

面向低频引力波探测的月球激光测距系统

陈妮^{1,2}, 郑昊¹, 高利¹, 陶军³, 蒋青权⁴, 王运永⁵, 张晓敏⁶, 郑瑞华⁷, 韦联福^{1,4}

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031; 2. 成都工业学院网络与通信工程学院, 成都 610032;
3. 四川大学物理学院, 成都 610041; 4. 西华师范大学物理与天文学院, 南充 637009; 5. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
6. 北京紫薇宇通科技有限公司, 北京 100190; 7. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 为避免LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) 型的引力波探测系统的双腔联锁的难题, 提出一种高灵敏度引力波探测方案: 以单链路传输光束为载体, 利用引力波对其相位的调制作用, 结合 Mach-Zehnder 干涉检测技术完成对引力波的高灵敏度探测。面向0.1~10 Hz月基引力波探测需求, 设计了1万km月基激光测距系统, 并评估了其在激光光束散粒和测试质量辐射压两种主要噪声的限制下, 应用于目标频段探测引力波的可达灵敏度。为构建基于激光测距实现目标频段引力波高灵敏度的探测试验系统, 提供参考和借鉴。

关键词: 激光测距系统; 引力波调制相位; Mach-Zehnder干涉检测; 月基引力波探测

中图分类号: V11 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9287(2025)06-0599-08

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250103

引用格式: 陈妮, 郑昊, 高利, 等. 面向低频引力波探测的月球激光测距系统[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(6): 599-606.

Reference format: CHEN N, ZHENG H, GAO L, et al. Lunar laser ranging system for low-frequency gravitational waves detection[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(6): 599-606.

引言

2015年, 激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)观测到两颗恒星级黑洞的并合, 开启了引力波探测的新纪元。随后, LIGO^[1]、室女座引力波天文台^[2](Virgo)和神冈引力波探测器^[3](Kagra)等联合探测, 探测到大量双星并合产生的引力波。理论上引力波的频段非常宽阔, 可以从 10^{-16} ~ 10^{12} Hz, 甚至更高^[4], 几乎不可能使用一个探测器来完成对所有频段引力波的探测。因此, 对不同频段的引力波, 需基于不同的探测原理、采用不同的探测技术, 来设计探测装置。

地基引力波探测系统的主流探测频段在10 Hz至数千赫兹的中高频频段范围^[5], 地面振动噪声对其可达的灵敏度影响很大、有限的干涉臂长限制了可探测频段的下限。避开地面噪声、激光干涉仪臂长可扩展到百万千米级的空间引力波探测器, 其敏感频段的下限延伸到分赫兹及以下, 如0.1 mHz~1 Hz的激光干涉空间天线(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)^[6]、 10^{-4} ~1 Hz的“天琴”^[7-8]和“太极”计划^[9]等。为将地基引

力波探测系统的下限拓展到10 Hz以下, 臂长为10 km的第3代引力波探测器爱因斯坦望远镜(Einstein Telescope, ET), 被深埋于地下以降低来自地面噪声的影响, 并通过加大激光功率、采用更高水平的隔振技术, 利用量子压缩资源, 其可达探测灵敏度已经可提升至 10^{-23} Hz^{-1/2}量级, 甚至有望达到 10^{-24} Hz^{-1/2}^[10-12]。此外, 以臂长为1 000 km的空间引力波探测器分赫兹干涉引力波天文台(Deci-Hertz Interferometer Gravitational wave Observatory, DECIGO)计划拟建设, 其目标频段也是0.1~10 Hz^[13]。

2020年以来, 面向10 Hz及以下低频段引力波探测的月基引力波探测, 逐渐受到人们的关注。迄今, 已提出了3种典型的月基激光干涉引力波探测构型: 月球引力波天线(Lunar Gravitational-wave Antenna, LGWA)^[14]、月震和引力天线(Lunar Seismic and Gravitational Antenna, LSGA)^[15]和宇宙学引力波月球观测站(Gravitational-Wave Lunar Observatory for Cosmology, GLOC)^[16], 其目标频段为1 mHz~10 Hz^[17]。其中: LGWA是一种将月球作为一个巨大的韦伯棒,

收稿日期: 2025-08-23 修回日期: 2025-11-13

基金项目: 国家重点研究计划(2021YFA0718803); 四川省科技教育联合基金重点项目(25LHJJ0097); 成都工业学院项目(2024ZR006)

探测由引力波引起的月球振动,其敏感频带从1 mHz到几Hz,峰值灵敏度在赫兹频段,是一种比ET敏感频段更低的探测器^[14]。与LIGO型激光干涉引力波探测系统类似,LSGA采用L型激光干涉仪结构,干涉臂长10 km;GLOC采用类似ET的正三角形激光链路结构,其干涉仪臂长40 km^[18]。面向1 Hz的月基激光干涉系统,同样采用了迈克尔逊干涉(Michelson interferometer)结构,其灵敏度可达 $10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$ 量级^[19]。这些月基激光干涉引力波探测系统的最高探测灵敏度,预计可达 $10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2}$ 量级^[20]。

目前大多数的激光干涉引力波探测系统,都采用迈克尔逊型干涉仪结构,需完成引力波同时调制两路相位的干涉测量,大多都采用联合锁定两个法布里-珀罗腔技术,其锁定精度要求极高。

为避免双腔联锁的技术难题,并面向0.1~10 Hz频段的引力波激光干涉探测需求,本文提出月基激光干涉引力波探测试验系统的另一种设计方案,即利用接收端的Mach-Zehnder干涉仪对引力波仅调制一条激光链路的相位进行高灵敏度探测。

1 引力波调制传输激光相位的灵敏检测方法

传播中的引力波,会在与其传播方向垂直的平面出现对时空的交替拉伸和压缩;通过探测沿这两个方向传输激光光程的微小变化,便可探测引力波所引起的时空应变。主流的激光干涉引力波探测器都是双臂干涉,同时测量两个互相垂直方向激光传输的引力波调制相位,因而需同时锁定两个互相垂直激光传输链路的光程。为避免两路传输路径的光程精确联调困难,本节首先探讨如何通过实现单路传输激光光束的引力波调制相位的精密探测,来达成对0.1~10 Hz频段引力波的高灵敏度探测。

1.1 引力波调制激光传输相位

考虑图1所示的基于Mach-Zehnder干涉仪(MZI)的激光干涉引力波探测系统。假设角频率为 ω_g 的引力波沿着Z轴入射,在图1的S0区域导致时空形变。

对于沿着Z轴入射的 \oplus 方向极化引力波,假设其无量纲振幅 h ,角频率 ω_g 。在 $Z=0$ 平面可表示为 $h(t) = h \cos(\omega_g t)$ ^[19,21],由 $Z=0$ 平面传输的激光光束时空间隔,可确定沿Y臂传播的激光光束的传播长度 y 和传播时间 t 的关系,即

$$dy = \frac{c}{\sqrt{1-h(t)}} dt \approx c \left[1 + \frac{1}{2} h(t) \right] dt \quad (1)$$

其中: c 为光速。

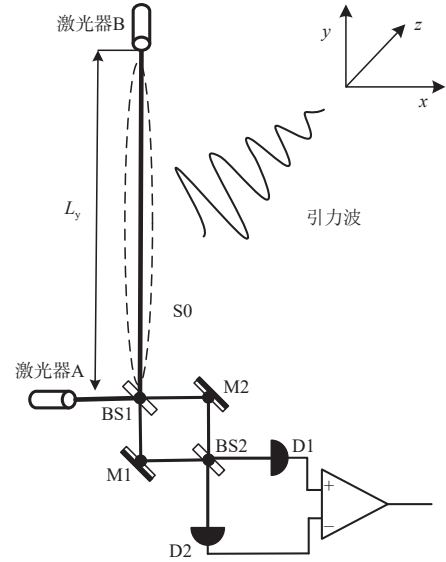


图1 Mach-Zehnder干涉仪测量引力波调制传输激光相位示意图
Fig. 1 Schematic diagram of gravitational wave-modulated laser phase measurement using a Mach-Zehnder interferometer

为通过测量 dy ,获得 h 的探测,在图1假设本地激光器(Laser A)输出光束入射至分束器BS1;远端另一个激光器(Laser B)输出的光束,传播距离 L_y 入射至分束器BS1,构成一个双端输入的Mach-Zehnder干涉仪。假设远端激光器Laser B发出的激光信号角频率 ω_B 、初相位 ϕ_{B0} 、光强 E_2 ,那么经过 L_y 的距离传播后到达分束器BS1时的光信号相位变为 ϕ_{B1} ,光强仍为 E_2 。除“月尘”外,月球表面是一个理想的超高真空环境,因此本方案设计暂时忽略激光光束在月球表面传播过程中的吸收损失和传输不可避免的光束发散能量损失。从远端激光器Laser B发射的激光信号在传输过程中会受到引力波的影响,到达分束器BS1时,其相位传输相位的变化量为

$$\phi_{B1} - \phi_{B0} = \omega_B \int_{t_0}^{t_0 + L_y/c} c \left[1 + \frac{1}{2} h(t) \right] dt = \frac{\omega_B L_y}{c} + \Phi_g \quad (2)$$

其中: Φ_g 为引力波对激光的调制相位。

$$\Phi_g = h \frac{\omega_B}{\omega_g} \sin(\omega_g L_y / 2c) \cos[\omega_g(t - L_y / 2c)] \quad (3)$$

1.2 基于引力波调制相位检测的引力波探测方法

本端激光器A输出激光到分束器BS1的信号角频率 ω_A 、初相位 ϕ_A 、光强 E_1 。假设分束器BS1、BS2的反射、投射系数分别为 R_1 和 T_1 、 R_2 和 T_2 ,那么探测器D1和D2探测到的信号可分别表示为

$$E_{D1} = \alpha_1 E_1 e^{-i(\omega_A t + \phi_A)} + \alpha_2 E_2 e^{-i(\omega_B t + \phi_{B1})} \quad (4)$$

其中: $\alpha_1 = |R_1 T_2| - |T_1 R_2|$, $\alpha_2 = |R_1 R_2| + |T_1 T_2|$ 。

$$E_{D2} = \alpha_2 E_1 e^{-i(\omega_A t + \phi_A)} - \alpha_1 E_2 e^{-i(\omega_B t + \phi_{B1})} \quad (5)$$

为实现两个光束之间的相干,理论上假设: $\omega_A = \omega_B$, MZI两个光子探测器所输出的光电流为

$$I_{D1}(t) = \chi |E_{D1}(t)|^2 = \chi \alpha_1^2 E_1^2 + \chi \alpha_2^2 E_2^2 + 2\chi \alpha_1 \alpha_2 E_1 E_2 \cos(\phi_A - \phi_{B1}) \quad (6)$$

和

$$I_{D2}(t) = \chi |E_{D2}(t)|^2 = \chi \alpha_2^2 E_1^2 + \chi \alpha_1^2 E_2^2 - 2\chi \alpha_1 \alpha_2 E_1 E_2 \cos(\phi_A - \phi_{B1}) \quad (7)$$

其中: $\chi = S_a \eta e / 2\mu_0 c \hbar \omega_B$ 为光电转换系数; η 为光电转化效率; S_a 为光电探测器响应面积; \hbar 为约化普朗克常量; e 为电子电荷。

从探测电流的表达式可知: $I_{D1}(t)$ 和 $I_{D2}(t)$ 的前两项不包含引力波信息,第3项才包含引力波信息。当激光频率和臂长确定时, $\phi_A - \phi_{B0} - \omega_B L_y / c = \phi_1$ 是一个恒定的值。由于 $\Phi_g \propto h$, 振幅 h 非常小, 当有引力波时, 令 $\alpha_1^2 = \alpha_2^2$, 有 $\alpha_1 \alpha_2 = 1/2$, 两个探测器输出电流之差 $I(t) = I_{D1} - I_{D2} = 2\chi E_1 E_2 (\cos \phi_1 + \Phi_g \sin \phi_1)$ 。其中 $2\chi E_1 E_2 \cos \phi_1$ 在系统设计完成后就是一个定值, 可简化为系统噪声, 因而引力波调制所导致的探测光电流变化可表示为

$$I_{wg}(t) = 2\chi E_1 E_2 A \cos[\omega_g(t - L_y/c)] \quad (8)$$

其中: $A = h\omega_B \sin \phi_1 \sin(\omega_g L_y/2c) / \omega_g$, 它所对应的功率谱为

$$S(\omega) = 4\pi^2 \chi^2 E_1^2 E_2^2 A^2 \delta^2(\omega - \omega_g) \quad (9)$$

根据信号可探测性的常规标定方法^[22]可知, 如果探测器在探测时间 τ 内探测到的光子数为 N , 考虑光子数必定存在的涨落为 \sqrt{N} , 则在满足 $I_{wg}(t) \geq \sqrt{N}\eta/\tau$ 的条件时, 即表示引力波调制激光传输相位所引起的光电流变化是可探测的。所以, 在仅考虑探测器端光电流散粒噪声影响的理想情况下, 这一系统的可达引力波探测灵敏度可表示为

$$h \geq \frac{\sqrt{N}\eta/\tau}{2\pi\chi E_1 E_2 \omega_B \sin \phi_1 \sin(\omega_g L_y/2c)} \frac{\omega_g}{(\hbar \cos \phi_1)^{1/2}} = \frac{\omega_g}{2\pi(\omega_B \tau)^{1/2} (P_A P_B)^{1/4} \sin \phi_1 \sin(\omega_g L_y/2c)} \quad (10)$$

当激光A功率为12.5 W, 激光B初始功率为12.5 W, 臂长为 $L_y = 10\,000$ km, 两个激光器输出的激光角频率都为 $2\pi \times 10^{14}$ Hz, 光电转换效率 $\eta = 0.5$, 探测时间为 $\tau = 10^{-4}$ s时, 根据式(10)可得到理论上可达探测的振幅灵敏度, 结果如图2所示, 可知系统对频率 f_g 低于

10 Hz的引力波, 理论可达探测的振幅灵敏度为 10^{-22} 量级(在考虑其它噪声因素的影响下, 实际可达的探测灵敏度会显著降低)。

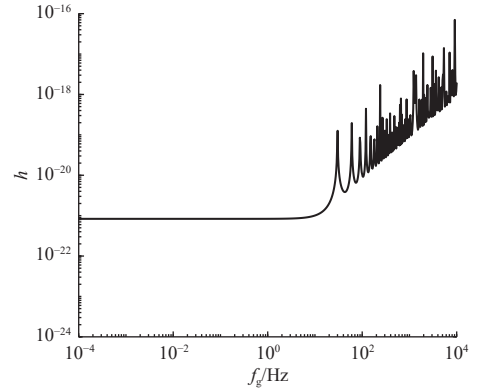


图2 理想情况下引力波调制相位的Mach-Zehnder干涉检测方法可达探测灵敏度

Fig. 2 Achievable gravitational waves detection sensitivity via Mach-Zehnder interferometric detection based on gravitational wave-modulated phase under ideal conditions

在其它参数不变, 仅改变激光A、激光B功率的条件下, 分析了该系统理论可达探测灵敏度随两个激光器输出功率比 P_A/P_B 的变化关系, 结果如图3所示。可见, 在 $P_A/P_B = 1$ 时可达探测灵敏度确实是最高的。这将为后续设计单个激光器分别向探测路和闲置路输出激光的分光比选择提供依据。在后续的讨论中, 约定进入MZI的探测光束和闲置光束的功率是相等的。

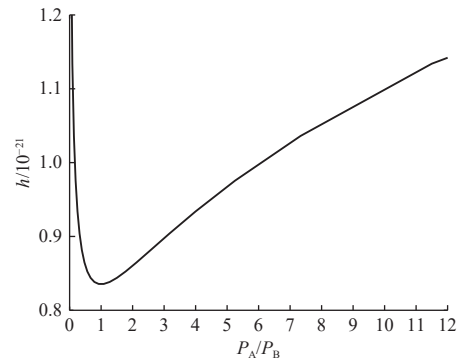


图3 激光总功率固定时, P_A/P_B 对灵敏度的影响

Fig. 3 Influence of on P_A/P_B detection sensitivity when total laser power is fixed

2 0.1~10 Hz月基引力波探测光学试验系统及其可达探测灵敏度估计

上节的探测方法提出的是一种理想的模型, 比如要求两个激光器输出的光束是完全相干的; 而且引力波在很长的单向激光传输链路, 完成对传输激光的相位调制, 即 L_y 长达1万km。这些假设在现实条件很难

满足。因此, 本节根据未来月基引力波探测可实现的条件, 设计一套基于引力波调制传输激光相位、高精度测量的、可实现的试验系统。

2.1 0.1~10 Hz频段引力波探测光学系统设计

为保证输入探测端MZI两束激光光束的相干性, 以及现实情况下可实现的激光传输链路长度, 设计了如图4所示的月基引力波激光测距系统。同一激光源(角频率为 ω_L)输出的光束, 进入分束镜BS0后, 被分为两束; 一束作为探测光射向反光镜M0并经多次反射往返后进入MZI; 另一路作为闲置光, 经过一定延迟后(相位固定为 ϕ_d)直接进入MZI。其中: 当反射一次时, 探测光的传输相位的引力波调制量 Φ'_g 为

$$\Phi'_g = h \frac{\omega_L}{\omega_g} \sin(\omega_g 2L'_y/2c) \cos[\omega_g(t - 2L'_y/2c)] \quad (11)$$

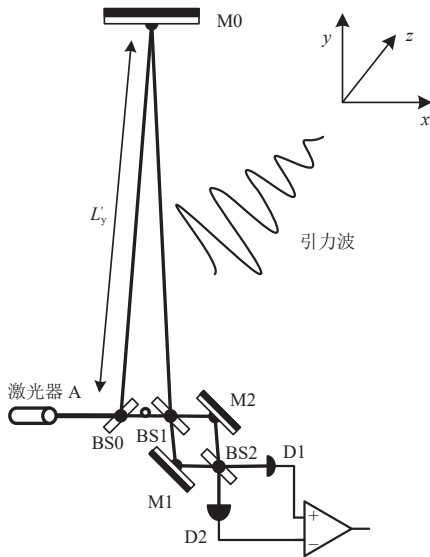


图4 月基引力波相位调制灵敏探测光学试验系统

Fig. 4 Optical experimental system for sensitivity detection of lunar-based gravitational wave phase modulation

显然, 要实现中心频率在1 Hz附近的引力波探测, 单次反射情况下, 探测臂的臂长需设置为 $L'_y = 5\,000\text{ km}$, 这对直径仅有3\,000多km的月球表面来说, 这一激光链路是不切实际的, 而且技术上也不易对准, 所以未来的月基引力波探测系统应该选址部署在月球的某个环形山上(月球表面存在大量的大小不等的陨石撞击坑^[23])。比如, 对于直径为数10 km的陨石坑顶部, 经数次反射后探测光的传输光程即可达到1万km的有效长度。这样, 探测光经数次反射后, 引力波导致的传输相位的调制量就可表示为

$$\Phi''_g = h \frac{\omega_L}{\omega_g} \sin(\omega_g \beta L''_y/2c) \cos[\omega_g(t - \beta L''_y/2c)] \quad (12)$$

其中: $\beta/2$ 为探测光总的反射次数。

类似于上面理想模型的计算, 如果激光器输出的初始功率 $P_0 = P'_1 + P'_2$, 其中 P'_1 、 P'_2 分别为到达分束器BS1的探测光和闲置光功率, 那么探测光电流中所含的光子数则为 $N = \sqrt{2|T||R|P_0\tau} \cos\phi'_1/\hbar\omega_L$ 。不失一般性, 令 $\sin\phi_d = \sqrt{2}/2$ 和 $\phi'_1 = \beta\omega_L L''_y/c - \phi_d$, 从而, 引力波可达探测灵敏度可表示为

$$h \geq \frac{(\hbar \cos\phi'_1)^{1/2} \gamma}{(\omega_B \tau)^{1/2} (|T||R|P_0)^{1/2}} \quad (13)$$

其中:

$$\gamma = \frac{\omega_g}{2\pi \sin\phi'_1 \sin(\omega_g \beta L''_y/2c)}$$

显然, 当激光输出的功率取 $P_0 = 25\text{ W}$, 分束器BS0的反射率和透射率满足 $|T|^2 = |R|^2 = 1/2$ 时, 其可达的引力波探测灵敏度与图2所给出的灵敏度预测一致。也就是说, 在探测臂长为 $L'_y = 50\text{ km}$, 激光反射系数为 $\beta = 200$, $P'_1/P'_2 = 1$, 并且不考虑激光在传输链路的损耗时, 这里所设计的探测臂长与前述 $L_y = 10\,000\text{ km}$ 臂长的理想模型, 可达到相同的探测灵敏度。但此处输入MZI的激光光束是同一个激光器输出的光束分束而来的, 它们之间的相干性可以保持。当然, 这里未考虑多次反射后光学损耗与月尘污染对镜面反射率的影响。实际上, 已有不少解决月尘污染的可行方案, 比如将激光传输链路都建造在一个封闭的外壳中或采用静电防尘罩^[20], 激光反射镜面增加高反射涂层^[24]。可以估算, 当镜面反射率达到99.99%时, 100次反射后的光功率损耗可降低到1%左右。在本探测系统设计方案中, 暂时不考虑光传输损耗影响。因此, 在不考虑反射噪声时, 通过多次反射来增加探测臂长, 并不影响其理论可达的探测灵敏度。

2.2 系统的可达探测灵敏度估计

在前面理论计算中, 仅考虑探测器散粒噪声的情况下, 预估了本引力波探测试验系统的理论可达探测灵敏度。当然实际的激光干涉系统存在大量的系统噪声, 因而引力波调制相位的探测灵敏度还需要考虑其它噪声, 如月震、引力梯度、月尘、激光功率涨落、激光线宽及其月面温差变化等因素的影响。由于尚缺乏月面环境参数的准确数据, 本文仅考虑激光系统本身所存在的噪声, 来对所设计的试验系统可达探测灵敏度进行数值模拟评估。

1) 激光频率噪声的影响

激光器输出激光光束的瞬时频率存在涨落。对于典型的频率噪声幅度谱 $\sqrt{S(f)} = 30\text{ Hz/Hz}^{1/2}$ 特性^[25], 利用激光频率幅度谱和激光相位幅度谱的关系^[26], 可

估算激光频率噪声引起的系统待探测相位的噪声, 对 0.1~10 Hz 的频率范围内, 引力波探测引起的噪声最大为 10^{-28} 量级, 比设计灵敏度低好几个量级, 对系统可达探测灵敏度评估时可暂不考虑。

2) 激光功率涨落噪声的影响

基于激光辐射的量子本质, 常规噪声抑制技术不可能消除干涉光束的功率涨落。两个探测器输出光电流进行差分处理后, 剩余的稳态光直流为

$$I_{B'} = \frac{4\chi\mu_0cTRP_0}{S_a} \cos\phi'_1 \quad (14)$$

其涨落可计算为

$$\delta I_{B',P} = \frac{2\chi\mu_0c}{S_a} \sqrt{\frac{\hbar\omega_L P_0 \cos\phi'_1}{\tau}} \quad (15)$$

在仅考虑这种噪声影响的情况下, 利用可探测信号的信噪比条件^[22]为

$$SNR = \frac{I_{wg'}}{\delta I_{B',P}} \geq 1 \quad (16)$$

可得到引力波的可达探测无量纲振幅为

$$h_{shot} = \frac{\hbar\gamma}{\eta eTRP_0} I_{wg'} \geq \frac{\hbar\gamma}{\eta eTRP_0} \delta I_{B',P} \quad (17)$$

根据式 (17), 当激光器输出功率不同时, 其功率涨落对引力波探测可达灵敏度的影响如图 5 所示。当干涉仪臂长选定后, 提高激光器输出功率可降低其输出功率涨落对引力波探测可达灵敏度的影响。

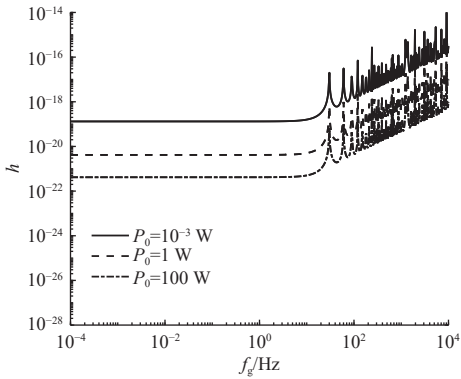


图 5 激光器输出功率噪声对引力波可达探测灵敏度的影响
Fig. 5 Influence of laser output power noise on achievable detection sensitivity of gravitational waves

3) 辐射压噪声影响

激光光束照射到测试质量反射镜产生的辐射压会使测试质量位移, 那么在该试验系统每次的光程 L'_y 下, 对测试质量为 M 的镜子其位移变化为

$$\delta L''_y = \frac{2}{M\omega_g^2} \sqrt{\frac{\hbar\omega_L P_0}{2c^2\tau}} \quad (18)$$

根据式 (14) 的背景直流电 $I_{B'}$, 则可得辐射压噪声的不确定度, 即

$$\delta I_{B',rp} = \frac{4\chi\mu_0cTRP_0}{S_a} \frac{\beta\omega_L \sin\phi'_1}{c} \delta L''_y \quad (19)$$

多次反射后, 辐射压噪声的不确定度增加 β 倍。对于只考虑辐射压噪声的情况下, 探测到引力波信号同样要求信噪比需满足 $SNR \geq 1$ 的条件, 则在辐射压噪声影响下可探测的引力波无量纲振幅为

$$h_{rp} \geq \frac{\hbar\gamma}{\eta eTRP_0} \delta I_{B',rp} \quad (20)$$

当测试质量 $M = 1 \text{ kg}$ 时, 本设计试验系统辐射压噪声对引力波可达探测灵敏度的影响与激光功率大小的关系如图 6 所示。在给定激光功率 $P_0 = 1 \text{ W}$, 不同测试质量情况下, 辐射压噪声对引力波可达探测灵敏度的影响如图 7 所示。可见增大测试质量有利于降低辐射压噪声的影响。

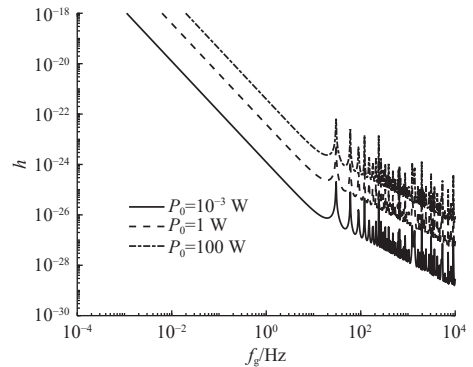


图 6 辐射压噪声中激光功率对灵敏度影响
Fig. 6 Influence of laser power in radiation pressure noise on detection sensitivity

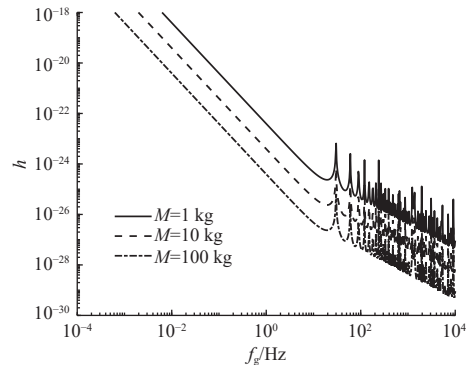


图 7 测试质量对灵敏度的影响
Fig. 7 Influence of test mass on detection sensitivity

综合来看, 增加激光功率可提升信号强度, 增加散粒噪声的信噪比, 但同时会降低辐射压噪声信噪比, 增加辐射压噪声。在其它噪声确定的情况下, 要

使激光干涉引力波探测试验系统实现最优的实际可达探测灵敏度,需在激光功率和测试质量之间达到平衡。

在综合考虑激光强度噪声和辐射压噪声情况下,其总噪声为

$$\delta I_{B'} = \sqrt{\delta I_{B',P}^2 + \delta I_{B',rp}^2} \quad (21)$$

总信噪比

$$SNR_{total} = \frac{I_{wg'}}{\delta I_{B'}} \geq 1 \quad (22)$$

可探测的引力波总体无量纲振幅可表示为

$$h \geq \frac{\hbar\gamma}{\eta e TRP_0} \delta I_{B'} \quad (23)$$

当测试质量为1 kg时,激光输出总功率为25 W时,所设计的试验系统在综合考虑激光散粒噪声和辐射压噪声情况下的实际可达探测灵敏度如图8所示。其频率区确实可填补现有地基和推进中的天基激光干涉引力波探测系统探测频段的“频率盲区”,在0.1~10 Hz频段其探测灵敏度最低可达 10^{-23} Hz^{-1/2},可应用于实现目标频段的月基激光干涉引力波探测。

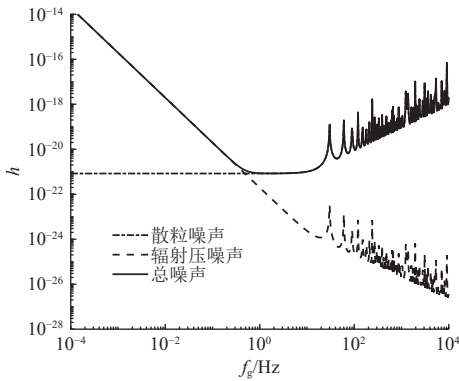


图8 试验系统的可达探测灵敏度曲线

Fig. 8 Achievable detection sensitivity curve of experimental system

3 结果讨论

在设计方案中高品质激光光束进入探测系统,通过50:50分束器分为两束,一束作为探测光,其传输相位被引力波所调制,另一束作为闲置光,用于与探测光进入MZI,以读取探测光中引力波所调制的相位,从而实现引力波的探测。所设计的激光干涉引力波探测试验系统与典型地基(aLIGO)和天基(LISA)激光干涉引力波探测系统的可达探测灵敏度对比,结果如图9所示,aLIGO的参数选为激光器25 W,干涉仪臂长4 km,测试质量40 kg^[27];LISA的参数选为激光功率2 W,干涉仪臂长250万km,测试质量2 kg^[6]。可以

看出所设计的月基激光干涉引力波探测试验系统,其探测频率敏感区正好填补了aLIGO和LISA的探测盲区,其频率敏感区的高频(低频)延伸还可以弥补地(天)基引力波探测系统在其频率敏感响应区外低频段(高频段)灵敏度急剧降低的缺陷,可应用于未来地-月-天基引力波的激光干涉联动探测。

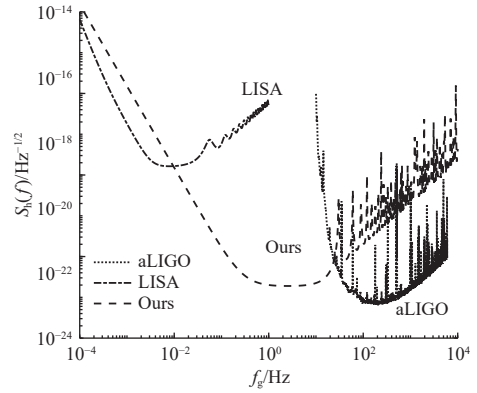


图9 灵敏度对比图

Fig. 9 Comparison of detection sensitivities

需要说明的是,本文只是月基激光干涉引力波探测试验系统一个可能方案的雏形,其理论可达和试验可达的探测灵敏度评估还很粗糙,因而在光路结构及激光功率和测试质量等相关参量还有很大的优化和改进空间。比如可利用直径更大的月球陨石坑,探测光传输链路可以更长(比如达到100 km甚至更长),从而减少其反射往返次数实现更低的辐射压噪声;在探测光传输链路引入法布里-珀罗(F-P)腔技术来实现探测光传输光程的精确锁定,以实现更高精度的探测光传输相位锁定,提升可达的探测灵敏度。虽然这里的单链路激光测距系统,理论上只能探测引力波的一个偏振分量信号,但是将其扩展到两个或更多不同方向的独立单臂系统,以实现引力波不同偏振分量的关联探测,对降低它们各独立探测系统的共模噪声、提升探测系统的引力波信号识别和波形,带来更大的便利。甚至,通过将系统的频率敏感频段改造为与地基LIGO装置或天基装置结构相同或相近的频段,便可实现对相近频率敏感频段引力波的月-地和月-天联合探测。

4 结论

针对常规激光干涉引力波探测系统中,需克服实现两路激光传输光程同时锁定的现实困难,本文提出并设计了一种面向月基激光干涉引力波探测应用的,基于引力波调制单路激光传输相位高精度检测的激光干涉测量系统。该系统通过构建1万km有效光程,实

现了在0.1~10 Hz频段对引力波信号的高灵敏探测。通过对激光功率及其相关的光子散粒噪声和辐射压噪声及测试质量等参数的恰当选择;预计所设计的单臂传输测距试验系统,其对目标频段引力波所实现的可达探测灵敏度可达 $10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$,理论上可满足该频段典型引力波波源信号的探测需要。该系统的敏感频段可与地基、天基探测系统形成频段互补,为地-月-天基引力波联动探测提供技术支撑。

未来工作将重点推进该单臂探测系统的多臂化扩展,同时深入探索研究引力波波形恢复的数据处理方法,持续提升月基引力波探测能力。

参考文献

- [1] FREY E R. LIGO: status and recent results[C]//Proceedings of 2nd International Conference. C2CR07. Lake Tahoe, USA: AIP, 2007.
- [2] FREDERIQUE M. Status of the Virgo experiment[C]// AIP Conference Proceedings. Pasadena, California: AIP, 2000.
- [3] AKUTSU T, ANDO M, ARAI K, et al. Kagra: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(1): 35-40.
- [4] 牛家树,王运永,边星,等.月基激光干涉仪引力波天文台[J]. *天文学进展*, 2024, 42(2): 203-223.
NIU J S, WANG Y Y, BIAN X, et al. Lunar-based laser interferometer gravitational wave observatory[J]. *Progress in Astronomy*, 2024, 42(2): 203-223.
- [5] CREIGHTON J D E, ANDERSON W G. 引力波物理学与天文学[M]. 王炎译. 北京: 科学出版社, 2024.
CREIGHTON J D E, ANDERSON W G. Gravitational-wave physics and astronomy[M]. WANG Y Translation. Beijing: Science Press, 2024.
- [6] DANZMANN K, AMARO-SEOANE P, AUDLEY H, et al. LISA laser interferometer space antenna[EB/OL]. (2017-02-02)[2025-6-30]. <https://lisa.nasa.gov/>.
- [7] 罗俊,艾凌皓,艾艳丽,等.天琴计划简介[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2021, 60(1-2): 1-19.
LUO J, AI L H, AI Y L, et al. A brief introduction to the Tianqin project[J]. *Journal of Sun Yat-sen University: Natural Science Edition*, 2021, 60(1-2): 1-19.
- [8] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. Tianqin: a space-borne gravitational wave detector[J/OL]. *Classical Quantum Gravity*, 2015, 33(3): 035010. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/33/3/035010/pdf#back-to-top-target>.
- [9] LUO Z R, WANG Y, WU Y L, et al. The Taiji program: a concise overview[J/OL]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020, 2021(5): 05A108. <https://academic.oup.com/ptep/article/2021/5/05A108/5875993?login>.
- [10] BRANCHESI M, FALANGA M, HARMS J, et al. Lunar gravitational-wave detection[J]. *Space Science Reviews*, 2023, 219(67): 1-46.
- [11] HILD S, ABERNATHY M, ACERNESE F, et al. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories[J/OL]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 28(9): 094013. <https://www.mendeley.com/catalogue/79033160-40cd-3a1f-978a-34ac746aa739/>.
- [12] 王运永. 第三代激光干涉仪引力波探测器[J]. *现代物理知识*, 2017, 29(1): 39-51.
WANG Y Y. The third-generation laser interferometer gravitational-wave detectors[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2017, 29(1): 39-51
- [13] KAWAMURA S, ANDO M, SETO N, et al. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO[J/OL]. *Progress Of Theoretical and Experimental Physics*, 2021(5): 05A105. <https://academic.oup.com/ptep/article/2021/5/05A105/6146419?login=false>.
- [14] HARMS J, AMBROSINO F, ANGELINI L. Lunar gravitational-wave antenna[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 910(1): 1-22
- [15] KATSANEVAS S, BERNARD P, GIARDINI D, et al. Ideas for exploring the moon with a large European lander (ESA, 2020)[EB/OL]. (2020)[2022-12-09]. <https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087607031744010&userAction=Browse&templateName=&documentId=a315450fae481074411ef65e4c5b7746>.
- [16] JANI K, LOEB A. Gravitational-wave lunar observatory for cosmology[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021, 2021(6): 1-15.
- [17] COZZUMBO A, MESTICHELLI B, MIRABILE M, et al. Opportunities and limits of lunar gravitational-wave detection[J/OL]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2024, 382(2271): 20230066. <https://royalsocietypublishing.org/rsta/article/382/2271/20230066/112635/Opportunities-and-limits-of-lunar-gravitational>.
- [18] 吴铠岚,林栩凌,郑永超,等.月基引力波探测进展与展望[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2023, 10(3): 247-256.
WU K L, LIN X L, ZHENG Y C, et al. Progress and prospect of the lunar-based gravitational-wave detection[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(3): 247-256.
- [19] 郑昊,杜浩,郑珺,等.面向1Hz附近引力波探测应用的月基激光干涉系统[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2025, 55(6): 260011. <https://academic.oup.com/ptep/article/2021/5/05A105/6146419?login=false>
ZHENG H, DU H, ZHENG J, et al. A lunar laser interferometer for the detection of gravitational waves near 1 Hz[J/OL]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2025, 55(6): 260011. <https://www.sciengine.com/cfs/files/pdfs/view/1674-7275/D248FDAE02974DDB8C0A8D82413DD7C.pdf>
- [20] AMARO-SEOANE P, BISCHOF L, CARTER J J, et al. LION: laser interferometer on the moon[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2021, 38(12): 125008. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6382/abf441>.
- [21] MAGGIORE M. Gravitational waves: Volume 1: theory and experiments. Gravitational waves[M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [22] KASAPSO. 光电子学与光子学——原理与实践(第二版)(英文版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
KASAP S O. Optoelectronics and photonics: principles and practice(second edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [23] 李飞,赵洋,杨眉,等.嫦娥四号月球背面南极-艾特肯盆地着陆区选择[J]. *国际太空*, 2020(1): 12-17.

- LI F, ZHAO Y, YANG M, et al. Landing site selection for the Chang'e-4 mission in the south pole-Aitken basin on the far side of the moon[J]. *International Space*, 2020(1): 12-17.
- [24] 吴泽华, 李刚, 邓沁文, 等. 近红外波段99.999%超高反射率激光反射镜[J]. *中国激光*, 2025, 52(11): 261-262.
- WU Z H, LI G, DENG S W, et al. Near-infrared band laser reflector with 99.999% ultra-high reflectivity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(11): 261-262.
- [25] 王盼盼, 赵鑫磊, 吴张启, 等. 空间引力波探测中的时间延迟干涉技术[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2025, 55(3): 140-154.
- WANG P P, ZHAO X L, WU Z Q, et al. Time-delay interferometry technology in space gravitational wave detection[J]. *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2025, 55(3): 140-154.
- [26] 金翔毅, 沈杨翊, 孔新新, 等. 激光频率噪声对外差干涉测量信号的影响及抑制方法分析[J]. *光学学报*, 2025, 45(7): 94-101.
- JIN X Y, SHEN Y Y, KONG X X, et al. Analysis of the influence of laser frequency noise on heterodyne interferometry signals and its suppression methods[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(7): 94-101.
- [27] MARTYNOV D V, HALL E D, ABBOTT B P, et al. Sensitivity of the advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy[J]. *Physical Review D*, 2016, 93(11): 112004. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.93.112004>.
- 作者简介:
陈妮(1984-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 激光干涉精密测量。
通信地址: 成都市郫都区中信大道2段1号(611730)
电话: 13540132896
E-mail: chenyuer2181@163.com
韦联福(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 光量子通信器件和系统、弱信号检测。本文通信作者。
通信地址: 成都市二环路北一段111号(610031)
电话: 13683480369
E-mail: lfwei@swjtu.edu.cn

Lunar Laser Ranging System for Low-Frequency Gravitational Waves Detection

CHEN Ni^{1,2}, ZHENG Hao¹, GAO Li¹, TAO Jun³, JIANG Qingquan⁴,
WANG Yunyong⁵, ZHANG Xiaomin⁶, ZHENG Ruihua⁷, WEI Lianfu^{1,4}

- (1. School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. College of Network and Communication Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 610032, China;
3. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610041, China;
4. School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong 637009, China;
5. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
6. Beijing Azspace Technology Co., Ltd, Beijing 100190, China;
7. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To avoid the dual-cavity locking challenge inherent in LIGO-type gravitational-wave detection systems, a high-sensitivity gravitational wave detection scheme was proposed. A single-link transmitted optical beam was used as a carrier, and the gravitational-wave-induced phase modulation on the beam was sensed and, in combination with Mach-Zehnder interferometry, was utilized to achieve high-sensitivity gravitational wave detection. A 10 000 km lunar laser ranging system was designed for the 0.1–10 Hz frequency band, and its achievable gravitational-wave detection sensitivity was evaluated under noise limitations from laser shot noise and test-mass radiation pressure noise. This study provides a reference for the development of a laser ranging-based experimental system aimed at high-sensitivity gravitational wave detection in the target frequency band.

Keywords: laser ranging system; gravitational wave modulated phase; Mach-Zehnder interferometry; lunar gravitational waves detection

Highlights:

- Proposed a Mach-Zehnder interferometer configuration utilizing a single laser link for gravitational-wave detection, thereby circumventing the challenge of dual-cavity locking.
- Designed a corresponding laser ranging system tailored for lunar-based gravitational-wave detection in the 0.1-10 Hz frequency band.
- Evaluates the system's detection sensitivity across the target frequency band, thereby validating the feasibility of the proposed configuration.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]