

太极计划星间激光通信参数设计及实验验证

张艺斌^{1,2,3,4}, 邓汝杰^{1,2,3,4}, 刘河山⁴, 罗子人^{2,4*}¹中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;²国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;³中国科学院大学, 北京 100049;⁴中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 在太极计划中, 三颗卫星将构成边长为 300 万 km 的三角形星座。为完成卫星间的信息交互, 需要在星间干涉链路中加入激光通信。笔者从太极计划星间通信的需求出发, 基于目前的相位计系统, 提出了太极计划星间激光通信方案及系统参数的设计。为验证所设计参数的合理性以及通信系统的性能, 基于自研板卡, 搭建了电子学模拟系统及光学验证系统。在发送端将通信码与伪随机码以直接序列扩频的方式调制至激光相位, 通过激光链路将信息发送至接收端, 并采用锁相环及延迟环对其进行解析, 完成通信功能。测试结果表明, 所设计的通信系统参数较为合理, 能够与相位计系统有效融合, 在通信速率为 19.5 kb/s 的条件下, 通信系统的误码率优于 10^{-6} , 可为太极计划的相关参数设计提供参考。

关键词 光通信; 太极计划; 系统参数; 光学验证; 直接序列扩频

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221407

1 引言

2016 年, 美国的 LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) 探测到了由两颗恒星质量黑洞所产生的引力波信号, 标志着人类历史上第一次直接观测到引力波^[1]。由于地面引力波探测器的臂长及振动噪声的限制, LIGO 及同类型探测器 (如 VIRGO 和 KAGRA) 主要关注 kHz 频段的引力波信息。为探测波源信息更为丰富的 mHz 低频段引力波, 自 20 世纪 90 年代起, 国内外科学家开始提出空间引力波探测。目前, 最具代表性的是欧美联合研究的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 计划^[2]。2015 年, 欧空局成功发射了第一颗空间引力波探测技术验证卫星——LISA 探路者, 其在轨取得了巨大成果, 拉开了人类探测空间引力波的序幕。

国内在空间引力波探测领域的起步较晚, 具有代表性的项目主要包括太极计划及天琴计划。中国科学院于 2008 年布局相关任务, 于 2015 年正式提出“太极计划”^[2]。太极计划显示, 我国拟于 2030 年前后发射由三颗卫星构成的边长为 300 万 km 的等边三角形星座, 其主要科学目标为探测中等质量黑洞合并以及中等质量黑洞双星绕转等引力波源^[3]。2019 年, 太极一号技术试验卫星成功升空, 标志着我国也正式迈入了空间

引力波探测领域。太极计划拟通过激光干涉的方法测量引力波引起的星间相对微小位移变化, 而激光干涉系统是一类高度集成的测量系统, 其在干涉测距链路上进行相关调制的同时可以实现时钟噪声传递、绝对距离测量与通信等功能^[4]。由中山大学牵头的天琴计划以发展地心轨道等边三角形的星组为目标, 其引力波探测星组将于 2033 年前后发射。类似于太极计划, 天琴计划亦需要建立星间通信系统^[1,5-6]。激光通信链路主要将两个从星的科学数据传递至主航天器, 在主航天器完成通信预处理后再传递给地面通信站。引力波探测星间激光通信的根本需求在于实时通信, 其误码率需低于 10^{-6} , 速率高于 15 kb/s^[7]。由于星间激光通信的信息较为保密, 相近频段的通信信息容易相互干扰, 而且需要传输的数据量较多, 因此, 星间激光通信系统需要满足信息保密、抗干扰能力强及传输大容量数据等要求。此外, 为了更有利于进行主干涉信号的提取, 系统仅采用少量激光载波功率进行通信测距, 从而对通信系统参数的设置提出了较高要求。

笔者以太极计划激光通信需求为出发点, 基于目前的相位计系统进行了星间激光通信方案及其系统参数的设计。搭建光学验证系统^[8-10], 验证了星间激光通信方法的有效性及其所设计参数的合理性, 为太极计划星间激光通信奠定了技术基础。全文安排如下: 第 2

收稿日期: 2022-11-10; 修回日期: 2022-12-12; 录用日期: 2023-01-05; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2020YFC2200104)

通信作者: *luoziren@imech.ac.cn

部分介绍激光通信的总体方案,并且给出了适合太极计划星间激光通信的参数设计;第 3 部分阐述了实验方案并对相应的实验结果展开了讨论。

2 方案与参数设计

2.1 整体方案概述

太极计划方案要求激光干涉系统高度集成,需要实现干涉测距、星间测距通信及时钟噪声传递等功能^[7]。星间激光通信方案框图如图 1 所示,主要包括三部分,分别为扩频调制、链路传输及相位解调。

通过电光调制器(EOM)将混合码(通信码和伪随机码异或运算所得)调制到激光载波相位中,继而通过

激光链路发送至 300 万 km 处的远端航天器。调制后的信号 $e(t)^{[8]}$ 的表达式为

$$e(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi_n), \quad (1)$$

式中: A 为载波幅值; f_c 为载波频率; t 为时间; φ_n (n 为序列位数) 表示混合码对应的相位序列。为减小混合码调制对干涉测量的影响^[7], 将相位调制深度设为 $0.1 \sim 0.78 \text{ rad}^{[11]}$ 。激光经 300 万 km 传输至远端航天器, 与本地光干涉, 经弱光锁相锁定后, 干涉信号表达式为

$$e_{\text{beat}}(t) = A_0 \cos(2\pi f_h t + \varphi_n), \quad (2)$$

式中: f_h 为弱光锁相外差频率; A_0 为干涉信号的幅值。将此干涉信号导入相位测量系统, 经锁相环解调、延迟环扩等步骤即可完成伪随机码的跟踪^[12-13]。

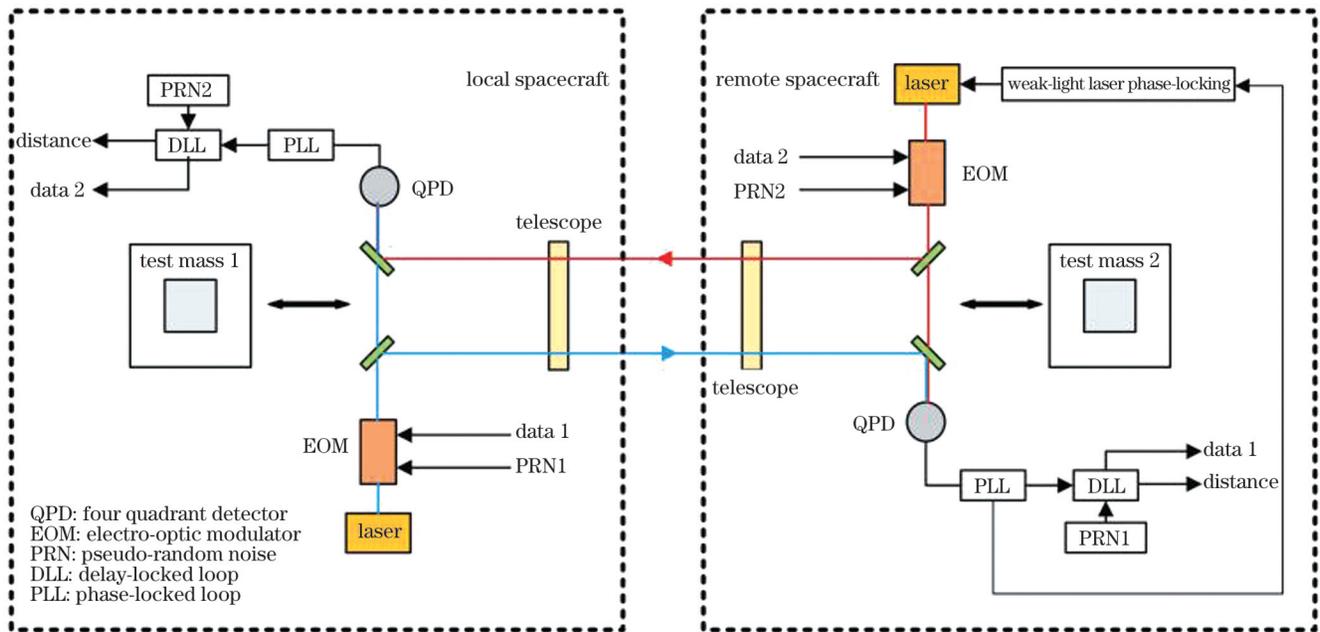


图 1 太极计划星间激光通信方案框图

Fig. 1 Scheme of Taiji program inter-satellite laser communication

2.2 参数设计

太极计划星间激光通信采用直接序列扩频的工作方式, 相关参数包括系统频率、PRN 码及通信码比特率、调制方式。下文将对上述参数进行讨论与设计。

首先, 作为相位计系统参数的一部分, 系统频率决定着测距的分辨率^[14], 一般将相位计的系统频率设定为 $50 \sim 100 \text{ MHz}^{[2, 15]}$ 。另外, 在不影响干涉测量的前提下, 太极计划激光链路中仅采用少量激光功率用于星间通信和测距^[7]。PRN 码的比特率越高, 周期就越长, 相关性也就越强, 然而这会导致调制所占激光功率比值增大, 从而降低主干扰信号的信噪比; PRN 码的比特率越低, 信噪比就会越小, 从而导致误码率增大。在直接序列扩频中, 通信码的比特率一般远小于 PRN 码, 且二者存在倍数关系。然而, 若通信码的比特率过高, 就会导致每位通信码所对应的 PRN 码位数减少, 从而降低了 PRN 码的自相关性, 因此通信码的比特率不能无限制地提高。

目前, 国内外引力波探测计划中的星间激光通信系统设计暂未考虑与相位计系统融合, 仅基于 50 MHz 系统时钟完成了相关功能参数的验证, 参数如表 1 中的第 1 组数据所示^[7]。我国太极计划及欧美 LISA 计划所采用的相位计时钟的频率均为 80 MHz , 且星间通信系统是基于该相位计设计的, 若通信系统采用 50 MHz 时钟设计的参数将会导致系统时钟不匹配、系统不稳定等问题。因此, 为满足太极计划星间激光通信的需求, 笔者基于 80 MHz 时钟提出了新的通信系统参数设计。

针对不同的侧重点, 笔者设计了三组不同的参数, 分别为表 1 中的第 2~4 组参数。其中: 第 2 组参数是基于较高的通信速率 (39.1 kb/s) 设计的, 但每位通信码所对应的 PRN 码的位数仅为 32 位, 相关性较低, 会影响测距精度; 第 3 组参数是基于较高的 PRN 码相关性设计的, 每位通信码所对应的 PRN 码的位数为 128 位, 相关性较高, 但 PRN 码的比特率高达 2.5 Mb/s , 将

表 1 参数设计
Table 1 Parametric design

Parameter	Value	Value	Value	Value
	1	2	3	4
Clock frequency /MHz	50	80	80	80
The length of PRN	1024	1024	2048	1024
Ranging range /km	200	250	250	250
The bit rate of data /($\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$)	24.4	39.1	19.5	19.5
The bit rate of PRN /($\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.5	1.25	2.5	1.25

占用较多的激光功率。如图 2 所示,在调制深度相同的前提下,利用 3 种不同比特率的 PRN 码对载波进行二进制相移键控(BPSK)调制,可发现 PRN 码比特率越大,调制信号的频谱旁瓣幅度越高,即表明调制所占激光功率越大。因此,若采用比特率为 2.5 Mb/s 的 PRN 码进行 BPSK 调制,所需激光功率较大,将导致主干涉信号的信噪比降低,影响引力波探测。

表 1 中第 4 组参数为折中设计,较为适合目前的太极计划星间激光通信系统,其信号结构如图 3 所示。相比于目前国内外引力波探测常用的激光通信系统参数,在满足空间引力波探测星间通信速率的前提下,本组参数更适用于太极计划主要表现在以下几个方面:

1) PRN 码的比特率为 1.25 Mb/s,结合上文可知,其与第 1 组参数中比特率为 1.5 Mb/s 的参数相比,调制所占激光链路系统功率较小,更有利于主干涉信号的提取。

2) 80 MHz 系统时钟的测距精度较 50 MHz 系统时钟更优。因为时钟采样周期反比于时钟采样频率,采样频率越高,其所对应的采样周期越小,即采样时间越精细。由伪码测距原理可知,采样时间越精细,测距

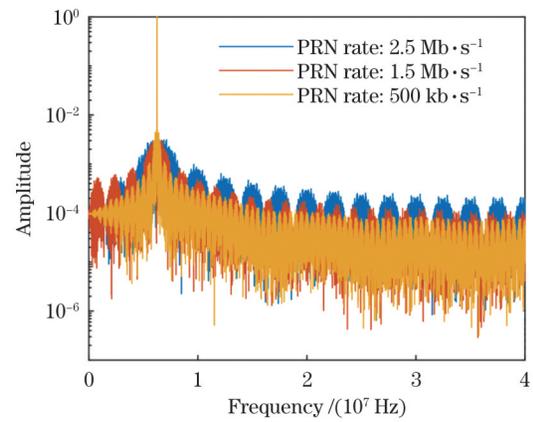


图 2 调制不同频率所得的信号频谱图

Fig. 2 Spectrogram of the signal obtained by modulating different frequencies

精度就越高^[2]。

3) 结合图 3 分析可知,本组参数的一个 PRN 码周期可测范围为 250 km,该值相比于目前文献中所述的 200 km 可测范围更大,更适用于深空探测。

由于太极计划中卫星之间的距离为 300 万 km,远远大于一个 PRN 码周期所对应的测距范围,为满足太极计划星间测距的实际需求,将在实际探测中引入深空探测网络。首先需要确定一个 PRN 码周期所对应测距范围的整数倍,再测量出 250 km 以内的精确距离,就可以实现卫星间超远距离的精确测量^[2]。

对于空间引力波探测而言,BPSK 最适合作为星间激光通信的调制方案^[8]。在 BPSK 的调制方案中,通信系统利用载波相位的变化携带数字信息,以此将信息进行传输^[16-18]。与正交相移键控(QPSK)调制方

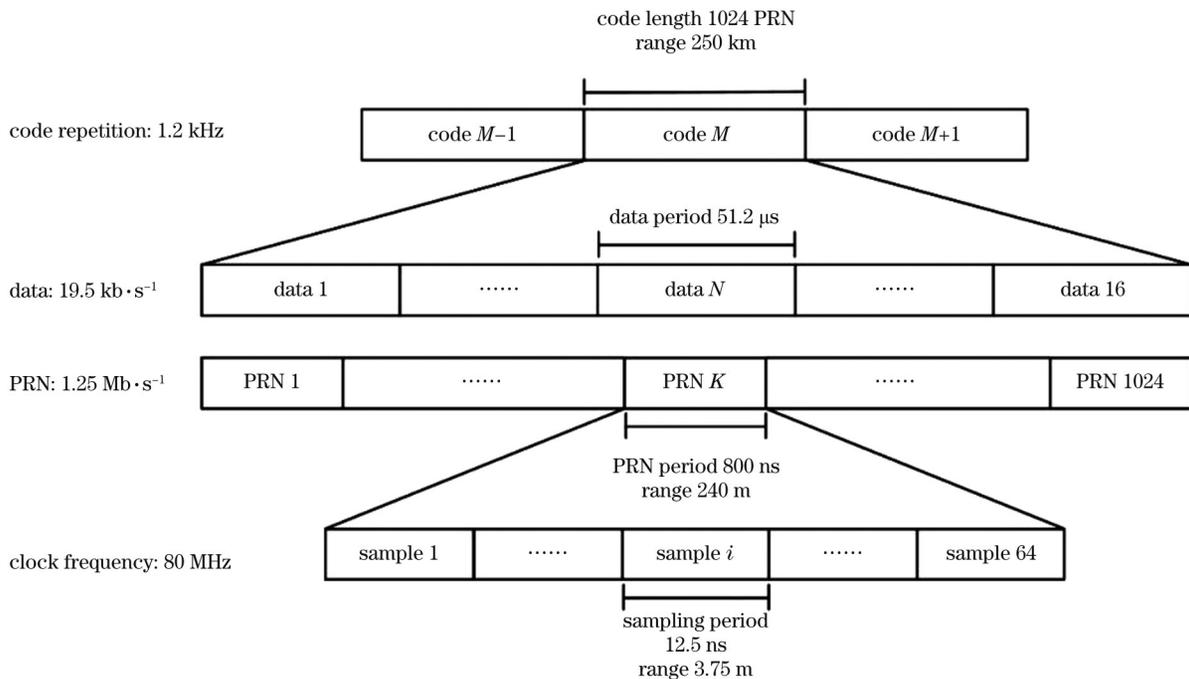


图 3 信号结构

Fig. 3 Signal structure

案相比, BPSK 通过与调制深度成正比的两个相位进行转换, 增加了每比特的传输能量, 以便于将信息进行超远距离发送^[19]。

调制深度是 BPSK 调制方案中的最重要参数之一。若调制深度较大, 会引入不必要的非线性噪声, 影响干涉测距; 若调制深度较小, 虽然会减小由 PRN 序列快速变化引起的残余载波相位噪声, 但会降低信噪比, 增大误码率^[20]。此外, 在光学系统中, 当两束激光进行干涉时, 光束之间的波前不匹配耦合抖动会引起额外的光程噪声, 从而导致干涉信号出现相位抖动。根据干涉系统的灵敏度, 目前研究人员普遍将调制深度设置在 0.1~0.78 rad 范围内^[11]。本次实验验证均在大气环境下进行, 过低的调制深度会导致解调过程中出现相位模糊问题^[21]。结合大气环境下的相位误差与干涉测量精度, 以下实验验证均将 0.4 rad 作为 BPSK 的调制深度。

此外, BPSK 调制所占激光功率与激光总功率的关系至关重要, 下文便对调制深度与激光功率进行分析。假设激光载波总功率为 P_c , 调制所用功率为 P_m , 则可得它们之间的关系^[7]为

$$\frac{P_m}{P_c} = \tan^2(m_{\text{pm}}/2), \quad (3)$$

式中: m_{pm} 为 BPSK 调制深度。由式(3)可得通信测距所占激光功率与载波功率之间的关系, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 本文所采用的 0.4 rad 调制深度所用功率占激光载波功率的 4% 左右, 不影响引力波探测主干信号的提取, 可以满足太极计划引力波探测的需求^[7, 22]。

3 实验验证

3.1 实验设置

太极计划激光通信系统包括扩频调制、链路传输、相

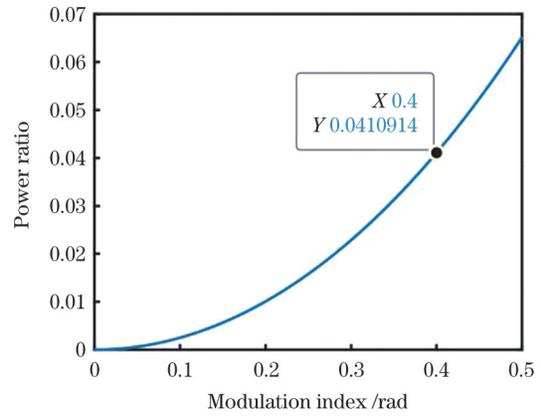


图 4 激光功率与调制深度的关系

Fig. 4 Laser power versus modulation depth

位解调三个部分。扩频调制及相位解调部分涉及的方法学和原理较多, 需要首先进行地面光学验证工作。对于光学实验, 其所需的软硬件环境搭建相对复杂, 受外界因素影响较大, 因此, 笔者在搭建光学系统之前先从电子学层面对其所采用的原理和方法学进行了模拟验证。

电子学模拟系统所采用的调制方式、相位解调系统及系统的各项指标均与光学系统类似, 二者的区别仅在于传输信息的载体不同: 电子学实验使用的媒介为射频线中的电磁波, 而光学实验使用的媒介为激光。因为传输信息的载体对激光通信以及测距的方法学及原理无任何影响, 所以该电子学模拟系统与后续进行的光学验证实验具有等效性。电子学模拟实验系统框图如图 5 所示, 包括发送端、接收端及链路传输过程。

电子学系统在现场可编程门阵列(FPGA)开发板上利用射频同轴电缆传输信息, 以此来模拟星间激光通信。首先, 在发送端将比特率为 1.25 Mb/s 的 PRN 码与比特率为 19.5 kb/s 的通信码作异或运算, 再将其通过 BPSK 的方式调制到载波相位中形成已调信号。通过数模转换器(DAC)将已调信号转换为模拟信号,

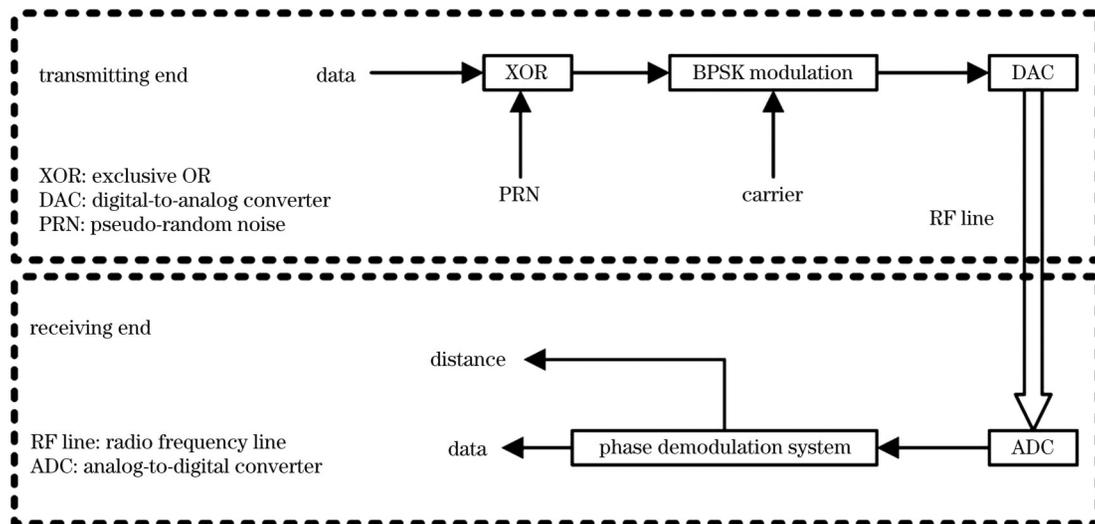


图 5 电子学模拟系统实验框图

Fig. 5 Experimental block diagram of electronic simulation system

再利用同轴电缆将该模拟信号传输至接收端。

在接收端,通过模数转换器(ADC)将已调信号恢

复为数字信号,并将其输入至相位解调系统进行进一步解析。解调器的原理如图 6 所示^[1]。

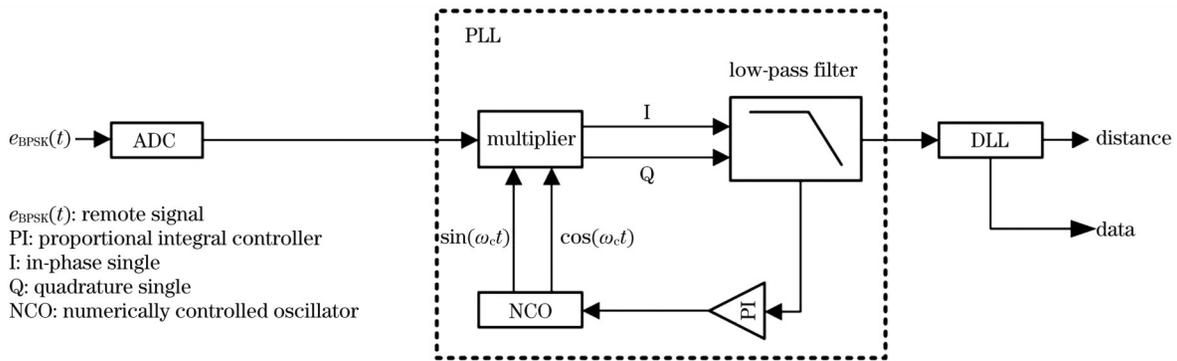


图 6 解调原理图

Fig. 6 Demodulation schematic

上述系统采用相干解调的方式进行解调。接收信号与数字振荡器(NCO)产生的正余弦信号相乘,得到同向(I路)信号和正交(Q路)信号,I路信号波形如图 7(a)所示。通过低通滤波器滤去I路信号中的倍频信号,保留差频信号,滤波后的结果如图 7(b)所示。该信号经由PI控制器后进入NCO,产生与输入信号同频同相的本地载波。

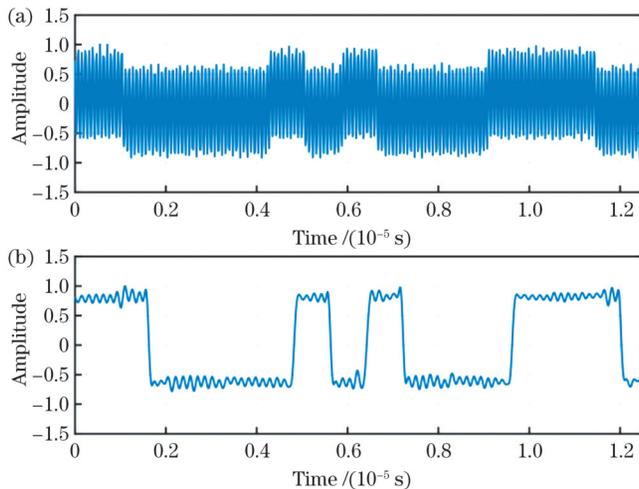


图 7 关键信号。(a)混频信号;(b)滤波信号

Fig. 7 Key signals. (a) Mixing signal; (b) filtering signal

I路信号经滤波后,在 80 MHz 定时脉冲作用下进行抽样判决,可解析出混合码。抽样判决的具体方法为:若滤波后信号的符号为正,令其结果为 0;若滤波后信号的符号为负,则令其结果为 1。最后将解析所得到的混合码输送到延迟环,与本地 PRN 码进行自相关运算,即可完成 PRN 码同步、测出绝对距离、读出通信信息。

根据以上原理,在实验室条件下搭建的系统实物图如图 8 所示,所用主要仪器设备为可编程直流电源、FPGA 开发板、同轴电缆线。

在完成电子学模拟的基础上,为验证所设计通



图 8 电子学模拟系统实物图

Fig. 8 Physical diagram of electronic simulation system

信系统的可靠性以及所采用参数的合理性,笔者进一步搭建了光学验证系统。相比于电子学模拟系统,光学系统存在的问题有光路设计复杂、对实验环境较为敏感、系统不稳定等。光学验证系统框图如图 9 所示。

光学验证系统采用波长为 1064 nm 的固体激光器。偏振光纤分束器将输出激光分为两束(分别标记为主激光与从激光),通过 AOM 将两束激光的频差设置为 6.25 MHz,以便于在接收端产生干涉信号。由于光学系统仅在传输链路方面与电子学系统不同,故而在光学系统中采用电子学系统中的扩频调制系统及相位解调系统。搭建的光学验证系统实物图如图 10 所示。

为减小光程噪声对通信系统的影响,在亚克力保护罩下进行光学系统的搭建与测试。在发送端通过位于 FPGA 开发板上的 SMA 接口将所对应的驱动电压输出至电光调制器,以此将通信码及 PRN 码通过 BPSK 方式调制至主激光相位中^[23]。本文所采用激光器的核心指标如表 2 所示。

经光纤传输至接收端后,主、从激光在光纤耦合器中进行干涉,产生包含混合码信息的频率为 6.25 MHz

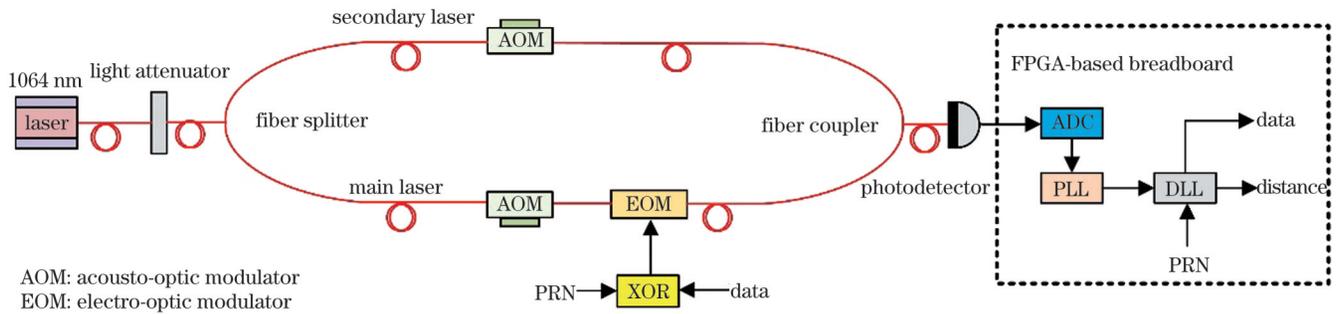


图 9 光学验证系统框图

Fig. 9 Optical verification system block diagram

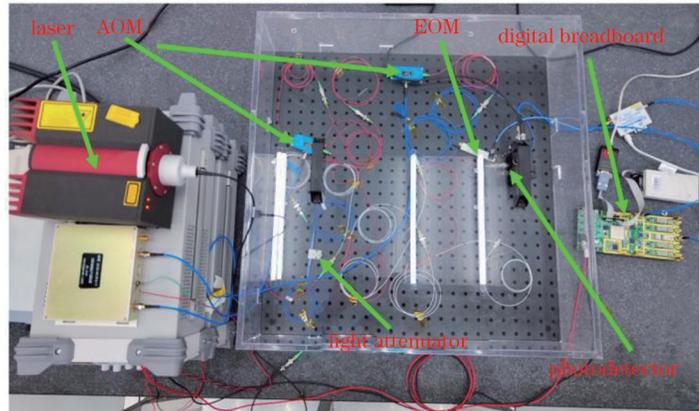


图 10 光学实验实物图

Fig. 10 Physical diagram of an optical experiment

表 2 激光器的核心指标

Table 2 Core index of the laser

Index	Content
Model of equipment	Mephisto 500NEFC
Spectral linewidth per 100 ms /kHz	1
Frequency stability / (MHz·min ⁻¹)	1
Wavelength /nm	1064

的干涉信号。随后,该干涉信号通过光电探测器转换为电信号,并被输送至 FPGA 板卡进行模数转换、相位解调、码元同步,进而解析出通信信息及距离信息。

3.2 结果与讨论

基于以上实验,笔者对电子学模拟系统及光学验证系统的混合码解调错误率进行了测试。结合 2.2 节参数设计可知,通信码的比特率为 19.5 kb/s, PRN 码及混合码的比特率均为 1.25 Mb/s。经过 80 MHz 时钟采样,一个周期的混合码(1024 位)可得 65536 位离散的比特位。笔者共设置了 3 次实验,每次传输一个周期的混合码,并将接收码元与发送码元进行比对,所得测试结果如表 3 所示。

由表 3 可知:电子学系统接收到正确的混合码的平均个数为 65408,错误个数为 128,出错的平均概率为 0.20%;光学系统接收到正确的混合码的平均个数为 64667,错误个数为 869,出错的平均概率为 1.3%。经分析,混合码解析出错的原因主要有以下两方面:

表 3 混合码的测试结果

Table 3 Test results of mixed code

Experimental type	No.	The number of correct codes	The number of error codes
Electronic experiment	1	65439	97
	2	65328	208
	3	65456	80
Optical experiment	1	64761	775
	2	64628	908
	3	64611	925

1) 滤波器存在较宽的过渡带(混合码解析出错的最主要原因),当抽样判决恰好采样至如图 11 矩形所示位置时,较易出现相位模糊问题,从而导致判决出错。

2) 由系统自身元器件及环境引起的系统背景噪声(混合码出错的主要原因)。背景噪声普遍存在于光学系统与电子学系统中,且光学系统中的背景噪声远高于电子学系统中的背景噪声。在未加调制的条件下,采用相位计测试了系统的背景噪声,测试结果如图 12 所示。经计算可知,电子学模拟系统、光学系统、光学系统增加亚克力罩后的背景噪声标准差分别为 3.6×10^{-4} 、15.4、5.6。这一计算结果证明了光学系统中的背景噪声远高于电子学系统中的背景噪声,从而

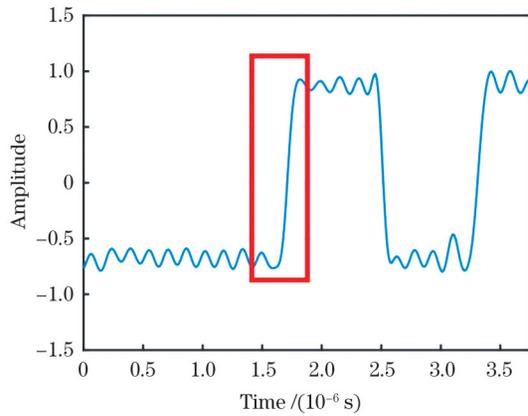


图11 抽样判决出错位置
Fig. 11 Sampling decision error location

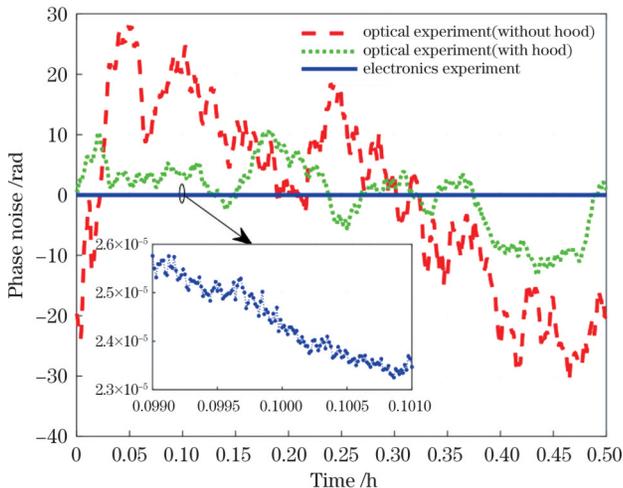


图12 系统的背景噪声
Fig. 12 System background noise

导致其信噪比远低于电子学系统,进而出现了混合码解析出错率高于电子学系统的现象。

结合2.2节参数设计可知,每位通信码在比特率为19.5 kb/s的条件下经80 MHz采样可得4096个比特位。在混合码有一定错误的条件下,笔者为降低通信误码率所采取的方法如下:统计该4096个比特位中0和1的个数,以此作为输出通信码的判决依据,将占比较大的数值作为通信码的输出值。

在延迟环中完成PRN码同步后,将混合码与提前保存至本地的PRN码作异或运算,即可解析出通信码。接下来对通信误码率进行三次实验测试,每次将4组数据(每组包含16个码元)重复传输15625次,共传输 10^6 个通信码元。测试结果如表4所示。

测试结果显示:在该电子学模拟系统及光学验证系统传输 10^6 个码元过程中,三次测试所接收到正确码元的个数均为 10^6 ,错误码元个数均为0。

综上所述,笔者基于相位计系统设计的激光通信方案及系统参数较为合理,在数据传输速率为19.5 kb/s的条件下,系统的误码率均未超过 10^{-6} ,能够满足太极计划星间激光通信的需求。

表4 误码率测试结果

Table 4 Test results of misunderstanding

Experimental type	No.	The number of correct codes	The number of error codes
Electronic experiment	1	10^6	0
	2	10^6	0
	3	10^6	0
Optical experiment	1	10^6	0
	2	10^6	0
	3	10^6	0

4 结 论

从太极计划星间激光通信的需求出发,基于目前的相位计系统进行了星间激光通信方案及其系统参数的设计,并通过光学系统验证了参数及激光通信方案的合理性。光学实验测试结果表明,该通信系统的误码率在 10^{-6} 以内,可以满足激光通信的需求,为未来太极计划的激光通信参数设计奠定了坚实的基础。作为太极计划干涉系统的扩展功能之一,激光通信需在满足基本通信功能和速率的前提下与干涉系统有效融合,这是下一阶段的重要工作。后续拟在真空腔中将电光相位调制器引入太极计划超稳干涉仪中,对激光通信系统进行更为详细的测试,以进一步减小系统噪声、降低PRN码调制深度、减小通信测距所占激光功率。

参 考 文 献

- [1] 刘河山, 高瑞弘, 罗子人, 等. 空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 486-492.
Liu H S, Gao R H, Luo Z R, et al. Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 486-492.
- [2] 邓汝杰, 张艺斌, 刘河山, 等. 太极计划中的星间激光测距地面电子学验证[J/OL]. 中国光学: 1-13[2022-10-08]. <http://chineseoptics.net.cn/cn/article/doi/10.37188/CO.2022-0041>.
Deng R J, Zhang Y B, Liu H S, et al. Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program[J/OL]. Chinese Optics: 1-13[2022-10-08]. <http://chineseoptics.net.cn/cn/article/doi/10.37188/CO.2022-0041>.
- [3] 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(17): 1706003.
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(17): 1706003.
- [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): 38-59.
Huang S 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): 38-59.
- [5] 罗子人, 钟敏, 边星, 等. 地球重力场空间探测: 回顾与展望[J]. 力学进展, 2014, 44(0): 291-337.
Luo Z R, Zhong M, Bian X, et al. Mapping Earth's gravity in space: review and future perspective[J]. Advances in Mechanics, 2014, 44(0): 291-337.
- [6] 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), 2021, 60(S1): 1-19.
Luo J, Ai L H, Ai Y L, et al. A brief introduction to the Tianqin

- project[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(S1): 1-19.
- [7] Sweeney D. Laser communications for LISA and the university of Florida LISA interferometry simulator[EB/OL]. [2022-08-06]. http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/UF/E0/04/46/01/00001/SWEENEY_D.pdf.
- [8] 曾凤娇, 杨康建, 晏旭, 等. 水下激光通信系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300002.
Zeng F J, Yang K J, Yan X, et al. Research progress on underwater laser communication systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0300002.
- [9] Esteban Delgado J J. Laser ranging and data communication for the laser interferometer space antenna[M]. Granada: Universidad de Granada, 2012.
- [10] 李佳蔚, 陈卫标. 星地相干光通信中的自适应光学系统带宽研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0806003.
Li J W, Chen W B. Bandwidth of adaptive optics system in satellite-ground coherent laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0806003.
- [11] 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.
- [12] Gardner F. A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(5): 423-429.
- [13] 邱子胜, 杨馥, 叶星辰, 等. 基于伪随机码相位调制和相干探测的激光测距技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 052801.
Qiu Z S, Yang F, Ye X C, et al. Research on laser ranging technology based on pseudo-random code phase modulation and coherent detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 052801.
- [14] 郭一岩, 贾志伟, 赵爱忠, 等. 面向激光测距的大功率混沌激光[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2114004.
Guo Y Y, Jia Z W, Zhao A Z, et al. High-power chaotic laser for laser ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2114004.
- [15] 韩爽. 空间引力波探测相位计测试系统设计与实现[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
Han S. Design and implementation of phasemeter test system for space gravitational wave detection[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [16] Goodwin F E. A review of operational laser communication systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(10): 1746-1752.
- [17] Caplan D O. Laser communication transmitter and receiver design [M]//Majumdar A K, Ricklin J C. Free-space laser communications. Optical and fiber communications reports. New York: Springer, 2007, 2: 109-246.
- [18] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710S.
- [19] Kim K, Polydoros A. Digital modulation classification: the BPSK versus QPSK case[C]//MILCOM 88, 21st Century Military Communications-What's Possible? Military Communications Conference, October 23-26, 1988, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 431-436.
- [20] 白杨杨, 岑远遥, 孟立新, 等. 空间激光通信组网从光端机控制技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406001.
Bai Y Y, Cen Y Y, Meng L X, et al. Control technology of slave optical transceiver in space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406001.
- [21] Boroson D M, Bondurant R S, Scozzafava J J. Overview of high-rate deep-space laser communications options[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5338: 37-49.
- [22] 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.
- [23] Whittaker E A, Gehrtz M, Bjorklund G C. Residual amplitude modulation in laser electro-optic phase modulation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1985, 2(8): 1320-1326.

Parameter Design and Experimental Verification of Taiji Program Inter-Satellite Laser Communication

Zhang Yibin^{1,2,3,4}, Deng Rujie^{1,2,3,4}, Liu Heshan⁴, Luo Ziren^{2,4*}

¹National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, Zhejiang, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

Abstract

Objective The Taiji program consists of three satellites that form an equilateral triangle with a side length of 3 million kilometer. The main scientific goal is to detect gravitational wave sources, such as the merger of medium-mass black holes and the rotation of medium-mass black hole binaries. The Taiji program uses laser interferometry to measure small shifts between stars caused by gravitational waves. Limited by satellite loads, laser interferometry systems must be highly integrated with the measurement systems. First, the laser communication link transmits data from the two satellites to the main spacecraft. After preprocessing is completed, the scientific data are transmitted to the ground station. The main requirement of the Taiji program laser communication is real-time communication, with a bit error rate of less than 10^{-6} and a rate of more than 15 kb/s. To meet the needs of the Taiji program inter-satellite laser communication, a communication scheme and system parameter design based on a phase meter system are proposed in this paper. An experimental verification system is planned to be set up under laboratory conditions to verify the rationality of the designed parameters and implementation of the scheme.

Methods The validity of the proposed method was verified under laboratory conditions by setting up a ground electronic simulation

system. To more closely simulate the actual transmission process of inter-satellite laser communication links, a ground optical verification system was built in this study. To fully simulate the actual situation of inter-satellite laser communication, the ground optical verification system was divided into three parts: spread-spectrum modulation, link transmission, and phase demodulation. Modulation and demodulation were completed on K7-FPGA (field programmable gate array, FPGA). Link transmission was performed using a laser with a wavelength of 1064 nm. In this experiment, the communication codes and the pseudo-random noise (PRN) code were modulated to the laser phase using a direct sequence spread spectrum at the transmitting end. This information was sent to the receiving end through a laser link. At the receiving end, a phase-locked loop (PLL) was used for carrier synchronization, and a delay-locked loop (DLL) for code synchronization, completing the communication function.

Results and Discussions The demodulation performance is evaluated in this study by measuring the error rate of the mixed code parsing. The mixed codes are transmitted in three experiments, and the correct and incorrect numbers are counted. The test results indicate that the average error probabilities of the electronic and optical systems are 0.20% and 1.3%, respectively. This is mainly because the filter has a wide transition band. If the sampling decision is made in the transition zone, phase ambiguity can easily occur. This phenomenon leads to sampling decision errors that affect the demodulation performance. In addition, the background noise caused by the components and environment of the system is the main cause of mixed code errors, which are widely found in optical and electronic systems. Noise in an optical system is significantly higher than that in an electronic system. Therefore, the error rate of mixed code analysis in an optical verification system is much higher than that in an electronic system. The communication bit error rate was then measured to evaluate the communication performance of the entire system. The test results show that when 10^6 codes were transmitted by the electronic simulation and optical verification systems, the number of correct codes received by the three tests is 10^6 . The experimental results show that a ground verification system based on the requirements of the Taiji program inter-satellite laser communication can be effectively integrated with a phase meter system. The parameters of the communication system designed in this study are verified to be reasonable. Under the condition that the communication bit rate is 19.5 kb/s, the bit error rate of the communication system is within 10^{-6} , which can meet the requirements of the Taiji program.

Conclusions Based on the current phase meter system, an inter-satellite laser communication scheme is designed in this study using system parameters according to the requirements of the Taiji program. In this paper, a scheme for inter-satellite laser communication is described in detail and the reasons for the selection of various system parameters are analyzed. In addition, the validity of the modulation and demodulation system based on the FPGA are verified using an electronic simulation system. Then, the rationality of the laser communication system parameters and scheme is verified using an optical system. The communication error rate is tested in this study. The experimental results show that the bit error rate of the communication system is within 10^{-6} under the premise of meeting the communication rate, which satisfies the requirements of laser communication in the Taiji program. The conclusions obtained in this study lay a solid technical foundation for future laser communication parameters and scheme designs within the parameters of the Taiji program.

Key words optical communications; Taiji program; system parameters; optical verification; direct sequence spread spectrum