



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113252163 B

(45) 授权公告日 2024. 04. 26

(21) 申请号 202110531116.8

(22) 申请日 2021.05.16

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113252163 A

(43) 申请公布日 2021.08.13

(73) 专利权人 南京师范大学  
地址 210023 江苏省南京市栖霞区文苑路1号

(72) 发明人 郭冬梅 夏巍 郝辉 陈磊

(74) 专利代理机构 南京众联专利代理有限公司  
32206  
专利代理师 蒋昱

(51) Int. Cl.  
G01H 9/00 (2006.01)

(56) 对比文件

- CN 113865479 A, 2021.12.31
- CN 117450932 A, 2024.01.26
- JP 2010203860 A, 2010.09.16
- CN 104713473 A, 2015.06.17
- CN 105333814 A, 2016.02.17
- CN 1614359 A, 2005.05.11
- JP 2008268047 A, 2008.11.06
- JP 2011027648 A, 2011.02.10

刘强、王鸣. 正弦相位调制型激光自混合干涉仪的实时位移测量技术. 2014, 第34卷(第6期),

审查员 刘晓华

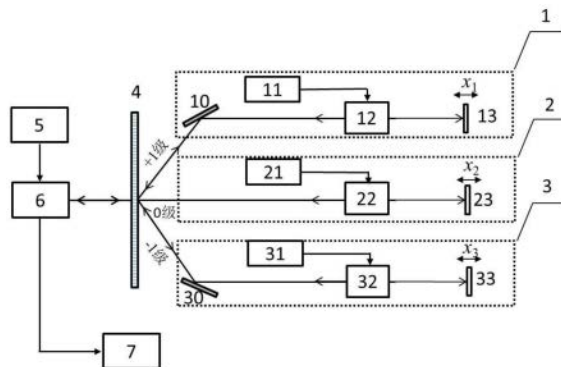
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪及测量方法

(57) 摘要

基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪及测量方法。半导体激光器输出的光垂直入射至透射式衍射光栅,形成各级次衍射光,每个级次衍射光形成一路振动测量通道。每路测量通道放置一个电光调制器对该级次衍射光束进行不同频率的相位调制,各个待测靶面置于电光调制器后方,使该级次衍射光经过电光调制器后垂直入射至待测靶面并沿原光路返回,再次入射至衍射光栅发生二次衍射;二次衍射光携带各个靶面振动信息沿激光器出射光的相反方向返回到激光器腔内与腔内光发生自混合干涉。利用频分复用技术处理自混合干涉信号,实时重构各个通道靶面振动波形。本发明系统结构简单紧凑,能同时对多通道多目标靶面振动进行实时探测,且测量分辨率高。



1. 基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪, 包括: 半导体激光器、半导体激光器驱动器、透射式衍射光栅、第一测量通道、第二测量通道、第三测量通道和信号处理模块, 其特征在于: 所述半导体激光器由半导体激光器驱动器驱动发出激光, 所述透射式衍射光栅置于激光器输出光路上, 所述半导体激光器发出的激光垂直入射至所述透射式衍射光栅, 形成各级次衍射光, 其中+1级衍射光构成第一测量通道, 0级衍射光构成第二测量通道, -1级衍射光构成第三测量通道, 所述0级、+1级、-1级次衍射光经过各自测量通道后沿原光路返回, 再次入射至衍射光栅发生二次衍射, 二次衍射光携带各通道待测靶面振动信息沿激光器出射光的相反方向返回到激光器腔内与腔内光发生激光自混合干涉, 自混合干涉信号由所述半导体激光器内部集成的光电探测器接受, 输出至数据处理模块, 所述信号处理模块利用频分复用技术实时恢复各个通道靶面振动波形;

第一测量通道包括第一平面反射镜、第一电光晶体调制器、第一电光晶体调制器驱动器和第一待测靶面; 第二测量通道包括第二电光晶体调制器、第二电光晶体调制器驱动器和第二待测靶面; 第三测量通道包括第二平面反射镜、第三电光晶体调制器、第三电光晶体调制器驱动器和第三待测靶面, 每个测量通道中, 衍射光通过电光晶体后, 垂直入射至待测靶面并沿原光路返回, 再次通过电光晶体调制器后, 入射至衍射光栅发生二次衍射;

所述半导体激光器内部集成光电探测器, 输出单纵模线偏振激光, 半导体激光器驱动器中集成了精密电流源和温度控制器, 且工作于恒电流模式;

所述透射式衍射光栅为可见光波段的一维光栅, 所述透射式衍射光栅前后方设置有挡板, 挡去不需要的级数的衍射光束;

第一平面反射镜、第二平面反射镜放置角度使得三路测量通道光路平行;

所述电光晶体调制器主轴方向和所述半导体激光器输出激光偏振方向一致;

相位调制幅度均为 $1.23\text{rad}$ ; 三个电光晶体调制器的调制频率 $f_{m1}$ 、 $f_{m2}$ 、 $f_{m3}$ 满足 $f_{m1}:f_{m2}:f_{m3}=3:5:7$ ;

每个测量通道的电光晶体调制器的调制频率 $f_{mi}$ ,  $i=1, 2, 3$ 和第 $i$ 个待测靶面最大运动速度 $v_{imax}$ 以及半导体激光器波长 $\lambda$ 之间的关系满足: $f_{mi}>4v_{imax}/\lambda$ ;

所述电光晶体调制器采用波导形电光晶体。

2. 根据权利要求1的基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪的测量方法, 其特征在于: 相位解调采用傅里叶分析解调技术, 信号处理过程为:

(1) 对自混合干涉信号进行傅里叶变换;

(2) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第一电光晶体调制器调制信号的一次谐波, 中心频率 $f_{m1}$ 和二次谐波, 中心频率 $2f_{m1}$ , 进行傅里叶反变换, 去除载波后, 得到该测量通道相位变化的正弦分量和余弦分量, 利用反正切运算计算出相位变化, 再依据相位变化和靶面振动之间的关系, 实时重构第一测量通道靶面振动波形;

(3) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第二电光晶体调制器调制信号的一次谐波, 中心频率 $f_{m2}$ 和二次谐波, 中心频率 $2f_{m2}$ , 进行傅里叶反变换, 去除载波后, 得到该测量通道相位变化的正弦分量和余弦分量, 利用反正切运算计算出相位变化, 再依据相位变化和靶面振动之间的关系, 实时重构第二测量通道靶面振动波形;

(4) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第三电光晶体调制器调制信号的一次谐波, 中心频率 $f_{m3}$ 和二次谐波, 中心频率 $2f_{m3}$ , 进行傅里叶反变换, 去除载波后, 得到该测量通道相位

变化的正弦分量和余弦分量,利用反正切运算计算出相位变化,再依据相位变化和靶面振动之间的关系,实时重构第三测量通道靶面振动波形。

## 基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪及测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及精密测量技术领域,特别是涉及基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪及测量方法。

### 背景技术

[0002] 传统的干涉测试结构,如Agilent公司5529A双频干涉仪虽然可以达到较高的振动测量精度,但普遍结构庞大,光路复杂,敏感于准直,而且价格昂贵。激光自混合干涉技术是近年来兴起的一种具有很高应用价值的新型干涉计量技术,当激光器输出光被外界物体反射或散射后,部分光将返回激光器谐振腔内与腔内光束相混合而引起激光器的输出光强的变化,实现速度、位移、振动及距离等物理量的精密测量。由于系统固有的结构简单紧凑、自准直、以及可以工作于粗糙散射表面显著优点,解决了传统干涉测量技术系统复杂、敏感于准直等问题,在很多场合可以代替传统的激光干涉仪。已见报道的激光自混合干涉测量装置多基于单通道测量的结构,对于自混合效应在多通道测量系统中的应用,在频分复用系统中的研究,国内外几乎还是空白。

### 发明内容

[0003] 为了解决上述问题,本发明提供基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪及测量方法,它是一种结构简单紧凑,能同时对多目标振动进行实时探测,且分辨率高的振动测量装置。为实现基于激光自混合干涉的复用传感网络技术提供了基本依据。

[0004] 本发明提供基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪,包括:半导体激光器、半导体激光器驱动器、透射式衍射光栅、第一测量通道,第二测量通道、第三测量通道和信号处理模块,所述半导体激光器由半导体激光器驱动器驱动发出激光,所述透射式衍射光栅置于激光器输出光路上,所述半导体激光器发出的激光垂直入射至所述透射式衍射光栅,形成各级次衍射光,其中+1级衍射光构成第一测量通道,0级衍射光构成第二测量通道,-1级衍射光构成第三测量通道。所述0级、+1级、-1级次衍射光经过各自测量通道后沿原光路返回,再次入射至衍射光栅发生二次衍射,二次衍射光携带各通道待测靶面振动信息沿激光器出射光的相反方向返回到激光器腔内与腔内光发生激光自混合干涉,所述自混合干涉信号由所述半导体激光器内部集成的光电探测器接受,输出至数据处理模块,所述信号处理模块利用频分复用技术实时恢复各个通道靶面振动波形。

[0005] 作为本发明测量仪进一步改进,第一测量通道包括第一平面反射镜、第一电光晶体调制器、第一电光晶体调制器驱动器和第一待测靶面;第二测量通道包括第二电光晶体调制器、第二电光晶体调制器驱动器和第二待测靶面;第三测量通道包括第二平面反射镜、第三电光晶体调制器、第三电光晶体调制器驱动器和第三待测靶面,每个测量通道中,衍射光通过电光晶体后,垂直入射至待测靶面并沿原光路返回,再次通过电光晶体调制器后,入射至衍射光栅发生二次衍射。

[0006] 作为本发明测量仪进一步改进,所述半导体激光器内部集成光电探测器,输出单

纵模线偏振激光,半导体激光器驱动器中集成了精密电流源和温度控制器,且工作于恒电流模式。

[0007] 作为本发明测量仪进一步改进,所述透射式衍射光栅为可见光波段的一维光栅,所述透射式光栅前后方设置有挡板,挡去不需要的级数的衍射光束。

[0008] 作为本发明测量仪进一步改进,第一平面反射镜、第二平面反射镜放置角度使得三路测量通道光路平行。

[0009] 作为本发明测量仪进一步改进,所述电光晶体调制器主轴方向和所述半导体激光器输出激光偏振方向一致。

[0010] 作为本发明测量仪进一步改进,相位调制幅度均为 $1.23\text{rad}$ ;三个电光晶体调制器的调制频率 $f_{m1}$ 、 $f_{m2}$ 、 $f_{m3}$ 满足 $f_{m1}:f_{m2}:f_{m3}=3:5:7$ 。

[0011] 作为本发明测量仪进一步改进,每个测量通道的电光晶体调制器的调制频率 $f_{mi}$ , $i=1,2,3$ 和第 $i$ 个待测靶面最大运动速度 $v_{imax}$ 以及半导体激光器波长 $\lambda$ 之间的关系满足: $f_{mi}>4v_{imax}/\lambda$ 。

[0012] 作为本发明测量仪进一步改进,所述电光晶体调制器采用波导形电光晶体。

[0013] 本发明基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪的测量方法,相位解调采用傅里叶分析解调技术,信号处理过程为:

[0014] (1) 对自混合干涉信号进行傅里叶变换;

[0015] (2) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第一电光晶体调制器调制信号的一次谐波,中心频率 $f_{m1}$ 和二次谐波,中心频率 $2f_{m1}$ ,进行傅里叶反变换,去除载波后,得到该测量通道相位变化的正弦分量和余弦分量,利用反正切运算计算出相位变化,再依据相位变化和靶面振动之间的关系,实时重构第一测量通道靶面振动波形;

[0016] (3) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第二电光晶体调制器调制信号的一次谐波,中心频率 $f_{m2}$ 和二次谐波,中心频率 $2f_{m2}$ ,进行傅里叶反变换,去除载波后,得到该测量通道相位变化的正弦分量和余弦分量,利用反正切运算计算出相位变化,再依据相位变化和靶面振动之间的关系,实时重构第二测量通道靶面振动波形;

[0017] (4) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第三电光晶体调制器调制信号的一次谐波,中心频率 $f_{m3}$ 和二次谐波,中心频率 $2f_{m3}$ ,进行傅里叶反变换,去除载波后,得到该测量通道相位变化的正弦分量和余弦分量,利用反正切运算计算出相位变化,再依据相位变化和靶面振动之间的关系,实时重构第三测量通道靶面振动波形。

[0018] 与现有技术相比,本发明的优点在于:

[0019] 1) 本发明基于半导体激光自混合干涉原理,相对于传统双光束干涉光路具有结构简单紧凑、无需外部探测器、易准直、光路调节方便等特点;

[0020] 2) 本发明通过在半导体激光自混合干涉光路中引入一个透射式衍射光栅,实现了测量通道的扩展,每个衍射级次的光都可以构成一路测量通道。同时由于光栅衍射效率的限制,光路中无需再加入衰减器控制光反馈强度;

[0021] 3) 本发明提出了频分复用技术解调自混合干涉信号的相位,采用电光调制器对每个测量通道衍射级次光进行不同频率的相位调制,相位解调由频分复用技术实现,实现了一个光源同时实现多通道的振动测量;

[0022] 4) 本发明形成了新的结构简单紧凑、高分辨率、多通道、多靶面振动测量装置,对

进一步推动先进制造技术的发展具有重要的现实意义。

### 附图说明

[0023] 图1是本发明提供的基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪示意图。

[0024] 图2是本发明提供的基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪进行多通道振动测量时的软件处理流程图。

[0025] 图例说明

[0026] 1、第一测量通道；2、第二测量通道；3、第三测量通道；4、透射式衍射光栅；5、半导体激光器驱动器；6、半导体激光器；7、信号处理模块；10、第一平面反射镜；11、第一电光晶体调制器驱动器；12、第一电光晶体调制器；13、第一待测靶面；21、第二电光晶体调制器驱动器；22、第二电光晶体调制器；23、第二待测靶面；30、第二平面反射镜；31、第三电光晶体调制器驱动器；32、第三电光晶体调制器；33、第三待测靶面。

### 具体实施方式

[0027] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述：

[0028] 本发明提供基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪及测量方法，它是一种结构简单紧凑，能同时对多目标振动进行实时探测，且分辨率高的振动测量装置。为实现基于激光自混合干涉的复用传感网络技术提供了基本依据。

[0029] 结合图1说明本发明基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪工作原理。如图1，半导体激光器6输出的线偏振光垂直入射至透射式衍射光栅4，形成各级次衍射光。其中+1级衍射光构成第一测量通道1，0级衍射光构成第二测量通道2，-1级衍射光构成第三测量通道3。第一平面反射镜10、第二平面反射镜30放置角度，使三路测量通道光线平行。

[0030] 第一测量通道中，+1级衍射光被第一平面反射镜10反射后，入射至第一电光晶体调制器12，经过第一电光晶体调制器12后，垂直入射至第一待测靶面13并沿原光路返回，再次入射至透射式衍射光栅4发生二次衍射。二次+1级衍射光携带第一待测靶面13振动信息沿激光器出射光的相反方向返回到半导体激光器6腔内与腔内光发生自混合干涉。当第一待测靶面13沿图中x方向运动为 $x_1(t)$ 时，引起+1级衍射光相位变化为： $\varphi_1(t)=4\pi x_1(t)/\lambda$ 。第一电光晶体调制器12对+1级衍射光进行相位调制，调制函数为： $a_1 \sin(2\pi f_{m1} t)$ ，其中 $a_1$ 为调制幅度， $f_{m1}$ 为调制频率。由于+1级衍射光束在外腔中两次经过电光晶体调制器12，由电光调制器12导致的+1级衍射反馈光相位变化为： $\psi_1(t) = 2a_1 \sin(2\pi f_{m1} t)$ ，+1级衍射反馈光相位变化总量为： $\varphi_1(t)+2a_1 \sin(2\pi f_{m1} t)$ 。

[0031] 第二测量通道中，0级衍射光入射至第二电光晶体调制器22，经过第二电光晶体调制器22后，垂直入射至第二待测靶面23并沿原光路返回，再次入射至透射式衍射光栅4发生二次衍射。二次0级衍射光携带第二待测靶面23振动信息沿激光器出射光的相反方向返回到半导体激光器6腔内与腔内光发生自混合干涉。当第二待测靶面23沿图中x方向运动为 $x_2(t)$ 时，引起0级衍射光相位变化为： $\varphi_2(t)=4\pi x_2(t)/\lambda$ 。第二电光晶体调制器22对0级衍射光进行相位调制，调制函数为： $a_2 \sin(2\pi f_{m2} t)$ ，其中 $a_2$ 为调制幅度， $f_{m2}$ 为调制频率。由于0级衍射光束在外腔中两次经过电光晶体调制器22，由电光调制器22导致的0级衍射反馈光相位变

化为： $\psi_2(t) = 2a_2 \sin(2\pi f_{m2}t)$ ，0级衍射反馈光相位变化总量为： $\varphi_2(t) + 2a_2 \sin(2\pi f_{m2}t)$ 。

[0032] 第三测量通道中，-1级衍射光被第二平面反射镜30反射后，入射至第三电光晶体调制器32，经过第三电光晶体调制器32后，垂直入射至第三待测靶面33并沿原光路返回，再次入射至透射式衍射光栅4发生二次衍射。二次-1级衍射光携带第三待测靶面33振动信息沿激光器出射光的相反方向返回到半导体激光器6腔内与腔内光发生自混合干涉。当第三待测靶面33沿图中x方向运动为 $x_3(t)$ 时，引起-1级衍射光相位变化为： $\varphi_3(t) = 4\pi x_3(t)/\lambda$ 。第三电光晶体调制器32对-1级衍射光进行相位调制，调制函数为： $a_3 \sin(2\pi f_{m3}t)$ ，其中 $a_3$ 为调制幅度， $f_{m3}$ 为调制频率。由于-1级衍射光束在外腔中两次经过电光晶体调制器32，由电光调制器32导致的-1级衍射反馈光相位变化为： $\psi_3(t) = 2a_3 \sin(2\pi f_{m3}t)$ ，-1级衍射反馈光相位变化总量为： $\varphi_3(t) + 2a_3 \sin(2\pi f_{m3}t)$ 。

[0033] 由三路反馈光引起的激光自混合干涉信号 $P(t)$ 可以表示为

$$[0034] \quad P(t) = P_0 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^3 m_i \cos[\varphi_i(t) + 2a_i \sin(2\pi f_{mi}t)] \right\} \quad (1)$$

[0035] 展开上式有：

$$[0036] \quad P(t) = P_0 + P_0 \sum_{i=1}^3 \{ m_i \cos \varphi_i(t) J_0(2a_i) + m_i \cos \varphi_i(t) [2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(2a_i) \cos(2n)(2\pi f_{mi}t)] - m_i \sin \varphi_i(t) [2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{(2n+1)}(2a_i) \sin(2n+1)(2\pi f_{mi}t)] \} \quad (2)$$

[0037] 其中 $J_n(2a_i)$ 为n阶的贝塞尔函数， $m_i$  ( $i=1, 2, 3$ )为和该测量通道反馈强度有关的系数。式(2)中对应于调制频率 $f_{mi}$  ( $i=1, 2, 3$ )的一次谐波和二次谐波可以表示为：

$$[0038] \quad \begin{aligned} P(f_{mi}, t) &= 2m_i P_0 \sin \varphi_i(t) J_1(2a_i) \sin(2\pi f_{mi}t) \\ &= A_{1i}(t) \sin(2\pi f_{mi}t) \quad i=1, 2, 3 \end{aligned} \quad (3)$$

$$[0039] \quad \begin{aligned} P(2f_{mi}, t) &= 2m_i P_0 \cos \varphi_i(t) J_2(2a_i) \cos(4\pi f_{mi}t) \\ &= A_{2i}(t) \sin(4\pi f_{mi}t) \quad i=1, 2, 3 \end{aligned} \quad (4)$$

[0040] 去除高频载波后，可以从对应各调制频率 $f_{mi}$ 的一次谐波 $P(f_{mi}, t)$ 和二次谐波 $P(2f_{mi}, t)$ 的包络信号 $A_{1i}(t)$ 和 $A_{2i}(t)$ 中解调出三个测量通道的相位 $\varphi_i(t)$

$$[0041] \quad \varphi_i(t) = \arctan \left[ \frac{A_{1i}(t)}{A_{2i}(t)} \cdot \frac{J_2(2a_i)}{J_1(2a_i)} \right] \quad i=1, 2, 3 \quad (5)$$

[0042] 下面结合图2说明本发明基于频分复用的自混合干涉多通道振动测量仪信号处理模块工作原理。

[0043] (1) 对自混合干涉信号 $P(t)$ 进行傅里叶变换；

[0044] (2) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第一电光晶体调制器调制信号的一次谐波(中心频率 $f_{m1}$ )和二次谐波(中心频率 $2f_{m1}$ )，进行傅里叶反变换，去除载波后，得到该测量通道相位变化的正弦分量 $\sin \varphi_1(t)$ 和余弦分量 $\cos \varphi_1(t)$ ，利用反正切运算计算出第一测量通道相位变化 $\varphi_1(t)$ ，再依据相位变化和靶面振动之间的关系 $\varphi_1(t) = 4\pi x_1(t)/\lambda$ ，实时重构第一测量通道靶面振动波形 $x_1(t)$ 。

[0045] (3) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第二电光晶体调制器调制信号的一次谐波

(中心频率 $f_{m2}$ )和二次谐波(中心频率 $2f_{m2}$ ),进行傅里叶反变换,去除载波后,得到该测量通道相位变化的正弦分量 $\sin\varphi_2(t)$ 和余弦分量 $\cos\varphi_2(t)$ ,利用反正切运算计算出第二测量通道相位变化 $\varphi_2(t)$ ,再依据相位变化和靶面振动之间的关系 $\varphi_2(t)=4\pi x_2(t)/\lambda$ ,实时重构第二测量通道靶面振动波形 $x_2(t)$ 。

[0046] (4) 利用矩形窗滤波函数滤出对应于第三电光晶体调制器调制信号的一次谐波(中心频率 $f_{m3}$ )和二次谐波(中心频率 $2f_{m3}$ ),进行傅里叶反变换,去除载波后,得到该测量通道相位变化的正弦分量 $\sin\varphi_3(t)$ 和余弦分量 $\cos\varphi_3(t)$ ,利用反正切运算计算出第二测量通道相位变化 $\varphi_3(t)$ ,再依据相位变化和靶面振动之间的关系 $\varphi_3(t)=4\pi x_3(t)/\lambda$ ,实时重构第二测量通道靶面振动波形 $x_3(t)$ 。

[0047] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例之一,并非是对本发明作任何其他形式的限制,而依据本发明的技术实质所作的任何修改或等同变化,仍属于本发明所要求保护的范围内。



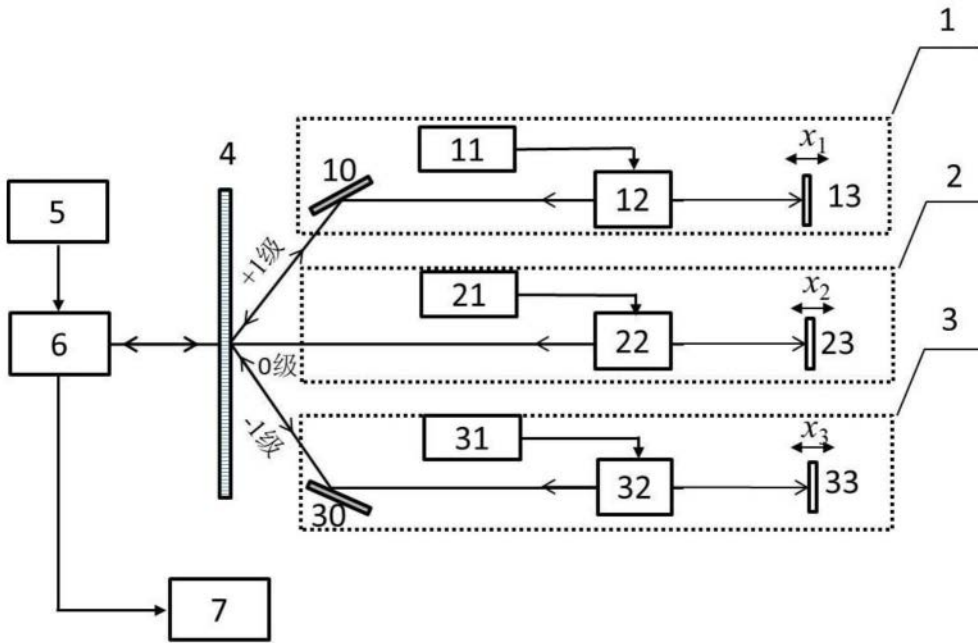


图1

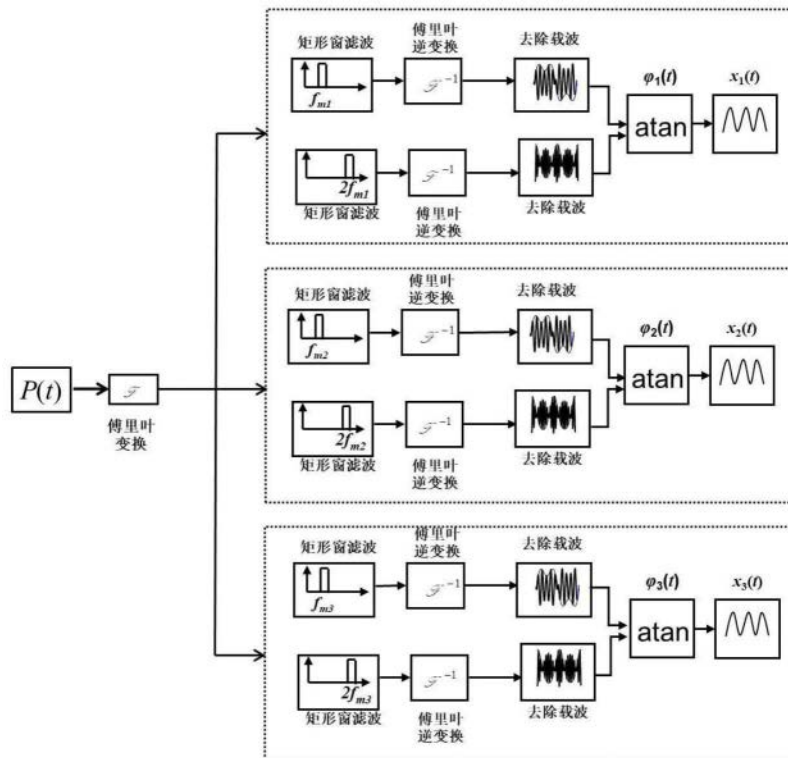


图2