

文章编号:1004-4213(2011)07-0967-5

基于相位载波复用的光纤周界安防系统及其实现方法

吴媛, 卞庞, 肖倩

(复旦大学 材料科学系, 上海 200433)

摘 要:提出一种利用相位载波的调制解调技术实现白光干涉系统复用的周界安防新方法. 该系统在单芯反馈式白光干涉系统的若干感应端, 分别串接工作在不同频率的相位调制器. 首先利用相位调制技术, 将不同干涉子系统的感应端的触发信号从频域上分开; 再使用相位解调技术, 从同一干涉系统输出信号中获得相应于不同感应端的独立时域信号. 实验中通过布设在现场的传感光纤对区域环境振动实现实时记录, 用白光干涉方法实现振动信号的提取, 利用相位载波复用实现不同区域的定位. 理论分析和测试结果表明: 通过相位载波复用技术, 实现不同传感端共用一套干涉系统的方法, 可以显著减小周界安防系统的复杂程度, 降低系统成本; 该方法能对环境触发信号进行实时监控, 并能快速、有效地确定扰动信号的所属区域, 具有较高的灵敏度, 有利于在大区域、长距离的监控领域获得实施.

关键词:单芯反馈式白光干涉系统; 相位载波复用; 周界安防

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114007. 0967

0 引言

近年来, 伴随着光电技术、计算机技术和集成电路技术的发展、具有抗腐蚀、抗环境干扰、无电磁辐射、传输传感合一、无中继传输距离长等优点的光纤传感技术, 在安防系统中得到了应用^[1-2]. 其中单芯反馈式白光干涉系统^[3]的反馈结构使光前后两次经过扰动点, 灵敏度加倍, 且其单芯结构不用形成环路, 使用方便. 该结构在长距离铺设的应用环境中尤显其灵活性. 在传统的使用中^[4], 以单芯反馈式白光干涉系统为基础的周界安防系统通常采用两种实现方式: 串联和并联. 对于串联方式, 采用一根连续的光缆连续铺设在需防范区域的周界上, 即一根光缆贯穿于周界的各区域, 采用一定的定位算法^[5], 计算出入侵发生的位置或区域. 这种串联方法的缺点是对于完全同时发生的入侵的行为, 无法实现定位; 当感应光缆有一个断点, 整个安防系统全部处于瘫痪状态. 对于并联方式, 是在周界的不同区域铺设各一根感应光缆, 每根光缆对应于一个光路干涉系统. 并联方案克服了串联方案种的上述缺点, 但由于每个区域都需要一套光路干涉系统, 不利于在大范围、长距离周界安防上应用.

针对周界安防系统中存在的问题, 本文提出了利用相位调制解调技术实现白光干涉系统复用的新型周界安防系统, 从而实现多路扰动信号复用同一白光干涉系统, 大大降低安防周界中因分区所需的干涉系统的数量. 该系统特别适用于军事重地、监狱、银行、博物馆、机场等高保密要求或大范围周界安全需求的区域.

1 系统结构及理论分析

1.1 系统结构

图 1 为采用相位载波复用方案的单芯反馈式全

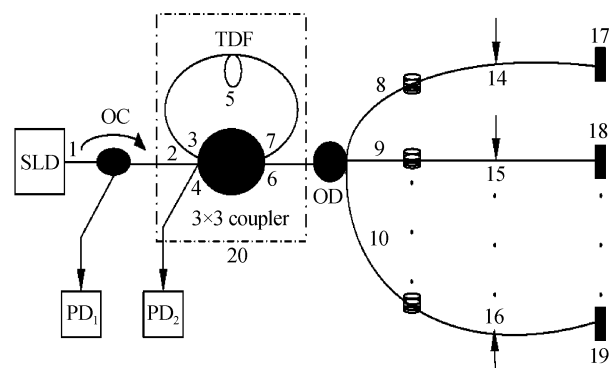


图 1 基于相位载波复用的全白光干涉系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of white light interference system based on phase carrier multiplexing

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB327805) 和国家高技术研究发展计划 (No. 2008AA040207) 资助

第一作者: 吴媛 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与信号处理. Email: 09210300031@fudan. edu. cn

通讯作者: 肖倩 (1973-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: ychunww@163. com

收稿日期: 2011-01-18; 修回日期: 2011-03-23

光纤白光干涉系统原理图. 该系统包括超辐射发光二极管 (Super Luminescence Diode, SLD) 光源, 环形器 (OC), 光纤耦合器 (Fiber Coupler, FC), 分路器 (OD), 光电探测器 (PD₁ 和 PD₂), 一段光纤延迟线, 相位调制器 (11、12、13) 及反射装置 (17、18、19). 其中, 相位调制器是将光纤绕在压电陶瓷上制作而成.

由图 1 可以看出, 分路器的不同输出端口 (传感端口) 分别接入传感光纤 (8、9、10), 每路传感光纤和相应的反馈装置 (17、18、19) 皆可与共同的干涉装置 (20) 构成一个干涉子系统, 从而每个干涉子系统在耦合器产生干涉信号进入光电探测器. 由于使用白光干涉, 光源的相干长度只有微米量级, 各传感光纤的长度差很容易超过这个值, 因此, 每根传感光纤, 对应的干涉子系统是相互独立的, 即这些独立子系统间的光信号不发生干涉.

因此, 该系统的光路为: a) 1-2-6-8-17-8-6-3-5-7; b) 1-2-7-5-3-6-8-17-8-6; c) 1-2-6-9-18-9-6-3-5-7; d) 1-2-7-5-3-6-9-18-9-6; e) 1-2-6-10-19-10-6-3-5-7; f) 1-2-7-5-3-6-10-19-10-6.

在这些光束中, 根据等光程相干原理, a) 和 b), c) 和 d) 以及 e) 和 f) 分别构成相干光束在耦合器中形成干涉, 分别构成干涉子系统 I、干涉子系统 II 和干涉子系统 III.

这个系统的原理是当扰动信号作用于感应光纤时, 光纤传光特性 (相位与光强) 会发生变化, 通过检测光纤的光相位和光强变化, 对各种进入周界的侵入行为进行实时监测^[6]. 同时, 在光路系统中施加相位载波, 利用相位载波的调制解调技术实现多路扰动信号复用同一白光干涉系统, 从而大大降低安防周界中因分区所需的干涉系统的数量.

1.2 相位调制解调原理

干涉型光纤传感器通过将测量量转化为光信号的相位, 因此, 相位测量是该类型传感器信号处理的基本要求. 如果是直接对相位进行测量, 那么系统受到外界干扰时, 被测相位会产生随机漂移, 从而引入测量误差, 导致信号衰减. 同时, 直接测量相位意味着直接检测, 信号处理容易受电路直接漂移的影响. 针对以上问题提出了相位生成载波技术. 相位生成载波调制是在被测信号带宽以外的某一频率之外引入大幅度的相位调制, 被测信号则位于调制信号的边带上, 这样就把外界干扰的影响转化为对调制信号的影响, 并且把被测信号的频带与低频干扰的频带分开, 从而减少了系统固有噪音干扰^[7]. 因此, 为了将各子干涉系统的干涉信号分别提取出来, 在每路传感光纤中都串接一个相位调制器. 本系统的相

位调制器是将光纤绕在压电陶瓷上制作而成. 其调制原理为当压电圆柱受到调制电压激励时, 柱体就会在调制电压的作用下产生电致伸缩效应, 引起光纤长度, 折射率发生变化, 导致干涉仪输出光波的相位差随调制信号有规律的变化, 从而实现了相位载波调制^[8].

对于含有 n 路传感端的复用系统, 探测器 (PD₁ 和 PD₂) 获得信号的交流部分可以分别表示为

$$P' = P_1 + P_2 + \dots + P_n = p_1 \cos[\varphi_{01} + \Delta\varphi_1 + \varphi_{m_1} \cdot \cos(2\pi f_{m_1} t)] + p_2 \cos[\varphi_{01} + \Delta\varphi_2 + \varphi_{m_2} \cdot \cos(2\pi f_{m_2} t)] + \dots + p_i \cos[\varphi_{01} + \Delta\varphi_i + \varphi_{m_i} \cdot \cos(2\pi f_{m_i} t)] + \dots + p_n \cos[\varphi_{01} + \Delta\varphi_n + \varphi_{m_n} \cdot \cos(2\pi f_{m_n} t)]$$

$$P'' = P_1 + P_2 + \dots + P_n = p_1 \cos[\varphi_{02} + \Delta\varphi_1 + \varphi_{m_1} \cdot \cos(2\pi f_{m_1} t)] + p_2 \cos[\varphi_{02} + \Delta\varphi_2 + \varphi_{m_2} \cdot \cos(2\pi f_{m_2} t)] + \dots + p_i \cos[\varphi_{02} + \Delta\varphi_i + \varphi_{m_i} \cdot \cos(2\pi f_{m_i} t)] + \dots + p_n \cos[\varphi_{02} + \Delta\varphi_n + \varphi_{m_n} \cdot \cos(2\pi f_{m_n} t)] \quad (1)$$

式中, φ_{01} 、 φ_{02} 为该干涉系统的初始相位, p_i 是第 i 路干涉子系统的交流分量的幅度, $\Delta\varphi_i$ 为感应光纤受扰动产生的相位信号, φ_{m_i} 、 f_{m_i} 为该路干涉子系统调制器施加的相位载波 (余弦信号) 的幅度和频率.

各干涉子系统原理相同, 这里仅讨论其中第 i 路干涉子系统. 将 p_i 用贝塞尔函数展开后, 变为

$$P_i = p_i \cos[\varphi_0 + \Delta\varphi_i + \varphi_{m_i} \cos(2\pi f_{m_i} t)] = p_i \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) [J_0(\varphi_{m_i}) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k}(\varphi_{m_i}) \cos(4k\pi f_{m_i} t)] - p_i \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) \cdot [2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_{m_i}) \cos(2(2k+1)\pi f_{m_i} t)] = p_i \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) [J_0(\varphi_{m_i}) - 2J_2(\varphi_{m_i}) \cdot \cos(4\pi f_{m_i} t) + \dots] - p_i \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) \cdot [2J_1(\varphi_{m_i}) \cos(2\pi f_{m_i} t) - 2J_3(\varphi_{m_i}) \cdot \cos(6\pi f_{m_i} t) + \dots] \quad (2)$$

式中, 将初始相位 φ_{01} 、 φ_{02} 统一表示为 φ_0 .

从式 (2) 可以看出, $2p_i J_1(\varphi_{m_i}) \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) \cdot \cos(2\pi f_{m_i} t)$ 的频谱是将时域信号 $\sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i)$ 的频谱特征从 0 频率附近平移到频率 f_{m_i} 处, 当 f_{m_i} ($i=1, 2, \dots, n$) 各不相同, 且间距足够大, 就可以将其相应的干涉子系统信号的频谱特征通过谱的平移彻底分开.

信号解调过程可以通过硬件实现, 也可以用软件来实现, 类似的信号解调技术也很多^[7-9]. 本文采用硬件解调的方式, 通过同步解调技术, 对不同的载波信号采用相应的参考频率信号与式 (2) 的信号进行混频, 然后用适当的低通滤波器滤除高频项, 就可以把含有被测信号的边带信号提取出来, 如式 (3)

$$P_{i_1} = 2p_i J_1(\varphi_{m_i}) \sin(\varphi_{01} + \Delta\varphi_i) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$P_{i_2} = 2p_i J_1(\varphi_{m_i}) \sin(\varphi_{02} + \Delta\varphi_i) \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中,当 $\varphi_{m_i} \approx 1.8 \text{ rad}$ 和 $J_1(1.8) = 0.53$ 时,可得到最大灵敏度.因此,选取适当的施加在调制器上的相位载波的幅值,使系统达到最大灵敏度^[10].

因而,通过相位调制解调技术,获得各干涉子系统独立的时域信号,实现干涉光路的复用.其具体相位载波调制解调方案流程如图 2.

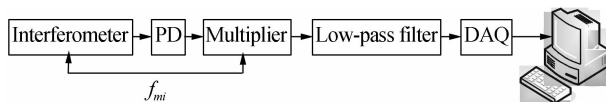


图 2 相位载波调制解调方案流程图

Fig. 2 Flowchart of the phase carrier demodulation

对于上述的解调方案,要将各子系统平移的频谱彻底分开,确保各个干涉子系统之间没有串扰,调制信号的频率分布必需满足:1)对于任意第 i 个干涉子系统,调制频率 f_{m_i} 应远大于扰动信号频率;2)在基频 f_{m_i} 和倍频之间 ($i=1, 2, \dots, n$),相邻频率的间距应远大于扰动信号的带宽.

由此可见,这种基于相位载波复用的光纤周界安防系统,使用相位调制技术,可将不同干涉子系统的干涉信号从频域上分开;使用解调技术,将分开的各干涉子系统信号分别解调出来,获得各干涉子系统的独立时域信号.

2 实验

在本实验中,光纤周界安防系统采用的是图 3 所示的光路结构.其中,监控区域周界分成 3 个区,每个区分别对应一根感应光缆((1a)、(1b)、(1c)),每根光缆分别对应着一个反馈装置((2a)、(2b)、(2c))^[11].每路感应光纤和相应的反馈装置皆可与共同的干涉光路构成一个干涉子系统(I、II、III).实验装置包括 SLD 光源(中心波长为 1 310 nm,谱宽为 35 nm,功率为 3 mW),光纤的折射率为 1.47.三个相位调制器(PZT)用来施加载波.多路分路器采用 3×3 耦合器.当人在布设光纤的区域跳跃或走动时,探测器处获得的触发信号频谱宽度小于 4 kHz.根据图 3,干涉子系统 I 中的 PZT1 施加载波的频率为 100 kHz,幅度为 1.94 V.干涉子系统 II 中的 PZT2 施加载波的频率为 167 kHz,幅度为 5.86 V.干涉子系统 III 中的 PZT3 施加载波的频率为 245 kHz,幅度为 1.13 V.干涉光路置于屏蔽盒中以避免干扰.利用 National Instrument 公司的 DAQ 采集卡(PCI-6224)将数据采集到计算机内,并用图形化编程软件 Labview 读取采集到的信号(3),可以进行防区定位.

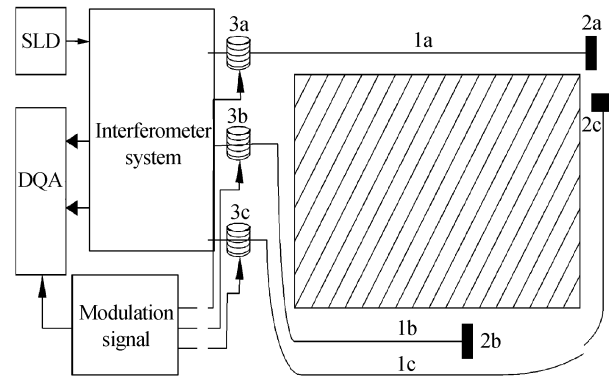


图 3 采用相位载波复用方案的单芯反馈式全光纤白光干涉系统图

Fig. 3 Scheme of single core feedback full fiber based on phase carrier multiplexing

当扰动信号作用于感应光缆 1b(干涉子系统 II)时,图 4(a)为采集得到的各子系统的干涉信号;图 4(b)为各子系统的干涉信号局部放大图.其中,信号线 1、6 对应的是干涉子系统 I,信号线 2、5 对应的是干涉子系统 II,信号线 3、4 对应的是干涉子系统 III.

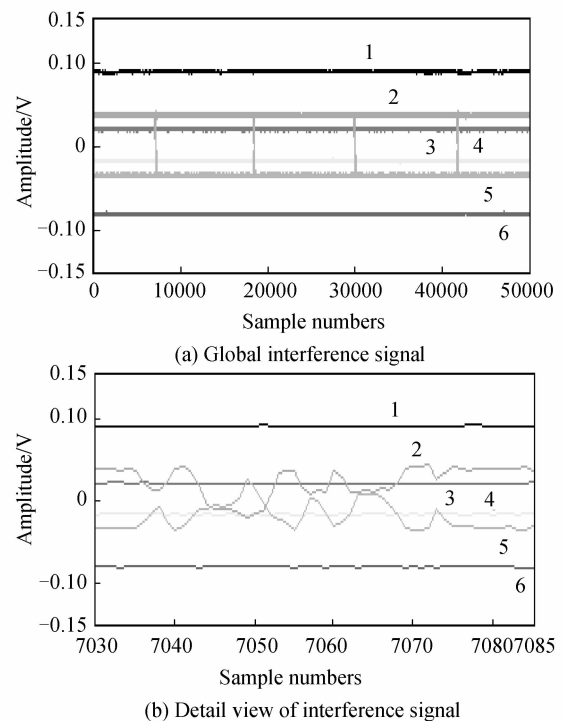


图 4 当扰动信号作用于感应光缆 1b(干涉子系统)时,采集得到各子系统的干涉的信号

Fig. 4 Interference signals of subsystem II

当扰动信号作用于感应光缆 1a 和 1c(干涉子系统 I 和干涉子系统 III)时,图 5(a)为采集得到的各子系统的干涉信号;图 5(b)为各子系统的干涉信号局部放大图.其中,信号线 1、6 对应的是干涉子系统 I,信号线 2、5 对应的是干涉子系统 II,信号线 3、4 对应的是干涉子系统 III.

当扰动信号作用于感应光缆 1a、1b 和 1c(干涉

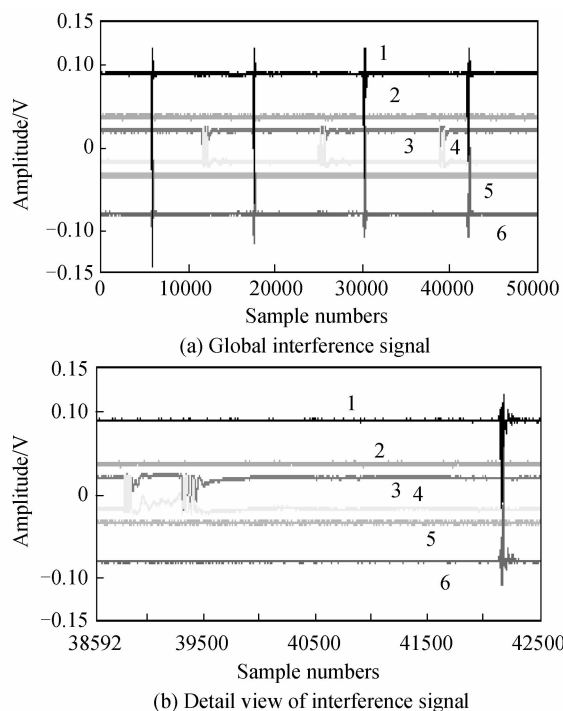


图5 当扰动信号作用于感应光缆 1a 和 1c(干涉子系统 I 和 II)时,采集得到各子系统的干涉的信号
Fig.5 Interference signals of subsystems I and II (干涉子系统 I、干涉子系统 II 和干涉子系统 III)时,3 个区域同时触发报警.图 6(1)为采集得到的各子系统的干涉信号;图 6(2)为各子系统的干涉信号局部放大图.其中,信号线 1,6 对应的是干涉子系统 I,信

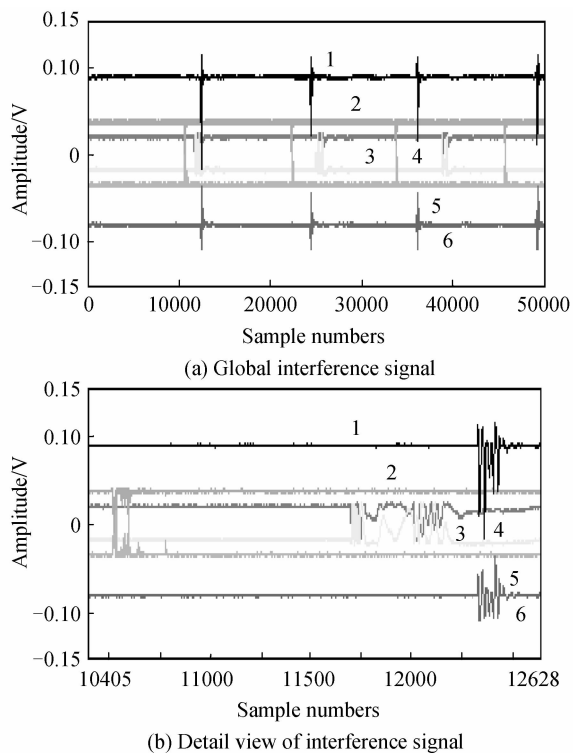


图6 当扰动信号作用于感应光缆 1a、1b 和 1c(干涉子系统 I、II 和 III)时,采集得到各子系统的干涉的信号
Fig.6 Interference signals of subsystems I, II and III

号线 2,5 对应的是干涉子系统 II,信号线 3,4 对应的是干涉子系统 III.

由图 4~6 可以看出,这种基于相位载波复用的光纤周界安防系统,当有入侵扰动时,只会触发被扰动区报警,未被入侵的区域没有脉冲出现,无报警.

3 结论

基于相位载波复用的光纤周界安防系统可以大大减少干涉系统的用量,克服了传统的并联方案中干涉系统潜在的过于庞大的缺点,尤其有利于在长距离、大范围的周界安防中使用.实验结果表明,该方法能对环境触发信号进行实时监控,并能确定信号所属区域.

参考文献

- [1] 孟克. 光纤干涉测量技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008.
- [2] UUAAREZ J C, ERIC W, CHOI K N, *et al.* Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Lightwave Technology*, 2005, **23**(6): 2081-2087.
- [3] SUN Yao, JIA Bo, ZHANG Tian-zhao. Position determination sensing system based on all-fiber interferometer with feedback loop [J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, **25**(1): 44-46.
- [4] 孙尧,贾波,张天照. 基于反馈环全光纤干涉的定位系统[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(1): 44-46.
- [5] 黎敏,廖延彪. 光纤传感及其应用技术[M]. 武汉:武汉大学出版社,2008.
- [6] HOFFMAN P R, KUZYK M G. Position determination of an acoustic burst along a sagnac interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(2): 494-498.
- [7] 王惠文,江先进,赵长明. 光纤传感技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [8] HUANG Jian-hui, CAO Mang, LI Da-cheng, *et al.* Review of phase generated carrier demodulation techniques for interferometric fiber-optic sensors[J]. *Optical Technology*, 2000, **26**(3): 228-231.
- [9] 黄建辉,曹芒,李达成,程晓辉. 用于干涉型光纤传感器的相位生成载波解调技术[J]. *光学技术*, 2000, **26**(3): 228-231.
- [10] TANG Ji. Research on scheme of phase detection of mach-zehnder optical fiber interferometer[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2000, **13**(2): 96-100.
- [11] 唐继. Mach-Zehnder 光纤干涉仪相位检测方案研究[J]. *传感技术学报*, 2000, **13**(2): 96-100.
- [12] DANRIDGE A, TVETEN A, GIALLORENZI T. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, **18**(10): 1647-1653.
- [13] LEFEVRE H C. 光学陀螺仪[M]. 张桂才,译. 北京:国防工业出版社,2004.
- [14] TANG Huang, WU Hong-yan, ZHANG Hua, *et al.* Application of fiber-optic encoding technology in multiple-zone intrusion detection system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(4): 912-915.
- [15] 唐璜,吴红艳,章骅,贾波. 光纤编码技术在区域定位监控中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(4): 912-915.

Fiber-optic Security System Based on Phase Carrier Multiplexing and its Realization Methods

WU Yuan, BIAN Pang, XIAO Qian

(Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A novel technology for security system was proposed based on phase carrier modulation-demodulation in this paper, to realize the multiplex of the white light interference system. In several sensing terminals of the single core feedback white light interference system, there are several phase-modulators which worked at different frequencies. The trigger signal in the different interference subsystems could be separated by phase modulation technology. The signals of the different interference subsystems could be demodulated by phase demodulation technology to have the independent time signal of the different interference subsystems. This method adopted fiber to sense certain environment vibration, obtained the vibration signal using white-light interferometry, and then located the vibration zone by means of phase carrier multiplexing. Theoretical analysis and experimental results show that it can realize the share of interference system of different sensing terminals based on the technology of phase carrier multiplexing. This technology can decrease the complexity of the security system and reduce the system cost. This method is able to monitor the vibration and locate the intrusion zone in real-time rapidly, effectively and sensitivity. Therefore this technology can be applied in large area and long distance multiple zone intrusion detection systems.

Key words: White light interference system based on single core feed back; Phase carrier multiplexing; Security system