

文章编号: 0253-2239(2010)02-0335-05

混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法

单超^{1,2} 方捻^{1,2} 王陆唐^{1,2} 黄肇明^{1,2}

(¹ 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)
² 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要 提出一种基于半导体光纤环形激光器的混沌光纤围栏系统。在该系统中,激光器输出为具有帧结构的偏振混沌光,环形激光器中的一段光纤用作传感光纤。任意位置的入侵都会改变光纤的双折射分布状态,引起环形激光器初始状态的改变,由于混沌对初值的敏感性,激光器输出波形即刻被改变。通过相邻帧输出波形的互相关检测可实现入侵的检测。利用混沌环形激光器输出波形的帧型特点实现入侵定位的空间-时间转换。利用入侵位置与帧间互相关峰值的对应关系实现入侵的定位。该方法实时性好,抗干扰性强,检测结果不受周围环境变化影响。实验结果表明,在3 km左右的监测范围内定位误差约45 m,相对误差5%,且检测结果重复性良好。

关键词 传感器; 光纤围栏; 光纤环形激光器; 混沌; 互相关

中图分类号 TP212.14; O415.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0335

Chaotic Fiber Fence System and Intrusion Location Method

Shan Chao^{1,2} Fang Nian^{1,2} Wang Lutang^{1,2} Huang Zhaoming^{1,2}

¹ Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University,
Shanghai 200072, China

² School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract A chaotic fiber fence system based on a semiconductor fiber ring laser is proposed, in which the laser outputs are framing polarization chaotic light and a part of the fiber ring is taken as sensing fiber. Wherever the intrusion acts in the sensing fiber, it will disturb the distribution state of the birefringence in the fiber, which influences the initial state of the laser. Output waveform changes immediately because chaos is sensitive to its initial value. By a cross-correlation detection of the waveforms in adjacent two frames, the intrusion can be detected. The position of the ring can be converted to the time of the frame with the framing characteristic of the chaotic waveform. According to the relation between the intrusion position and cross-correlation peak value, the intrusion position is located. This method is real time and with stronger anti-interference capacity and the detection results are immune from external environment fluctuations. The experiment results illustrated that the system has a location error of about 45 m, the relative error of 5%, and a good repetitiveness with a 3 km long sensing fiber.

Key words sensors; fiber fence; fiber ring laser; chaos; cross-correlation

1 引言

作为分布式光纤传感技术的一个重要组成部分,可用于入侵检测和定位的光纤围栏系统得到了极大的关注^[1~5]。目前,光纤围栏系统主要有光时域反射(OTDR)型和光干涉型两大类。如相敏OTDR(ϕ -OTDR)光纤围栏系统^[1,2],利用光纤内不

同部位的背向散射光的干涉效应,由光相位变化导致光功率变化,通过入侵前后功率谱曲线的比较获取入侵点的位置信息。尽管它能检测到很小的、传统OTDR检测不到的扰动,但对激光器的线宽与频率漂移以及探测器的灵敏度要求都较高,实时性也差。干涉型光纤围栏系统的主要代表是基于马赫-

收稿日期: 2009-03-23; 收到修改稿日期: 2009-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(60577042)和上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108, 08DZ2231100)资助课题。

作者简介: 单超(1985—),男,硕士研究生,主要从事混沌分布式光纤传感方面的研究。E-mail: posidon7@163.com

导师简介: 方捻(1972—),女,博士,副教授,主要从事光通信与光传感等方面的研究。E-mail: nfang@staff.shu.edu.cn

曾德尔(M-Z)干涉仪的传感系统^[4,5]。它利用 M-Z 干涉原理检测入侵,通过互相关运算得到两个探测器的信号延时定位入侵。由于采用双臂干涉结构,必须保证参考臂和传感臂等长,同时还要对参考臂进行扰动隔离。另外这类传感系统对入射光的偏振态^[6]以及外界环境因素(如温度等)的变化比较敏感,易产生漏报和误报等现象。

此外,利用混沌系统对初始状态的敏感性,把混沌应用到传感领域的研究也已展开。C. Jáuregui 等^[7]将光脉冲注入一个无源的光纤环谐振腔(OFRRs)得到一个混沌输出信号,利用该信号螺旋线型吸引子每圈之间的间隔作为传感参数,实现对光纤环上压力等物理量变化的传感。K. Suzuki 等^[8]则通过测量两个 OFRRs 混沌同步特性的变化,实现对微位移和光纤折射率变化的传感。另外, Y. Wang 等^[9]采用混沌激光器输出波形的自相关检测方式实现对光纤内部反射点的定位。

本文提出一种采用偏振混沌光纤环形激光器的混沌光纤围栏系统,利用混沌对初始状态的敏感性检测外界入侵对激光器系统初始状态的扰动,通过相邻帧混沌波形的互相关检测实现入侵的实时监测和定位。

2 混沌光纤围栏实验系统的组成与传感机理

如图 1 所示,混沌光纤围栏实验系统由一个半导体光纤环形激光器(SFRL)及其接收光路以及信号处理单元三部分组成。SFRL 是一个由半导体光放大器(SOA, OptoSpeed Corporation, 1550MRI- XII500)、偏振控制器(PC, 图 1 中用 General Photonics Corporation 生产的光纤挤压器 PLC-001 实现其功能)、中心波长为 1560.6 nm 的滤波器、分光比为 90:10 的耦合器(OC)和光隔离器(ISO)等器件用标准单模光纤连接而成的单

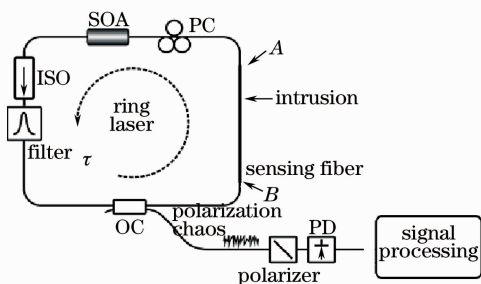


图 1 混沌光纤围栏实验系统

Fig. 1 Chaotic fiber fence experimental system

向谐振环形激光器。其输出经过检偏器和光电探测器(PD)进行偏振接收后进入信号处理单元。把环形激光器中的一段连接光纤(图 1 中 A, B 点之间的部分)用作传感光纤,就构成了混沌光纤围栏系统,其中 A, B 点分别对应定位的起点与终点。它采用 SFRL 作为混沌光源,并把传感光纤作为混沌光源的一部分,利用混沌光源的光纤环对外界作用的敏感性,构成了一种混沌的、有源的新型分布光纤传感系统。

通过调节 PC 和 SOA 工作电流,可使 SFRL 工作于混沌状态^[10,11],其输出为偏振混沌光。SFRL 作为一个偏振混沌非线性动力学系统,光纤环的双折射是系统参数之一,其大小与分布状态以及 SOA 中载流子的分布状态构成了系统的初始状态。当入侵事件发生时,作用到传感光纤的外部应力和压力改变了光纤环的双折射分布状态,从而引起激光器初始状态的变化,由于混沌系统对初始状态的敏感性,最终导致其输出混沌波形发生变化。这种传感机理与传统光纤传感机理的不同点在于:外界扰动直接改变了激光器动力学系统参数或初始状态,通过对系统输出波形变化的检测来探知动力学系统状态的变化,最终实现对外界扰动的传感。

3 帧的概念与互相关检测方法

在一定条件下,光纤环形激光器可处于自脉冲工作模式,其输出呈现周期性变化,具有帧结构特点。每帧宽度与光波在光纤环形谐振腔中传播一周的时间常数 τ 有关。光纤环形激光器的自脉冲工作模式起源于激光器中同时存在两个相互正交的偏振模,光纤环所具有的双折射效应、环中 PC 和 SOA 有源波导所引入的附加双折射都会使两偏振模在循环传播过程中出现不同的相位变化,导致两偏振模不断地出现拍振(beating)与反相(antiphase)现象^[12~14]。另外,SOA 的增益与相位对偏振的依赖性等偏振特性,又会使两正交偏振模在传输过程中产生强烈地耦合和转化^[15],最终形成自脉冲,并呈现出帧结构特点,此时帧的宽度正好等于环形谐振腔的时间常数 τ 。

当光纤环形激光器处于偏振混沌工作状态,同时激光器的初始状态保持不变时,由于环形谐振腔结构上的特点,输出光波的混沌状态也会出现帧结构特点。图 2 是光纤环形激光器输出的混沌波形。实验系统中,SOA 工作电流设定在 450 mA。由图 2 可见,光纤环形激光器输出波形具有自脉冲与混沌波形相组合的特征,每两个相邻自脉冲构成一

帧。通过对图 2 中混沌波形帧长的测量,获得光纤谐振环的时间常数 τ 约为 $1.63 \mu\text{s}$,乘以光纤中的光速,可以估算出光纤环长度约 330 m 。

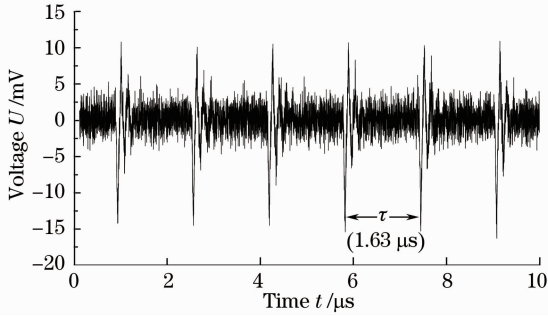
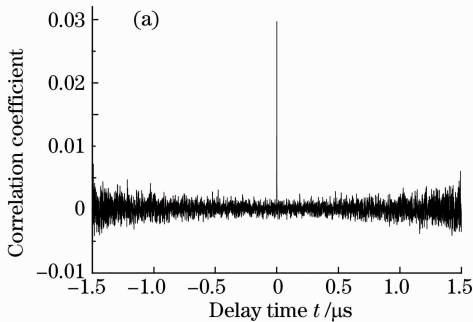


图 2 具有帧结构特点的偏振混沌环形激光器输出波形
Fig. 2 Framing output waveforms of polarization chaos ring laser

根据相邻两帧混沌波形具有很大相似性^[16]的特点,在基于环形激光器的偏振混沌光通信中,用延迟一帧的混沌信号与原信号相减的偏振开环接收方式实现收发两端混沌的同步^[17,18],相减结果趋于零



时即认为达到了同步。相邻两帧混沌波形的相似性也可以通过其互相关系数来定量表示。因此,混沌光纤围栏系统的入侵检测可以通过相邻两帧混沌波形的互相关运算即互相关检测来实现。在没有入侵事件发生时,混沌激光器的初始状态无变化,当前一帧内混沌波形几乎没有变化,两帧混沌波形的相似度高,故其延迟时间为零时的互相关函数峰值(简称互相关峰值)较大。当入侵发生时,混沌激光器的初始状态即刻变化,由于混沌对初始状态的敏感性,当前一帧内的混沌波形即刻发生变化(该帧称为入侵帧),出现非相似混沌波形,持续时间超过一帧,此时两帧混沌波形的相似度下降,两者的互相关峰值就会减小。因此,根据相邻两帧混沌波形的互相关峰值大小可以判断入侵事件是否发生。

图 3 是根据具体实验数据绘制的有、无入侵时相邻帧混沌波形的互相关曲线。两者对比可以看出,无入侵时零点位置的互相关峰值较大,而有入侵时零点位置的互相关峰值明显降低。

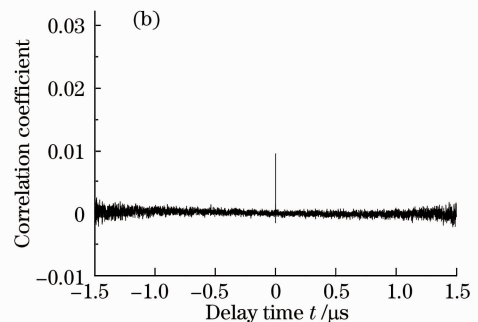


图 3 相邻两帧混沌波形的互相关曲线,(a)无入侵时,(b)有入侵时

Fig. 3 Cross-correlation curve of adjacent frame chaos waveforms, without intrusion (a) and with intrusion (b)

4 混沌光纤围栏系统的定位方法

利用偏振混沌环形激光器输出波形的帧结构特点,可以将光纤环中不同位置出现的入侵转换为一帧内不同时刻出现的入侵,从而实现入侵定位的空间-时间转换。直观上通过观察测定入侵帧混沌波形开始发生变化的时刻就可以推定出入侵的具体位置,然而采用时域波形帧间互相关比较定位方法则更为有效。

进一步研究发现,互相关峰值大小与两者的相似度成正比关系,而与入侵帧内非相似波形所占比例的大小成反比关系,这种类似的关系在文献^[19]中也有体现。入侵位置的不同,对应于入侵帧内混沌波形发生变化的起始时刻会不同,导致非相似波形所占的比例不同,互相关峰值也会不同。如图 1

中 A 点,相比其他位置,入侵发生时入侵帧内非相似波形所占比例最高,故对应的互相关峰值也最低。因此可以以无入侵时的互相关峰值为基准,根据入侵发生时的互相关峰值的大小推算出入侵的位置,实现混沌光纤围栏的定位功能。

利用入侵实验数据在入侵帧内移位替换法可得到互相关峰值与环中位置的关系曲线。即在一帧偏振混沌波形内的不同位置,用实验采集到的某一段被入侵干扰的波形数据替换原有数据,来模拟在不同帧内时刻出现入侵的情况。计算不同情况下的入侵帧与其前一帧的互相关峰值,经过拟合绘制出一条入侵的帧内时刻(环中位置)与互相关峰值的关系曲线,如图 4(a)所示。当传感光纤足够长时,可以近似地认为传感光纤的长度就是光纤谐振环的环

长,从而将图 4(a)视为归一化互相关峰值与传感光纤位置的对应关系。通常情况下,传感光纤的长度在数百米至几千米之间,而谐振环其余部分的长度为几米左右,因此这种近似所带来的测量误差非常之小,可以忽略不计。图 4(b)是分别在 300 m 传感光纤的两端和中间位置模拟入侵测得的实验结果,入侵位置与归一化互相关峰值确实呈线性关系。

另外,即使没有入侵相邻两帧的互相关峰值也会波动,波动范围在最大值的 15% 以内;如果归一化互相关峰值太小($<5\%$),会被互相关曲线基底的噪声掩盖。因此,选取归一化互相关峰值在 $[0.1, 0.7]$ 的稳定区域作为有效定位区域,在

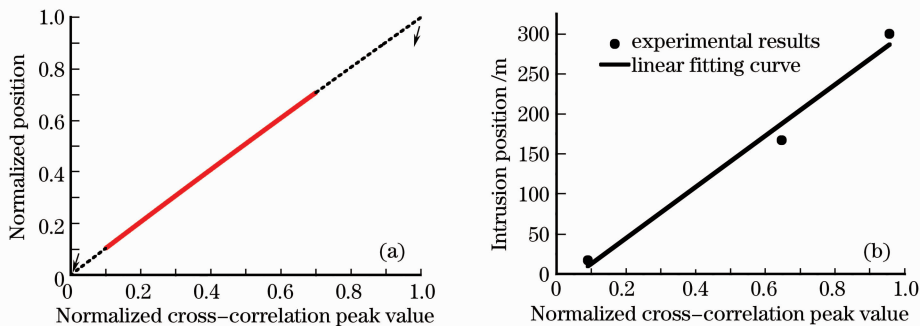


图 4 归一化互相关峰值与归一化位置的关系曲线, (a) 移位替换法拟合曲线, (b) 实验数据及拟合曲线
Fig. 4 Normalized cross-correlation peak value vs. normalized position in shift-replace fitting curve (a) and experimental results and fitting curve (b)

5 入侵检测与定位的模拟实验结果与分析

实验用的光纤环总长度为 3.083 km, 利用信号发生器 (Agilent 33250 A, 80 MHz Function/Arbitrary waveform generator) 产生一个高斯白噪声来驱动压电陶瓷 (PZT) 产生一个振动信号模拟入侵, PZT 所处位置距离 A 点 0.895 km。探测器的输出接到示波器 (Agilent 54845 A Infiniium Oscilloscope) 中进行波形观测和数据采集。用 Matlab 软件计算入侵帧与其前一帧的互相关峰值为 0.00939, 互相关曲线如图 3(b) 所示。多次计算无入侵时的相邻两帧的互相关峰, 得到其最大值为 0.03, 如图 3(a) 所示, 则入侵的归一化互相关峰值为 $0.00939/0.03 = 0.313$ 。根据图 4 的对应关系, 入侵发生的归一化位置为 0.305, 换算成实际距离为 0.94 km。与实际的 0.895 km 有 45 m 的偏差, 相对误差约为 5%。

为了检验混沌光纤围栏系统对入侵检测与定位的可重复性, 在同一位置进行了 10 次测量, 实验结

果如图 5 所示。可见, 10 次测得的入侵距离都在 0.89 km 附近, 与实际 PZT 安置位置基本吻合。

果如图 5 所示。可见, 10 次测得的入侵距离都在 0.89 km 附近, 与实际 PZT 安置位置基本吻合。

由于对入侵的检测与定位都是基于互相关运算技术进行的, 可以有效消除各类随机噪声的影响, 系统的抗干扰性强。另一方面, 互相关检测是通过相邻两帧混沌波形相似性的动态比较来完成的, 动态比较所经历的时间短, 故检测结果不受周围环境波动所引起的系统参数缓慢变化的影响。

果如图 5 所示。可见, 10 次测得的入侵距离都在 0.89 km 附近, 与实际 PZT 安置位置基本吻合。

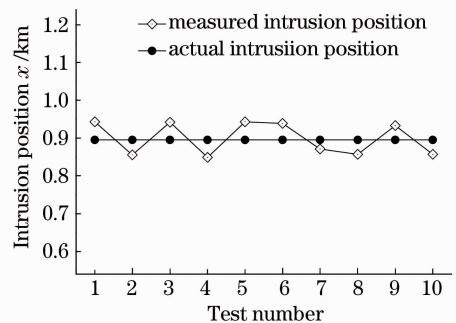


图 5 入侵位置为 0.895 km 时的 10 次测量结果
Fig. 5 Ten times measured results with intrusion position of 0.895 km

需说明的是, 实验数据均是通过示波器采集的。而示波器存储深度是固定的, 既要保证每帧内采样点数足够多, 又要保证采样的总时间足够长, 在存储深度固定的情况下这两点无疑是相互矛盾的。因此只能找到一个合适的采样频率对输出数据进行采集。采样点数的不足也是导致实验误差较大的一个

原因。若使用高采样率的数据采集卡则可以提高定位的精度。

实验中发现,在整个光纤围栏上入侵定位精度是不相同的。由于互相关曲线基底噪声和峰值波动的影响,处于中间位置的入侵定位效果相对较好,而近端与远端的入侵定位存在较大误差。在实际系统设置中应尽可能避免使用两端作为传感区域,或通过适当延长两端引导光纤的长度使传感有效区域位于最佳测量范围内。

6 结 论

提出了一种基于半导体光纤环形激光器的混沌光纤围栏系统及其时域波形帧间互相关比较定位方法。利用混沌对初值的敏感性作检测机理,通过对入侵导致的激光器输出混沌波形的变化做互相关检测,实现对入侵事件的监测和定位。系统构成简单,具有入侵监测实时性好和对周围环境变化不敏感等特点。多次重复实验结果表明,混沌光纤围栏系统的可重复性和精确性都能满足实际光纤围栏系统对入侵检测与定位的要求。在如何降低系统测量误差、进一步提高系统长时间工作稳定性、增加监测距离、定位多点入侵以及有效区分各类扰动等方面将会进一步开展深入的研究和探讨。

参 考 文 献

- 1 J. C. Juarez, H. F. Taylor. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46** (11): 1968~1971
- 2 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28** (3): 569~572
- 谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J], *光学学报*, 2008, **28**(3): 569~572
- 3 J. Z. Gao, Z. D. Jiang, Y. L. Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3** (11): 633~635
- 4 Q. Sun, D. Liu, J. Wang *et al.*. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(4): 1538~1544
- 5 Liu Bo, Yang Yifei, Zhang Jian *et al.*. A fiber fence system based on M-Z interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007,

- 36**(6): 1013~1017
- 刘 波, 杨亦飞, 张 键 等. 基于 M-Z 干涉的光纤围栏系统实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1013~1017
- 6 Feng Hao, Jin Shijiu, Zeng Zhoumo *et al.*. Locating error analysis in pipeline leakage detection and prewarning system based on modeling using Jones matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (3): 723~727
- 封 皓, 靳世久, 曾周末 等. 基于琼斯矩阵建模的管道泄漏检测及预警系统的定位误差分析[J]. *光学学报*, 2009, **29** (3): 723~727
- 7 C. Jáuregui, A. Quintela, M. Lomer *et al.*. Optical fiber sensor based on a chaotic fiber ring resonator [J]. *Photo. Technol. Lett.*, *IEEE* 2005, 329~334
- 8 K. Suzuki, Yoh Imai. Periodic chaos synchronization in slave subsystems using optical fiber ring resonators[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(4~6): 507~512
- 9 Y. Wang, B. Wang, A. Wang. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19): 1636~1638
- 10 Fang Nian, Shan Chao, Wang Lutang *et al.*. Numerical investigation of semiconductor fiber ring laser about generation of polarization chaos[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 13~18
- 方 捻, 单 超, 王陆唐 等. 半导体光纤环形激光器产生偏振混沌的数值研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 13~18
- 11 L. Wang, Z. Huang. Optical chaos communication with a dynamical SOA-based fiber ring laser [C]. *SPIE*, 2003, **5281**: 619~627
- 12 E. Lacot, F. Stoeckel, M. Chenevier. Dynamics of an erbium-doped fiber laser[J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(5): 3997~4008
- 13 W. H. Loh, C. L. Tang. Successive higher-harmonic bifurcations of a polarization self-modulated external cavity semiconductor laser [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **85** (2~3): 283~290
- 14 W. H. Loh, C. L. Tang. Numerical investigation of ultrahigh frequency polarization self-modulation in semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.* 1991, **27**(3): 389~395
- 15 Pei Xin, Xiang Wanghua, Tan Li *et al.*. Effect of Yb : Er codoping on spressing self-pulsing in Er-Doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (1): 94~98
- 裴 新, 向望华, 谭 莉 等. Yb:Er 共掺杂对掺铒光纤激光器中自脉冲行为的抑制作用[J], *光学学报*, 2004, **24** (1): 94~98
- 16 G. D. Van Winggeren, Rajarshi Roy. Communication with dynamically fluctuating states of light polarization [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(9): 097903-1~097903-4
- 17 L. Wang, Weijia Wu, N. Fang *et al.*. Experimental study on chaotic optical communication with PolSK modulation technology [C], *SPIE*, 2005, **6021**: 60210S
- 18 Q. L. Williams, J. Garcia-Ojalvo, R. Roy. Fast intracavity polarization dynamics of an erbium-doped fiber ring laser : inclusion of stochastic effects[J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(3): 2376~2386
- 19 C. K. Mann, J. R. Goleniewski, C. A. Sismanidis. Spectrophotometric analysis by cross-correlation [J], *Appl. Spectrosc.*, 1982, **36**(3): 223~227