

(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
2014 年 1 月 23 日 (23.01.2014)



(10) 国际公布号
WO 2014/012411 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01D 5/353 (2006.01) *G01B 11/16* (2006.01)
G01K 11/32 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2013/077639
- (22) 国际申请日: 2013 年 6 月 21 日 (21.06.2013)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201210250190.3 2012 年 7 月 19 日 (19.07.2012) CN
201310124500.1 2013 年 4 月 10 日 (10.04.2013) 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: 张旭苹 (ZHANG, Xuping); 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路 22 号, Jiangsu 210093 (CN)。 胡

君辉 (HU, Junhui); 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路 22 号, Jiangsu 210093 (CN)。 夏岚 (XIA, Lan); 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路 22 号, Jiangsu 210093 (CN)。

(74) 代理人: 南京瑞弘专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING RUIHONG PATENT AND TRADEMARK OFFICE (GENERAL PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市玄武区太平门街 1 号 304 室, Jiangsu 210016 (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, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV,

[见续页]

(54) Title: BOTDA SYSTEM BASED ON PULSE CODING AND COHERENT DETECTION

(54) 发明名称: 基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统

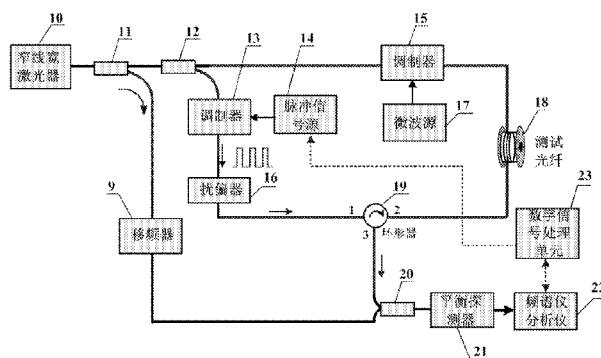


图 1 / FIG. 1

- 9 Frequency shifter
10 Narrow linewidth laser
13 Modulator
14 Pulse signal source
15 Modulator
16 Scrambler
17 Microwave source
18 Test optical fibre
19 Circulator
21 Balancing detector
22 Spectrometer analyzer
23 Digital signal processing unit

(57) Abstract: A BOTDA system based on pulse coding and coherent detection, comprising a narrow linewidth laser (10), two polarization-maintaining couplers (11, 12), a microwave signal source (17), two electrooptical modulators (13, 15), a test optical fibre (18), an optical circulator (19), a 3 dB coupler (20), a scrambler (16), a pulse signal source (14), a balancing photoelectric detector (21), a spectrum analyzer (22), a digital signal processing unit (23), and a frequency shifter (9). The system adopts the pulse coding technology and the coherent detection method at the same time, and can improve the signal-to-noise ratio and measurement precision of BOTDA and increase the sensing distance; and the system has a breakpoint monitoring function, can effectively overcome the defect that the conventional BOTDA requires double-end access, resulting in the occurrence of breakpoints and work failure, and enhances the adaptability and practicality of a sensing system.

(57) 摘要:

[见续页]



SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC,
VN, ZA, ZM, ZW。

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)。

- (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, 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,

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 包括窄线宽激光器 (10), 两个保偏耦合器 (11, 12), 微波信号源 (17), 两个电光调制器 (13, 15), 测试光纤 (18), 光环形器 (19), 3dB 耦合器 (20), 扰偏器 (16), 脉冲信号源 (14), 平衡光电探测器 (21), 频谱分析仪 (22), 数字信号处理单元 (23), 移频器 (9)。该系统同时采用了脉冲编码技术和相干检测方法, 可提高 BOTDA 的信噪比、测量精度和增加传感距离, 并且该系统具有断点监测功能, 能有效克服传统 BOTDA 需要双端接入带来出现断点不能工作的缺点, 增强传感系统的适应能力和实用性。

基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统

技术领域

本发明涉及一种基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统，属于分布式光纤传感技术领域。

背景技术

基于光纤受激布里渊散射的布里渊光时域分析仪(Brillouin Optical Time-Domain Analysis, BOTDA)是众多分布式光纤传感器中具有长距离、高测量精度温度和应变测量能力的传感技术，在大型土木工程、通信光缆、油气管道等的结构健康监测中有着巨大的应用前景。在这种技术中，当光纤中相向传输的两束光波的频率差在布里渊增益范围内时，它们通过声波场发生受激布里渊作用，由此两束光之间发生能量转移，当两束光的频率差等于光纤的布里渊频移(Brillouin frequency shift, BFS)时，能量转移量最大，这个布里渊频移(BFS)与温度和应变之间存在一个线性关系，因此通过测量两束光波能量转移量最大时的频率差，进而测得布里渊频移(BFS)，根据布里渊频移(BFS)与温度和应变之间存在一个线性关系就可以实现温度和应变的分布式传感。

基于相干检测的光时域反射仪(COTDR)，该技术利用相干检测的方法来探测瑞利散射信号，有效抑制了自发辐射噪声(ASE)对瑞利散射功率的影响，非常适合用于诸如海底光缆等长距离并且存在多个光纤放大器的链路检测，COTDR 广泛应用于超长距离光纤链路的损耗、故障点、接续点和断点等事件的监测，是跨洋海缆的不可或缺的监测工具。

传统的 BOTDA 系统一般采用直接探测方式，由于光纤非线性效应的存在，探测光和泵浦光所允许的最大光功率受到限制，因此 BOTDA 的传感性能受到限制。基于直接探测方法的传统 BOTDA 的有效传感长度一般小于 40km。此外，BOTDA 存在由于需要双端接入而带来的当光纤链路中出现断点时不能工作的缺点，这极大的限制了 BOTDA 的应用场合。而近年来，随着电力传输网络的发展，各种大型基础设施的健康监控和重大灾害防治需要的增加，对长距离分布式光纤温度、应变传感网络提出了更高的要求。

发明内容

本发明的目的是，提出一种融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪代替传统直接检测的 BOTDA，可以实现长距离的温度或应变传感，当传感光纤出现断点时，

系统能对断点进行定位。本发明的目的还在于，克服上述方法与系统存在信噪比、空间分辨率和测量精度不够高的缺点，提出一种增益高、传感距离长、系统信噪比和测量精度高的基于脉冲编码和相干探测的具有断点定位功能的 BOTDA 系统。

本发明为达到上述目的，采用如下技术方案：一种融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，包括窄线宽激光器，第一耦合器，第二耦合器，微波信号源，电光调制器，隔离器，长距离传感光纤，光环形器，3dB 耦合器，脉冲调制器，掺铒光纤放大器，扰偏器，脉冲信号发生器，平衡光电探测器，电频谱分析仪，数据处理模块，声光调制器；其中：

所述窄线宽激光器发出连续光经第一耦合器分成两路连续光：第一路连续光、第二路连续光，其中，第一路连续光经由脉冲信号发生器控制的脉冲调制器调制成泵浦脉冲光，所述泵浦脉冲光经掺铒光纤放大器放大到所需光功率后，经扰偏器由光环形器的第 1 端口注入光环形器，然后由光环形器的第 2 端口输出至长距离传感光纤的 B 端口进入长距离传感光纤；

第二路连续光经第二耦合器再分成两路连续光：其中一路连续光经声光调制器移频 f_1 后作为本振光；另一路连续光经电光调制器移频 f 后作为探测信号光，移频量 f 的值由微波信号源控制，由电光调制器调制的探测信号光具有对称的两个探测边带，两个探测边带经隔离器后同时从长距离传感光纤的 A 端注入长距离传感光纤，与相向传输的泵浦脉冲光在长距离传感光纤中发生受激布里渊散射作用，然后两个探测边带经光环形器的第 3 端口进入 3dB 耦合器与所述本振光相干混频后由平衡探测器探测，所述电频谱分析仪根据观测和采集平衡探测器输出的中频电信号获取布里渊增益谱，所述数据处理模块对电频谱分析仪采集到的布里渊增益谱进行洛伦茨拟合得到沿光纤的布里渊频移分布，根据布里渊频移与温度和应变的解调关系，实现光纤分布式温度或应变的传感。

进一步的，本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，所述脉冲信号发生器用于控制脉冲调制器的同时，还对电频谱分析仪进行同步触发控制。

进一步的，本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，所述长距离传感光纤为长度超过 70km 的普通单模光纤。

进一步的，本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，当所述长距离传感光纤出现断点时，所述脉冲调制器调制的泵浦光脉冲成为探测信号光，其后向的瑞利散射光注入光环形器的第 2 端口后，经光环形器的第 3 端口进入 3dB 耦合器与本振光相干混频后由平衡探测器探测，电频谱分析仪的中心频率设置在中频 $f_{IF} = f_1$ 处，

并采用“零范围”模式，经多次平均后获取瑞利散射光的时域曲线分布，实现 COTDR 断点检测的功能。

进一步的，本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，还包括设置在第一耦合器与脉冲调制器之间的第一偏振控制器、以及设置在第二耦合器与电光调制器之间的第二偏振控制器；其中，所述第一偏振控制器用于控制射入电光调制器的光的偏振态，所述第二偏振控制器用于控制射入脉冲调制器的光的偏振态。

进一步的，本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，所述微波信号源输出的微波控制信号的频率约为长距离传感光纤的一个布里渊频移。

进一步的，本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，所述微波信号源控制移频量 f 的值，即为控制探测光和泵浦脉冲光之间的频率差，通过不断调节微波信号源的调制频率改变探测光和泵浦脉冲光之间的频率差，实现布里渊频谱的扫频测量。

一种基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统，包括移频器、窄线宽激光器、第一保偏耦合器、第二保偏耦合器、第一电光调制器、脉冲信号源、第二电光调制器、扰偏器、微波信号源、测试光纤、光环形器、3dB 耦合器、平衡光电探测器、频谱分析仪、数字信号处理单元，窄线宽激光器发出连续光经第一保偏耦合器分成两路连续光：第一路连续光、第二路连续光，其中，

第一路连续光经移频器移频 f_1 后作为本振光；

第二路连续光经第二保偏耦合器再分成两路连续光：其中一路连续光经经由脉冲信号源控制的第一电光调制器调制成编码泵浦脉冲，所述编码泵浦脉冲光经扰偏器后由光环形器的第 1 端口注入，然后由光环形器的第 2 端口输出至测试光纤的一端；另一路连续光经第二电光调制器移频 f 后作为探测信号光，移频量 f 的值由微波信号源控制，由第二电光调制器调制的探测信号光具有对称的两个探测边带，两个探测边带从测试光纤的另一端注入，与相向传输的编码泵浦脉冲光在测试光纤中发生受激布里渊散射作用，经过受激布里渊作用后的探测信号光经光环形器的第 3 端口进入 3dB 耦合器与所述本振光相干混频后由平衡探测器进行相干检测，平衡探测器输出的中频电信号由频谱分析仪观测和采集，数字信号处理单元对电频谱分析仪采集到的中频电信号进行解码、累加处理得到布里渊增益谱，并对所获得的布里渊增益谱进行洛伦兹拟合得到沿光纤的布里渊频移分布，在根据布里渊频移与温度和应变的解调关系，实现光纤分布式温度或应变的传感。

进一步的, 所述平衡探测器是频率响应大于 12GHz 的光电探测器。

进一步的, 所述移频器的频移量 f_1 超过 80MHz。

进一步的, 所述第一电光调制器调制输出的编码泵浦脉冲是 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码泵浦脉冲光。

本发明的基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 当所述测试光纤出现断点时, 所述第一电光调制器调制输出的 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码泵浦脉冲光作为探测信号光, 其后向的瑞利散射光经光环形器的第 3 端口进入 3dB 耦合器与所述本振光相干混频后由平衡探测器进行相干检测, 此时所述电频谱分析仪采用 “Zero-Span” 模式提取中频 $f_{if} = f_1$ 的中频信号, 经多次累加平均后得到瑞利散射的 OTDR 功率分布曲线, 实现断点检测功能。

进一步的, 所述数字信号处理单元控制着脉冲信号源产生 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码电脉冲, 并对频谱分析仪作同步控制。

进一步的, 通过调节所述微波信号源调制频率 f 的值, 实现布里渊频谱的扫频测量。

进一步的, 该系统同时采用了脉冲编码技术和相干探测技术两种技术。

本发明采用以上技术方案与现有技术相比, 具有以下有益效果:

本发明采用相干检测技术代替传统直接检测的方法, 有效提高 BOTDA 系统的信噪比和动态范围, 在无光放大器的情况下, 传感长度超过 70km; 本发明采用双边带探测方法, 可以有效的减小传统 BOTDA 中的非局域效应, 提高长距离测量的精度; 本发明的 BOTDA 相对于传统的 BOTDA, 由于采用相干检测的方法, 系统中不再需要窄带宽的光滤波器, 提高了系统的稳定性; 本发明将具有单端接入和超长距离断点检测能力的 COTDR 融合到相干探测的 BOTDA 系统中, 在传感光纤出现断点时, 系统能工作在 COTDR 断点检测模式, 有效克服传统 BOTDA 在传感光纤出现断点不能工作且无法对断点定位的缺点, 增强传感器的实用性。

本发明同时采用脉冲编码技术和相干检测结合的方法, 可提高 BOTDA 系统的信噪比、改善温度和应变的测量精度和增加传感距离; 采用 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码泵浦脉冲光, 在提高系统信噪比同时又可通过减小编码脉冲的码元宽度来提高系统的空间分辨率, 码元宽度可以小到与光纤声子寿命 10ns 相当, 对应空间分辨率可达到 1m; 采用相干探测使得系统具有断点监测功能, 能有效克服传统 BOTDA 需要双端接入带来出现断点不能工作的缺点, 增强传感系统的适应能力和实用性。本发明实现长距离的温度或应变传感, 当传感光纤出现断点时, 系统具有对断点进行定位的功能, 同时具有高的

空间分辨率、测量精度高，传感距离长，信噪比高。

附图说明

图 1 是本发明基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统示意图。

图 2 是本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪示意图。

图 3 是本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪所测得的布里渊频移沿光纤长度的分布图。

图 4 是当长距离传感光纤的 A 端断开时，本发明实现的 COTDR 测试结果图。

图 1 中：9、移频器；10、窄线宽激光器；11、第一保偏耦合器；12、第二保偏耦合器；13、第一电光调制器；14、脉冲信号源；15、第二电光调制器；16、扰偏器；17、微波信号源；18、测试光线；19、光环形器；20、3dB 耦合器；21、平衡光电探测器；22、电频谱分析仪；23、数字信号处理单元。

具体实施方式

下面结合附图和实施例对本发明的技术方案作进一步详细说明和描述。

如图 1 所示，一种基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统包括移频器 9、窄线宽激光器 10、第一保偏耦合器 11、第一保偏耦合器、第一电光调制器 13、脉冲信号源 14、第二电光调制器 12、扰偏器 16、微波信号源 17、测试光纤 18、光环形器 19、3dB 耦合器 20、平衡光电探测器 21、频谱分析仪 22 和数字信号处理单元 23。

假设 3dB 线宽小于 1MHz 的窄线宽激光器 10 出射光的频率为 f_0 ，激光器发出连续光经第一保偏耦合器 11 分成两路连续光：第一路连续光经移频器 9 移频 f_1 后作为后续相干探测的本振光；第二路连续光经第二保偏耦合器 12 再分成两路连续光：其中一路连续光经由脉冲信号源 14 控制的第一电光调制器 13 制成 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码脉冲，编码长度根据实际情况由脉冲信号源 14 设定，所述编码泵浦脉冲光经扰偏器 16 后由光环形器 19 的第 1 端口注入，然后由光环形器 19 的第 2 端口输出至测试光纤 18 的一端；另一路连续光经第二电光调制器 15 移频 f 后作为探测信号光，移频量 f 的值由微波源 17 控制，由第二电光调制器 15 调制的探测信号光具有对称的两个探测边带，两个探测边带从测试光纤的另一端注入，与相向传输的编码泵浦脉冲光在测试光纤中发生受激布里渊散射作用，经过受激布里渊作用后的探测信号光经光环形器 19 的第 3 端口进入

3dB 耦合器 20 与所述本振光相干混频后由平衡光电探测器 21 进行相干检测。根据相干检测原理, 平衡光电探测器 21 输出拍频信号的光电流为:

$$i_{\text{det}}(t) = 2R\sqrt{P_L P_p (1 + g_{\text{SBS}}(v_s, z))^2} \times \cos(2\pi f_{\text{IF}} t + \Delta\phi) \quad (1)$$

式(1)中, g_{SBS} 是受激布里渊增益, R 为平衡光电探测器的响应度, P_L 和 P_p 分别是本振光的功率和探测光的功率, f_{IF} 是拍频信号频率(也称为中频), $\Delta\phi$ 是本振光和探测光的相位差。将电频谱分析仪的中心频率设置在中频 f_{IF} 处, 并采用“Zero-Span”模式, 数字信号处理单元 24 对电频谱分析仪采集到的中频电信号进行解码、累加处理后则可以获取中频 f_{IF} 信号的时域功率曲线。在布里渊频谱范围内按一定频率间隔调节微波源 17 的输出信号频率 f , 按前面所述获取中频信号沿光纤分布的时域功率曲线的方法, 可以得到一系列中频信号的时域功率曲线, 按中频的大小将这一系列时域功率曲线重整后, 可以获得沿光纤分布的布里渊增益谱, 对布里渊增益谱进行洛伦兹拟合, 得到沿光纤分布的布里渊频移, 根据温度和应变与布里渊频移关系, 实现温度或应变分布式测量。

温度和应变的解调原理如下:

布里渊频移变化量 Δv_B 与温度和应变的线性关系为:

$$\Delta v_B = C_{vT} \Delta T + C_{v\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (2)$$

式(2)中 ΔT 为温度的变化量, $\Delta \varepsilon$ 为应变的变化量, C_{vT} 和 $C_{v\varepsilon}$ 分别是布里渊频移的温度系数和应变系数, 这些系数通过已知条件的实验进行标定, 根据测得的布里渊频移变化量和(2)式, 实现温度或应变的分布式传感。

脉冲编码和解码原理:

本发明中的编码泵浦脉冲光是由相关序列对窄线宽激光器 10 输出的连续光进行调制而成, 这些相关序列是有两个或者多个由“-1”和“1”组成的序列组, 且它们的自相关函数和为 δ 函数的整数倍, 由于光脉冲只能为单极性, 因此当序列中含有元素“-1”时, 可将该双极性序列用两个单极性序列的差表示, 而该双极性序列的系统响应可以由这两个单极性序列的响应相减得到。解码时将双极性序列的系统响应与该相关序列做互相关后累加可以得到系统响应的估计值, 从而实现信号的解码。

Hadamard 序列和 Golay 互补序列是常用的相关序列, 它们具有很好的相关性, 由编码原理可知, 采用 N 位的 Hadamard 序列和 Golay 互补序列可获得的信噪比改善分别为:

$$G_H = \frac{N^2}{(2N-1)\sqrt{N}} \quad (3)$$

$$G_G = \frac{\sqrt{N}}{2} \quad (4)$$

断点监测原理为：

当测试光纤 18 出现断点时，所述第一电光调制器 13 调制的具有时间序列的编码泵浦脉冲光成为探测脉冲光，其后向的瑞利散射光经光环形器的第 3 端口进入 3dB 耦合器与本振光相干混频后由平衡光电探测器 21 探测，将频谱分析仪 22 的中频选为 f_i ，在“Zero-Span”模式，采集中频电信号并由对数字信号处理单元 23 其进行解码、累加处理后则得到时域下 OTDR 的功率曲线，实现断点检测的功能。

本发明同时采用了脉冲编码技术和相干检测方法，可提高 BOTDA 系统的信噪比、改善温度和应变的测量精度和增加传感距离；采用时间序列编码激光脉冲，在提高系统信噪比同时又可通过减小编码脉冲的码元宽度来提高空间分辨率，码元宽度可以小到与光纤声子寿命 10ns 相当，对应空间分辨率可达到 1m；采用相干探测使得 BOTDA 系统具有断点监测功能，能有效克服传统 BOTDA 需要双端接入带来出现断点不能工作的缺点，增强 BOTDA 传感系统的适应能力和实用性。

参照图 2，本发明的融合 COTDR 的超长距离相干检测布里渊光时域分析仪，具体为：线宽小于 1MHz 的激光器 30 发出 1550nm 的连续光（功率为 16dBm），耦合器 31 分成两路，一路经由脉冲信号发生器 44 控制的脉冲调制器 21 调制成 50ns 的泵浦光脉冲，脉冲调制器 41 为铌酸锂强度电光调制器，消光比为 40dB，由于电光调制器对光的偏振态敏感，所以为了减小偏振态的影响，在脉冲调制器 41 前放置了偏振控制器 40 用于控制入射光的偏振态，光脉冲经掺铒光纤放大器 42 放大到所需光功率（脉冲峰值功率为 20dBm 左右）后经扰偏器 43 注入光环形器 38 的 1 端口，由光环形器 38 的 2 端口出射后，从长距离传感光纤 37 的 B 端进入长距离传感光纤 37。

另一路连续光经耦合器 32 再分成两路：其中一路连续光经声光调制器 30-1 移频 f_i 后作为本振光，声光调制器 30-1 的频移量 $f_i=80\text{MHz}$ ；另一路连续光经带宽大于 12GHz 的电光调制器 35 移频 f 后作为探测信号光，移频量 f 的大小由微波信号源 34 控制，约为光纤介质的一个布里渊频移，电光调制器 35 前的偏振控制器 33 控制入射光的偏振态；由电光调制器 35 调制的探测信号光有对称的两个边带，边带探测光与原连续光差频约为 11GHz，为了减小泵浦衰减造成的非局域效应，采用双边带探测技术，即两个边带探测光

经隔离器 36 后同时从长距离传感光纤 37 的 A 端注入长距离传感光纤 37，然后与相对传输的泵浦脉冲光在长距离传感光纤 37 中发生受激布里渊散射作用，然后两个边带探测光经光环形器 38 的 3 端口进入 3dB 耦合器 39 与本振光相干混频后由平衡探测器 45 探测；平衡探测器 45 的带宽大于 12GHz，电频谱分析仪 46 用于观测和采集平衡探测器 45 输出的中频电信号，数据处理模块 47 对电频谱分析仪 46 采集到的信号进行数据处理得到沿光纤的布里渊频移分布，根据布里渊频移与温度和应变的关系，即温度和应变的解调原理，实现温度或应变的分布式测量。

本发明的相干检测布里渊光时域分析仪利用光纤中受激布里渊散射效应，采用相干检测技术和双边带探测方式制成的布里渊光时域分析仪。

脉冲信号发生器 44 用于控制脉冲调制器 21 的同时，对电频谱分析仪 46 进行同步触发控制。

微波信号源 44 输出的微波控制信号的频率约为长距离传感光纤 37 的一个布里渊频移；所述微波信号源 44 控制探测光和泵浦脉冲光之间的频率差，通过不断调节微波信号源 34 的调制频率改变探测光和泵浦脉冲光之间的频率差，完成布里渊频谱的扫频测量；所述电频谱分析仪 26 获取布里渊增益谱；数据处理模块 47 对电频谱分析仪 46 采集到的布里渊增益谱进行洛伦茨拟合得到沿光纤的布里渊频移分布，根据布里渊频移与温度和应变的关系，实现温度或应变的分布式传感。

图 3 是本发明的融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪所测得的布里渊频移沿光纤长度的分布图。图中布里渊频移分成两段，这是因为传感光纤由两段布里渊频移不同的光纤组成，前一段光纤长约 48km，后一段光纤长度约为 24km，图中的小插图 3 为后一段光纤接近末端处的布里渊频移分布的放大图，其中在 24km 末端约 50m 的光纤的温度与其余光纤的温度实际相差约 32.7°C，而放大图中两部分光纤的布里渊频移相差约 34.2MHz，与实际温度相符(布里渊频移温度系数取 1.1MHz/°C)。

所述融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪，当长距离传感光纤 17 出现断点时，所述脉冲调制器 21 调制的泵浦光脉冲成为探测脉冲，其后向的瑞利散射光经光环形器 38 的 3 端口进入 3dB 耦合器 39 与本振光相干混频后由平衡探测器 46 探测，将电频谱分析仪 46 的中频选为 80MHz，在“Zero-Span”模式，经多次平均后则得到时域下 OTDR 的功率曲线，实现 COTDR 断点检测的功能。图 4 是当长距离传感光纤的末端断开时，本发明实现的 COTDR 测试结果图。

本发明采用相干检测方法提高 BOTDA 的信噪比，采用双边带的探测方式减小系统的

非局域效应，有效提高了 BOTDA 系统的传感距离，并将具有单端接入和超长距离断点检测能力的 COTDR 融合到相干探测的 BOTDA 系统中，在传感光纤 37 出现断点时，系统能工作在 COTDR 断点检测模式，有效克服传统 BOTDA 在传感光纤出现断点不能工作且无法对断点定位的缺点，增强传感器的实用性。

虽然本发明已以较佳实施例公开如上，但它们并不是用来限定本发明，本领域的开发人员可以对本发明的实施例进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样，倘若本发明实施例中的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同的范围之内，则本发明中的实施例也包含这些改动和变型在内。因此本发明的保护范围应当以本申请的权利要求所界定的为准。

1. 一种基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 包括窄线宽激光器(10)、第一保偏耦合器(11)、第二保偏耦合器(12)、微波信号源(17)、测试光纤(18)、光环形器(19)、3dB 耦合器(20)、平衡光电探测器(21)、扰偏器(16)、电频谱分析仪(22)和数字信号处理单元(23), 窄线宽激光器(10)发出连续光经第一保偏耦合器(11)分成两路连续光: 第一路连续光、第二路连续光, 其特征在于: BOTDA 系统还包括移频器(9)、第一电光调制器(13)、脉冲信号源(14)、第二电光调制器(15)其中:

第一路连续光经移频器(9)移频 f_1 后作为本振光;

第二路连续光经第二保偏耦合器(12)再分成两路连续光: 其中一路连续光经由脉冲信号源(14)控制的第一电光调制器(13)调制成泵浦脉冲, 所述泵浦脉冲光经扰偏器(16)后由光环形器(19)的第 1 端口注入, 然后由光环形器(19)的第 2 端口输出至测试光纤(18)的一端; 另一路连续光经第二电光调制器(15)移频 f 后作为探测信号光, 移频量 f 的值由微波信号源(14)控制, 由第二电光调制器(15)调制的探测信号光具有对称的两个探测边带, 两个探测边带从测试光纤(18)的另一端注入, 与相向传输的泵浦脉冲光在测试光纤(18)中发生受激布里渊散射作用, 经过受激布里渊作用后的探测信号光经光环形器(19)的第 3 端口进入 3dB 耦合器(20)与所述本振光相干混频后由平衡光电探测器(21)进行相干检测, 平衡光电探测器(21)输出的中频电信号由电频谱分析仪(22)观测和采集, 数字信号处理单元(23)对电频谱分析仪(22)采集到的中频电信号进行相应的处理得到布里渊增益谱; 并对所获得的布里渊增益谱进行洛伦兹拟合得到沿光纤的布里渊频移分布, 在根据布里渊频移与温度和应变的解调关系, 实现光纤分布式温度或应变的传感。

2. 根据权利要求 1 所述基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 其特征在于: 所述平衡光电探测器(21)是频率响大于 12GHz 的光电探测器。

3. 根据权利要求 1 所述基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 其特征在于: 所述移频器(9)的移频量超过 80MHz。

4. 根据权利要求 1 所述基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 其特征在于: 所述数字信号处理单元(23)控制着脉冲信号源(14)产生 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码电脉冲, 并对电频谱分析仪(22)作同步控制。

5. 根据权利要求 1 所述基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 其特征在于: 所述第一电光调制器(13)由脉冲信号源(14)控制, 其输出的是 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码泵浦脉冲光。

6. 根据权利要求 1 所述基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 其特征在于: 当所述测试光纤(18)不出现断点时, 所述平衡光电探测器(21)输出拍频信号的光电流为:

$$i_{\text{det}}(t) = 2R\sqrt{P_L P_p (1 + g_{\text{SBS}}(v_s, z))^2} \times \cos(2\pi f_{\text{IF}} t + \Delta\phi)$$

其中, g_{SBS} 是受激布里渊增益, R 为平衡光电探测器的响应度, P_L 和 P_p 分别是本振光的功率和探测光的功率, f_{IF} 是拍频信号频率(也称为中频), $\Delta\phi$ 是本振光和探测光的相位差; 当所述测试光纤(18)出现断点时, 所述第一电光调制器(13)调制输出的具有时间序列的 Hadamard 序列或 Golay 互补序列的编码泵浦脉冲光作为探测信号光, 其后向的瑞利散射光经所述光环形器(19)的第 3 端口进入 3dB 耦合器(20)与所述本振光相干混频后由平衡光电探测器(21)进行相干检测, 此时所述电频谱分析仪(22)采用“Zero-Span”模式提取频率 $f_{\text{IF}} = f_i$ 的中频信号, 经多次累加平均后得到瑞利散射的 OTDR 功率分布曲线, 实现断点检测功能。

7. 根据权利要求 1 所述基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 其特征在于: 所述电频谱分析仪(22)的中心频率设置在中频 f_{IF} 处, 并采用“Zero-Span”模式, 所述数字信号处理单元(23)对所述电频谱分析仪(22)采集到的中频电信号进行解码、累加处理后可以获取中频 f_{IF} 信号的时域功率曲线。

8. 根据权利要求 1 所述基于脉冲编码和相干探测的 BOTDA 系统, 其特征在于: 通过调节所述微波信号源(17)调制频率 f 的值, 实现布里渊频谱的扫频测量。

9. 一种融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪, 其特征在于: 包括窄线宽激光器(10), 第一耦合器(11), 第二耦合器(12), 微波信号源(14), 电光调制器(15), 隔离器(16), 长距离传感光纤(17), 光环形器(18), 3dB 耦合器(19), 脉冲调制器(21), 掺铒光纤放大器(22), 扰偏器(23), 脉冲信号发生器(24), 平衡光电探测器(25), 电频谱分析仪(26), 数据处理模块(27), 声光调制器(30); 其中:

所述窄线宽激光器(10)发出连续光经第一耦合器(11)分成两路连续光: 第一路连续光、第二路连续光, 其中,

第一路连续光经由脉冲信号发生器(24)控制的脉冲调制器(21)调制成泵浦脉冲光, 所述泵浦脉冲光经掺铒光纤放大器(22)放大到所需光功率后, 经扰偏器(23)由光环形器(18)的第 1 端口注入光环形器(18), 然后由光环形器(18)的第 2 端口输出至长距离传感光纤(17)的 B 端口进入长距离传感光纤(17);

第二路连续光经第二耦合器(12)再分成两路连续光: 其中一路连续光经声光调制器(30)移频 f_i 后作为本振光; 另一路连续光经电光调制器(15)移频 f 后作为探测信号光, 移

频量 f 的值由微波信号源(14)控制, 由电光调制器(15)调制的探测信号光具有对称的两个探测边带, 两个探测边带经隔离器(16)后同时从长距离传感光纤(17)的 A 端注入长距离传感光纤(17), 与相向传输的泵浦脉冲光在长距离传感光纤(17)中发生受激布里渊散射作用, 然后两个探测边带经光环形器(18)的第 3 端口进入 3dB 耦合器(19)与所述本振光相干混频后由平衡探测器(25)探测, 所述电频谱分析仪(26)根据观测和采集平衡探测器(25)输出的中频电信号获取布里渊增益谱, 所述数据处理模块(27)对电频谱分析仪(26)采集到的布里渊增益谱进行洛伦茨拟合得到沿光纤的布里渊频移分布, 根据布里渊频移与温度和应变的解调关系, 实现光纤分布式温度或应变的传感。

10. 根据权利要求 1 所述融合 COTDR 的长距离相干检测布里渊光时域分析仪, 其特征在于: 当所述长距离传感光纤(17)出现断点时, 所述脉冲调制器(21)调制的泵浦光脉冲成为探测信号光, 其后向的瑞利散射光注入光环形器(18)的第 2 端口后, 经光环形器(18)的第 3 端口进入 3dB 耦合器(19)与本振光相干混频后由平衡探测器(25)探测, 电频谱分析仪(26)的中心频率设置在中频 $f_{IF} = f_1$ 处, 并采用“Zero-Span”模式, 经多次平均后获取瑞利散射光的时域曲线分布, 实现 COTDR 断点检测的功能。

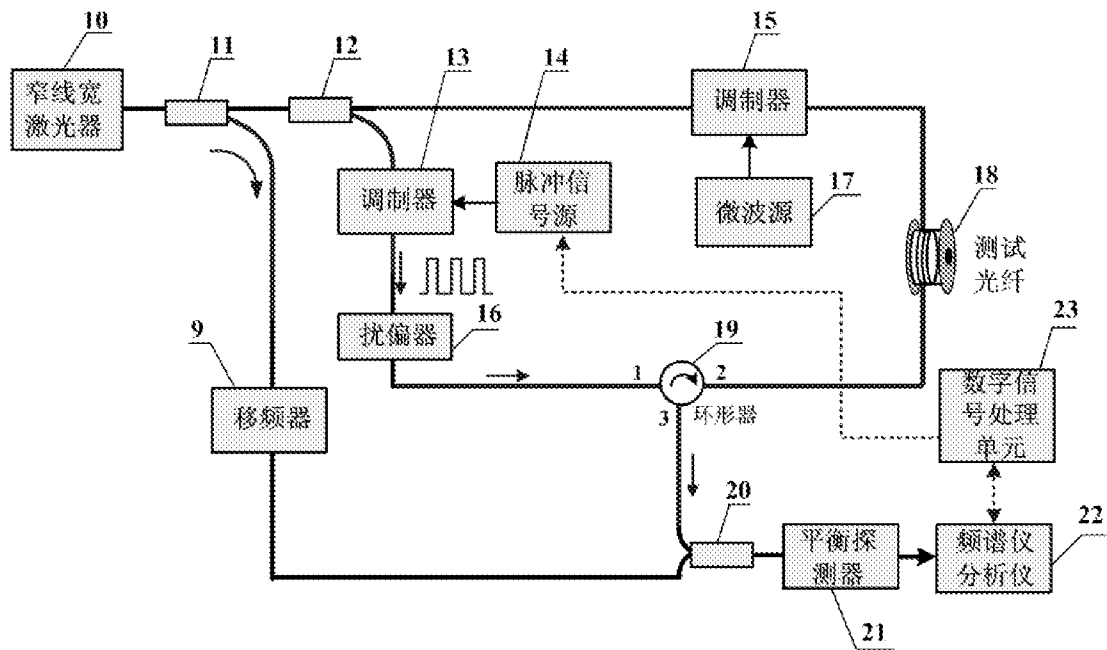


图 1

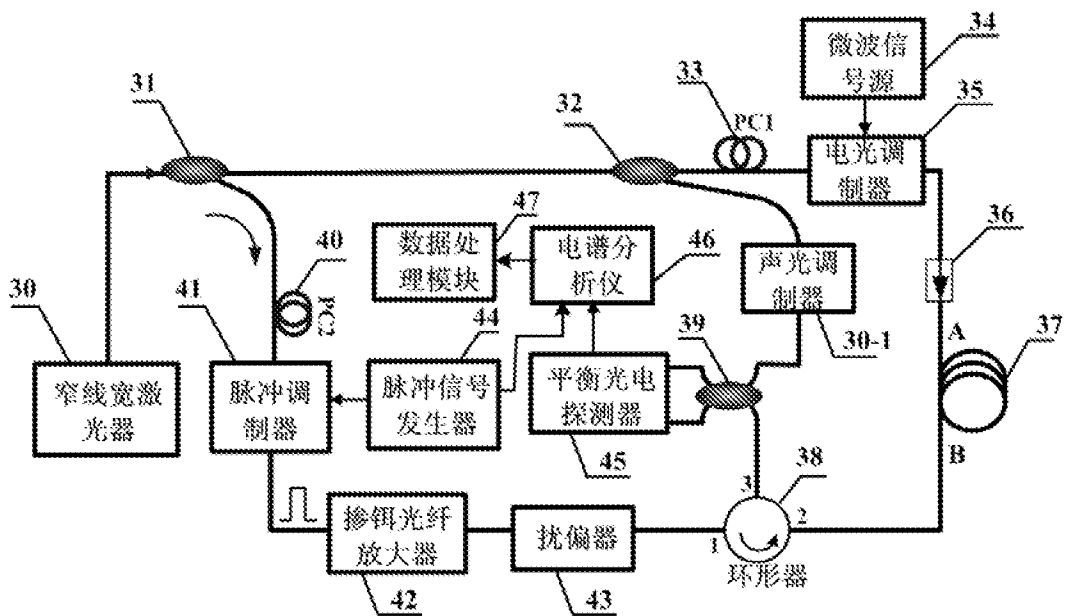


图 2

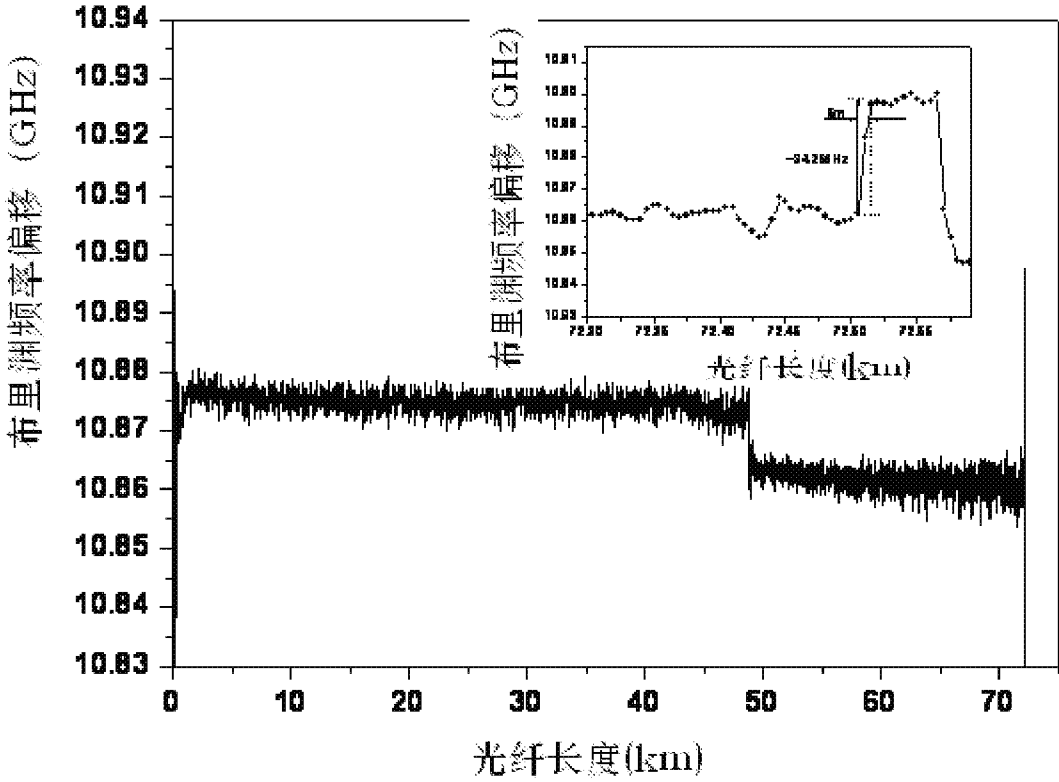


图 3

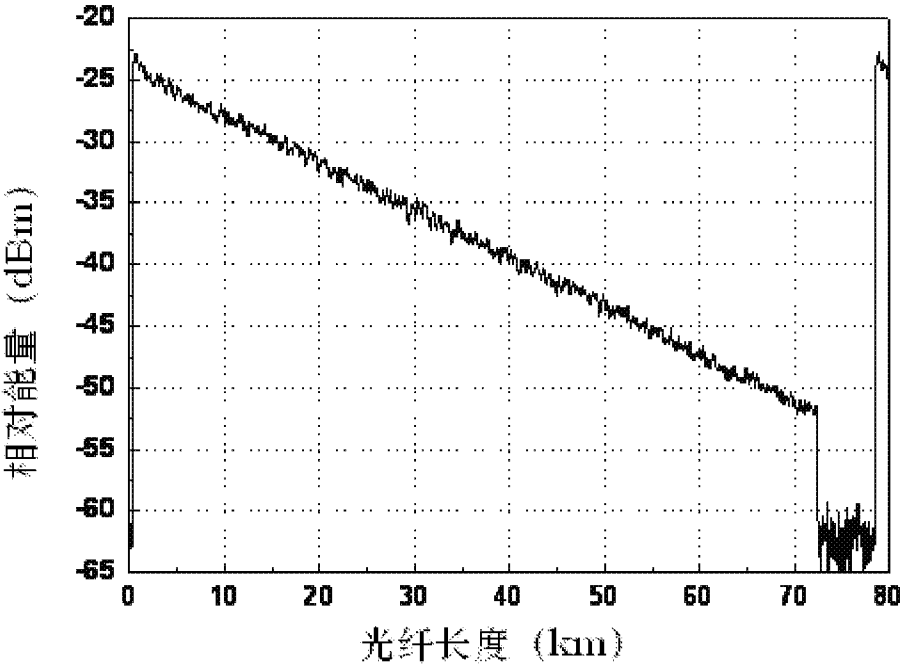


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2013/077639

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See the extra sheet

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)

IPC: G01D 5/353 G01K 11/32 G01B 11/16

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, CJFD, CNKI, VEN: BOTDA, COTDR, frequency, shift, coherent, pulse, brillouin

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 102759371 A (UNIV NANJING) 31 October 2012 (31.10.2012) claims 1-7	9-10
A	CN 102589592 A (NANJING UNIVERSITY SUZHOU HIGH TECH INS et al.) 18 July 2012 (18.07.2012) description, paragraphs [0022] and [0023], figures 2 and 3	1-8
A	CN 202195827 U (UNIV JILIANG CHINA) 18 April 2012 (18.04.2012) description, paragraphs [0054] to [0059] and figure 1	1-10
A	CN 101324424 A (UNIV JILIANG CHINA) 17 December 2008 (17.12.2008) the whole document	1-10
A	CN 102425995 A (WUXI CHENGDIAN OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY CO LTD) 25 April 2012 (25.04.2012) the whole document	1-10
A	CN 102147236 A (UNIV NANJING) 10 August 2011 (10.08.2011) the whole document	1-10
A	CN 101144729 A (UNIV NANJING) 19 March 2008 (19.03.2008) the whole document	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search 17 September 2013 (17.09.2013)	Date of mailing of the international search report 26 September 2013 (26.09.2013)
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer YANG, Yanlan Telephone No. (86-10) 62085705

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2013/077639

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102109362 A (UNIV JILIANG CHINA) 29 June 2011 (29.06.2011) the whole document	1-10
A	CN 202204524 U (HANGZHOU BRIGHTWAVE PHOTONICS TECHNOLOGY CO LTD) 25 April 2012 (25.04.2012) the whole document	1-10
A	US 2002/0154291 A1 (ANDO ELECTRIC CO LTD) 24 October 2002 (24.10.2002) the whole document	1-10
A	CA 2615327 A (YOKOGAWA DENKI KK) 26 June 2008 (26.06.2008) the whole document	1-10
A	WO 2009/006000 A2 (BP EXPLORATION OPERATING CO LTD) 08 January 2009 (08.01.2009) the whole document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2013/077639

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102759371 A	31.10.2012	None	
CN 102589592 A	18.07.2012	None	
CN 202195827 U	18.04.2012	None	
CN 101324424 A	17.12.2008	CN 101324424 B	09.06.2010
CN 102425995 A	25.04.2012	None	
CN 102147236 A	10.08.2011	CN 102147236 B	26.09.2012
CN 101144729 A	19.03.2008	CN 100504309 C	24.06.2009
CN 102109362 A	29.06.2011	CN 102109362 B	23.05.2012
CN 202204524 U	25.04.2012	None	
US 2002/0154291 A1	24.10.2002	US 6700655 B	02.03.2004
		JP 2002323407 A	08.11.2002
		JP 4048729 B	20.02.2008
		GB 2378504 A	12.02.2003
		DE 10218421 A	06.03.2003
CA 2615327 A	26.06.2008	JP 2008157859 A	10.07.2008
		JP 4904148 B	28.03.2012
		CA 2615327 C	16.04.2013
WO 2009/006000 A2	08.01.2009	CA 2692151 A	08.01.2009
		US 2009008536 A	08.01.2009
		US 7504618 B	17.03.2009
		NO 20100026 A	26.03.2010
		GB 2464414 A	21.04.2010
		GB 2464414 B	09.11.2011

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/077639

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01D 5/353 (2006.01) i

G01K 11/32 (2006.01) i

G01B 11/16 (2006.01) i

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2013/077639

A. 主题的分类

参见附加页

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)

IPC:G01D5/353 G01K11/32 G01B11/16

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,CNXTX,CJFD,CNKI:BOTDA COTDR 相干 移频 频移 布里渊 脉冲

VEN:BOTDA COTDR FREQUENCY SHIFT COHERENT PULSE

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	CN102759371A (南京大学) 31.10 月 2012 (31.10.2012) 权利要求 1-7	9-10
A	CN102589592A (南京大学(苏州)高新技术研究院等) 18.7 月 2012 (18.07.2012) 说明书第[0022]-[0023]段, 图 2-3	1-8
A	CN202195827U (中国计量学院) 18.4 月 2012 (18.04.2012) 说明书第[0054]-[0059]段, 图 1	1-10
A	CN101324424A (中国计量学院) 17.12 月 2008 (17.12.2008) 全文	1-10
A	CN102425995A (无锡成电光纤传感科技有限公司) 25.4 月 2012 (25.04.2012) 全文	
A	CN102147236A (南京大学) 10.8 月 2011 (10.08.2011) 全文	1-10
A	CN101144729A (南京大学) 19.3 月 2008 (19.03.2008) 全文	1-10
A	CN102109362A (中国计量学院) 29.6 月 2011 (29.06.2011) 全文	1-10
A	CN202204524U (杭州布里特威光电技术有限公司) 25.4 月 2012 (25.04.2012) 全文	1-10
A	US2002/0154291A1 (ANDO ELECTRIC CO LTD) 24.10 月 2002 (24.10.2002) 全文	1-10

☒ 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
17.9 月 2013 (17.09.2013)

国际检索报告邮寄日期
26.9 月 2013 (26.09.2013)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
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

杨艳兰
电话号码: (86-10) **62085705**

C(续). 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
A	CA2615327A (YOKOGAWA DENKI KK) 26.6 月 2008 (26.06.2008) 全文	1-10
A	WO2009/006000A2 (BP EXPLORATION OPERATING CO LTD) 08.1 月 2009 (08.01.2009) 全文	1-10

国际检索报告

关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2013/077639

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN102759371A	31.10.2012	无	
CN102589592A	18.07.2012	无	
CN202195827U	18.04.2012	无	
CN101324424A	17.12.2008	CN101324424B	09.06.2010
CN102425995A	25.04.2012	无	
CN102147236A	10.08.2011	CN102147236B	26.09.2012
CN101144729A	19.03.2008	CN100504309C	24.06.2009
CN102109362A	29.06.2011	CN102109362B	23.05.2012
CN202204524U	25.04.2012	无	
US2002/0154291A1	24.10.2002	US6700655B	02.03.2004
		JP2002323407A	08.11.2002
		JP4048729B	20.02.2008
		GB2378504A	12.02.2003
		DE10218421A	06.03.2003
CA2615327A	26.06.2008	JP2008157859A	10.07.2008
		JP4904148B	28.03.2012
		CA2615327C	16.04.2013
WO2009/006000A2	08.01.2009	CA2692151A	08.01.2009
		US2009008536A	08.01.2009
		US7504618B	17.03.2009
		NO20100026A	26.03.2010
		GB2464414A	21.04.2010
		GB2464414B	09.11.2011

A. 主题的分类

G01D5/353 (2006.01)i

G01K11/32 (2006.01)i

G01B11/16 (2006.01)i