

[网站地图 \(http://www.imech.cas.cn/serv/wzdt/\)](http://www.imech.cas.cn/serv/wzdt/) |

[联系我们 \(http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205_3698646.html\)](http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205_3698646.html) |



中国科学院力学研究所
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

(<http://www.imech.cas.cn/>)

Search



当前位置 : 首页 (../../../../) >> 科学传播 (../../../../) >> 力学园地 (../../../../) >> 前沿动态 (../../../../)

【信息之窗】空间引力波探测系统中的光程噪声研究进展

2021-07-09 11:18

[【放大 缩小】](#)

编者按: 力学所引力波实验中心的罗子人研究团队和长春光机所的太极团队合作, 从干涉机理出发, 在影响空间干涉测距系统精度的抖动光程耦合噪声的分析工作中取得了很好的进展。本刊在此发布相关信息, 以飨读者。

空间引力波探测系统中的光程噪声研究进展

沈嘉, 牛宇, 罗子人

如同平静的湖面会因突然跃出水面的鱼而泛起涟漪, 在宇宙中发生的大质量天体相撞等天文事件时, 同样会在时空中泛起涟漪, 并以波的形式向宇宙各个方向传播, 这就是引力波(参见图1示意)。有经验的渔民可以通过水面涟漪的波纹判断鱼的种类和大小, 同样聪明绝顶的科学家也可以通过探测到的引力波来寻找宇宙的奥秘。但是探测引力波是件十分困难的任务。直到2016年2月, 媒体正式报道了美国激光干涉引力波天文台(LIGO)在地面探测到了引力波信号的消息, 全世界的科学家都为引力波的发现而无比兴奋。它不仅直接证明了爱因斯坦的广义相对论, 还为人类开启了探索宇宙的新旅程, 因为引力波包含着大量的宇宙演化信息(例如, 恒星死亡、黑洞形成与成长、银河系演化等)。所以, 2017年的诺贝尔物理学奖颁给了三位美国科学家Rainer Weiss(雷纳·韦斯)、Barry C. Barish(巴里·巴里什)和Kip S. Thorne(基普·索恩), 以表彰他们在LIGO探测器和引力波观测的决定性贡献。

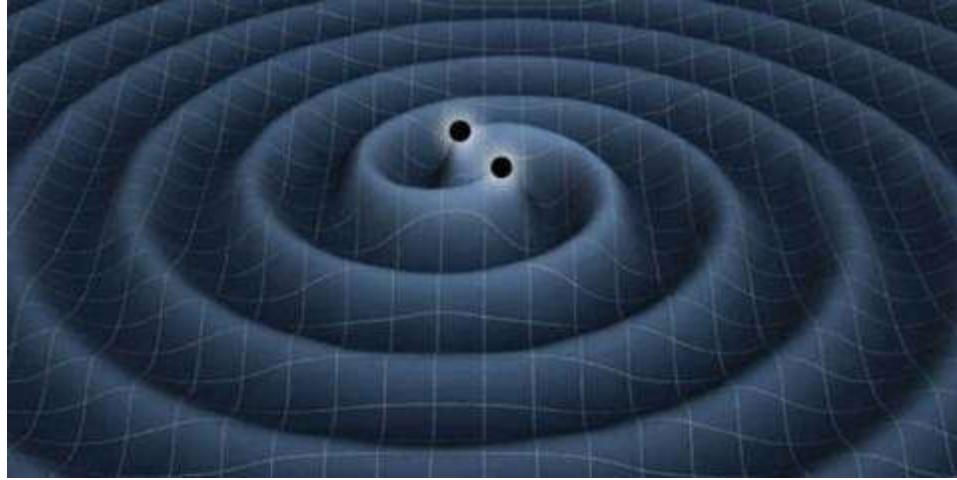


图1 引力波传播示意（来源：“视觉中国”网络）

不难想到，如果能在空间探测引力波，应当可以获得更多频段的引力波信号。因为不同频率的引力波对应于不同的天体物理过程，例如地面装置观测到的高频(>10赫兹)。引力波主要是对应于致密双星的引力辐射。由于受到空间距离的限制和地球重力梯度噪声的影响，基于地面的引力波探测实验装置无法探测低于10赫兹的引力波，所以它的研究目标就变得较为有限。现在，空间激光干涉法测量中、低频引力波已成为天文学和空间宇宙物理领域的最前沿课题。到目前为止，无论是在地面，还是在太空，利用激光干涉仪测量引力波都是一个重要的途径。它其实就是迈克尔逊激光干涉仪，其工作原理如图2所示，说明如下。从光源S处发出的一束入射光，在分束板G被分为两束，透射光经过补偿镜C后被平面镜 M_2 反射回来，反射光被平面镜 M_1 反射回来，两束光经透镜L聚焦后在光检测器P处能够发生干涉，两束光的光程差不同时形成的干涉图样是不同的。当 M_2 的位置发生d值的改变时，通过干涉中两束光的干涉图样可以测得对应的光程差（即d值）。

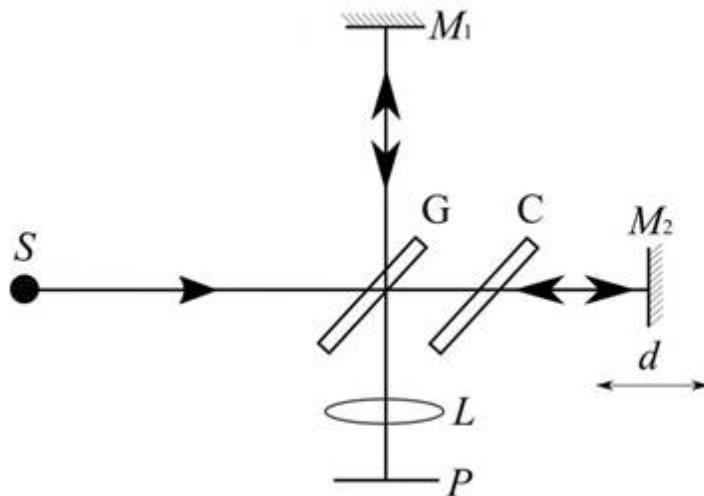


图2 迈克尔逊干涉仪的原理示意

在太极的激光干涉仪中, 引起光程差变化的原因, 是引力波涟漪造成的光路长度的变化。因为当引力波经过时会挤压或拉伸附近的时空, 从而引起空间中不同位置的点之间的光程变化(参见图3)。

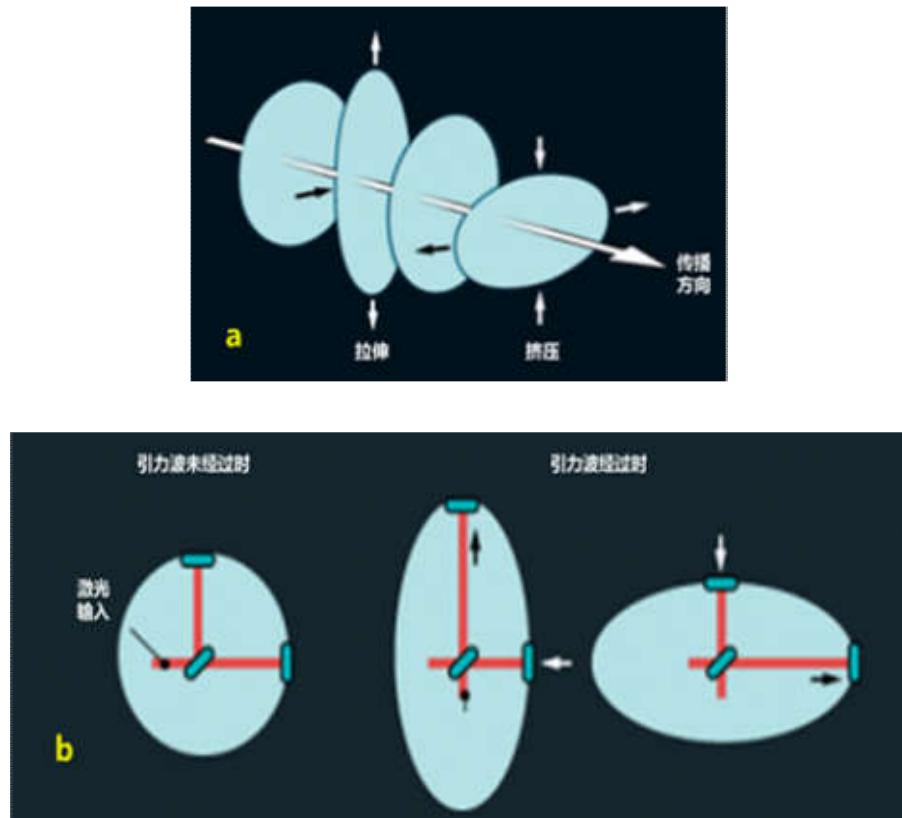


图3 空间干涉系统测量引力波的原理示意

为了开展空间引力波的探测, 2008年, 中科院成立了以力学所胡文瑞院士为召集人的空间引力波探测论证组, 开始规划我国空间引力波探测在未来数十年内的发展路线图; 2009年, 空间引力波探测列入中科院2050发展规划; 2010年, 太极计划初步方案推出, 2012年, 太极工作组正式成立; 2015年, 太极计划“三步走”路线图正式提出; 2016年, 中科院正式启动了太极计划; 2018年, “太极一号”任务立项。2019年8月31日, “太极一号”实验卫星在中国酒泉卫星发射中心发射, 从而迈出了太极计划的第一步。目前, 太极计划各项任务在中科院太极联盟(Taiji)的统一部署下正在稳步推进。力学所是太极联盟的创始单位, 也是太极实验卫星的干涉仪载荷总体单位。



图4 “太极一号”发射成功

按照太极计划，我国将发射由位于等边三角形顶点三颗卫星组成的引力波探测星组，星组中卫星间距300万公里，在日心系中运行，采用激光干涉方法进行中低频波段（ 1×10^{-4} –1.0 Hz）引力波的直接探测。它的主要科学目标是观测双黑洞并合和极大质量比天体并合时产生的引力波辐射，以及其他宇宙引力波辐射过程。显然，高精度的空间干涉测量系统是实现引力波探测任务的关键技术。这个超精密的系统需要在百万公里量级的测距上，位移测量精度要求达到皮米量级（ 10^{-12} 米），瞄准精度达到1纳弧度量级。图5给出太极计划中引力波探测星组布置及运行轨道示意。

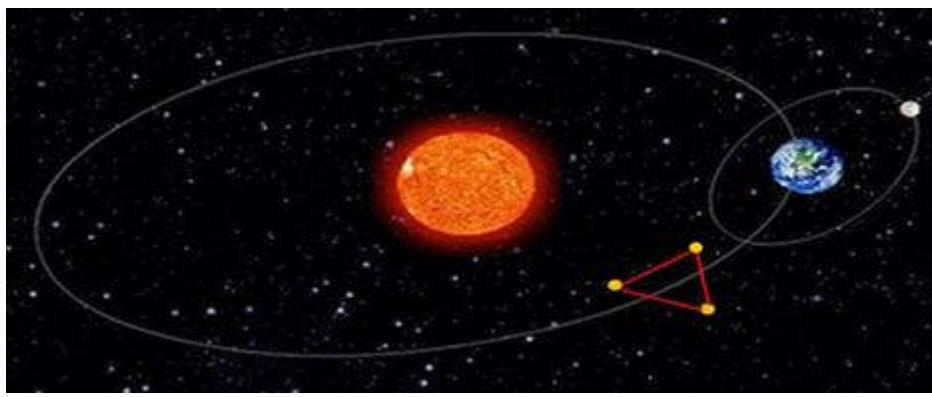


图5 太极计划的引力波探测星组布置及运行轨道示意

图6a给出探测星组的工作运行示意。在实际的探测过程中，干涉臂两端测试质量间的距离变化分为三个部分进行测量：第一部分是测量卫星一与其内部测试质量之间的距离变化；第二部分是测量卫星二与其内部测试质量之间的距离变化；第三部分是测量卫星一和卫星二之间的距离变化。第一、二部分的测量是利用各自内部搭建的测试质量干涉仪来测量的，第三部分的测量则是

利用星间激光干涉链路进行测量的。其实, 理想情况下, 在无拖曳技术的控制下, 卫星与其内部的测试质量之间的相对位置一般不会发生变化, 但是由于一些残余的噪声影响, 卫星与其内部测试质量的相对位置会发生变化, 因此需要搭建干涉仪进行测量。从本质上讲, 这三部分测量都是利用迈克尔逊激光干涉原理的, 只不过系统结构不太一样。例如, 为了测量卫星一与卫星二之间的距离变化, 远端的光束经过本地望远镜缩束后, 打到本地光学平台, 再与本地的光束进行干涉(下文将对此做具体的说明)。这就是图6b中所示的望远镜的用途。

发射和接收激光束的激光干涉仪配置在卫星平台上, 这是一个高精度光学平台, 整个航天器采用上面提到的无拖曳技术来实现控制。为了消除空间环境中太阳风、太阳辐射宇宙射线等外部环境的扰动, 太极计划中利用微推进器产生推力进行实时抵消, 这就是所谓的“无拖曳技术”。

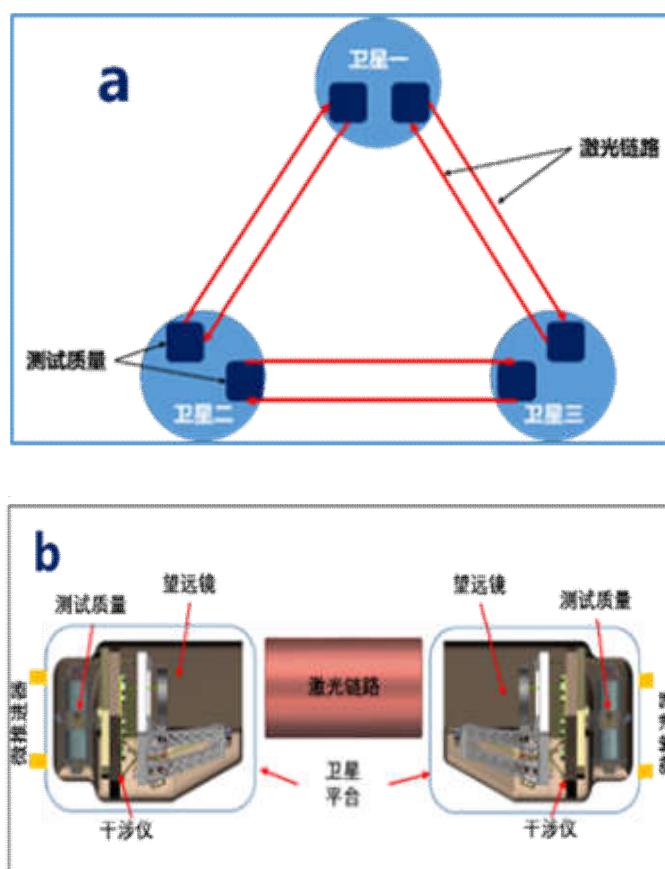
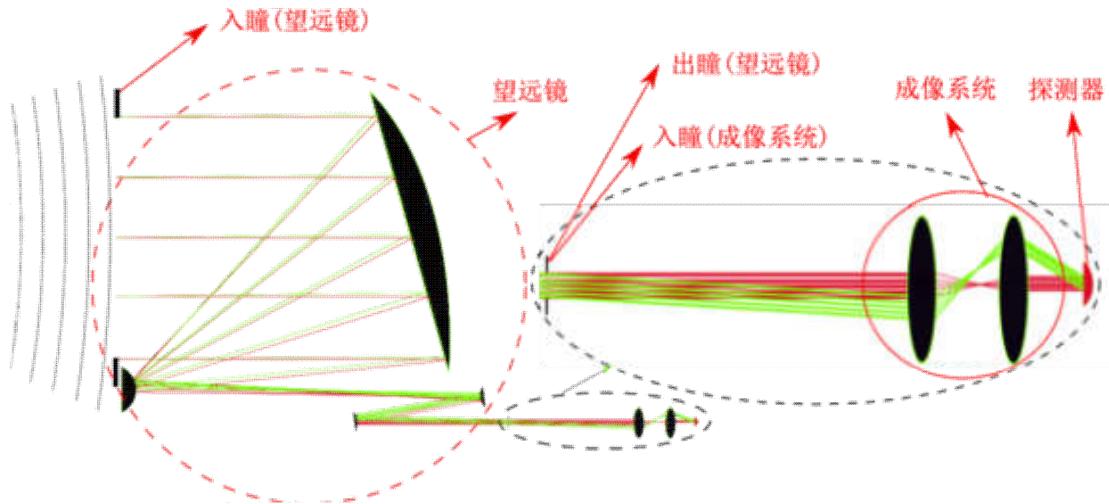


图6 引力波探测星组构成示意

下面就来简要谈谈光程误差是怎么回事儿吧! 望远镜在接收由远端卫星发出的光束同时, 还会发射本地的激光器发出的光束并经过百万公里的自由传输到达远端卫星。即便如此长的星间激光干涉链路, 距离变化测量的精度要求依然极其苛刻, 总的测量位移精度需在皮米(pm)量级。而在空间环境中, 不免总要受到太阳风等非保守力的扰动, 卫星姿态不可避免地发生抖动。这种抖动会引起望远镜在接收或者发射光束时, 光束的传输方向发生抖动。当接受光束与本地光束进行干涉测距时, 两干涉光束之间的波前不匹配耦合抖动会引起额外的光程噪声, 如图7b所示。同时发射光束经过望远镜扩束并进行远场传输时, 由于望远镜残余像差的影响, 会形成光束的波前畸变。光束的波前畸变耦合两个卫星之间的指向抖动也会引起额外的光程噪声, 如图8所示。人们将上述两种噪声统称为星间激光链路中的抖动光程耦合噪声。



(a) 望远镜样机



(b) 望远镜工作机制简示

图7 望远镜样机照片及其工作机制示意

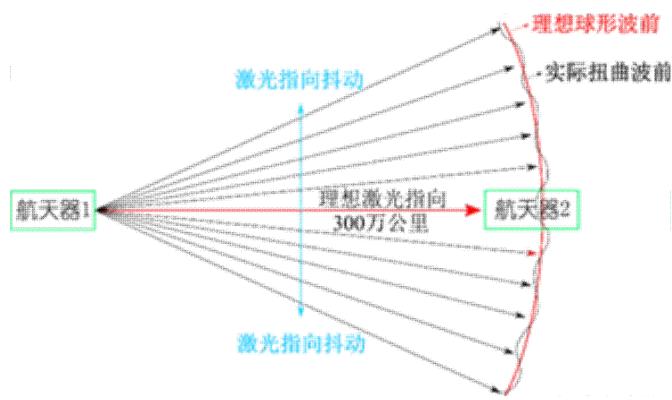


图8 激光指向抖动示意图

针对于上述问题，力学所引力波实验中心团队与长春光机所太极团队从干涉机理出发，分析了影响空间干涉测距系统精度的抖动光程耦合噪声。他们通过编写的泽尼克多项式算法拟合光束波前形状（参见图9），建立了完备的抖动光程耦合噪声的物理模型。他们利用蒙特卡洛算法全面分析了波前差对抖动光程耦合噪声影响（参见图10），结果表明：要满足测距精度要求，两干涉光束间的波前差需优于 $\lambda/30$ （ λ 是波长）。他们还提出了一种利用干涉光束与探测器间的横向偏移减小抖动光程耦合噪声的新方法：图11（左）为没有采用横向偏移的情况，图11（右）是采用了横向偏移的情况，采用横向偏移后的效果很明显。此外，研究团队还利用光束的远场传输模型，分析了像差耦合指向抖动对测量精度的影响。相关工作对全链路空间激光干涉测距系统的搭建具有重要的指导意义，并得到了国际同行的关注。

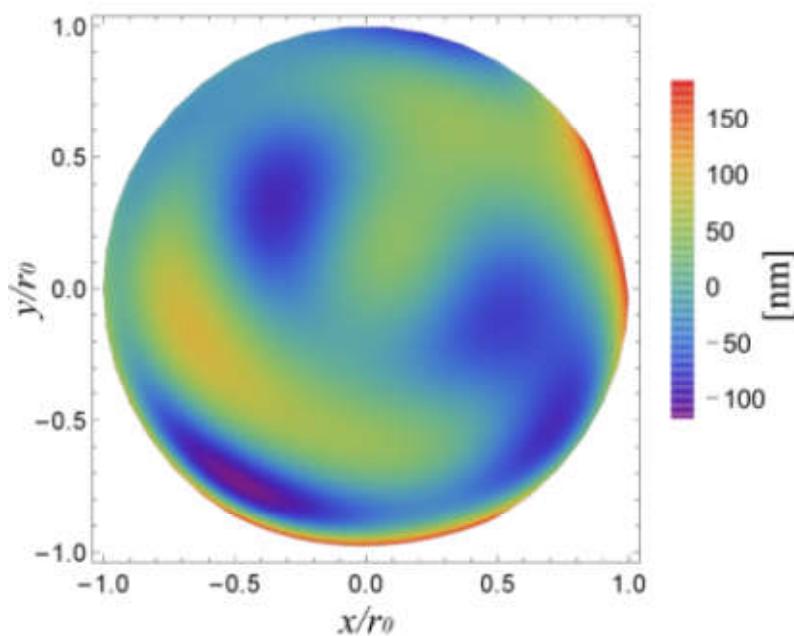


图9 泽尼克多项式拟合的波前差

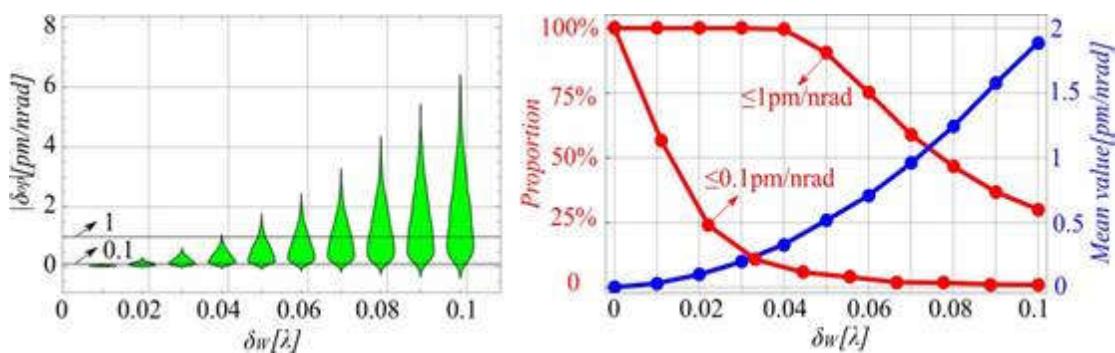


图10 利用蒙特卡洛算法分析的波前差与光程噪声的耦合关系

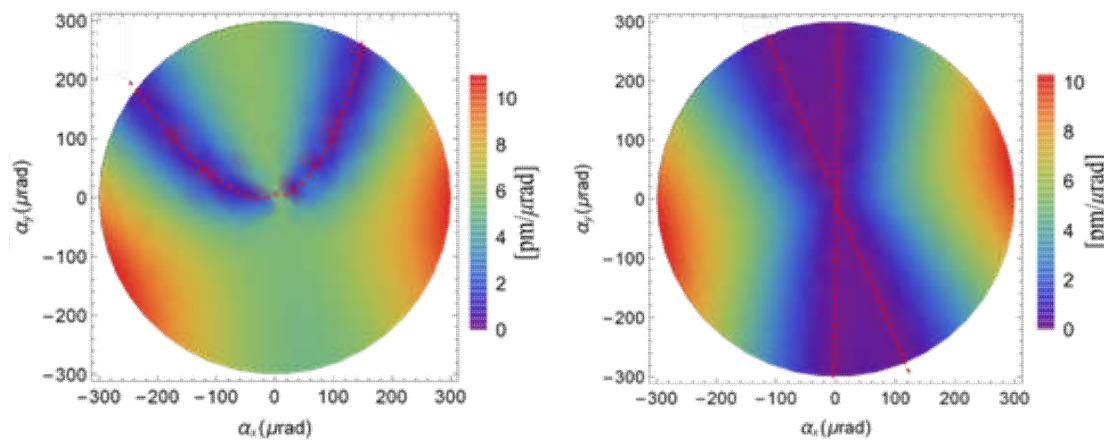


图11 探测器与光束间的横向偏移对抖动光程噪声的影响

(其中左边为无偏移, 右边为最优偏移)

参考文献:

- [1] Ya Zhao, Jia Shen, Chao Fang, Heshan Liu, Zhi Wang, Ziren Luo. Tilt-to-length noise coupled by wavefront errors in the interfering beams for the space measurement of gravitational waves (https://www.researchgate.net/publication/343115781_Tilt-to-length_noise_coupled_by_wavefront_errors_in_the_interfering_beams_for_the_space_measurement) Optics Express, 20: 25545-25561, 2020; <https://doi.org/10.1364/OE.397097>
- [2] Ya Zhao, Jia Shen, Zhi Wang, Chao Fang, Ruihong Gao, Wei Sha. The far-field optical path noise coupled with the pointing jitter in the space measurement of gravitational waves. Applied Optics, 60: 438-444, 2021; <https://doi.org/10.1364/AO.405467> (<https://doi.org/10.1364/AO.405467>)



