文章编号 2095-1531(2019)03-0425-07

太极计划激光指向调控方案介绍

高瑞弘[1,2],刘河山[1],罗子人[1*],靳 刚[1,2]
(1. 中国科学院 力学研究所,北京 100190;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:空间引力波探测中为实现引力波信号科学测量,卫星发射到预定轨道后需首先完成百万公里级激光链路的构建。同时为保证引力波信号不会被激光指向噪声淹没,激光指向稳定性需达到 nrad/$\sqrt{\text{Hz}}$量级。为此需设计一套复杂而精密的激光指向调控方案。本文以太极计划为背景,详细阐述了可采用的指向调控方案。拟将整个过程将分为两个阶段,首先进行激光捕获过程,在该过程中,使用星敏感器(STR)与电荷耦合器件(CCD)作为辅助捕获探测器,将激光指向不确定区域控制到 μrad 量级。之后进行激光精密指向过程,利用差分波前敏感测角(DWS)技术对激光指向稳定性进行控制。根据太极计划要求,对各阶段捕获探测器提出了视场及精度要求,并论述了采用 DWS 技术实现精密指向的可行性。相关结论可为未来的验证实验奠定理论基础,对太极计划指向系统构建提供参考。

关 键 词:太极计划;引力波;激光捕获;精密指向
中图分类号:P171.3; O439 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191203.0425

Introduction of laser pointing scheme in the Taiji program

GAO Rui-hong[1,2], LIU He-shan[1], LUO Zi-ren[1*], JIN Gang[1,2]
(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: Luoziren@imech.ac.cn*

Abstract: To realize scientific measurement of gravitational waves in the space gravitational wave detection, after launching into a predetermined orbit, the satellites must first construct a 100-km laser link. Furthermore, to prevent the gravitational wave signal from being flooded by laser pointing noise, the laser pointing stability must reach a magnitude of nrad/$\sqrt{\text{Hz}}$. Therefore, a sophisticated laser pointing scheme has to be adopted. In this paper, based on the Taiji program, we will discuss the design of such a scheme, which can be divided into two phases. Laser acquisition will be the first process. A star sensor (STR) and a charge coupled device (CCD) will be used as auxiliary capture detectors to decrease the laser pointing uncertainty region to sub-μrad levels. After that will be the laser fine pointing process, which uses differential wavefront sensitive (DWS) technology to accurately control pointing direction. The requirements of the acquisition sensors will be proposed based on the Taiji program while the feasibility of the DWS technique in the laser fine pointing phase

收稿日期:2018-06-29;**修订日期**:2018-08-31
基金项目:中科院战略性先导科技专项(B)(No. XDB23030000)
Supported by the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Science (No. XDB23030000)

will be discussed. The conclusions of this paper can be regarded as the basis and principle of related experiments and will give a reference for system construction in the laser pointing scheme of the Taiji program.
Key words: Taiji program; gravitational wave; laser acquisition; fine pointing

1 引 言

2016年2月,美国地基激光干涉引力波天文台(LIGO)公布了人类历史上首次直接探测引力波的结果。这个激动人心的消息,进一步推动了各国空间引力波探测计划的开展,我国的太极计划也应运而生。太极计划拟发射三颗空基引力波探测卫星至太阳轨道,形成等边三角形结构。为实现0.1 mHz~1 Hz频段引力波信号的探测[1-4],太极计划将采用激光干涉的方法,通过四象限探测器(QPD)对干涉臂长变化进行皮米精度的测量。与欧洲的LISA/eLISA[5-9]计划不同,太极计划相邻两颗卫星间距达三百万公里,敏感频段位于0.01 Hz,故对于涉及中质量黑洞并合过程的波源—总质量在几百至几万太阳质量的双黑洞绕转并合系统有更高的探测能力。

太极计划卫星发射到预定轨道后需首先进行卫星间双向激光信号捕获,完成星间激光链路的构建使四象限接收到连续的激光信号。但由于卫星姿态抖动会引起激光指向噪声,若要进行科学测量,需将激光指向稳定性控制到nrad/$\sqrt{\text{Hz}}$量级。太极计划的激光指向调控方案可分为两个阶段,即:激光捕获阶段与精密指向阶段。

空间激光捕获方案在许多空间项目中已有讨论,如日本的OICETS卫星成功与相距四万五千公里的欧洲ARTEMIS卫星建立了激光链路,实现了星间双向激光通信[8];GRACE-Follow on计划的激光捕获方案可使相距百公里量级的两颗卫星实现百微弧度精度的捕获[9-10]。相比而言,太极计划激光捕获方案需进行特殊的设计以应对其捕获距离远,所需精度高的难题。精密指向阶段首先采用差分波前敏感测量(DWS)技术对传输光束与本地光束间夹角进行高精度测量,之后控制微推系统进行卫星姿态调整,压制指向噪声,使激光指向稳定性达到太极计划要求的水平。目前国际上对DWS技术进行了多项理论探索和实验研究,2010年,GERALD H构建了高斯光束-高斯光束干涉时DWS探测的解析模型[11];2012年,Sheard针对GRACE Follow-on计划给出了高帽光束-高斯光束干涉的DWS技术相角转换近似公式[12];2014年,Yuhui Dong进行了基于DWS技术的精密测角系统地面模拟,将大于100 μrad的指向偏置迅速压制到优于100 nrad[13],完成了DWS技术的原理性验证。

本文将基于太极计划对激光指向调控系统的需求,分别介绍激光捕获与精密指向两个阶段拟采用的方案细节。

2 激光捕获阶段

激光捕获是指向调控过程的第一阶段,由于QPD视场较小,太极计划拟采用星敏感器(STR)、捕获探测器(CCD)辅助QPD完成激光捕获任务。虽然STR测量精度较低但其具有较大的视场,故可进行卫星初始姿态确定。较STR CCD具有更高的测量精度,视场大小介于STR与QPD之间,利用CCD协助QPD进行捕获,可大大缩短捕获所需时间。卫星进入预定轨道后将自动完成捕获。整个捕获阶段可分为3个主要过程:(1)望远镜视线矫正;(2)CCD激光信号捕获;(3)QPD激光信号捕获。3个干涉臂依次进行相同的过程,本文仅介绍任意两颗卫星间的双向链路构建。

2.1 望远镜视线矫正

图1为STR在卫星上的位置示意图,太极计划设计的望远镜视线与STR视线方向的夹角为30°。但由于受STR与望远镜地面矫正误差、望远镜指向方向漂移等因素的影响,卫星发射到预定轨道后。该夹角会偏离30°,因此需首先进行望远镜的视线矫正。

在矫正过程中为保证热环境尽量一致,卫星将绕着太阳矢量旋转。由STR先捕获一颗引导星,与星图对比后获得卫星姿态信息。之后通过望远镜系统,捕获探测器CCD发现另一颗引导

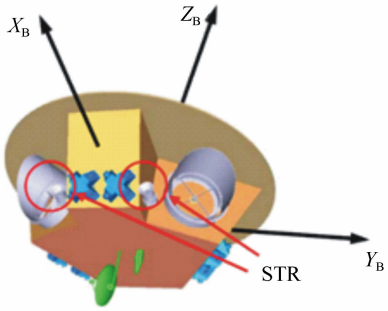

图 1　星敏感器位置示意图

Fig. 1　Location map of star sensor

星,结合已知的卫星姿态信息,计算视线夹角的偏移量,望远镜指向驱动器改变其视线方向,完成视线矫正。为保证 CCD 能在相对 STR 偏转 30°角的位置捕获到引导星,其视野范围必须能覆盖望远镜视线偏离的不确定区域。与 LISA 计划类似,太极计划对矫正过程不确定区域的误差预算如表 1 所示[6],即 CCD 的视场半角应大于 155.5 μrad,考虑一定的冗余可取为 200 μrad。

表 1　矫正过程不确定区域的误差预算

Tab. 1　Error budget of uncertain areas in correction process

误差项	平面内误差/μrad	平面外误差/μrad
STR 与卫星矫正误差	50	50
望远镜与卫星矫正误差	50	50
望远镜与望远镜指向驱动器矫正误差	25	25
望远镜指向驱动器绝对位置误差	0.5	0
飞船姿态的长期项漂移	30	30
望远镜平面内指向角相对飞船的长期项漂移	0.01	0
总计(线性和)	155.5	155

2.2　CCD 激光信号捕获

两颗卫星均完成望远镜视线矫正过程后,根据各自星载 STR 获得的卫星姿态信息与导航信息,调整卫星姿态进行初对准。由于导航误差、望远镜视线矫正残余误差等的影响,接受卫星(SC1)将处于一定的不确定范围内。其中导航误差对不确定范围的贡献可由下式计算得出:

$$\varepsilon_{\mathrm{nav}} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}\delta_x}{L_{\min} - 2\delta_x}\right) \approx \frac{\sqrt{2}\delta_x}{L_{\min}}, \quad (1)$$

其中,δ_x 代表由 DSN(Deep Space Network)提供的最大相对导航误差(预计为 25 km RMS 3σ),$L_{\min}$ 为考虑到 ±1% 变化时的最小臂长(对太极计划而言为 2.97×10^6 km)。经计算得,导航误差为 11.9 μrad。

望远镜视线矫正残余误差主要由 STR 的精度决定,以 ASTRO-APS[14] 为例,其视场大小为 0.35 rad,读出噪声约为 5 μrad。再考虑到其他因素的影响,太极计划对 CCD 捕获阶段不确定区域的误差预算如表 2 所示[6,14]。

表 2　CCD 捕获过程不确定区域的误差预算

Tab. 2　Error budget of uncertain area in CCD acquisition process

误差项	误差值/μrad
导航误差	11.9
望远镜视线矫正残余误差	5
视线与输出光束角度误差	1
卫星姿态长期项漂移	5
望远镜平面内指向角相对飞船的长期项漂移	1
总计(线性和)	23.9

与 LISA 计划类似,太极计划激光光束的发散角约为 1.43 μrad[6],小于不确定区域,因此初对准后 CCD 无法保证探测到远处卫星传来的激光信号,需采取一定的扫描策略。由于接收卫星(SC1)可能在不确定区域内的任何地方,激光发射卫星(SC2)需发射激光束对整个不确定区域进行扫描,同时 SC1 保持初始参考位置不变,如图 2(a)所示。扫描模式将采用匀切向速度阿基米德螺线扫描,为保证对不确定区域的完全覆盖,相邻两个扫描点间有一定重叠区域,该扫描模式具有对扫描区域覆盖均匀的优势。另一方面,由 2.1 节可知 CCD 拟采用的视场半角大小为 200 μrad,大于该阶段捕获不确定区域大小,因此可以保证扫描过程中某一时刻接收卫星可探测到入射激光。

由于本地激光的杂散光会使得 CCD 探测器过度曝光,在 SC2 扫描过程中 SC1 的激光器将保

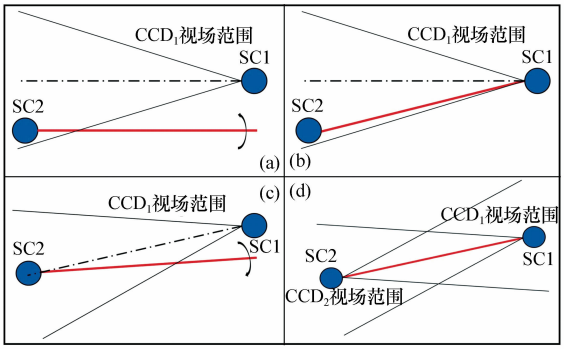

图 2 CCD 激光信号捕获方案示意图(a);SC2 激光扫描(b);SC1 接收到来自 SC2 激光(c);SC1 视线对准 SC2;(d)SC2 视线对准 SC1

Fig. 2 CCD laser acquisition scheme (a) SC2 laser scanning; (b) SC1 captures the laser from SC2; (c) SC1 points to SC2; (d) SC2 points to SC1

持关闭状态。同样,SC2 在两个扫描点之间扫描期间,发射激光器将处于关闭状态。

如图 2(b)所示,在某一时刻 SC1 的 CCD 上将接收到光信号。但由于存在初始对准偏差,CCD 上光斑的实际位置与预计的参考位置之间有偏移,如图 3 所示。光斑的位置偏移量大小与姿态偏移角度间具有近似线性关系,根据光斑中心的位置即可计算出接收光束的入射角度,SC1 根据计算结果调整姿态,使其视线方向对准 SC2 的位置并发射激光束,如图 2(c)所示。

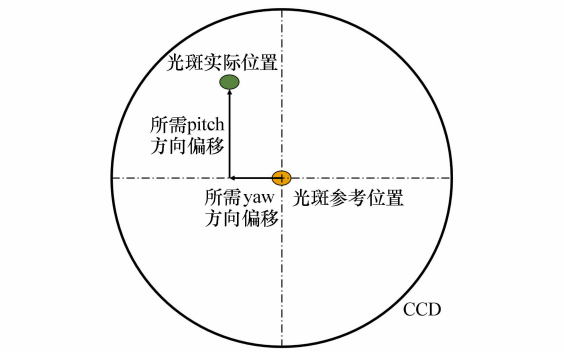

图 3 CCD 表面光斑偏移示意图

Fig. 3 Schematic of spot position offset on CCD surface

之后在两相邻扫描点之间,SC2 的 CCD 将接收到光信号。在接收到该信号之前 SC2 继续执行扫描方案,因此其光束传播方向将偏离 SC1 视线方向。同样该指向偏差会引起 CCD2 上光斑的实际位置与参考位置间的偏移,SC2 采用与 SC1 同样的姿态调整方法将视线对准 SC1,如图 2(d)所示,此时 SC1 与 SC2 的 CCD 均可接收到入射激光。最后,根据 CCD 上光斑的位置继续调整两颗卫星的姿态,直到光斑中心均位于参考位置处。

应用优化的质心算法光斑中心定位可优于 0.1 pixel,因此对视场为 200 μrad,像素数为 512×512 的 CCD,上述捕获过程精度可达 40 nrad。考虑到 CCD 捕获残余误差及 QPD 与 CCD 参考位置对准误差等因素的影响,QPD 捕获阶段不确定区域的误差预算如表 3 所示。由表 3 可知,当 QPD 视野大于 1.14 μrad 时即可保证能够接收到由远处卫星传来的激光束,考虑一定的冗余,视场大小可取为 1.5 μrad。

表 3 QPD 捕获过程不确定区域的误差预算

Tab. 3 Error budget of uncertain area in QPD acquisition process

误差项	误差值/μrad
CCD 捕获精度	0.04
卫星姿态与望远镜平面内指向角短期项抖动	0.1
QPD 与 CCD 位置矫正偏差	1
总计(线性和)	1.14

2.3 QPD 激光信号捕获

CCD 激光捕获过程完成后,入射光可投射到 QPD 表面。SC1 将通过改变本地激光器的频率来进行频率扫描,使拍频信号的频率进入 QPD 探测带宽之内,实现对干涉信号的探测。考虑两卫星间相对运动产生的多普勒频移,继续在探测带宽内改变频率,可使得 SC2 同时探测到干涉信号,完成星间激光链路的构建。

表 4 太极计划各级指向探测器要求

Tab. 4 Performance requirements of point sensors at various levels in Taiji program

	STR	CCD	QPD
视场	0.35 rad	200 μrad	1.5 μrad
精度	5 μrad (RMS 3σ)	40 nrad (RMS 3σ)	10 nrad/$\sqrt{\text{Hz}}$

综合上述各阶段应用需求及误差预算，并保证一定的冗余量，太极计划对各级指向探测器的要求如表 4 所示。

3　精密指向

上述过程虽完成了激光链路的构建，但科学数据采集仍无法实现。受到复杂空间环境，如太阳风、太阳辐射、宇宙射线等非保守力影响，航天器会发生抖动。无拖曳系统虽可压制这类噪声，但部分残余抖动仍将耦合到出射激光，并经三百万公里传播后到达远端卫星。若此时传播激光为标准高斯光束，与本地激光干涉时，其指向抖动不会耦合到测距信号中。而实际情况如图 4 所示[13]，传播望远镜的打磨精度有限，由此出射的激光存在一定的波前畸变，经三百万公里后，传播激光将偏离标准高斯波前。

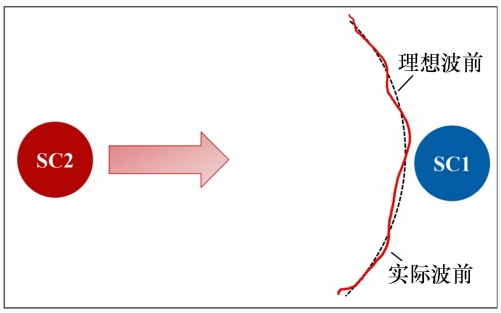

图 4　实际激光波前示意图

Fig. 4　Schematic diagram of real laser wavefront

当携带抖动信号的非标准高斯传播激光与远端卫星的本地激光干涉时，指向抖动将耦合并主导测距噪声，使引力波探测无法实现。在远场条件下，激光指向抖动引起的测相噪声可表示为：

$$\delta\varphi \approx \frac{1}{32}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 dD^2\theta_{\mathrm{dc}}\delta\theta \ , \qquad (2)$$

其中，λ 为激光波长；d 为波前曲率误差；D 为望远镜直径；θ_{dc} 为指向静态偏转误差；$\delta\theta$ 为激光指向抖动。太极计划拟采用的望远镜直径为 0.4 m，波前曲率误差为 $\lambda/30$，另外静态指向偏差可达到 10 nrad，因此为实现 $2\pi\times10^{-6}$ rad/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$ 的测相精度，激光指向抖动精度需满足：$\delta\theta < 17$ nrad/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$。考虑一定的冗余，指向抖动应达到 10 nrad/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$，因此在成功构建激光链路后，必须经过进一步的精密指向调控。

太极计划精密指向系统将以本地光束入射 QPD 方向为参考，对远端的传播光束与本地光束的夹角进行高精度测量，根据测量结果调整卫星姿态以压制指向噪声[15]。其中光束夹角的高精度测量将采用差分波前敏感测角（DWS）技术实现，DWS 技术具有灵敏度高、噪声低等优点，图 5 为其原理图[13]。

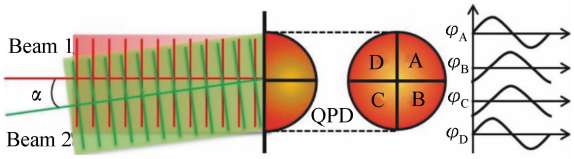

图 5　DWS 测角原理图。其中 Beam 1 为本地激光，Beam 2 为传播激光，α 为光束夹角

Fig. 5　Schematic diagram of angle-measuring principle for DWS. Beam 1 represents the local beam, Beam 2 represents the propagating beam and α represents the included angle

传播激光与本地激光干涉后，其拍频光信号被 QPD 转化为电信号，各象限干涉信号的平均相位由相位计分别探测获得，并计算出左右象限及上下象限的相位差。当两光束夹角不大时，该相位差与夹角近似为正比关系，比例系数为 1 000 rad/rad量级，因此相位差的高精度测量可转化为夹角的高精度测量。

随着夹角的增大，DWS 信号的线性度也将变差。太极计划拟采用的望远镜尺寸为 0.4 m，投射到 QPD 上的光斑直径为 1 mm，即入射光经星载光学系统传播后，光束尺寸缩小了 400 倍，相应的光束偏移将扩大 400 倍。由表 4 可知，QPD 的视野范围为 1.5 μrad，因此 QPD 表面的入射光偏角变化范围为 ±600 μrad。另一方面太极计划指向精度要求为 10 nrad/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$，则由 DWS 技术引入的角度测量误差应小于 4 μrad，即对于在 ±600 μrad 范围变化的偏角 φ，其角度测量误差应满足：

$$|\Delta\varphi(\varphi)| = \left|\frac{DWS(\varphi)}{k} - \varphi\right| \leqslant 4\ \mu\mathrm{rad}\ . \qquad (3)$$

由于经远距离传播后入射光束将具有高斯平顶光束的性质,因此 QPD 上的信号实际是由远处传来的高斯平顶光束与本地激光器发射的高斯光束干涉耦合的。对该干涉情况下 DWS 技术的表现在 MATLAB 中进行数值模拟,并假设两光束都入射到 QPD 中心,结果如图 6 所示。

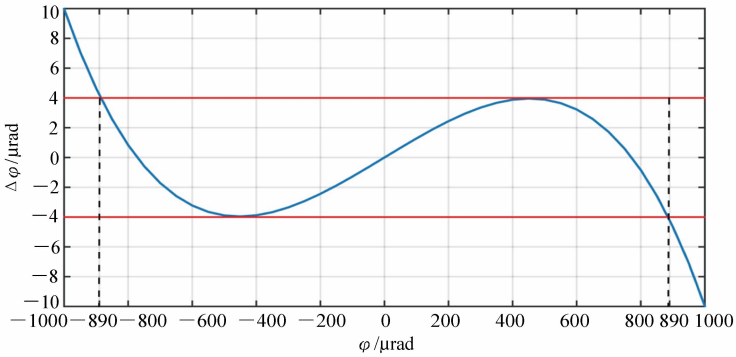

图 6 两光束均入射到 QPD 中心时由 DWS 技术引入的角度测量误差与入射光束偏角关系图

Fig. 6 Relationship between the measurement error induced by the DWS and angular offset when both beams vertically enter the QPD center

由图 6 可知,满足式(3)要求的入射偏角变化范围近似为 ±890 μrad,说明采用 DWS 技术可满足太极计划对精密指向过程的要求,实现优于 10 nrad/$\sqrt{\text{Hz}}$的指向精度要求。

4 结 论

本文首先介绍了空间引力波探测太极计划对激光指向的需求,为实现应用需求,太极计划指向调控系统将分为激光捕获与精密指向两个阶段。之后描述了拟采用的激光捕获方案的技术细节,依据对各阶段不确定范围的预算给出了太极计划对各级指向探测器的要求。最后对激光精密指向部分所需的关键技术进行了介绍,通过数值模拟方法论述了采用 DWS 技术实现 10 nrad/$\sqrt{\text{Hz}}$激光指向稳定性的可行性。目前对指向调控系统的研究主要集中在方案设计及参数确定上,对整个系统控制器的设计有待进一步的研究。

参考文献:

[1] HU W R, WU Y L. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 685-686.

[2] JIN G. Program in space detection of gravitational wave in Chinese Academy of Sciences[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840(1): 012009.

[3] 罗子人, 白姗, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, 43(4): 415-447.
LUO Z R, BAI SH, BIAN X, *et al*.. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4): 415-447. (in Chinese)

[4] 黄双林, 龚雪飞, 徐鹏, 等. 空间引力波探测——天文学的一个新窗口[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(1): 010404.
HUANG SH L, GONG X F, XU P, *et al*.. Gravitational wave detection in space—a new window in astronomy[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(1): 010404. (in Chinese)

[5] CIRILLO F, GATH P F. Control system design for the constellation acquisition phase of the LISA mission[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 154(1): 012014.

[6] CIRILLO F. Controller design for the acquisition phase of the LISA mission using a Kalman filter[D]. Pisa: Università di Pisa, 2007.

[7] HYDE T T, MAGHAMI P G, MERKOWITZ S M. Pointing acquisition and performance for the laser interferometry space

antenna mission[J]. *Classical and Quantum Gravity*,2004,21(5):S635-S640.

[8] JONO T,TOYODA M,NAKAGAWA K,*et al*.. Acquisition, tracking and pointing systems of OICETS for free space laser communications[J]. *Proceedings of SPIE*,1999,3692:41-50.

[9] LUO Z R,WANG Q L,MAHRDT C,*et al*.. Possible alternative acquisition scheme for the gravity recovery and climate experiment follow-on-type mission[J]. *Applied Optics*,2017,56(5):1495-1500.

[10] WUCHENICH D M R,MAHRDT C,SHEARD B S,*et al*.. Laser link acquisition demonstration for the GRACE Follow-on mission[J]. *Optics Express*,2014,22(9):11351-11366.

[11] HECHENBLAIKNER G. Measurement of the absolute wavefront curvature radius in a heterodyne interferometer[J]. *Journal of the Optical Society of America A*,2010,27(9):2078-2083.

[12] SHEARD B S,HEINZEL G,DANZMANN K,*et al*.. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE Follow-on mission[J]. *Journal of Geodesy*,2012,86(12):1083-1095.

[13] 董玉辉. 面向空间激光干涉引力波探测的精密指向和弱光锁相控制技术的研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
DONG Y H. Intersatellite interferometry:fine pointing and weak-light phase locking techniques for space gravitational wave observatory[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2015. (in Chinese)

[14] 梁斌,朱海龙,张涛,等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学,2016,9(1):16-29.
LIANG B,ZHU H L,ZHANG T,*et al*.. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. *Chinese Optics*,2016,9(1):16-29. (in Chinese)

[15] HYDE T T,MAGHAMIP G. Precision pointing for the laser interferometry space antenna mission[J]. *Journal of the Astronautical Sciences*,2003,113:497-508.

作者简介:

高瑞弘(1994—),男,辽宁大连人,博士研究生,主要从事空间引力波探测中的激光干涉测量方面的研究。E-mail:gaoruihong@imech.ac.cn

罗子人(1980—),男,理学博士,现任中国科学院力学研究所副研究员,硕士生导师,主要从事空间引力波探测中的激光干涉测量方面的研究。E-mail:luoziren@imech.ac.cn