



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107976248 A

(43)申请公布日 2018.05.01

(21)申请号 201610933350.2

(22)申请日 2016.10.25

(71)申请人 北京大学

地址 100871 北京市海淀区颐和园路5号

(72)发明人 张敏 何向阁 刘飞 古利娟

(74)专利代理机构 北京万象新悦知识产权代理
事务所(普通合伙) 11360

代理人 王岩

(51)Int.Cl.

G01H 9/00(2006.01)

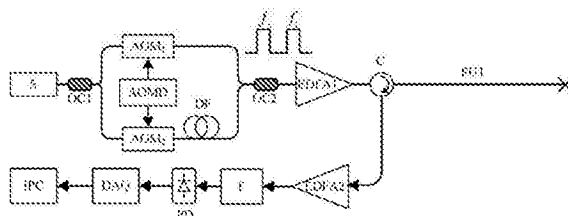
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

能够实现全相位解调的分布式光纤传感系统及其测量方法

(57)摘要

本发明公开了一种能够实现相位解调的分布式光纤传感系统及其测量方法。本发明的分布式光纤传感系统包括：窄线宽激光器、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机；本发明在传统的Φ-OTDR系统中引入了外差脉冲对，将光纤某一位置的振动信号调制到外差频率上，通过外差解调算法得到待测光纤沿线任意位置的外界振动信号的幅度和频率；本发明能够实时得到待测光纤沿线任意位置的外界振动信号的幅度和频率，并且可以获得很大的动态范围；以外差频率为50kHz为例，系统可以探测幅度从0.1rad到100rad的信号，同时可以探测频率从10Hz到25kHz的信号。



1. 一种能够实现相位解调的分布式光纤传感系统,其特征在于,所述分布式光纤传感系统包括:窄线宽激光器、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机;其中,所述窄线宽激光器发出连续激光;经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 f_1 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 f_2 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 L_d 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 Δf ,外差脉冲对的间隔为 L_d ;外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入待测光纤;外差脉冲对在待测光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,待测光纤上一个位置的外界振动信号调制到外差频率上;外差信号通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡采集信号,最后在工控机上进行信号的外差解调,从而得到待测光纤上外界振动信号的幅度与频率,其中, $f_1 \neq f_2, L_d > 0$ 。

2. 如权利要求1所述的分布式光纤传感系统,其特征在于,外差信号的采样频率即脉冲重复频率为外差频率 Δf 的4倍以上。

3. 如权利要求1所述的分布式光纤传感系统,其特征在于,外差脉冲对的间隔 L_d 大于脉冲宽度 w ,在这个基础上间隔要尽量小。

4. 如权利要求1所述的分布式光纤传感系统,其特征在于,可探测的外界振动信号的频率的上限为外差频率的一半,可探测的外界振动信号的频率的下限由用于时域重构的背向散射曲线的条数决定,频率下限为 f_s/M ,其中 f_s 为脉冲重复频率, M 为用于时域重构的背向散射曲线的条数。

5. 一种能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的测量方法,其特征在于,所述测量方法包括以下步骤:

1) 待测光纤的长度为 L ,脉冲重复频率为 f_s ,则有 $f_s < c/2nL$,其中, c 为真空中的光速, n 为待测光纤的折射率,数据采集卡的采样频率为 f_c ,采样深度为 N ,则有 $N=f_c/f_s$;

2) 窄线宽激光器发出连续激光,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 f_1 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 f_2 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f=f_1-f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 L_d 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 Δf ,外差脉冲对的间隔为 L_d ;

3) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入待测光纤;外差脉冲对在待测光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,待测光纤上一个位置的外界振动信号调制到外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

4) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集 M 条背向散射曲线;

5) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为: $I=A+B \cos [2\pi \Delta f t+\Phi(t)]$,其中 Δf 为外差频率, $\Phi(t)$ 为外界振动信号引起待测光纤中光相位的变化量,该值与外界振动信号的幅度成正比, $\Phi(t)$ 的频率与外界振动信号的频率一致;

6) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号 $y_s=B \cos [2\pi \Delta f t+\Phi(t)]$,然后对待解调信号进行外差解调算法,最后得到光相位的变化量 $\Phi(t)$,从而得到外界振动信号的幅度和频率。

6. 如权利要求5所述的测量方法,其特征在于,在步骤4)中,背向散射曲线的条数 $M \geq 50$ 。

7. 如权利要求5所述的测量方法,其特征在于,在步骤6)中,对待解调信号进行外差解调算法,具体过程为:将待解调信号 y_s 分别与正弦信号 $\sin(2\pi \Delta f t)$ 和余弦信号 $\cos(2\pi \Delta f t)$ 进行混频并分别经过低通滤波器,然后两者相除得到两者的比值,最后经过反正切 \arctan 运算即可得到光相位的变化量 $\Phi(t)$ 。

能够实现全相位解调的分布式光纤传感系统及其测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感技术,具体涉及一种能够实现全相位解调的分布式光纤传感系统及其测量方法。

背景技术

[0002] 分布式光纤传感是一种新型的传感技术,不同于点式传感器,分布式传感可以获得光纤沿线任意位置处的振动信息,传感距离可以从几百米到上百公里。分布式光纤传感因具有抗电磁干扰、高的灵敏度以及长的传感距离等优点在石油管道监护、周界安防等领域得到了广泛的应用^[1]。现有的分布式光纤传感系统中应用较广的一类是基于光纤中瑞利散射原理而搭建的相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)。该系统首先在光纤首端注入一个较窄的脉冲光,然后探测该脉冲光在光纤中引起的瑞利散射信号,不同时刻接收到的信号对应于光纤不同位置散射回来的信号,利用该原理即可实现定位。此外该系统中所用的光源线宽较窄,从而一个脉冲宽度内散射回的信号将会发生干涉,在光纤没有受到外界扰动时,干涉信号是稳定的,当某处受到了扰动,该处的干涉信号将发生变化,从而可判断外界扰动的发生^[2]。

[0003] 在传统的 Φ -OTDR系统中,将前后两个脉冲散射回的信号作差来判别是否有振动的发生。当外界没有振动时,两次信号的差值为零;当某处有振动发生时,该处的差值将发生变化,通过该变化即可判别外界振动。由于只是强度的判别,因此传统的方案并不能很好的得到外界振动信号的幅度和频率信息。

发明内容

[0004] 针对以上现有技术中存在的问题,本发明提出了一种能够实现相位解调的分布式光纤传感系统及其测量方法,能够得到待测光纤沿线的振动信号的强度和频率信息。

[0005] 本发明的一个目的在于提出一种能够实现相位解调的分布式光纤传感系统。

[0006] 本发明的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统包括:窄线宽激光器、第一耦合器、第一声光调制器、第二声光调制器、延时光纤、第二耦合器、第一掺铒光纤放大器、环形器、第二掺铒光纤放大器、滤波器、光电探测器、数据采集卡和工控机;其中,窄线宽激光器发出连续激光;经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 f_1 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 f_2 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f = f_1 - f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 L_d 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 Δf ,外差脉冲对的间隔为 L_d ;外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入待测光纤;外差脉冲对在待测光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,待测光纤上一个位置的外界振动信号调制到外差频率上;外差信号通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪

声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡采集信号,最后在工控机上进行信号的外差解调,从而得到待测光纤上外界振动信号的幅度与频率,其中, $f_1 \neq f_2, L_d > 0$ 。

[0007] 外差信号的采样频率即脉冲重复频率应该是外差频率 Δf 的4倍以上,外差频率要尽量大,因此一般选4倍关系;外差脉冲对的间隔 L_d 要大于脉冲宽度 w ,以保障两个脉冲没有重叠,在这个基础上间隔要尽量小。可探测的外界振动信号的频率的上限为外差频率的一半,可探测的外界振动信号的频率的下限由用于时域重构的背向散射曲线的条数决定,频率下限为 f_s/M ,其中 f_s 为脉冲重复频率, M 为用于时域重构的背向散射曲线的条数。

[0008] 下面明确几个基本概念:

[0009] 脉冲宽度:连续光经过声光调制器后被调制成脉冲光的宽度,时域上表示的脉冲宽度为 τ ,空间域上表示的脉冲宽度为 w ,外差脉冲对中两个脉冲的脉冲宽度是一样的。

[0010] 脉冲重复频率:每次生成脉冲都会同时生成一个外差脉冲对,脉冲重复频率即为生成外差脉冲对的频率。

[0011] 外差信号的采样频率:待测光纤上一个位置的背向瑞利散射信号在时域上重构后的采样频率,外差信号的采样频率与脉冲重复频率相等。

[0012] 数据采集卡的采样频率:数据采集卡采集数据的速率,该采样频率与空间分辨率有关。

[0013] 采样深度:数据采集卡一次触发后采集数据的长度,该值与待测光纤的长度和数据采集卡的采样频率有关。

[0014] 本发明的另一个目的在于提供一种能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的测量方法。

[0015] 本发明的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的测量方法,包括以下步骤:

[0016] 1) 待测光纤的长度为 L ,脉冲重复频率为 f_s ,则有 $f_s < c/2nL$,其中, c 为真空中的光速, n 为待测光纤的折射率,数据采集卡的采样频率为 f_c ,采样深度为 N ,则有 $N = f_c/f_s$;

[0017] 2) 窄线宽激光器发出连续激光,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 f_1 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 f_2 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f = f_1 - f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 L_d 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率为 Δf ,外差脉冲对的间隔为 L_d ;

[0018] 3) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入待测光纤;外差脉冲对在待测光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,待测光纤上一个位置的外界振动信号调制到外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

[0019] 4) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集 M 条背向散射曲线, $M \geq 50$;

[0020] 5) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为: $I = A + B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$,其中 Δf 为外差频率, $\Phi(t)$ 为外界振动信号引起待测光纤中光相位的变化量,该值与外界振动信号的幅度成正比, $\Phi(t)$ 的频率与外界振动信号的频率一致;

[0021] 6) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号 $y_s = B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$, 然后对待解调信号进行外差解调算法, 最后得到光相位的变化量 $\Phi(t)$, 从而得到外界振动信号的幅度和频率。

[0022] 本发明的优点:

[0023] 本发明在传统的 Φ -OTDR 系统中引入了外差脉冲对, 将光纤某一位置的外界振动信号调制到外差频率上, 通过外差解调算法能够得到待测光纤沿线任意位置的外界振动信号的幅度和频率; 本发明能够实时得到待测光纤沿线任意位置的外界振动信号的幅度和频率, 并且可以获得很大的动态范围; 以外差频率为 50kHz 为例, 系统可以探测幅度从 0.1rad 到 100rad 的信号, 同时可以探测频率从 10Hz 到 25kHz 的信号; 其中可探测频率的上限为外差频率的一半, 可探测频率的下限由用于时域重构的背向散射曲线的条数决定。

附图说明

[0024] 图1为本发明的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的一个实施例的示意图;

[0025] 图2为根据本发明的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的测量方法的一个实施例得到的背向散射曲线的三维视图;

[0026] 图3为根据本发明的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的测量方法的一个实施例的外差解调算法的示意图;

[0027] 图4为根据本发明的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的测量方法的一个实施例得到的解调效果图, 其中, (a) 为待测光纤 120m~280m 长度内解调出来的外界振动信号, (b) 为 170m 处解调出来的外界振动信号, (c) 为 230m 处解调出来的外界振动信号。

具体实施方式

[0028] 下面结合附图, 通过具体实施例, 进一步阐述本发明。

[0029] 如图1所示, 本实施例的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统包括: 窄线宽激光器 S、第一耦合器 OC1、第一声光调制器 AOM1、第二声光调制器 AOM2、延时光纤 DF、第二耦合器 OC2、第一掺铒光纤放大器 EDFA1、环形器 C、第二掺铒光纤放大器 EDFA2、滤波器 F、光电探测器 PD、数据采集卡 DAQ 和工控机 IPC; 其中, 窄线宽激光器 S 发出连续激光; 经第一耦合器 OC1 后, 均匀分成两路, 一路经过第一声光调制器 AOM1 被移频 f_1 并被调制成第一脉冲光, 另外一路经过第二声光调制器 AOM2 被移频 f_2 并被调制成第二脉冲光, 第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f = f_1 - f_2$ 即为外差频率; 第二脉冲光经过长度为 L_a 的延时光纤 DF, 与第一脉冲光在时域上分开; 第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器 OC2 合光后, 得到一前一后的两个脉冲, 形成一个外差脉冲对, 外差脉冲对的外差频率为 Δf , 外差脉冲对的间隔为 L_a ; 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器 EDFA1 放大后, 通过第一口进入环形器 C, 通过环形器 C 的第二口注入待测光纤; 外差脉冲对在待测光纤 FUT 中产生背向瑞利散射信号, 作为外差信号, 待测光纤 FUT 上一个位置的外界振动信号调制到外差频率上; 外差信号通过环形器 C 的第三口进入第二掺铒光纤放大器 EDFA2, 经过第二掺铒光纤放大器 EDFA2 放大后, 经过滤波器 F 滤除噪声; 然后到达光电探测器 PD, 由高速的数据采集卡 DAQ 来采集信号, 最后在工控机 IPC 上进行信号的外差解调, 从而得到待测光纤上外界振动信号的幅度与频率。第一声光

调制器AOM1和第二声光调制器AOM2分别连接至声光调制器的驱动器AOMD。

[0030] 本实施例中,外差频率 Δf 为50kHz,系统可以探测幅度从0.1rad到100rad的信号,同时可以探测频率从10Hz到25kHz的信号。其中可探测频率的上限为外差频率的一半,可探测频率的下限由用于时域重构的背向散射曲线的条数决定。

[0031] 待测光纤FUT的长度为480m,在170m处有5m光纤绕在了第一个压电陶瓷PZT上,在230m处有7m光纤绕在了第二个PZT上。对第一个PZT添加电压为300mV,频率为100Hz到1kHz的正弦扫频信号,对第二个PZT添加电压为500mV,频率为300Hz的正弦信号。

[0032] 本实施的能够实现相位解调的分布式光纤传感系统的测量方法,包括以下步骤:

[0033] 1) 待测光纤的长度 L 为480m,脉冲重复频率为 f_s ,则有 $f_s < c/2nL$,其中, c 为真空中的光速, n 为待测光纤的折射率,数据采集卡的采样频率为 f_c ,采样深度为 N ,则有 $N = f_c/f_s$;

[0034] 2) 窄线宽激光器发出连续激光,经第一耦合器后,均匀分成两路,一路经过第一声光调制器被移频 f_1 并被调制成第一脉冲光,另外一路经过第二声光调制器被移频 f_2 并被调制成第二脉冲光,第一脉冲光与第二脉冲光之间的频率差 $\Delta f = f_1 - f_2$ 即为外差频率;第二脉冲光经过长度为 L_d 的延时光纤,与第一脉冲光在时域上分开;第一脉冲光和第二脉冲光经过第二耦合器合光后,得到一前一后的两个脉冲,形成一个外差脉冲对,外差脉冲对的外差频率 Δf 为50kHz,外差脉冲对的间隔为 L_d ;

[0035] 3) 外差脉冲对先经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一口进入环形器,通过环形器的第二口注入待测光纤;外差脉冲对在待测光纤中产生背向瑞利散射信号,作为外差信号,待测光纤上一个位置的外界振动信号调制到外差频率上,通过环形器的第三口进入第二掺铒光纤放大器,经过第二掺铒光纤放大器放大后,经过滤波器滤除噪声;然后到达光电探测器,由高速的数据采集卡来采集信号,传输至工控机;

[0036] 4) 一个外差脉冲对得到一条背向散射曲线,连续采集 M 条背向散射曲线, $M = 100$,如图2所示;

[0037] 5) 选取所有背向散射曲线的同一位置处的信号进行时域重构,将会得到同一位置处随时间变化的信号,该信号的表达式为: $I = A + B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$,其中 Δf 为外差频率, $\Phi(t)$ 为外界振动信号引起待测光纤中光相位的变化量,该值与外界振动信号的幅度成正比, $\Phi(t)$ 的频率与外界振动信号的频率一致;

[0038] 6) 将上述信号滤除直流成分后将得到待解调信号 $y_s = B \cos [2\pi \Delta f t + \Phi(t)]$,然后对待解调信号进行外差解调算法,如图3所示,具体算法过程为:将待解调信号 y_s 分别与正弦信号 $\sin(2\pi \Delta f t)$ 和余弦信号 $\cos(2\pi \Delta f t)$ 进行混频并分别经过低通滤波器LPF(滤波器的截止频率 $\leq \Delta f$),然后两者相除得到两者的比值,最后经过反正切 \arctan 运算即可得到光相位的变化量 $\Phi(t)$ 。待测光纤120m到280m长度内解调出来的外界振动信号如图4(a)所示,明显可以看出170m和230m处有外界振动信号。图4(b)显示了170m处解调出来的外界振动信号,其中虚线代表解调出来的外界振动信号,实线代表实际添加在PZT上的外界振动信号。图4(c)显示了230m处解调出来的外界振动信号,其中虚线代表解调出来的外界振动信号,实线代表实际添加在PZT上的外界振动信号。可以看出外界振动信号都被很好的解调了出来。

[0039] 参考文献:

[0040] [1] Tu D, Xie S, Jiang Z, et al. Ultra long distance distributed fiber-

optic system for intrusion detection [C].2012.

[0041] [2] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed Fiber-Optic Intrusion Sensor System [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23 (6) : 2081.

[0042] 最后需要注意的是, 公布实施例的目的在于帮助进一步理解本发明, 但是本领域的技术人员可以理解: 在不脱离本发明及所附的权利要求的精神和范围内, 各种替换和修改都是可能的。因此, 本发明不应局限于实施例所公开的内容, 本发明要求保护的范围以权利要求书界定的范围为准。

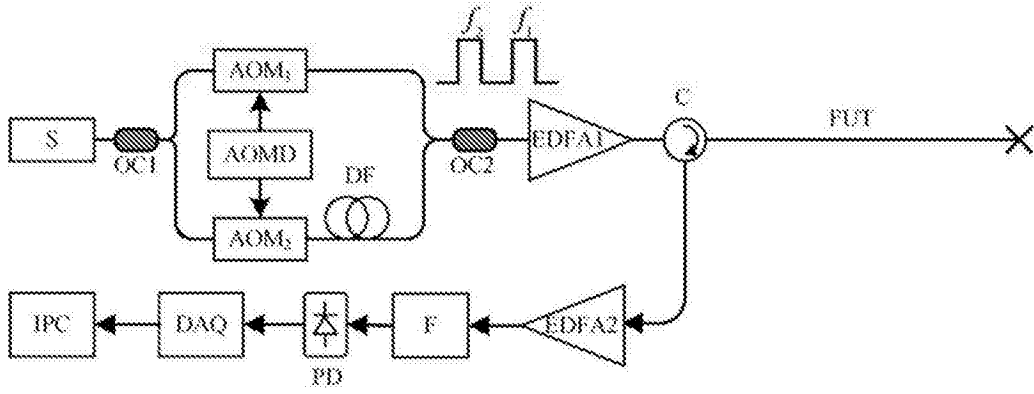


图1

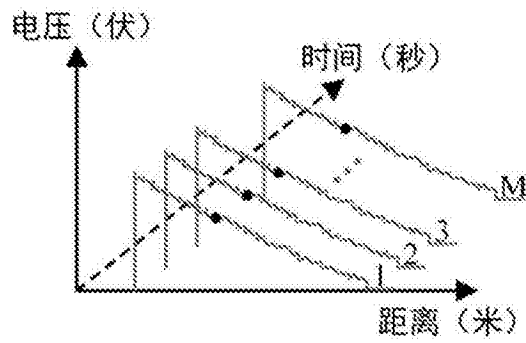


图2

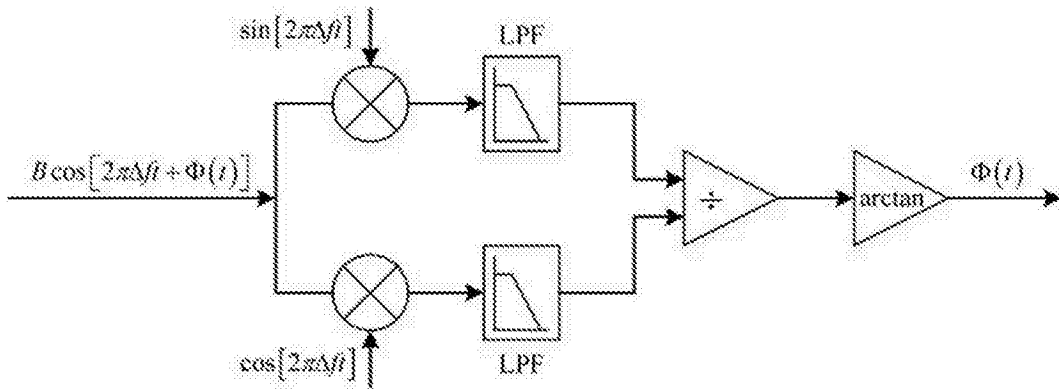


图3

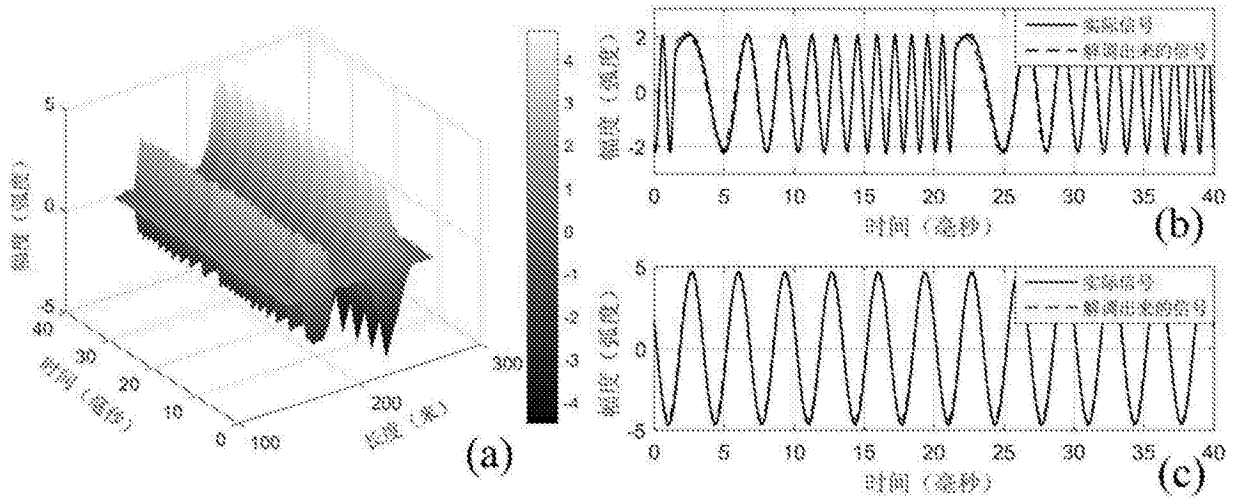


图4