

doi:10.3788/gzxb20174603.0314003

基于光反馈半导体激光器的多开关状态检测系统

熊小志, 方捻, 王陆唐, 黄肇明

(上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

摘 要: 为了能够同时检测多个开关的状态, 提出了一种基于光反馈半导体激光器的多开关状态检测系统. 该系统由半导体激光器、多开关传感网络和数据采集与处理单元组成. 多开关传感网络包括多个反馈光路, 每个光路由耦合器、光纤和强度反射式光开关构成. 所有开关都闭合时, 系统没有反馈, 激光器输出连续光. 当有开关被打开时, 光反馈使系统工作在混沌状态. 根据系统输出信号的自相关曲线中与各开关位置对应处的峰值是否大于预设阈值来判断开关的状态, 通过编程令其它位置处的峰值为零来消除干扰峰. 搭建了 3 个开关的实验系统, 分别对不同开关状态下的系统进行检测, 结果表明该系统可以准确检测单个或多个开关的状态.

关键词: 非线性光学; 检测; 半导体激光器; 光反馈; 开关网络; 混沌; 自相关

中图分类号: TN247; TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0314003-6

Multi-switch States Detection System Based on Semiconductor Laser with Optical Feedbacks

XIONG Xiao-zhi, FANG Nian, WANG Lu-tang, HUANG Zhao-ming

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to detect the states of multiple switches simultaneously, a multi-switch states detection system based on a semiconductor laser with optical feedbacks is presented. The system consists of a semiconductor laser, multi-switch sensing network, data acquisition and processing unit. The sensing network includes multiple feedback optical circuits made of couplers, optical fibers and intensity reflection optical switches. When all switches are in 'off' state, the system has no feedback. Hence the laser outputs continuous light. Once some a switch is in 'on' state the feedback light makes the system work at chaotic state. By comparing the sub-peak values, corresponding to each switch position, of the autocorrelation curve of the signal out of the system with a preset threshold value, the switch state can be determined. The interference sub-peaks are eliminated by programing to set the values of sub-peaks in other locations as zero. An experimental system is constructed in which the sensing network is composed of three switches in series. The system is detected in different switch states respectively. The results confirm that the system can accurately detect the states of single or multiple switches.

Key words: Nonlinear optics; Detection; Semiconductor lasers; Optical feedback; Switching networks; Chaos; Autocorrelation

OCIS Codes: 140.5960; 140.1540; 190.4360; 040.1880; 250.6715

0 引言

通过检测开关的状态, 可以实现对某些系统的监控. 电信井盖、银行保险柜、保密资料室的门窗以及存放

基金项目: 上海市浦江人才计划(No. 14PJD017)、国家自然科学基金(Nos. 61108004, 61377082)和上海市特种光纤与光接入网重点实验室开放课题(No. SKLSFO2015-02)资助

第一作者: 熊小志(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光传感技术. Email: jxxiongxiaozhi@163.com

导师(通讯作者): 方捻(1972-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信与光传感技术. Email: nfang@shu.edu.cn

收稿日期: 2016-09-02; **录用日期:** 2016-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

危险品的仓库门窗等都属于开关状态的监控范围. 还有一些特定点的温度、液位、气压、液压等达到某一阈值后需予以报警, 也可以用开关状态的检测来实现. 因此, 开关状态的监测在现实生活中是非常重要的.

当需要检测状态的开关数量较多且相隔一定距离时, 如, 为了监控某园区内所有电信井盖是否被非法打开, 可以在每个井盖上安放一个强度反射式光开关, 利用光纤把这些光开关连接起来, 形成一个检测开关状态的光纤传感系统, 对各个监测点的开关状态远程检测. 光时域反射仪 (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR) 可以用来实现该传感系统. 然而, 叠加多个脉冲信号来定位的方法检测的实时性较差^[1], 且这些待测开关是离散分布的, 用全分布式的 OTDR 系统使得系统资源利用率较低. 利用脉冲光源和多个耦合器组成的光纤传感系统也可以实现开关状态的检测^[2]. 该系统结构简单, 由于采用短时互相关法定位, 有一定的抗噪能力, 但系统受制于脉冲光源的脉冲宽度和脉冲周期以及探测器的灵敏度, 可分辨的最小开关距离与可检测的最大开关距离有限.

光反馈半导体激光器具有丰富的非线性动力学特征, 在合适的反馈强度下可产生混沌激光^[3]. 该混沌激光携带有反馈腔长度或其对应的时延信息^[4-5]. 一种提取反馈时延信息的简单有效的方法是自相关法^[6]. 文献^[7-8]研究了抑制甚至消除混沌信号中的反馈时延信息的方法, 以提高利用光反馈半导体激光器做混沌光源的保密通信系统的保密性. 本文利用时延信息提出一种开关状态检测系统. 通过耦合器、光纤和强度反射式光开关构造多个反馈光路, 根据系统输出信号的自相关曲线中与各开关位置对应的峰值是否大于预设阈值来判断开关的状态. 该系统可以在复杂环境下对开关状态进行远程监控, 准确检测多个开关的状态, 而且结构简单灵活、成本低.

1 系统结构与工作原理

如图 1 所示, 基于光反馈半导体激光器的多开关状态检测系统由半导体激光器 (Semiconductor Laser, SL)、多开关传感网络、数据采集与处理单元组成. 图 1 中虚线框部分为多开关传感网络. 图 1(a) 串联系统采用的是内部带光电探测器的半导体激光器. 而图 1(b) 并联系统的半导体激光器不带光电探测器, 只能通过一个光纤耦合器 FC_1 耦合出一路作为系统输出, 通过外接光电探测器 (Photodetector, PD) 转成电信号输入数据采集与处理单元, 另一路直接进入多开关传感网络. 图 1(b) 系统的 FC_1 的耦合比一般在 20% 以下, 以便 SL 的输出光更多地通过 FC_1 的直通端进入多开关传感网络. 图 1 中粗线代表电缆, 细线代表光纤.

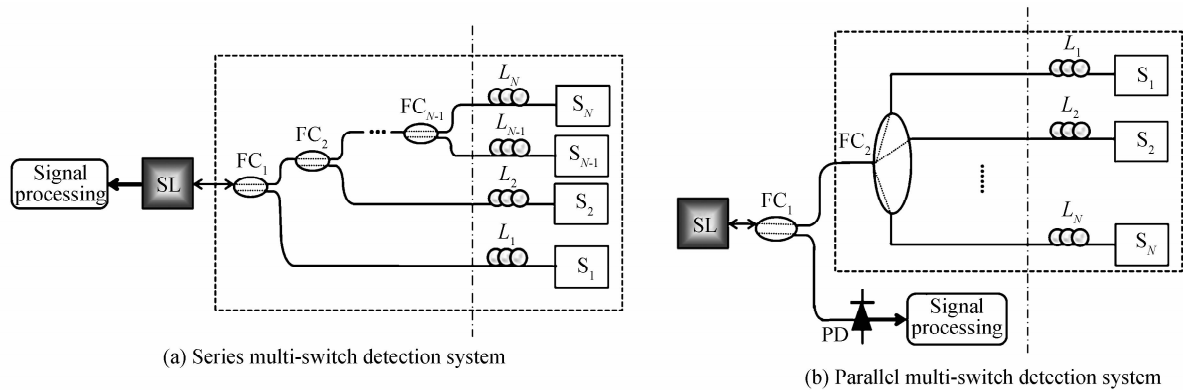


图 1 检测系统结构

Fig. 1 Detection system structure

多开关传感网络通过耦合器分成 N 个支路, 各支路通过一段长为 L_i 的光纤连接一个强度反射式光开关 S_i ($1 \leq i \leq N$), 开关的不同状态形成不同的反馈网络. 多开关传感网络可以采用串联结构或并联结构, 或串并联混合结构. 这里的串联结构指通过 $N-1$ 个 1×2 的光纤耦合器 FC_i 逐级分成 N 个分支, 如图 1(a) 所示. 而并联结构则是指通过一个 $1 \times N$ 的耦合器 FC_2 一次分成 N 个支路, 如图 1(b) 所示. 只要能在最终的检测结果中分辨出不同的开关位置, 各段光纤的长度 L_i 可以根据实际检测的需要灵活地确定. 因此, 尽管混沌信号非零的自相关峰的半高宽 (Full-Width at Half-Maximum, FWHM) 使得系统存在一定的分辨率限制^[9], 但可以通过调节光纤长度来克服. 对并联型多开关传感网络, 光纤长度 L_i 不能等长, 其差异应大于混沌信号自相关峰 FWHM 决定的分辨率长度. 串联或串并联混合结构也要使开关到激光器的光纤总长度的

差满足分辨率要求.

S_i 的开关状态与反射光强大小的对应关系可以根据实际需要确定. 定义小的反射率甚至无反射为开关的闭合状态, 而大的反射率为打开状态. 这样定义可以使系统在开关闭合时没有光反馈, 只有开关打开时才有光反馈, 以方便开关状态的检测. 当然, 也可以做相反的定义和设计.

对开关的具体结构也没有特别要求, 只要能实现强度反射式光开关的功能即可. 根据上述思想, 强度反射式光开关设计成如图 2 所示的结构. 光纤 F_1 的一端接一个反射镜 M , 另一端接一个自聚焦透镜 L . 光纤 F_2 的尾部装在一个铁管里, 铁管末端有一个支点 F . 铁管被固定在待监测目标, 如门窗或井盖上的磁铁吸引, 略向上翘起, 此时光路是不通的, 对应于开关闭合状态. 一旦待监测目标被非法打开, 则固定在其上的磁铁也被移开, 内装光纤 F_2 的铁管由于重力作用落入光纤槽内, 与光纤 F_1 通过自聚焦透镜对准, 光路即被接通, 对应于开关打开状态.

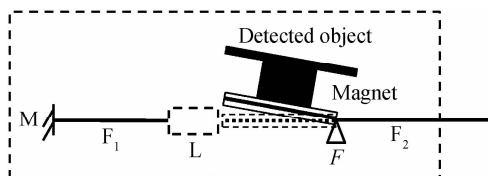


图 2 一种强度反射式光开关的结构示意图
Fig. 2 Sketch map of the structure of an intensity reflection optical switch

图 1 中激光器和耦合器以及各耦合器之间都是通过尾纤直接相连. 竖直的点划线左边部分可以放在监控室里, 只需把右侧的光纤 L_i 和开关 S_i 放于监测区域, 这一点对于监测区域在室外的情况很有用.

按照图 2 所示的开关结构, 正常情况下, 所有开关都为闭合状态, 各个反馈支路都没有光反馈, 或者反馈很弱, 可以忽略不计. 此时, 半导体激光器输出连续光. 当某个开关被打开时, 对应的支路形成足够强的光反馈, 激光器产生混沌光, 经光电探测器转变成混沌电信号. 只要检测系统输出的信号是否为混沌信号, 即可知道是否有开关被打开了. 但这样无法知晓开关被打开的数量, 也无法分辨是哪个开关被打开了. 为此, 本文采用混沌信号自相关法来判别各个开关的状态.

2 开关状态的检测方法

如果一个随机过程 $X(t)$ 是各态历经和广义平稳的, 则其自相关函数定义为^[6]

$$R_x(\tau) = \frac{1}{\sigma^2} \langle (x(t) - \mu)(x(t+\tau) - \mu) \rangle \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 是随机过程 $X(t)$ 的 2 个样本, $\mu = \langle x(t) \rangle$ 是 $x(t)$ 的均值, $\sigma = \langle (x(t) - \mu)^2 \rangle^{1/2}$ 是 $x(t)$ 的方差, $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均. 自相关函数揭示了 $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 两样本间的线性关系或相似程度.

光反馈半导体激光器系统输出的混沌信号是一种随机信号, 其自相关曲线除了零延迟时间处的自相关峰, 称为主峰, 还存在多个具有相等延迟时间间隔 τ 的自相关峰, 称为次峰. τ 即是系统的反馈时延, 也是第一个次峰出现的延迟时间, 且延迟时间越大, 次峰越小, 如图 3 所示. 因此, 只需知道第一个次峰的延迟时间 τ 即可获知反馈时延. 当系统包含 N 个反馈腔, 则在最长的反馈时延范围内每个反馈时延都对应一个自相关次峰, 这些次峰的延迟时间记作 $\tau_i, i=1, 2, \dots, N$.

对于多开关状态检测系统, 所有开关都闭合时, 系统没有反馈, 输出信号的自相关曲线只有主峰, 没有次峰. 而当有开关被打开时, 系统出现光反馈, 输出信号的自相关曲线会出现与该开关位置对应的次峰, 次峰的延迟时间 τ_i 等于光从激光器到该开关的往返时间 t_i , 即

$$\tau_i = t_i = \frac{2(L_i + L_t) \times n}{c} \quad (2)$$

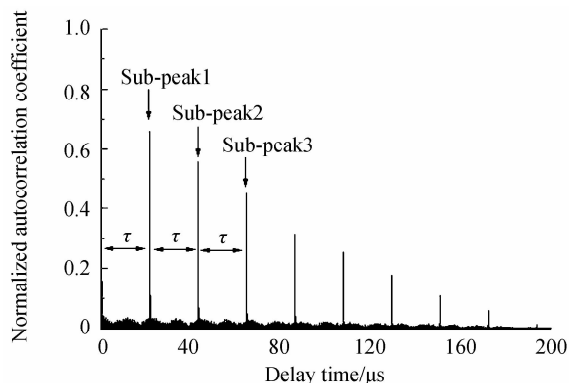


图 3 单光反馈半导体激光器系统的混沌信号的自相关曲线
Fig. 3 Autocorrelation curve of the chaotic signal from a semiconductor laser system with a single optical feedback

式中, L_i 为与光开关 S_i 相连的光纤长度, L_c 为激光器与耦合器以及耦合器之间的尾纤长度之和. c 为真空中的光速, n 为光纤纤芯的折射率, 可近似取作 1.47, $i=1, 2, \dots, N$, N 为待测状态的开关数. 因此, 通过有无次峰出现可判断是否有开关被打开, 次峰的延迟时间与激光器的光到达哪个/些开关的往返时间一致来判断哪个/些开关被打开.

但有多个光开关同时被打开时, 自相关曲线也会出现一些与开关位置不符的干扰次峰. 由于各个开关的位置是确定不变的, 通过软件编程把混沌信号的自相关函数乘以一个特定的脉冲序列来消除干扰峰. 脉冲序列如图 4 所示, 其幅度在与开关位置对应的时间 τ_i 为“1”, 而在其它时间都为“0”. 即与开关位置对应的自相关系数保持不变, 其它位置处的系数都置零. 根据混沌信号自相关峰的 FWHM^[9] 选取一个合适的脉冲宽度. 这种处理方法相当于给自相关函数加一个时间开关, 只在与开关对应的次峰的延迟时间打开开关, 其它时间开关都闭合. 这样处理后, 不仅消除了干扰峰, 也消除了非监测点的噪声影响, 使得自相关曲线只在与每个开关对应的延迟时间 τ_i 才有非零的自相关次峰.

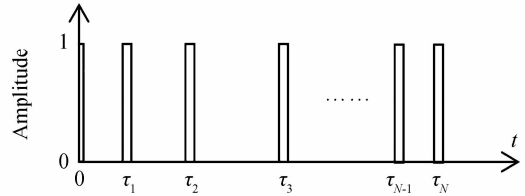


图 4 消除干扰峰使用的脉冲序列示意图

Fig. 4 Sketch map of the pulse train used to eliminate the interference sub-peaks

所有开关都闭合时, 各开关对应的自相关峰值为系统噪声在相应位置的自相关系数; 若有其它开关打开, 则闭合状态的开关对应的自相关峰值为混沌自相关曲线的基底系数. 无论是系统噪声的自相关系数, 还是混沌自相关曲线的基底系数, 一般都很弱, 可以看作是一个很弱的次峰. 而一旦某个开关被打开, 对应的次峰则明显变强. 因此可以设定一个合适的阈值, 分别比较每个开关所对应的次峰峰值是否大于该阈值, 即可得知该开关是否为打开状态.

根据开关闭合与打开状态下的次峰的差异来确定系统的检测阈值. 根据噪声的自相关系数和多个混沌信号的自相关曲线的基底系数的最大值确定阈值的下限, 开关打开状态下的最小自相关峰值作为阈值的上限. 一般来说, 开关闭合与打开时的自相关系数的对比度是比较大的, 确定一个合适的阈值并不困难.

3 实验

3.1 实验装置

搭建一个串联结构的三开关实验系统, 如图 5 所示. 半导体激光器 SL 的输出光经过一个 2×2 耦合器 FC_1 分成两路. 20% 的耦合光经光电探测器 PD 送入示波器 OSC 进行数据采集. 另外 80% 的直通光经过第二个 2×2 耦合器 FC_2 后, 平分成两路, 一路经过长约 2.187 km 的光纤盘 F_1 后由反射镜 M_1 反射回去, 另一路再经过第三个 2×2 耦合器 FC_3 平分成两路, 分别经过长约 0.895 km 的光纤盘 F_2 和 3.094 km 的光纤盘 F_3 后, 分别接反射镜 M_2 和 M_3 . 这里用是否接入反射镜代表光开关的打开与否. 与反射镜连接的光纤接头为 FC/APC 型, 未接入反射镜时光纤末端没有反射. 功率计 PM 接在耦合器 FC_2 闲置的一个端口, 用于监测反馈光的强度. 另外, 为了减少不必要的反馈光, 所有 FC/PC 型光纤接头涂覆光纤匹配膏. 所有光器件的尾纤长度约为 1 m, 计算光开关与激光器的距离时也都要考虑, 加上 3 盘光纤 $F_1 \sim F_3$ 的长度, 算得光从激光器到反射镜 M_1 、 M_2 和 M_3 的往返时间分别约 $t_1 = 21.5 \mu\text{s}$, $t_2 = 8.85 \mu\text{s}$, $t_3 = 30.4 \mu\text{s}$.

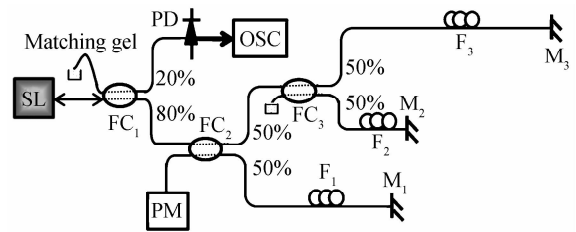


图 5 实验系统结构图

Fig. 5 Experimental system structure

SL 为内部没有隔离器和光电探测器的分布反馈 (Distributed Feedback, DFB) 激光器模块, 其工作波长为 1528 nm. 光电探测器带宽为 1.25 GHz. 示波器的检测带宽为 250 MHz, 最高采样率为 1 GS/s.

3.2 实验结果

图 6 为反射镜不同接入情况下得到的实验结果. 图 6 中第 1 行为系统输出的时域波形, 第 2 行为第 1 行波形的自相关曲线, 第 3 行为第 2 行自相关曲线消除干扰峰后的结果. 图 6 中第 1 列对应于 3 个平面镜都没有接入时的情况. 此时, 系统不含反馈腔, 所以在图 6(d) 中, 自相关曲线没有次峰. 图 6 中第 2 列是只接入反

射镜 M_1 时的结果. 系统中只有一个反馈腔,所以在图 6(e)中,自相关曲线只在 $\tau_1 = 21.5 \mu\text{s}$ 处出现了次峰,而 τ_1 正好等于光从激光器到反射镜 M_1 的往返时间 t_1 . 第 3 列对应于同时接入三个反射镜时的情况. 系统中三个反馈腔共存,所以图 6(f)的自相关曲线在反射镜 M_1 、 M_2 和 M_3 对应的时延位置处都出现了次峰.

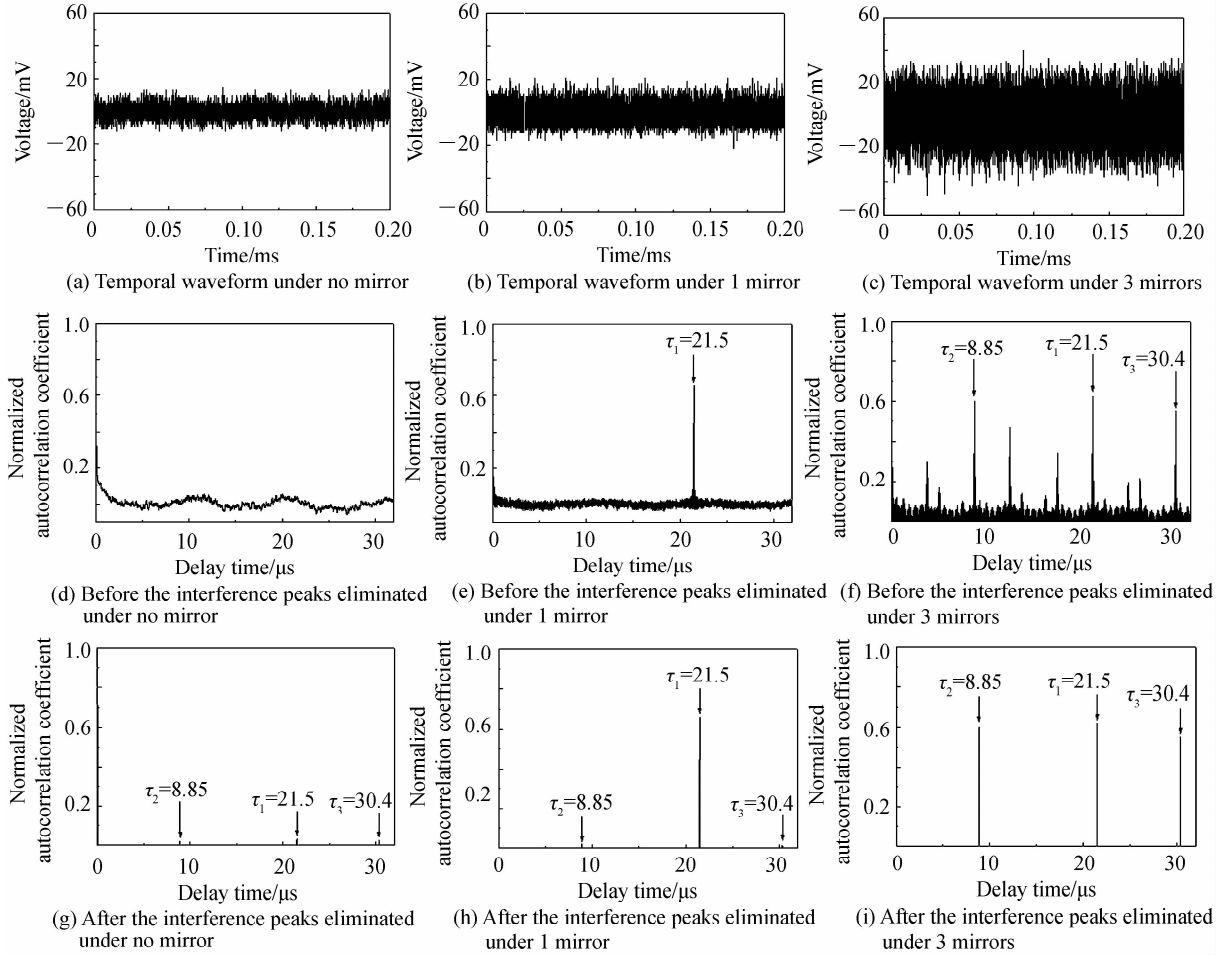


图 6 反射镜不同接入情况下的输出波形及其消除干扰峰前后的自相关曲线

Fig. 6 Waveforms and autocorrelation curves before and after the interference sub-peaks eliminated under different mirrors action

从图 6(f)还可看出,当有多个反射镜接入到系统时,自相关曲线除了 3 个反射镜对应的时延位置出现自相关次峰,确实还有其它干扰次峰存在.但从图 6(g)~(i)可以清楚地看出,经前述方法消除干扰峰后,只有每个光开关对应的时延位置处有一个非零的自相关次峰.当光开关处于闭合状态时,其对应的次峰值都在 0.05 以下,参见图 6(g), (h),而一旦其被打开时,对应的次峰值都高达 0.5 以上,参见图 6(h), (i).因此,可以设定阈值为 0.1,分别比较三个光开关对应的时延位置的自相关次峰值是否大于 0.1,即可准确判断它们的开关状态.

4 分析与讨论

根据文献[6,10],反馈较弱时,光反馈半导体激光器系统输出的混沌信号的自相关次峰随反馈强度的增大而减小.因为此时反馈较弱,激光器固有的非线性作用和反馈光的作用相当.但超过一定反馈强度后,自相关次峰反而随反馈强度的增大而增大.各支路的反馈强度系数 k_i 受到多个因素的影响.除了半导体激光器自身因素外,还有多开关传感网络的支路数 N 和光开关 S_i 的反射率 r_i 等因素.尽管反馈时延的增大对自由空间光反馈系统的混沌信号自相关次峰的大小几乎没有影响^[10],但长的光纤系统不得不考虑光纤损耗的影响.因此,各支路对应的光纤长度 L_i 也要作为影响反馈强度大小的一个因素.比如,对并联型多开关传感网络,有

$$k_i = (1 - r_0^2) \sqrt{r_i / N} \exp(-2aL_i) / \tau_m r_0$$

式中 r_0 为激光器内腔端面的反射系数, τ_m 为光在半导体激光器内腔的往返时间, $a=0.2$ dB/km 为光在光纤中的衰减系数. 每增加 1 km 光纤长度, 反馈强度系数 k_i 减小 $1-\exp(-2a/8.686)\approx 4.5\%$. 光开关反射率每下降 1%, k_i 减小 10%. 光分支数由 N 增加到 $N+1$, k_i 减小 $\sqrt{1/(N+1)}$ 倍.

另外, 文献[6]还发现, 反馈较弱时, 次峰的时延与反馈时延是有偏差的, 但随反馈强度的增大, 次峰的时延与反馈时延的差异呈单调减小趋势.

此外, SL 的工作电流越大, 次峰的时延和反馈时延的最大偏差越小^[6]. 尽管偏差可能还不到 1ns, 但如果开关到激光器的光纤较短, 反馈时延也在 ns 级, 则偏差不可忽视, 否则容易造成误报.

因此实际布设系统时, 应该综合考虑所使用的半导体激光器的混沌波形的自相关峰值的大小与时延, 确定合适的分支数以及各分支的光纤长度和光开关的反射率. 尽量使各反馈支路的反馈强度都比较大, 以便在各开关被打开时都能获得大的自相关次峰值. 同时也要使各开关对应的自相关次峰分布均匀. 对于半导体激光器的工作电流, 要适当选用较大的数值, 建议选择阈值电流的 1.2~1.5 倍左右. 考虑到激光器电流的波动, 以理论上的自相关次峰的时延为中心, 适当扩大图 4 中的脉冲宽度, 可把电流不稳造成的自相关次峰的时延误差抵消.

光纤沿线各种应力作用以及光开关强度反射性能下降等因素都会降低反馈强度的大小, 进而造成自相关次峰的降低. 通过把判决的阈值适当调低, 可以抵抗这些因素的影响. 本文实验中选取的阈值明显偏低.

另外, 需要注意的是, 各反馈腔的长度之差需大于由混沌信号自相关峰 FWHM 决定的系统分辨率.

5 结论

本文提出并论证了一种基于光反馈半导体激光器的多开关状态检测系统. 该系统由半导体激光器携带多个以耦合器、光纤和强度反射式光开关组成的反馈腔构成. 通过检测与开关位置对应的系统输出信号的自相关次峰是否大于预设阈值, 实现对多个开关工作状态的远程检测. 本文的研究成果可用于安防领域, 监控那些只有两个工作状态的设备, 也拓展了光反馈半导体激光器的应用范畴, 特别是在大家都在设法抑制混沌信号包含的时延信息时, 却把它用于传感, 为该领域的研究提供了一种新思路.

参考文献

- [1] XIE Kong-li, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling. 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.
- [2] FANG Nian, WANG Lu-tang, HUANG Zhao-ming, *et al.* Discrete multi-target on-off states detection and location with optical fiber sensing system[C]. SPIE, 2012, **8561**: 85611F.
- [3] OLIVER N, JÜNGLING T, FISCHER I. Consistency properties of a chaotic semiconductor laser driven by optical feedback[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(12): 123902.
- [4] WU Yuan, WANG Yun-cai, LI Pu, *et al.* Can fixed time delay signature be concealed in chaotic semiconductor laser with optical feedback? [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(11): 1371-1379.
- [5] XIANG Shui-ying, WEN Ai-jun, ZHANG Hao, *et al.* Effect of gain nonlinearity on time delay signature of chaos in external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, **52**(4): 1100207.
- [6] RONTANI D, LOCQUET A, SCIAMANNA M, *et al.* Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback; a dynamical point of view [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(7): 879-891.
- [7] LI Song-sui, CHAN Sze-chun. Chaotic time-delay signature suppression in a semiconductor laser with frequency-detuned Grating feedback [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, **21**(6): 1800812.
- [8] MU Peng-hua, PAN Wei, YAN Lian-shan, *et al.* Experimental evidence of time-delay concealment in a DFB laser with dual-chaotic optical injections [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(2): 131-134.
- [9] WANG An-bang, WANG Na, YANG Yi-biao, *et al.* Precise fault location in WDM-PON by utilizing wavelength tunable chaotic laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(21): 3420-3426.
- [10] HEILGENTHAL S, JÜNGLING T, DHUYS O, *et al.* Strong and weak chaos in networks of semiconductor lasers with time-delayed couplings [J]. *Physical Review E*, 2013, **88**(1): 012902.