

太极计划激光链路辅助功能方案设计及验证

张子恒^{1,2,3,4}, 范习谦^{1,2,3,4}, 靳刚^{1,4}, 罗子人^{1,4}, 刘河山^{4*}¹国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 浙江 杭州 310024;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;⁴中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 太极计划是由中国科学院主导的空间引力波探测任务,其目标是在深空中探测 0.1 mHz 至 1 Hz 频段的引力波信号。在太极计划中,激光链路的辅助功能是实现星间激光通信测距和时钟噪声传递。为实现引力波探测辅助功能在激光干涉链路中的集成,拟对同一激光干涉链路进行边带倍频时钟噪声传递(以消除时钟噪声)和伪随机码扩频调制(以实现星间激光通信)。本文介绍了太极计划通过激光链路实现星间时钟噪声传递及激光通信的需求、原理、方法,分析了二者的耦合关系。搭建光学激光链路,对实验现象及性能进行评估,确定相关实验参数,以确保倍频时钟噪声传递方案耦合星间激光通信方案整体可靠,满足太极计划需求。实验结果表明,在 0.1 Hz 至 1 Hz、0.1 mHz 至 0.5 mHz 频段内,时钟噪声抑制效果达到了优于 $2\pi \times 10^{-5}$ rad/Hz^{1/2} 的精度水平,同时通信误码率低于 10^{-6} 。这说明激光链路辅助功能的集成方案有效,为未来太极计划实现干涉仪辅助功能整体化集成奠定了实验和理论基础。

关键词 太极计划; 空间引力波探测; 时钟噪声传递; 星间激光通信

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL241483

1 引言

太极计划是由中国科学院主导的在空间引力波探测领域对深空中 0.1 mHz 至 1 Hz 频段的引力波信号进行探测的任务^[1]。太极计划确定采用由三个相距 300 万 km 的航天器构成等边三角形,基于激光外差干涉技术构建干涉仪系统^[2-4],对皮米级变化的光学路径进行探测。由于需要在超远距离、极低信噪比条件下依靠相位计提取主信号并抑制各项噪声,因此对测试质量微小位移的测量精度需要达到 1 pm/Hz^{1/2},相位计读出精度需要低于 $2\pi\mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[5-8]。由于航天器之间的距离过于遥远,每个航天器的信号处理都需要在各自的时钟基准下进行,因此,每个航天器都要搭载星载超稳振荡器(USO),以此来提供时钟基础^[9]。由于多普勒效应的影响,相位计测量的主干涉信号频率会在 5~25 MHz 之间波动。为了达到皮米级的测量精度,太极计划要求星载超稳振荡器的计时误差在 40 fs/Hz^{1/2} 以内^[10-11],目前尚未有达到此要求的星载超稳振荡器,需要对时钟噪声进行抑制,以满足要求。其主要思路为测量星间的时钟相对误差,即,采用时间延迟干涉(TDI)技术方案^[12-14],通过数据处理方法消除相位数据中的时钟噪声。因此,需要

通过激光链路对时钟噪声进行传递。另外,三星系统中的主卫星将与地面基地搭建通信链路,以实现信息交互以及对科学数据的采集分析。对于引力波探测,三颗卫星具有相同的激光器以及光路配置和电子学系统^[15]。这意味着从卫星可能探测到关键科学信息,而主卫星需要对所有卫星的关键数据进行采集。因此,需要在深空远距离下实现星间激光通信技术。太极计划要求数据传输速率高于 15 kb/s,且通信误码率低于 10^{-6} ,并且需要借助激光链路来实现星间通信测距功能^[16-17]。

太极计划的激光链路辅助功能主要包括时钟噪声传递消除以及星间激光通信测距。目前,消除时钟噪声传递的方案以 LISA 团队的 Bender 等于 1998 年提出的星间时钟传递方案最为典型^[18-19]。在该方案中,各卫星将各自星载超稳振荡器的时钟信号分别调制到主激光,在调制频率处产生两个激光边带,然后将这两个激光边带连同主信号一起发送至接收航天器与本地激光进行干涉。LISA 团队的研究起步较早,目前已经完成了时钟噪声传递方案的地面原理验证和各类噪声建模消减。LISA 团队的 Heinzl 等^[20]分别对采用功率合成器将 MHz 信号上变频至 GHz 信号以及采用数字分频器将 GHz 信号下变频至 MHz 信号作为采样时钟

收稿日期: 2024-12-31; 修回日期: 2025-02-02; 录用日期: 2025-03-03; 网络首发日期: 2025-03-05

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2023YFC2206200, 2020YFC2200104)

通信作者: *liuheshan@imech.ac.cn

的两种方案进行了测试,结果显示,采用分频器方案的时钟噪声抑制效果更优。在国内:太极计划团队设计了光学实验,对星间时钟噪声传递进行了地面原理验证,验证了基于电光调制器(EOM)的边带倍频传递时钟噪声方案的有效性,取得了 $0.05\sim 1\text{ Hz}$ 频段内噪声抑制优于 $2\pi\times 10^{-5}\text{ rad/Hz}^{1/2}$ 的结果^[21];天琴计划团队对用于边带调制时钟噪声的电光调制器进行了相关研究和测试,实验结果表明,用于探测引力波信号的电光调制器在整个测试频段内的噪声水平符合要求^[22]。对于星间激光通信测距系统,资料显示,2011年,LISA团队在时钟采样频率为 50 MHz 、通信比特率为 12 kb/s 、伪随机码比特率为 1.5625 Mb/s 、激光功率为 100 pW 的条件下,实现了误码率优于 6×10^{-4} 和测距精度优于 0.7 m ^[23]。在国内:天琴计划团队在 10 km 光纤伪随机码调制双向激光测距中实现了 1.2 m 的测距精度^[24];太极计划团队在 19.5 kb/s 通信速率下实现了 82.1 cm 的测距精度,并且误码率低于 10^{-6} ,符合太极计划指标^[25]。

目前,面向空间引力波探测激光链路辅助功能的研究较为分化,各项功能均在独立的系统下进行,尚没有在同一激光链路下对干涉仪的辅助功能耦合性进行测试的研究报道。太极计划要求干涉仪激光链路辅助

系统同时集成时钟噪声传递以及星间激光通信测距系统,而测距系统依赖于伪随机码的自相关性,属于通信系统参数结构下的附属功能。因此,在同一激光链路下同时实现时钟噪声传递与星间激光通信,并对其耦合作用产生的影响进行研究具有重要意义。本团队分别对时钟噪声传递及星间激光通信的原理进行分析,进而对参数进行调控,以便改进耦合效应。本文安排如下:第二节主要介绍太极计划中集成时钟噪声传递和星间激光通信的方案与参数设计;第三节介绍光学实验设计,分析测量的相关参数和系统构成;第四节对实验耦合结果进行比较,并对现象进行分析,调整参数结构后对系统进行改进,完成激光干涉时钟噪声传递方案验证以及激光通信指标。

2 辅助功能耦合方案与参数设计

2.1 耦合方案

在太极计划中,三个相距 300 万 km 的航天器构成等边三角形,主卫星与从卫星之间需要搭建通信链路并进行时钟同步。太极计划星间激光干涉方案如图1所示。

构成等边三角形的三颗卫星两两之间通过激光器和电光调制器将所需发送的通信信息以及时钟信息调

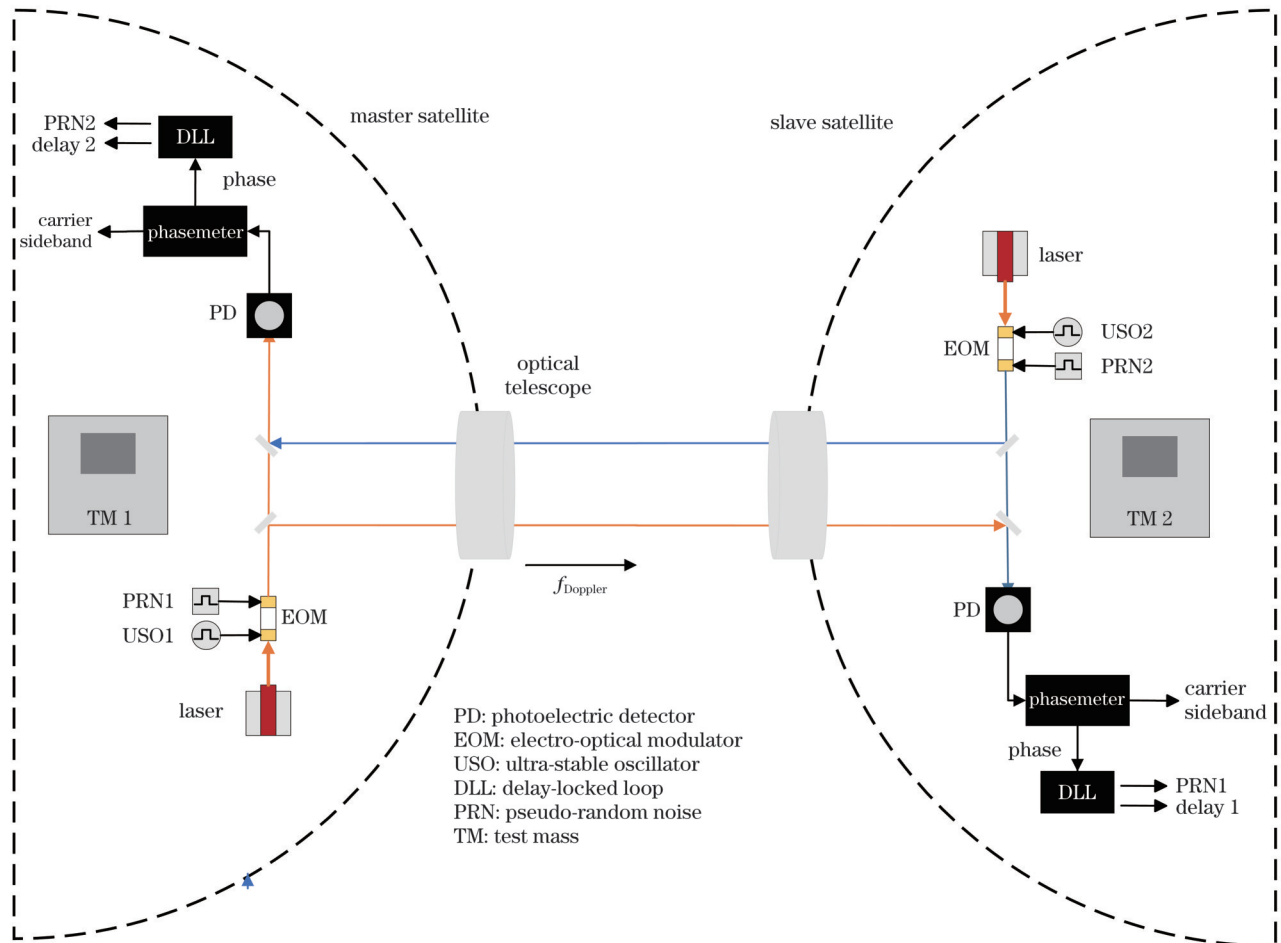


图1 太极计划星间激光干涉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inter-satellite laser interference in the Taiji Program

制入激光载波并发射至远端卫星,两端卫星接收远端卫星经 300 万 km 传输而来的 pW 级激光信号,并将其与本地激光进行干涉。之后,相位计对干涉数据进行采集和处理。

2.2 调制指数设计

太极计划要求激光链路辅助系统同时对倍频时钟信号和伪随机码进行调制,但调制会导致激光载波能量向边带倾斜,为了不对主干涉信号产生过大影响,同时抑制高阶边带的影响,需要对倍频时钟信号调制深度 m_{uso} 进行调控。星间通信系统基于直接序列扩频技术,采用二进制相移键控(BPSK)调制方案,将 Weil 型伪随机码经电光调制器调制入光学链路中,同时将倍频时钟信号与伪随机码调制入激光载波中,得到载波激光波动方程,即

$$P(t) = \cos \left[2\pi f_c t + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_n p(t - kT_c) + m_{\text{uso}} \cos(2\pi f_m t) \right] \quad (1)$$

式中: f_c 表示拍频载波频率; m_{prm} 表示伪随机码调制深度; c_n 表示伪随机码; $p(t - kT_c)$ 表示脉冲函数; m_{uso} 为时钟噪声调制深度; f_m 为倍频时钟频率。由于本文的研究对象之一是超稳振荡器的时钟噪声,因此实际的时钟调制信号为 $m_{\text{uso}} \cos[2\pi f_m t + \psi(t)]$, 其中 $\psi(t)$ 为模拟数字转换器(ADC)采样抖动引起的时钟相位噪声。当采用合适的调制深度时,时钟噪声的高阶边带可以忽略,发送端调制后的激光信号按照贝塞尔函数展开可以得到

$$P_1 = \cos \left\{ 2\pi f_c t + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n1} p(t_1 - kT_c) + m_{\text{uso}} \cos[2\pi f_{m1} t + l_1 \psi_1(t)] \right\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_{\text{uso}}) \cos \left[2\pi f_c t + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n1} p(t_1 - kT_c) + n l_1 \psi_1(t) + n \cdot 2\pi f_{m1} t \right] \approx \sum_{n=-1}^1 J_n(m_{\text{uso}}) \cos \left[2\pi f_c t + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n1} p(t_1 - kT_c) + n l_1 \psi_1(t) + n \cdot 2\pi f_{m1} t \right] \quad (2)$$

式中: $J_n(m_{\text{uso}})$ 表示第一类 n 阶贝塞尔函数; l_1 为本地航天器的倍频系数; $\psi_1(t)$ 表示本地超稳振荡器的时钟相位噪声。同理可得接收端调制后的激光信号为

$$P_2 = \cos \left\{ 2\pi f_c t' + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n2} p(t_2 - kT_c) + m_{\text{uso}} \cos[2\pi f_{m2} t' + l_2 \psi_2(t')] \right\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_{\text{uso}}) \cos \left[2\pi f_c t' + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n2} p(t_2 - kT_c) + n l_2 \psi_2(t') + n \cdot 2\pi f_{m2} t' \right] \approx \sum_{n=-1}^1 J_n(m_{\text{uso}}) \cos \left[2\pi f_c t' + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n2} p(t_2 - kT_c) + n l_2 \psi_2(t') + n \cdot 2\pi f_{m2} t' \right] \quad (3)$$

式中: l_2 为远端超稳振荡器的时钟倍频系数; t' 表示远端基准时钟; $\psi_2(t')$ 表示远端超稳振荡器的时钟相位噪声。在实际太空环境中,卫星会产生相对运动,依据多普勒效应,实际接收端信号应用 $t' = at$ 替换,这里 $a = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}$, 其中 c 为光速, v 为卫星间相对运动速率。

两束激光干涉后,忽略幅值的大小,最终得到拍频信号,其中主信号为

$$P_m \propto J_0^2(m_{\text{uso}}) \cos \left[2\pi f_c (1-a)t + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n1} p(t_1 - kT_c) + m_{\text{prm}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{n2} p(at_2 - kT_c) \right] \quad (4)$$

干涉后的主信号相位中包含着由两端卫星各自调制入伪随机码的通信信息,因此,本地接收端可利用伪随机码的自相关性对发送端发出的信息进行同步和提取。

载波拍频的上下边带信号为

$$P_{\text{up}} \propto J_1^2(m_{\text{uso}}) \cos \left\{ 2\pi [f_c(1-a) + f_{m1} - af_{m2}]t + l_1 \psi_1(t) - l_2 \psi_2(at) \right\} \quad (5)$$

$$P_{\text{dp}} \propto J_1^2(m_{\text{uso}}) \cos \left\{ 2\pi [f_c(1-a) - f_{m1} + af_{m2}]t - l_1 \psi_1(t) + l_2 \psi_2(at) \right\} \quad (6)$$

可以看到:上下边带信号主要由倍频后的时钟噪声构成,边带的幅值受时钟噪声调制深度 m_{uso} 的影响,边带中的时钟噪声信息得以放大,成为边带信号中的主要信息,但其会受到伪随机码调制深度的影响。当伪随机码调制深度过大时,其可能会淹没时钟噪声,因此需要采用较小的伪随机码调制深度,以免对时钟噪声传递产生阻碍。本文采用的参考基准时钟为 10 MHz,拟将其本地端与远端分别倍频至 2.4 GHz 与 2.401 GHz,产生的上下边带差频为 1 MHz,倍频放大系数约为 240,相位计采样时钟为 80 MHz。

按照太极计划的要求,为了使调制过程不向引力

波探测信号主载波引入过多的残留相位噪声,边带的功率总和不能超过主激光功率的十分之一。对于通信测距系统中的激光功率,其占用的能量应不超过 1%。若采用双极性码调制方法,对应调制信号的范围为 $[-1, 1]$,当能量占比为 1% 时,所对应的调制深度为 0.1 rad,这会在激光载波上对应产生 -0.1 rad 与 0.1 rad 的相位偏移。根据现场可编程门阵列(FPGA)的运算性质,采用双极性码调制方法时,需要用两位比特位宽进行控制。同时,在激光链路中,对激光进行调制的电光调制器仅能由一位比特控制。为了更简便合理地实现调制操作,本研究采用单极性码控制方案进行伪随机码调制。此时,激光载波中 1% 的能量对应的单极性码调制深度为 0.2 rad,在激光载波上会产生 0 与 0.2 rad 的相位偏移。本研究将对激光链路同时进行倍频时钟信号和通信伪随机码调制,图 2 给出了激光功率与调制深度之间的关系。

由图 2 可以看出,激光功率的 5% 对应单边边带调制深度 m_{iso} 为 0.45 rad,激光功率的 1% 对应伪随机码调制深度 m_{pm} 为 0.2 rad。这是满足太极计划要求的最

(a) $m_{\text{pm}}=0.2$ rad $m_{\text{iso}}=0.45$ rad

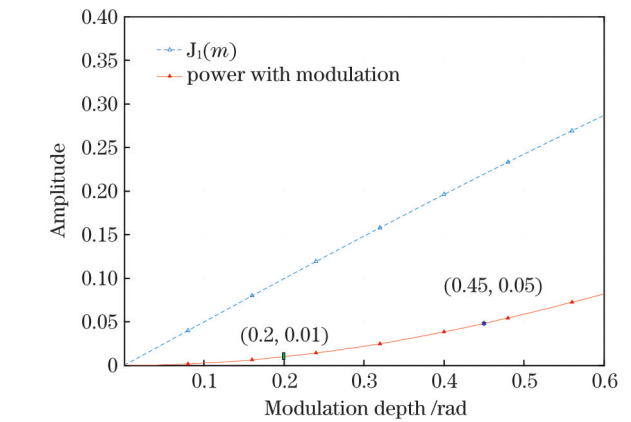
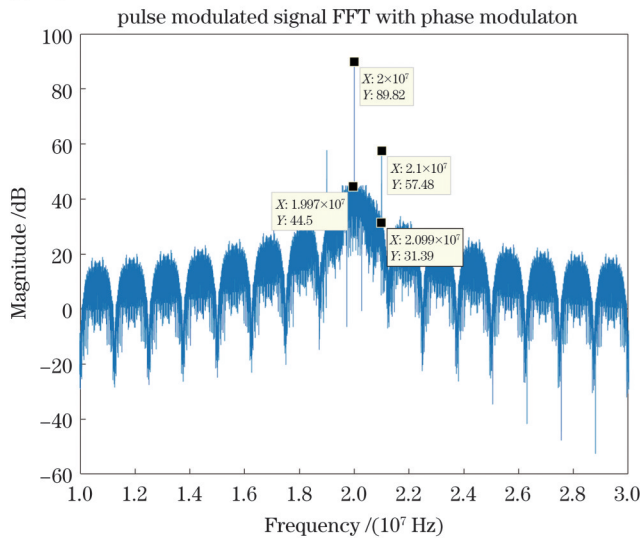


图 2 激光功率与调制深度的关系

Fig. 2 Relationship between laser power and modulation depth

宽限度要求。在实际的试验中,为了满足各自信号的有效性以及功能性,需要对两种调制深度进行调整,以实现时钟噪声传递和通信功能同步。图 3 展示的是理想状态下 20 MHz 载波拍频信号的频域仿真图,其中伪随机码调制深度固定为 0.2 rad,倍频时钟调制深度分别为 0.45 rad(左图)和 0.1 rad(右图)。

(b) $m_{\text{pm}}=0.2$ rad $m_{\text{iso}}=0.1$ rad

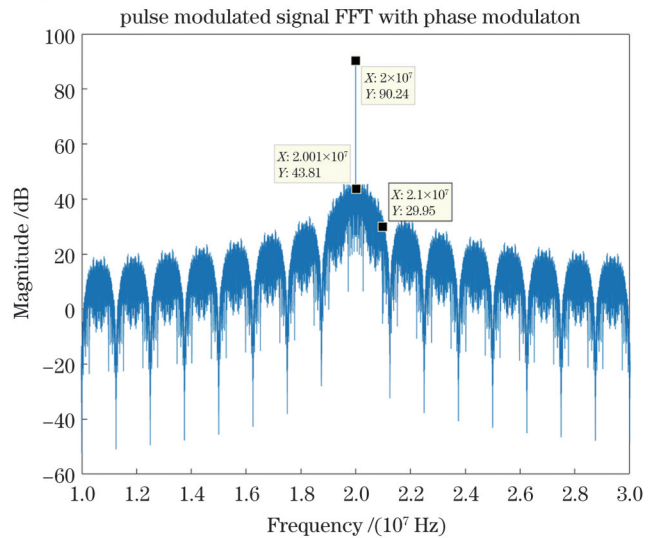


图 3 拍频信号的频域仿真图。(a)边带可见;(b)边带淹没

Fig. 3 Simulation diagrams of the frequency domain of the beat frequency signal. (a) Sidebands are visible; (b) sidebands are submerged

由于携带通信数据的伪随机码调制会以主信号为中心向两侧形成多阶旁瓣,旁瓣值对于测量的主信号以及用于传递时钟噪声的边带信号来说等价于噪声,若边带调制深度过低,将会导致边带信号完全淹没在伪随机码中,进而导致相位计无法锁定边带信号。在图 3 中,若将伪随机码视为噪声,则主干扰信号与边带信号的信噪比分别约为 45 dB 与 22 dB,主信号与边带信号的信噪比为 32 dB。通过降低伪随机码与边带调制深度能够提高主干扰信号的信噪比,而边带信号的信噪比主要受时钟信号调制深度和伪随机码调制深度的协同影响,虽然更大的时钟信号调制深度和更小的伪随机码调制深度能使边带信噪比得到提高,但同时

也会降低主信号比边带信噪比。针对伪随机码与边带调制深度的不同组合方式引起的信噪比差异问题,研究了边带比旁瓣、主信号比旁瓣、主信号比边带信噪比与两种调制深度之间的关系,如图 4 所示。

主信号信噪比主要受伪随机码调制深度的影响,并随伪随机码调制深度的减小而增大。边带信噪比同时受伪随机码调制深度和时钟信号调制深度的影响:当伪随机码调制深度一定时,时钟信号调制深度越大,边带信噪比越高;当时钟信号调制深度一定时,伪随机码调制深度越大,边带信噪比越小。伪随机码调制深度和时钟信号调制深度这两者协同影响边带信噪比,但若其差值过大,即伪随机码调制深度过低,就会导致

通信系统本身的能量值过低,数据判决系统解析较为困难。实际的实验室环境中存在环境噪声,这会导致伪随机码旁瓣淹没在背景噪声中,后文将对此情形进行分析。主信号比边带信噪比与时钟调制深度成负相

关,减小时钟调制深度能够提高主信号比边带信噪比。为了满足太极计划的测量要求,且尽可能提高主信号的信噪比,初步拟采用时钟噪声调制深度为 0.3 rad、单极性伪随机码调制深度为 0.2 rad 的调制方案。

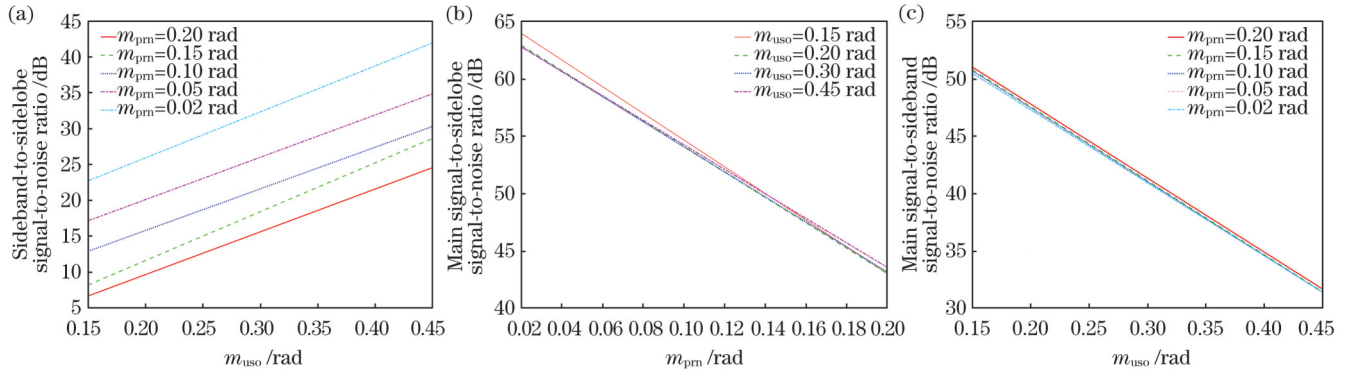


图 4 调制深度与各信号信噪比的关系。(a)调制深度与边带比旁瓣信噪比的关系;(b)调制深度与主信号比旁瓣信噪比的关系;(c)调制深度与主信号比边带信噪比的关系

Fig. 4 Relationships between modulation depth and signal-to-noise ratio of each signal. (a) Relationship between modulation depth and sideband-to-sidelobe signal-to-noise ratio; (b) relationship between modulation depth and main signal-to-sidelobe signal-to-noise ratio; (c) relationship between modulation depth and main signal-to-sideband signal-to-noise ratio

2.3 通信系统参数设计

引力波探测的核心模块是相位计(目前相位计采用的是 80 MHz 的采样频率),而通信系统则作为辅助功能模块。为了兼容相位计的核心功能和数据输出,最大程度地减小跨时钟域交换数据带来的误码风险,本研究使用的通信系统也采用与相位计同步的 80 MHz 时钟。

本研究所采用的扩频方式为直接序列扩频,伪随机码选取的是 1024 位 Weil 型码片。Weil 型伪随机码的自相关函数表现为理想的特征,具有尖锐的峰值,并且旁瓣值较低,在适宜的调制深度下对主载波信号的影响较小,易于实现高精度的信号处理操作。将待传

输的数据与伪随机码进行异或操作,能够使通信数据频带展宽并附着在伪随机码中。每一比特位数据与 64 位伪随机码进行异或操作,一组完整的伪随机码能够携带 16 位比特数据。在 80 MHz 的时钟频率下,对每个复合码元进行 64 次采样,最终得到的携带通信数据的复合码速率为 1.25 Mb/s,对应通信数据的速率为 19.5 kb/s。参数结构如图 5 所示。

通信数据与各自对应的伪随机码片进行异或操作后,数据位 1 对应的伪随机码片段会产生翻转,单个比特下的伪随机码积分结果为 -64 ,在对每个复合码元采样 64 次的情况下最终得到的积分值为 -4096 ,而

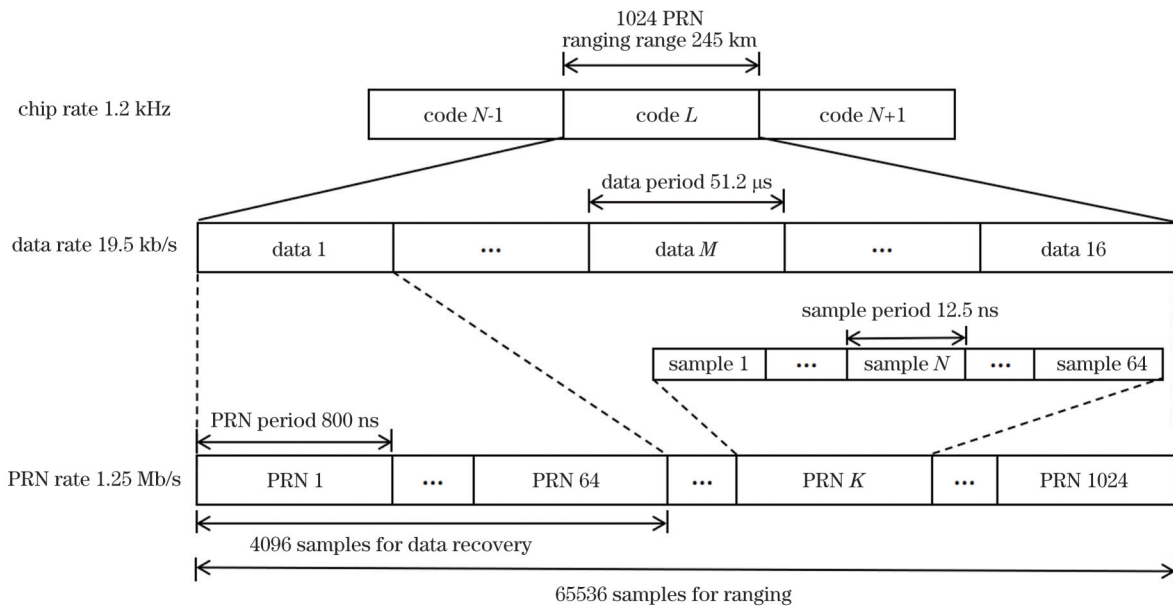


图 5 通信系统参数的结构图

Fig. 5 Structural diagram of communication system parameters

数据位 0 对应的伪随机码片段则会保持,积分后得到的值为 4096。如图 6 所示,根据积分结果的正负即可判断原始数据。但是,由于前端 FPGA 平台以及电光调制器的限制,采用单极性码调制方案仅能得到伪随机码自相关后 0 和 1 的值,并不能获取伪随机码的完整能量,最终的积分值仅有码元完整长度的二分之一,从而导致伪随机码的自相关性能大大降低。通信系统在 FPGA 平台上的实现方案如图 7 所示,对相位计输出的相位数据进行抽样判决,通过设定门限值将原本的单极性码转换成双极性码。对于单个数据比特,其对

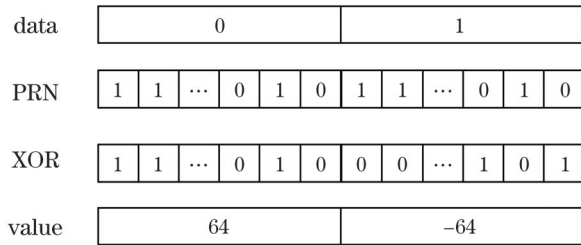


图 6 数据判断示意图

Fig. 6 Schematic diagram of data judgment

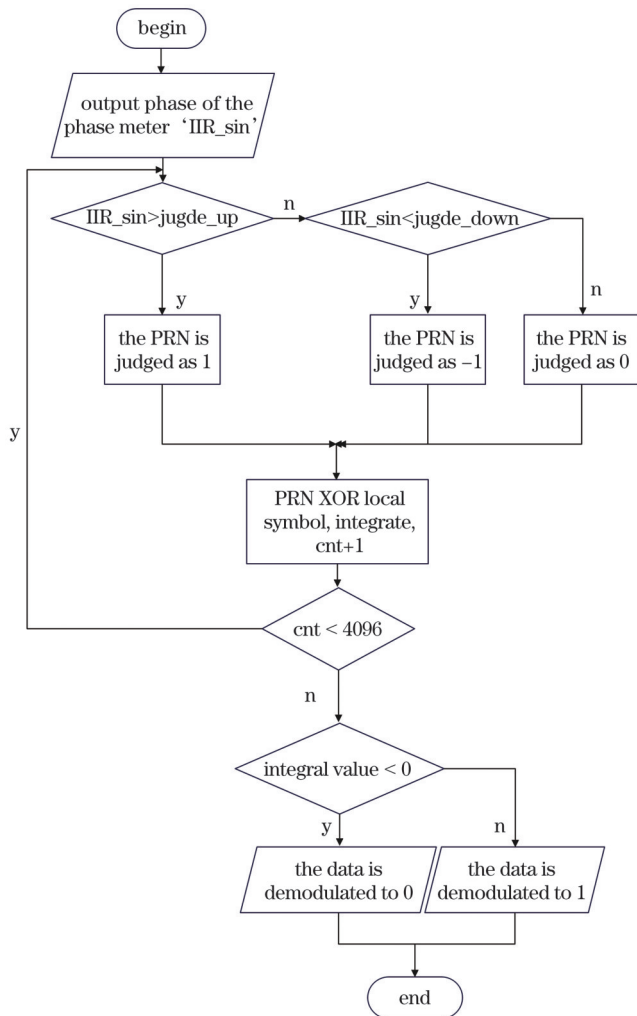


图 7 数据恢复流程图

Fig. 7 Flow chart of data recovery

应 64 位伪随机码,并且每个伪随机码元经历 64 次时钟周期采样,总计判决时钟周期为 4096。将周期为 4096 的计数器作为数据边界,将接收端数据与本地伪随机码进行相关积分运算,根据积分值的正负即可判断当前判决周期下的原始数据值。然后通过移位寄存器将数据进行存储和串并转换,得到的最终数据经串口发送至上位机进行误码率分析。

3 实验验证设计及光路搭建

激光通信与时钟噪声传递系统的激光链路设计和光路实物如图 8 所示。激光器发出的激光经 50:50 分束器后产生两路光信号,这两路光信号通过声光调制器(AOM)产生 20 MHz 的差频。电光调制器将信号发生器发出的倍频时钟信号和相位计平台发送的携带通信信息的伪随机码调制入激光载波中,由于电光调制器输入端口位宽仅为 1 位,因此采用带宽范围为 0~3 GHz 的功率合成器进行倍频时钟噪声与伪随机码的叠加。此后,两路激光束再经由 50:50 分束器分为两路,其中一路作为发送端通过环形器发送至远端,另一路作为接收端与远端激光进行干涉,经衰减器后最终由光电探测器接收。由于采用两台相位计模拟两地卫星,因此需要使用两台信号发生器(作为独立的时钟源)为两台相位计的 ADC 提供时钟信号,以便对光电探测器发出的模拟信号进行采样。并且,两台相位计的基准时钟分别对应调制入激光载波的倍频时钟。

倍频时钟信号由信号发生器发出,通过设置,使两路待调制的时钟信号产生一定的差频。这两路时钟信号经激光干涉后,会在主干涉信号两侧产生边带,边带与主干涉信号的频率差为所调制倍频时钟信号的差值。通信数据由上位机发出,并在电子学系统中与本地伪随机码进行异或操作,得到携带通信信息的复合码。复合码经两路电光调制器分别调制后转化到载波相位中,此时光电探测器接收到的载波拍频信号是声光调制器控制产生的 MHz 级干涉信号。主干涉信号相位中携带着通信信息,上下边带携带着时钟噪声。相位计能够分别提取主干涉信号和上下边带的频率信息,用于对时钟噪声进行分析和压制,同时,相位计还能从主干涉信号相位中提取伪随机码对数据进行解调和扩,实现通信功能。具体的测量原理如图 9 所示。

以相位计 1(PM 1)为例,其 4 个通道分别接收来自光路的激光载波信号、远端时钟的基准信号以及本地时钟的基准信号。两台信号发生器将其自身的基准时钟提供给两台相位计,作为 ADC 采样时钟。在时钟同步的情况下,同一台相位计对同一信号测量的结果是不包含时钟噪声的,能最大程度地展现其最佳工作性能。将作为参考时钟的信号发生器输出的 10 MHz 同频同相信号一分二,分别输入相位计 c、d 通道。将

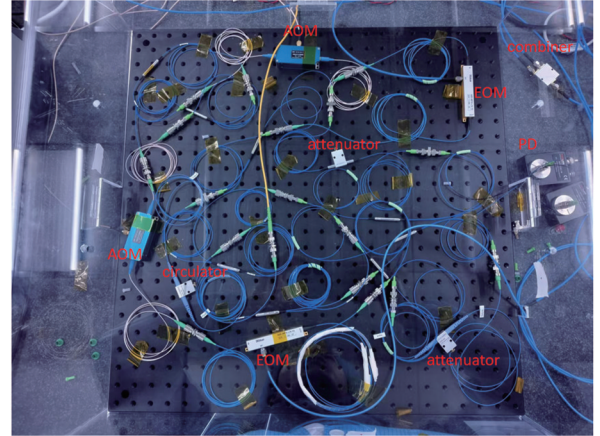
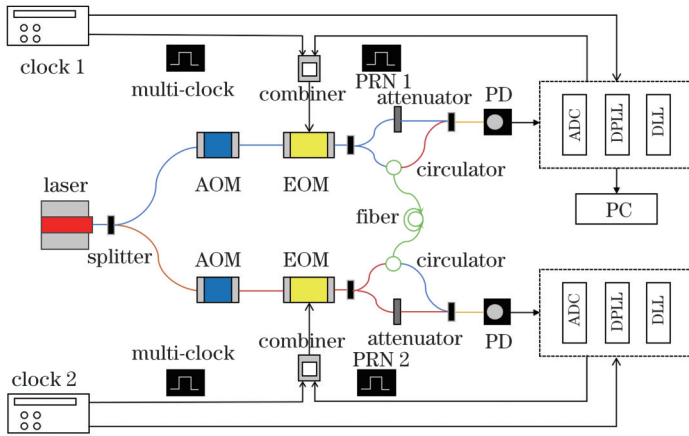


图 8 激光链路设计(左)与光路实物图(右)

Fig. 8 Laser link design (left) and physical diagram of optical path (right)

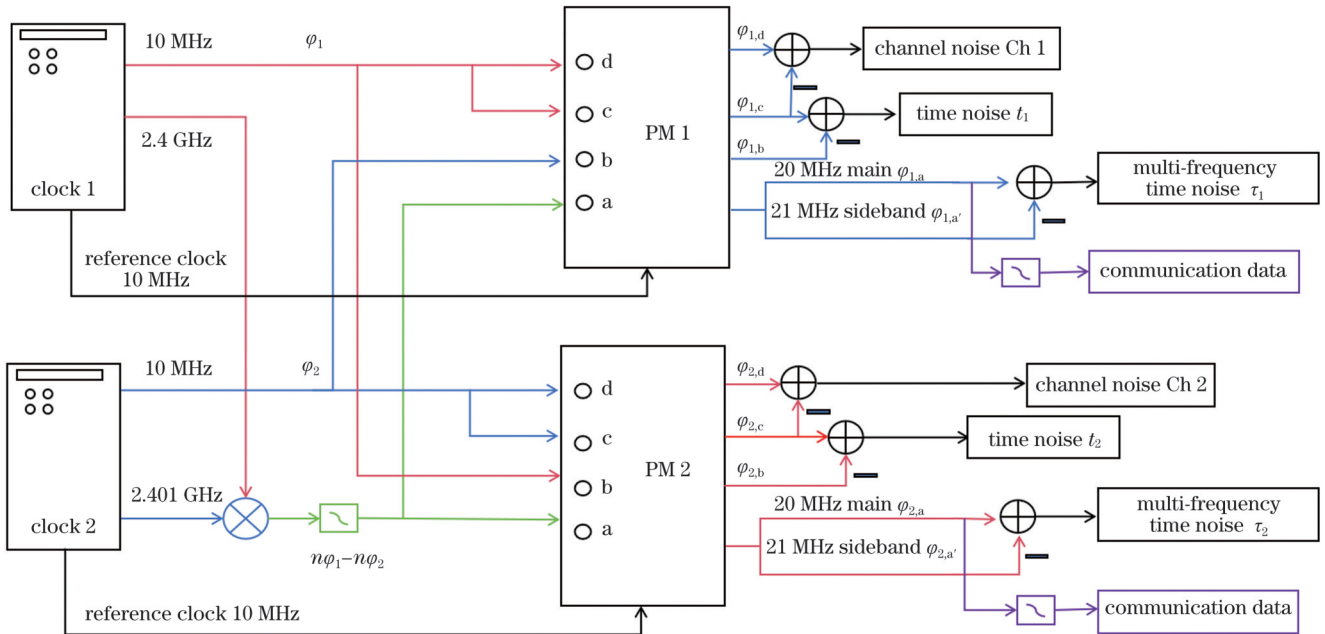


图 9 相位计测量信号的原理图

Fig. 9 Schematic diagram of the signal measured by the phase meter

c、d通道的测量结果进行共模处理,所得结果即为相位计的通道噪声,如式(7)所示。该通道噪声可以作为评价相位计工作性能的参照。

$$N_{\text{Ch1}} = \varphi_{1,c} - \varphi_{1,d} \quad (7)$$

式中: N_{Ch1} 表示相位计的通道噪声; $\varphi_{1,c}$ 、 $\varphi_{1,d}$ 分别表示 PM 1 对 c、d 通道信号的测量结果。

相位计的 b 通道接收来自远端信号发生器的时钟源 φ_2 。对于在同一采样时钟下的 b、c 通道,由于没有经过光路器件和电子学器件的干扰,两路信号能够较为本质地反映两端时钟源之间的差异,因此 φ_1 与 φ_2 的差值即为所需要传递的时钟噪声,如式(8)所示。

$$t_1 = \varphi_{1,b} - \varphi_{1,c} \quad (8)$$

激光拍频信号由本地激光与远端激光干涉形成,其中两路激光各自包含经由功率合成器与电光调制器作用后的时钟信号和通信信息,最终由光电探测器接

收转换后送入相位计的 a 通道。由于向本地激光中调制了 2.4 GHz 的倍频时钟,而远端激光的调制时钟为 2.401 GHz,因此会在干涉拍频信号主频段附近产生 3 个峰,即 20 MHz 主频以及 19 MHz 和 21 MHz 边带。相位计能够同时提取这三个频段的相位信息,其中倍频时钟噪声为

$$\tau_1 = \varphi_{1,a} - \varphi_{1,a'} \quad (9)$$

τ_1 是两台信号发生器之间的时钟差异经约 240 倍放大后的结果。通过将倍频时钟噪声除以对应放大倍数,并将其与相同采样时钟下测量的时钟噪声作差,能够得到消除时钟噪声的结果,如式(10)所示。该结果作为共模噪声,反映了激光边带法传递时钟噪声的有效性。

$$N_{\text{Com1}} = \frac{\tau_1}{n} - t_1 = \frac{\varphi_{1,a} - \varphi_{1,a'}}{n} - (\varphi_{1,b} - \varphi_{1,c}) \quad (10)$$

此外,激光拍频信号的相位中还含有通信数据,利用滤波器可将主频信号中的相位信息抽取出来,进行

抽样判决后再送入延迟环中进行数据恢复。

实验相关参数如表 1 所示。

表 1 参数设计与实际值

Table 1 Parameter design and actual values

Parameter name	Theoretical value	Actual value
Sampling clock /MHz	80	80
Data rate /(kb/s)	19.5	19.5
PRN rate /kHz	1.2	1.2
Composite code rate /(Mb/s)	1.25	1.25
Interference frequency /MHz	5 to 25	20
Sideband frequency /MHz	$f_{\text{inter}} \pm 1$ MHz (f_{inter} : interference frequency)	19, 21 MHz
Pseudo-random code modulation depth /rad	<0.2 (unipolar code)	0.2, 0.1
Multiplied clock modulation depth /rad	<0.45 rad	0.3 rad
Frequency multiplication factor	Approximately 240 times	240, 240.1
Received optical power	pW level	28 μ W

由于实验条件为光纤环境,受探测器与光学器件等的限制,实验过程中有效采集所需的光功率为 μ W 级。另外,在信号发生器功率输出限制以及电子学器件能量损耗的影响下,经过功率合成器的倍频时钟信号与伪随机码调制信号叠加后所能达到的最大调制深度为 0.3 rad。在此条件下进行激光链路辅助功能方案

的验证。

4 结果与讨论

4.1 时钟噪声传递结果

按照上文设计的方案进行光学实验,得到的结果如图 10 所示。

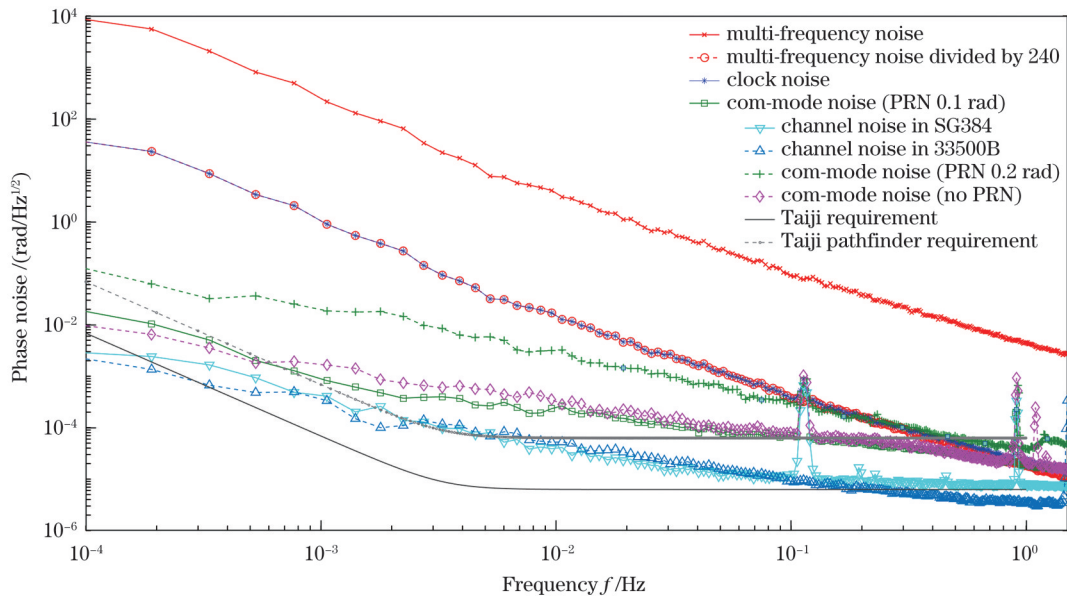


图 10 时钟噪声测量结果

Fig. 10 Graph of the measurement results of clock noise

对于同一信号,将不同通道之间的 ADC 抖动引入的相位读出误差定义为相位计通道噪声。在 80 MHz 的采样时钟下,根据香农定理,理论上可有效采集 40 MHz 及以下频率的信号。太极计划探测引力波信号的目标频率为 5~25 MHz,本实验采用 20 MHz 的干涉频率。图 10 中,下三角标记实线与上三角标记虚线分别为两种信号发生器的通道噪声曲线,可以看出:在同一时钟下,相位计的通道噪声曲线最低,并且基本能

够满足测量要求;高频信号发生器 SG384 的时钟噪声曲线在 0.1 Hz 处出现了峰值,而采用 KEYSIGHT 33500B 信号发生器在同频下复测没有发现此峰值,表明此峰值为高频信号发生器 SG384 本身的相位噪声。“*”标记实线是相位计测量的不同时钟体系下两台信号发生器的参考时钟,呈现 $1/f$ 特性,表明时钟噪声较大。“×”标记实线是通过拍频信号传递的倍频时钟噪声,其经 240 倍缩放后如圆形标记虚线所示,其整体上

与时钟噪声曲线基本一致,呈现出共模效果。

“+”标记虚线是在时钟噪声调制深度为 0.3 rad、伪随机码调制深度为 0.2 rad 条件下的时钟噪声抑制结果。依据上文分析,在同一激光载波中同时耦合时钟噪声信号和伪随机码信息会使激光边带受伪随机码调制深度的影响,从而使得信噪比在一定程度上被削弱。此方案下拍频信号的频域与相位计采集到的信号时域如图 11、12 所示。

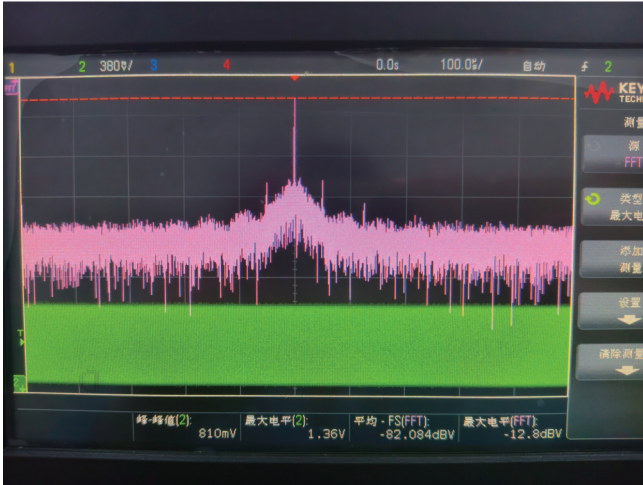


图 11 拍频信号频域图($m_{pm}=0.2$ rad)

Fig. 11 Frequency domain diagram of the beat frequency signal ($m_{pm}=0.2$ rad)

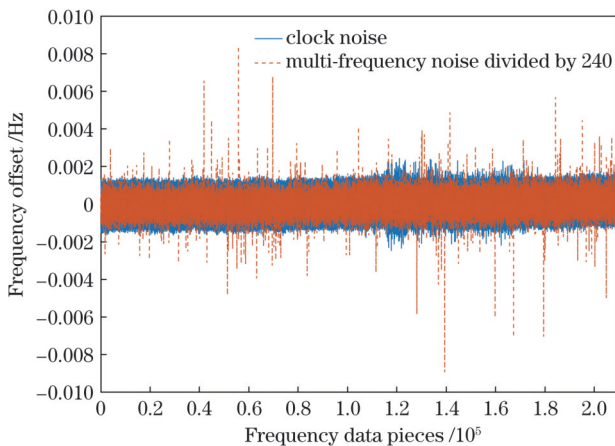


图 12 相位计采集数据的频率图($m_{pm}=0.2$ rad)

Fig. 12 Frequency chart of data acquisition by the phase meter ($m_{pm}=0.2$ rad)

从示波器显示中可以看到拍频信号中的成分包括激光干涉频率下的主信号、电光调制器作用下的倍频时钟信号以及伪随机码脉冲引起的上下边带和多阶旁瓣。受实验环境及链路中光学器件的影响,拍频信号中的主信号比旁瓣信噪比约为 40 dB(示波器上的每一格等于 20 dB),边带信号比旁瓣信噪比约为 12 dB。这些值由于受光路器件噪声及实验环境影响,相较于仿真值偏低。在此信噪比下,相位计采集的边带信号如图 12 中的虚线所示。与实线表征的时钟噪

声参考信号相比,二者整体频率锁定效果基本一致,但边带信号存在部分毛刺数据,导致两者谱密度曲线的共模一致性降低,存在较大的耦合影响。因此,需要降低伪随机码调制深度,以提高边带信噪比。

图 10 中的正方形标记实线是降低伪随机码调制深度至 0.1 rad 时的时钟噪声抑制结果,此方案下拍频信号的频域图以及相位计采集的数据分别如图 13 和图 14 所示。

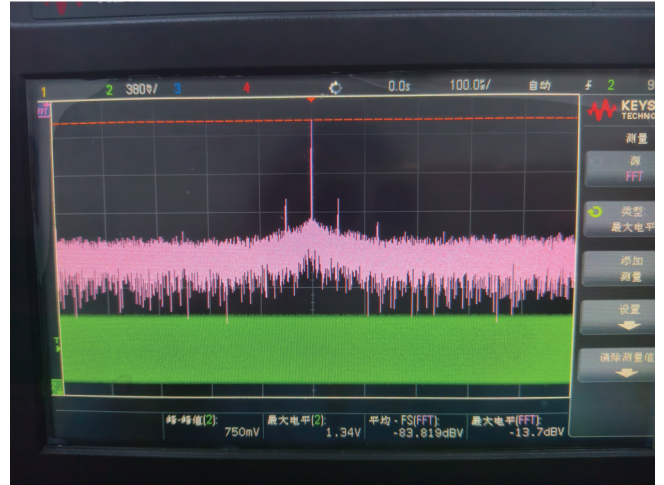


图 13 拍频信号的频域图($m_{pm}=0.1$ rad)

Fig. 13 Frequency domain diagram of the beat frequency signal ($m_{pm}=0.1$ rad)

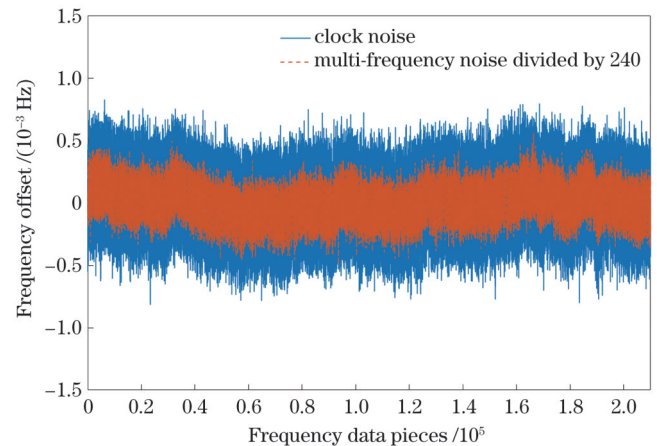


图 14 相位计采集数据的频率图($m_{pm}=0.1$ rad)

Fig. 14 Frequency chart of data acquisition by the phase meter ($m_{pm}=0.1$ rad)

在此方案下,主信号比旁瓣信噪比约为 45 dB,边带比旁瓣信噪比约为 20 dB,相较于前一种方案得到了提升。相位计采集激光干涉拍频信号的频率较为稳定,光路传递的倍频时钟信号与电子学参考时钟信号的频率偏移整体一致,消除了毛刺数据。图 10 中的菱形标记虚线是仅加入 0.3 rad 时钟噪声调制深度时的时钟噪声抑制结果。作为时钟噪声传递方案的参考曲线,该曲线的精度代表目前实验条件及方案下不受伪随机码调制影响时的结果。由于测量环境的影响,相

位计测量结果具有一定的波动性,这导致未加入伪随机码调制的曲线在部分频段上与加入伪随机码调制后的共模结果存在差异,但二者整体上位于同一精度水平,可以作为参照。实验方案以 MHz 级信号作为基准信号,通过信号发生器内置锁相环进行系数有差别的上变频,生成 GHz 级的倍频时钟信号。这一过程可能会受信号发生器性能的限制,从而引入额外的变频相位噪声。LISA 团队在实验中验证了不同类型的上变频系统,结果显示,仅有定制的 Rupptronik 合成器达到了相位计通道噪声水平^[26]。另外,实验中的调制信号经过电光调制器后作用于激光载波,而电光调制器是基于电光效应工作的,施加电压到其电光晶体上,就会导致电光晶体的折射率发生变化,从而导致通过该晶体的光波特性的变化。同时,电光调制器受温度的影响较为明显,温度改变会导致晶体的晶格结构发生微小变化,从而影响其折射率和电光系数,进而向激光载波相位中引入额外偏差。最终将时钟噪声共模消减后得到的曲线如图 10 中正方形标记实线所示,其精度与未加入伪随机码调制的单纯时钟噪声传递抑制结果处于同一量级,表明此方案下伪随机码调制产生的不利影响已被消除。相较于上一调制方案,该方案的整

体精度提升了约一个量级,在 0.1~1 Hz、0.1~0.5 mHz 频段达到优于 $2\pi \times 10^{-5}$ rad/Hz^{1/2} 的精度,满足太极探路者的要求,验证了在激光链路中同时耦合伪随机码与时钟信号调制后时钟噪声传递方案的有效性。

4.2 耦合调制对通信系统的影响

上文提出的降低伪随机码调制深度的方案虽然在一定程度上提高了时钟噪声传递的性能,但却对通信系统的可靠性造成了一定影响。伪随机码调制深度的下限在理想无噪声情况下仅受锁相环解调相位数据位宽的限制,理论上非常小,但在实际实验中,受实验环境中背景噪声的影响,过低的伪随机码调制深度会导致通信数据被环境噪声淹没。而时钟调制深度的下限受伪随机码调制深度的限制,随着伪随机码调制深度减小,载波信号中携带通信信息的相位的变化更不明显。若调制深度过低,将会导致伪随机码的准确判决较为困难,在原有的判决周期下导致对部分数据的积分判决出现错误,从而导致误码率大幅上升。因此,需要改进判决系统,以实现高精度通信传输。图 15 上下两行图分别为单极性码调制 m_{pm} 为 0.2 rad 和 0.1 rad 时相位计的输出相位表现。

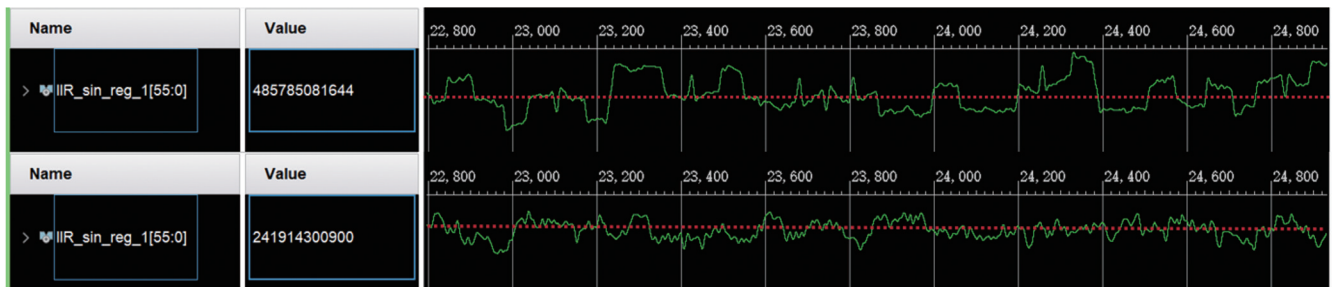


图 15 主信号的相位数据图

Fig. 15 Phase data diagram of the main signal

由于存在码间串扰,激光干涉后会存在三种状态。较低调制深度下的相位对应的 PRN 的状态较为不易判决,数据恢复误码率较高,恢复结果如图 16 所示。

采样码元范围中会出现较多的 0 状态码元,而 0 状态码元无法为数据判决积分提供效益。因此,对一个

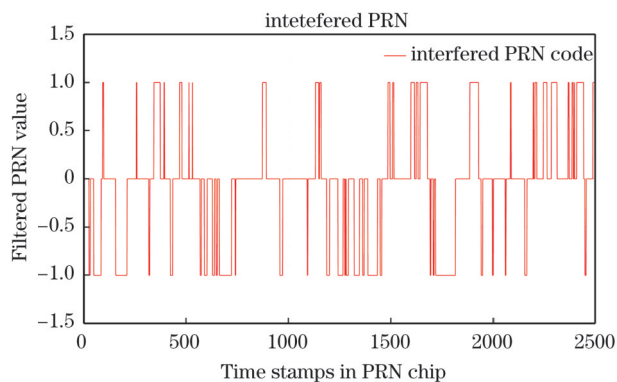


图 16 码元解调结果(一)

Fig. 16 Demodulation result of code elements (part one)

数据点的积分判决结果会因生效判决码元的减少而产生错误。利用上位机软件采集百万比特的通信数据,然后通过 MATLAB 软件进行误码查询及误码率 (BER) 分析,结果如图 17 所示。

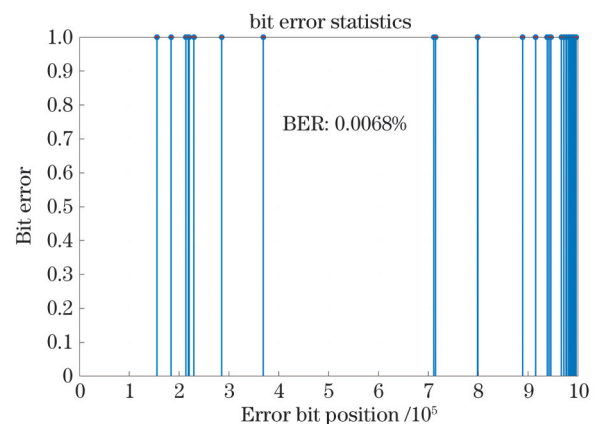


图 17 误码分析结果(一)

Fig. 17 Bit error analysis result (part one)

在多次抽取 $m_{\text{pm}}=0.1$ rad 下的相位数据后调整判决门限,使得码元的有效率得到了提升。码元的恢复结果如图 18 所示。

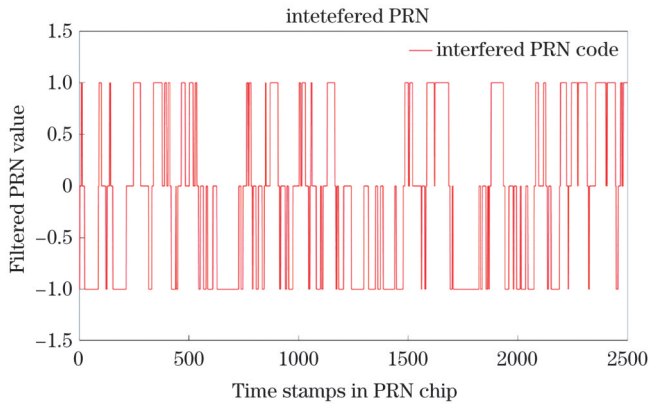


图 18 码元解调结果(二)

Fig. 18 Demodulation result of code elements (part two)

从图 18 中可以看到处于 +1 和 -1 态的码元数量较多且分布均匀,码元有效率大大增加,从而使得数据的恢复判决更加准确。再次通过上位机软件采集百万比特的通信数据,然后通过 MATLAB 软件进行误码查询及误码率分析。结果显示,在 10^6 个比特内未检测出误码。最终得到结果如图 19 所示。

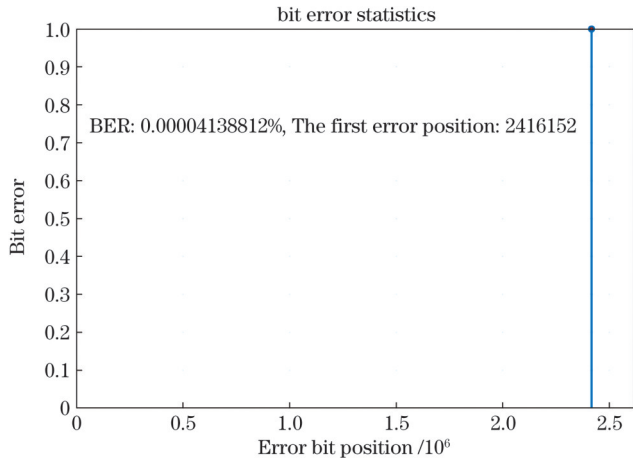


图 19 误码分析结果(二)

Fig. 19 Bit error analysis results (part two)

在此判决系统下, $m_{\text{pm}}=0.1$ rad 的伪随机码通信误码率低于 10^{-6} ,并且用于调制通信数据的激光功率在原有基础上进一步降低,这使得主干涉信号以及用于传递时钟噪声的边带信号信噪比得以提高,验证了在同一激光链路中同时耦合时钟噪声传递及星间激光通信等辅助功能的方案的有效性。面向太极计划的激光链路方案整体可行,参数设计有效,集成辅助功能可以实现。

5 结 论

在太极计划中,面向引力波探测的激光干涉辅助

功能主要包括时钟噪声传递及星间激光通信测距。激光链路系统要求边带激光功率不超过总激光功率的 10%,并且伪随机码调制功率不超过总激光功率的 1%,针对这两个要求,本文通过原理分析、仿真拟合设计了时钟噪声传递及星间激光通信参数结构,并对两项功能集成于同一激光链路中的耦合性进行了测试,验证了伪随机码调制深度对时钟噪声传递的影响并进行了改进。改进方案使得时钟噪声经共模消减后能够在 0.1 Hz 至 1 Hz、0.1 mHz 至 0.5 mHz 频段内达到优于 $2\pi \times 10^{-5}$ rad/Hz^{1/2} 的精度,与倍频方案下采用边带法抑制时钟噪声的结果符合。改进方案在降低伪随机码调制深度以提高主信号及边带信号信噪比的同时实现了通信误码率低于 10^{-6} ,总体上实现了激光链路辅助功能的集成,验证了两项方案的有效性,为未来实现干涉仪辅助功能整体化集成奠定了实验和理论基础。

参 考 文 献

- [1] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极 1 号”在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 3-10.
Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese spaceborne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 3-10.
- [2] Danzmann K, Team T L S. LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements[J]. Classical and Quantum Gravity, 1996, 13(11A): A247-A250.
- [3] Bayle J B, Bonga B, Caprini C, et al. Overview and progress on the laser interferometer space antenna mission[J]. Nature Astronomy, 2022, 6(12): 1334-1338.
- [4] 徐欣, 谈宜东, 穆衡霖, 等. 空间引力波探测中的激光干涉多自由度测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312006.
Xu X, Tan Y D, Mu H L, et al. Laser interferometric multi-degree-of-freedom measurement technology in space gravitational-wave detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312006.
- [5] Luo Z R, Liu H S, Jin G. The recent development of interferometer prototype for Chinese gravitational wave detection pathfinder mission[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 146-151.
- [6] Yang R, Liu H S, Luo Z R. Optimization design of decimation filter for the phasemeter in the space gravitational wave detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 7006508.
- [7] 王娟, 齐克奇, 王少鑫, 等. 面向空间引力波探测的激光干涉技术研究进展及展望[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(7): 109-127.
Wang J, Qi K Q, Wang S X, et al. Advance and prospect in the study of laser interferometry technology for space gravitational wave detection[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2024, 54(7): 109-127.
- [8] Wang Z, Yu T, Zhao Y, et al. Research on telescope TTL coupling noise in intersatellite laser interferometry[J]. Photonic Sensors, 2020, 10: 265-274.
- [9] Liu H S, Yu T, Luo Z R. A low-noise analog frontend design for the Taiji phasemeter prototype[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(5): 054501.
- [10] Heinzl G, Álvarez-Vizoso J, Dovale-Álvarez M, et al. Frequency planning for LISA[J]. Physical Review D, 2024, 110(4): 042002.
- [11] Zhang J F, Ma X S, Zhao M Y, et al. Advanced inter-spacecraft

- offset frequency setting strategy for the Taiji Program based on a two-stage optimization algorithm[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(16): 4370-4380.
- [12] Yamamoto K, Vorndamme C, Hartwig O, et al. Experimental verification of intersatellite clock synchronization at LISA performance levels[J]. *Physical Review D*, 2022, 105(4): 042009.
- [13] Wu H Z, Xu M Y, Wang P P, et al. Time delay interferometry with a transfer oscillator[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(1): 9-12.
- [14] 王登峰, 姚鑫, 焦仲科, 等. 面向天基引力波探测的时间延迟干涉技术[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 275-288.
Wang D F, Yao X, Jiao Z K, et al. Time-delay interferometry for space-based gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 275-288.
- [15] 胡海林, 虞逸航, 陈迪俊, 等. 面向空间引力波探测的激光低频段相对强度噪声测试技术[J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 2301009.
Hu H L, Yu Y H, Chen D J, et al. Measurement technology of laser relative intensity noise at low frequency for space-based gravitational wave detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(23): 2301009.
- [16] 赵梦阳, 高瑞弘, 张强涛, 等. 太极计划激光链路构建地面模拟控制系统研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(19): 1906003.
Zhao M Y, Gao R H, Zhang Q T, et al. Research on simulated laser link construction control system of Taiji Program[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(19): 1906003.
- [17] 张艺斌, 邓汝杰, 刘河山, 等. 太极计划星间激光通信参数设计及实验验证[J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 2306002.
Zhang Y B, Deng R J, Liu H S, et al. Parameter design and experimental verification of Taiji Program inter-satellite laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(23): 2306002.
- [18] Bender P, Brillat A, Ciufolini I, et al. LISA. Laser Interferometer Space Antenna for the detection and observation of gravitational waves. An international project in the field of fundamental physics in space[EB/OL]. [2024-12-12]. <https://lisa.nasa.gov/archive2011/Documentation/ppa2.08.pdf>.
- [19] Barke S, Tröbs M, Sheard B, et al. EOM sideband phase characteristics for the spaceborne gravitational wave detector LISA[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(1): 33-39.
- [20] Heinzel G, Esteban J J, Barke S, et al. Auxiliary functions of the LISA laser link: ranging, clock noise transfer and data communication[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28(9): 094008.
- [21] 江强, 董鹏, 刘河山, 等. 太极计划时钟噪声传递的地面原理验证[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(6): 1394-1403.
Jiang Q, Dong P, Liu H S, et al. Ground-based principle verification of clock noise transfer for the Taiji Program[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1394-1403.
- [22] Xu M Y, Tan Y J, Wu H Z, et al. Influence of EOM sideband modulation noise on space-borne gravitational wave detection[J]. *Results in Physics*, 2024, 57: 107366.
- [23] Esteban J J, Garcia A F, Barke S, et al. Experimental demonstration of weak-light laser ranging and data communication for LISA[J]. *Optics express*, 2011, 19(17): 15937-15946.
- [24] Xie S Y, Zeng H Y, Pan Y H, et al. Bi-directional PRN laser ranging and clock synchronization for TianQin mission[J]. *Optics Communications*, 2023, 541: 129558.
- [25] Chen P Q, Zhang Y B, Deng R J, et al. Experimental demonstration of bi-directional laser ranging and data communication for space gravitational wave detection[J]. *Results in Physics*, 2024, 65: 107985.
- [26] Sweeney D, Mueller G. Experimental verification of clock noise transfer and components for space based gravitational wave detectors[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25603-25612.

Design and Verification of a Laser Link Auxiliary Function Scheme for the Taiji Program

Zhang Ziheng^{1,2,3,4}, Fan Xiqian^{1,2,3,4}, Jin Gang^{1,4}, Luo Ziren^{1,4}, Liu Heshan^{4*}

¹*School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, Zhejiang, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

⁴*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Abstract

Objective The Taiji Program, led by the Chinese Academy of Sciences, is a space-based gravitational wave detection mission designed to detect gravitational wave signals in the frequency band of 0.1 MHz to 1 Hz in deep space. The main auxiliary functions of the laser link in the Taiji Program are intersatellite laser communication, ranging, and clock noise transfer. To integrate these functions within the same laser interferometric link used for gravitational wave detection, the mission proposes to implement sideband frequency doubling for clock noise transfer to suppress clock noise. Furthermore, pseudorandom code spread spectrum modulation is employed to achieve intersatellite laser communication. At present, research on the auxiliary functions of laser links for space gravitational wave detection remains limited. These functions often operate independently in separate systems, and no previous studies have tested the coupling of these auxiliary functions within a single laser link. This study aims to fill this gap by analyzing and designing parameters for the coupled modulation of clock signals and pseudorandom codes through simulation and experimental methods. The study aims to validate the feasibility and performance of the dual-modulation scheme within a single laser link, achieving functional integration of the interferometric auxiliary functions in the Taiji Program.

Methods This study examined the requirements, principles, and methods for using a laser link to achieve intersatellite clock noise transfer and laser communication. It discussed the coupling relationship between the two functions to establish parameter planning. To validate the concept, a ground-based optical experiment was set up to simulate the laser interferometric link between the two satellites. The setup involved two independent signal generators acting as clock sources for the system clocks of the satellites. A power combiner was used to couple the communication information and the clock signal. The combined signal was then modulated into two laser carriers using an electro-optic modulator for interference testing. The phase information was extracted, and the data were demodulated through phase-locked and delay loops. Finally, the suppression results of the clock noise and the communication bit error rate were determined through data post-processing using MATLAB.

Results and Discussions The experimental and simulation results reveal that simultaneously modulating the clock signal and pseudorandom code in the laser link introduces a measurable impact on the main detection signal. Specifically, as the modulation depths of both signals increase, the signal-to-noise ratio of the main detection signal decreases. Furthermore, a coupling effect was observed between the clock noise sidebands and the sidelobes of the pseudorandom code. When the modulation depth of the pseudorandom code is relatively high, the signal-to-noise ratio of the sidebands becomes constrained and decreases. In extreme cases, sidebands may be overshadowed by sidelobes, which renders effective clock noise extraction impossible. Conversely, if the modulation depth of the pseudorandom code is relatively low, environmental noise significantly affects the performance, greatly increasing the communication bit error rate. Through experimental analysis and parameter optimization, the clock noise suppression effect achieved surpasses $2\pi \times 10^{-5}$ rad/Hz^{1/2} in the frequency bands of 0.1–1.0 Hz and 0.1–0.5 mHz, meeting the requirements of the Taiji Pathfinder. This validates the effectiveness of the clock noise transfer scheme by simultaneously coupling the pseudorandom code and the clock signal modulation in the laser link. At the same time, the communication bit error rate is successfully maintained below 10^{-6} (Fig. 19).

Conclusions The auxiliary laser interferometry functions for gravitational wave detection in the Taiji Program mainly include clock noise transfer and intersatellite laser communication ranging. To meet the system design requirements that the sideband laser power in the laser link system does not exceed 10% of the total laser power and that the pseudorandom code modulation power remains below 1%, this study employs principle analysis and simulation fitting to design an optimized parameter structure for these functions. It also evaluates their integration within the same laser link. The influence of pseudorandom code modulation depth on the clock noise transfer was analyzed, leading targeted improvements. These enhancements enable clock noise suppression to reach a level better than $2\pi \times 10^{-5}$ rad/Hz^{1/2} in the frequency bands of 0.1–1.0 Hz and 0.1–0.5 mHz. This performance is consistent with the suppression effect achieved using the sideband frequency doubling method. By reducing the pseudorandom code modulation depth to improve the signal-to-noise ratios of the main and sideband signals, the communication bit error rate is successfully maintained below 10^{-6} . Overall, this work demonstrates the successful integration of auxiliary laser link functions, validates the effectiveness of the proposed two schemes, and lays experimental and theoretical groundwork for the comprehensive integration of interferometric auxiliary functions.

Key words Taiji Program; space gravitational wave detection; clock noise transmission; inter-satellite laser communication