



(21) 申请号 202110853778.7

(22) 申请日 2021.07.28

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113607074 A

(43) 申请公布日 2021.11.05

(73) 专利权人 天津大学前沿技术研究院有限公司

地址 301700 天津市武清区武清开发区新兴路1号

(72) 发明人 丁振扬 刘铁根 刘琨 江俊峰
李胜

(74) 专利代理机构 天津耀达律师事务所 12223
专利代理师 张耀

(51) Int. Cl.

G01B 11/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101512295 A, 2009.08.19

CN 112985639 A, 2021.06.18

JP 2015105909 A, 2015.06.08

刘晓等. 基于光频域反射和互相关算法的分布式振动传感系统.《应用科学学报》.2020, 全文.

Shiyuan Zhao等. Accuracy improvement in OFDR-based distributed sensing system by image processing.《Optics and Lasers in Engineering》.2020, 全文.

杨凯; 邹耘; 尹路明;. 重叠加窗FFT频域抗干扰算法设计. 测绘科学技术学报. 2013, (03), 全文.

吕乐群; 易云清; 卢圆圆;. 基于重叠滑窗时频分析的跳频信号检测技术. 电子信息对抗技术. 2020, (02), 全文.

审查员 彭鼎原

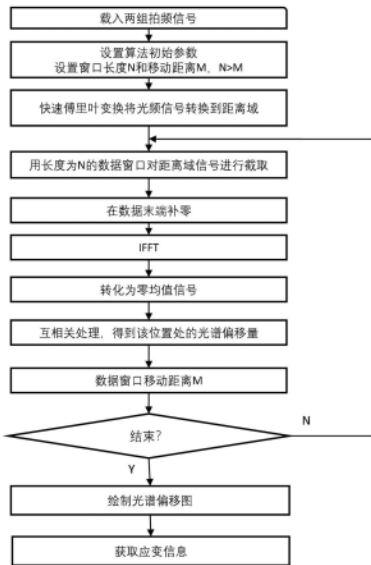
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种光频域反射中基于重叠窗口的应变传感解调方法

(57) 摘要

一种光频域反射中基于重叠窗口的应变传感解调方法, 涉及光纤传感技术领域, 利用被测光纤应变区的背向瑞利散射模间干涉进行应变传感。在经典瑞利散射光谱互相关法的基础上, 通过将数据窗口进行部分重叠, 解决了OFDR分布式应变传感系统中空间分辨率和应变分辨率不能同时提高的问题, 使算法的性能进一步提高。经测试, 本发明能解调出200m测试光纤上 $1 \mu \epsilon$ 大小的微应变, 且其空间分辨率可以由原来的10cm提高到5cm。



1. 一种光频域反射的分布式光纤传感装置,其特征是,包括:可调谐激光器(1)、95:5光分束器(4)、计算机(11)、GPIB控制模块(18)、基于辅助干涉仪的时钟触发装置(21)、主干涉仪(22),GPIB控制模块(18)输入端与计算机(11)相连,GPIB控制模块(18)输出端与可调谐激光器(1)相连,可调谐激光器(1)与95:5光分束器(4)的a端口相连,95:5光分束器(4)的b和c端口分别与基于辅助干涉仪的时钟触发装置(21)和主干涉仪(22)相连;

该装置通过以下方法实现光频域反射中基于重叠窗口的应变解调,包括以下步骤:

第一步,利用OFDR系统进行两次传感测量,一次为未发生应变变化作为参考组和一次为产生应变变化作为测量组,并对两种数据分别进行快速傅里叶变换,将光频域信息转换到对应测试光纤中各个位置的距离域信息;

第二步,从信号的零位置开始,用一个长度为N的移动数据窗口截取瑞利散射信号,得到该位置处的局部瑞利散射信号;

第三步,在得到的局部瑞利散射信号的末端补零,再进行快速傅里叶逆变换,得到该位置对应的局部瑞利散射光谱;

第四步:将得到的局部瑞利散射光谱减去其平均值,得到一个零均值的信号;

第五步,将参考组和测量组经步骤二到四处理后的光谱信号进行互相关操作,得到该位置处的互相关图,并把互相关图中峰值所在位置偏移中心位置的大小记为数据窗口起始点处对应位置处的应变值,互相关峰的偏移方向反映了测量组是受到拉应力还是压应力;

第六步,将数据窗口向后移动M个数据点,这里 $N > M$,以保证前后两个数据窗口间有重叠部分,重叠区域长度为 $N - M$,继续重复步骤二到步骤五,直至获取到整条测试光纤上的各个位置处的光谱偏移量,此时系统能分辨最小长度为M个数据点对应的距离;

第七步,将每一次窗口移动采集到的光谱偏移量绘制成一条曲线,在这个曲线中,受到应变的位置会有明显的突起,这就是应变所在位置,将这个突起位置的数据点取平均值减去整条曲线的平均值,从而得到该位置处的应变值。

2. 根据权利要求1所述的光频域反射的分布式光纤传感装置,其特征是,基于辅助干涉仪的时钟触发装置(21)包括:第一平衡探测器(2)、第一50:50耦合器(5)、时钟整形电路模块(6)、延迟光纤(7)、第一法拉第转镜(8)、第二法拉第转镜(9)和第一环形器(10)。

3. 根据权利要求1所述的光频域反射的分布式光纤传感装置,其特征是,主干涉仪(22)包括:80:20分束器(3)、偏振控制器(12)、第二环形器(13)、第二50:50耦合器(14)、第二平衡探测器(16)、采集装置(17)、参考臂(19)、测试臂(20)和长距离光纤光栅(23)。

4. 根据权利要求1所述的光频域反射的分布式光纤传感装置,其特征是,GPIB控制模块(18)输入端与计算机(11)相连;GPIB控制模块(18)输出端与可调谐激光器(1)相连;可调谐激光器(1)与95:5光分束器(4)的a端口相连;95:5光分束器(4)的b端口与第一环形器(10)的a端口相连;第一环形器(10)的b端口与第一50:50耦合器(5)的a端口相连;第一环形器(10)的c端口与第一平衡探测器(2)的输入端相连;第一50:50耦合器(5)的b端口与第一平衡探测器(2)的输入端相连;第一50:50耦合器(5)的c端口与第一法拉第转镜(8)相连;第一50:50耦合器(5)的d端口通过延迟光纤(7)与第二法拉第转镜(9)相连;第一平衡探测器(2)的输出端与时钟整形电路模块(6)的输入端相连;时钟整形电路模块(6)的输出端与采集装置(17)的输入端相连。

5. 根据权利要求1所述的光频域反射的分布式光纤传感装置,其特征是,95:5光分束器

(4)的c端口与80:20分束器(3)的a端口相连;80:20分束器(3)的b端口通过参考臂(19)与偏振控制器(12)的输入端相连;80:20分束器(3)的c端口通过测试臂(20)与第二环形器(13)的a端口相连;偏振控制器(12)的输出端与第二50:50耦合器(14)的a端口相连;第二环形器(13)的b端口与第二50:50耦合器(14)的b端口相连;环形器(13)的c端口与通过拉伸区与长距离光纤光栅(23)相连;第二50:50耦合器(14)的c端口与第二平衡探测器(16)的输入端相连;第二50:50耦合器(14)的d端口与第二平衡探测器(16)的输入端相连;第二平衡探测器(16)的输出端与采集装置(17)的输入端相连;采集装置(17)的输出端与计算机(11)相连。

6.根据权利要求1所述的光频域反射的分布式光纤传感装置,其特征是:第三步中,补零数根据具体的测量系统来决定。

一种光频域反射中基于重叠窗口的应变传感解调方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感技术领域,尤其涉及一种光频域反射中基于重叠窗口的分布式应变传感方法,应用于光频域反射。

背景技术

[0002] 应力测量是一种重要的技术。应力测量在航空航天、材料加工、安全监测等领域有着广泛的应用。而其中分布式光纤应变传感器,在航天智能结构,材料加工传感、石油和天然气管道的泄漏检测、周界监测等检测应用中备受关注。传统的分布式光纤应变传感器有,布里渊光时域反射仪(BOTDR)和布里渊光时域分析(BOTDA),可以实现亚米级空间分辨率,数十公里感应范围和静态/动态应变测量。而光纤干涉仪传感器,如MZI型和Sagnac环型,具有高灵敏度但低空间分辨率(通常为几十米)。然而,以上的分布式光纤应变传感器最小可测量应变通常限制在 $10\mu\epsilon$ 以上,因此这不能满足某些应用的高灵敏度要求。

[0003] 光频域反射技术(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR),作为分布式光纤传感的一种,OFDR技术将光纤中的瑞利散射看作一种的随机空间周期弱布拉格光栅,可用于分布式应力、温度传感。在解调方案方面,通过互相关来计算测量瑞利后向散射谱位移的方法在OFDR传感器系统中得到了广泛的应用,这种方法被称为瑞利散射光谱互相关法,但这种方法具有一定的局限性,即当测量距离不断增大的同时,其空间分辨率也会逐渐降低,为了进一步提高系统的空间分辨率,本发明提出了一种新基于重叠分段窗口的分布式应变传感解调方法,对应200m测试光纤上一个微应变的测量,和经典的互相关算法相比,其空间分辨率由原来的10cm提高到了5cm。

发明内容

[0004] 本发明提出了一种光频域反射中基于重叠窗口的应变解调方法。其具体的实施步骤见下文描述:

[0005] 第一步,利用OFDR系统进行两次传感测量,一次为未发生应变变化作为参考组和一次为产生应变变化作为测量组,并对两种数据分别进行快速傅里叶变换,将光频域信息转换到对应测试光纤中各个位置的距离域信息。

[0006] 第二步,从信号的零位置开始,用一个长度为N的移动数据窗口截取该瑞利散射信号,得到该位置处的局部瑞利散射信号

[0007] 第三步,在得到的局部瑞利散射信号的末端补零,补零数根据具体的测量系统来决定,再进行快速傅里叶逆变换,得到该位置对应的局部瑞利散射光谱。

[0008] 第四步:为了消除直流分量的影响,将得到的局部瑞利散射光谱减去其平均值,得到一个零均值的信号。

[0009] 第五步,将参考组和测量组经步骤二到四处理后的光谱信号进行互相关操作,得到该位置处的互相关图,并把互相关图中峰值所在位置偏移中心位置的大小记为该数据窗口起始点处对应位置处的应变值,互相关峰的偏移方向反映了测量组是受到拉应力还是压

应力。

[0010] 第六步,将数据窗口向后移动M个数据点,这里 $N>M$,以保证前后两个数据窗口间有重叠部分,重叠区域长度为 $(N-M)$,继续重复步骤二到步骤五,直至获取到整条测试光纤上的各个位置处的光谱偏移量,此时系统能分辨最小长度为M个数据点对应的距离。

[0011] 第七步,将每一次窗口移动采集到的光谱偏移量绘制成一条曲线,在这个曲线中,受到应变的位置会有明显的突起,这就是应变所在位置,将这个突起位置的数据点取平均值减去整条曲线的平均值,从而得到该位置处的应变值。

[0012] 本发明还提供了一种实现上述方法的光频域反射的分布式光纤传感装置,包括:可调谐激光器、95:5光分束器、计算机、GPIB控制模块、基于辅助干涉仪的时钟触发装置、主干涉仪,GPIB控制模块输入端与计算机相连,GPIB控制模块输出端与可调谐激光器相连,可调谐激光器与95:5光分束器的a端口相连,95:5光分束器的b和c端口分别与基于辅助干涉仪的时钟触发装置和主干涉仪相连。

[0013] 本发明提供的技术方案的有益效果是:

[0014] 1、实现了200m长距离测试光纤空间分辨率达5cm的分布式光纤应变测量;2、实现200m长距离测试光纤灵敏度达到 $1\mu\epsilon$ 的分布式光纤应变测量;

附图说明

[0015] 图1为一种利用长距离光纤光栅测量分布式光纤应力的传感系统的结构示意图;

[0016] 图2为一种光频域反射中基于重叠窗口的应变解调方法的算法流程图;

[0017] 图3为重叠分段窗口相对于常规分段窗口的区别示意图;

[0018] 图4为一种光频域反射中基于重叠窗口的应变解调方法相比于经典互相关算法的解调效果图。

[0019] 附图中,各标号所代表的部件列表如下:

[0020] 1:可调谐激光器;2:第一平衡探测器;3:80:20分束器;4:95:5光分束器;5:第一50:50耦合器;6:时钟整形电路模块;7:延迟光纤;8:第一法拉第转镜;9:第二法拉第转镜;10:第一环形器;11:计算机;12:偏振控制器;13:第二环形器;14:第二50:50耦合器;15:拉伸区域;16:第二平衡探测器;17:采集装置;18:GPIB控制模块;19:参考臂;20:测试臂;21:基于辅助干涉仪的时钟触发装置;22:主干涉仪;23:长距离连续光栅光纤;

具体实施方式

[0021] 本实例包括使用长距离连续光栅光纤的光频域反射的分布式光纤传感装置,参见附图1,光频域反射的分布式光纤传感装置包括:可调谐激光器1、95:5光分束器4、计算机11、GPIB(通用接口总线)控制模块18、基于辅助干涉仪的时钟触发装置21、主干涉仪22。

[0022] 其中,基于辅助干涉仪的时钟触发装置21包括:第一平衡探测器2、第一50:50耦合器5、时钟整形电路模块6、延迟光纤7、第一法拉第转镜8、第二法拉第转镜9和第一环形器10。基于辅助干涉仪的时钟触发装置21用于实现等光频间距采样,其目的是抑制光源的非线性扫描。

[0023] 其中,主干涉仪22包括:80:20分束器3、偏振控制器12、第二环形器13、第二50:50耦合器14、第二平衡探测器16、采集装置17、参考臂19、测试臂20和长距离光纤光栅23。主干

涉仪22是光频域反射的分布式光纤传感装置的核心,其为改进型马赫泽德干涉仪。

[0024] GPIB控制模块18输入端与计算机11相连;GPIB控制模块18输出端与可调谐激光器1相连;可调谐激光器1与95:5光分束器4的a端口相连;95:5光分束器4的b端口与第一环形器10a端口相连(5);95:5光分束器4的c端口与80:20分束器3的a端口相连(95);第一环形器10的b端口与第一50:50耦合器5的a端口相连;第一环形器10的c端口与第一平衡探测器2的输入端相连;第一50:50耦合器5的b端口与第一平衡探测器2的输入端相连;第一50:50耦合器5的c端口与第一法拉第转镜8相连;第一50:50耦合器5的d端口通过延迟光纤7与第二法拉第转镜9相连;第一平衡探测器2的输出端与时钟整形电路模块6的输入端相连;时钟整形电路模块6的输出端与采集装置17的输入端相连;80:20分束器3的b(20)端口通过参考臂19与偏振控制器12的输入端相连;80:20分束器3的c(80)端口通过测试臂20与第二环形器13的a端口相连;偏振控制器12的输出端与第二50:50耦合器14的a端口相连;第二环形器13的b端口与第二50:50耦合器14的b端口相连;环形器13的c端口与通过拉伸区与长距离光纤光栅23相连;第二50:50耦合器14的c端口与第二平衡探测器16的输入端相连;第二50:50耦合器14的d端口与第二平衡探测器16的输入端相连;第二平衡探测器16的输出端与采集装置17的输入端相连;采集装置17的输出端与计算机11相连。

[0025] 装置工作时,计算机11通过GPIB控制模块18控制可调谐激光器1控制调谐速度、中心波长、调谐启动等;可调谐激光器1的出射光由95:5光分束器4的a端口进入,并以5:95的比例从95:5光分束器4的b端口经过环形器10进入第一50:50耦合器5的a端口,光从第一50:50耦合器5的a端口进入,从第一50:50耦合器5的c和d端口出射,分别被两臂的第一法拉第转镜8和第二法拉第转镜9反射,返回到第一50:50耦合器5的c、d端口,两束光在第一50:50耦合器5中发生干涉,从第一50:50耦合器5的b端口输出;第一50:50耦合器5从b端口的出射光进入第一平衡探测器2,第一平衡探测器2将探测到的光信号转换为干涉拍频信号传输至时钟整形模块6,时钟整形模块6干涉拍频信号整形为方波,整形后的信号传输至采集装置17,作为采集装置17的外部时钟信号。

[0026] 可调谐激光器1的出射光由95:5光分束器4的a端口进入,从95:5光分束器4的c端口(95)进入80:20分束器3的a端口;经过80:20分束器3(20)从b端口进入参考臂19中的偏振控制器12,从c端口(80)进入测试臂20上的第二环形器13的a端口;光从第二环形器13的a端口进入,从第二环形器13的c端口进入拉伸区15中的长距离光纤光栅23,而长距离光纤光栅23的背向散射光从第二环形器13端口c端口进入,从第二环形器13端口b端口输出;参考臂19中的偏振控制器12输出的参考光通过第二50:50耦合器14的a端口与第二环形器13上的背向散射光通过第二50:50耦合器14的b端口进形合束,形成拍频干涉并从第二50:50耦合器14的c端口和d端口输出至第二平衡探测器16,第二平衡探测器16将输出的模拟电信号传输至采集装置17,采集装置17在时钟整形模块6形成的外部时钟信号作用下将采集到的模拟电信号传输至计算机11。

[0027] GPIB控制模块18用于计算机11通过其控制可调谐激光器1。

[0028] 可调谐激光器1用于为光频域反射系统提供光源,其光频能够进行线性扫描。

[0029] 第一环形器10防止辅助干涉仪中第一50:50耦合器5的b端口的反射光进入激光器。

[0030] 第一50:50耦合器5用于光干涉。

- [0031] 延迟光纤7用于实现非等臂的拍频干涉,能够根据拍频和延迟光纤长度得到光频。
- [0032] 第一法拉第转镜8和第二法拉第转镜9用于为干涉仪提供反射,且能够消除干涉仪的偏振衰落现象。
- [0033] 偏振控制器12作用是调节参考光偏振态,使其在偏振分束时两个正交方向上光强基本一致。
- [0034] 第二50:50耦合器14完成对信号进行偏振分束,消除偏振衰落噪声的影响。
- [0035] 计算机11:对采集装置17采集的干涉信号进行数据处理,实现基于光频域反射中利用长距离光纤光栅测量分布式光纤应力的光纤传感。
- [0036] 发明实施例提供了一种利用长距离连续光栅光纤测量分布式光纤应力的传感方法,该方法是与实施例一中的传感系统相对应,如图2所示,该传感方法的步骤是:
- [0037] 第一步,利用OFDR系统进行两次传感测量,一次为未发生应变变化作为参考组和一次为产生应变变化作为测量组,并对两种数据分别进行快速傅里叶变换,将光频域信息转换到对应测试光纤中各个位置的距离域信息。
- [0038] 第二步,从信号的零位置开始,固定长度移动数据窗口截取该瑞利散射信号,数据窗口长度 $N=2000$,得到该位置处的局部瑞利散射信号。
- [0039] 第三步,在得到的局部瑞利散射信号的末端补零,补零数设为20000,再进行快速傅里叶逆变换,得到一个长度总长度为22000个数据点的局部瑞利散射光谱。
- [0040] 第四步:将得到的局部瑞利散射光谱减去其平均值,得到一个零均值的信号。
- [0041] 第五步,将参考组和测量组经步骤二到四处理后的光谱信号进行互相关操作,得到该位置处的互相关图,并把互相关图中峰值所在位置偏移中心位置的大小记为该数据窗口起始点处对应位置处的应变值,互相关峰的偏移方向反映了测量组是受到拉应力还是压应力。
- [0042] 第六步,将数据窗口向后移动1000个数据点,此时两个数据窗口间有重叠部分,重叠区域长度为1000,即此时对应空间分辨率为5cm,继续重复步骤二到步骤五,直至获取到整条测试光纤上的各个位置处的光谱偏移量。
- [0043] 第七步,将每一次窗口移动采集到的光谱偏移量绘制成一条曲线,在这个曲线中,受到应变的位置会有明显的突起,这就是应变所在位置,将这个突起位置的数据点取平均值减去整条曲线的平均值,从而得到该位置处的应变值。
- [0044] 下面结合具体的试验对本发明传感系统和解调方法进行可行性验证,并和瑞利散射光谱经典互相关法进行比较,图3给出了重叠分段窗口相对于常规分段窗口的区别示意图,结果参见图4,详见下文描述:
- [0045] 本发明实施例验证实验为采用长距离连续光栅光纤,测试光纤长度为200m,应变位置在测试光纤末端,应变区长度约为40cm,应变由纳米位移台拉伸产生;位移台每移动 $0.1\mu\text{m}$ 对应于待测光纤产生了0.25个微应变,实验中使用的激光器调谐速度为400nm/s,附加干涉仪长度为500m,采集的数据点数为10M。
- [0046] 为了凸显本发明的优势,本实施例分别采用重叠分段窗口和常规分段窗口对实验中采集到的 $1\mu\text{e}$ 大小的数据进行解调。重叠分段窗口中取窗口间距为1000个数据点,窗口长度取为2000;常规分段窗口中数据窗口长度取为1000,以保证二者空间分辨率都为5cm,解调结果如图4。

[0047] 从解调结果可以看出,在200m的测试光纤上,当空间分辨率减小到5cm时,基于常规分段窗口的互相关算法已经很难识别出一个微应变所在位置,而基于重叠窗口的应变解调方法的解调效果较好,其应变分辨能力得到了提高。

[0048] 本发明实施例对各器件的型号除做特殊说明的以外,其他器件的型号不做限制,只要能完成上述功能的器件均可。

[0049] 本领域技术人员可以理解附图只是一个优选实施例的示意图,上述本发明实施例序号仅仅为了描述,不代表实施例的优劣。

[0050] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

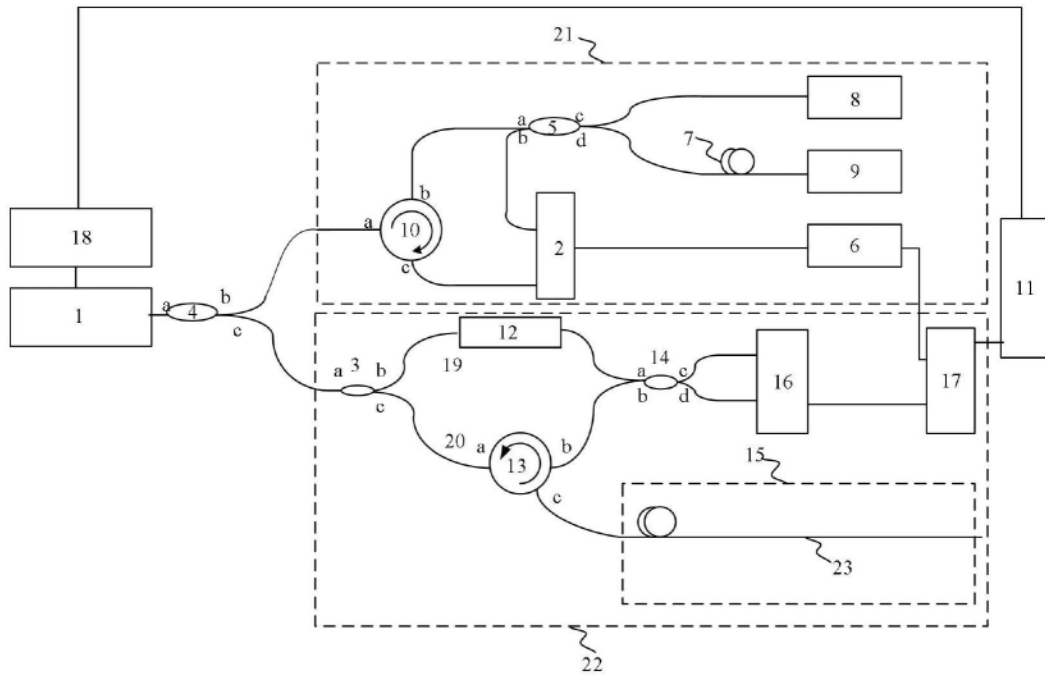


图1

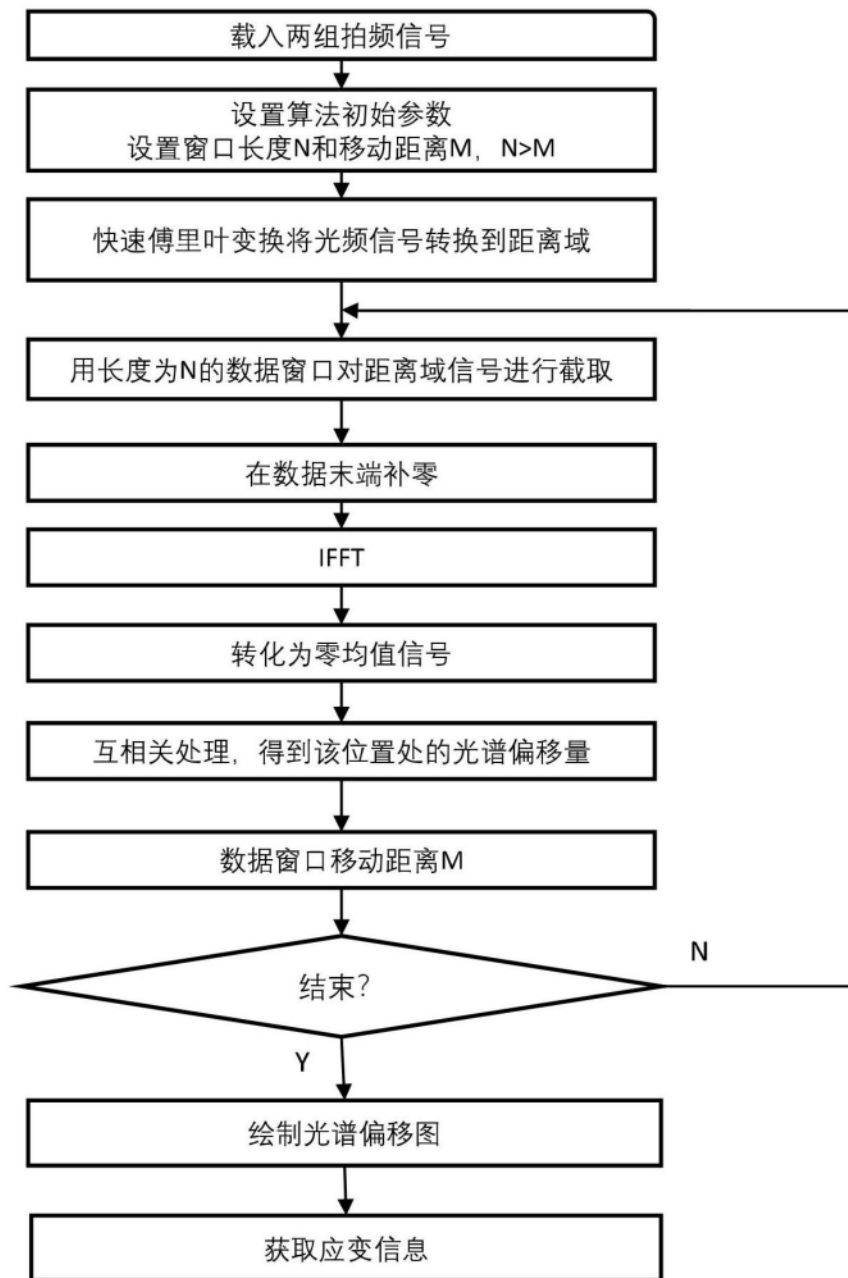


图2

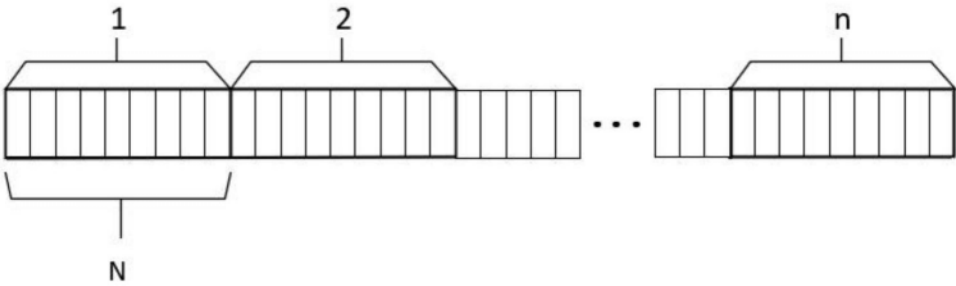


图 3a

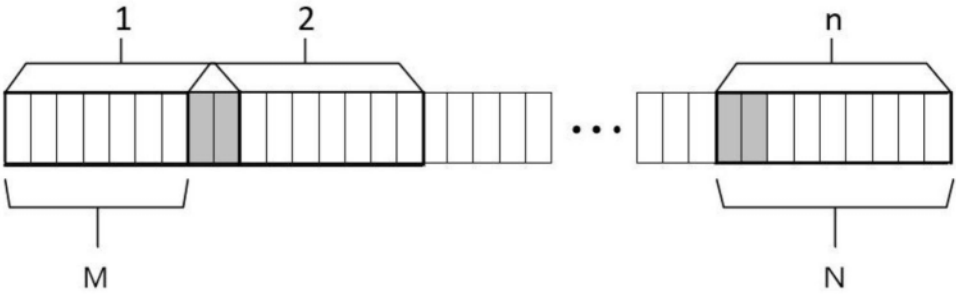


图 3b

图3

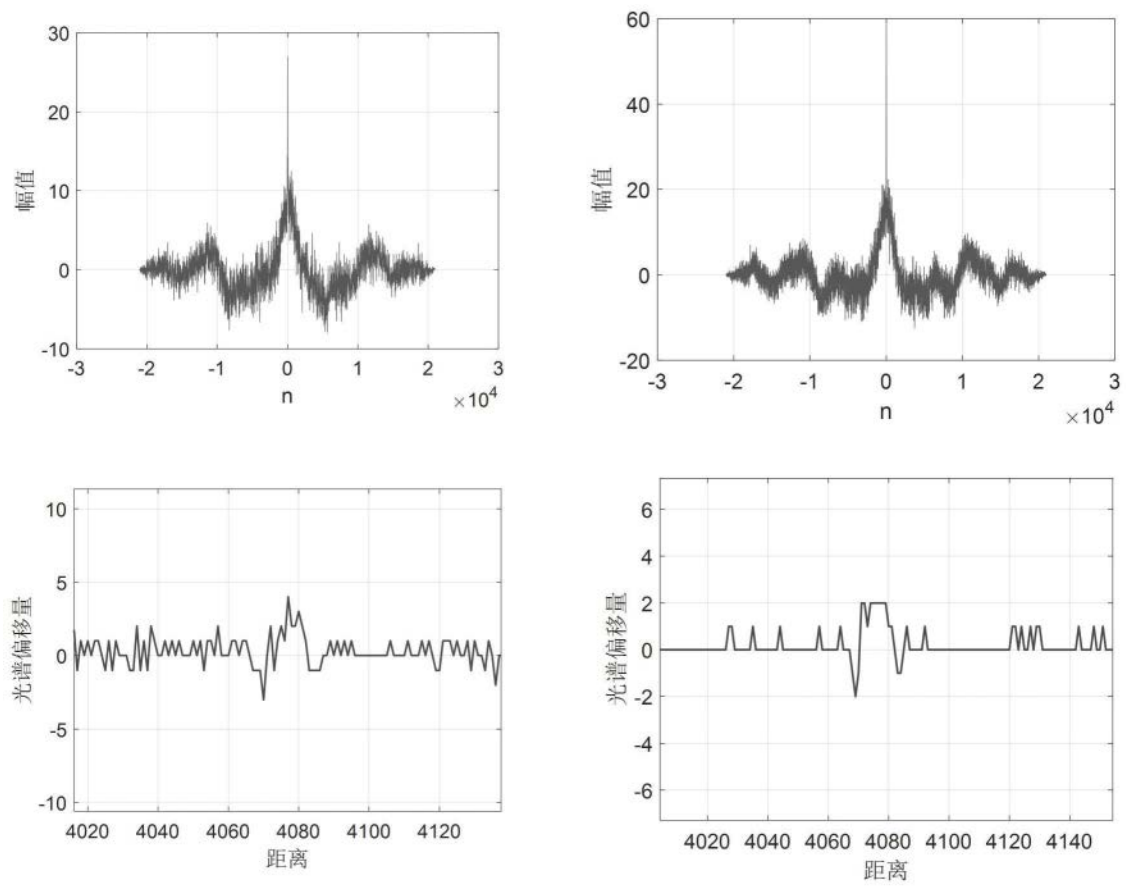


图4