



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101936747 A

(43) 申请公布日 2011.01.05

(21) 申请号 201010238444.0

(22) 申请日 2010.07.28

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 孙强 李也凡

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 南小平

(51) Int. Cl.

G01D 3/036(2006.01)

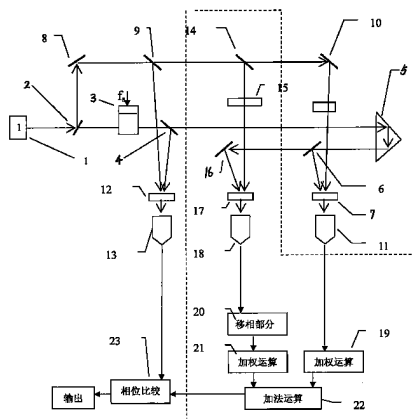
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 1 页

(54) 发明名称

波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法

(57) 摘要

本发明波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法属于精密测量技术领域,该方法在激光外差干涉法测量的过程中,将携带被测物理量信息的干涉光由两个光电探测器接收,通过光程差的调整或设置,使探测到的两路中周期性的非线性误差的相位反向,然后,在后续的电子学处理中消除周期性的非线性误差中占据主部的基波成分等。本发明的方法可以消除非线性误差的主部,提高精度,可以将非线性误差降低 2-3 个数量级以上。



1. 波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法,其特征在于,该方法是:在存在对于被测量的周期性的非线性误差的波动信号的通道上,将混频部分或相位检出部分由一路增加到两路,并通过对检出信号中所包含的周期性误差信号的相位做连续的调节或设置,使这两路输出中的周期性误差干扰成分的基波的相位差互为  $180^\circ$  或  $180^\circ + 2n\pi$ , 其中,  $n$  是整数,然后,通过后续的电子学处理来消除或减小这些周期性误差的基波和奇次谐波成分。

2. 如权利要求 1 所述的波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法,其特征在于,若所述的波动探测方法为光外差干涉测量法,则该光外差干涉测量法中非线性误差的基波和奇次谐波的消除法是:在存在周期性非线性误差的干涉光路上,将光电探测部分由一个增加到两个,并通过连续地调节或设置其至少一路的光电探测器接收到的参考光与测量光之间的相位差,来实现使两个光电探测器接收到的干涉光中的周期性非线性误差干扰成分基波的相位差互为  $180^\circ$  或  $180^\circ + 2n\pi$ , 其中,  $n$  是整数,然后,通过后续的电子学处理来消除或减小非线性误差的基波和奇次谐波成分。

3. 如权利要求 2 所述的波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法,其特征在于,所述调节或设置光电探测器接收到的参考光与测量光之间的相位差的方法是:将测量光和参考光各分成两束,再分别作差频干涉,得到两路外差干涉光束,分别由两个光电探测器探测,并通过调节至少一个干涉光路中参与干涉的测量光和参考光中的至少一个光束的光程,来调节参与干涉的测量光和参考光的光程差。

4. 如权利要求 2 或 3 所述的波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法,其特征在于,所述调节光电探测器接收到的参考光与测量光之间相位差的方法是由两个对称的折射率相等的楔型光学介质块实现的,每个介质块的两个光学面之间具有相同的夹角,在光线入射和出射的位置处,两光学介质块的介质表面垂直于光线;两光学介质块相邻的光学面平行且不垂直于入射和出射光线,在调整相位时,平行的两个光学面间的距离保持不变。

5. 如权利要求 4 所述的波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法,其特征在于,所述两个楔型光学介质块相平行的光学平面与垂直于光线的平面之间的夹角不大于  $0.1$  度。

## 波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法

### 技术领域

[0001] 本发明属于精密测量技术中采用波动方法,包括外差干涉法的技术领域,涉及一种波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波消除法。

### 背景技术

[0002] 在真实的物质世界中,波动这一类运动形式存在着多种物质载体。我们可以不失一般性地采用光波或其它形式的电磁波为例来讨论,激光外差干涉法是一个典型的利用波动来测量的方法。

[0003] 激光外差干涉法可以用来测量位移和振动等物理量,是目前最好的纳米测量方法之一。该方法是将被测位移量转变到外差信号的频率或者相位变化中,再将这种变化测量出来,由于外差信号的频率比光频低得多,光电信号容易处理,容易经过电子细分而达到较高的测量分辨率。这种方法可以达到皮米 (pm) 或更好的测量分辨率。

[0004] 但是在光外差干涉法这类技术中普遍存在着非线性 (nonlinearity) 问题,这个问题也同样存在于其它种类波动的外差干涉测量中,比如普通电磁波,这些因素是纳米测量的主要误差来源,使其精度一般只有纳米级,甚至十几纳米,其原因是作为外差干涉的测量光和参考光中两个频率不同的光线成分不能很好的分离,相互“串扰”。这些周期性的非线性误差问题,多年来一直是该领域技术进一步发展的障碍。

[0005] 多年来,国内外学者不断地发明了一些改善的方法,但也多存在一些限制或问题,例如文献‘V G Badami, and S R Patterson, A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry, Prec. Eng., Vol. 24, pp. 41-9, 2000.’ 公开了使用速率计和频谱仪在移动系统直接测量非线性误差成分并进行补偿;文献‘Tae Bong Eom, Tae Young Choi, Keon Hee Lee et al.. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer[J]. Meas. Sci. Technol., 2002, 13 :222 ~ 225’ 公开了对相位信号积分后进行椭圆拟合的方法来补偿非线性误差;文献‘High resolution heterodyne interferometer without detectable periodic nonlinearity, Ki-Nam Joo, Jonathan D. Ellis, Eric S. Buice, Jo W. Spronck, and Robert H. Munnig Schmidt, Optics Express, Vol. 18, Issue 2, pp. 1159-1165 2010’ 公开了使用双频激光器加上两个声光器件移频等手段来消除非线性误差。这些方法可以在没有其它的辅助干涉仪存在时补偿非线性误差,但系统复杂,而且有些还需要大量的波动信号周期和相对大量的运算,影响测量的实时性。2007年,我国业界著名学者侯文玫等(外差激光干涉仪非线性的细分和消除,上海理工大学光电学院,上海 200093, 计量学报-2007, 28(3). -210 ~ 215) 公布了一种可以有效地减小双频激光干涉仪的各种非线性误差的方法,它可以成倍地减小测量结果的相对误差。其方法是改变干涉仪的结构,增加测量光程的折返倍数。这样就提高了测量灵敏度。即提高了单位位移量对应的光电探测器输出的交流电信号的相位变化量,使其呈同样倍数地增加。而非线性误差对应的相角(误差)的振幅是不变的。即成倍地减小了测量结果的相对误差。在一定的范围内,这个方法有很好的效

果。但问题是如果要成数量级地减小非线性误差,比如将非线性误差减小到百分之一,那就需要上百倍的折返光路,而一般的讲,这是困难的。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种波动探测方法中非线性误差的基波(也称基频,在业内的文章中也叫做一次谐波)和奇次谐波的消除法,可以消除周期性的非线性误差,提高测量精度,将非线性误差降低 2-3 个数量级以上。

[0007] 光外差干涉系统测量光臂的光电探测器所获得的,是以形成干涉的两束异频光的光频差为频率的交流电信号,这个交流电信号还包含一个应该与被测位移成精确的比例关系的,反应了被测物体位移量的相位差,而这个相位差正是由异频的两束光的相位差产生的。这种形成干涉的两光束的相位差信号就是我们在外差干涉法中所要得到的,包含着被探测物理量信息的信号。

[0008] 但是,由于形成干涉的两光束不能在频率上彻底分开,存在“串扰”现象等,因此在产生检测目标信号的同时,还产生了周期性的、主要分布在傅立叶频谱的基波上的非线性误差干扰信号,该干扰信号的相角可以通过测量形成干涉的两光束——即参考光和测量光之间的光程差来确定。

[0009] 基于上述内容,本发明采用下面的方法来消除非线性误差的基波和奇次谐波成分:

[0010] 将被探测信号所在光臂上的干涉光光电探测器由一个增加到两个,通过调整探测器接收到的参考光和测量光之间的光程差,来改变形成干涉的两光束的相位差,从而使两个探测器接收到的两束干涉光中,形成周期性的非线性误差的两个干扰信号的相位差为  $180^\circ$  (或  $180^\circ + 2n\pi$ , 其中,  $n$  是整数,以下类似之处不再重复说明),进而便可以在后续的电子学处理中消除非线性误差成分。

[0011] 上述调整探测器接收到的参考光和测量光之间的光程差(对于其它波动形式可以叫做波程差)的方法中的一种方式是,将测量光和参考光各自再分成两束,然后再分别作差频干涉后,分别得到两路外差干涉光束,送至两个光电探测器各自检测,并通过调节测量光或参考光之中的任一光束的光程,来调它们之间的光程差。

[0012] 本发明采用两个对称放置的楔形光学介质块对干涉光的相位进行微调:对于这个起微调作用的子系统,在光线的入射和出射的位置处,介质表面垂直于入射和出射光线;而两介质块相邻的两个平面平行但不垂直于入射和出射光线;在进行相位调节时,这两个平面保持距离不变,并且两个介质块之间不做转动。这样便能够单纯地调节光程,而不影响被调节的干涉光的出射光线的位置和角位置。

[0013] 同时,可对光线的幅度做调节,使两路光信号通道中,产生非线性误差的干扰信号的振幅值相等。

[0014] 基于上述的调节之后,光电探测器所获得的两个信号中,不但非线性误差信号中基频的幅度相等、方向相反,而且当被探测物理量变化时,两通道中代表被测物理量的相位变化的方向相同。

[0015] 即便此时两路光电信号中的被探测信号也存在着相位差,那么也可以在后续电子学处理电路中将相位差调整,以使两路信号中的被探测信号的相位一致,并通过运算电路

使两路电信号相加,便保留了被探测的信号成分,同时,这两路检出的电信号中包含的非线性误差干扰成分,由于在相位差调整的过程中,大小和相位角偏移量均未改变,即保持了所谓的大小相等,方向相反的状态,而彼此抵消掉了。

[0016] 实际上,当两路中的非线性误差信号基波成分的相位相反时,其他的奇次谐波成分的相位也是相反的,所以其他的奇次谐波成分也会被彼此抵消。

[0017] 因此,应用上述的方法,就能够使得光外差干涉法检测中,造成非线性误差干扰的信号中基波成分等被消除或抑制,从而提高激光外差干涉法的测量精度。

[0018] 从理论上讲,如果欲消除或减小的周期性非线性误差成分不是一次谐波,即基波,而是  $n$  次谐波,甚至是任意的频率成分  $f$  或  $f$  的奇数倍的频率成分的情况,则可以利用同样的装置和原理,在含有相应频率干扰信号的检测路径中,增加相应的光学和电子学电路,并通过调节使得该检测电路中两个光电探测器接收到的干涉波动信号中的周期性非线性误差频率为  $f$  的成分的大小相等、方向相反,即相位差互为  $180^\circ$ ,再通过后续的电子学处理,即可消除或抑制这些产生非线性误差的干扰成分。

[0019] 在应用上述消除或抑制非线性误差干扰成分的方法时,不必满足对调整两束光的光波幅值相等的要求,而是在后续电路上最终通过运算电路对电信号上进行加权处理、移相和相加等处理,同样可以消除或大幅度降低非线性误差成分。这种降低对光波幅值调整要求的方法,可以应用在各路光束(或各通道)中,被探测信号的有用信号和非线性误差干扰信号同时存在不同的“信噪比”或幅度的情况。

[0020] 除上述先在光电信号部分的,以光频的差频为频率的电信号阶段,通过移相、加权、叠加等方法来抵消产生非线性误差干扰信号的方式以外,还可以将其被分成两路的光电探测信号分别象原有的外差干涉系统那样处理,在最后的测量结果之后,再进行加权和叠加等处理。因此,本发明方法所及的原理中可采用的电子学处理方法并不唯一。

[0021] 依照本发明的方法,消除误差的过程,不需要知道非线性误差的幅度和相位的具体数值。

[0022] 异频光的产生方法,可以通过声光器件,也可以是其它方法,如双频激光器等。

[0023] 本发明方法的特点是,没有在原有外差干涉法的任何部分和结构上增加了任何的非线性误差成分,而只是在原有的误差基础上大幅度消除这种误差。这样即便是出现任何原因引起的完全失调,将不会使非线性误差大于原有的误差。

[0024] 本发明方法的光学处理部分,适用于各类集成光学方式,包括光纤方式,也适用于体波方式。本方法的电信号处理过程,也适用于各类模拟量处理或数字量处理。另外,本方法对参考信号的选取,可以由光学处理部分的光外差处理得到,或直接由后续电学处理部分对电信号的电路运算处理得到。这种选择处理方式的多样性同样是本发明所具有的优点和意义。

[0025] 本发明所提出的消除或减小波动信号中任何谐波成分所产生的非线性干扰,从而提高测量精度的方法,适用范围广,对于应用同类工作原理的任何其它波动形式,如其它波段的电磁波、声波等,本发明所提出的方法和原理均适用。

[0026] 在一般性的原理中,由于紫外探测器、红外探测器和前面所述的光电探测器并不能响应光频级的电磁波,而是能够响应该电磁波载波上的较低调制频率或干涉的拍频。因此,在将本发明应用于波长在红外或紫外区段内的电磁波所进行外差干涉法的测量时,只

需将所述的光电探测器替换为相应的紫外探测器或红外探测器,则所应用的紫外探测器或红外探测器同样可以实现对被检测波动信号中任何谐波成分所产生的非线性误差干扰的检波功能,并通过本发明提供的其它步骤,达到消除或减小误差的目的。

[0027] 对于被检测波动信号为声波的情况,则光电探测器为麦克,而对于声表面波可以是叉指换能器等等,它们的后面可以继续做混频、变频等等;也可在非干涉方法中,直接与其他信号进行相位比较等等,在这样的过程中,非线性误差等周期性的有害信号会检出于像变频、相位比较(如相敏检波)等这类信号检出的环节,而不一定像可见光等那样产生在探测器上,这时本方法所需要得到的两个相位反向的干扰信号成分,就不一定来源于两个探测部分,而是更一般地来源于像变频、相位比较等这类相位检出部分。当然,如果将探测器和后面的变频部分等看做是一个整体,那么就可以完全地起到与光电探测器完全相对应的作用。

[0028] 综上,本发明是,在利用各种波动信号(包括激光外差干涉)的测量方法中,消除或减小存在对被测物理量呈周期性的非线性误差(或其他呈周期性的干扰成分)中的基频(即一次谐波),和其它奇次谐波成分;或者是消除或减小其中任意的某一频率成分  $f$ ,也可包括可能存在的  $3f$ 、 $5f$ 、 $7f$ 、..... 等这些奇数的谐波成分,提高外差干涉法测量精度的方法。该方法的技术方案是:在存在周期性误差的波动信号通道上,将混频部分或相位检出部分由通常的一路增加到两路,并通过对于检出信号中所包含的周期性误差信号的相位做连续的调节或设置,使其这两路输出中的周期性误差干扰成分的基频或频率  $f$  的相位差互为  $180^\circ$  (或  $180^\circ + 2n\pi$ , 其中,  $n$  是整数),便可以通过后续的电子学处理来消除或抑制这些周期性的非线性误差成分。

[0029] 对于激光外差干涉测量法,上述波动信号的通道是指在干涉光路上。

[0030] 本发明的有益效果是:本发明的方法能够有效地消除或大幅地降低非线性误差等周期性干扰成分,提高测量精度。本发明新增的部分主要是在原有激光外差干涉测量系统中存在的类似器件和结构,该新增部分不会给整个测量系统带来明显的新的误差来源、成本、体积和重量,也不会明显的破坏整个测量系统的可靠性;新增部分的电子学部分,其特点是精度高和成本低,有很小的体积和重量,可靠性极好,与新增的光学部分结合起来后,使整体功能强大,而成本增加很小。

## 附图说明

[0031] 图 1 是本发明激光外差干涉法中非线性误差中基波和奇次谐波的消除法原理示意图。

[0032] 图 2 是本发明方法中相位调节器的原理示意图。

[0033] 图中:1、激光器,2、第一分光镜,3、声光器件,4、第二分光镜,5、测量棱镜,6、第三分光镜,7、第一偏振片,8、第一反射镜,9、第四分光镜,10、第二反射镜,11、第一光电探测器,12、第二偏振片,13、第二光电探测器,14、第五分光镜,15、光程微调装置,16、第三反射镜,17、第三偏振片,18、第三光电探测器,19、加权运算,20、移相部分,21、加权运算,22、加法运算,23、相位比较。

## 具体实施方式

[0034] 如图 1 所示,以光学应用为例,在原有的激光外差干涉测量法的基础上,本发明的

方法是增加了图中虚线框中的部分,用以与原有的激光外差干涉测量法配合来实现本发明所述的原理和功能。

[0035] 首先,阐述原有的激光外差干涉测量法的工作原理:由激光器 1 发出激光,经第一分光镜 2 的透射光入射到声光器件 3,被声光器件 3 移频后出射到第二分光镜 4,经第二分光镜 4 的透射光由测量棱镜 5 反射回来,入射到第三分光镜 6,经第三分光镜 6 反射的光线与经第二反射镜 10 反射的光线经过第一偏振片 7 干涉。由第一分光镜 2 反射的光线,为后续的各光路干涉部分提供参考光线,该反射的光线经第一反射镜 8 反射进入第四分光镜 9,再经过第四分光镜 9、第二反射镜 10 之后,与第三分光镜 6 的反射光一同入射到第一偏振片 7,经第一偏振片 7 出射的干涉光由第一光电探测器 11 将两光的差频部分转换成交流电信号。该电信号作为测量信号,该电信号包含有从测量棱镜 5 上面获得的位移信息以及干涉过程中的非线性误差成分。由第二分光镜 4 反射的光线与第四分光镜 9 反射的光线汇合,一同入射到第二偏振片 12,经第二偏振片 12 出射的干涉光由第二光电探测器 13 将两光的差频部分转换成电信号。该电信号作为参考信号,在原有的激光外差干涉测量法中,将参考信号与测量信号进行比较,便解出由测量棱镜 5 上面获得的位移信息,此位移信息中含有破坏测量精度的非线性误差成分。

[0036] 本发明在上述原有的激光外差干涉测量法基础之上,增加了图 1 中的虚线框内的部分。其中,由第四分光镜 9 透射的光线射入第五分光镜 14,经第五分光镜 14 反射的光线射入光程微调装置 15,经过光程微调装置 15 入射到第三偏振片 17;第三分光镜 6 的透射光经第三反射镜 16 反射后,也入射到第三偏振片 17,两光相干涉后由第三光电探测器 18 将两光的差频部分转换成电信号。该电信号与第一光电探测器 11 输出的测量信号,除了下面的区别之外是完全一样的,两路信号的区别是:经过光程微调装置 15 的调节,使第三光电探测器 18 探测的干涉光信号中,或输出的电信号中的非线性误差信号的基波部分,在两路之间有  $180^\circ$  的相位差。至此,根据所获得的信息量,足以实时地得到准确的测量值。即,对应于被测的位移量所引起的相位的变化,两路的输出量是相同的。移相部分 20 的作用是使两路信号中的有用信号具有相同的相位,以便在随后的加法运算 22 中,两路信号被加强,而不是被抵消或降低。两路中存在的非线性误差的基波成分,则是方向相反的,在分别通过各自的加权运算 19 和加权运算 21 进行适当加权之后的加法运算 22 中被抵消掉。经过加法运算 22 之后的信号,与现有技术相同,即,再与由第二光电探测器 13 输出的参考信号进行相位比较 23,以输出纯净的测量结果。

[0037] 对于一般波动信号来说,本发明只需要在上述图 1 的光路结构基础上,将上述光源部分和各部分的名称做了改变和调整之后,即可完全地实现本发明对于一般波动探测方法中非线性误差的基波和奇次谐波的消除法。比如,将图 1 中光源部分,包括激光器 1、第一分光镜 2、声光器件 3 和第一反射镜 8 换成双频波束发生器,分别发出不同频率的两波束,即参考波束和测量波束;对于光电探测器来说,一般波动信号可以叫做探测器,例如可以是红外线探测器,或紫外线探测器,或麦克(传声器)和混频器,或电磁波天线和混频器;对于一般波动信号,可以将图 1 中的反射镜换成反射器;文字说明中的光的概念换成波的概念等。通过上述名称的改变,我们并不需要改变系统的基本结构,也不需要改变图 1 中的原理图。因此,实施例中的内容,也同样适用于几乎任何的波的形式。对于可见光段内部,我们也不详细讨论和设置实施例于不同的波段(如氦氖红光和其他的可见光)以及应该采用哪种材料和工艺的 pin 探测器等。

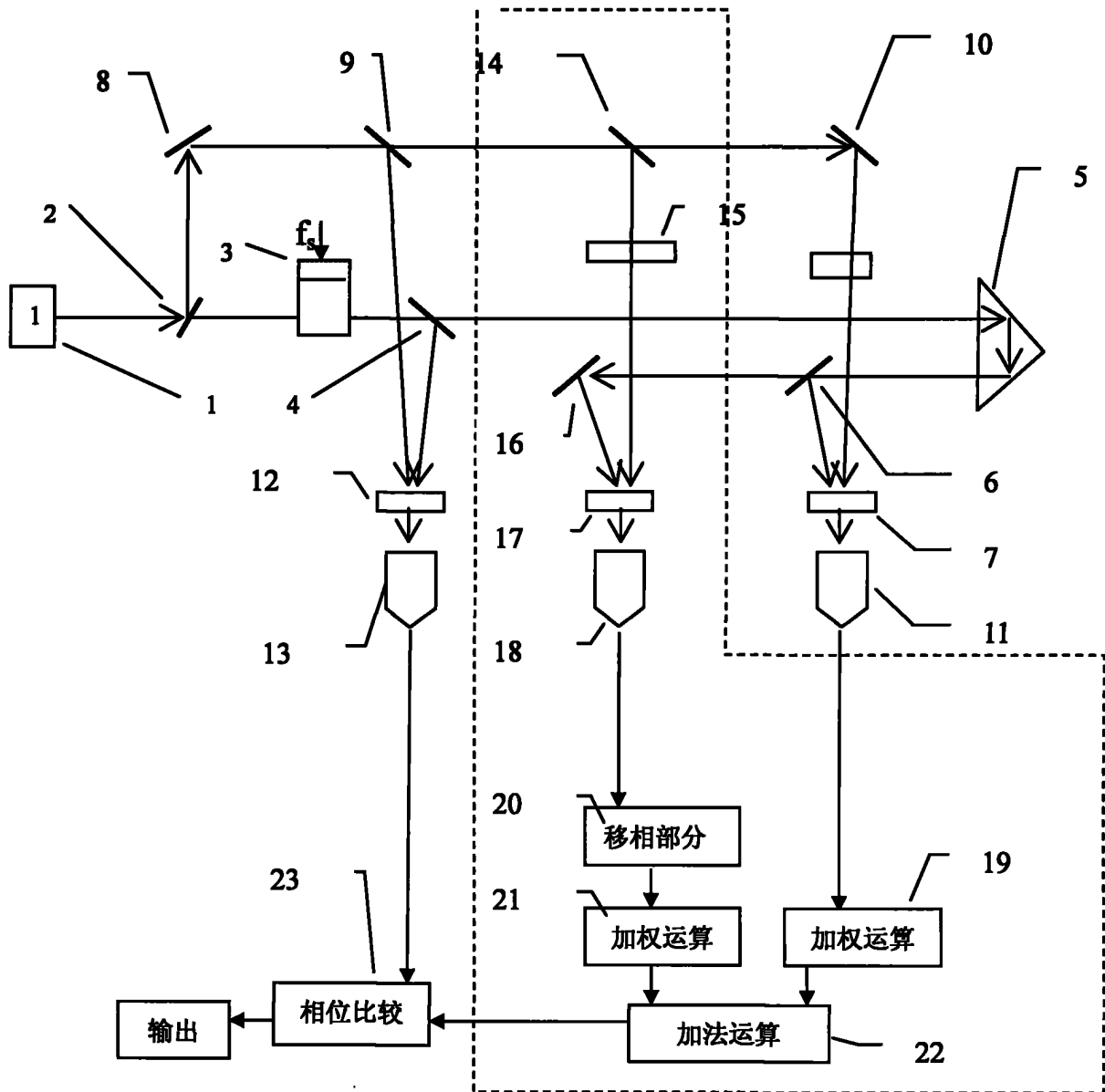


图 1

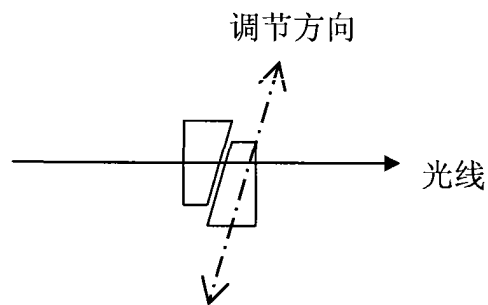


图 2