

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.02.XX

引力波探测器中角度自动控制系统工作点偏移的实验研究

万睿哲¹, DAIKI Haba², 王浩宇², KENTARO Somiya², 朱宗宏¹

(1 武汉大学 物理科学与技术学院 武汉 430072;

2. Department of Physics, Institute of Science Tokyo, Tokyo 152-8550)

摘要: 引力波的直接探测为研究致密天体和检验广义相对论开辟了新窗口。随着多台大型干涉型探测器投入运行,灵敏度提升成为核心目标。然而,测试质量光学非均匀性会导致法布里-珀罗腔角度对准波前传感信号工作点偏移,增强噪声耦合,降低稳定性与灵敏度。针对这一问题,基于四象限光电探测器加权读出理论,搭建单法布里-珀罗腔实验系统,观测并验证了非均匀性补偿方法的有效性,为其工程应用提供了实验依据。

关键词: 引力波; 仪器: 干涉仪; 仪器: 探测器, 法布里珀罗腔, 四象限光电探测器

中图分类号: P111.47 **文献标识码:** A

1 引言

引力波是时空曲率的扰动,以光速传播,携带着极端天体现象的重要物理信息。引力波的直接观测对引力理论检验、极端致密天体研究、多信使天文学、宇宙学以及大尺度结构等方向具有重要意义。自 1916 年爱因斯坦在广义相对论框架下预言引力波以来,对其直接探测的探索持续推进。由于引力波信号极其微弱,长期以来人们只能间接观测其影响。2015 年,激光干涉引力波天文台 (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) 首次探测到双黑洞并合事件 GW150914 产生的引力波信号^[1],引力波天文学由此进入直接观测阶段。此后,欧洲的 Virgo 干涉仪 (Virgo)^[2]与日本的神冈引力波探测器 (Kamioka Gravitational Wave Detector, KAGRA)^[3]等大型地面装置相继运行,全球引力波观测网络逐步形成。

在地基引力波探测器中,测试质量 (test mass, TM) 通常指悬挂于干涉仪法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 臂腔中的高反射镜。理想情况下, TM 应具有均匀的光学性质分布。然而,实际材料加工与生长过程中,杂质、晶格缺陷及内部应力等因素会引入空间分布非均匀性。这

收稿日期: YYYY-MM-DD; 修回日期: YYYY-MM-DD

资助项目: 国家自然科学基金 (12433001, 12021003), JST ASPIRE (JPMJAP2320)

通讯作者: 朱宗宏, zhuzh@whu.edu.cn

类非均匀性可能来源于热吸收诱导的非均匀形变^[4],也可能表现为晶体生长不均导致的形貌差异与附加双折射^[5]。

以 KAGRA 为例,其作为大规模低温引力波探测器,为降低热噪声选用高纯度、低吸收的单晶蓝宝石作为 TM 材料^[6]。蓝宝石在低温下具有较高热导率与机械强度,且对近红外波段具有较高透过率,适用于地下低温真空环境运行。然而,大尺寸蓝宝石晶体的实际生长结果可能偏离理想设计,从而出现空间非均匀的双折射效应^[7]。该效应可引发腔内高阶模耦合增强、增益下降,并增强激光频率噪声耦合^[8]。非均匀双折射不仅会改变入射激光在传播过程中的偏振态,还会改变透射光波前,引入波相差,从而在腔镜反射信号中引入附加偏置与非线性噪声。在对准控制中,上述影响会进一步造成波前传感 (wavefront sensing, WFS) 信号的工作点偏移,降低锁腔与对准精度,从而限制探测器的整体灵敏度^[5]。

因此,如何有效测量并补偿输入测试镜的非均匀双折射噪声,是提升 KAGRA 乃至下一代引力波探测器性能的关键科学与工程问题。Eisenmann 等利用一对电光延迟器生成任意偏振态,从而对测试基片双折射进行补偿^[9]。Wang 等基于透射波前误差提出快速表征方法,并实现了 KAGRA 输入测试质量的双折射图谱再现^[10]。Haba 等则通过优化光电探测器的读出方式,提出加权四象限光电探测器 (quadrant photodiode, QPD) 信号读出方法,在模拟中有效抑制了入射测试质量 (Input Test Mass, ITM, ITMX, ITMY) 非均匀性对腔倾斜控制的影响^[11]。由于现有地基探测器普遍采用 QPD 实现腔倾斜反馈控制,且加权 QPD 信号读出方法无需引入额外硬件,该方法在工程实现上具有潜在优势。同时,该方法并不局限于非均匀双折射引起的偏振变化,对其他镜面非均匀性导致的高阶模与波前变化亦可能具有一定补偿能力。然而,现有研究主要停留在数值模拟验证阶段,为推动其在实际引力波探测器中的应用,有必要开展实验验证。

本文针对引力波探测器 ITM 非均匀性引发的 WFS 噪声问题,基于加权 QPD 信号读出理论设计实验并进行验证,评估该方法在真实实验条件下对 TM 非均匀性诱导噪声的补偿效果。第 2 节介绍引力波探测器与 FP 腔对准控制,以及加权 QPD 读出的理论基础。第 3 节给出实验系统与实验方案,描述实验过程并分析初期结果。第 4 节对全文进行总结并讨论后续工作。

2 理论基础

2.1 引力波探测器基本结构

在目前的地基引力波探测器中,如图1所示,其核心光学结构为法布里-珀罗迈克耳孙干涉仪 (Fabry-Perot Michelson interferometer, FPMI)。该结构将传统迈克耳孙干涉仪的两条相互垂直的干涉臂拓展为千米级 FP 臂腔,从而显著增加光在腔内的有效往返传播距离,放大引力波引起的微小臂长变化。在此基础上,在激光源与干涉仪之间引入功率回收镜 (Power Recycling Mirror, PRM, PR2, PR3),并在输出端口配置信号回收镜 (Signal Recycling Mirror, SRM, SR2, SR3),可提高入射到主干涉仪的有效功率并调控探测器的频率响应。此外,为抑制高阶横模与散射光对读出的影响,探测器光学链路通常设置输入模式清洁器 (Input Mode

Cleaner, IMC) 与输出模式清洁器 (Output Mode Cleaner, OMC), 用于滤除非基模空间模式及与探测无关的调制分量, 以保证进入主干涉仪的光束空间质量与读出稳定性。

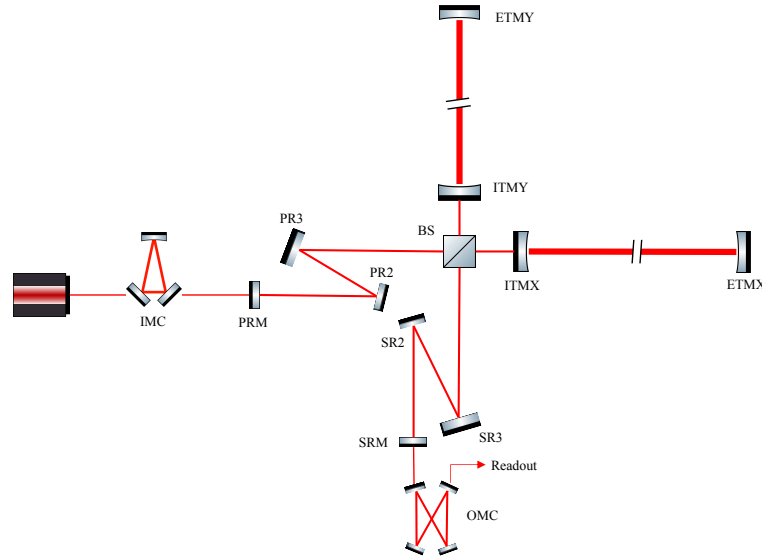


图 1 地基引力波探测器的基本结构。BS: 分束器; ETM: 末端测试质量

引力波探测器作为高精度干涉测量系统, 通常具有多个独立的自由度。其中最核心的长度自由度可归纳为 5 个: 两条法布里-珀罗臂腔的差分长度 DARM(Differential Arm Length), 两条臂腔的共模长度 CARM(Common Arm Length), 由两条干涉臂在主干涉仪中心形成的迈克尔孙干涉自由度 MICH(Michelson), 功率回收腔长度 PRCL(Power Recycling Cavity Length), 以及信号回收腔长度 SRCL(Signal Recycling Cavity Length)。除长度自由度外, 探测器还具有大量角度自由度, 每个主要光学元件均需控制其俯仰 (pitch) 与偏航 (yaw), 以维持在理想工作点附近。受实验简化限制, 本文将着重研究单个 FP 腔的控制。

2.2 FP 腔的控制

在理想情况下, FP 腔由两面反射镜构成, 入射光束沿腔轴传播并在镜间多次反射。对于给定的腔本征模 (通常为 TEM_{00} 模, Transverse Electromagnetic Mode, TEM), 当腔长满足共振条件时, 腔内 TEM_{00} 模光场将得到最大程度的共振增强, 腔内光功率达到该条件下的最大值。与此同时, 入射镜直接反射的光场与腔内泄漏出的光场在反射端发生干涉, 使反射光功率达到最小。但在实际运行中, 镜面抖动、光束偏移等扰动会使腔长与对准条件随时间变化, 从而使腔难以长期稳定地保持在共振点附近; 同时, 入射光与 TEM_{00} 模的模式匹配也会发生波动。一旦光束光轴与腔轴不再重合, 或光腰位置与大小偏离腔基模的匹配条件, 输入光将无法完全耦合到 TEM_{00} 模, 并在腔内激发一定比例的高阶模分量。因此, 通常需要配置长度控制与对准控制等反馈系统, 尽量将 FP 腔维持在共振点附近并保持与 TEM_{00} 模的良好匹配, 从而获得稳定的腔内功率增强与低噪声工作状态 [12, 13]。

当腔的两个镜面沿特定角度倾斜, 或入射光束发生抖动时, 入射光的光轴将与腔轴产生

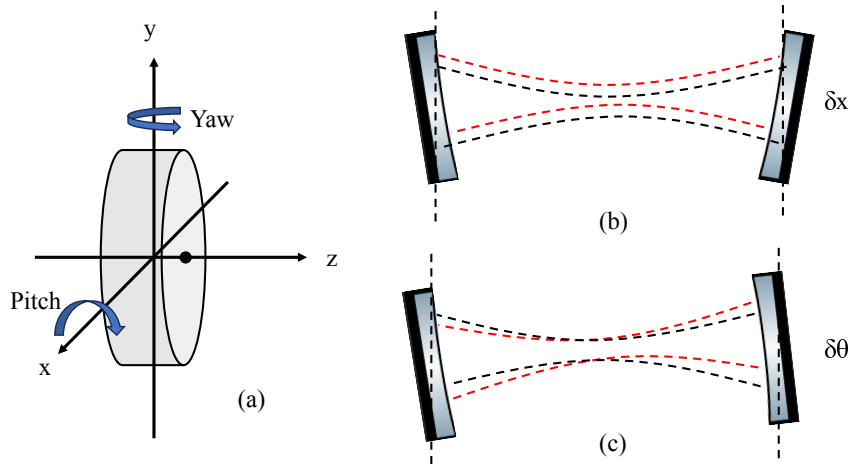


图2 对准误差示意图。(a) 镜面俯仰 (Pitch) 与偏航 (Yaw) 两种倾斜形式; (b) SOFT 模式; (c) HARD 模式

相对偏移, 该类误差称为对准误差 (alignment error)^[14]。对准误差的典型形式如图2所示。如图2(a), 对腔工作状态影响较大的倾斜主要包括绕水平 x 轴的俯仰 (pitch) 与绕垂直 y 轴的偏航 (yaw)。对于同一种倾斜, 若腔的两面镜子以相反方向倾斜, 入射光轴与腔轴将产生横向位移, 且光压效应会进一步放大镜子的倾斜, 该模式称为 SOFT 模式, 如图2(b)。若腔的两面镜子以相同方向倾斜, 入射光轴与腔轴将形成相对角度, 此时光压效应倾向于补偿镜子的倾斜, 该模式称为 HARD 模式, 如图2(c)^[11, 14]。因此, 光轴与腔轴之间的相对角度倾斜 $\delta\theta$ 与横向位移 δx (对应 SOFT 与 HARD 模式) 也可作为等效量, 用于描述光束抖动噪声对腔共振状态的影响。

为实现腔的稳定控制, 获取腔镜的实时工作状态至关重要。常用的监控手段为调制解调系统。当入射光包含调制边带时, 可近似表示为载波频率 f_0 与一阶边带 $f_0 \pm f_m$ 的叠加。当载波满足腔的共振条件时, 载波在腔内多次往返叠加并得到显著功率增强, 反射端的载波分量被抑制到最低。边带 $f_0 \pm f_m$ 通常远离腔的共振频率, 耦合入腔的功率很小, 主要在输入镜处被反射, 从而形成相对稳定的参考场。通过监控反射端参考场与载波反射分量之间频率为 f_m 的拍频信号并解调, 可得到用于长度控制的误差信号。

对于本征模为 TEM00 的 FP 腔, 当腔长发生失配时, 反射光中将出现额外的 TEM00 分量。该分量与参考场形成的拍频信号经解调后可用于检测镜面微小位移导致的腔长变化, 并据此施加反馈实现腔长控制, 该方法称为庞德-德里弗-霍尔锁定 (Pound-Drever-Hall locking, PDH)^[13]。当腔镜角度发生失配时, 反射光中将出现额外的一阶横模分量 (如 TEM01, TEM10)。其与参考场形成的拍频信号经解调后可用于检测镜面微小倾斜, 并可在 QPD 上获得读出, 该方法称为波前传感法 (Wavefront Sensing method, WFS)^[15]。此外, 通过在不同古伊 (Gouy) 相位位置布置 QPD 并进行解调, 可进一步区分同一种倾斜自由度下的 HARD 与 SOFT 运动分量。

当腔镜存在其他非理想因素, 如镜面表面不均、杂质分布或热致形变等, 均可能引入额

外的高阶模，导致腔内激光功率下降。同时，高阶模的存在会引起腔内能量分布畸变，并削弱锁定与对准控制的灵敏度。例如在 KAGRA 的 FP 腔中，镜面不规则性与基底非均匀双折射会使入射激光的部分能量散射为高阶模。这些高阶模在某些情况下与镜面倾斜引入的模式信号难以区分，从而导致对准控制信号产生虚假偏移，最终限制系统噪声性能与探测灵敏度。因此，即使镜子实际未发生角度漂移，由镜面非均匀性引起的高阶模仍可能在读出中表现为类似倾斜的信号，这也是本文重点关注的问题。

2.3 工作点偏移的产生

对于理想 FP 腔，为获取腔镜的微小倾斜信息，通常采用 WFS 方法。该方法对镜面倾斜所激发的一阶横模进行调制解调，并利用 QPD 的空间分割读出得到倾斜信号。对于倾斜自由度，解调后的信号分布可写为 (以 yaw 为例，pitch 类似)：

$$V_{\text{yaw}}(x, y) = -2J_0J_1 U_{00}U_{10}^* \left[\frac{\delta X}{w_0} \sin \eta + \frac{\delta \theta_{\text{yaw}}}{\alpha_0} \cos \eta \right] \quad (1)$$

式中，系数 $-2J_0J_1$ 来自对入射激光施加相位调制后产生的边带，其中 J_0 与 J_1 分别为零阶与一阶贝塞尔函数。 U_{00} 为腔内基模光场分布，表征主光束的空间形状， U_{10}^* 为一阶横模 (TEM_{10}) 的共轭场，由镜面倾斜或光束偏移等扰动引入。方括号中第一项对应 SOFT 模式对信号的贡献，其中 δX 为光束横向偏移量， w_0 为用于归一化的光腰半径。第二项对应 HARD 模式引起的信号，其中 $\delta \theta_{\text{yaw}}$ 为 yaw 方向的镜面角度偏差， $\alpha_0 = 2/(kw_0)$ 为角度的归一化因子， k 为波数。 η 为 Gouy 相位。由于两项分别以 $\sin \eta$ 与 $\cos \eta$ 的形式出现，因而可通过在不同 Gouy 相位位置布置 QPD 实现对光束横向偏移与镜面角度扰动的解耦。

由于 $V_{\text{yaw}}(x, y)$ 在空间上呈奇对称分布，单个光电探测器 (photodiode, PD) 对全光斑积分将相互抵消，因而无法获得有效读出。为实现该类信号的测量，通常采用 QPD 对光斑不同区域的光强进行分区积分，并通过四象限信号的加减运算构造误差信号。以 yaw 方向为例，其读出可表示为

$$P_{\text{yaw}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} V_{\text{yaw}}(x, y) dx dy - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^0 V_{\text{yaw}}(x, y) dx dy \quad (2)$$

式(2)对应均匀入射测试质量在 yaw 方向的读出示意，其结果可化为关于 δX 与 $\delta \theta_{\text{yaw}}$ 的线性函数，即

$$P_{\text{yaw}} = -2J_0J_1 \sqrt{\frac{8}{\pi}} \left[\frac{\delta X}{w_0} \sin \eta + \frac{\delta \theta_{\text{yaw}}}{\alpha_0} \cos \eta \right] \quad (3)$$

然而在实际系统中，FP 腔镜 (尤其是 ITM) 往往存在空间分布不均的光学性质，从而使上述理想误差信号受到扰动。在这种情况下，WFS 信号的空间分布不再满足规则的奇对称形式，而成为与光束入射位置 (X, Y) 及镜面畸变相关的函数。相应的 yaw 读出可写为

$$P'_{\text{yaw}}(X, Y) = -2J_0J_1 \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} f(x, y, X, Y) |U_{00}|^2 dx dy - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^0 f(x, y, X, Y) |U_{00}|^2 dx dy \right) \quad (4)$$

式(4)对应非均匀入射测试质量在 yaw 方向的读出示意。其中 $f(x, y, X, Y)$ 用于表示与激光入射位置 (X, Y) 相关的镜面空间分布不均匀性。由于空间分布不再由理想的 $U_{00}U_{10}^*$ 项所决定, 由 $f(x, y, X, Y)|U_{00}|^2$ 产生的读出将相对于理想分布引入偏差, 即 P_{yaw} 与 P'_{yaw} 之间出现差异。该差异会在控制回路中表现为虚假的倾斜反馈信号, 从而使腔的工作点偏离理想位置, 并进一步影响探测器的整体灵敏度。

进一步, 光束抖动噪声 (beam jitter noise) 也将由于镜面分布不均的原因, 与 WFS 信号耦合出一种额外的噪声。镜面分布不均匀时, $f(x, y, X, Y)$ 是一个与入射光入射位置有关的函数, 这导致光束在入射点附近的抖动噪声也会通过镜面分布不均耦合进误差信号中。对于原有的 $P'_{\text{yaw}}(X, Y)$, 若产生光束位置的抖动 $P'_{\text{yaw}}(X + \delta X, Y + \delta Y)$, 将其进行泰勒展开, 用式子可以表示为:

$$P'_{\text{yaw}}(X + \delta X, Y + \delta Y) = P'_{\text{yaw}}(X, Y) + \delta X \frac{\partial P'_{\text{yaw}}}{\partial X} + \delta Y \frac{\partial P'_{\text{yaw}}}{\partial Y} + O(\delta X^2) + O(\delta Y^2) + O(\delta X \delta Y) \quad (5)$$

可以发现, 第 1 项为光束中心在 (X, Y) 位置时 WFS 信号的固定偏移量, 不随 $\delta X, \delta Y$ 变化。第 2、3 项为由于光束抖动造成的 WFS 信号抖动。第 4、5、6 项作为二阶小项忽略。从第 2、3 项中可以看出, 由于镜面分布不均, 光束抖动将在 WFS 信号中耦合出额外的噪声, 从而产生虚假的反馈信号。

2.4 加权 QPD 信号读出理论^[11]

在 QPD 中, 将式(4)拆分为四个象限的积分, 并对每一象限的积分项添加系数, 可得加权读出

$$\begin{aligned} P_{\text{yaw}}^{\text{weighted}}(X, Y) = & a_1 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(x, y, X, Y) |U_{00}|^2 dx dy \\ & + a_2 \int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} f(x, y, X, Y) |U_{00}|^2 dx dy \\ & - a_3 \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^0 f(x, y, X, Y) |U_{00}|^2 dx dy \\ & - a_4 \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 f(x, y, X, Y) |U_{00}|^2 dx dy \end{aligned} \quad (6)$$

通过适当选取系数, 可以将由于表面分布不均匀导致的工作点偏移现象 (即 P_{yaw} 与 P'_{yaw} 之间的偏差) 进行抑制, 也可以将光束抖动与测试质量不均匀性的耦合 [式 (5) 中第 2、3 项]

进行抑制,从而达到减弱整体噪声的目的。在光学干涉腔建模与场传播计算的仿真工具 FINESSE^①模拟过程中,用于决定该系数的目标函数可以表示为

$$C_k(\mathbf{a}) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{\tilde{h}^2(\omega)}{S_x(\omega; \mathbf{a})} d\omega \quad (7)$$

其中 $\tilde{h}(\omega)$ 为关注信号的频域模板, $S_x(\omega; \mathbf{a})$ 为与加权系数向量 $\mathbf{a}$ 相关的噪声谱密度,具体可以表示为

$$S_x(\omega; \mathbf{a}) = (\Delta x_k)^2 \cdot \int_0^\infty \left(\left\langle \theta_k^{(\text{shot})}(t) \theta_k^{(\text{shot})}(t+\tau) \right\rangle + \left\langle \theta_k^{(\text{jitter})}(t) \theta_k^{(\text{jitter})}(t+\tau) \right\rangle \right) e^{i\omega\tau} d\tau \quad (8)$$

其中 Δx_k 为该自由度对应的静态偏置量,通常视为常数。 $\theta_k^{(\text{shot})}$ 与 $\theta_k^{(\text{jitter})}$ 分别表示由散粒噪声与光束抖动引起的读出偏置波动形成的角度噪声。 $\theta_k^{(\text{shot})}$ 的大小与加权系数绝对值之和成正比, $\theta_k^{(\text{jitter})}$ 由给定的光束抖动噪声谱与加权系数决定。两者近似不相关,因此功率谱视为可叠加。权重优化时施加的限制条件包括: (i) 信号守恒 $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 4$, 以保持对准读出增益与未加权情形一致; (ii) 解耦条件 $a_1 - a_2 - a_3 + a_4 = 0$, 避免加权后把正交自由度 (pitch / yaw) 混入读出; (iii) 为抑制加权导致的散粒噪声抬升,要求各权重的绝对值之和不能偏离 4 过大,用于限制总散粒噪声增益不超过预设阈值。

3 实验流程与结果

3.1 实验设计

如图3所示,为验证加权 QPD 信号读出方法的模拟过程,本文设计了相应的实验设置,用于对该模拟流程进行实验验证。

本实验选用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 连续激光器作为主光源。激光首先通过透镜 F1 进行光束整形,使光腰尺寸给定。随后,激光依次通过两片半波片 (HWP) 和偏振分束器 (PBS),用于调节入射进电光调制器 (Electro-Optic Modulator, EOM) 以及腔内的偏振态与光强。激光再经过 EOM 施加射频调制,为后续 PDH 锁定和波前传感信号的产生提供调制边带,调制频率为 20 MHz。由于该实验使用的是光纤激光器,法拉第隔离器串联在光纤输入口。

为模拟腔镜空间非理想性 (如实际 KAGRA 测试镜中的非均匀双折射或表面波前畸变),实验光路中引入可替换的相位板,用于提供不同的非均匀表面,实现不同类型与幅度的非均匀扰动,以此验证加权 QPD 信号读出理论及其对不同表面的适应性。为使光斑与相位板充分接触,使用凹透镜 F2 和凸透镜 F3。其中凹透镜 F2 用于放大光斑大小,使 F2 与 F3 之间的光斑较大,从而充分发挥相位板的扭曲作用。F2、F3 共同完成入射光与 FP 腔的模式匹配。

FP 腔采用凹面-凹面设计,两面镜子均具有高反射率,曲率均为 100 mm,腔长为 160 mm。其中入射镜的镜面上连接了两个横向排列的促动器,用于改变入射镜 yaw 方向的倾斜。

^①<https://finesse.ifosim.org/>

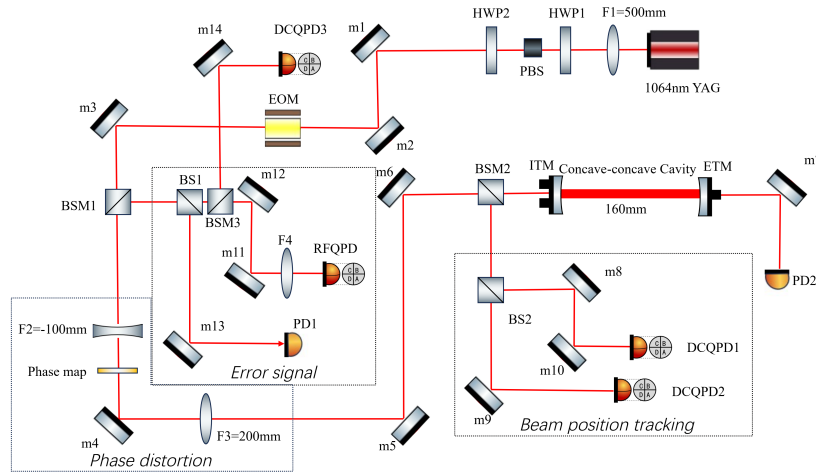


图3 实验设计示意图。BS: 分束器, PBS: 偏振分束器, EOM: 电光调制器, PD: 光电探测器, PZT: 压电促动器, RFQPD: 射频四象限光电探测器, DCQPD: 直流四象限光电探测器, BSM: 分光取样镜, HWP: 半波片。

反射镜上连接了一个环状的促动器, 用于在透射光穿过的同时控制腔长。两面镜子与促动器共同组成可实现锁腔并微小改变倾斜的 FP 腔。从加权 QPD 信号读出理论而言, 四个自由度(偏航 HARD、偏航 SOFT、俯仰 HARD、俯仰 SOFT)在实验验证角度来说说是等效的, 故本文将着重研究其中一个自由度, 并选取偏航 HARD 作为验证对象。由于系统对称性与线性读出特性, 其结论可推广到其他角度自由度。

该光路中有三种检测单元。光电探测器 PD1 与 PD2 为光功率探测器, 分别用于监测 FP 腔内由前镜反射的反射光与由后镜透过的透射光。在经过 EOM 的调制后, 反射光将与边带产生拍频信号, 是锁腔的关键信号。射频调制四象限光电探测器 RFQPD 与直流四象限光电探测器 DCQPD1、DCQPD2、DCQPD3 为分割型光电探测器。RFQPD 主要用于射频调制信号的接收, 四个象限的信号可单独输出, 主要用于探测腔中倾斜造成的波前信号变化。

对于腔长为 160 mm、ITM 与 ETM 曲率半径均为 100 mm 的双凹镜 FP 腔, 由稳定性判据 $0 < g_1 g_2 < 1$ 可知该腔为稳定腔, 腔内基态本征模 (TEM_{00}) 的光腰半径为 $w_0 = 116.3 \mu\text{m}$ 。实验中通过调节凹透镜 F2 与凸透镜 F3 的相对位置实现模式匹配, 使入射光尽可能与腔内本征基模相匹配。由于需要让激光在相位片处充分取样其空间非均匀性, 模式匹配设计还需兼顾在凹透镜与凸透镜之间获得较大的光斑半径这一要求。基于上述考虑, 本文采用 JamMt 软件^①中的 mode matching assistant 工具进行模式匹配计算。激光经 F1 整形后的光腰半径为 $174.7 \mu\text{m}$, 以该光腰位置为参考并完成模式匹配后, 凹透镜 F2、凸透镜 F3、入射镜 ITM 以及腔内光腰位置相对于该光腰位置的距离分别为 0.396 m、0.597 m、1.225 m 和 1.306 m。

根据以上设置搭建主光路。由于 EOM 等元件的工作需要, 整体实验在 s 偏振光中进行。

^①<https://www.sr.bham.ac.uk/dokuwiki/doku.php?id=geosim:jammt>

同时,为使 EOM 工作在理想状态, EOM 被安装在入射光的光腰位置。在凹透镜 F2 与凸透镜 F3 之间安装相位片。本实验中,相位片为被施加瑕疵(划痕等)的光学窗口片,通过施加瑕疵模拟实际引力波探测器 ITM 的表面扭曲。相位片放置于可沿 x 方向横向移动的平台,平台可控制并读出位移量,用于模拟光束抖动导致的入射光在不均匀介质上入射位置的变化。

3.2 实验平台的调试

在本次实验设置背景下,相位片与入射镜 ITM 共同构成模拟含有扭曲部分的入射镜,故实验需要从相位片后提取 FP 腔的反射光,用于提取 PDH 锁腔信号与 WFS 信号。利用分光取样镜 BSM1 对从 FP 腔并经相位片反射出的光束进行取样,再利用分束镜 BS1 将取样光二等分。其中一部分入射至光电探测器 PD1,用于获得 PDH 锁腔信号;另一部分入射至射频四象限光电探测器 RFQPD,用于读取 WFS 信号。对于 FP 腔在 ETM 处的透射光,采用光电探测器 PD2 进行检测。

如图4(a)(b)所示,利用 EOM 对激光施加边带调制(20 MHz),同时对连接在 ETM 上的促动器施加低频(20 Hz)三角波电压,使腔长在一定长度范围内随时间 t 周期性变化,并对 FP 腔的反射光在 PD 上的电压读数进行监测,将电压画在同一幅图中。

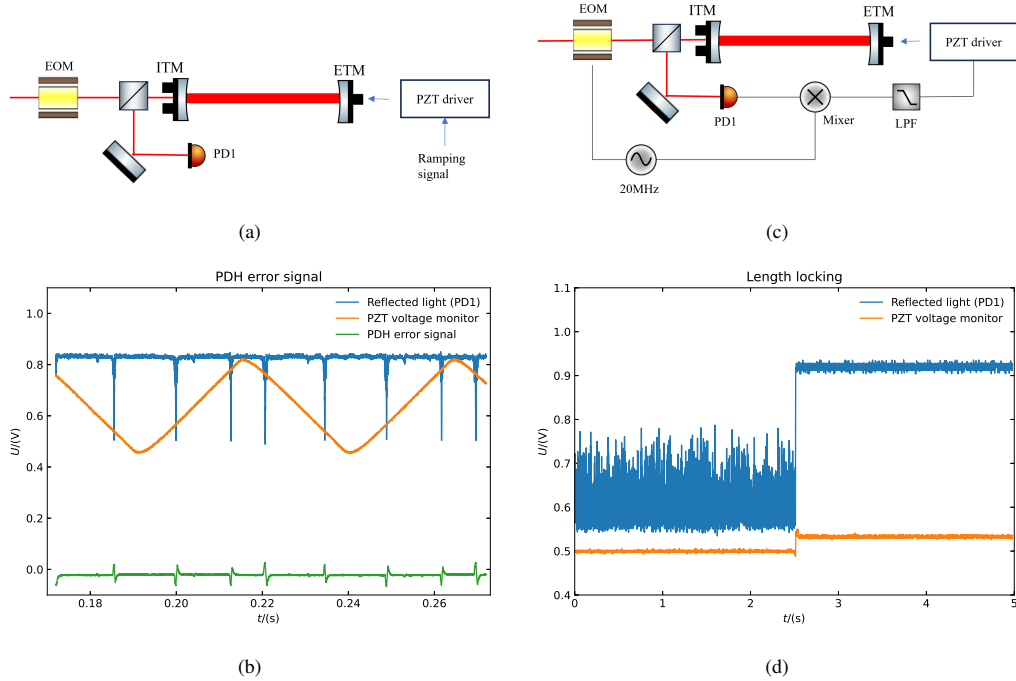


图4 PDH锁腔调试过程。(a)对ETM促动器施加周期性三角波进行腔长扫描的示意图。(b)腔长扫描过程中PD1读出的反射光强信号及其解调得到的PDH误差信号。(c)PDH锁腔示意图。(d)PDH反馈回路闭合与断开时系统响应。

可以看出,在共振状态下反射光达到最小值,符合FP腔的基本性质。利用腔的品质因素 F 的计算公式,即自由光谱范围 FSR(Free Spectral Range, FSR)与半高宽 FWHM(Full Width

at Half Maximum, FWHM) 的比值计算其 F 。在三角波电压的一个上升 (或下降) 周期中选取两个相邻的峰并进行拟合, 计算得到腔的品质因素为 90.9。选用的镜子中, ITM 的反射率为 95%, ETM 的反射率为 99%, 其品质因素理论值为 102.4。测得的品质因素由于损耗原因与理论值有所偏差, 但仍然较为接近。在三角波电压作用下, 对 PD1 信号与 20 MHz 信号进行混频与解调, 得到用于腔长控制的误差信号。

关闭三角波信号后, 仍利用 EOM 对激光进行边带调制 (20 MHz), 对 PD1 信号进行调制解调, 并将误差信号反馈至 ETM 促动器, 实现利用 PDH 信号锁腔。锁腔示意图和信号如图 4(c)(d) 所示。在图 4(d) 的前一部分, 腔处于锁定状态, 反射光强度 (PD1) 处于最低点; 在切断促动器反馈电压后, 腔锁定解除, 反射光回到原先水平, 说明该系统利用 PDH 锁腔方法得到了反馈控制。

本实验的波前信号读出示意图如图 5 所示。图 5(a) 中, RFQPD 用于获取调制解调后的角度敏感 WFS 信号, DCQPD3 作为低频光斑位置监视器, 用于跟踪反射光束的漂移。RFQPD 的四象限射频输出被分别独立进行调制解调, 最终得到四路解调后的信号, 简易标记为 A、B、C、D。在本实验中, 对四路通道进行求和与差分, 生成最终的 yaw 读出 $(A+B)-(C+D)$ 作为主要的对准敏感信号, 供后续数据分析使用。

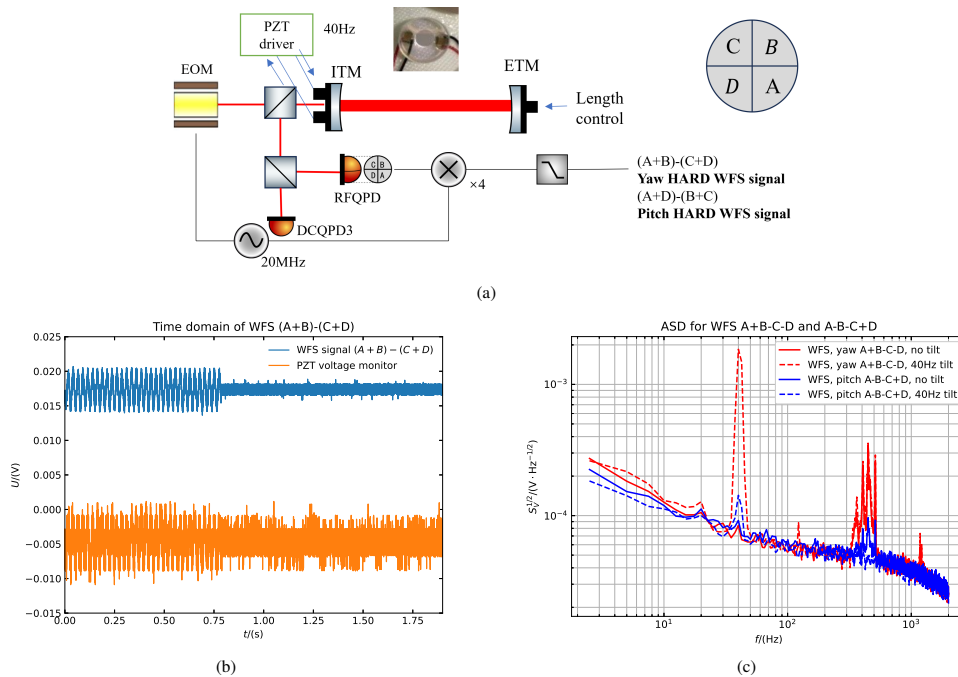


图 5 (a)WFS 信号读出示意图。(b) 在时域中对 ITM 施加 40Hz 倾斜激励时的 WFS 读出信号。(c) 对应的频域结果 (幅度谱), 用于表征 40Hz 处的响应峰。

为避开低频的信号慢漂移、百 Hz 左右的系统机械共振频率段以及促动器响应较差的 kHz 以上频率段, 选择对连接在 ITM 上的两个用于施加 yaw 偏移的促动器施加反相的 40 Hz 促动

电压, 并进行时域与频域观测, 相应时序信号与谱数据分别由示波器与 FFT 分析仪完成采集与记录, 如图5(b)(c)所示。可以看出, 当对 ITM 促动器施加 40 Hz 反相促动电压时, 时域 WFS 信号出现与 40 Hz 同频的明显波形, 当促动信号消失时该波形随之消失。该现象在频域中亦有反映, 40 Hz 处的峰值仅在施加促动电压时显现。同时, 由于该组促动器主要提供 ITM 在 yaw 方向的倾斜, 频谱中 pitch 方向的 WFS 信号峰 (定义为 $(A + D) - (B + C)$) 明显小于 yaw 方向, 说明该系统可以进行正常的 WFS 信号读出。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 工作点偏移

为理解并预测空间相位畸变导致的 WFS 工作点漂移, 首先基于光学干涉腔建模与场传播计算的仿真工具 FINESSE 建立数值模型开展仿真研究, 设置示意图与仿真结果如图6所示。如图6(a), 仿真模型为单一 FP 腔, 腔内光学元件取熔融石英材料, 并在 FINESSE 中采用熔融石英的折射率参数。相位畸变通过在入射镜 (ITM) 上施加空间厚度分布 $\Delta t(x, y)$ 引入, 使其在透射场上等效为一张相位图 $\phi(x, y) \propto (n - 1)\Delta t(x, y)$, 其中 n 为熔融石英的折射率。通过生成随机厚度图, FINESSE 可模拟畸变的波前条件。随后在锁腔条件保持一致的前提下, 对比两种情况: (i) 无相位畸变 (flat map) 的“干净”腔; (ii) 施加随机相位畸变 (random map) 的腔。对两种情况, 均对 ITM 施加可控的倾斜激励, 并使用 FINESSE 的 qpd 元件读取基于四象限探测器的 WFS 输出, 该读出与实验中 RFQPD 的 WFS 读出概念一致。

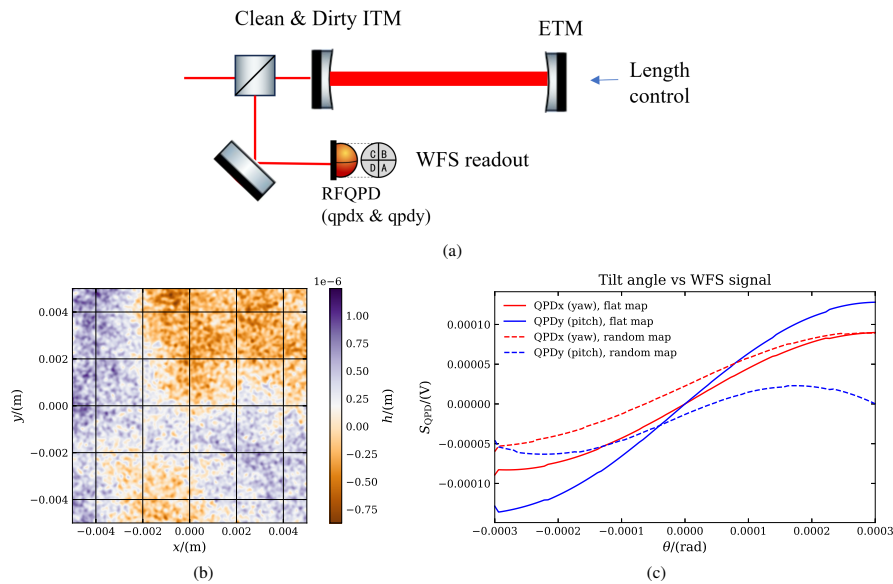


图6 基于 FINESSE 3 的非均匀性引起的 WFS 信号偏置与幅值变化模拟结果。(a) 仿真设置示意图。(b) 施加在 ITM 上的随机表面相位图。(c) 扫描 ITM 的 yaw 倾角得到的 WFS 读出, 展示其随倾角变化的偏置与响应幅值变化。

图6(b) 为通过随机厚度分布 h 施加的随机相位分布。图6(c) 中, 横轴表示 ITM 的倾斜角,

纵轴表示 qpd 元件的 WFS 信号读出。红线表示对 ITM 施加 yaw 方向倾斜时, 探测 yaw 方向 WFS 信号的 QPDx 元件读出; 蓝线表示对 ITM 施加 pitch 方向倾斜时, 探测 pitch 方向 WFS 信号的 QPDy 元件读出。实线表示无相位畸变情况下的信号, 虚线表示某随机相位畸变下的信号。对比表明: 当施加相同的物理倾角时, 随机相位畸变会以两种方式改变 WFS 读出。其一, WFS 信号的零倾角工作点会偏离理想的零交叉点, 即在 0° 倾角时原本应该为 0 的 WFS 读出变为非零; 将该非零偏置定义为由相位畸变引起的 WFS 偏置 (工作点漂移)。其二, 相位畸变会改变 WFS 通道的响应增益, 具体表现为在相同倾角扫描幅度下 WFS 信号最大幅值发生变化, 或等效地表现为工作点附近误差信号局部斜率的变化。

我们希望在当前实验设置下也能观测到上述现象。基于模拟分析与目前实验设置, 进行如图7所示实验。

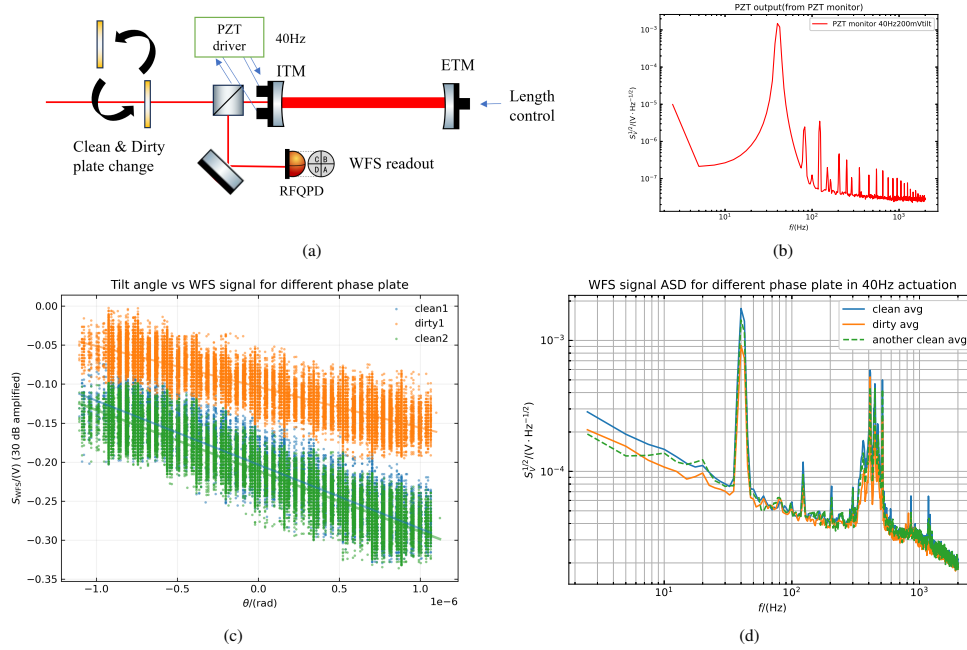


图7 更换相位片引起的 WFS 信号偏置与幅值变化的实验验证。(a) 实验设置示意图。(b) 施加到 PZT 致动器的驱动信号幅度谱密度 (ASD)。(c) 不同相位片条件下 ITM 倾角 θ 与 WFS 读出的关系: 干净相位片 (clean1, 蓝), 畸变相位片 (dirty1, 橙), 再次换回干净相位片 (clean2, 绿)。(d) 在 40 Hz、幅值约为 10^{-6} rad 的 ITM 倾斜调制下, WFS 读出信号的幅度谱密度 (ASD)。

如图7(a), 在横向可移动平台上安装干净的相位片, 并调整 FP 腔与入射光使二者对准, 此时记录 DCQPD1、DCQPD2 的读数并锁腔。对 ITM 上两个促动器施加如图7(b) 所示幅度谱的 40 Hz 反相正弦电压, 使 ITM 在 yaw 方向产生周期性倾斜, 并读取此时 RFQPD 四个输出口在 EOM 调制频率 (20 MHz) 下的解调信号。此时, 四个输出口的信号强度即为 20 MHz 解调下 RFQPD 四个象限信号分布的积分结果。对四个象限信号按式(4)的读出方式进行计算, 得到波前信号在周期性倾斜下的变化。随后将干净相位片替换为带有一定瑕疵的相位片, 利用

两路 DCQPD 的读数重新校准入射光路并进行锁腔, 对 ITM 上的 PZT 施加与干净相位片测量过程相同的周期电压, 读取 RFQPD 四个输出口解调后的信号并进行同样计算。比较相同周期电压下波前信号的响应差异, 结果如图7(c)(d) 所示。

如图7(c), 横轴为 ITM 倾角 θ , 纵轴为 WFS 信号读出 S_{WFS} 。图中三组数据分别对应干净相位片 clean1(蓝色)、畸变相位片 dirty1(橙色) 与再次换回干净相位片 clean2(绿色)。可以看到, 畸变相位片相对干净相位片出现整体平移: 在相同 θ 下, WFS 输出带有额外偏置。与此同时, clean2 与 clean1 基本重合, 说明该偏移具有与相位片状态对应的可重复性, 而非单纯的时间漂移。该现象对应模拟中的信号偏置现象。

如图7(d), 进一步利用幅度谱密度分析 WFS 信号在不同相位片条件下的增益变化。以 40 Hz 正弦信号驱动 ITM 上的两个 PZT, 对 yaw 角度施加确定幅度的调制, 随后分别在“干净相位片”和“畸变相位片”条件下读取 WFS 输出的幅度谱密度 $S_V^{1/2}$, 并比较谱中 40 Hz 线谱峰值的大小。三条曲线分别为干净相位片(clean, 蓝色)、畸变相位片(dirty, 橙色) 与另一块干净相位片(another clean, 绿色虚线) 条件下 yaw 自由度 WFS 信号多次测量下的 ASD。可以发现, 干净相位片条件下(蓝色、绿色虚线)40 Hz 处峰值与畸变相位片条件下(橙色) 的峰值明显不同, 说明相位畸变不仅会产生 WFS 信号的工作点整体偏移, 还会改变相同倾斜下 WFS 信号的响应, 具体表现为 40 Hz 峰值的变化。

3.3.2 噪声与系统分析

为识别本实验 WFS 信号读出链路中的主要噪声来源, 并判断其对 ITM 倾斜角度测量的限制因素, 我们对系统中若干可能相关的噪声通道进行了频域测量, 并将其统一标定到 ITM 倾斜角幅度密度 ($\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) 上, 形成如图8所示的角度灵敏度 / 噪声预算图。通过测量各探测器输出信号 V 与 ITM 倾斜角 θ 之间的传递函数 $H_{\theta \leftarrow V}(f)$, 并将该通道的幅度谱密度 $S_V^{1/2}(f)$ 映射为等效角噪声 $S_\theta^{1/2}(f)$,

$$S_\theta^{1/2}(f) = |H_{\theta \leftarrow V}(f)| S_V^{1/2}(f), \quad (9)$$

从而在同一坐标系下直接比较各噪声源对角度读出的贡献大小。

如图8所示, 图中包含 7 条曲线, 对应 7 种不同的等效角噪声或参考读出: (1) 蓝色虚线 length error signal: 用于长度控制的误差信号; (2) 橙色虚线 Yaw beam jitter: 由 DCQPD3 监测的 FP 腔反射光在 yaw 方向的光斑位置抖动; (3) 绿色虚线 WFS yaw, dark: 在无入射光条件下, RFQPD 按照本实验解调与信号组合链路得到的 WFS yaw 读出(暗噪声); (4) 红色虚线 WFS yaw light: 有入射光但不施加人为倾斜时, RFQPD 读出的 WFS yaw 输出, 即反映系统本底抖动与读出噪声叠加的总频谱; (5) 紫色实线 WFS yaw tilt: 对 ITM 施加已知的 yaw 正弦调制(约 10^{-6} rad, 40 Hz) 后, RFQPD 的 WFS yaw 读出折算结果; (6) 棕色实线 DCQPD3X tiltX: 在与(5) 相同的 40 Hz 倾斜注入条件下, DCQPD3 对反射光 yaw 方向抖动的读出折算结果; (7) 黑色虚线 total sensitivity: 该系统的总噪声谱。该图横轴为频率(Hz), 纵轴为折算后的 ITM 倾斜角 ASD($\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$), 便于在不同频段比较各通道的噪声水平与线谱特征。其中(5)(6) 用于展示 40 Hz 注入响应, 不作为噪声曲线解读。

分析图像可以看出: (1) 图中蓝线显示长度控制误差信号可映射为一定的等效角噪声, 说

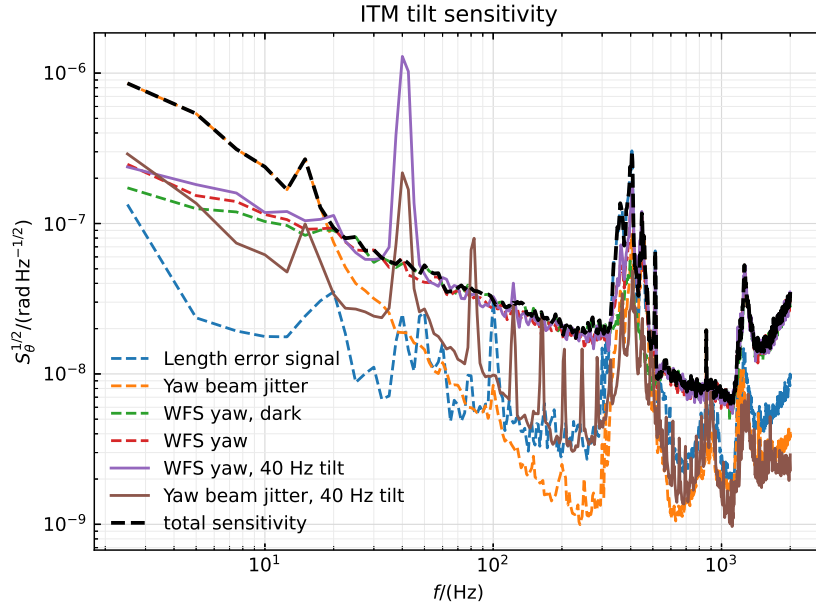


图 8 系统角度灵敏度曲线。

明系统中确实存在长度—角度耦合路径。但蓝线在大多数频段低于 WFS 与注入响应对应的灵敏度水平,表明该耦合对当前角度读出的限制较弱。(2)WFS yaw 读出的暗噪声与含光条件下的读出频谱在大部分频段接近,说明在当前光功率与解调设置下, WFS 读出主要受解调链路噪声限制, ITM 本体微小抖动在该带宽内未能显著体现,角度信号难以从噪声中分辨。(3)施加约 10^{-6} rad 的 40 Hz yaw 倾斜后,紫线与棕线均出现清晰线谱,证明该量级倾斜可被系统检测。同时,紫线在 40 Hz 处的等效倾角幅值显著高于棕线,表明在当前读出配置下 RFQPD 的 yaw 通道对 ITM 倾斜具有更高的等效传感增益。这提示该系统的 WFS 读出不完全等同于反射光斑在 DCQPD3 上的几何抖动, WFS 的信噪比较高。(4)多条曲线在低频端呈上升趋势,反映出可能的环境扰动导致的低频噪声,这会在时域表现为 WFS 输出在一定范围内上下浮动。与图7(c)进行比较可以看出, WFS 信号在 y 轴上的不稳定浮动是低频噪声的体现。(5)在约 300–600 Hz 区间, WFS、DCQPD3 以及部分 length 通道同时出现一簇谱峰。该特征大致符合 ITM 及支撑结构的机械共振被激励后的表现。

3.3.3 加权 QPD 读出方法的实验验证讨论

在已有的数值模拟中 [11, 16], 不均匀测试质量上不同入射点对应的 WFS 信号通常通过在 FINESSE 中引入实际测试质量的空间非均匀性分布生成。具体而言,数值模拟基于 KAGRA 镜面双折射的非均匀性,将输入镜测得的双折射分布作为镜面畸变函数写入模型。由第 2 节的讨论可知,此时 WFS 信号读出依赖于光束在镜面上的入射位置 (X, Y) ,随后通过在 X 与 Y 方向移动镜子改变光在测试质量入射点,在镜面上对入射点进行 15×15 的二维扫描。对每一

个 (X, Y) 位置, 计算四象限探测器解调后的输出, 从而得到由入射点到 WFS 解调信号构成的空间映射。由于该位置相关的 WFS 偏置会在光束抖动下转化为附加控制噪声, 模拟中进一步将上述位置映射与 KAGRA 中实测的光束抖动频谱 (beam-jitter spectrum) 结合, 构造预测的抖动耦合噪声, 并利用第 2.4 节中描述的方法确定加权系数。

可见, 模拟中不同入射点的 WFS 信号本质上是通过对非均匀镜面上的入射点位置进行系统扫描得到的。对数值模拟方案进行等效简化, 实验保留“先测得 WFS 对入射位置的依赖, 再据此确定最优权重”的核心思路开展实验设计。在本实验中, 相位片可沿 x 方向移动, 可实现与模拟过程中测试质量平移相对应的入射点变化, 并据此将二维扫描等效简化为单自由度实验。本次实验在相位片 x 方向 2 mm 范围内选取 11 个位置点, 并参照数值模拟中的方法采集 WFS 样本。模拟方法与实验方法采集 WFS 样本的示意图如图9所示。

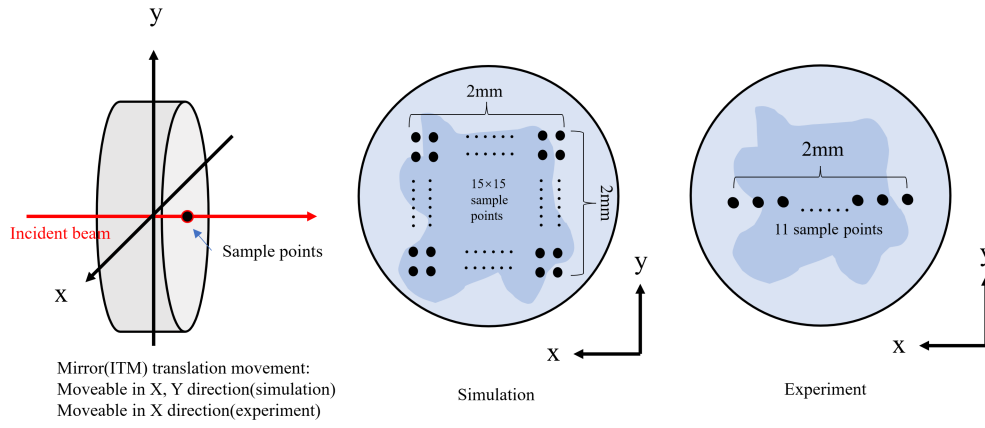


图9 数值模拟与实验中采集 WFS 样本的示意图。数值模拟中通过非均匀镜面上扫描入射点位置 (X, Y) 得到 WFS 信号的空间映射; 实验中通过在相位片上沿 x 方向移动实现入射点变化, 采集 WFS 信号随相位片位置变化的样本。

在每一个位置处, 保持腔处于锁定状态, 分别采集 RFQPD 四个象限经独立解调后的四路信号 A, B, C, D , 并记录一段时间序列。随后对各通道时间序列求均值, 得到该位置对应的四象限样本 A_i, B_i, C_i, D_i , 再按常规四象限组合构造 WFS 样本

$$S_{i0} = (A_i + B_i) - (C_i + D_i) \quad (10)$$

从而得到一组随相位片位置变化的 WFS 读出。

在此基础上, 为对应加权 QPD 方法的核心思想, 对四象限数据添加权重, 构造加权后的 WFS 读出

$$S_{iw} = a_1 A_i + a_2 B_i - a_3 C_i - a_4 D_i \quad (11)$$

为确定权重系数, 本文采用位置样本离散度最小化作为评价函数, 即

$$J(a_1, a_2, a_3, a_4) = \text{std}(S_{1w}, S_{2w}, \dots, S_{11w}) \quad (12)$$

其中 std 表示 11 个离散位置样本均值之间的标准差。通过最小化 J , 可得到使 WFS 读出对相位片位置变化最不敏感的一组权重。由于对于同一个相位片位置, 普通 QPD 与加权 QPD 的结果均来自于相同的四通道原始测量, 因此可在相同畸变条件下直接比较两种读出方式对入射点变化的响应差异。实验中对干净相位片与畸变相位片, 每片均选取 11 个离散位置点并依次重复上述过程, 最终得到干净相位片、畸变相位片以及加权后的畸变相位片三组随位置变化的 WFS 样本序列, 如图10所示。相关标准差如表1所示。

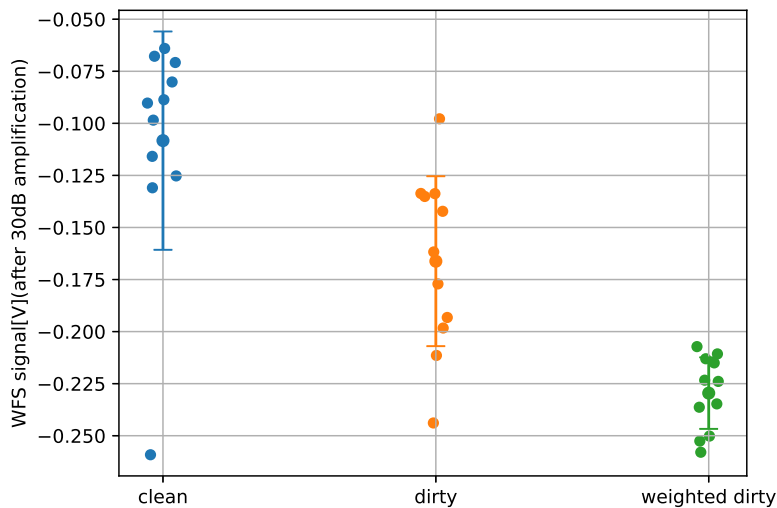


图 10 干净相位片、畸变相位片以及加权后的畸变相位片三组随位置变化的 WFS 样本分布。

表 1 不同条件下 WFS 信号标准差的定义与数值

符号	含义	数值
σ_c	干净相位片 11 组 WFS 信号的标准差 (clean)	0.0524
σ_d	畸变相位片 11 组 WFS 信号的标准差 (dirty)	0.0408
σ_{wd}	加权后畸变相位片 11 组 WFS 信号的标准差 (weighted dirty)	0.0172
σ_{bg}	图 7(c) 中 $(-1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-7})$ rad 范围内 WFS 信号的标准差	0.0214

对加权 QPD 方法的实验结果进行分析可见, 在畸变相位片条件下, 11 组不同位置对应的 WFS 信号标准差由未加权时的 0.0408 降低到加权后的 0.0172。这表明, 按照本文所采用的评价函数, 加权后由位置变化引入的附加 WFS 波动在当前实验数据中得到了明显压低, 从这一角度上说, 加权方法能够减小 WFS 读出对相位片位置变化的敏感性。

然而, 上述结果仍需谨慎对待。理论上, 对于均匀测试质量, WFS 信号不应耦合光束抖动, 因此本实验中干净相位片对应的 11 组 WFS 信号标准差应显著小于畸变相位片。但本实验中干净相位片与畸变相位片对应的标准差分别为 0.0524 和 0.0408, 二者不仅未明显拉开差距, 且前者略大于后者, 这表明当前 11 组位置样本中所反映的位置相关变化数据可信度不

高。进一步地,在利用相同读出系统测得的图 7(c) 中 $-1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-7}$ rad 角度范围内提取干净相位片对应的 WFS 信号,将其作为 WFS 信号在一定角度下随时间变化的样本,其标准差为 0.0214,与图 10 中位置扫描数据的波动水平属于同一数量级,且波动范围的大小基本相同(约 0.1 V)。这说明,同一套读出系统中的时间漂移与背景起伏尚未与随位置变化的真实 WFS 响应充分区分开来。因此,虽然加权后的标准差已降低,但现阶段仍难以据此直接认定实验中已经清晰观测并定量验证了光束抖动耦合噪声的抑制。

此外还可以看到,加权后的畸变相位片 WFS 信号整体偏置并未明显向干净相位片结果靠近。这说明本文当前用于求取权重系数的理论假设与评价函数更侧重于减小不同位置样本之间的离散度,而未能同时保证加权后信号在工作点偏置意义上逼近理想均匀情形。后续仍需结合更合理的目标函数,对权重求解方法作进一步改进。

4 小结与后续研究优化

本文围绕引力波探测器中测试质量非均匀性导致的波前传感信号工作点偏移及光束抖动噪声影响,开展了理论分析与实验验证研究。针对实际探测器中镜面非均匀性引入的高阶模耦合及虚假倾斜信号问题,本文在理论上概述其对波前传感(WFS)读出的作用机理,并引入加权 QPD 信号读出方法以抑制该类噪声。在实验设计中,通过在 FP 腔光路中引入可替换相位片模拟测试镜的空间畸变特性,并采用射频调制四象限光电探测器结合加权系数优化的方法,完成了该抑噪方案在非均匀镜面条件下的实验搭建、流程规划及初步测量。实验方案兼顾锁腔、模式匹配、光束位置监控及相位片扰动引入等环节,并利用该实验设置观测到由测试质量非均匀性导致的工作点偏移现象,同时对该实验设置进行了噪声分析与初期评估。

后续工作将以提升实验设置稳定度为核心对系统进行改进。一方面,计划将 DCQPD1/2/3 由监控单元升级为控制回路,建立入射与反射光束的居中反馈控制,以抑制相位片更换与 ITM 运动引起的光束指向性假信号;另一方面,将改进相位畸变载入方式,采用相位图已知、可重复且可调制的方案,避免自制随机划痕相位片带来的额外散射与损耗,可选方案包括定制厚度分布光学器件或可编程相位调制器等。在此基础上,将结合数值模拟步骤及其实验简化方案,进一步评估加权系数在不同畸变模式下对四象限光电探测器波前信号读出的优化效果,为加权 QPD 信号读出技术在现有及下一代引力波探测器中的工程化应用提供实测依据与参数参考。

致谢

本工作得到国家自然科学基金(12433001, 12021003)与先端国际共同研究推进事业项目(JST ASPIRE Grant Number JPMJAP2320)的资助。

参考文献:

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Phys Rev Lett, 2016, 116: 061102
- [2] Acernese F, Agathos M, Agatsuma K, et al. Classical and Quantum Gravity, 2014, 32: 024001
- [3] Akutsu T, Ando M, Arai K, et al. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2020, 2021: 05A101
- [4] Liu Y T, Thorne K S. Physical Review D, 2000, 62: 122002
- [5] Somiya K, Hirose E, Michimura Y. Physical Review D, 2019, 100: 082005
- [6] Hirose E, Bajuk D, Billingsley G, et al. Physical Review D, 2014, 89: 062003
- [7] Winkler W, Rüdiger A, Schilling R, et al. Optics Communications, 1994, 112: 245
- [8] Michimura Y, Wang H, Salces-Carcoba F, et al. Physical Review D, 2024, 109: 022009
- [9] Eisenmann M, Singh S, Leonardi M. Optics Letters, 2024, 49: 3404
- [10] Wang H, Aso Y, Leonardi M, et al. Physical Review D, 2024, 110: 082007
- [11] Haba D, Takeshita K, Wan R, et al. Classical and Quantum Gravity, 2026, 43: 015017
- [12] Anderson D Z. Applied Optics, 1984, 23: 2944
- [13] Black E D. American Journal of Physics, 2001, 69: 79
- [14] Sidles J A, Sigg D. Physics Letters A, 2006, 354: 167
- [15] Morrison E, Meers B J, Robertson D I, et al. Applied Optics, 1994, 33: 5041
- [16] Haba D. Master's thesis, Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 2025: 55

Experimental Investigation of Operating-Point Offsets in the Angular Automatic Control System of Gravitational-Wave Detectors

WAN Ruizhe¹, DAIKI Haba², WANG Haoyu², KENTARO Somiya², ZHU Zonghong¹

(1. School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072;

2. Department of Physics, Institute of Science Tokyo, Tokyo 152-8550)

Abstract: Direct detection of gravitational waves has opened a new window for studying compact objects and testing general relativity. With the commissioning of multiple large-scale interferometric detectors, improving sensitivity has become a central objective. However, optical non-uniformities of the test masses can shift the operating point of wavefront-sensing signals used for Fabry–Perot cavity angular alignment, thereby enhancing noise coupling and degrading stability and sensitivity. To address this issue, a single Fabry–Perot cavity experimental system was developed based on the weighted readout theory of quadrant photodiodes. Using this system, the effectiveness of the non-uniformity compensation method was observed and verified experimentally, providing experimental support for its engineering application.

Key words: Gravitational waves; Instrumentation: interferometers; Instrumentation: detectors; Fabry–Perot cavity; Quadrant photodiode