倾斜-长度耦合计量：LISA任务

Frédéric Cleva[1a]、Jean-Pierre Coulon a、Marco Nardello a

[a]大学　蔚蓝海岸大学、蔚蓝海岸天文台、法国国家科学研究中心、ARTEMIS，法国尼斯 ce

摘要

本文介绍了一套用于测量 LISA任务光学平台中所谓倾斜-长度（TTL）耦合的装置。TTL是指任何光学装置的角抖动耦合到其输入与输出光瞳之间光程的现象。这可能会对激光测距实验造成不利影响，因此必须对其进行评估，以便进一步补偿。该装置由两束激光组成：其中一束具有角抖动，用以模拟从正在抖动的被测平台（BUT）观察到的输入光束；另一束则与被测平台的光轴对准，为抖动光束提供相位参考。在被测平台输出光瞳处探测两束光之间产生的相位变化，即可测得TTL耦合。“TTL探针”必须具有可忽略不计的残余TTL耦合，这意味着装置光瞳、光束以及角抖动对应枢轴点的居中位置均须达到微米级精度。该装置采用光学掩模，将装置的光学参考系与机械参考坐标系连接起来，并配备位置记忆装置和用于光束对准的伺服回路。我们表明，尽管该装置使用现成组件，且在标准实验室环境中运行，其稳定性、准确度和噪声本底仍符合LISA任务的TTL抑制技术指标。

关键词：LISA、倾斜-长度耦合、倾斜-活塞耦合、光学对准计量

1. 引言

地面引力波探测器首次探测到引力波（GW）[1]，为新的引力波天文学开启了道路。2024年初，Virgo 和 LIGO 地面探测器已常规探测到超过171个事件[2] [3]。在这一背景下，激光干涉空间天线任务（LISA）[4], 是一个空间干涉式引力波探测器项目，旨在探测较低频率范围内的引力波；由于与地球相关的限制因素，这一频段无法由地面探测器探测[2] [3]。LISA 是欧洲空间局与美国国家航空航天局合作开展的项目。该项目已于2024年1月获采纳，预计于2037年发射。

LISA 将通过测量自由下落检验质量（FFM）之间的距离变化来探测引力波（GW）；这些变化由引力波所具有的时空结构畸变引起。LISA 能够探测小于 10 $pm/\sqrt{Hz}$ 、频率范围为 [0.1 mHz – 1 Hz] 的光程（OPL）变化。各 FFM 相距 2.5 Mkm，并通过光学激光链路（波长为 1.064 um）相连。链路上累积的光学相位变化包含引力波特征，探测则通过对入射激光链路（即“Rx”光束）与连接到本地 FFM 的激光（即“LO”光束）进行干涉组合来实现。FFM 周围设有光学平台（LISA_OB），用于安装光电探测器，并集成管理光束组合的光学装置。LISA 面临的一项关键问题是：卫星残余运动会引起平台角抖动；当输出端与输入端平台的光瞳失准时，这种角抖动会耦合到纵向光程中。额外的光程会损害科学信号。这种有害效应称为倾斜—长度耦合（TTL），必须对其进行精确测量，才能予以补偿。我们开发了一套装置

[1] Frederic.cleva@oca.eu，电话：+33 (0)4 92 00 31 97[2] 0LISA 的频率范围为 0.1 mHz 至 1 Hz，Virgo/LIGO 的频率范围为 10 Hz 至 10 kHz[3] 地震噪声与热噪声、牛顿噪声.....

旨在测量符合 LISA 光学平台要求的 TTL耦合。本文介绍了这台称为 FOGOB 的演示装置的一些关键特性及其性能。

2. FOGOB概念

2.1. 工作原理

TTL耦合可以理解为一种杠杆效应，其单位为米/弧度，表示为 TTL $= \frac{\partial \delta_x}{\partial \theta} = \Delta$，其中 δx 是待测光学平台倾斜所引起的纵向光程变化，而“Δ”是入射Rx光束轴线相对于倾斜枢轴点的偏移量（图1）。FOGOB提供两束激光，用于模拟Rx光束和本地振荡光束。LO光束与LISA_OB的光轴对准，而Rx光束则模拟远距离入射光链路[4]。Rx光束与LO光束的轴线彼此重合，并在FOGOB出瞳中心锁相，从而确保该位置的TTL耦合为零。FOGOB出瞳与LISA_OB的光瞳共轭（见图2）。在此配置下，通过测量Rx光束在LISA_OB中传播过程中累积的相对于LO光束的相对相位变化，可推导出LISA_OB处的TTL耦合。测量在LISA_OB的光电探测器处进行。

2.2. 指标

FOGOB必须能够测量TTL耦合系数，准确度优于15 μm/radian，精密度优于1 μm/radian，测量时长为3 σ （在测量活动期间评估统计数据，时长为~ 30 分钟），并且在校准装置之前的整个运行期间（数天）均满足要求。

2.3. 描述

Rx光束具有频率为几十赫兹的正弦角抖动，相关“枢轴点”位于FOGOB瞳面中心（图2）。所有对中均以微米级精度实现，并可长期（数天）保持。我们采用外差探测方案，在Rx光束与LO光束之间引入1 MHz频移，最终在光电探测器上形成1 MHz拍频。在1 MHz解调后，我们根据关系式$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \times OPL$得到与光程相关的相位（λ = 1064 nm为激光波长）。相位在整个光瞳（FOGOB直径孔径为2.55 mm）上用四象限光电探测器测量。TTL是各象限检测到的相位变化之和，以光程米数表示，并用相应的“Rx”倾斜进行归一化（图3）。相邻象限对之间的相位差给出Rx光束与LO光束之间的夹角，即所谓的差分波前信号（DWS），包括水平方向和垂直方向（图4）。

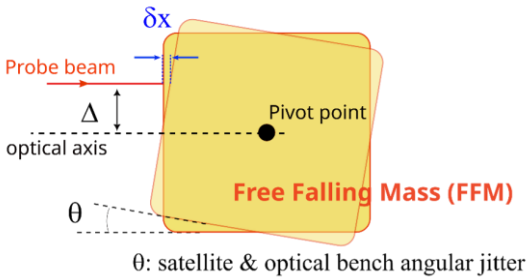


图1将TTL耦合示意为杠杆效应。该示意图采用卫星参考系，在此坐标系中，FFM表现为抖动。

[4] 在LISA_OB的参考坐标系中，Rx光束表现为角度抖动

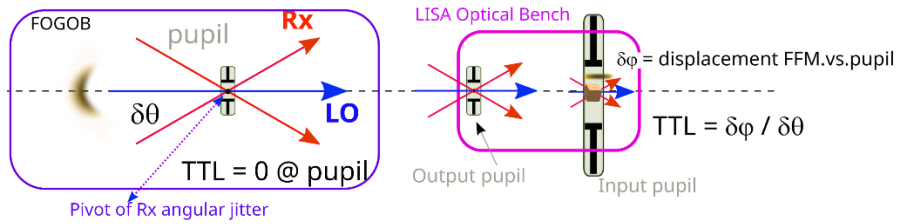


图2说明了FOGOB的原理。FOGOB瞳面与LISA_OB的输入与输出光瞳共轭。抖动的FFM设置在LISA_OB的输入光瞳处。由于LISA_OB输入和输出光瞳与FFM之间存在对准误差，因此产生TTL耦合。在此示意图中，我们未考虑将FOGOB瞳面共轭到LISA_OB光瞳上的光学元件，这些元件不属于本研究范围。

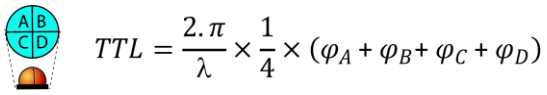


图3 使用4象限光电探测器（QPD）测得的TTL耦合系数

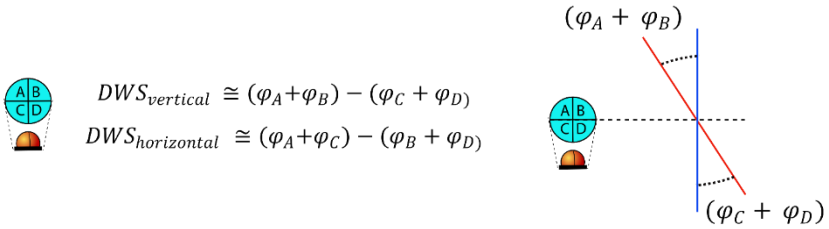


图4：差分波前信号（DWS）信号的定义。DWS表征Rx光束与LO光束沿垂直方向和水平方向的倾斜。右侧示意图展示了与垂直方向相关的DWS。

3. FOGOB集成

3.1. 总体策略

如图2所示，FOGOB装置需要具备3项关键特性：

- 接收光束和本地振荡光光束的轴线均以FOGOB瞳面为中心 • 接收光束的角抖动枢轴点位于FOGOB瞳面中心 • 接收光束与本地振荡光光束在FOGOB瞳面中心处锁相

我们采用了在汉诺威阿尔伯特·爱因斯坦研究所建立的一种策略 [5] [6]。该策略使用3个透射式光学掩模，在三步FOGOB集成过程中依次放置在同一位置。每个掩模都设计有特定图案，分别用于将光束轴线对准掩模中心、定义光瞳（尺寸[5] 及在掩模中心的位置），以及定义锁相区域（尺寸[6] 及在

[5] 2.55 mm 直径孔径[6] 150 微米直径孔径

掩模中心）。图5展示了这三个掩模。掩模还集成了四个 “基准标记”，用于将图案的参考坐标系与FOGOB的机械坐标系关联起来。这些基准标记可确保三个掩模的位置完全一致，从而使枢轴点、光束轴线和瞳孔图案集中在同一中心，最终定义FOGOB瞳面。

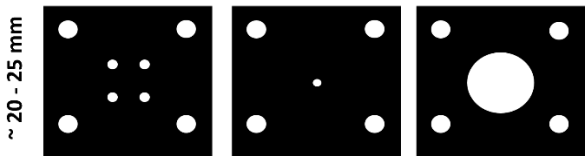
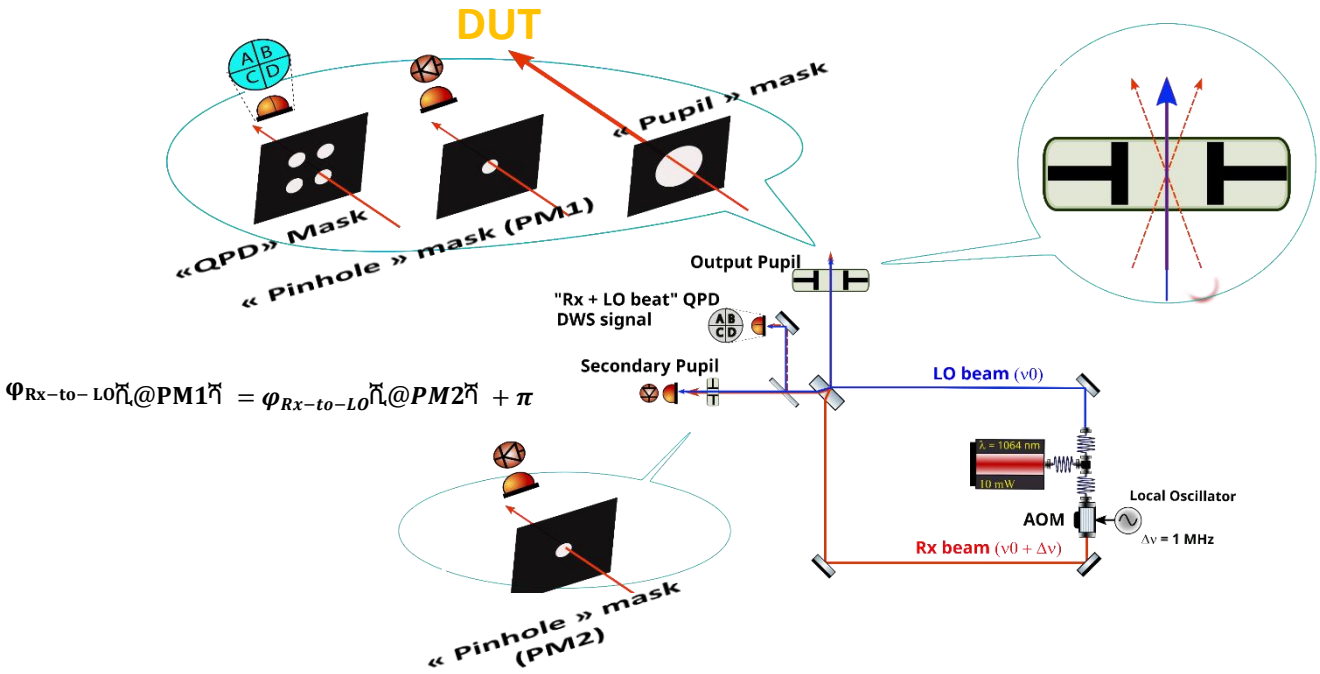


图5 掩模分类：“类QPD”掩模用于光束定心，“针孔”掩模用于锁相区域定义（直径150微米），“光瞳”掩模用于FOGOB瞳面定义（直径2.55 mm）。位于掩模四角的四个孔是基准标记，用于将图案参考坐标系传递至FOGOB参考坐标系



$$\varphi_{Rx-to-LO}(@PM1) = \varphi_{Rx-to-LO}(@PM2) + \pi$$

图6：基于掩模的FOGOB集成策略。“接收光束+本地振荡光拍频*QPD*”在拍频解调后提供DWS信号，解调采用1 MHz本地振荡器。为便于阅读，该操作未在图中示出。

总体策略如图6所示。

- 我们通过平衡四孔图案各孔的透射功率，将光束对准“QPD”掩模图案。由此确定FOGOB光学坐标系的图案中心。
- 我们用“针孔”掩模（“PM1”）替换“QPD”掩模。我们利用在针孔透射处探测到的 1 MHz 拍频所提取的误差信号，将接收光束与本地振荡光光束进行锁相。我们探测由一组孪生“针孔掩模 + 光电探测器”组件（PM2，位于次级瞳孔处，图6）产生的误差信号，该组件

与 PM1 相对于分束器共轭。这样的信号与前一个信号（@PM1）相差π。最后，我们将“孪生”误差信号馈入锁相环。• 我们将“针孔”掩模（PM1）替换为瞳孔掩模，为接收光束和本地振荡光通往 LISA_OB 留出通道。

最终得到的配置中，光束、枢轴点和光瞳均位于中心，且接收光束与LO光束彼此锁相[5]。

以下将介绍我们为管理掩模定位和控制光束对准而开发的装置，并展示 FOGOB 在残余TTL耦合方面的整体性能。

3.2. 掩模’对准

掩模为石英基底（28 x 28 x 1 mm），两面均镀有抗反射涂层，除定义所关注图案的区域外，整个表面均涂覆了黑色涂层[7]（图 7）。黑色涂层通过光刻沉积，确保图案设计的精密度优于 0.25 μm。我们测得整体图案中各图形的尺寸和间距偏差均小于 0.5 μm（符合我们所用坐标测量机的精密度）。

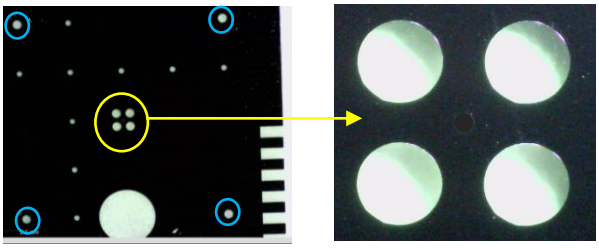


图7展示了一个用于光束对准的掩模示例。图案由未镀膜区域构成。黄色圆圈标出所谓的“QPD式”图案，该图案为光束居中定义了一个参考坐标系，见§3.3。蓝色圆圈标出四个基准标记（直径为500微米的圆盘），它们将“*QPD*-式”图案 的参考坐标系与FOGOB机械参考系相连接。右图是中央图案的放大图。其他图案用于计量。另见图5

我们设计了一套光机装置，用于在FOGOB机械参考坐标系中检测掩模基准标记的位置（图8）。它作为位置记忆，在掩模更换过程中是必需的。4个基准标记的位置由固定在掩模前方的一组4个QPD检测，这些QPD安装在连接到FOGOB台架的因瓦合金[8]支撑件上。每个基准孔径由连接到FOGOB的激光束照射（四个光纤准直器，图8），其衍射图样由QPD检测，从而给出基准孔径的位置。采用这种配置，我们能够检测到小至30 nm的基准标记/掩模位移。掩模支撑件可在粘接于FOGOB所连支撑件上的四片薄蓝宝石垫片上滑动。借助4个嵌入式磁体[9]，它被约束在FOGOB支撑件上。这种装配允许执行器脱开，并避免执行器的任何机械扰动耦合到掩模支撑件的位置中。掩模位置通过四个千分尺水平位移台进行精细调节（图8）图8。如有需要，垂直杠杆可以抬起掩模支撑件。尽管这种装配使用起来相当繁琐，但出于成本考虑仍被选用。更高效但更昂贵的方案是存在的，但不在我们演示装置的范围内。

[7] 光密度 > 4[8] 因瓦合金是一种热膨胀系数较低的FeNi36合金[9] 掩模支撑件由因瓦合金制成，因瓦合金具有磁性

在FOGOB参考坐标系中，掩模位置的稳定性如图9所示。沿水平方向给出了两个基准标记。它们的位置长期漂移小于0.4 μm（120小时内），短期时段（数小时）则小于0.1微米。因此，该装置能够以优于0.1微米的准确度进行掩模定位，并能在0.4微米范围内对位置进行长期监测。

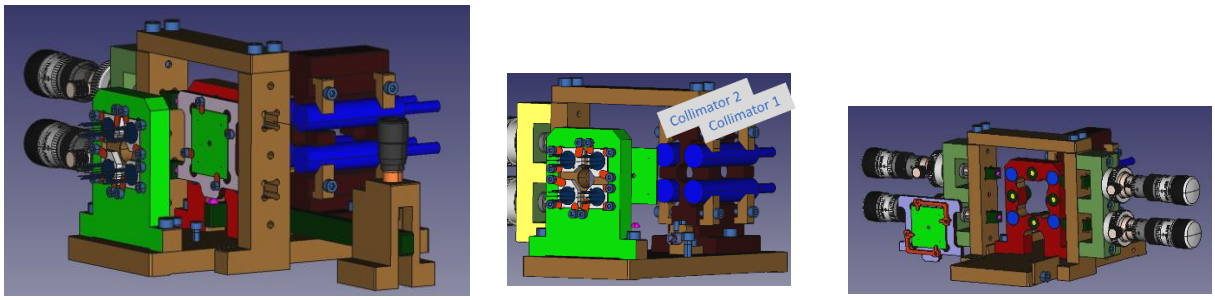


图8 “用于在 FOGOB机械参考系中定位掩模的“位置记忆”设置。掩模支架（磁性因瓦合金）与连接到 FOGOB 的红色支架相连（左图），支架上装有四个磁体（右图中的黄色圆盘），并可在粘贴于红色支架上的 4 个蓝宝石薄垫片（蓝色圆盘）上滑动（类似雪橇）。掩模角落附近可见 4 个基准标记“孔径”。Rx 和 LO 光束通过中央孔径（中间图）沿整个装置传播。使用四个水平微米级位移台推动掩模“雪橇”定位 （为便于理解设计图，仅显示两个位移台）。

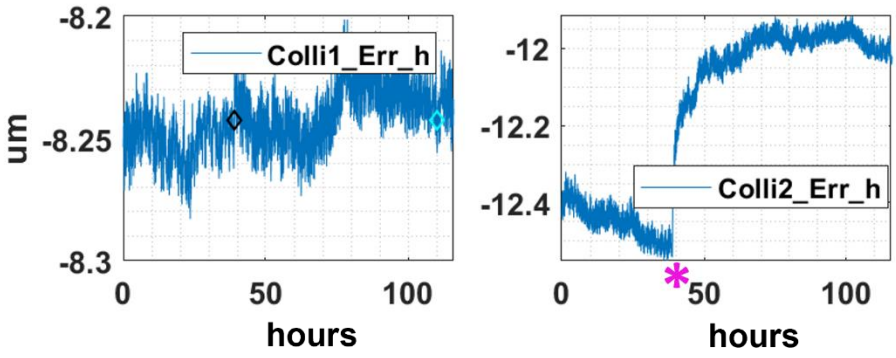


图9：与准直器 1 和 2（上方准直器）相关的基准标记位置长期监测结果。图中仅显示水平漂移。粉色星形标记表示对装置施加的有意扰动；因此，不应将明显的 0.4 微米漂移计入自由运行稳定性。位置在 120 小时内的漂移小于 0.5 μm，在数小时内的漂移小于 0.1 微米。

3.3. LO光束对准

我们采用了一种基于“位置记忆QPD”的策略，以精细调节FOGOB瞳面处的光束位置。通过伺服环路将光束锁定在位置记忆QPD处，可以轻松实现亚微米级调节，并提高光束位置的稳定性。

我们集成了一个相对于分离LO光束的取样分束器、与FOGOB瞳面共轭的QPD。通过压电驱动反射镜，伺服环路将LO的位置锁定在位置记忆QPD处（图10）。向伺服环路误差信号中加入的任何输入，都会被其视为实际的光束位移；反过来，环路也会通过实际的光束位移对其进行补偿。只要保持在误差信号的线性工作区内，这种方法就能以微米以下的准确度，实现相当精细且直接的对准。我们

使用这一驱动策略，在“QPD”掩模集成期间调节FOGOB瞳面处的LO光束（见3）。完成后，借助伺服环路以及误差信号中引入的偏置，光束能够保持对准。

图11（左图）展示了在伺服环路误差信号中人为加入“扰动”的效果，该误差信号用于驱动位置记忆QPD处的LO光束位置；在FOGOB输出瞳面（类QPD掩模）处也检测到了相同的效果。浅蓝色曲线（FOGOB瞳面处的位置）带有一些额外噪声，这可能是由实验室内的空气“湍流”造成的。

我们采用了相同的策略来控制接收光束。在这个具体案例中，我们控制四个自由度：光束在水平和垂直方向上的倾斜与平移。误差信号由位置记忆QPD提供（与本地振荡光的配置相同），另一个则是DWS信号（§2.3，图4），用于监测接收光束与本地振荡光之间的夹角。我们对4 × 4指令矩阵进行了对角化，以分离系统四个自由度上的驱动。准确度方面，我们达到了与本地振荡光相同的性能。此外，只需在DWS误差信号中加入适当的正弦扰动，我们就能在接收光束上施加纯正弦角抖动。图11（右图）展示了在DWS误差信号输入端加入正弦扰动所产生的效果：最终在DWS QPD和专用的“倾斜监测QPD”上都能观察到正弦倾斜 [10]。

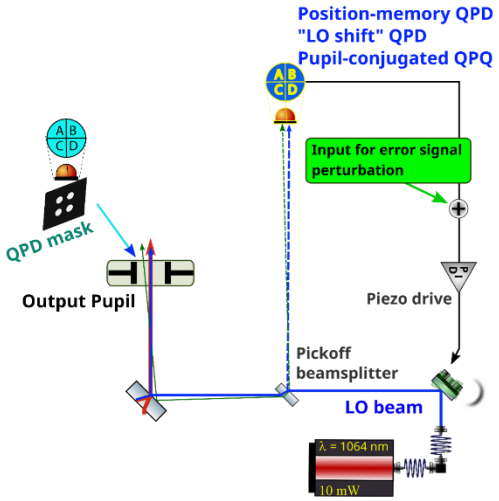


图10 LO光束的对准伺服环路。*“LO偏移”QPD*与输出光瞳处的*“QPD*掩模”共轭。锁定后，“QPD掩模”可移除，而“LO偏移”*QPD*则充当*LO*定位的位置记忆。

[10] 我们在透镜焦点处使用一个QPD，它仅对入射光束的倾斜变化敏感。

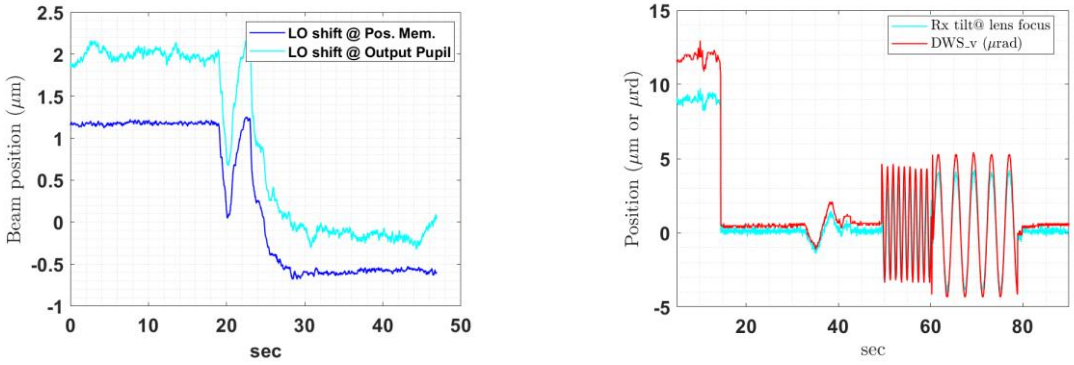


图11：左图展示了在本地振荡光光束位置误差信号中加入特定信号所产生的影响。该影响在提供误差信号的“本地振荡光+接收光束”QPD（图10）和FOGOB瞳面上均可见。右图展示了接收光束角度控制所产生的相同影响。回路在 t = *10* 秒时闭合，在 t = *35* 秒时加入一个突变扰动，并在 t = *50* 秒后加入两个频率不同的正弦扰动。

4. FOGOB残余TTL耦合

我们测量了接收光束受到人为施加的正弦角抖动（15 Hz）所引起的光程变化。在初步阶段，我们是在“接收光束 + 本地振荡光拍频”QPD（图6）处进行测量，而不是按要求在FOGOB瞳面处进行测量（图2）。在这种配置下，光瞳由QPD孔径本身（直径3 mm）定义，而非由FOGOB瞳面（直径2.55 m）定义。此外，这种测量（所谓的 $TTL_{Meas.}$）与TTL不同：它处理的是两对合并象限，而非四个单独象限（图12），因此适用于DWS信号。



$$TTL_{Meas.} = \frac{2.\pi}{\lambda} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{\theta_0} (\varphi_{A+B} + \varphi_{C+D})$$

$$DWS_{vertical} \cong \varphi_{A+B} - \varphi_{C+D}$$

图12 TTL和DWS信号的简化表达式

相位信号从1 MHz拍频中经本地振荡器频率解调后提取。我们使用频谱分析仪监测15 Hz处相位信号谱线的幅度，并以米为单位表示；再用Rx角抖动幅度归一化，得到TTL。结果如图13所示。

$TTL_{Meas.}$ 的长期漂移小于0.7微米/弧度（130小时），评估得到的准确度优于5微米/弧度。因此，它符合 3 σ [11] 规定的15微米/弧度准确度和1微米/弧度精密度指标（§2.2）。

[11] 对 60 秒数据趋势的统计结果显示，标准差小于 0.1 微米/弧度，且趋势时间越长，标准差越低。

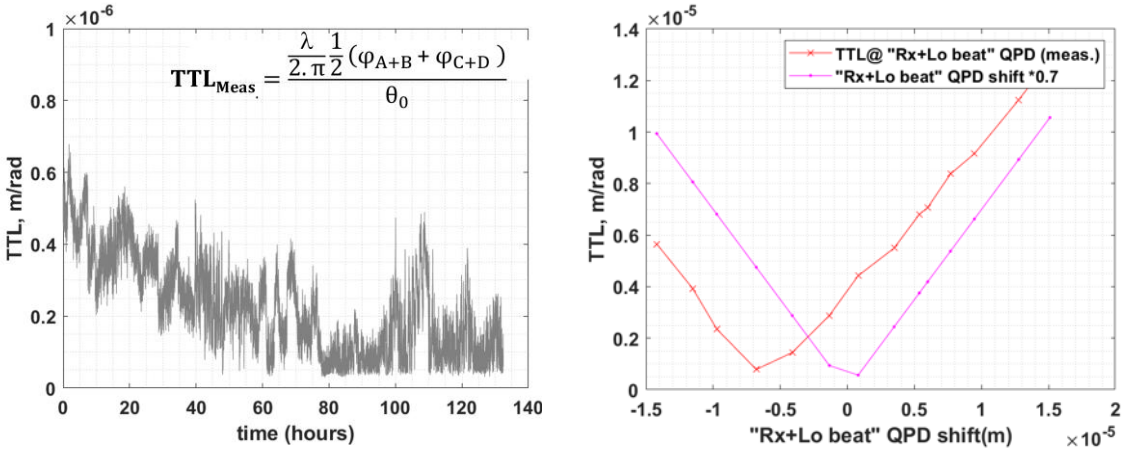


图13 $TTL_{Meas.}$ 在130小时内的趋势（左图）。$TTL_{Meas.}$ 随QPD失准的变化关系（右图），粉色曲线由仿真给出。当QPD居中时，残余TTL为~ *4* μm/弧度。

5. 结论

我们开发了FOGOB装置，用于测量LISA光学平台等设备的TTL。TTL测量的准确度优于5微米/弧度，在130小时内的精密度优于1微米/弧度。该装置采用现成组件，并在正常环境条件下运行。通过使用伺服回路和位置记忆来控制光束对准，可以轻松、直接地在短时间内实现亚微米级对准。如有需要，也可以远程控制。伺服回路控制能够应对准直器可能存在的稳定性不合格问题（至少对于标准组件而言）。这种未知因素会削弱我们对装置稳定性的信心，进而影响我们对残余TTL准确度的信心。采用光刻设计的图案和光学掩模，可实现优于1微米的居中精度。尽管所测TTL的定义是LISA所关注的TTL定义的简化版本，但我们相信，为FOGOB开发的这些概念适用于TTL测量。

致谢

本工作由法国国家空间研究中心（CNES）资助。

参考文献

[1] Abbott等，“双黑洞并合引力波的观测”，《物理评论快报》，第116卷，第061102页，2016年2月。

[2] Virgo, «https://www.virgo-gw.eu/»。

[3] LIGO，“https://www.ligo.caltech.edu/”。

[4] «LISA - 引力宇宙»，[在线]。网址：https://sci.esa.int/web/lisa/-/58543-the-引力宇宙。

[5] M. Chwalla，《LISA 长臂干涉仪中倾斜-长度耦合的光学抑制》，《物理评论应用》，第 14 卷，第 %11 期，页码 014030，2020年。

[6] M. Tröbs，《降低 LISA 测试质量干涉仪中倾斜-长度耦合》，《经典与量子引力》，第 35 卷，第 %11 期，页码 105001，2018年。