

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 11 月 3 日 (03.11.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/227948 A1

(51) 国际专利分类号:
G01M 11/02 (2006.01) G01D 5/353 (2006.01)
G01H 9/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/082419

(22) 国际申请日: 2022 年 3 月 23 日 (23.03.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110453267.6 2021年4月26日 (26.04.2021) CN

(71) 申请人: 南京大学(NANJING UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路
22号, Jiangsu 210093 (CN)。

(72) 发明人: 张益昕(ZHANG, Yixin); 中国江苏省南
京市鼓楼区汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。
陈晓红(CHEN, Xiaohong); 中国江苏省南京市鼓

楼区汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。 张旭
苹(ZHANG, Xuping); 中国江苏省南京市鼓楼区
汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。 佟帅(TONG,
Shuai); 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路22号,
Jiangsu 210093 (CN)。 梁蕾(LIANG, Lei); 中国
江苏省南京市鼓楼区汉口路22号, Jiangsu 210093
(CN)。 万一鸣(WAN, Yiming); 中国江苏省南
京市鼓楼区汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。
王峰(WANG, Feng); 中国江苏省南京市鼓楼区
汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。

(74) 代理人: 北京睿智保诚专利代理事务所(普
通合伙)(RZBC PATENT AGENCY (GENERAL
PARTNERSHIP)); 中国北京市丰台区马连
道卫强校村118号(万丰基业)A座301
室, Beijing 100071 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,

(54) Title: COHERENT AND POLARIZATION FADING SUPPRESSION METHOD FOR SYNCHRONOUS MONITORING OF
LOSS AND VIBRATION

(54) 发明名称: 一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法

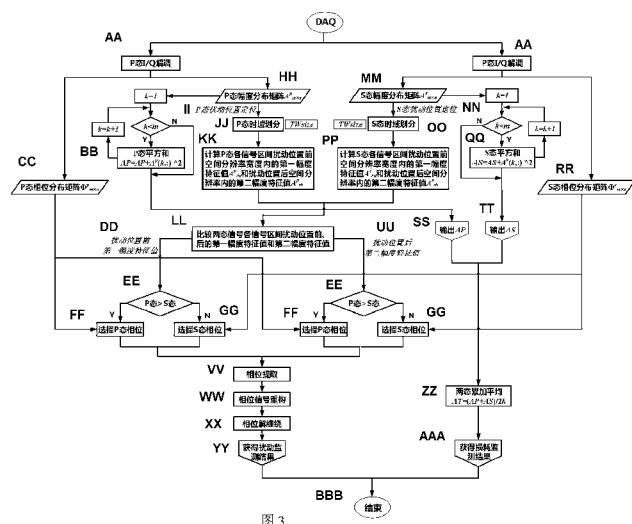


图 3

AA P-state IQ demodulation
BB P-state sum of squares
CC P-state phase distribution matrix
DD First amplitude feature value in front of disturbance position
EE P state is greater than S state
FF Select a P-state phase
GG Select an S-state phase
HH P-state amplitude distribution matrix
II Location of P-state disturbance position
JJ P-state time domain division
KK Calculate, within each P-state signal interval, a first amplitude feature value A_{ra}^P within a spatial resolution width in front of the disturbance position and a second amplitude feature value A_{ra}^S within a spatial resolution width behind the disturbance position
LL Compare the first amplitude feature value and the second amplitude feature value in front of and behind the disturbance position within each signal interval of a two-state signal
MM S-state amplitude distribution matrix
NN Location of S-state disturbance position
OO S-state time domain division
PP Calculate, within each S-state signal interval, a first amplitude feature value A_{ra}^S within a spatial resolution width in front of the disturbance position and a second amplitude feature value A_{ra}^S within a spatial resolution width behind the disturbance position
QQ S-state sum of squares
RR S-state phase distribution matrix
SS Output an A^P
TT Output an A^S
UU Second amplitude feature value behind disturbance position
VV Phase extraction
WW Phase signal reconstruction
XX Phase unwrapping
YY Obtain a disturbance monitoring result
ZZ Cumulative average of two states
AAA Obtain a loss monitoring result
BBB End

(57) Abstract: The present invention relates to a coherent and polarization fading suppression method for synchronous monitoring of loss and vibration. When only a common single-mode sensing optical fiber is used, the conflict of a Φ -OTDR and a COTDR on a polarization state problem is solved on the basis of a polarization diversity measurement method. In addition, for loss parameter monitoring, not only can a better coherent fading noise suppression effect be obtained, but also the recognition capability of a small-loss event can be enhanced. Furthermore, for disturbance parameter monitoring, the influence of coherent fading on phase demodulation of the Φ -OTDR can be suppressed, and a vibration signal can be reconstructed in a high-fidelity manner, so that a false alarm rate of external disturbance early warning is effectively reduced.

BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明涉及一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法, 在仅使用普通单模传感光纤的前提下, 基于偏振分集的测量方式, 解决了 Φ -OTDR和COTDR在偏振态问题上的冲突, 并且对于损耗参量的监测, 不仅能够获得更好的相干衰落噪声抑制效果, 还能够增强微小损耗事件的识别能力, 同时对于扰动参量的监测, 能够抑制相干衰落对 Φ -OTDR相位解调的影响, 高保真地重构振动信号, 从而有效地降低外部扰动预警的误报率。

一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法

技术领域

本发明涉及一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法,属于光纤传感技术领域。

背景技术

相干光时域反射仪 (Coherent Optical Time Domain Reflectometry, COTDR) 采用相干探测将瑞利背向散射信号 (Rayleigh Backscattering Signal, RBS) 光学信号转换为某一特定中频的电学信号。通过对该中频信号进行电学的窄带滤波,抑制绝大部分的 ASE 噪声,从而使其能够监测多中继超长距离光纤通信线路。近年来, COTDR 技术仍有持续改进,主要依托频分复用技术提高监测通道的带宽利用效率,缩短测量耗时,但就其目标参量而言仍局限在对光纤损耗参量的监测。这就造成基于 COTDR 的光纤链路监测系统仅能够进行事后的故障诊断与定位。事实上,在出现真正的不可逆转的损伤之前,虽然损耗值尚未出现明显的变化,但线路周边环境中的潜在威胁常通过直接接触或间接的振动信号传递,对光缆形成扰动,从而为提前预警提供依据。在扰动监测方面,相位敏感型光时域反射仪 (Phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometry, Φ -OTDR) 凭借灵敏度高和响应速度快的优点成为现阶段海缆监测技术的研究热点。

考虑到 Φ -OTDR 和 COTDR 都使用线宽窄、频率漂移小的激光器作为光源,并且在结构上外差探测 Φ -OTDR 与 COTDR 系统也具有高度的相似性。为了满足光纤监测系统对振动和损耗同步监测的需求,可以考虑将 Φ -OTDR 与 COTDR 技术进行结合。但是两种测量原理的融合,存在诸多矛盾和问题,例如: (1) Φ -OTDR 系统为了能够获得较高的监测精度,相邻 RBS 曲线之间必须具备较高的相似性,因此需要一个频率稳定的光源,而 COTDR 则需要主动扫频和多点数字平均技术来抑制相干衰落噪声,产生对光源工作模式的需求冲突; (2) 对于 Φ -OTDR 而言,偏振态的改变会在检测信号中引入随时间变化的偏振分量,影响振动测量精度。而 COTDR 中常采用扰偏器对光本振光 (Optical Local Oscillator, OLO) 光的偏振态进行快速扰动,以抑制由于 RBS 与 OLO 偏振态不匹配导致的偏振衰落噪声,这与 Φ -OTDR 希望偏振态高度稳定的要求相矛盾; (3) 目前 Φ -OTDR 解调方法有两种:鉴幅型和鉴相型。鉴幅型解调方法根据 RBS 的幅度信息快速定位振动事件。由于 RBS 的幅度变化与振动事件引起的光纤动态应变没有明确的线性关系,因此鉴幅型解调方法通常仅能够做定性测量,无法高保真地重构扰动事件的时频特征。鉴相型解调方法利用 RBS 的相位变化与光纤局部区域的动态应变之间的线性关系,可以精准还

原扰动事件，提升后续模式识别的准确性。但是由于相干衰落，光纤某些区域强度趋近于零，在这些区域相位解调结果很容易出现信噪比的急剧恶化导致频繁的误报警。

发明内容

本发明所要解决的技术问题是提供一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，采用全新设计方法，在实现光纤链路损耗监测的同时，能够实现扰动事件的预警。

本发明为了解决上述技术问题采用以下技术方案：本发明设计了一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，基于针对待测光纤采用偏振分集探测方式获得的两路正交偏振态中频信号，执行如下步骤A至步骤F：

步骤A. 分别针对两路正交偏振态中频信号中的P偏振态中频信号与S偏振态中频信号，执行IQ解调，获得P偏振态中频信号所对应的P偏振态幅度分布矩阵、P偏振态相位分布矩阵，以及S偏振态中频信号所对应的S偏振态幅度分布矩阵、S偏振态相位分布矩阵，然后进入步骤B；其中，幅度分布矩阵表示信号幅度随时间、距离的分布，相位分布矩阵表示信号相位随时间、距离的分布；

步骤B. 根据P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵，分别获得P偏振态扰动位置和S偏振态扰动位置，然后进入步骤C；

步骤C. 分别针对P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵，按预设大小时间窗口 $TWsize$ ，沿时间轴进行划分，获得P偏振态幅度分布矩阵所对应的各个 $TWsize$ 时长的信号区间，以及S偏振态幅度分布矩阵所对应的各个 $TWsize$ 时长的信号区间，然后进入步骤D；

步骤D. 分别针对P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，计算P偏振态和S偏振态分别对应当前信号区间扰动位置前空间分辨率宽度内的第一幅度特征值、以及所在位置；同时，计算P偏振态和S偏振态分别对应当前信号区间扰动位置后空间分辨率宽度内的第二幅度特征值、以及所在位置；进而分别获得P偏振态与S偏振态各个信号区间扰动位置前和扰动位置后空间分辨率宽度内的第一幅度特征值和第二幅度特征值，以及该第一幅度特征值和第二幅度特征值所对应的位置，然后进入步骤E；

步骤E. 基于P偏振态相位分布矩阵与S偏振态相位分布矩阵，分别针对P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，首先选择P偏振态和S偏振态对应当前信号区间扰动位置前空间分辨率宽度内较大的第一幅度特征值所对应的偏振态相位、以及所在位置，作为当前信号区间扰动位置前的偏振态相位；同时，选择P偏

振态和 S 偏振态对应当前信号区间扰动位置后空间分辨率宽度内较大的第二幅度特征值所对应的偏振态相位、以及所在位置，作为当前信号区间扰动位置后的偏振态相位；然后对当前信号区间扰动位置前后所选的偏振态相位进行相位差运算，实现相位提取，获得当前信号区间扰动位置的相位信号；进而获得各个信号区间扰动位置的相位信号，实现扰动位置相位信号重构，然后进入步骤 F；

步骤 F. 根据各信号区间扰动位置的重构相位信号，执行相位解缠绕，还原由外部扰动信号所引起的扰动位置处的光纤伸缩情况，即获得待测光纤的扰动监测结果。

作为本发明的一种优选技术方案，基于步骤 A 所获 P 偏振态幅度分布矩阵与 S 偏振态幅度分布矩阵，还包括执行如下步骤 I 至步骤 II，实现对待测光纤损耗监测结果的获得：

步骤 I. 沿时间轴顺序，分别对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵进行平方和处理，获得 P 偏振态幅度分布矩阵平方和结果，以及 S 偏振态幅度分布矩阵平方和结果，然后进入步骤 II；

步骤 II. 针对 P 偏振态幅度分布矩阵平方和结果与 S 偏振态幅度分布矩阵平方和结果，进行累加平均处理，获得待测光纤的损耗监测结果。

作为本发明的一种优选技术方案，所述步骤 D 包括如下：

分别针对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，执行步骤 D1 至步骤 D2，获得 P 偏振态与 S 偏振态各信号区间扰动位置前和扰动位置后空间分辨率宽度内的第一幅度特征值和第二幅度特征值，以及该第一幅度特征值和第二幅度特征值所对应的位置，然后进入步骤 E；

步骤 D1. 根据 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵，分别获得当前信号区间 P 偏振态和 S 偏振态扰动位置前、空间分辨率宽度范围内各空间位置的最小幅度值，并选取 P 偏振态和 S 偏振态分别所对应该各最小幅度值中的最大幅度值，作为 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间各自扰动位置前所对应的第一幅度特征值，分别记为 A_{ra}^P 和 A_{ra}^S ，其中下标 ra 表示 P 偏振态、S 偏振态分别对应信号区间各自扰动位置前第一幅度特征值所在位置；

步骤 D2. 根据 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵，分别获得当前信号区间 P 偏振态和 S 偏振态扰动位置后、空间分辨率宽度范围内各空间位置的最小幅度值，并选取 P 偏振态和 S 偏振态分别所对应该各最小幅度值的最大幅度值，作为 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间各自扰动位置后所对应的第二幅度特征值，分别记为 A_{rb}^P 和 A_{rb}^S ，其中下标 rb 表示 P 偏振态、S 偏振态分别对应信号区间各自扰动位置后第二幅度

特征值所在位置。

作为本发明的一种优选技术方案，所述步骤 E 中各信号区间扰动位置前、后的偏振态相位选择包括：

- (1) 信号区间扰动位置前选择了 P 偏振态相位，扰动位置后选择了 P 偏振态相位；
- (2) 信号区间扰动位置前选择了 P 偏振态相位，扰动位置后选择了 S 偏振态相位；
- (3) 信号区间扰动位置前选择了 S 偏振态相位，扰动位置后选择了 P 偏振态相位；
- (4) 信号区间扰动位置前选择了 S 偏振态相位，扰动位置后选择了 S 偏振态相位。

本发明所述一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，采用以上技术方案与现有技术相比，具有以下技术效果：

本发明所设计一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，在仅使用普通单模传感光纤的前提下，基于偏振分集的测量方式，解决了 Φ -OTDR 和 COTDR 在偏振态问题上的冲突，并且对于损耗参量的监测，不仅能够获得更好的相干衰落噪声抑制效果，还能够增强微小损耗事件的识别能力，同时对于扰动参量的监测，能够抑制相干衰落对 Φ -OTDR 相位解调的影响，高保真地重构振动信号，从而有效地降低外部扰动预警的误报率。

附图说明

图 1 是本发明所设计损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法的系统架构示意图；

图 2 为本发明所设计中待测光纤连接示意图；

图 3 是本发明所设计损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法流程图；

图 4 是实施例中 P 态 PZT 附近 2s 间的幅度瀑布图；

图 5 是实施例中 2^{16} 条曲线损耗测试结果；

图 6 是实施例中损耗测试结果局部放大图；

图 7 是实施例中两态提取的相位信息及经过优选后的重建结果。

其中，1. 待测光纤 1，2. 待测光纤 2，3. 实验用圆筒形柱状压电陶瓷。

具体实施方式

下面结合说明书附图对本发明的具体实施方式作进一步详细的说明。

本发明设计了一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，该方法是基于具体所设计的系统架构去实现执行的，实际应用设计中，如图 1 所示，该系统具体包括激光器、光耦合器、声光调制器、光放大器、环形器、预放型偏振分集接收器（Pre-PDR）、

偏振控制器、控制及处理模块、数据采集卡（DAQ）、脉冲信号发生器、以及 P 偏振态信号滤波装置和 S 偏振态滤波装置。

其中，激光器与控制及处理模块相连，激光器基于来自控制及处理模块的预设扫频速度进行扫频，产生连续光信号；激光器的光输出端对接光耦合器的输入端，由光耦合器针对所接收的连续光信号进行分束，分别获得探测光信号与本振光信号；光耦合器的本振光信号输出端对接偏振控制器的输入端，由偏振控制器针对所接收的本振光信号的偏振态进行调整；光耦合器的探测光信号输出端对接声光调制器的输入端，由声光调制器在脉冲信号发生器所输出脉冲调制信号的控制下、针对所接收到的探测光信号进行调制，获得探测光脉冲，并进行移频。

声光调制器的输出端对接光放大器的输入端，由声光调制器将探测光脉冲输送至光放大器进行放大处理；光放大器的输出端对接环形器，由光放大器将探测光脉冲输送至环形器，由环形器将探测光脉冲传输至待测光纤，并接收待测光纤返回的 RBS 信号；预放型偏振分集接收器（Pre-PDR）分别与环形器、偏振控制器相连接，由预放型偏振分集接收器（Pre-PDR）分别接收来自环形器的 RBS 信号、以及来自偏振控制器的本振光信号，并实现 RBS 信号中各偏振态与本振光信号的相干处理，分别获得 P 偏振态中频信号和 S 偏振态中频信号进行输出。

P 偏振态信号滤波装置和 S 偏振态信号滤波装置结构相同，分别针对来自预放型偏振分集接收器（Pre-PDR）输出端的 P 偏振态中频信号和 S 偏振态中频信号进行滤波-放大-再滤波处理，实现偏振态中频信号的更新、并输出。

P 偏振态信号滤波装置和 S 偏振态信号滤波装置的输出端对接数据采集卡（DAQ）的两路输入端，由数据采集卡（DAQ）对来自两路偏振态信号滤波装置输出更新后的偏振态中频信号进行采集，并传输至控制及处理模块进行数据处理，执行所述一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法；脉冲信号发生器基于与数据采集卡（DAQ）所输出各偏振态中频信号相同步的时钟信号，生成用于驱动声光调制器产生探测脉冲光的脉冲调制信号，并输送至声光调制器。

实际设计应用中，该系统中的两路偏振态信号滤波装置分别均包括第一带通滤波器、低噪声电学放大器、第二带通滤波器，两路偏振态信号滤波装置结构中，第一带通滤波器的输入端构成偏振态信号滤波装置的输入端，第一带通滤波器的输出端对接对应低噪声电学放大器的输入端，低噪声电学放大器的输出端对接对应第二带通滤波器的输入端，第二带通滤波器的输出端构成对应偏振态信号滤波装置的输出端；第一带通滤波器用于滤除所

接收偏振态中频信号中的无用信号、以及宽带噪声，执行第一级滤波处理，实现对偏振态中频信号的更新；低噪声电学放大器用于针对第一带通滤波器输出的偏振态中频信号，实现放大更新；第二带通滤波器用于针对对应低噪声电学放大器输出的偏振态中频信号，滤除其中的无用信号、以及宽带噪声，执行第二级滤波处理，实现对偏振态中频信号的更新输出。

并且在实际的系统搭建中，针对光放大器，具体选用为掺铒光纤放大器；针对激光器，具体选用窄线宽可调激光器。

基于上述实际应用所搭建的系统，具体执行本发明所设计损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，基于针对待测光纤采用偏振分集探测方式获得的两路正交偏振态中频信号，实际应用中，如图3所示，具体执行如下步骤A至步骤F。

步骤A. 分别针对两路正交偏振态中频信号中的P偏振态中频信号与S偏振态中频信号，执行IQ解调，获得P偏振态中频信号所对应的P偏振态幅度分布矩阵、P偏振态相位分布矩阵，以及S偏振态中频信号所对应的S偏振态幅度分布矩阵、S偏振态相位分布矩阵，然后进入步骤B；其中，幅度分布矩阵表示信号幅度随时间、距离的分布，相位分布矩阵表示信号相位随时间、距离的分布。

步骤B. 根据P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵，分别获得P偏振态扰动位置和S偏振态扰动位置，然后进入步骤C。

步骤C. 分别针对P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵，按预设大小时间窗口 $TWsize$ ，沿时间轴进行划分，获得P偏振态幅度分布矩阵所对应的各个 $TWsize$ 时长的信号区间，以及S偏振态幅度分布矩阵所对应的各个 $TWsize$ 时长的信号区间，然后进入步骤D。

步骤D. 分别针对P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，计算P偏振态和S偏振态分别对应当前信号区间扰动位置前空间分辨率宽度内的第一幅度特征值、以及所在位置；同时，计算P偏振态和S偏振态分别对应当前信号区间扰动位置后空间分辨率宽度内的第二幅度特征值、以及所在位置；进而分别获得P偏振态与S偏振态各个信号区间扰动位置前和扰动位置后空间分辨率宽度内的第一幅度特征值和第二幅度特征值，以及该第一幅度特征值和第二幅度特征值所对应的位置，然后进入步骤E。

实际应用当中，上述步骤D具体设计，分别针对P偏振态幅度分布矩阵和S偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，执行步骤D1至步骤D2，获得P偏振态与S偏振态

各信号区间扰动位置前和扰动位置后空间分辨率宽度内的第一幅度特征值和第二幅度特征值，以及该第一幅度特征值和第二幅度特征值所对应的位置，然后进入步骤 E。

步骤 D1. 根据 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵，分别获得当前信号区间 P 偏振态和 S 偏振态扰动位置前、空间分辨率宽度范围内各空间位置的最小幅度值，并选取 P 偏振态和 S 偏振态分别所对应该各最小幅度值中的最大幅度值，作为 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间各自扰动位置前所对应的第一幅度特征值，分别记为 $A^{P_{ra}}$ 和 $A^{S_{ra}}$ ，其中下标 ra 表示 P 偏振态、S 偏振态分别对应信号区间各自扰动位置前第一幅度特征值所在位置。

步骤 D2. 根据 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵，分别获得当前信号区间 P 偏振态和 S 偏振态扰动位置后、空间分辨率宽度范围内各空间位置的最小幅度值，并选取 P 偏振态和 S 偏振态分别所对应该各最小幅度值的最大幅度值，作为 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间各自扰动位置后所对应的第二幅度特征值，分别记为 $A^{P_{rb}}$ 和 $A^{S_{rb}}$ ，其中下标 rb 表示 P 偏振态、S 偏振态分别对应信号区间各自扰动位置后第二幅度特征值所在位置。

步骤 E. 基于 P 偏振态相位分布矩阵与 S 偏振态相位分布矩阵，分别针对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，首先选择 P 偏振态和 S 偏振态对应当前信号区间扰动位置前空间分辨率宽度内较大的第一幅度特征值 ($\max\{A^{P_{ra}}, A^{S_{ra}}\}$) 所对应的偏振态相位、以及所在位置，作为当前信号区间扰动位置前的偏振态相位；同时，选择 P 偏振态和 S 偏振态对应当前信号区间扰动位置后空间分辨率宽度内较大的第二幅度特征值 ($\max\{A^{P_{rb}}, A^{S_{rb}}\}$) 所对应的偏振态相位、以及所在位置，作为当前信号区间扰动位置后的偏振态相位；然后对当前信号区间扰动位置前后所选的偏振态相位进行相位差运算，实现相位提取，获得当前信号区间扰动位置的相位信号；进而获得各个信号区间扰动位置的相位信号，实现扰动位置相位信号重构，然后进入步骤 F。

实际应用中，步骤 E 中各信号区间扰动位置前、后的偏振态相位选择包括：

- (1) 信号区间扰动位置前选择了 P 偏振态相位，扰动位置后选择了 P 偏振态相位；
- (2) 信号区间扰动位置前选择了 P 偏振态相位，扰动位置后选择了 S 偏振态相位；
- (3) 信号区间扰动位置前选择了 S 偏振态相位，扰动位置后选择了 P 偏振态相位；
- (4) 信号区间扰动位置前选择了 S 偏振态相位，扰动位置后选择了 S 偏振态相位。

为抑制相干及偏振衰落提供了多种选择，从而实现更好的相干及偏振衰落抑制效果。

步骤 F. 根据各信号区间扰动位置的重构相位信号，执行相位解缠绕，还原由外部扰

动信号所引起的扰动位置处的光纤伸缩情况，即获得待测光纤的扰动监测结果。

实际应用中，基于步骤 A 所获 P 偏振态幅度分布矩阵与 S 偏振态幅度分布矩阵，还包括执行如下步骤 I 至步骤 II，实现对待测光纤损耗监测结果的获得：

步骤 I. 沿时间轴顺序，分别对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵进行平方和处理，获得 P 偏振态幅度分布矩阵平方和结果，以及 S 偏振态幅度分布矩阵平方和结果，然后进入步骤 II；

步骤 II. 针对 P 偏振态幅度分布矩阵平方和结果与 S 偏振态幅度分布矩阵平方和结果，进行累加平均处理，获得待测光纤的损耗监测结果。

将本发明所设计损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，应用于实际当中，以长距离海缆监测为例，结合附图对本发明的技术方案做进一步的详细说明：

如图 1 所示，系统采用波长为 1550.12nm、线宽为 3.7kHz 的窄线宽可调谐 NKT 激光器作为光源，通过控制及处理模块控制的可编程驱动器对其光频率进行调谐。NKT 激光器输出的连续光被 90:10 的光耦合器分成两部分，其中 90% 的一路作为探测光，10% 的一路作为本振光。探测光经声光调制器被调制为 200MHz 频移的光脉冲，再利用光放大器进行功率放大。针对长距离海缆监测海上定位的需求，100m 以内的空间分辨率足以满足要求。因此实验中声光调制器的调制脉冲采用 1us 脉宽，周期为 1ms。为了确保 Φ -OTDR 对外部扰动的测量精度，同时抑制 RBS 曲线的幅度波动，根据 Φ -OTDR 对相邻 RBS 曲线相关度的要求，以及扫频速度与调制信号脉宽、周期之间的关系，实验中选取了 5MHz/s 的扫频速度，这足以有效地抑制相干衰落对损耗测量精度的影响，而不牺牲 Φ -OTDR 的扰动事件识别能力。经光放大器放大后的探测脉冲光通过环形器的 2 端口注入待测光纤。

基于图 2 所示，待测光纤 1 和待测光纤 2 分别为长度约 71km 和 1km 的单模光纤。在实验用圆筒形柱状压电陶瓷（PZT）表面缠绕了约 30m 光纤，用于模拟产生外界声场的振动。实验中，对 PZT 施加了 30Hz 的正弦波模拟传感光纤受到外部声场扰动。

光纤中产生的 RBS 光经环形器的 2 端口返回，并由 3 端口输出后与本振光被预放型偏振分集相干接收器（Pre-PDR）接收，其中本振光一路通过偏振控制器实现对其偏振态的调整，以均衡 Pre-PDR 输出的 P 态和 S 态的中频信号强度，使其平均强度尽量一致。相干拍频产生 P 态和 S 态两路中频信号，再分别经中心频率为 200MHz 的带通滤波器和低噪声放大器进一步滤波和放大，最终由数据采集卡（DAQ）进行采集，传输至控制及处理模块进行数据处理。系统采样率为 1.25GSa/s。其中，第一带通滤波器和第二带通滤波器的带宽通带范围为 195MHz~205MHz，低噪声放大器的增益为 27dB，该偏振态信号

滤波装置的作用主要是为了滤除无用的信号，同时放大光电转换产生的微弱电信号。

采集后的数据处理如图 3 所示，具体过程如下：

(1) 分别对采集到的两路中频信号（ P 态和 S 态）分别进行 IQ 解调，获得两态中频信号的幅度分布矩阵 $A_{m \times n}^P$ 和 $A_{m \times n}^S$ ，以及相位分布矩阵 $\Phi_{m \times n}^P$ 和 $\Phi_{m \times n}^S$ ，其中， A 和 Φ 均为由时间行和距离列组成的 $m \times n$ 列的矩阵，二者中每一行分别代表着幅度和相位随距离的分布，每一列分别代表着幅度和相位随时间的变化。

(2) 根据 P 态幅度分布矩阵和 S 态幅度分布矩阵，分别获得 P 偏振态扰动位置和 S 偏振态扰动位置，如图 4 所示，为 P 态 PZT 附近 2s 间的幅度瀑布图，图中虚线区域可以清楚地看到约 71.9km 处检测到了一个周期性的信号。

(3) 分别对 P 态幅度分布矩阵和 S 态幅度分布矩阵，按预设大小时域窗口 $TWsize$ ，沿时间轴进行时域划分。考虑到海底扰动事件的低频特性，这里设置时域窗口 $TWsize$ 选择为 20 个点，即 0.02s。将两态幅度分布矩阵分别划分为首尾相接且等宽度的 428 个信号区间。

(4) 沿被划分的 428 个信号区间的时间轴，比较两态幅度分布矩阵在当前时域宽度 $TWsize$ 下扰动位置前的第一幅度特征值和扰动位置后的第二幅度特征值，选择两态当前信号区间扰动位置前空间分辨率宽度内较大的第一幅度特征值（ $\max\{A_{ra}^P, A_{ra}^S\}$ ）所对应的偏振态相位及所在位置 ra ，作为扰动位置前的偏振态相位；同时，选择两态当前信号区间扰动位置后空间分辨率宽度内较大的第二幅度特征值（ $\max\{A_{rb}^P, A_{rb}^S\}$ ）所对应的偏振态相位及所在位置 rb ，作为扰动位置后的偏振态相位。对当前信号区间扰动位置前后所选的偏振态相位进行相位差运算，实现相位提取，获得当前信号区间扰动位置的相位信号。进而获得 428 个信号区间扰动位置的相位信号，实现扰动位置相位信号重构。

(5) 对重构的相位信号进行解缠绕，还原由外部扰动信号引起的扰动位置处的光纤伸缩情况，获得扰动监测结果，从而实现对外部扰动信号的感测。

(6) 分别对两态幅度矩阵 $A_{m \times n}^P$ 和 $A_{m \times n}^S$ 沿时间轴进行平方，得到两态幅度矩阵的平方和 AP 和 AS 。

(7) 对两态平方和矩阵 AP 和 AS 再进行累加平均，得到 AT 曲线，从而获得损耗监测结果，如图 5 所示。其中，图 5 中的 (a) 和 (b) 分别为 P 偏振态和 S 偏振态各自获得的 2^{16} 条 RBS 曲线进行平均的结果，图 5 中的 (c) 为两态 RBS 曲线总条数平均的改进结果，可以看到将两态的 RBS 曲线进一步平均后，得到的 COTDR 曲线更加平滑，获得了 59.2dB 的总动态范围，对应的单程动态范围（Single-Way Dynamic Range, SWDR）为

29.6dB。图6为图5中30km~40km的局部放大图，经计算P态和S态获得的COTDR曲线的波动分别为0.24dB和0.35dB，将两态累加平均获得COTDR曲线的波动为0.09B。可见，利用本发明提供的一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，不仅能够获得更好的相干衰落噪声抑制效果，还能够增强微小损耗事件的识别能力。

如图7所示，展示了经过本发明提供的方法优选前后的相位提取结果。为了能够凸显偏振分集幅度优选的效果，在已知施加信号频率的基础上，我们对各自鉴相结果进行带通滤波。由上至下，图7中(a)和(b)分别为P态和S态各自RBS的重构振动信号波形图，可以看到未进行本发明的优选算法之前，两态RBS提取的相位信号均存在多处畸变；图7中(c)展示了上文P态和S态RBS信号解调得到的幅度在 $TWsize$ 时域内ra和rb位置的幅度总和。与相应的信号强度相比，图7中(a)和(b)中的失真位置均为幅值较弱的位置。图7中(d)对应了图7中(c)的幅值选择策略，在当前时域窗口内选择最大总幅度特征值的一方进行相位提取。其中，蓝色域表示选择了P态，红色域表示选择了S态，从图中可以看到，随着时间的推移，其相位提取一直在两个偏振态中跳转，从而获得了如图7中(e)所示的重建相位信号波形图。

可见，利用本发明提供的一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，能够高保真地重构振动信号，并且同步实现了单端传感距离至少71.9km的损耗与振动监测。

上面结合附图对本发明的实施方式作了详细说明，但是本发明并不限于上述实施方式，在本领域普通技术人员所具备的知识范围内，还可以在不脱离本发明宗旨的前提下做出各种变化。

权 利 要 求 书

1. 一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法，其特征在于：基于针对待测光纤采用偏振分集探测方式获得的两路正交偏振态中频信号，执行如下步骤 A 至步骤 F：

步骤 A. 分别针对两路正交偏振态中频信号中的 P 偏振态中频信号与 S 偏振态中频信号，执行 IQ 解调，获得 P 偏振态中频信号所对应的 P 偏振态幅度分布矩阵、P 偏振态相位分布矩阵，以及 S 偏振态中频信号所对应的 S 偏振态幅度分布矩阵、S 偏振态相位分布矩阵，然后进入步骤 B；其中，幅度分布矩阵表示信号幅度随时间、距离的分布，相位分布矩阵表示信号相位随时间、距离的分布；

步骤 B. 根据 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵，分别获得 P 偏振态扰动位置和 S 偏振态扰动位置，然后进入步骤 C；

步骤 C. 分别针对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵，按预设大小时域窗口 $TWsize$ ，沿时间轴进行划分，获得 P 偏振态幅度分布矩阵所对应的各个 $TWsize$ 时长的信号区间，以及 S 偏振态幅度分布矩阵所对应的各个 $TWsize$ 时长的信号区间，然后进入步骤 D；

步骤 D. 分别针对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，计算 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间扰动位置前空间分辨率宽度内的第一幅度特征值、以及所在位置；同时，计算 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间扰动位置后空间分辨率宽度内的第二幅度特征值、以及所在位置；进而分别获得 P 偏振态与 S 偏振态各个信号区间扰动位置前和扰动位置后空间分辨率宽度内的第一幅度特征值和第二幅度特征值，以及该第一幅度特征值和第二幅度特征值所对应的位置，然后进入步骤 E；

步骤 E. 基于 P 偏振态相位分布矩阵与 S 偏振态相位分布矩阵，分别针对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间，首先选择 P 偏振态和 S 偏振态对应当前信号区间扰动位置前空间分辨率宽度内较大的第一幅度特征值所对应的偏振态相位、以及所在位置，作为当前信号区间扰动位置前的偏振态相位；同时，选择 P 偏振态和 S 偏振态对应当前信号区间扰动位置后空间分辨率宽度内较大的第二幅度特征值所对应的偏振态相位、以及所在位置，作为当前信号区间扰动位置后的偏振态相位；然后对当前信号区间扰动位置前后所选的偏振态相位进行相位差运算，实现相位提取，获得当前信号区间扰动位置的相位信号；进而获得各个信号区间扰动位置的相位信号，实现扰动位置相位信号重构，然后进入步骤 F；

步骤 F. 根据各信号区间扰动位置的重构相位信号，执行相位解缠绕，还原由外部扰动信号所引起的扰动位置处的光纤伸缩情况，即获得待测光纤的扰动监测结果。

2. 根据权利要求 1 所述一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法, 其特征在于: 基于步骤 A 所获 P 偏振态幅度分布矩阵与 S 偏振态幅度分布矩阵, 还包括执行如下步骤 I 至步骤 II, 实现对待测光纤损耗监测结果的获得:

步骤 I. 沿时间轴顺序, 分别对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵进行平方和处理, 获得 P 偏振态幅度分布矩阵平方和结果, 以及 S 偏振态幅度分布矩阵平方和结果, 然后进入步骤 II;

步骤 II. 针对 P 偏振态幅度分布矩阵平方和结果与 S 偏振态幅度分布矩阵平方和结果, 进行累加平均处理, 获得待测光纤的损耗监测结果。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法, 其特征在于: 所述步骤 D 包括如下:

分别针对 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵划分后的各信号区间, 执行步骤 D1 至步骤 D2, 获得 P 偏振态与 S 偏振态各信号区间扰动位置前和扰动位置后空间分辨率宽度内的第一幅度特征值和第二幅度特征值, 以及该第一幅度特征值和第二幅度特征值所对应的位置, 然后进入步骤 E;

步骤 D1. 根据 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵, 分别获得当前信号区间 P 偏振态和 S 偏振态扰动位置前、空间分辨率宽度范围内各空间位置的最小幅度值, 并选取 P 偏振态和 S 偏振态分别所对应该各最小幅度值中的最大幅度值, 作为 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间各自扰动位置前所对应的第一幅度特征值, 分别记为 A_{ra}^P 和 A_{ra}^S , 其中下标 ra 表示 P 偏振态、S 偏振态分别对应信号区间各自扰动位置前第一幅度特征值所在位置;

步骤 D2. 根据 P 偏振态幅度分布矩阵和 S 偏振态幅度分布矩阵, 分别获得当前信号区间 P 偏振态和 S 偏振态扰动位置后、空间分辨率宽度范围内各空间位置的最小幅度值, 并选取 P 偏振态和 S 偏振态分别所对应该各最小幅度值的最大幅度值, 作为 P 偏振态和 S 偏振态分别对应当前信号区间各自扰动位置后所对应的第二幅度特征值, 分别记为 A_{rb}^P 和 A_{rb}^S , 其中下标 rb 表示 P 偏振态、S 偏振态分别对应信号区间各自扰动位置后第二幅度特征值所在位置。

4. 根据权利要求 1 所述一种损耗与振动同步监测的相干及偏振衰落抑制方法, 其特征在于, 所述步骤 E 中各信号区间扰动位置前、后的偏振态相位选择包括:

- (1) 信号区间扰动位置前选择了 P 偏振态相位, 扰动位置后选择了 P 偏振态相位;
- (2) 信号区间扰动位置前选择了 P 偏振态相位, 扰动位置后选择了 S 偏振态相位;

- (3) 信号区间扰动位置前选择了 S 偏振态相位，扰动位置后选择了 P 偏振态相位；
- (4) 信号区间扰动位置前选择了 S 偏振态相位，扰动位置后选择了 S 偏振态相位。

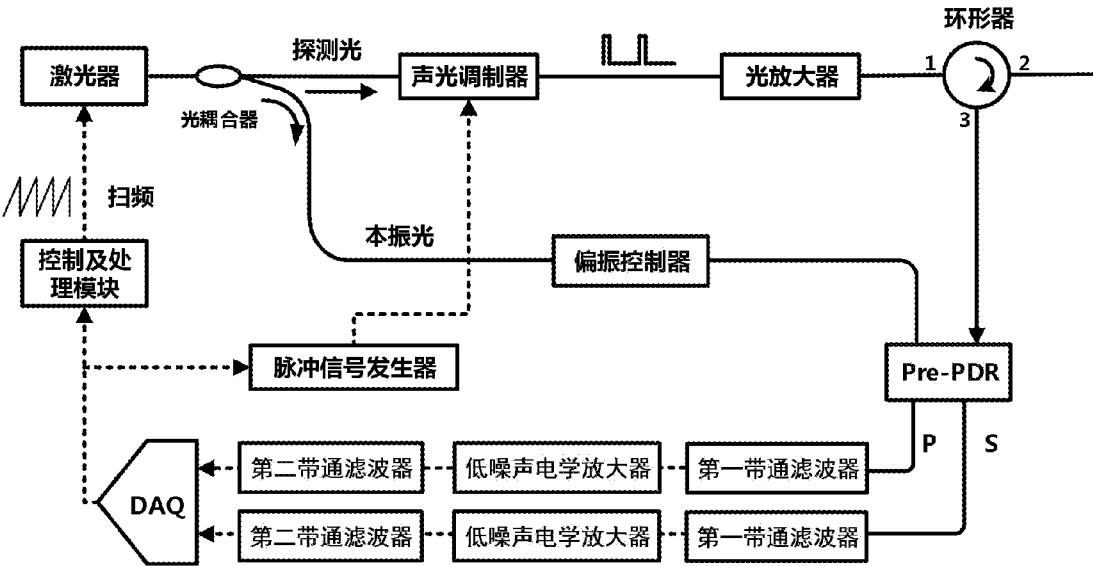


图 1

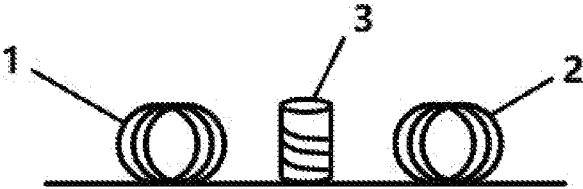


图 2

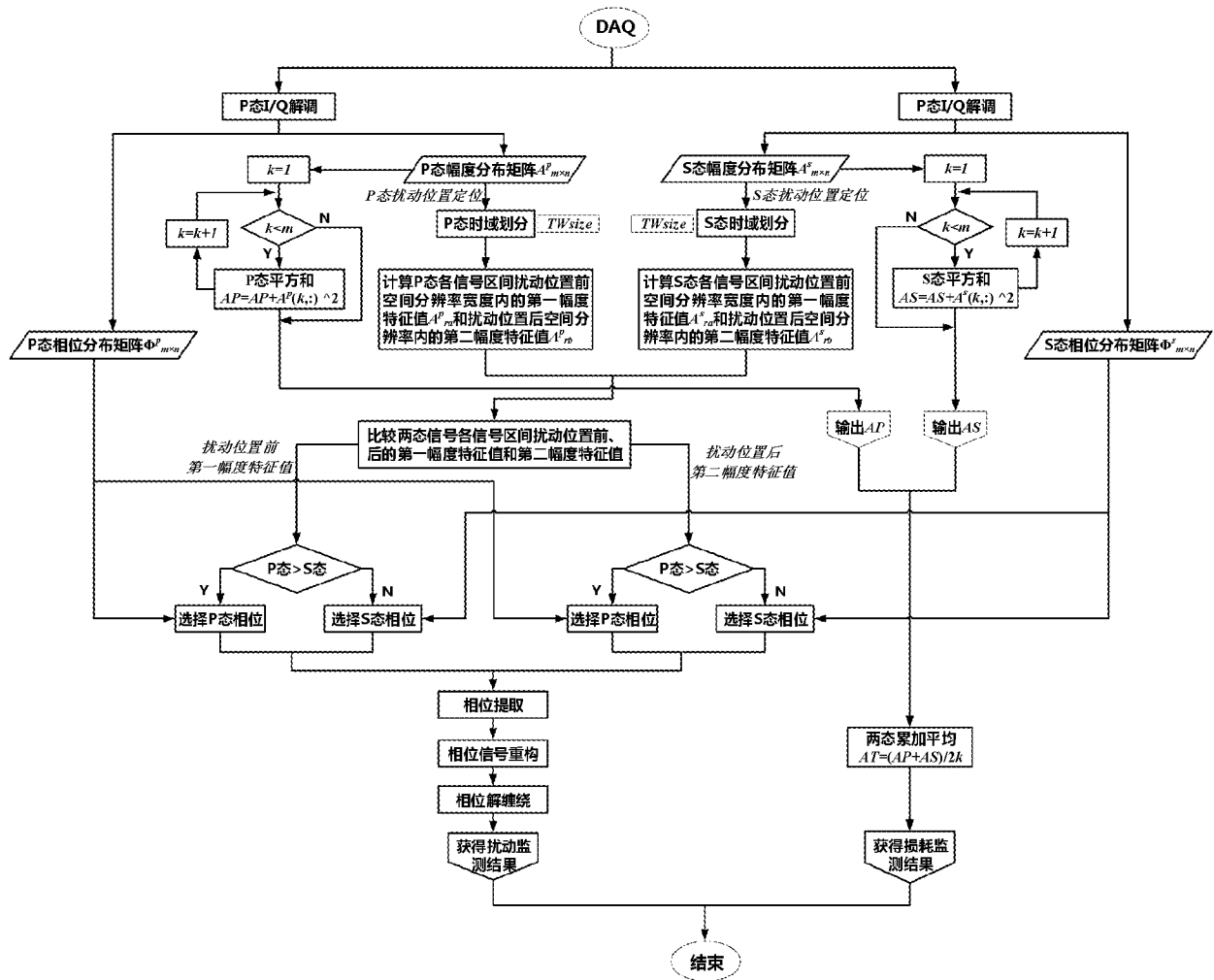


图 3

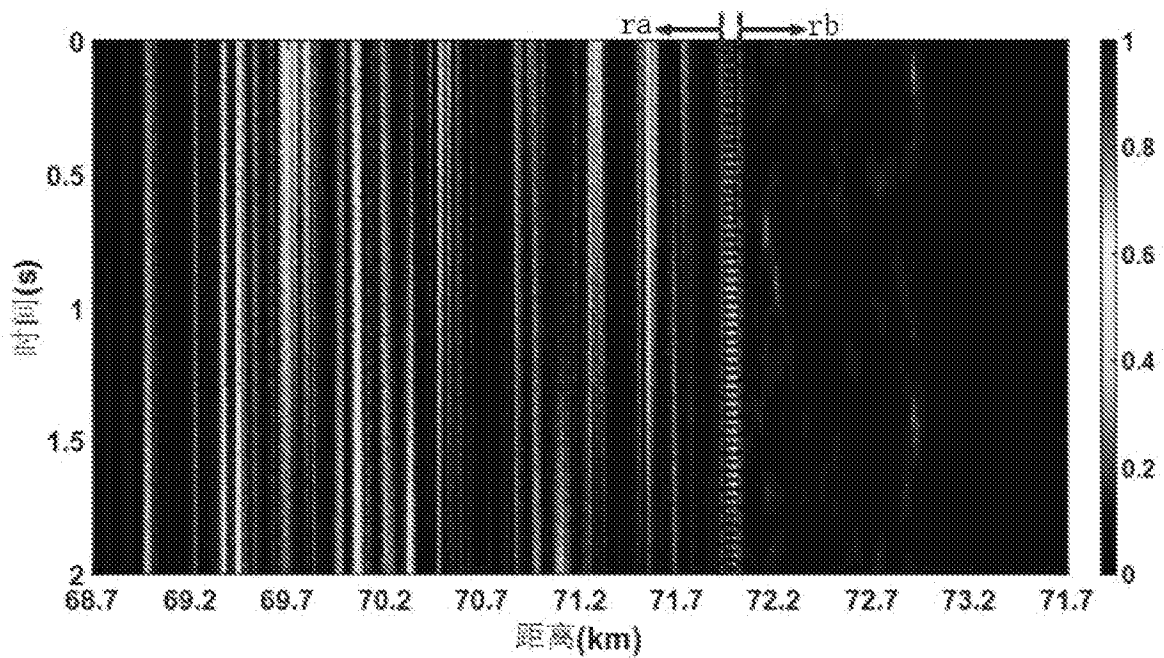


图 4

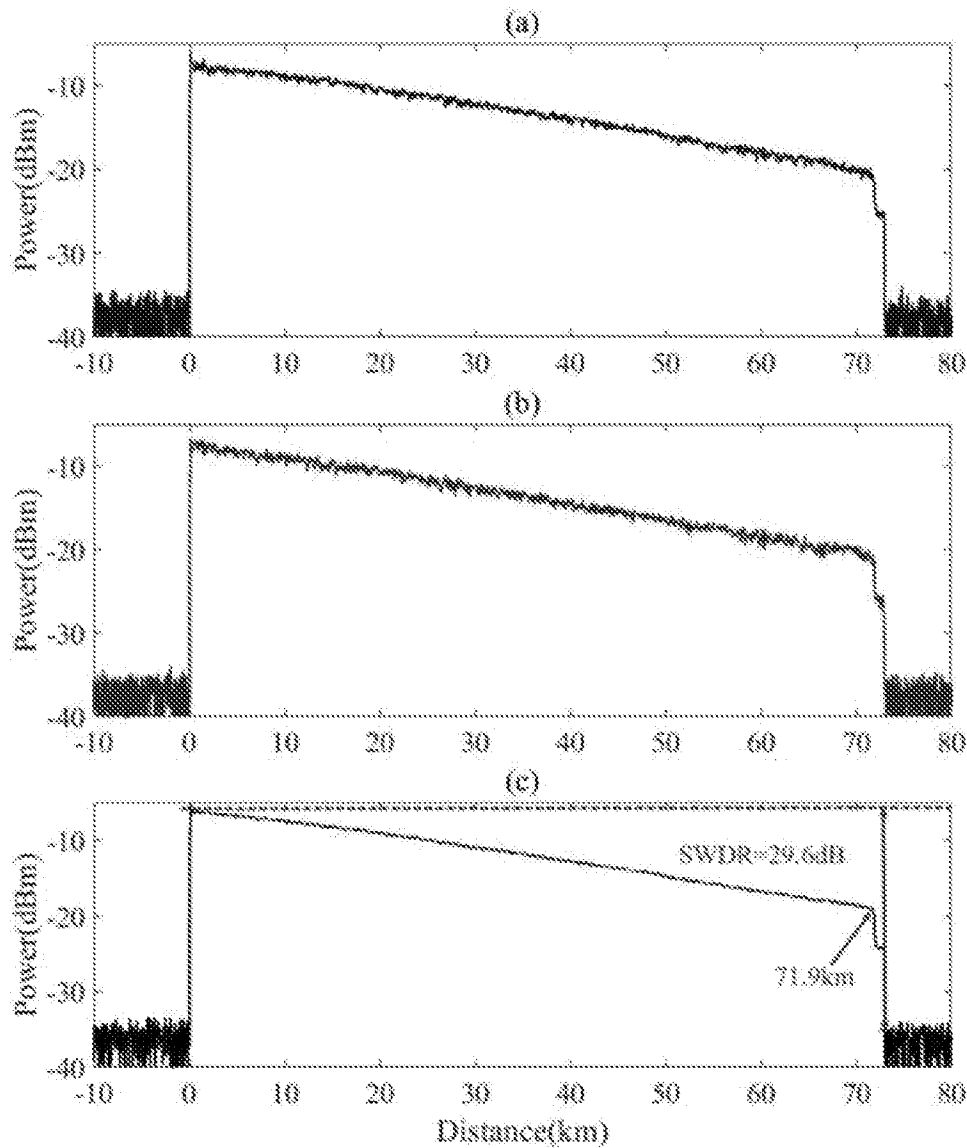


图 5

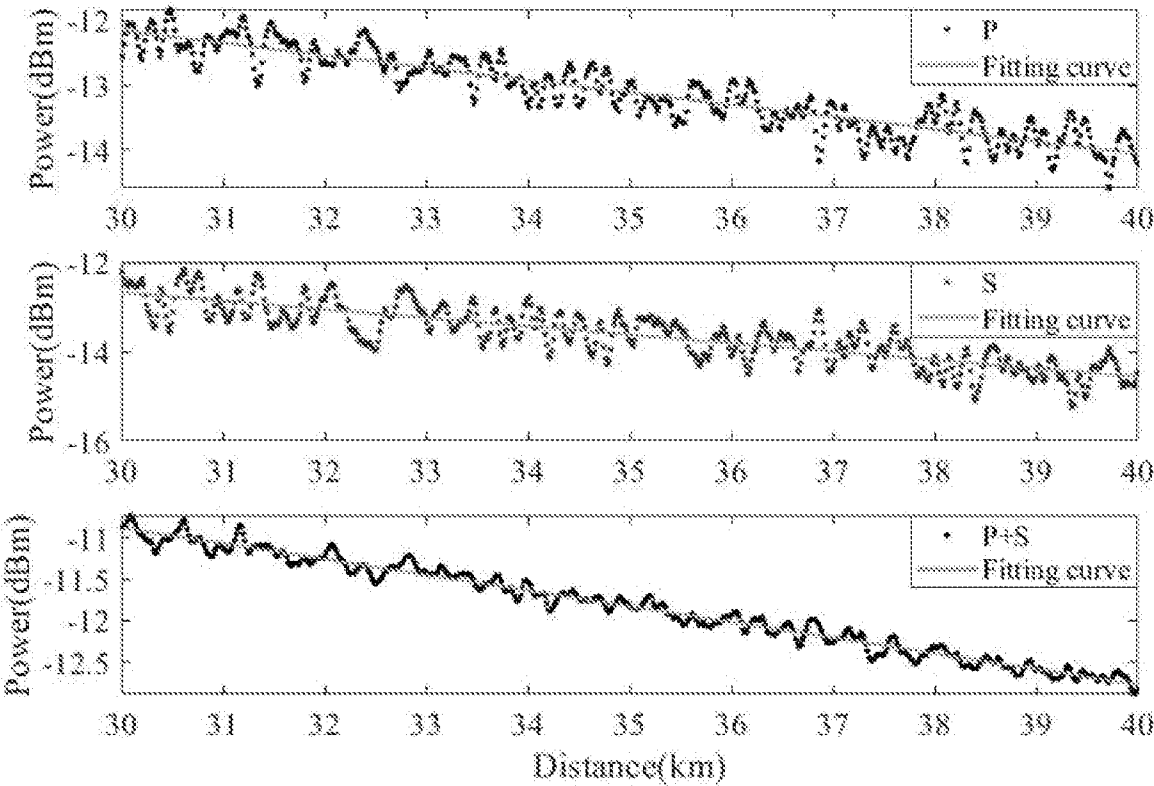


图 6

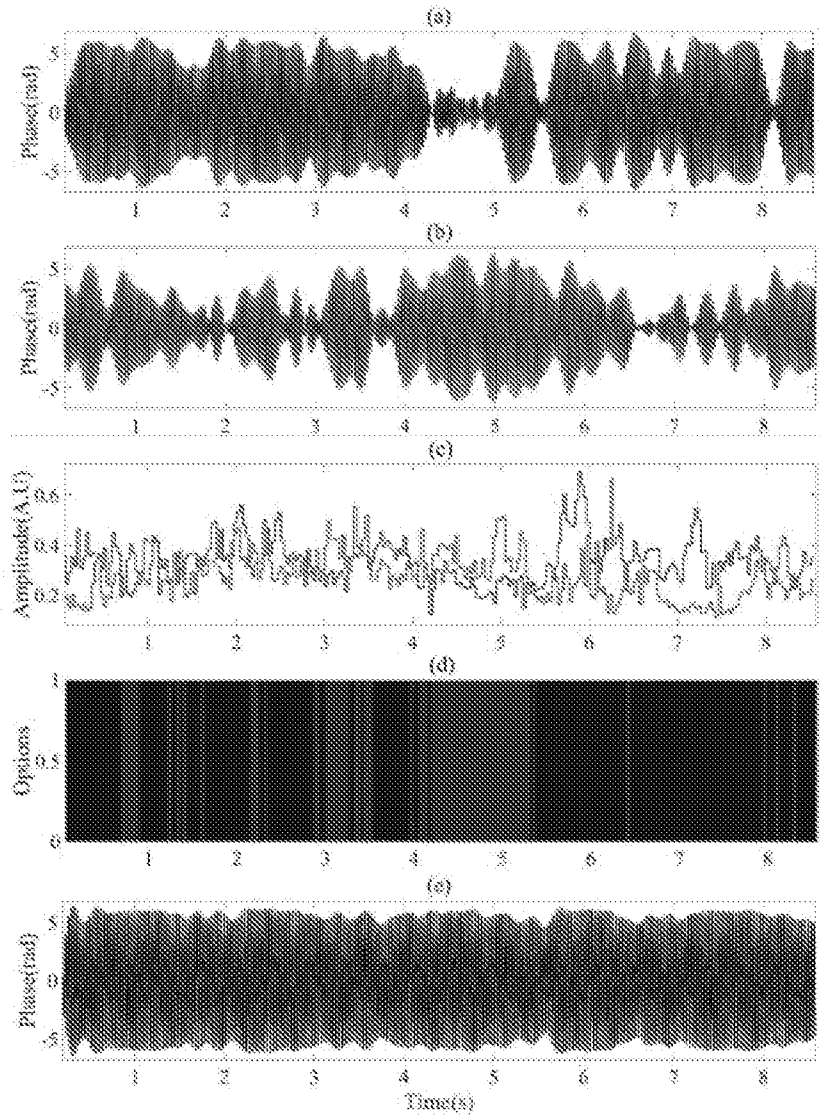


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/082419

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01M 11/02(2006.01)i; G01H 9/00(2006.01)i; G01D 5/353(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01M; G01H; G01D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; CNKI; 万方, WANFANG; 超星, CHAOXING; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; IEEE: 南京大学, 张益昕, 陈晓红, 张旭苹, 佟帅, 梁蕾, 万一鸣, 王峰, 光时域反射, 相干, 相位, 偏振分集, 光纤, 损耗, 振动, 扰动, +OTDR, Optical, Time, Domain, Reflectometry, Coherent, Phase, fiber, fibre, polari+, vibrat+, disturb+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 113176075 A (NANJING UNIVERSITY) 27 July 2021 (2021-07-27) description, paragraphs [0001]-[0073], and figures 1-7	1-4
A	CN 112595492 A (FIBERHOME TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES CO., LTD.) 02 April 2021 (2021-04-02) description, paragraphs [0001]-[0131], and figures 1-8	1-4
A	CN 111609919 A (CHONGQING UNIVERSITY) 01 September 2020 (2020-09-01) entire document	1-4
A	US 2016187224 A1 (VERIZON PATENT AND LICENSING INC.) 30 June 2016 (2016-06-30) entire document	1-4



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

04 May 2022

Date of mailing of the international search report

08 June 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/082419

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	113176075	A	27 July 2021	CN 113176075 B	25 March 2022
CN	112595492	A	02 April 2021	None	
CN	111609919	A	01 September 2020	CN 111609919 B	01 June 2021
US	2016187224	A1	30 June 2016	US 9435712 B2	06 September 2016

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/082419

A. 主题的分类

G01M 11/02 (2006.01) i; G01H 9/00 (2006.01) i; G01D 5/353 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

G01M; G01H; G01D

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNABS; CNTXT; CNKI; 万方; 超星; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; IEEE; 南京大学, 张益昕, 陈晓红, 张旭苹, 佟帅, 梁蕾, 万一鸣, 王峰, 光时域反射, 相干, 相位, 偏振分集, 光纤, 损耗, 振动, 扰动, +OTDR, Optical, Time, Domain, Reflectometry, Coherent, Phase, fiber, fibre, polari+, vibrat+, disturb+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 113176075 A (南京大学) 2021年7月27日 (2021 - 07 - 27) 说明书第[0001]-[0073]段, 附图1-7	1-4
A	CN 112595492 A (烽火通信科技股份有限公司) 2021年4月2日 (2021 - 04 - 02) 说明书第[0001]-[0131]段, 附图1-8	1-4
A	CN 111609919 A (重庆大学) 2020年9月1日 (2020 - 09 - 01) 全文	1-4
A	US 2016187224 A1 (VERIZON PATENT & LICENSING INC) 2016年6月30日 (2016 - 06 - 30) 全文	1-4

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2022年5月4日

国际检索报告邮寄日期

2022年6月8日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

杨牧

电话号码 (86-512)88997263

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/082419

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	113176075	A	2021年7月27日	CN 113176075 B	2022年3月25日
CN	112595492	A	2021年4月2日	无	
CN	111609919	A	2020年9月1日	CN 111609919 B	2021年6月1日
US	2016187224	A1	2016年6月30日	US 9435712 B2	2016年9月6日