

分布式光纤 Sagnac 干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法

皮少华 王冰洁 赵栋 贾波

Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer

Pi Shao-Hua Wang Bing-Jie Zhao Dong Jia Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 044210 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.044210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor

物理学报.2015, 64(6): 064213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064213>

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案

A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant

物理学报.2015, 64(4): 044205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044205>

基于辅助电介质层的棱镜表面等离子体共振效应研究

Study of prism surface plasmon resonance effect based on dielectric-aided layer

物理学报.2014, 63(3): 034207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034207>

仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量

Simultaneous measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured longperiod fiber grating

物理学报.2014, 63(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024206>

基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器

In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on fiber core etched air-bubble and core diameter mismatch for liquid refractive index sensing

物理学报.2013, 62(21): 214209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214209>

分布式光纤Sagnac干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法*

皮少华 王冰洁 赵栋[†] 贾波

(复旦大学材料科学系, 上海 200433)

(2015年7月29日收到; 2015年10月27日收到修改稿)

基于Sagnac结构的分布式光纤干涉仪具有灵敏度高和动态范围大等特点, 特别适合监测入侵信号, 并确定其发生位置. 不同于现有的时域自相关及频域陷波点定位方法, 本文提出将两相干光束相位差信号变换到倒谱域, 通过倒谱系数峰来方便准确地确定入侵位置. 此外, 为克服倒谱定位中降采样带来的分辨率粗糙问题, 提出了多分辨率定位综合的改进方法. 通过改变降采样因子和利用高阶倒谱峰两种措施对同一入侵信号得到一系列定位值, 并对所有定位值取平均作为入侵信号的最终定位值. 实验首先在距离传感光缆尾端40.498 km处制造3个入侵信号. 采用本文提出的倒谱方法对该入侵得到84个定位值, 综合后的定位误差分别只有9 m, 17 m和11 m, 显示了对入侵信号定位的准确性. 之后对不同位置的入侵信号进行定位, 7次实验的定位误差的标准差达到12 m, 而相同情况下的自相关方法和陷波点方法的定位误差标准差分别为695 m和118 m. 此外, 这种方法还具有操作简单、易于自动测量等特点, 有望在Sagnac干涉传感系统中发挥重要作用.

关键词: Sagnac干涉仪, 倒谱, 定位算法, 多分辨率

PACS: 42.81.Pa, 42.15.Eq, 42.25.Hz, 42.82.Bq

DOI: 10.7498/aps.65.044210

1 引言

智能传感物联网近年来得到大力发展, 各类智能安防产品层出不穷, 防护要求越来越高^[1-3]. 其中, 国境线^[4]、石油管道^[5,6]、电力线路^[7]和通信干线^[8]等重要区域由于距离长、地形复杂等特点, 其他手段^[9,10]监控非常困难. 而由于目标的特殊性, 非法入侵时常发生于线路沿线, 严重威胁系统安全. 一旦入侵发生, 快速响应警报^[11,12]、识别入侵种类^[13,14]、尽可能准确地给出入侵发生的位置^[15,16]是非常必要的, 能为巡逻人员排查提供针对性的指导, 大大缩短事件处置的时间. 例如大容量光缆通信干线, 由于一般埋于地下, 带来隐蔽性的同时也造成“误伤”频发, 一旦被挖断, 将造成巨大损失, 产生强烈的社会影响. 因此, 监控线路安

全, 尽早发现这类行为并给出准确的警报是非常必要的^[17-20].

基于白光干涉的分布式光纤Sagnac干涉仪^[21,22]可很好地解决这个问题, 它具有灵敏度高、动态范围大等特点, 特别适合对长距离线路进行分布式传感, 及时监测入侵并对其定位^[23]. 与其他技术^[24-26]相比, 它具有两个显著优点^[27-29]: 1) 它的两束相干光在静态条件下天然具有等光程, 因此能采用廉价的宽谱光源作为入射激光, 既降低了成本又提高了稳定性; 2) 它采用单芯光缆实现传感定位, 每个光束经过传感光缆两次, 有效地减少了环境噪声对测量结果的影响, 提高了检测信号的信噪比.

在这类干涉仪^[30,31]中, 入侵位置 L_x 被调制进两相干光束的相位差信号中, 表现为信号的延时 T .

* 国家科技支撑计划(批准号: 2013BAK02B03)、国家自然科学基金(批准号: 61107077)、国家自然科学基金科学仪器基础研究专款(批准号: 2014YQ090709)和上海市科委科技基金(批准号: 14DZ2281200, 14511101800)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhaodongfudan@163.com

一类算法是在时域信号中使用自相关函数等 [32,33] 时间延迟估计方法来计算入侵位置. 这类算法的优点是简单直接, 缺点在于信号常常重叠严重, 难以得到真实的自相关峰. 另一类算法是在频谱信号中寻找频率缺失的点 [22,30], 这些点被称为陷波点, 与延时 T 相关, 决定于入侵位置. 这类算法借助了频域分析的优点, 但也存在一些问题. 比如只依靠几个单独的频率成分, 而忽略大多数的频谱, 导致噪声对定位结果影响很大 [34]. 可信陷波点的选取很大程度上依靠研究者的经验, 难以实现自动化稳定监测.

借鉴语音信号中基音的提取技术 [35,36], 本文提出一种在倒谱域提取入侵位置的方法. 倒谱是指将信号的频谱经对数运算后再进行傅里叶逆变换的一种分析手段, 能将卷积运算转化成加法运算 [37,38]. 经过分析, 在倒谱域上, 构成相位差信号的两部分成分表现不同, 从而被成功地分离开. 其中含有入侵位置的成分在倒谱上表现为倒谱系数的峰, 直接读取峰值并乘以相应因子就可以确定定位值. 此外, 为克服求倒谱过程中对信号降采样带来的分辨率粗糙的问题提出了多分辨综合的改进办法, 包括扫描降采样因子和采用高阶系数峰. 每个降采样因子条件下的每阶系数峰都对应不同的分辨率, 定位的取值可能也不一样. 对一个入侵可得到多个定位值, 最后将所有有效定位值相加求取平均值, 给出入侵位置的最终定位值. 实验结果证明这种方法所得到的入侵位置估计值较为准确, 能更好地缩小报警区域, 提高快速应变能力.

2 系统定位原理

2.1 干涉仪结构

分布式光纤 Sagnac 干涉仪结构如图 1 所示. 由超辐射发光二极管 (SLD) 光源发出的红外光经耦合器 1 分成两束. 一束光从耦合器 1 的上端臂引出后, 由耦合器 2 导引进入延时线圈 4 传播, 并被法拉第旋转镜 5 反射后再经过延时线圈 4, 之后沿着耦合器 2 的另一条臂, 经由耦合器 3 进入传感光缆, 在传感光缆的尾端由另一个法拉第旋转镜 7 反射回来, 再经耦合器 3 的另一条臂到达耦合器 1, 这被称为延迟光束. 另一束光传播的路径正好相反, 从耦合器 1 的下端臂引出后, 直接进入耦合器 3, 并被导入传感光缆, 经法拉第旋转镜 7 反射后, 重新进入

耦合器 3, 由它的另一条臂进入耦合器 2, 并两次经过延时线圈 4, 最终和前一束光汇聚在耦合器 1 里, 这被称为直通光束. 两光束的完整传播路径如下:

延迟光束: 1-2-4-5-4-2-3-6-7-6-3-1,

直通光束: 1-3-6-7-6-3-2-4-5-4-2-1.

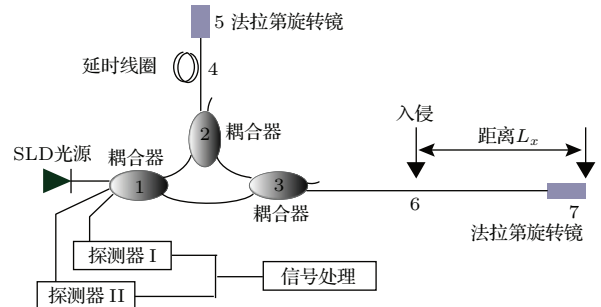


图 1 (网刊彩色) 分布式光纤 Sagnac 干涉仪结构框图
Fig. 1. (color online) Schematic diagram of distributed fiber optic Sagnac interferometer.

延迟光束和直通光束都通过了传感光缆两次, 且经过各器件的次数也一样, 因此它们具有等光程的特点, 在静态条件下相位差为零, 不发生干涉. 一旦传感光缆某处有入侵产生, 将使这两个光束分别产生相位变化. 由于延迟光束和直通光束到达入侵位置的时间不同, 且入侵在不同时刻对传感光缆施加的压强不同, 因此两光束产生的相位变化不同, 形成相位差, 从而发生干涉现象被探测器记录并进行信号处理 [39].

2.2 相位差

假设入侵发生在距离传感光缆尾端 L_x 的位置 6 处, 设激光两次经过此位置的时间间隔为 T , 则 T 与 L_x 的关系式可表示为

$$T = \frac{2n}{c} L_x. \quad (1)$$

已知光束两次经过延时线圈的时间为 τ , 不考虑光束在其他地方传播所需的时间, 那么直通光束和延迟光束之间的相位差可表示为

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t) &= \varphi(t) + \varphi(t+T) - \varphi(t+\tau) \\ &\quad - \varphi(t+\tau+T) \\ &= x(t) + x(t+T) \\ &= h(T) * x(t), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\varphi(t)$ 代表入侵对在光纤中传播的光束造成的相位变化, 它与入侵施加在光纤上的压强成正比, 反映了入侵的强度. 假设直通光束第一次到达入

侵入位置的时间是 t , 由于入侵改变了位置 6 处的光纤, 包括折射率和长度, 光束与没有入侵时相比, 将受到等于 $\varphi(t)$ 的相位变化. 由于法拉第旋转镜 7 的反射, 直通光束第二次到达入侵位置的时间就成了 $t + T$, 此时受到的相位变化是 $\varphi(t + T)$. 同理, 延迟光束两次到达入侵位置的时间分别是 $t + \tau$ 和 $t + \tau + T$, 因此, 延迟光束的相位变化分别是 $\varphi(t + \tau)$ 和 $\varphi(t + \tau + T)$. 将两光束的相位变化相减, 就是它们之间的相位差. 经过简化, 可用 $x(t)$ 代表单程的相位差, 用只含两个 δ 脉冲的 $h(T)$ 代表传递函数, 且这两个冲击的间隔是 T . 它们的具体形式如下:

$$\begin{aligned} x(t) &= \varphi(t) - \varphi(t + \tau), \\ h(T) &= \delta(t) + \delta(t - T). \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 倒谱定位

倒谱分析作为一种信号处理方法, 将信号中的卷积相乘运算变成倒谱域中的相加运算, 由于其对信号进行非线性运算, 从而十分适合分离信号与时延信息. 一般来说, 采集的信号 $s(t)$ 可以表示为源信号 $x(t)$ 与信道传递函数 $h(t)$ 的卷积, 传递函数通常表现为多径效应, 即同一信号通过不同的途径, 在不同的时刻到达采集器.

$$s(t) = h(t) * x(t). \quad (4)$$

信道传递函数往往包含系统工作的重要参数, 准确估计出传递函数的特征将有助于理解系统的状态. 如 (3) 式所示, 在分布式光纤 Sagnac 干涉仪中, 入侵位置的信息包含在信道传递函数 $h(t)$ 中, 表现为 T , 代表两个 δ 脉冲的间隔, 而 $h(t)$ 和 $x(t)$ 在时域非线性交叠在一起, 因此必须采用非线性的分离方法.

倒谱能将非线性问题转化到线性域, 源信号的特征与信道传递函数的特征在倒谱域占据不同的位置, 或者有不同的表现形式, 因此能够将两者区分开, 并对一些特征进行估计. 简单来说, 倒谱是对傅里叶变换谱信号进行对数运算后再求取逆傅里叶变换的结果, 它可以表示为

$$C(\tau) = F^{-1}[\log\{F[s(t)]\}], \quad (5)$$

其中, $F[\cdot]$ 和 $F^{-1}[\cdot]$ 分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换. 由于两信号卷积的傅里叶变换等于傅里叶

变换的乘积, 而对数运算能将乘积运算变成相加运算, 因此, 结合 (4) 式, (5) 式可表示为

$$\begin{aligned} C(\tau) &= F^{-1}[\log\{H(\omega)\}] + F^{-1}[\log\{X(\omega)\}] \\ &= C_h(\tau) + C_x(\tau), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $H(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 分别表示信道传递函数和源信号的频谱. 这样两信号卷积的倒谱就表示成了各自信号倒谱的和, 将卷积这种非线性运算转换成加和的线性运算. 将 (3) 式中干涉仪传递函数 $h(t)$ 的解析表达式代入, 可以得到传递函数的频谱 $H(\omega)$ 及倒谱系数 $C_h(\tau)$ 分别为

$$\begin{aligned} H(\omega) &= 2 + 2 \cos\left(\omega \frac{2nL_x}{c}\right), \\ C_h(\tau) &\approx \delta\left(\tau - \frac{2nL_x}{c}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

从 (7) 式可知, 传递函数 $h(t)$ 的倒谱 $C_h(\tau)$ 是一个单脉冲, 在 $\tau = 2nL_x/c$ 处取得峰值, 而在倒谱其余地方, 系数接近于 0, 这个特征使得直接识别 L_x 变得简单可行. 而源信号一般为短时冲击, 具有较宽的频谱, 延续性好, 从低频到高频缓慢衰减. 考虑理想情况下, 源信号的频谱均匀覆盖整个频率区域, 且无衰减, 表现为一条与水平线平行的横线, 经倒谱变换后, 倒谱系数也只在 0 附近均匀分布. 源信号的实际情况与理想情况稍有不同, 但得到的倒谱系数存在相似, 也没有明显的峰值. 因此, 将两信号的倒谱线性叠加, 传递函数在倒谱的峰并不受大的干扰, 可以通过读取相位差的倒谱的峰值, 方便地对入侵定位.

3 实验系统及测量结果

按图 1 的框图搭建实验验证算法的可行性. 超辐射宽带激光光源的中心波长为 1550 nm, 耦合器均为均分耦合器. 传感光缆采用标准通信用单模 G.654 超低损耗光纤. 光电探测器采用 Thorlabs 公司生产的 APD130C 型铟镓砷雪崩光电探测器, 用于将光干涉转换成电信号. 数据采集卡采用美国国家仪器公司 (NI) 的 PXI 系列采集卡, 采样率为 $4 \times 10^6/s$. 在 LabVIEW 2012 平台上编写数据处理程序.

在距离传感光缆尾端 40.498 km (用光时域反射仪 OTDR 测定) 处的位置 6, 用手轻弹光缆作为入侵信号. 通过系统记录干涉信号, 并经采集卡采

集送至电脑处理, 利用相位还原算法^[39]从干涉信号还原出相位差信号.

一般而言, 入侵信号持续时间非常短暂, 通常不超过 5 ms. 为提高处理效率, 对相位差信号进行分帧, 每帧持续时间 10 ms, 包含 40000 个数据点, 每两个数据点之间的时间间隔为 0.25 μs. 仅对相位变化幅度大于 2 rad 的帧分析, 认为包含入侵信号.

图 2 展示了一帧典型的入侵信号相位差波形图. 在没有入侵信号以及入侵信号结束后, 两相干光束的相位差都接近于 0, 比较平稳. 在 0.002 s 左右入侵开始发生, 到 0.004 s 左右基本结束, 持续了不到 3 ms, 引起了高达 9 rad 的相位差.

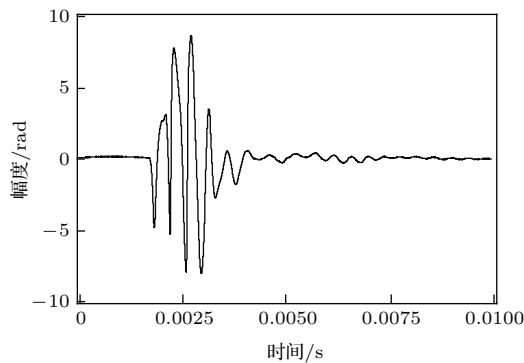


图 2 距离传感光缆尾端 40.498 km 处敲击信号产生的相位差波形
Fig. 2. Waveform of the phase difference signal for a knock at 40.498 km away from the far end of sensing cable.

由前面的分析可知, 相位差信号由两个具有延迟的源信号叠加而成, 因而相位差信号本身具有一定的周期性. 传统的自相关算法直接对相位差信号求取自相关函数, 根据自相关峰确定延迟 T . 本文从上述 10 ms 的相位差信号截取包含入侵信号的 4 ms 信号, 计算其自相关函数, 选取除自重合外的两个相关函数最大峰峰值对应的时间差作为源信号的延迟 T . 如图 3(a) 所示, 红色曲线为截取的相位差信号的自相关函数, 黑色方框标示了 3 个自相关峰. 除去中间相关度为 1 的自重合峰, 两侧两个相关峰是由于不同延迟的源信号重合产生, 它们的时间差就是延迟 T . 读取到左峰对应的时间 $t_1 = 3612.50 \mu\text{s}$, 右峰对应的时间 $t_2 = 4387.00 \mu\text{s}$, 根据 (8) 式得到定位距离 $L_x = 39.786 \text{ km}$, 与实际位置的误差达 712 m.

$$L_x = \frac{c}{2n}T = \frac{c}{2n} \frac{t_2 - t_1}{2}. \quad (8)$$

产生巨大误差的主要原因是自相关法比较粗糙. 不同延迟时间的源信号存在重叠, 非随机噪声由于自相关运算叠加起来, 影响了自相关峰出现的位置, 与实际延迟存在一定偏差, 因此, 得到的入侵位置也与实际有较大偏差.

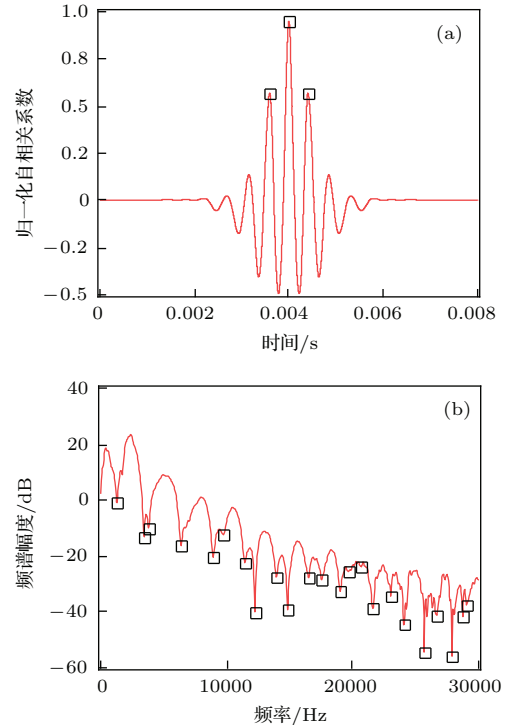


图 3 (网刊彩色)(a) 自相关算法和 (b) 陷波点算法的定位结果; 红色是定位曲线, 黑色方框是特征值
Fig. 3. (color online) Localization results for (a) self-correlation algorithm and (b) null frequencies algorithm. Red lines are the respective localization curves, and the dark boxes are the localization values.

另一种传统方法是陷波点方法, 其具体作法是将相位差信号变换到频域. 由于两个具有延迟的源信号重叠在一起, 将使入侵信号的某些频率不被系统采集, 使得这些频率在频谱上表现为一系列凹陷, 形成所谓“陷波点”. 陷波点的位置与入侵位置的关系为

$$f_{\text{null}}(k) = \frac{(2k-1)c}{4nL_x} = (2k-1)f_b, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

其中, $f_{\text{null}}(k)$ 代表第 k 阶陷波点, 可表示为某一基频 f_b 的奇数倍. 确定了这些陷波点的值, 就可以根据 (9) 式反推出入侵位置. 如图 3(b) 所示, 红色曲线是相位差的对数频谱, 黑色框标示了寻峰算法识别的 23 个局域最小值, 经过人工比对, 其中只有 11 个最小值对应的频率是陷波点, 另外 12 个

则是一些普通的局域最小值. 选取那 11 个陷波点的频率值进行定位处理, 并将这 1 至 11 阶陷波点频率值以及相应计算出的基频值和入侵位置值列于表 1. 最后将各阶陷波点得到的定位值进行平均作为最终定位值. 实验中采用陷波点方法对发生在 40.498 km 处同一个入侵的定位估计值为 40.403 km, 存在 95 m 的定位误差, 比自相关方法要好. 但这种方法存在 3 个主要缺点: 一是很难辨识哪些局域最小值是陷波点, 入侵定位过程中, 入侵位置提前并不知道, 而且非陷波点的局域最小值也常常表现出规律性, 所以要从局域最小值中辨别哪些是陷波点, 哪些不是陷波点是非常困难的; 二

是陷波点阶数通常难以判断, 识别过程中陷波点常出现缺级现象, 也就是某阶或某几阶陷波点常常被遗漏, 如果第一阶陷波点没有被正确识别, 将导致后续陷波点阶数判断错误, 甚至找错陷波点 (比如图 3 中第二和第三个局域最小值混淆), 使最后定位结果出现很大偏差; 三是单个陷波点值易受到影响, 偏离实际位置, 表现在两个方面, 比如第一阶陷波点, 受到频谱的下降趋势影响, 发生偏移, 以及第二阶陷波点受到周边最小局域值的影响, 也难以得到准确值, 尤其是信噪比相对较差时, 频谱毛刺增多, 更难获得正确的陷波点值.

表 1 陷波点方法对 40.498 km 处的入侵信号的定位结果
Table 1. Localization results of intrusion occurring at 40.498 km by null frequency algorithm.

	<i>k</i>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$2k - 1$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$f_{\text{null}}/\text{Hz}$	1289	3789	6367	8906	11445	13945	16523	19023	21601	24102	26680
f_b/Hz	1289.1	1263.0	1273.4	1272.3	1271.7	1267.8	1271.0	1268.2	1270.7	1268.5	1270.5
L_x/km	39.851	40.672	40.340	40.375	40.395	40.520	40.416	40.505	40.427	40.496	40.434
最终定位值	40.403 km										

本文提出的倒谱方法可以克服这些缺点, 它关注信号整体, 而不是某几个频率值, 这使得它具有很强的鲁棒性, 简单直观, 且易于自动化测量. 倒谱本身较平坦, 有利于准确确定延迟峰的位置. 由于入侵信号的有效频谱集中在几十 kHz 内, 而系统采样率是 $4 \times 10^6/\text{s}$, 可分辨的频谱范围高达 2000 kHz, 因此有必要对相位差信号进行降采样操作, 避免大段无效频谱的干扰. 但这使得倒谱中数据点过少, 每两个相邻点间隔过大, 造成分辨率较粗糙. 为解决这个问题, 提出采用多降采样因子, 每个降采样因子下信号的采样间隔不同, 因此对应不同的分辨率. 这样在倒谱中, 综合考虑各定位值, 就可以有效地避免截断误差, 降低分辨率粗糙带来的定位间隔大的问题. 另外, 在实践中也常常发现倒谱上存在不止一个延时峰, 往往还有延时峰的高阶谐波峰, 这些高阶峰也可用于定位. 图 4 所示为采用倒谱方法对同一个入侵得到的定位曲线. 这里的降采样因子是 40. 曲线展示了从 0.0001 s 到 0.002 s (约相当于从 10 km 到 200 km) 区域的倒谱系数,

可以看到: 倒谱系数在没有扰动的区域非常平坦, 围绕着 0 随机涨落, 而在入侵位置 (40.498 km, 约 0.0004 s) 处以及它的整数倍位置, 呈现非常明显的峰和谷, 幅度依次衰减; 而在其他位置, 倒谱系数较为平坦. 直接读取这些峰和谷对应的时间, 转换成距离, 就可以得到入侵的定位值.

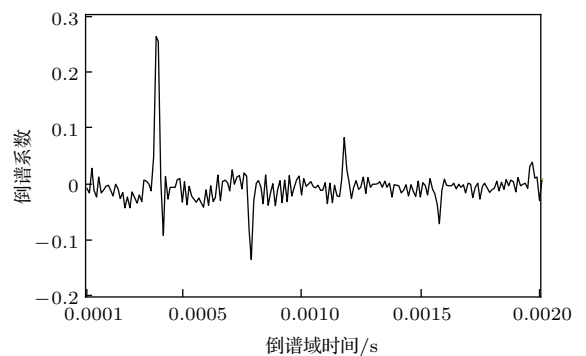


图 4 降采样因子为 40 时的相位差信号的倒谱系数, 峰值处对应光两次到达入侵信号位置的间隔时间

Fig. 4. Cepstrum coefficient for the phase difference signals with decimating factors of 40. The peaks correspond to the time interval, in which light propagates to the position of the intrusion twice.

通过改变相位差信号的降采样因子,使得相位差的采样率变化,总的采样点数也发生变化.因此,倒谱的时间间隔不一样,从而每个降采样因子对应的时间取值不一样.通过多个降采样因子的综合,可以消除由于粗糙分辨率带来的误差.如(10)式所示,当降采样因子 d 为40时,倒谱的时间分辨率为 $40/F_s$,

$$r(d, k) = \frac{dc}{2nkF_s}. \quad (10)$$

对于本实验的采样率 $F_s = 4 \times 10^6$,分辨率为 10^{-5} s,对于 $k = 1$ 阶峰,换算成距离的分辨率 $r(40, 1)$ 则为1.027 km.那么,定位值只可能是1.027 km的整数倍.而降采样因子为50时定位值的取值是0.770 km的整数倍.不同的降采样因子,对应的定位值的取值组合不一样,彼此之间互相交叉.例如,对于40.498和40.798 km处的两个入侵,在单一降采样因子下,由于取值的离散性,它们最终定位值

很可能一样.但是,在多降采样因子下,虽然它们在这个降采样因子下定位值一样,但是在其他降采样因子下存在差异,由此可以区分出这两个不同的位置.此外,同一入侵在不同降采样因子下的定位值实际是真实值向最近的可能取值截断的结果.这些结果围绕在真实值附近,求取均值将使定位值更接近真实位置.

表2展示了不同降采样因子下前4阶峰的定位值.降采样因子从30到50共21组.实验总共得到84个定位值,计算它们的均值作为最终定位值.可以看到,虽然不同降采样因子得到的定位值有较大差异,但经过平均后,每阶峰得到的定位值误差分别是+33 m, +1 m, -85 m, +21 m.再对每阶峰的定位结果求取平均,得到最终定位值为40.489 km,与实测距离仅有9 m的误差,显示了良好的定位准确性.

表2 30至50的降采样因子下倒谱算法1至4阶谐波峰的定位值

Table 2. Localizations of the 1st, 2nd, 3rd, 4th harmonic peaks for decimating factors from 30 to 50 by the cepstrum algorithm.

降采样因子	一阶峰/km	二阶峰/km	三阶峰/km	四阶峰/km	降采样因子	一阶峰/km	二阶峰/km	三阶峰/km	四阶峰/km
30	40.068	40.454	40.411	40.518	41	40.017	40.544	40.214	40.428
31	40.608	40.608	40.351	40.614	42	39.914	40.454	40.360	40.518
32	40.274	40.274	40.274	40.479	43	40.865	40.313	40.505	40.595
33	40.685	40.685	40.462	40.518	44	40.685	40.685	40.274	40.377
34	40.171	40.608	40.360	40.531	45	40.454	40.454	40.411	40.422
35	40.454	40.454	40.539	40.518	46	40.171	40.171	40.548	40.454
36	40.685	40.685	40.719	40.479	47	41.045	40.441	40.283	40.473
37	40.865	40.390	40.265	40.653	48	40.685	40.685	40.822	40.788
38	40.993	40.505	40.428	40.569	49	40.274	40.274	40.120	40.473
39	41.070	40.569	40.257	40.460	50	41.096	40.454	40.668	40.454
40	40.068	40.582	40.411	40.582	Mean	40.531	40.490	40.413	40.519
最终定位值	40.489 km								

为验证算法表现的有效性,在同一位置又制造了两次入侵,之后又分别在50.131 km处以及100.016 km处各制造两次入侵.三种定位算法对这些入侵的定位值与误差列于表3.从表3可以看到,本文提出的倒谱法定位误差稳定在40 m以下,按照(11)式计算的7次定位误差的标准差是12 m.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}}. \quad (11)$$

而自相关方法及陷波点方法的标准差分别达到695 m和118 m.通过对比,显示本文提出的倒谱法定位效果优于另外两种方法.

表3 三种定位算法相同入侵的定位结果对比
Table 3. Localization results comparison for the three algorithm to same intrusions.

序号	实测位置/km	自相关方法		陷波点方法		倒谱法	
		定位值/km	误差/m	定位值/km	误差/m	定位值/km	误差/m
1	40.498	39.786	712	40.403	95	40.489	9
2	40.498	41.712	1214	40.845	347	40.515	17
3	40.498	40.196	301	40.551	53	40.487	11
4	50.131	51.190	1059	50.186	55	50.116	15
5	50.131	52.397	2266	50.440	309	50.096	35
6	100.016	99.914	102	99.975	41	100.014	2
7	100.016	100.300	284	100.172	156	100.052	36

4 结 论

本文分析了分布式光纤 Sagnac 干涉仪传统入侵定位方法的不足, 并提出了一种更有效、更精确的利用相位差信号的倒谱得到入侵位置的方法. 该方法由于采用了多降采样因子和多阶倒谱峰, 对同一入侵可得到一系列定位值, 可对入侵进行准确的定位. 本文对发生在 40 km 附近的入侵, 采用三种方法分别定位, 结果显示本文提出的多分辨倒谱定位方法得到的定位值最精确, 也便于实现自动化测量. 实验中对处于其他位置的入侵信号的定位结果也显示相同的结论, 验证了该方法的可行性, 证明该方法能提高分布式光纤 Sagnac 的实用性和定位稳定性.

但是, 该方法还存在一些局限, 主要表现在两方面. 第一, 在分析过程中假设源信号的倒谱是平坦的, 不会对倒谱的信号峰产生影响. 大多数入侵信号能满足这一条件, 即具有较宽频谱延续至高频. 但有少数入侵信号的频谱局限在几百赫兹的低频段, 这时大段的无效频谱不包含入侵位置的信息, 在倒谱上表现为大幅的随机涨落, 压制倒谱峰的形成. 而一旦加大降采样因子, 又将使倒谱的分辨率过于粗糙, 甚至每百公里只有一个数据点, 也是无法有效定位. 第二, 在实际应用中, 采集到的干涉信号信噪比可能降到小于 1, 这种情况下由于噪声的干扰, 高阶峰的个数会减少, 甚至不可辨认, 实验时应设置阈值, 动态调整进入平均处理的峰的个数, 确保得到正确定位结果. 后续将探究倒谱定位方法在极限条件下的工作表现, 如超窄频谱信号

和超低信噪比等条件, 并积极开发表现更好的定位算法.

参考文献

- [1] Cao Y, Pei Y W, Tong Z R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 024206 (in Chinese) [曹晔, 裴庸惟, 童峥嵘 2014 物理学报 **63** 024206]
- [2] Leung C K, Wan K T, Inaudi D, Bao X Y, Habel W, Zhou Z 2015 *Mater. Struct.* **48** 871
- [3] Jiang Z X, Cui B T 2015 *Chin. Phys. B* **24** 020702
- [4] Zhou D P, Qin Z G, Li W H, Chen L, Bao X Y 2012 *Opt. Express* **20** 13138
- [5] Xu Q, Xu H Y, Song Y H, Xiao Q 2014 *Chin. J. Sci. Instrum.* **35** 216 (in Chinese) [徐锬, 许海燕, 宋耀华, 肖倩 2014 仪器仪表学报 **35** 216]
- [6] Zhang J, Hoffman A, Kane A, Lewis J 2014 *Proceedings of the 10th International Pipeline Conference* Calgary, Alberta, Canada, September 29–October 3, 2014 p33619
- [7] Zubia J, Casado L, Aldabaldetrekua G, Montero A, Zubia E, Durana G 2013 *Sensors* **13** 13584
- [8] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, Taylor H F 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 2081
- [9] Bian Z Y, Liang R S, Zhang Y J, Yi L X, Lai G, Zhao R T 2015 *Chin. Phys. B* **24** 107801
- [10] Karimov K S, Sulaiman K, Ahmad Z, Akhmedov K M, Mateen A 2015 *Chin. Phys. B* **24** 018801
- [11] Maki M C, Weese J K 2004 *IEEE Aero. El. Sys. Mag.* **19** 8
- [12] Wu H J, Li S S, Lu X L, Wu Y, Rao Y J 2012 *Proceedings of SPIE 8351, 3th Asia Pacific Optical Sensors Conference* Sydney, Australia, January 31, 2012 p835134
- [13] Li K Y, Zhao X Q, Sun X H, Wan S R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 054304 (in Chinese) [李凯彦, 赵兴群, 孙小菡, 万遂人 2015 物理学报 **64** 054304]
- [14] Wang B J, Pi S H, Sun Q, Jia B 2015 *Opt. Eng.* **54** 055104

- [15] Hong X, Wu J, Zuo C, Liu F, Guo H, Xu K 2011 *Appl. Opt.* **50** 4333
- [16] Dong Y, Zhang H, Chen L, Bao X Y 2012 *Appl. Opt.* **51** 1229
- [17] Belal M, Newson T P 2011 *Opt. Lett.* **36** 4728
- [18] Culshaw B, Kersey A 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 1064
- [19] Zhang Z, Bao X Y 2008 *Opt. Express* **16** 10240
- [20] Bao X Y, Chen L 2012 *Sensors* **12** 8601
- [21] Ma H Q, Zhao J L, Wu L A 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2801
- [22] Hoffman P R, Kuzyk M G 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 494
- [23] Bian P, Wu Y, Jia B, Xiao Q 2012 *Chin. J. Sci. Instrum.* **33** 2870 (in Chinese) [卞庞, 吴媛, 贾波, 肖倩 2012 仪器仪表学报 **33** 2870]
- [24] Chen W, Meng Z, Zhou H J, Luo H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034212
- [25] Li L C, Li X, Xie Z H, Liu D M 2012 *Opt. Express* **20** 11109
- [26] Hao Y Q, Ye Q, Pan Z Q, Cai H W, Qu R H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074214
- [27] Wu Y, Bian P, Jia B, Xiao Q 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1892
- [28] Ruan J, Zhang W G, Zhang H, Geng P C, Bai Z Y 2012 *Chin. Phys. B* **22** 064216
- [29] Zhen S L, Chen J, Li H, Wang X G, Zhang B, Yu B L 2015 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **27** 895
- [30] Hong G W, Jia B, Tang H 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 3057
- [31] Pi S H, Wang B J, Jia B, Sun Q, Xiao Q, Zhao D 2015 *Opt. Eng.* **54** 085105
- [32] Xu H Y, Xu Q, Xiao Q, Jia B 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1603 (in Chinese) [许海燕, 徐锲, 肖倩, 贾波 2010 光学学报 **30** 1603]
- [33] Wu Y, Bian P, Jia B, Xiao Q 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1032
- [34] Bian P, Wu Y, Jia B, Xiao Q, Xu Q, Wu H Y 2014 *Opt. Eng.* **53** 044111
- [35] Hess W 2012 *Pitch Determination of Speech Signals: Algorithms and Devices* (Berlin: Springer Science & Business Media) p399
- [36] Oppenheim A V, Schaffer R W 2004 *IEEE Signal Proc. Mag.* **21** 95
- [37] Borghesania P, Pennacchia P, Randallb R B, Sawalhib N, Riccia R 2013 *Mech. Syst. Signal Pr.* **36** 370
- [38] Wang Y, Zou N, Fu J, Liang G L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034302 (in Chinese) [王燕, 邹男, 付进, 梁国龙 2014 物理学报 **63** 034302]
- [39] Wu H Y, Jia B, Ye J, Wang C 2007 *Trans. Micro. Technol.* **26** 45 (in Chinese) [吴红艳, 贾波, 叶佳, 王超 2007 传感器与微系统 **26** 45]

Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer*

Pi Shao-Hua Wang Bing-Jie Zhao Dong[†] Jia Bo

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

(Received 29 July 2015; revised manuscript received 27 October 2015)

Abstract

Distributed fiber optic sensors are studied extensively, for monitoring abnormal events in continuous space, due to the advantages of immunity to electrical interference, non-conductivity and light weight. Moreover, the position of abnormal events, such as intrusions, could be determined directly without additional measurements. Among the various techniques, Sagnac interferometers prove to be promising for providing high sensitivity and large dynamic range in detecting intrusions. Two interference light beams are used which are naturally of equal optical path length in static status. When an intrusion occurs along the sensing fiber, the two light beams arrive at the intrusion position in different time and thus cause different phase changes induced by the intrusion. Analysis of the phase difference signal can predict the intrusion position, as well as the existence of the intrusion. As a Faraday rotator mirror (FRM) connected in the far-end of sensing fiber, both beams travel twice to the intrusion position after being reflected by the FRM. The propagation time interval T between the two interactions corresponds to the distance between the intrusion position and the far-end of sensing fiber L_x , which is further extracted as the localization of intrusion. Previously, the auto-correlation algorithm deals with the phase difference signal in the time domain and the null-frequency algorithm is used in frequency domain to calculate the distance. However the poor localization performance usually can not meet the requirement in high-quality monitoring applications. To determine the position of an intrusion effectively and accurately, the localization algorithm which deals with the phase difference signal in cepstrum domain is proposed in this article. Inspired by the research on the pitch examination we first introduce the algorithm for intrusion localization. Through theoretical analysis, the phase difference signal can be regarded as the convolution of the original waveform of intrusion and the T -related transform function. By applying the fast Fourier transform to the logarithmic spectrum, the phase difference signal is changed into the cepstrum domain, where the original waveform of intrusion and the transform function behave differently and are separated. The propagation time interval T , as well as the distance L_x , can be directly acquired from the peak produced by the transform function. In addition, to overcome the roughness in localization resolution brought by down-sampling of the phase difference signal, the decimator factor is scanned from 30 to 50 for multi-resolution localization at an original sampling rate 4 million/s⁻¹. Besides the basic peak, high order peaks also emerge in the cepstrum in high signal-noise-ratio condition, which can also be used for localization. Since the localizations from different decimator factor and different peaks spread around the actual distance, an average of all reasonable localizations is calculated as the ultimate localization result for the intrusion. Firstly in experiments, intrusions occurring at a position 40.498 km are produced for the verification of the algorithm. The localizations are 40.489, 40.515 and 40.487 km, with localization errors as small as 9, 17 and 11 m respectively. Intrusions at different positions are tested and also correctly localized. For comparison, the standard deviations of localization error are respectively 695 m and 118 m for the auto-correlation algorithm and the null frequency algorithm, which are 58 times and 10 times of the result 12 m, which is obtained by the proposed cepstrum algorithm. The performance suggests promise to achieve better localization in practical applications.

Keywords: Sagnac interferometers, cepstrum, localization algorithm, multi-resolution

PACS: 42.81.Pa, 42.15.Eq, 42.25.Hz, 42.82.Bq

DOI: 10.7498/aps.65.044210

* Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2013BAK02B03), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107077), the Special Fund for Basic Research on Scientific Instruments of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 2014YQ090709), and the Shanghai Committee of Science and Technology, China (Grant Nos. 14DZ2281200, 14511101800).

† Corresponding author. E-mail: zhaodongfudan@163.com