



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103513254 A

(43) 申请公布日 2014. 01. 15

(21) 申请号 201310420051. 5

(22) 申请日 2013. 09. 16

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72) 发明人 李玉琼 罗子人 靳刚 刘河山 董玉辉

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理 事务所(普通合伙) 11390

代理人 王艺

(51) Int. Cl.

G01S 17/08(2006. 01)

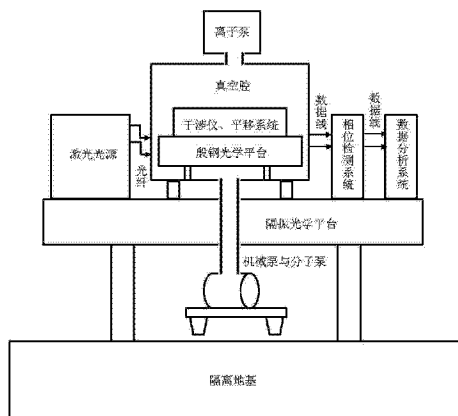
权利要求书4页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置

(57) 摘要

本发明提供了一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,至少包括:隔振系统,用于将外界的震动噪声进行隔离与过滤,降低系统的震动噪声;真空系统,用于降低系统因温度波动所带来的热噪声;光源系统,用于提供2束高稳定性、高稳频的激光;干涉仪,用于产生三路等臂长外差式干涉信号,实现卫星轨道游离运动信息与由引力波或重力场等引起的科学信号信息的模拟;第一平移系统,用于由引力波或重力场等引起的模拟科学信号;第二平移系统,用于模拟卫星轨道游离信号;相位检测系统,用于对干涉信号进行相位检测;对相位信息进行采集,并反演位移;数据分析系统,用于评估干涉系统的动态测距精度,并从混和信号中提炼出科学信号。本发明能够实现高精度双星激光干涉动态测距的地面模拟。



1. 一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在于,至少包括:
 - 隔振系统,用于将外界的震动噪声进行隔离与过滤,降低系统的震动噪声;
 - 真空系统,用于降低系统因温度波动所带来的热噪声;
 - 光源系统,用于提供 2 束高稳定性、高稳频的激光,同时这两束光具备相应的差分频率;
 - 干涉仪,用于产生三路等臂长外差式干涉信号,利用位移与相位之间的关系,得到被测两物体之间的位移变化信息;实现卫星轨道游离运动信息与由引力波或重力场等引起的科学信号信息的模拟,精确评估干涉仪的动态测距功能;
 - 第一平移系统,用于模拟由引力波或重力场等引起的科学信号;
 - 第二平移系统,用于模拟卫星轨道游离信号;
 - 相位检测系统,用于对干涉信号进行相位检测;对相位信息进行采集,并反演位移;
 - 数据分析系统,用于评估干涉系统的动态测距精度,并从混和信号中提炼出科学信号。
2. 如权利要求 1 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在于:
 - 所述隔振系统包括隔离地基和隔振光学平台。
3. 如权利要求 2 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在于:
 - 所述真空系统包括真空腔和真空泵。
4. 如权利要求 3 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在于:
 - 所述光源系统包括沿光轴方向依次设置的:
 - 一光源参考激光臂,用于产生准直、单色及偏振态可控的偏振参考激光;
 - 一与所述光源参考激光臂等臂长的光源测量激光臂,用于产生准直、单色及偏振态可控的偏振测量激光。
5. 如权利要求 4 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在于:
 - 所述光源参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的:
 - 一个激光器,用于产生激光光源;
 - 一个光源半反半透镜,使激光入射后分为两路,光强减半,两路光信号分别作为参考激光和测量激光;
 - 一个第一声光调制器,使经过的激光发生声光相互作用后产生相应的频移;
 - 一个第一法拉第隔离器,用于对经过的激光进行调整,防止激光返回激光器,影响激光器正常工作;
 - 一个第一线性偏振片,校正激光偏振状态,使出射激光的偏振态保持为 P 光或者 S 光;
 - 一个第一光纤耦合器,用于连接一条第一光纤;
 - 所述光源测量激光臂包括沿光轴方向依次设置的:
 - 一个光源直角反射镜,使被所述光源半反半透镜反射的激光被 90 度反射;
 - 一个第二声光调制器,使经过的激光发生声光相互作用后产生相应的频移;
 - 一个第二法拉第隔离器,用于对经过的激光进行调整,防止激光返回激光器,影响激光

器正常工作；

一个第二线性偏振片,校正激光偏振状态,使出射激光的偏振态保持为 P 光或者 S 光,与被所述第一线性偏振片校正的激光偏振态保持一致；

一个第二光纤耦合器,用于连接一条第二光纤。

6. 如权利要求 5 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在于:

所述干涉仪包括光学平台及干涉光路；

所述光学平台为殷钢光学平台；

所述干涉光路包括参考干涉光路、混合信号读出干涉光路和科学信号读出干涉光路；

所述参考干涉光路包括等臂长的第一参考激光臂、第二参考激光臂；

所述第一参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的：

一个第一偏振分光棱镜,使所述第二光纤射出的激光向上透射；

一个第二直角反射镜,位于所述第一偏振分光棱镜上方,使所述第一偏振分光棱镜透射的激光被 90 度向右反射；

一个第二半反半透镜,位于所述第二直角反射镜右侧,使经所述第二直角反射镜反射的激光从一个表面 45 度角入射；

一个第二光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号；

所述第二参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的：

一个第二偏振分光棱镜,使所述第一光纤射出的激光向右透射；

一个第六直角反射镜,位于所述第二偏振分光棱镜右侧,使所述第二偏振分光棱镜透射的激光被 90 度向上反射,并 45 度角入射到所述第二半反半透镜的另一个表面；

一个第一光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号；

所述混合信号读出干涉光路与所述参考干涉光路共用所述第一偏振分光棱镜与第二偏振分光棱镜；

所述混合信号读出干涉光路包括等臂长的第一混合信号读出激光臂和第二混合信号读出激光臂；

所述第一混合信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的：

所述第一偏振分光棱镜,使所述第二光纤射出的激光向左反射；

一个第一 $\lambda/4$ 波片,位于所述第一偏振分光棱镜左侧,使所述第一偏振分光棱镜反射出的激光垂直经过；

一个第一反射镜,使经过所述第一 $\lambda/4$ 波片透射的激光被 180 度反射回,并再次经过所述第一 $\lambda/4$ 波片,被所述第一偏振分光棱镜透射；

一个第一半反半透镜,使激光 45 度角入射后透射；

一个第三偏振分光棱镜,使经所述第一半反半透镜透射的激光 45 度角入射后透射；

一个第二 $\lambda/4$ 波片,位于所述第三偏振分光棱镜右侧,使所述第三偏振分光棱镜透射出的激光垂直经过；

一个第二反射镜,使经过所述第二 $\lambda/4$ 波片透射的激光被 180 度反射回,并再次经过所述第二 $\lambda/4$ 波片,被所述第三偏振分光棱镜向下反射；

一个第三半反半透镜,位于所述第三偏振分光棱镜下方,使被第三偏振分光棱镜向下

反射的激光 45 度角入射到一个表面；

一个第三光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号。

所述第二混合信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的：

所述第二偏振分光棱镜,使所述第一光纤射出的激光向上反射；

一个第五半反半透镜,位于所述第二偏振分光棱镜上方,使所述第二偏振分光棱镜反射的激光被 90 度向左反射；

一个第三直角反射镜,位于所述第五半反半透镜左侧,使被所述第五半反半透镜反射的激光被 90 度向下反射；

一个第四直角反射镜,位于所述第三直角反射镜下方,使被所述第三直角反射镜反射的激光被 90 度向右反射后 45 度入射到所述第三半反半透镜的另一个表面；

一个第四光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号；

所述科学信号读出干涉光路与所述混合信号读出干涉光路共用所述第一偏振分光棱镜、第二偏振分光棱镜与第一半反半透镜；

所述科学信号读出干涉光路包括等臂长的第一科学信号读出激光臂和第二科学信号读出激光臂；

所述第一科学信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的：

所述第一偏振分光棱镜,使所述第二光纤射出的激光向左反射；

一个第一 $\lambda/4$ 波片,位于所述第一偏振分光棱镜左侧,使所述第一偏振分光棱镜反射出的激光垂直经过；

一个第一反射镜,使经过所述第一 $\lambda/4$ 波片透射的激光被 180 度反射回,并再次经过所述第一 $\lambda/4$ 波片,被所述第一偏振分光棱镜透射；

一个所述第一半反半透镜,使激光 45 度角入射后向上反射；

一个 $\lambda/2$ 波片,位于所述第一半反半透镜上方,使所述第一半反半透镜反射出的激光垂直经过,并改变其偏振状态；

一个第四半反半透镜,位于所述 $\lambda/2$ 波片上方,使被 $\lambda/2$ 波片经过的激光 45 度角入射到一个表面；

一个第六光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号；

所述第二科学信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的：

所述第二偏振分光棱镜,使所述第一光纤射出的激光向上反射；

一个第五半反半透镜,位于所述第二偏振分光棱镜上方,使所述第二偏振分光棱镜反射的激光透射；

一个第五直角反射镜,位于所述第五半反半透镜上方,使被所述第五半反半透镜反射的激光被 90 度向左反射后 45 度入射到所述第四半反半透镜的另一个表面；

一个第五光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号。

7. 如权利要求 6 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在于：

所述第一平移系统,由第一压电陶瓷、第一控制器、第一计算机组成,所述第一反射镜固定于所述第一压电陶瓷上；

所述第二平移系统,由第二压电陶瓷、第二控制器、第二计算机组成,所述第二反射镜

固定于所述第二压电陶瓷上。

8. 如权利要求 7 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在
于,所述相位检测系统包括:

一个相位计,与所述第一光电探测器、第二光电探测器、第三光电探测器、第四光电探
测器、第五光电探测器、第六光电探测器相连,对从光电探测器中获得的干涉信号进行相位
检测,相位检测精度要求优于 0.01° ;所述相位计同时要求具备测频功能,根据干涉信号差
分频率的变化和多普勒频移原理反推出第一反射镜与第二反射镜的相对运动速度;

一个计算机,与所述相位计相连,对从相位计中获得的相位信息进行采集,并反演位
移,其中,位移的反演公式是: $\Delta L = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda$, 其中 λ 为激光波长, $\Delta\varphi$ 为相位信息,单位为弧
度。

9. 如权利要求 8 所述的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,其特征在
于,所述数据分析系统包括:

一个示波器,与所述第一光电探测器、第二光电探测器、第三光电探测器、第四光电探
测器、第五光电探测器、第六光电探测器相连,观察从光电探测器中获得的干涉信号强弱,
从而对光路系统进行调试,以获得最佳的干涉信号;

一个频谱仪,对测距精度数值进行频谱展开,从而反映出干涉系统在各个频段上的测
距精度;

所述相位计,对干涉信号进行相位检测和频率测量;

所述计算机,通过 Matlab 等数据分析软件,并采用频谱分析法对数据进行分析,对动
态测距数据进行比对,以评估出系统的动态测距精度,并从混和信号中提炼出科学信号。

一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,可用于双星之间位移变化的精密测量,测距精度可达皮米量级。

背景技术

[0002] 激光干涉测量仪是利用光束分离器把一束激光分成两束,一路通过已知的距离形成参考干涉,一路入射到测量目标反射后形成测量干涉,通过探测器及相位计读出参考干涉与测量干涉的相位差数据,从而得到目标的距离信息。空间激光干涉系统是利用激光干涉技术来测量双星之间的距离变化,以获得由引力波信号或重力场信号等科学信号所引起的星间距变化,其方法学原理是引力波信号或重力场信号等科学信号将导致激光干涉测距系统中的悬浮质量产生位移,从而引起激光干涉信号的相位变化,根据位移与相位、波长三者之间的关系式:

$$\Delta L = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \lambda$$
, 可反演出悬浮质量的位移变化,从而获取引力波或重力场的相关信息。

相对于微波干涉测距法,激光干涉测距可达更高的测距精度,其测距精度可达纳米量级甚至皮米量级。因此,许多空间精密测量项目的测量方法学均计划采用空间激光干涉法,例如空间引力波探测计划、先进重力场测量项目以及月球重力场探测计划等。

[0003] 目前,地面引力波探测激光干涉仪有美国的 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory),探测器采用迈克尔逊干涉仪和法布里-珀罗干涉仪的原理,由两个互相垂直的长臂构成,臂的末端悬挂着反射镜,臂长 4000 米,相对测距精度达 10^{-22} ;德国汉诺威 GEO 600 是 2002 年开始运作的一个英德合作计划,臂长为 600 米,相对测距精度为 2×10^{-22} ;日本 TAMA 300,臂长为 300 米,相对测距精度为 2×10^{-21} ;澳大利亚也在计划建造 AIGO(Australia Interferometer Gravitational Observatory)等等;空间激光干涉仪有日本的 DECIGO(Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory),臂长为 1000 公里,目标测距相对精度优于 10^{-23} ;美国宇航局和欧洲空间局合作的 LISA(Laser Interferometer Space Antenna),臂长为 500 万公里,目标相对测距精度优于 10^{-23} ;同时,德国马普学会爱因斯坦研究所研制出一个具有 4 路干涉仪的非偏振态激光干涉测距系统,地面试验证明在 1mHz-1Hz 的宽频带范围内,测距精度达 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$,它作为空间引力波探测的技术试验卫星即将于 2014 年发射升空等等。

[0004] 在此背景下,我国自 2008 年以来,综合分析目前国际上最有可能应用于空间引力波探测的 LISA 计划、NGO(Next Gravitational Observer) 计划及 DECIGO 方案,以及应用于重力场测量的 GRACE-Follow-on 计划等,相继提出了 SAGM(Space Advanced Gravity Measurements) 计划和 ALIA(Advanced Laser Interferometer Antenna) 计划。但我国在空间激光干涉测量领域一直处于落后和跟踪阶段。造成这一状况的原因是空间激光干涉测距法技术难度大,很多关键技术尚处于研究不足的状态。目前,国际上关于双星运动的地面模拟、科学数据与轨道游离数据分离的实验方法和技术未见相关报道。而这一关键技术是

未来空间引力波探测及先进重力测量所必需解决的关键技术。同时,目前现有的激光干涉测距技术测距精度一般为微米至纳米量级,无法达到皮米量级的测距精度,主要受限于等臂长的干涉光路设计、消噪参考干涉光路设计、高稳频激光器、高精度检相系统以及配套的隔噪措施等;同时,现有的激光干涉仪没有模拟在轨双星轨道游离信号与科学信号的精密平移系统,因而只能反映出激光干涉测距系统的本底噪声水平,因此,无法实现运动双星的位移变化测量,属于静态测量。

发明内容

[0005] 本发明解决的一个技术问题是提供一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,可有效解决测距精度不高、无法在在轨卫星轨道游离信号模拟、科学信号模拟、系统动态测距功能模拟,以及轨道游离数据与科学数据分离的实验方法和技术流程匮乏等各类问题。

[0006] 为了解决上述问题,本发明提供一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,至少包括:

[0007] 隔振系统,用于将外界的震动噪声进行隔离与过滤,降低系统的震动噪声;

[0008] 真空系统,用于降低系统因温度波动所带来的热噪声;

[0009] 光源系统,用于提供 2 束高稳定性、高稳频的激光,同时这两束光具备相应的差分频率;

[0010] 干涉仪,用于产生三路等臂长外差式干涉信号,利用位移与相位之间的关系,得到被测两物体之间的位移变化信息;实现轨道游离运动信息与科学信号信息的模拟,精确评估干涉仪的动态测距功能;

[0011] 第一平移系统,用于模拟由引力波或重力场等引起的科学信号;

[0012] 第二平移系统,用于模拟卫星轨道游离信号;

[0013] 相位检测系统,用于对干涉信号进行相位检测;对相位信息进行采集,并反演位移;

[0014] 数据分析系统,用于评估干涉系统的动态测距精度,并从混和信号中提炼出科学信号。

[0015] 进一步,所述隔振系统包括隔离地基和隔振光学平台。

[0016] 进一步,所述真空系统包括真空腔和真空泵。

[0017] 进一步,所述光源系统包括沿光轴方向依次设置的:

[0018] 一光源参考激光臂,用于产生准直、单色及偏振态可控的偏振参考激光;

[0019] 一与光源参考激光臂等臂长的光源测量激光臂,用于产生准直、单色及偏振态可控的偏振测量激光。

[0020] 进一步,所述光源参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0021] 一个激光器,用于产生激光光源;

[0022] 一个光源半反半透镜,使激光入射后分为两路,光强减半,两路光信号分别作为参考激光和测量激光;

[0023] 一个第一声光调制器,使经过的激光发生声光相互作用后产生相应的频移;

[0024] 一个第一法拉第隔离器,用于对经过的激光进行调整,防止激光返回激光器,影响

激光器正常工作；

[0025] 一个第一线性偏振片,校正激光偏振状态,使出射激光的偏振态保持为 P 光或者 S 光；

[0026] 一个第一光纤耦合器,用于连接一条第一光纤；

[0027] 所述光源测量激光臂包括沿光轴方向依次设置的；

[0028] 一个光源直角反射镜,使被所述光源半反半透镜反射的激光被 90 度反射；

[0029] 一个第二声光调制器,使经过的激光发生声光相互作用后产生相应的频移；

[0030] 一个第二法拉第隔离器,用于对经过的激光进行调整,防止激光返回激光器,影响激光器正常工作；

[0031] 一个第二线性偏振片,校正激光偏振状态,使出射激光的偏振态保持为 P 光或者 S 光,与被所述第一线性偏振片校正的激光偏振态保持一致；

[0032] 一个第二光纤耦合器,用于连接一条第二光纤。

[0033] 进一步,所述干涉仪包括光学平台及干涉光路；

[0034] 所述光学平台为殷钢光学平台；

[0035] 所述干涉光路包括参考干涉光路、混合信号读出干涉光路和科学信号读出干涉光路；

[0036] 所述参考干涉光路包括等臂长的第一参考激光臂、第二参考激光臂；

[0037] 所述第一参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的；

[0038] 一个第一偏振分光棱镜,使所述第二光纤射出的激光向上透射；

[0039] 一个第二直角反射镜,位于所述第一偏振分光棱镜上方,使所述第一偏振分光棱镜透射的激光被 90 度向右反射；

[0040] 一个第二半反半透镜,位于所述第二直角反射镜右侧,使经所述第二直角反射镜反射的激光从一个表面 45 度角入射；

[0041] 一个第二光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号；

[0042] 所述第二参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的；

[0043] 一个第二偏振分光棱镜,使所述第一光纤射出的激光向右透射；

[0044] 一个第六直角反射镜,位于所述第二偏振分光棱镜右侧,使所述第二偏振分光棱镜透射的激光被 90 度向上反射,并 45 度角入射到所述第二半反半透镜的另一个表面；

[0045] 一个第一光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号；

[0046] 所述混合信号读出干涉光路与所述参考干涉光路共用所述第一偏振分光棱镜与第二偏振分光棱镜；

[0047] 所述混合信号读出干涉光路包括等臂长的第一混合信号读出激光臂和第二混合信号读出激光臂；

[0048] 所述第一混合信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的；

[0049] 所述第一偏振分光棱镜,使所述第二光纤射出的激光向左反射；

[0050] 一个第一 $\lambda/4$ 波片,位于所述第一偏振分光棱镜左侧,使所述第一偏振分光棱镜反射出的激光垂直经过；

[0051] 一个第一反射镜,使经过所述第一 $\lambda/4$ 波片透射的激光被 180 度反射回,并再次经过所述第一 $\lambda/4$ 波片,被所述第一偏振分光棱镜透射；

- [0052] 一个第一半反半透镜,使激光 45 度角入射后透射;
- [0053] 一个第三偏振分光棱镜,使经所述第一半反半透镜透射的激光 45 度角入射后透射;
- [0054] 一个第二 $\lambda/4$ 波片,位于所述第三偏振分光棱镜右侧,使所述第三偏振分光棱镜透射出的激光垂直经过;
- [0055] 一个第二反射镜,使经过所述第二 $\lambda/4$ 波片透射的激光被 180 度反射回,并再次经过所述第二 $\lambda/4$ 波片,被所述第三偏振分光棱镜向下反射;
- [0056] 一个第三半反半透镜,位于所述第三偏振分光棱镜下方,使被第三偏振分光棱镜向下反射的激光 45 度角入射到一个表面;
- [0057] 一个第三光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号。
- [0058] 所述第二混合信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的;
- [0059] 所述第二偏振分光棱镜,使所述第一光纤射出的激光向上反射;
- [0060] 一个第五半反半透镜,位于所述第二偏振分光棱镜上方,使所述第二偏振分光棱镜反射的激光被 90 度向左反射;
- [0061] 一个第三直角反射镜,位于所述第五半反半透镜左侧,使被所述第五半反半透镜反射的激光被 90 度向下反射;
- [0062] 一个第四直角反射镜,位于所述第三直角反射镜下方,使被所述第三直角反射镜反射的激光被 90 度向右反射后 45 度入射到所述第三半反半透镜的另一个表面;
- [0063] 一个第四光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号;
- [0064] 所述科学信号读出干涉光路与所述混合信号读出干涉光路共用所述第一偏振分光棱镜、第二偏振分光棱镜与第一半反半透镜;
- [0065] 所述科学信号读出干涉光路包括等臂长的第一科学信号读出激光臂和第二科学信号读出激光臂;
- [0066] 所述第一科学信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的;
- [0067] 所述第一偏振分光棱镜,使所述第二光纤射出的激光向左反射;
- [0068] 一个第一 $\lambda/4$ 波片,位于所述第一偏振分光棱镜左侧,使所述第一偏振分光棱镜反射出的激光垂直经过;
- [0069] 一个第一反射镜,使经过所述第一 $\lambda/4$ 波片透射的激光被 180 度反射回,并再次经过所述第一 $\lambda/4$ 波片,被所述第一偏振分光棱镜透射;
- [0070] 一个所述第一半反半透镜,使激光 45 度角入射后向上反射;
- [0071] 一个 $\lambda/2$ 波片,位于所述第一半反半透镜上方,使所述第一半反半透镜反射出的激光垂直经过,并改变其偏振状态;
- [0072] 一个第四半反半透镜,位于所述 $\lambda/2$ 波片上方,使被 $\lambda/2$ 波片经过的激光 45 度角入射到一个表面;
- [0073] 一个第六光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号;
- [0074] 所述第二科学信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的;
- [0075] 所述第二偏振分光棱镜,使所述第一光纤射出的激光向上反射;
- [0076] 一个第五半反半透镜,位于所述第二偏振分光棱镜上方,使所述第二偏振分光棱镜反射的激光透射;

[0077] 一个第五直角反射镜,位于所述第五半反半透镜上方,使被所述第五半反半透镜反射的激光被 90 度向左反射后 45 度入射到所述第四半反半透镜的另一个表面;

[0078] 一个第五光电探测器,用于将激光干涉信号转换成电信号。

[0079] 进一步,所述第一平移系统,由第一压电陶瓷、第一控制器、第一计算机组成,所述第一反射镜固定于所述第一压电陶瓷上;

[0080] 所述第二平移系统,由第二压电陶瓷、第二控制器、第二计算机组成,所述第二反射镜固定于所述第二压电陶瓷上。

[0081] 进一步,所述相位检测系统包括:

[0082] 一个相位计,与所述第一光电探测器、第二光电探测器、第三光电探测器、第四光电探测器、第五光电探测器、第六光电探测器相连,对从光电探测器中获得的干涉信号进行相位检测,相位检测精度要求优于 0.01° ;所述相位计同时要求具备测频功能,根据干涉信号差分频率的变化和多普勒频移原理反推出第一反射镜与第二反射镜的相对运动速度;

[0083] 一个计算机,与所述相位计相连,对从相位计中获得的相位信息进行采集,并反演

位移,其中,位移的反演公式是: $\Delta L = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda$, 其中 λ 为激光波长, $\Delta\varphi$ 为相位信息,单位为弧度。

[0084] 进一步,所述数据分析系统包括:

[0085] 一个示波器,与所述第一光电探测器、第二光电探测器、第三光电探测器、第四光电探测器、第五光电探测器、第六光电探测器相连,观察从光电探测器中获得的干涉信号强弱,从而对光路系统进行调试,以获得最佳的干涉信号;

[0086] 一个频谱仪,对测距精度数值进行频谱展开,从而反映出干涉系统在各个频段上的测距精度;

[0087] 所述相位计,对干涉信号进行相位检测和频率测量;

[0088] 所述计算机,通过 Matlab 等数据分析软件,并采用频谱分析法对数据进行分析,对动态测距数据进行比对,以反映出系统的动态测距精度,并从混和信号中提炼出科学信号。

[0089] 本发明的优点是:

[0090] 本发明高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置实现了三路干涉光路中参考臂与测量臂的等臂性,可有效消除激光器频率不稳定性对测距精度的影响,同时集成了可消除光源系统各类噪声源的干涉光路,可有效消除激光器初始相位、光学平台、元器件与仪器以及光纤等各类噪声源对系统测距精度的影响,实现了长周期皮米量级的测量精度。

[0091] 本发明采用二级隔振系统,它是由 $2.7\text{m} \times 3.7\text{m} \times 2.5\text{m}$ 的独立地基和隔振光学平台组成,隔振频率低于 1Hz。通过二级隔振系统能有效隔离地面振动及其它高频振动对实验平台的影响。

[0092] 本发明采用高真空系统和殷钢光学平台。真空系统由机械泵、分子泵和离子泵三级协作,能达到 $8 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 的真空度。它能降低大气扰动的影响并且提供恒温环境。殷钢的膨胀系数为 $10^{-8}/^\circ\text{C}$ 。通过真空系统和殷钢光学平台,能有效抑制热噪声对系统测距精度的影响。

[0093] 本发明具备模拟卫星轨道游离信号与由引力波或重力场等引起的科学信号的干

涉光路设计,具备激光干涉测距系统的动态测距精度评估。

[0094] 本发明采用偏振光进行设计,利用偏振光的偏振特性,使得此干涉仪的光路设计非常规整、美观。

附图说明

[0095] 图 1 为本发明的高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置结构图。

[0096] 图 2 为本发明的光源系统示意图。

[0097] 图 3 为本发明的干涉仪示意图。

[0098] 图 4 为本发明的参考干涉光路示意图。

[0099] 图 5 为本发明的混合信号读出干涉光路示意图。

[0100] 图 6 为本发明的科学信号读出干涉光路示意图。

[0101] 图 7 为本发明的平移系统示意图。

[0102] 图 8 为本发明的相位检测系统示意图。

[0103] 图 9 为本发明的数据分析系统示意图。

具体实施方式

[0104] 下文中将结合附图对本发明的实施例进行详细说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0105] 本发明提供了如附图 1-9 所示的一种高精度双星激光干涉动态测距地面模拟装置,至少包括:

[0106] 隔振系统,用于将外界的震动噪声进行隔离与过滤,降低系统的震动噪声;隔振系统包括隔离地基和隔振光学平台。

[0107] 真空系统,用于降低系统因温度波动所带来的热噪声;真空系统包括真空腔和真空泵。

[0108] 光源系统,用于提供 2 束高稳定性、高稳频的激光,同时这两束光具备相应的差分频率。光源系统包括沿光轴方向依次设置的:

[0109] 一光源参考激光臂,用于产生准直、单色及偏振态可控的偏振参考激光;一与光源参考激光臂等臂长的光源测量激光臂,用于产生准直、单色及偏振态可控的偏振测量激光。

[0110] 干涉仪,用于产生三路等臂长外差式干涉信号,利用位移与相位之间的关系,得到被测两物体之间的位移变化信息;实现轨道游离运动信息与由引力波或重力场等引起的科学信号信息的模拟,精确评估干涉仪的动态测距功能;干涉仪包括光学平台及干涉光路。光学平台为殷钢光学平台。此干涉仪包含了三个独立的干涉光路,其功能设计理念如下:(1) 消除真空腔干涉仪以外的环境噪声与器件噪声,包括两激光器的相位噪声;(2) 实现三条干涉光路的等臂性,消除激光的频率不稳定性问题;(3) 实现卫星轨道游离运动信息与科学信号信息的模拟,精确评估干涉仪的动态测距功能。

[0111] 相位检测系统,用于对干涉信号进行相位检测;对相位信息进行采集,并反演位移;

[0112] 数据分析系统,用于评估干涉系统的动态测距精度,并从混和信号中提炼出科学信号。

[0113] 如图 2 所示,光源参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0114] 一个激光器 1,用于产生激光光源;一个光源半反半透镜 121,使激光入射后分为两路,光强减半,两路光信号分别作为参考激光和测量激光;一个第一声光调制器 41,使经过的激光发生声光相互作用后产生相应的频移;一个第一法拉第隔离器 51,用于对经过的激光进行调整,防止激光返回激光器 1,影响激光器 1 正常工作;一个第一线性偏振片 61,校正激光偏振状态,使出射激光的偏振态保持为 P 光或者 S 光;一个第一光纤耦合器 71,用于连接一条第一光纤。

[0115] 光源测量激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0116] 一个光源直角反射镜 131,使被所述光源半反半透镜 121 反射的激光被 90 度反射;一个第二声光调制器 42,使经过的激光发生声光相互作用后产生相应的频移;一个第二法拉第隔离器 52,用于对经过的激光进行调整,防止激光返回激光器 1,影响激光器 1 正常工作;一个第二线性偏振片 62,校正激光偏振状态,使出射激光的偏振态保持为 P 光或者 S 光,与被所述第一线性偏振片 61 校正的激光偏振态保持一致;一个第二光纤耦合器 72,用于连接一条第二光纤。

[0117] 光纤一般采用单模保偏光纤,以保证光的偏振态。通过调整两光路中光学元器件及仪器的位置,使两路光的光程基本相等,同时两光纤也采用长度相等的光纤,尽量使两路光的光程保持相等。

[0118] 如图 3 所示,干涉光路包括参考干涉光路、混合信号读出干涉光路和科学信号读出干涉光路。三路干涉光路均为等臂长设计,能很好压制激光频率不稳定性引起的相位噪声。真空腔之外,由于温度起伏较高,引入的热噪声较大,需引入参考干涉仪进行噪声消除。因此将参考干涉光路的噪声相位信息读出,并与混合信号读出干涉光路及科学信号读出干涉光路的相位信息进行减法运算,由此消除真空腔外的噪声影响,得到各自“干净”的位移信息;混合信号读出干涉光路读出混合信号,通过频谱分析法,使得科学信号与轨道游离信号获得区分;科学信号读出干涉光路读出单独的模拟科学信号,用来与混合信号读出干涉光路中分离的科学信号进行比对,并反演系统测距精度。

[0119] 如图 4 所示,参考干涉光路包括等臂长的第一参考激光臂、第二参考激光臂;用来读出激光在光源系统调制光路中的相位噪声,包括激光器相位噪声、光纤噪声、声光调制器(AOM)噪声等器件噪声,以及热噪声、震动噪声与电磁噪声等环境噪声。

[0120] 第一参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0121] 一个第一偏振分光棱镜 81,使第二光纤射出的激光向上透射;一个第二直角反射镜 32,位于第一偏振分光棱镜 81 上方,使第一偏振分光棱镜 81 透射的激光被 90 度向右反射;一个第二半反半透镜 22,位于第二直角反射镜 32 右侧,使经第二直角反射镜 32 反射的激光从一个表面 45 度角入射;一个第二光电探测器 112,用于将激光干涉信号转换成电信号。

[0122] 第二参考激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0123] 一个第二偏振分光棱镜 82,使第一光纤射出的激光向右透射;一个第六直角反射镜 36,位于第二偏振分光棱镜 82 右侧,使第二偏振分光棱镜 82 透射的激光被 90 度向上反射,并 45 度角入射到第二半反半透镜 22 的另一个表面;一个第一光电探测器 111,用于将激光干涉信号转换成电信号。

[0124] 如图 5 所示,混合信号读出干涉光路与参考干涉光路共用第一偏振分光棱镜 81 与第二偏振分光棱镜 82;混合信号读出干涉光路包括等臂长的第一混合信号读出激光臂和第二混合信号读出激光臂。用来读出第一反射镜 101 与第二反射镜 102 的混合位移变化数据,即模拟实际星间激光干涉测距情况下,卫星轨道游离信号与由引力波或重力场等引起的科学信号同时存在的情形。

[0125] 第一混合信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0126] 第一偏振分光棱镜 81,使第二光纤射出的激光向左反射;一个第一 $\lambda/4$ 波片 91,位于第一偏振分光棱镜 81 左侧,使第一偏振分光棱镜 81 反射出的激光垂直经过;一个第一反射镜 101,为采用镀金的石英玻璃,使经过第一 $\lambda/4$ 波片 91 透射的激光被 180 度反射回,并再次经过第一 $\lambda/4$ 波片 91,被第一偏振分光棱镜 81 透射;一个第一半反半透镜 21,使激光 45 度角入射后透射;一个第三偏振分光棱镜 83,使经第一半反半透镜 21 透射的激光 45 度角入射后透射;一个第二 $\lambda/4$ 波片 92,位于第三偏振分光棱镜 83 右侧,使第三偏振分光棱镜 83 透射出的激光垂直经过;一个第二反射镜 102,为采用镀金的石英玻璃,使经过第二 $\lambda/4$ 波片 92 透射的激光被 180 度反射回,并再次经过第二 $\lambda/4$ 波片 92,被第三偏振分光棱镜 83 向下反射;一个第三半反半透镜 23,位于第三偏振分光棱镜 83 下方,使被第三偏振分光棱镜 83 向下反射的激光 45 度角入射到一个表面;一个第三光电探测器 113,用于将激光干涉信号转换成电信号。

[0127] 第二混合信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0128] 第二偏振分光棱镜 82,使第一光纤射出的激光向上反射;一个第五半反半透镜 25,位于第二偏振分光棱镜 82 上方,使第二偏振分光棱镜 82 反射的激光被 90 度向左反射;一个第三直角反射镜 33,位于第五半反半透镜 25 左侧,使被第五半反半透镜 25 反射的激光被 90 度向下反射;一个第四直角反射镜 34,位于第三直角反射镜 33 下方,使被第三直角反射镜 33 反射的激光被 90 度向右反射后 45 度入射到第三半反半透镜 23 的另一个表面;一个第四光电探测器 114,用于将激光干涉信号转换成电信号。

[0129] 如图 6 所示,科学信号读出干涉光路与混合信号读出干涉光路共用第一偏振分光棱镜 81、第二偏振分光棱镜 82 与第一半反半透镜 21;科学信号读出干涉光路包括等臂长的第一科学信号读出激光臂和第二科学信号读出激光臂。用来读出第一反射镜 101 的位移变化数据,即模拟的科学信号。

[0130] 第一科学信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0131] 第一偏振分光棱镜 81,使第二光纤射出的激光向左反射;一个第一 $\lambda/4$ 波片 91,位于第一偏振分光棱镜 81 左侧,使第一偏振分光棱镜 81 反射出的激光垂直经过;一个第一反射镜 101,使经过第一 $\lambda/4$ 波片 91 透射的激光被 180 度反射回,并再次经过第一 $\lambda/4$ 波片 91,被第一偏振分光棱镜 81 透射;一个第一半反半透镜 21,使激光 45 度角入射后向上反射;一个 $\lambda/2$ 波片 93,位于第一半反半透镜 21 上方,使第一半反半透镜 21 反射出的激光垂直经过;一个第四半反半透镜 24,位于 $\lambda/2$ 波片 93 上方,使被 $\lambda/2$ 波片 93 经过的激光 45 度角入射到一个表面;一个第六光电探测器 116,用于将激光干涉信号转换成电信号。

[0132] 第二科学信号读出激光臂包括沿光轴方向依次设置的:

[0133] 第二偏振分光棱镜 82,使第一光纤射出的激光向上反射;一个第五半反半透镜 25,位于第二偏振分光棱镜 82 上方,使第二偏振分光棱镜 82 反射的激光透射;一个第五直

角反射镜 35,位于第五半反半透镜 25 上方,使被第五半反半透镜 25 反射的激光被 90 度向左反射后 45 度入射到第四半反半透镜 24 的另一个表面;一个第五光电探测器 115,用于将激光干涉信号转换成电信号。

[0134] 如图 7 所示,第一平移系统,用于模拟科学信号;由第一压电陶瓷、第一控制器、第一计算机组成,第一反射镜 101 固定于第一压电陶瓷上;第一压电陶瓷为德国 PI 公司生产的 P-772K012 压电陶瓷,第一控制器为 PIE-753.1CD 控制器。第一平移系统的绝对位移精度为 0.05nm,行程为 10 μm,耐真空度高达 10^{-7} Pa,此平移系统用于模拟科学信号,位于干涉仪的左边,第一反射镜 101 安装于第一压电陶瓷的运动面上,形成水平方向运动的反射光路,运动方程设置如下: $10\sin(0.02\pi t + \phi)$ nm,运动幅值为 10nm,运动频率为 0.01Hz;

[0135] 第二平移系统,用于模拟卫星轨道游离信号;由第二压电陶瓷、第二控制器、第二计算机组成,第二反射镜 102 固定于第二压电陶瓷上。第二压电陶瓷为德国 PI 公司生产的 P-611.ZS 压电陶瓷,第二控制器为 PI E-709.SRG 控制器。此平移系统的绝对位移精度为 0.2nm,行程为 100 μm,耐真空度高达 10^{-7} Pa,此平移系统用于模拟卫星轨道游离信号,位于干涉仪的右边,第二反射镜 102 安装于第二压电陶瓷的运动面上,形成水平方向运动的反射光路,运动方程设置如下: $50\sin(20\pi t + \phi)$ μm,运动幅值为 50 μm,运动频率为 20Hz,最高模拟速度达 3mm/s。

[0136] 如图 8 所示,相位检测系统包括:

[0137] 一个相位计,与第一光电探测器 111、第二光电探测器 112、第三光电探测器 113、第四光电探测器 114、第五光电探测器 115、第六光电探测器 116 相连,对从光电探测器中获得的干涉信号进行相位检测,相位检测精度要求优于 0.01° ;相位计同时要求具备测频功能,根据干涉信号差分频率的变化和多普勒频移原理反推出第一反射镜 101 与第二反射镜 102 的相对运动速度;一个计算机,与相位计相连,对从相位计中获得的相位信息进行采集,并反演位移,其中,位移的反演公式是: $\Delta L = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \lambda$, 其中 λ 为激光波长, $\Delta\phi$ 为相位信息,单位为弧度。

[0138] 如图 9 所示,数据分析系统包括:

[0139] 一个示波器,与第一光电探测器 111、第二光电探测器 112、第三光电探测器 113、第四光电探测器 114、第五光电探测器 115、第六光电探测器 116 相连,观察从光电探测器中获得的干涉信号强弱,从而对光路系统进行调试,以获得最佳的干涉信号;一个频谱仪,对测距精度数值进行频谱展开,从而反映出干涉系统在各个频段上的测距精度;相位计,对干涉信号进行相位检测和频率测量;计算机,通过 Matlab 等数据分析软件,并采用频谱分析法对数据进行分析,对动态测距数据进行比对,以评估系统的动态测距精度,并从混和信号中提炼出科学信号。

[0140] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。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。

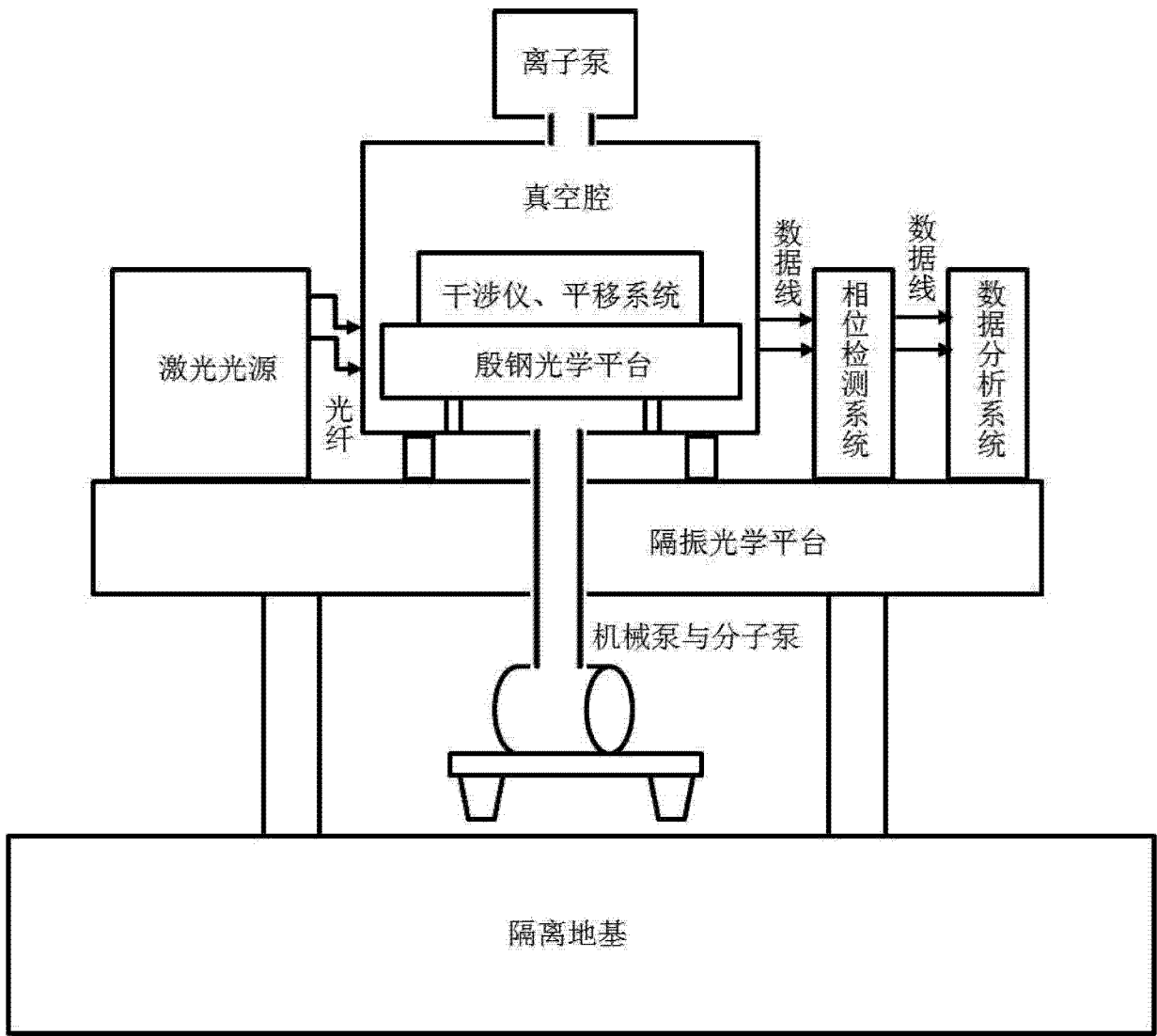


图 1

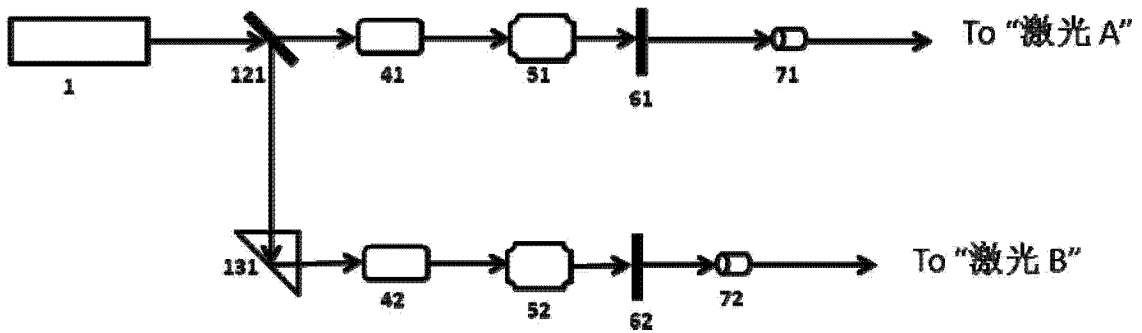


图 2

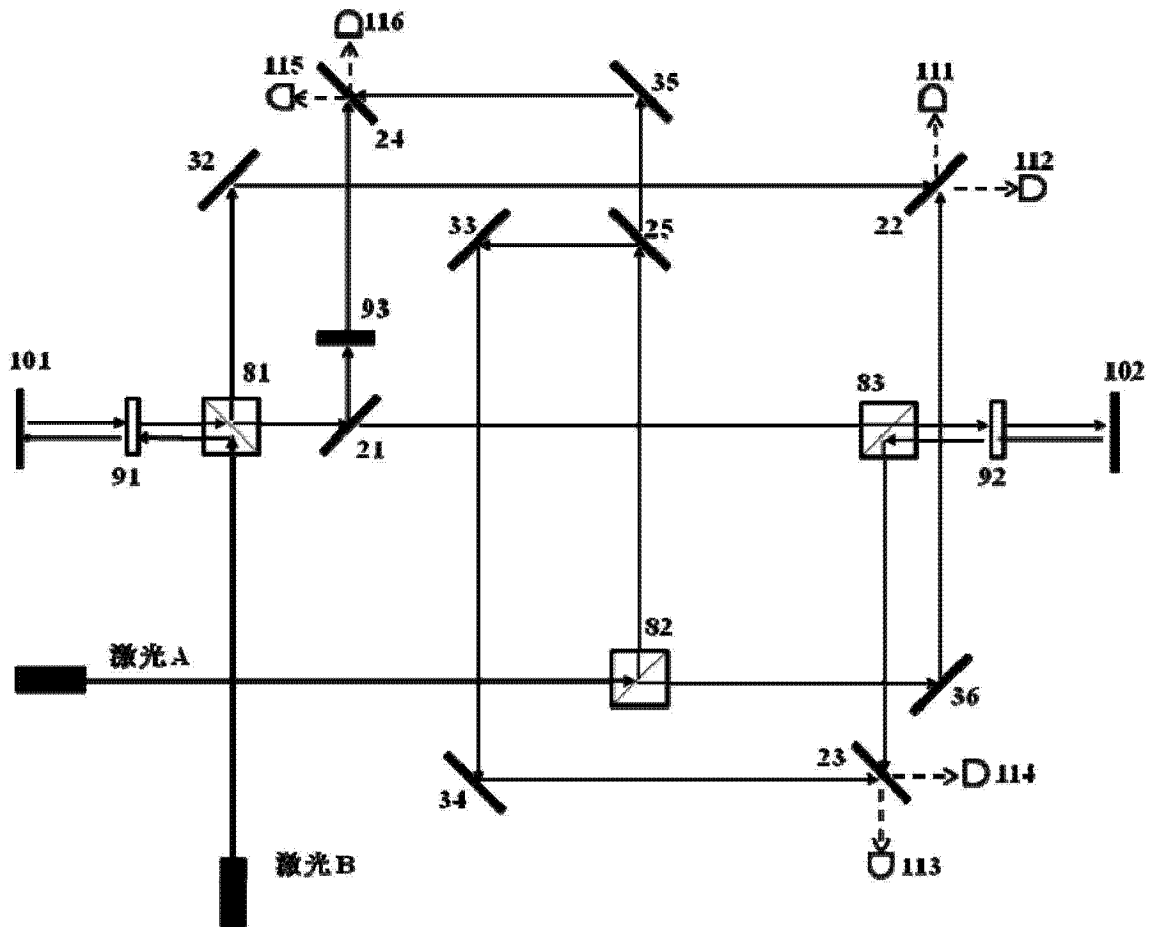


图 3

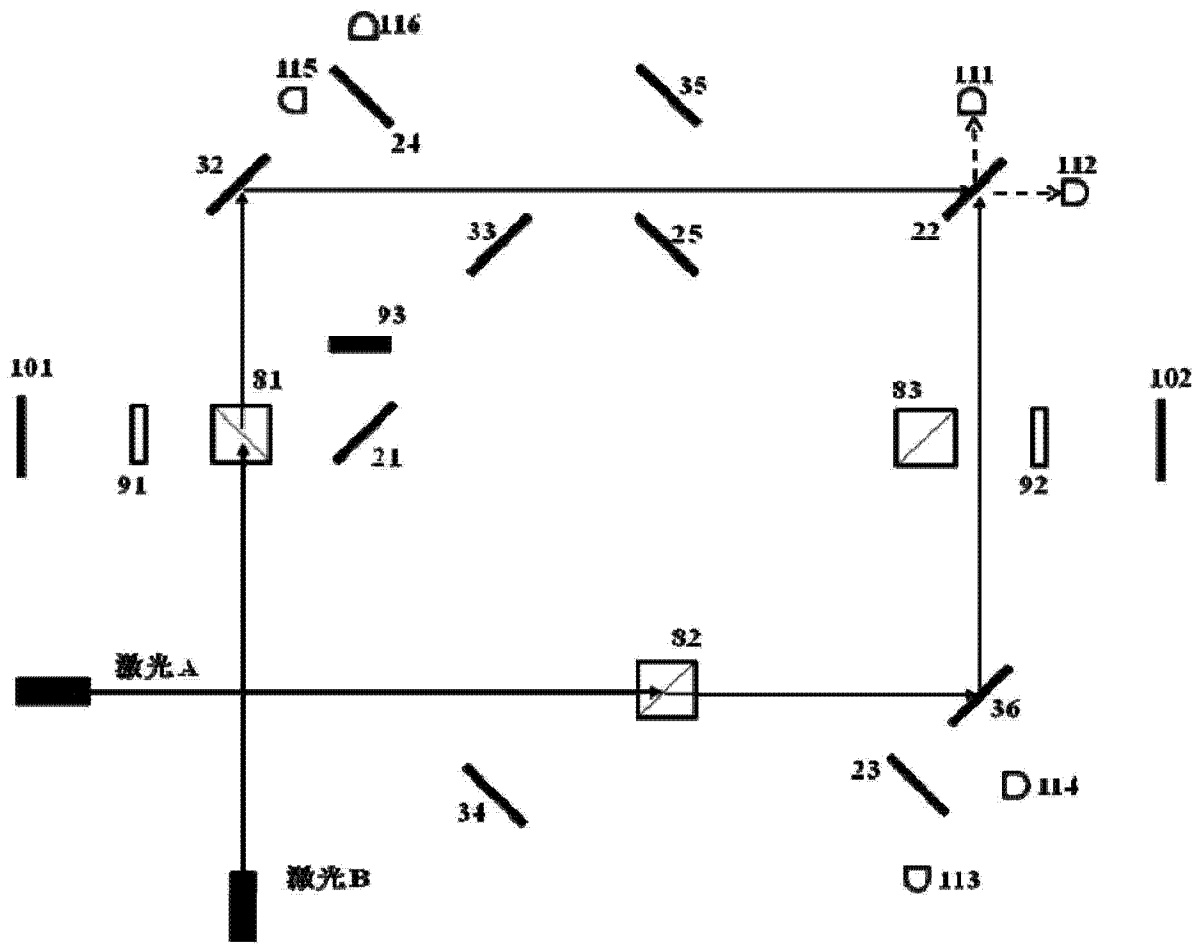


图 4

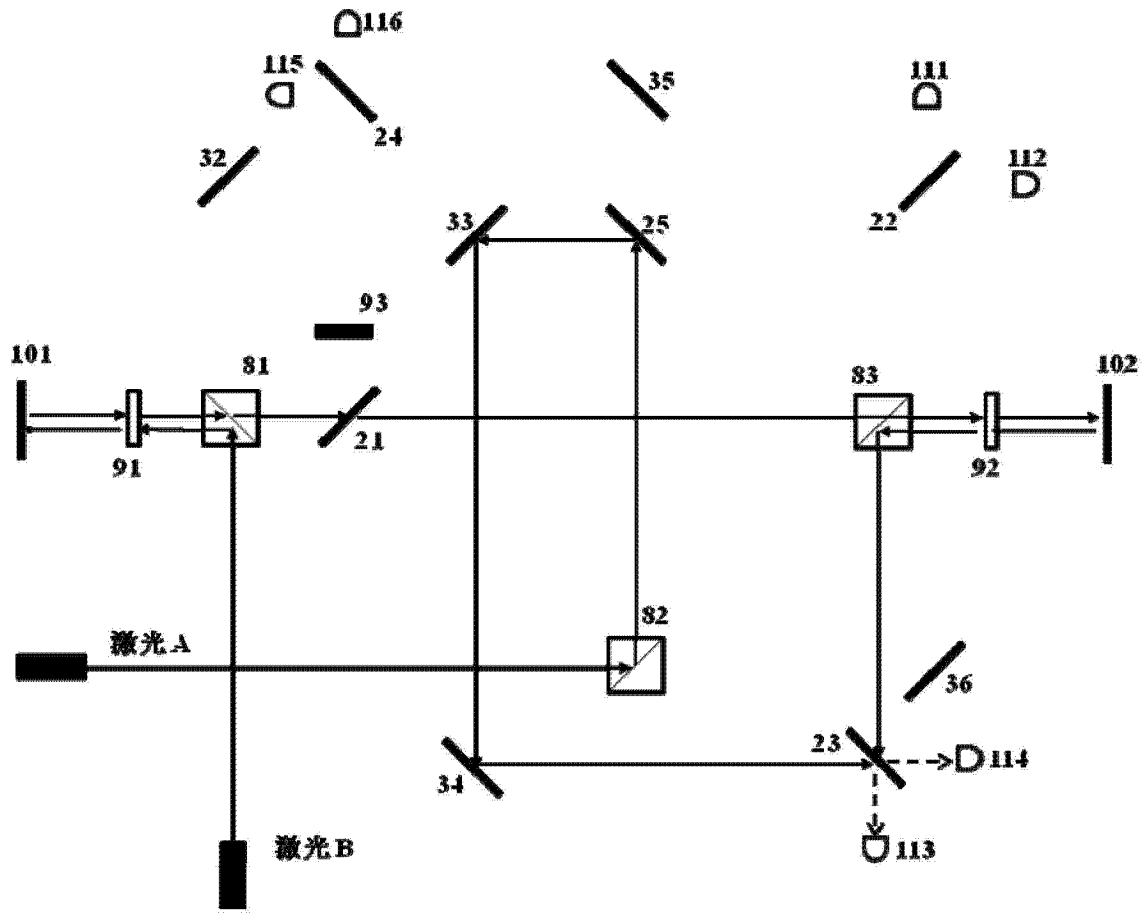


图 5

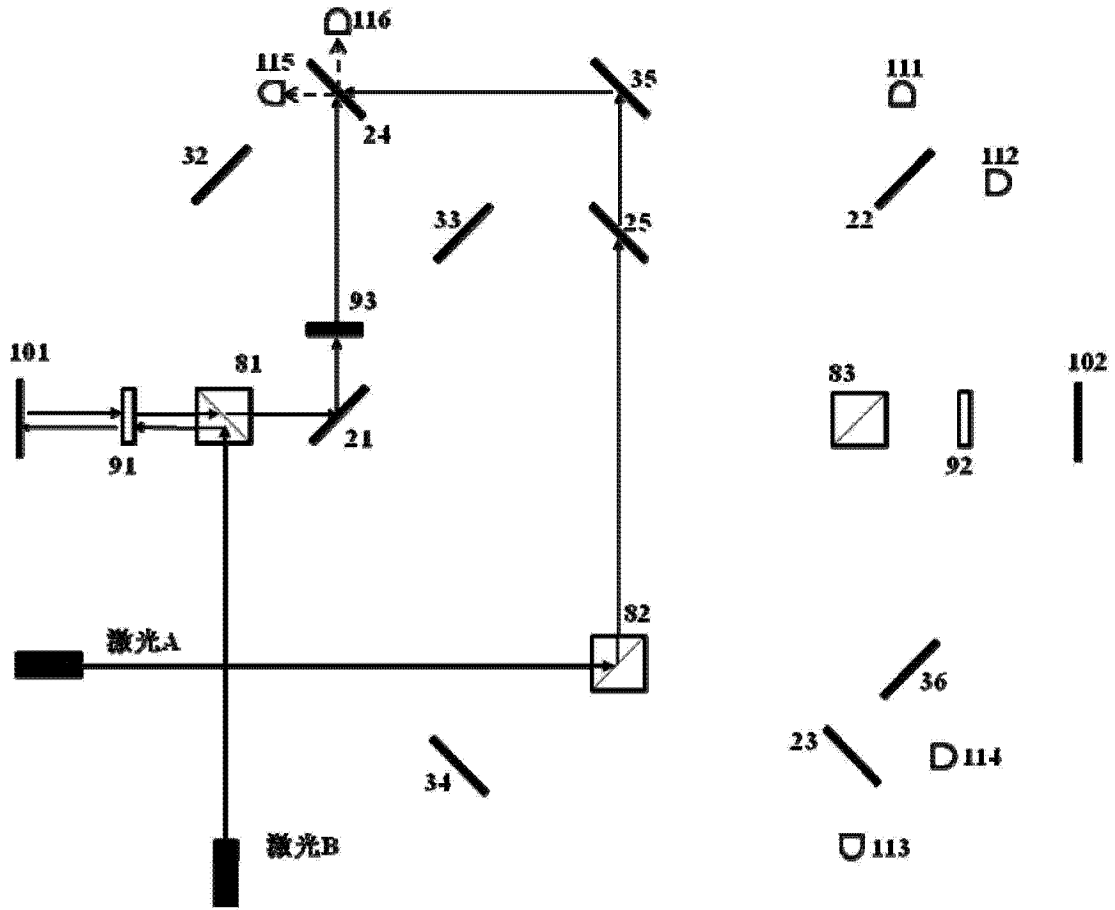


图 6



图 7



图 8

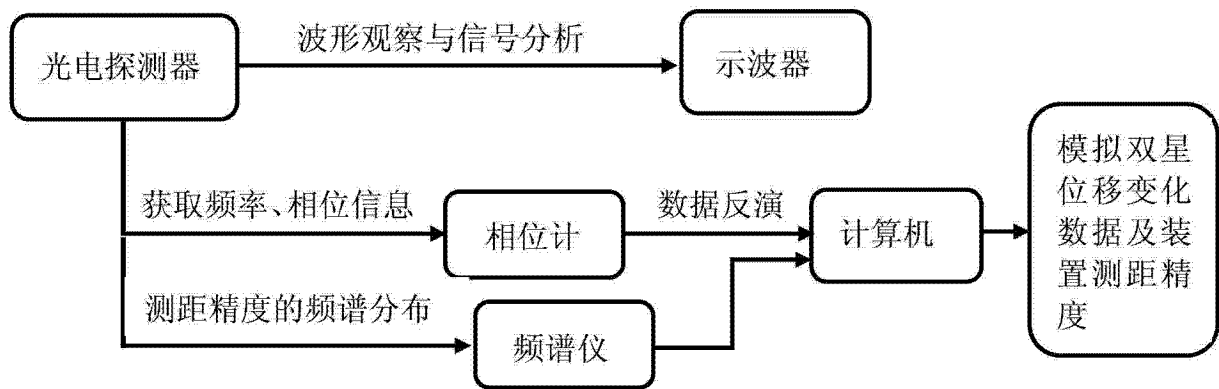


图 9