

光源谱宽通过光纤色散对 AOCS 输出的影响

沈 涛¹, 魏新劳²

(1. 哈尔滨理工大学 应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 基于光纤色散引起的脉冲展宽效应, 在理论和实验上研究了有源光学电流传感器 (AOCS) 中宽带光源对系统输出的影响. 理论结果表明: 对于长度为 500 m 的光纤, 当光源谱宽在 40 - 60 nm 之间变化时, 多模光纤传输下的脉冲展宽范围在 0.5 ~ 0.8 ns, 单模光纤传输下的脉冲展宽范围在 $2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$ ns, 信号衰减量对系统输出影响很小, 且随光源谱宽的增加而有微弱的增加, 实验与理论相符合.

关键词: 有源光学电流传感器; 光源谱宽; 光纤色散; 脉冲展宽

中图分类号: TP212.14; TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)01-0098-04

Effect of the Spectral Width of Optical Sources upon the Output of an Active Optical Current Sensor by Fiber Dispersion

SHEN Tao¹, WEI Xin-lao²

(1. School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Electric and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: For Active optical current sensor, the effect of broadband light sources on pulse broadening caused by fiber dispersion has been theoretically investigated and simulated. The results show that when the spectra width of light sources varies between 40 - 60 nm, the pulse broadening of multimode fiber with length of 500 m and single-mode fiber varies between 0.5 ~ 0.8 ns and $2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$ ns, respectively. Finally, our experimental results verify the above conclusions.

Key words: active optical current sensor (AOCS), source spectral width, fiber dispersion, pulse broadening

1 引 言

光学电流传感器 (OCS) 作为传统的电磁式电流互感器 (CT) 的理想替代, 引起了全球研究者的关注. 按高压侧的传感头是否需要工作电源, 可以将 OCS 分为有源式和无源式两种. 一般地, 无源光学电流传感器 (FOCS) 采用法拉第磁光效应原理, 易受温度等环境因素引起的双折射的影响, 而且受光学

工艺和光学材料的制约, 其测量准确度和长期运行稳定性难以达到实用化要求^[1-2].

和 FOCS 相比, 有源光学电流传感器 (AOCS) 具有价格低廉、工艺简单、准确度高和稳定性好等优点, 具有更好的实用前景. AOCS 采用光纤连接高压端和低压端, 具有简单的绝缘结构和优良的绝缘性能, 这使其在高压和超高压电流测量应用中更优于传统的 CT. 以上优点使 AOCS 吸引了越来越多研究者的兴趣^[3-4]. 但在以往对 AOCS 的研究与设计

中,大多数研究者都假定光源输出单色光,因此很少讨论宽带光源对系统输出的影响.但实际 AOCS多数采用宽带光源,因此,有必要研究由于光源存在谱线宽度对系统产生的波长积累效应,以证实光源具有一定线宽的系统中,利用单色光模型方法进行研究的合理性与可行性.

本文理论分析并仿真了 AOCS中光纤由于色散引起的宽带光源对脉冲展宽的影响,用实验进行了定量验证,并进行了相关讨论.

2 理论推导

2.1 脉冲展宽与 AOCS系统输出的关系

对于 AOCS系统通常的构成包括高压侧部分、光纤传输部分和低压侧部分.其中光纤是联系高低压侧的介质,并未参与对电流的传感过程中^[4],但是,光纤作为传输信息的通道,对光信号的影响会引起系统输出的改变,故需要讨论信号在光纤中传输引起的改变.

光纤中的光信号在传播过程中会产生失真(也称畸变),并随着传播距离的增加而越来越严重.这种失真是模式本身的色散和模式间的传播时延差造成的,其中模式本身的色散称为模内色散或色度色散,它是指在一个单独的模式内发生的脉冲展宽.对于 AOCS系统,光纤色散产生的信号失真对系统输出会带来影响,产生这种失真是因为光源所发射的光有一定的频谱宽度,而群速率又是波长的函数.模内色散与波长相关,所以光源的频谱越宽,它对信号失真的影响就越大.

又由于 AOCS传输的为交流电信号,应该用模拟信号来表示.在模拟传输中,由于色散,不同频率的模拟光信号频谱不相同,在接收端就会使模拟信号出现严重失真.从时域观点分析,光纤色散会造成光脉冲的波形展宽,若是从频域角度来看,光纤有色散就表示光纤是有一定传输带宽的.因此脉冲展宽和带宽是从不同角度描述光纤传输特性的两个紧密联系的参量.所以在 AOCS中,在理论上可以用色散引起的脉冲展宽来代替光源谱宽对系统输出的影响.

2.2 宽带光源对脉冲展宽影响的推导

在多模光纤传输下的 AOCS系统中,由光源谱宽产生脉冲展宽的主要来源为材料色散.材料色散的产生是因为折射率是光波长的函数,又因为模式的群速度 v_g 是折射率的函数,所以模式中不同频谱

分量的传播速率也是波长的函数^[5-6].

假设被调制的光信号在光纤的输入端同等地激励起所有的模式,每种模式携带的光功率也是一样的,而且每种模式包含光源范围内所有的频谱分量.当光信号在光纤中传播时,就可以把每一个频谱看成独立传播的,那么在传播方向的单位距离上所经历的时延,其表达式为^[7]

$$\frac{\tau_g}{L} = \frac{1}{V} = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk} = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{d\beta}{d\lambda} \quad (1)$$

为了计算材料引入的色散,设想一个平面波在无限延伸的电解质中传播,介质的折射率与纤芯折射率相同,均为 n ,则其传播常数 β 为

$$\beta = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda} \quad (2)$$

将这个 β 的表达式代入式 (1),并使 $k = 2\pi/\lambda$,得到材料色散引起的群时延 τ_{mat} 为

$$\tau_{mat} = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (3)$$

如果光源谱宽 $\delta\lambda$ 是用其均方根值来表示的.则脉冲的展宽程度可以近似地由脉冲展宽的均方根值表示,即

$$\sigma_g \approx \left| \frac{d\tau_g}{d\lambda} \right| \sigma_\lambda = \frac{L\sigma_\lambda}{2\pi c} \left| 2\lambda \frac{d\beta}{d\lambda} + \lambda^2 \frac{d^2\beta}{d\lambda^2} \right| \quad (4)$$

应用式 (4),在光源谱宽为 σ_λ 时,脉冲展宽 σ_{mat} 可以由群时延波长的微分乘上 σ_λ 得到:

$$\sigma_{mat} = \left| \frac{d\tau_{mat}}{d\lambda} \right| \sigma_\lambda = \frac{\sigma_\lambda L}{c} \left| \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right| \quad (5)$$

式 (5)即为多模光纤传输下的 AOCS系统中宽带光源对脉冲展宽影响的关系.

3 理论仿真

对于多模光纤传输下的 AOCS系统,由式 (5) 以及文 [8] 中给出的 SF-6 玻璃的 Sellmeier 折射率色散公式,结合实验系统中光纤的长度 $L = 500$ m;光源中心波长 $= 1\,310$ nm.利用 Mathematica 软件仿真可得脉冲展宽随光源谱宽的变化情况,如图 1a 所示.从图 1 可见:光源谱宽在 $0 \sim 100$ nm 范围内变化时,相应的脉冲展宽变化很小,量级为 1 ns,随着光源谱宽的增大,输出信号的脉冲展宽增大;在光源谱宽为 $40 \sim 60$ nm 范围时,脉冲展宽在 $0.5 \sim 0.8$ ns 范围内变化,对系统影响较小.

对于单模光纤传输下的 AOCS系统,利用文 [9] 的结论,相应的 500 m 长光纤对应的脉冲展宽

如图 1b 所示. 从图可见: 在光源谱宽均方根值在 0 ~ 100 nm 范围内变化时, 相应的脉冲展宽变化量级为 10^{-5} ns 左右; 随着光源谱宽的增大, 输出信号的脉冲展宽增大; 在光源谱宽为 40 ~ 60 nm 范围时, 脉冲展宽在 2×10^{-5} ~ 4×10^{-5} ns 范围内变化, 对系统影响更小.

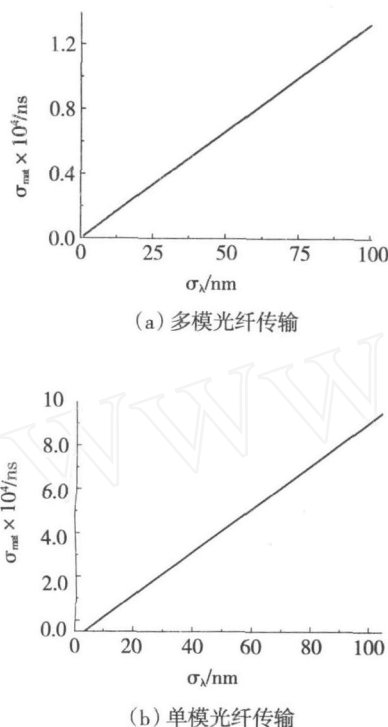


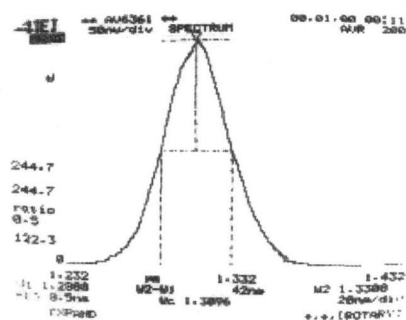
图 1 脉冲展宽随光源谱宽的变化

4 实验

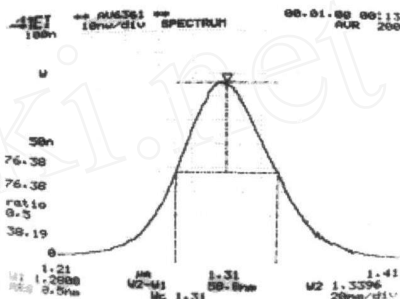
由图 1 中的仿真结论及文献 [9] 可知, 单模光纤传输下的 AOCS 系统中宽带光源对系统输出的影响比多模光纤传输下约小 5 个数量级, 故在实验中仅采用相对影响大的多模光纤传输下的 AOCS 系统进行验证.

在实验中通过测量不同谱宽光源下的系统输出电压随待测电流的变化规律来验证前述仿真中的不同谱宽光源对 AOCS 系统输出信号的脉冲展宽的影响, 并且在实验中通过选择两种不同类型的光源——超发光二极管 (SLD)、发光二极管 (LED) 分别代表不同谱宽的光源, 实验前先用光栅光谱仪对 SLD 和 LED 的光谱进行测量. 其光谱分别如图 2 所示. 由图 2 可知, 光谱宽度分别为 42 nm 和 58 nm.

实验中采用的装置如图 3 所示, 其中“小信号电流”是由待测大电流信号经传统 CT 变换转化的驱动信号, 其驱动光源发光以实现光电转换; “光源”



(a) 光源为 SLD



(b) 光源为 LED

图 2 光源的光谱图

分别为 SLD 和 LED; “光纤”为普通多模光纤; “光电探测和信号处理电路”是由 PD 和相应电路来实现的; “显示测量装置”是高精度度存储示波器 DPO4032 (泰克). 光源的输出光信号经光纤传输到低压区, 由光电探测器实现光电转换后, 送往信号处理电路实现放大、滤波和显示等功能. 实验时人为地改变待测电流信号大小, 然后在低压端测试数据并记录.

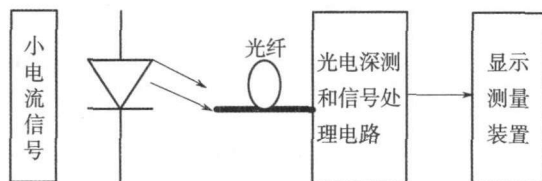
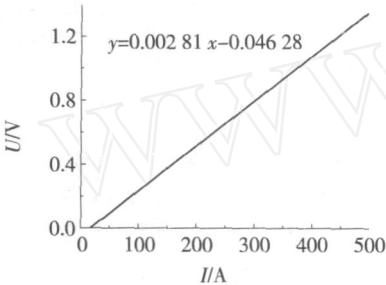


图 3 ACOS 实验装置图

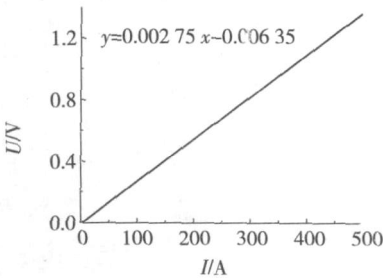
实验数据如表 1 所示, 相应的实验曲线如图 4 所示. 由图 4 可知, 输出电压随待测电流基本上成线性变化, 用 SLD 和 LED 做光源的直线斜率分别为 0.002 81 和 0.002 75. 在 AOCS 中, SLD 作为光源时比 LED 作为光源时系统的输出信号要大, 联系到前者的谱线宽度比后者的小, 实验定性的验证了前述的结论: 即随着光源谱线宽度的增加, 系统的输出减小.

表 1 实验数据表

序号	用 SLD作为光源		用 LED作为光源	
	信号电流 /A	测量输出 /V	信号电流 /A	测量输出 /V
1	0	0	0	0.01
2	49.7	0.06	29.3	0.09
3	111.5	0.24	70.1	0.18
4	182.1	0.46	133.4	0.35
5	241.4	0.64	192.2	0.50
6	290.1	0.78	248.8	0.66
7	341.4	0.91	307.6	0.83
8	398.1	1.06	373.3	1.06
9	455.0	1.22	434.5	1.18
10	509.0	1.34	472.8	1.30



(a) 光源为 SLD



(b) 光源为 LED

图 4 实验曲线

5 结 语

本文通过理论推导、仿真和实验研究讨论了在 AOCS中宽带光源对系统输出的影响. 理论研究和实验结果均表明: AOCS中光源谱宽对系统输出的影响很小以致可以忽略,故若不考虑其他光学参量的波长积累效应,用单色光模型替代采用宽带光源的实际情况的研究方法是合理而可行的. 研究结果可供从事 AOCS的研究人员参考.

参 考 文 献:

[1] Emerging Technologies Working Group. Optical Current Transducers for Power Systems: A Review[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9 (4): 1778 - 1788

[2] 李红斌,张明明,刘延冰,等. 几种不同类型电子式电流互感器的研究与比较[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 4 - 5, 9.

[3] 尚秋峰,石新春,王仁洲,等. 有源光电式电流互感器的进展及分析[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(9): 81 - 84.

[4] 王政平,康 崇,张雪原,等. 有源型光学电流互感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(10): 34 - 38.

[5] GLOGE D. Weakly Guiding Fibers[J]. Appl Opt , 1971, 10 (10): 2252 - 2258

[6] GLOGE D. Dispersion in Weakly Guiding Fibers[J]. Appl Opt , 1971, 10(11): 2442 - 2445.

[7] GLOGE D, MAARCATLIE A J, MARCUSE D, et al Dispersion Properties of Fibers[M]. In S E Miller and A. G Chynoweth, eds , Optical Fiber Telecommunications, Academic, New York, 1979.

[8] SCHOTT Catalogue Optical Glass 2000[EB/OL]. <http://www.schott.com>, 2008 - 01 - 09.

[9] REED W A, COOHEN L G, SHANG H T. Tailoring Optical Characteristics of Dispersion - shifted Lightguides for Applications Near 1.55μm[J]. AT&T Tech, 1986, 65(9): 105 - 122.

(编辑:付长缨)