下部是去卷积处理后的分辨率接近 0.05 nm 时的放大自发辐射谱。分别用 HP 方法求得两个放大自发辐射谱的增益谱,然后用去卷积前测量的增益谱减去去卷积后的增益谱就可以得到去卷积处理对 HP 方法的改善结果,如图 5 所示。可见,去卷积前的增益谱比去卷积后的增益谱要小很多,HP-DD 方法改善了 HP 方法测量结果偏小的缺点。

经过 HP-DD 方法的测量后,在图 6 中给出分辨率在 0.1 nm, 0.2 nm 和 0.5 nm 时放大自发辐射谱测量得到的增益谱和经过去噪和去卷积之后得到的

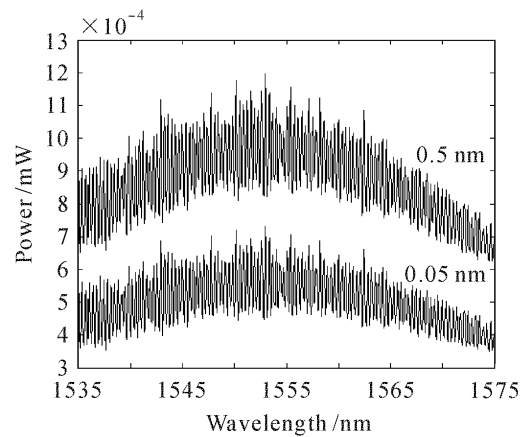


图 4 去卷积前后的放大自发辐射光谱
Fig. 4 ASE spectra before and after deconvolution process

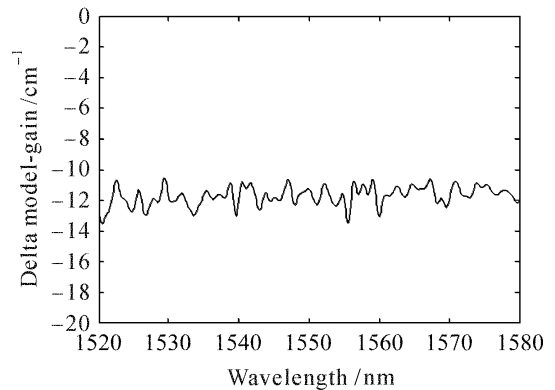


图 5 去卷积前后增益系数谱值之差
Fig. 5 Difference between the gain coefficient spectra before and after deconvolution process

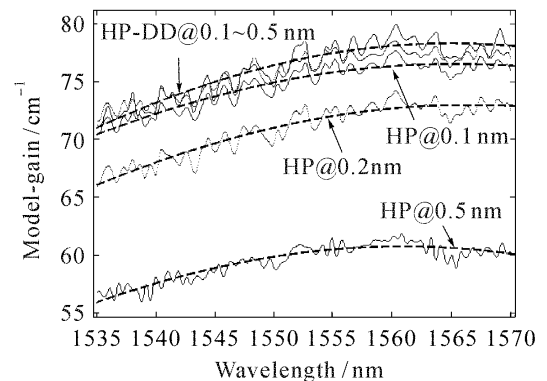


图 6 各分辨率下 HP-DD 方法和 HP 方法测得的增益谱
Fig. 6 Gain coefficient spectra obtained by HP-DD method and HP method at different resolution

增益谱。可以看出,HP-DD 方法测量的结果基本上变化不大,比 HP 方法测量的结果有了很大的改进。

5 结 论

提出了一种在 HP 方法中引入小波去噪和去卷

积算法的 HP-DD 方法。在数值模拟过程中,用法布里-珀罗腔激光器的放大自发辐射谱方法来作为模拟的放大自发发射谱,得到了其在分辨率为 0.05 nm,0.1 nm 和 0.5 nm 的情况下模拟的真实谱,用 HP 方法得到的增益谱在不同的分辨率下的误差最大可以达到 20 cm^{-1} ,而用 HP-DD 方法在不同分辨率下的误差只有 0.5 cm^{-1} ,而且不易受噪声影响。在最后的实际测量结果中,HP-DD 方法得到的测量结果不受分辨率的影响,得到的曲线在不同分辨率下没有太大的差别,比 HP 方法要改进很多。

参 考 文 献

- Dai Kehui, Zhang Xinliang, Xu Fan *et al.*. Actively mode-locked fiber ring laser based on cross-gain modulation effect of semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):293~297
戴科辉,张新亮,徐帆等. 基于半导体光放大器交叉增益调制效应的主动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(3):293~297
- Wang Ying, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Novel all-optical AND gate based on cross gain modulation in cascaded semiconductor optical amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1433~1436
王颖,张新亮,黄德修. 基于级联半导体光放大器中交叉增益调制效应的新型全光逻辑与门[J]. 中国激光, 2004, **31**(12):1433~1436
- Jiang Huan, Wu Keying, Han Liuyan *et al.*. All-optical wavelength conversion technology using injection-locking in semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1183~1188
姜欢,吴克瑛,韩柳燕等. 注入锁定半导体激光器全光波长转换技术[J]. 中国激光, 2005, **32**(9):1183~1188
- Teng Xiang, Zhang Hanyi, Guo Yili *et al.*. Performance optimization of the wavelength converter based on cross-polarization-modulation in SOA [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):810~814
滕翔,张汉一,郭奕理等. 基于半导体光放大器中交叉偏振调制效应的波长转换器[J]. 中国激光, 2005, **32**(6):810~814
- Wang Shurong, Wang Yu, Zhu Hongliang *et al.*. High-gain polarization-insensitive semiconductor optical amplifier with tensile-strained InGaAs/InP bulk material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **31**(6):1380~1382
王书荣,王圩,朱洪亮等. 高增益偏振不灵敏 InGaAs/InP 体材料半导体光放大器[J]. 中国激光, 2005, **31**(6):1380~1382
- Basil W. Hakki, Thomas L. Paoli. CW degradation at 300 K of GaAs double heterostructure junction lasers. II. Electronic gain [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(9):4113~4119
- Basil W. Hakki, Thomas L. Paoli. Gain spectra in GaAs double-heterostructure injection lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(3):1299~1306
- Daniel T. Cassidy. Technique for measurement of the gain spectra of semiconductor diode lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(11):3096~3099
- Daniel Hofstetter, Robert L. Thornton. Loss measurements on semiconductor lasers by Fourier analysis of the emission spectra [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(4):404~406
- D. Hofstetter, R. L. Thornton. Measurement of optical cavity properties in semiconductor lasers by Fourier analysis of the emission spectrum [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(10):1914~1923
- Weihua Guo, Yongzhen Huang, Chunlin Han *et al.*. Measurement of gain spectrum for Fabry-Pérot semiconductor lasers by the Fourier transform method with a deconvolution process [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(6):719~721
- M. J. Connelly. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(3):439~447
- C. H. Henry, R. A. Logan, F. R. Merritt. Measurement of gain and absorption spectra in AlGaAs buried heterostructure lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(6):3042~3050
- P. Blood, A. I. Kucharska, J. P. Jacobs *et al.*. Measurement and calculation of spontaneous recombination current and optical gain in GaAs-AlGaAs quantum well structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**:1144~1156
- Xiao Yue, Cui Yiping. A new kind of wavelet-based method for spectrum deconvolution [J]. *Journal of Southeast University*, 2003, **19**(1):12~13
- D. Hofstetter, J. Faist. Measurement of semiconductor laser gain and dispersion curves utilizing Fourier transforms of the emission spectra [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(11):1372~1374