

中国激光
Chinese Journal of Lasers
ISSN 0258-7025, CN 31-1339/TN

《中国激光》网络首发论文

题目：太极计划星间激光通信参数设计及实验验证
作者：张艺斌，邓汝杰，刘河山，罗子人
收稿日期：2022-11-10
网络首发日期：2023-02-08
引用格式：张艺斌，邓汝杰，刘河山，罗子人. 太极计划星间激光通信参数设计及实验验证[J/OL]. 中国激光.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//31.1339.TN.20230207.1555.046.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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 太极计划三颗卫星构成边长为 300 万公里的三角形星座, 为完成卫星间的信息交互, 需在星间干涉链路中加入激光通信。本文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其系统参数的设计。为验证所设计参数的合理性及通信系统的性能, 基于自研板卡, 搭建了电子学模拟系统及光学验证系统。本实验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, 以此完成通信的功能。测试结果表明, 本文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 19.5kbps 的条件下, 通信系统误码率优于 10^{-6} , 可为太极计划的相关参数设计提供参考。

关键词 太极计划; 激光通信; 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

1 引言

2016 年, 美国的 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)探测到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 及其同类型探测器(VIRGO、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]。该计划在 2015 年成功发射第一颗空间引力波探测技术验证卫星 LISA 探路者, 在轨取得了巨大的成果, 拉开了人类空间引力波探测的序幕。

国内在空间引力波探测领域起步较晚, 具有代表性的项目主要包括太极计划及天琴计划。中国科学院自 2008 年布局相关任务, 2015 年正式提出太极计划^[2]。该计划由三颗卫星构成边长为 300 万公里的等边三角形星座, 拟于 2030 年前后发射升空, 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的成功升空, 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

基金项目: 国家重点研发计划资助: “引力波探测”重点专项 (No. 2020YFC2200104)

*E-mail: luoziren@imech.ac.cn

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，加入时钟噪声传递、绝对距离测量与通信等功能^[4]。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^[1,6]。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 15kbps^[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，且需要传输数据量较多。因此，星间激光通信系统需满足信息保密、抗干扰能力强及传输大容量数据等需求。此外，为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具有较高要求。

本文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。通过搭建光学验证系统^[8-9]，验证星间激光通信方法学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技术基础。全文安排如下：第 2 部分介绍激光通信的总体方案，并且给出适合于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及对相应的实验结果展开讨论。

2 方案与参数设计

2.1 整体方案概述

太极计划激光干涉系统高度集成，需完成干涉测距、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，其主要包括三个部分，分别为扩频调制、链路传输及相位解调。

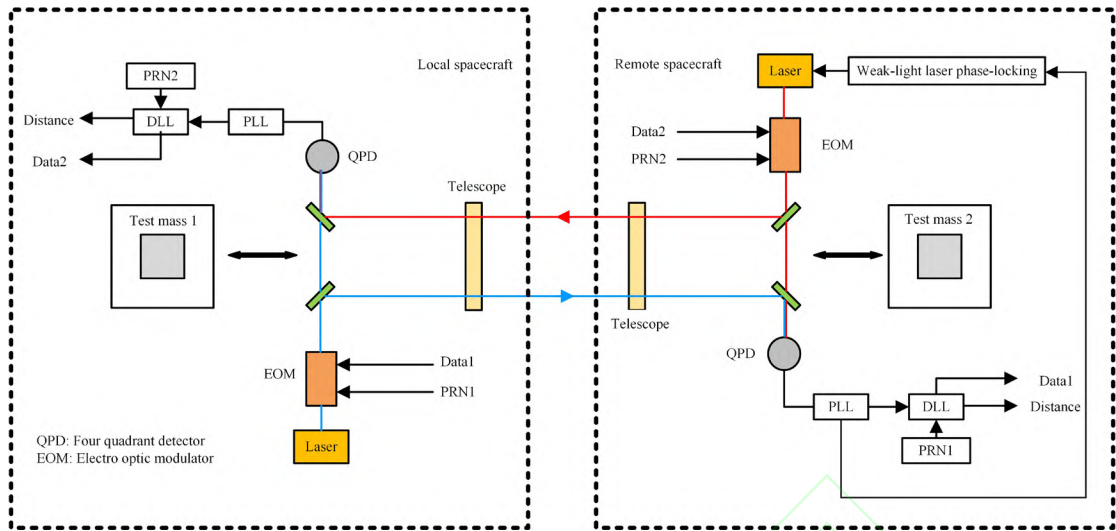


图 1 太极计划星间激光通信方案框图

Fig. 1 Laser Communication Scheme Diagram of Taiji program Inter-satellite

通过 EOM(Electro-optical modulator)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 万公里的远端航天器。调制后的信号 $e(t)$ 表达式如式(1)所示^[8]:

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

上式中， A 为载波幅值， f_c 为其频率， φ_n (n 为序列位数)表示混合码对应的相位序列。为减少混合码调制对干涉测量的影响^[7]，相位调制深度设为 $0.1-0.78 \text{ rad}$ ^[11]。激光经 300 万公里传输至远端航天器，与本地光干涉，经弱光锁相锁定后，干涉信号表达式如式所示：

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

其中， 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、延迟环解扩等步骤即可完成 PRN(Pseudo Random Noise)码的跟踪、绝对距离的测量和通信数据解析^[12]。

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，相关的参数包括系统频率、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，作为相位计系统的一部分，系统频率决定了测距的分辨率，一般设定为 $50-100 \text{ MHz}$ ^[2,15]。另外，太极计划激光链路中，在不影响干涉测量的前提下，仅采用少量激光功率用于星间通信和测距^[7]。PRN 码比特率越高，周期越长，相关性越强，但会增大相应的激

光功率，降低主干涉信号信噪比；比特率越低，信噪比减小，将导致误码率的增加。在直接序列扩频当中，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，若通信码比特率过高，会导致每位通信码所对应的 PRN 码位数减少，从而降低 PRN 码的互相关性，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星间激光通信功能，暂未考虑与相位计系统的融合，仅基于 50MHz 系统时钟，完成相关功能参数的验证，参数如表 1 中的第 1 组数据所示^[7]。但我国太极计划及欧美 LISA 计划所采用的相位计时钟均为 80MHz，且星间通信系统基于该相位计所设计，若通信系统采用时钟为 50MHz 所设计的参数将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，本文基于 80MHz 时钟提出新的通信系统参数设计。

表 1 参数设计
Table 1 Parametric design

Parameter	Value1	Value2	Value3	Value4
Clock(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(kbps)	24.4	39.1	19.5	19.5
The bit rate of PRN(Mbps)	1.5	1.25	2.5	1.25

针对不同侧重点，本文设计了三组不同的参数，分别为表 1 中的第 2-4 组。其中，第 2 组参数基于较高的通信速率所设计，其速率为 39.1kbps，但每位通信码所对应的 PRN 码的位数仅为 32 位，相关性较低，影响测距精度。第 3 组参数基于较高的 PRN 码相关性所设计，每位通信码所对应的 PRN 码的位数为 128 位，相关性较高，但其 PRN 码比特率高达 2.5Mbps，将占用较多激光功率。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 BPSK(Binary Phase Shift Keying)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 2.5Mbps 的 PRN 码进行 BPSK 调制，所需激光功率较大，将导致主干涉信号信噪比降低，影响引力波探测。

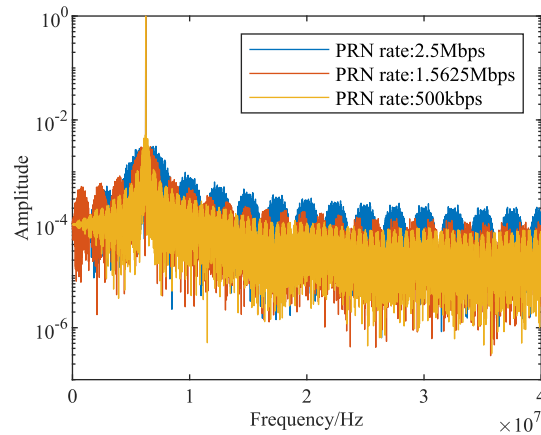


图 2 调制不同频率所得信号频谱图

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

表 1 中第 4 组参数为折中设计，较为适合目前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，本组参数在以下几个方面更适合于太极计划。

第一，PRN 码的比特率为 1.25Mbps，结合上文可知，其与第 1 组参数中比特率为 1.5625Mbps 的 PRN 码相比，调制所占激光链路系统功率较小，从而更有利于主干涉信号的提取。第二，系统时钟为 80MHz，其所对应的测距精度优于 50MHz。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。根据伪码测距原理可知，采样时间越精细则测距精度越高^[2]。第三，结合图 3 分析可知，本组参数的一个 PRN 码周期可测范围为 250km，相比于目前文献当中可测的 200km 范围，测距范围增大，从而更适用于进行深空探测。由于在太极计划当中，卫星间的距离为 300 万公里，其远远大于一个 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，在实际探测当中将引入深空探测网络。首先需确定一个 PRN 码周期所对应测距范围的整数倍，再测量出 250km 以内的精确距离，从而可实现卫星间超远距离的精确测量^[2]。

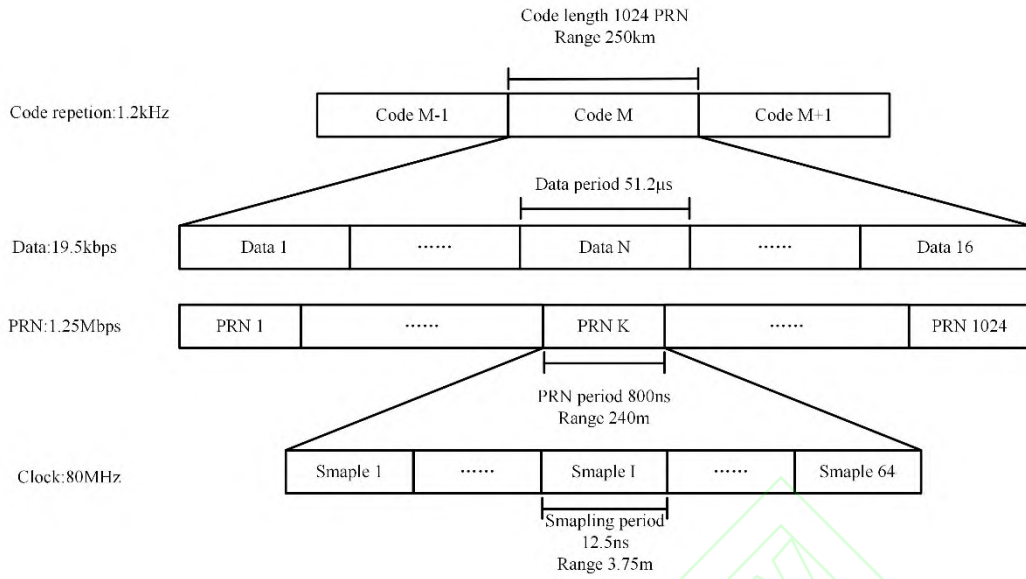


图3 信号结构

Fig. 3 Signal structure

针对空间引力波探测，BPSK 是最适合作为星间激光通信的调制方案^[8]。在 BPSK 的调制方案当中，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]。与 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)调制方案相比，BPSK 通过与调制深度成正比的两个相位转换，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]。

其中，调制深度为 BPSK 调制方案当中最重要的参数之一，调制深度较大，会引入不必要的非线性噪声，影响干涉测距；调制深度较小，可减少由 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。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，会导致干涉信号出现相位的抖动。目前文献中，根据干涉系统的灵敏度，调制深度普遍在 0.1-0.78 rad^[11]。本文的实验验证均在大气环境下进行，过低的调制深度会在解调过程中出现相位模糊问题。结合大气环境下的相位误差与干涉测量精度，本文的以下实验验证采用 0.4rad 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 ，调制所占功率为 P_m ，则可得其关系如式(3)所示^[7]：

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

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

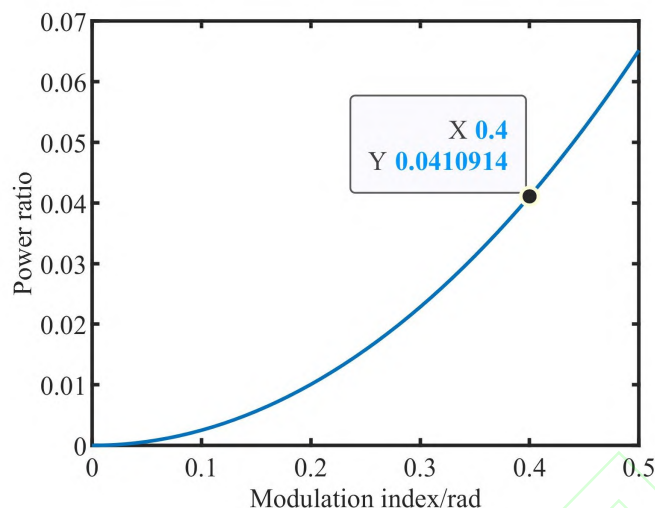


图4 激光功率与调制深度

Fig. 4 Laser power and modulation depth

由上图可知，本文所采用的 0.4rad 调制深度所占激光载波功率仅为 4%左右，不影响引力波探测主干涉信号的提取，可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三个部分：扩频调制、链路传输、相位解调。其中扩频调制及相位解调部分涉及的方法学和原理较多，需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，因此本文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当中的电磁波，而在光学实验中为激光。因为传输信息的载体对激光通信和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，其包括发送端、接收端及链路传输过程。

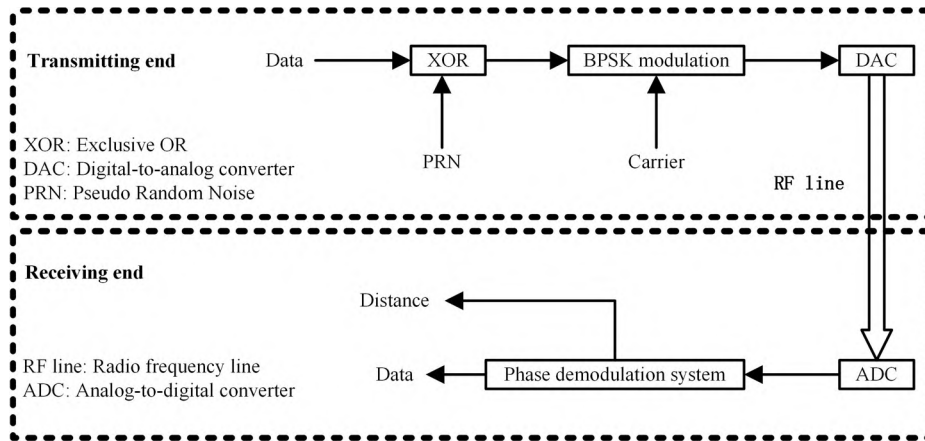


图 5 电子学模拟系统实验框图

Fig. 5 Experimental block diagram of electronic simulation system

电子学系统在 FPGA(Field Programmable Gate Array)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 1.25Mbps 的 PRN 码与比特率为 19.5kbps 的通信码做异或运算，再将其通过 BPSK 的方式调制到载波相位当中形成已调信号。通过 DAC(Digital-to-Analog converter)将已调信号转换为模拟信号，再利用同轴电缆线将该模拟信号传输至接收端。

在接收端，通过 ADC(Analog-to-Digital converter)将已调信号恢复为数字信号，并将其输入至相位解调系统做进一步解析，解调器的原理如图 6 所示^[1]。

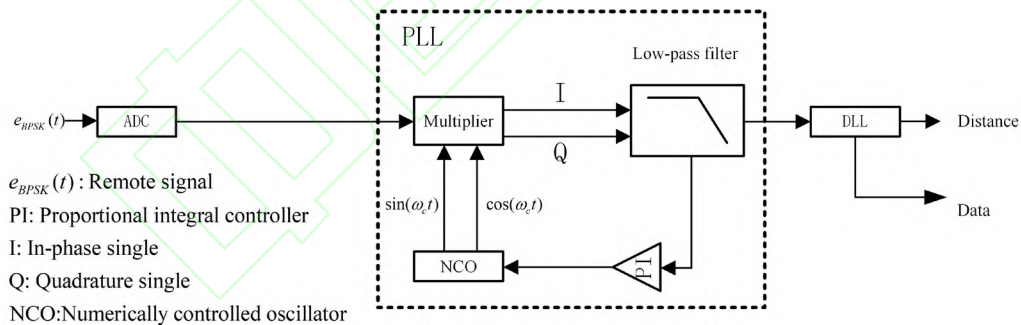


图 6 解调原理图

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 NCO 产生的正余弦信号进行相乘，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 路信号的倍频信号，保留差频信号，滤波后的结果如图 7(b)所示。将该信号通过 PI 控制器，使 NCO 产生与输入信号同频同相的本地载波。

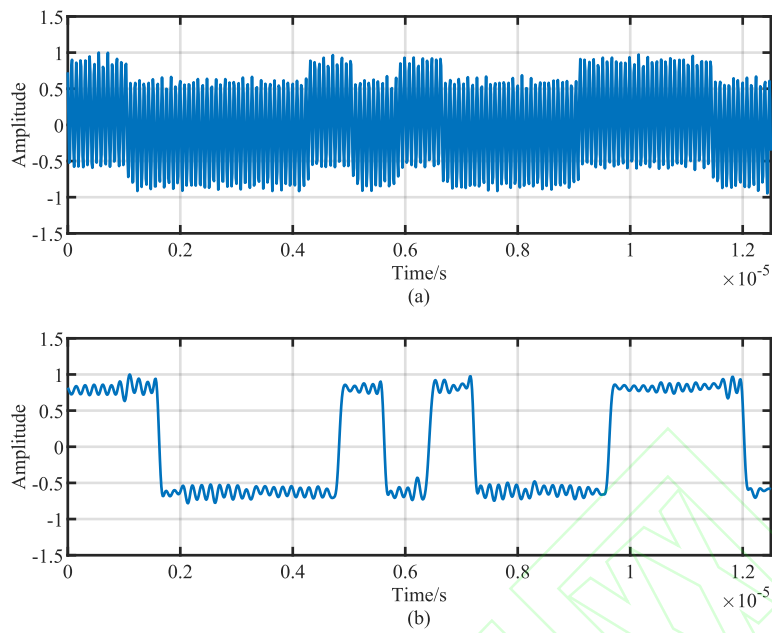


图 7 关键信号 (a)混频信号; (b)滤波信号

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

I 路信号经滤波后, 在 80MHz 定时脉冲作用下, 对信号进行抽样判决, 可解析出混合码。抽样判决的具体方法为: 滤波后信号的符号为正, 令其结果为 0; 为负, 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 码进行互相关运算, 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, 其主要仪器设备为: 可编程直流电源、FPGA 开发板、同轴电缆线。

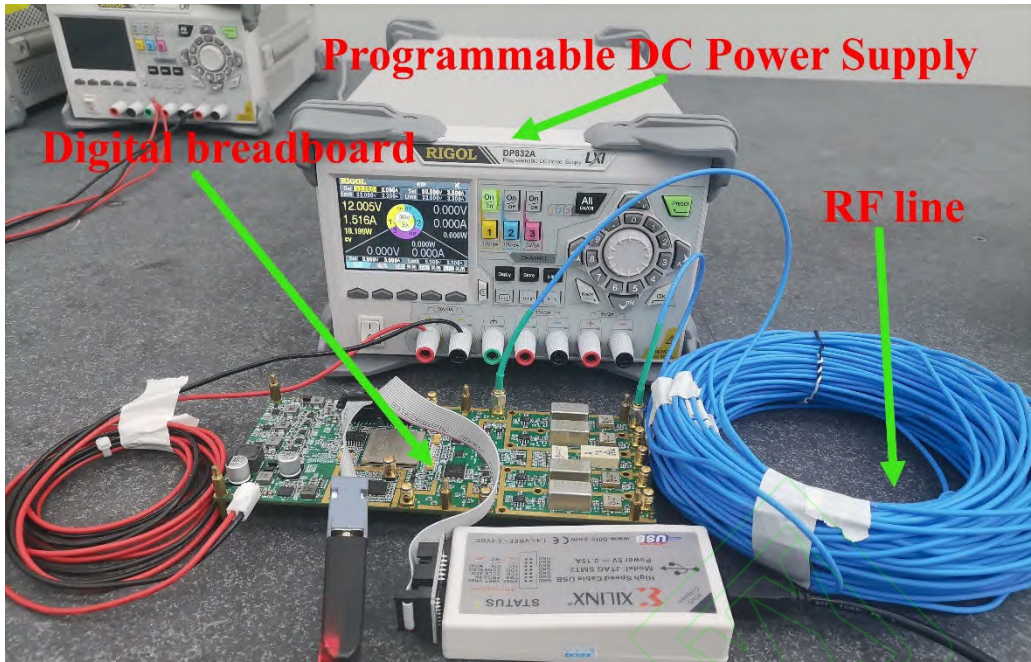


图 8 电子学模拟系统实物图

Fig. 8 Physical diagram of electronic simulation system

在完成电子学模拟的基础之上,本文为验证所设计通信系统的可靠性和所采用参数的合理性,将进一步搭建光学验证系统。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。其系统框图如图 9 所示。

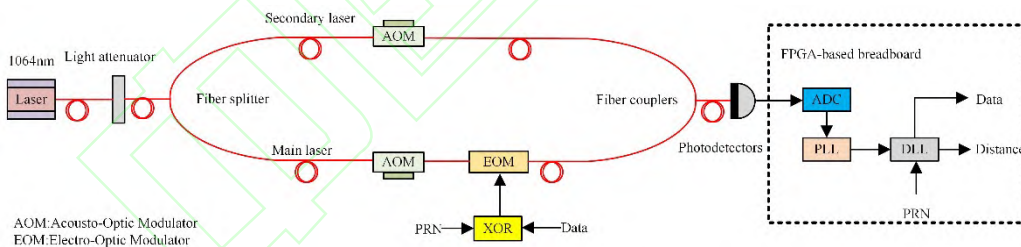


图 9 光学验证系统框图

Fig.9 Optical verification system block diagram

本文采用波长为1064nm的固体激光器,经偏振光纤分束器将输出激光分束为两束激光,分别标记为主激光与从激光,且经 AOM 将其频差设置为 6.25MHz,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,故在光学系统中采用电子学系统所设计的扩频调制系统及相位解调系统。本文搭建的光学验证系统实物图如图 10 所示。

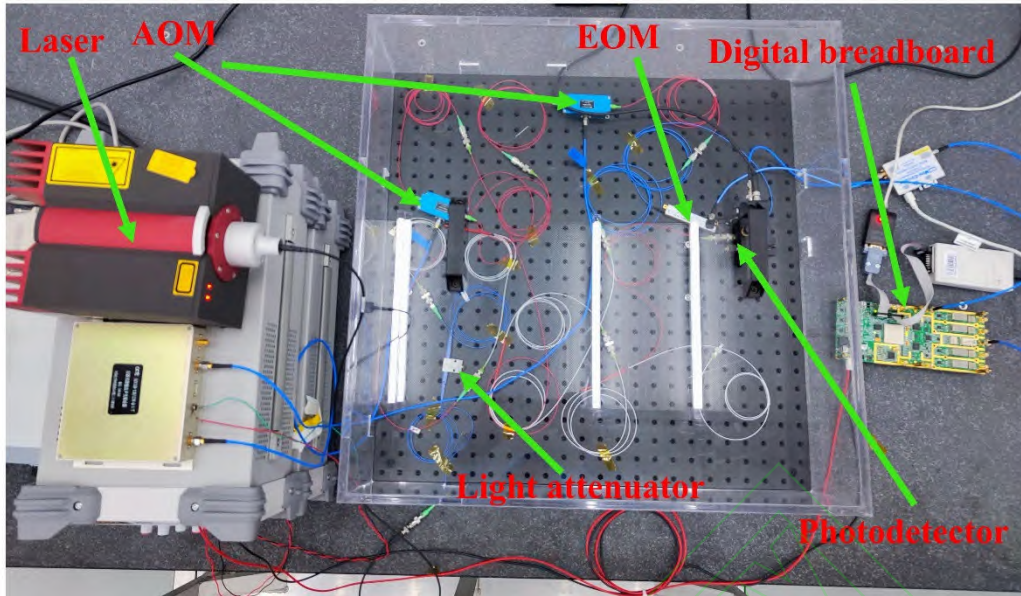


图 10 光学实验实物图

Fig.10 Physical diagram of a optical experiment

为减少光程噪声对通信系统的影响，光学系统置放在亚克力保护罩下进行搭建与测试。本实验在发送端通过位于 FPGA 开发板之上的 SMA 接口将所对应的驱动电压输出至 EOM(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当中^[23]。本文所采用激光器的核心指标如表 2 所示。

表 2 激光器的核心指标

Table 2 The core index of laser

Index	Value
Model of Equipment	Mephisto 500NEFC
Spectral linewidth [kHz/100ms]	1
Frequency stability [MHz/min]	1
Wavelengths[nm]	1064

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、频率为 6.25MHz 的干涉信号。随后，通过光电探测器，该干涉信号转换为电信号，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，本文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测试。

结合 2.2 节参数设计可知,通信码的比特率为 19.5kbps,PRN 码及混合码的比特率为 1.25Mbps。经过 80MHz 时钟采样,一个周期的混合码(1024 位)可得 65536 位离散的比特位。本文共设置 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。

表 3 混合码的测试结果

Table 3 Test results of mixed code

The 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

由上表可知,电子学系统接收到正确的混合码平均个数为 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:

一方面,混合码解析出错最主要的原因是滤波器存在较宽的过渡带,当抽样判决恰好采样至如图 11 矩形所示位置,较易出现相位模糊问题,从而导致判决致错。

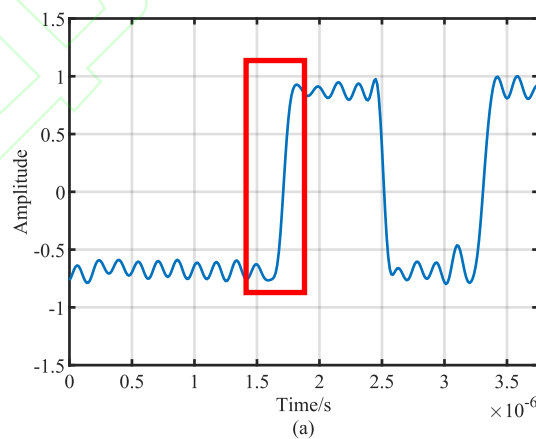


图 11 抽样判决出错位置

Fig. 11 Sampling decision error location

另一方面,由系统自身元器件及环境所引起的系统本底噪声,也是导致混合码出错的主

要原因，其普遍存在于光学系统与电子学系统之中，且光学系统的噪声远高于电子学系统。本文在未加调制的条件下，通过相位计测试了系统的噪声，其结果如图 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子后的噪声标准差分别为 3.6×10^{-4} 、15.4 及 5.6。上述实验结果证明了光学系统当中的噪声远高于电子学系统，从而导致其信噪比远低于电子学系统，进而出现混合码解析出错率高于电子学系统的现象。

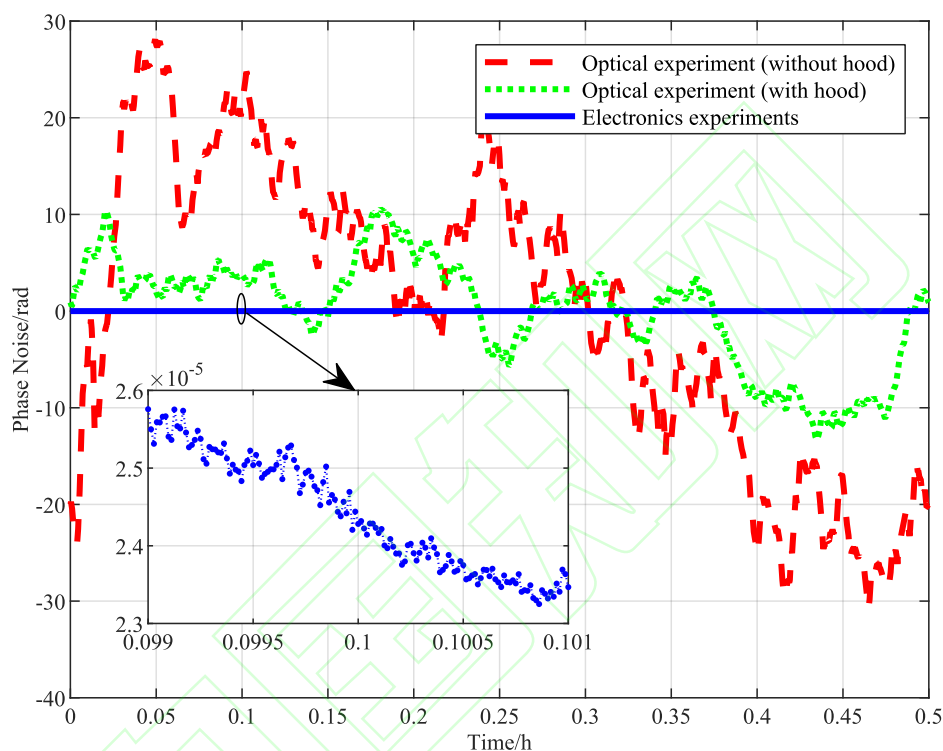


图 12 系统本底噪声

Fig. 12 System body noise

结合 2.2 参数设计可知，每位通信码在比特率为 19.5kbps 的条件下，经 80MHz 采样可得 4096 个比特位。在混合码有一定错误的条件下，本文为降低通信误码率所采取的方法为：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 码同步之后，将混合码与提前保存至本地的 PRN 码做异或运算，即可解析出通信码。下文将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：

表 4 误码率的测试结果

Table 4 Test results of misunderstanding

The 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

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 个码元的过程中，三次测试所接收到正确码元个数为 10^6 ，错误码元个数为 0。

综上所述，本文基于相位计系统所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 19.5kbps 的条件下，系统的误码率均在 10^{-6} 范围内，能够满足太极计划星间激光通信的需求。

4 结论与展望

本文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，该通信系统误码率在 10^{-6} 以内，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，与干涉系统的有效融合是下一阶段的重要工作。后续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，将进一步减小系统噪声、降低 PRN 码调制深度、减少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.
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.

-
- [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].中国光学, 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]. Chinese Optics, 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 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]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy,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,2014,44:291-337.
Luo Z R, Zhong M, Bian X, et al. Mapping Earth's gravity in space: Review and future perspective [J]. Advances in Mechanics,2014,44:291-337.
- [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(Z1):1-19.DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.12.23.2020B154.
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(Z1):1-19.DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.12.23.2020B154.
- [7] Sweeney D, Mueller G. Laser Communications for LISA and the University of Florida Interferometry Simulator[J]. 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010, 38: 3.
- [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, García 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]. 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2022.DOI:10.27522/d.cnki.gkcg.2022.000146.
Han S. Design and implementation of phasemeter test system for space gravitational wave detection[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022.DOI:10.27522/d.cnki.gkcg.2022.000146.
- [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]//Free-Space Laser Communications. Springer, New York, NY, 2007: 109-246.
- [18] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI. SPIE, 2014, 8971: 213-223.
- [19] Kim K, Polydoros A. Digital modulation classification: the BPSK versus QPSK case[C]//MILCOM 88, 21st Century Military Communications-What's Possible?. Conference record. Military Communications Conference. IEEE, 1988: 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[C]//Free-Space Laser Communication Technologies XVI. International Society for Optics and Photonics, 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(中英文), 2020, 7(1): 3-10. doi: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191230001.
Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese Space-Borne Gravitational Wave Detection Program“Taiji” and “Taiji-1” Satellite Mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 3-10. doi: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191230001.
- [23] Whittaker E A, Gehrtz M, Bjorklund G C. Residual amplitude modulation in laser electro-optic phase modulation[J]. *JOSA 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 Taiji program consists of three satellites, which form an equilateral triangle with a side length of 3 million kilometers. The main scientific goal is to detect the gravitational wave sources such as the merger of medium-mass black holes and the rotation of medium-mass black hole binaries. The Taiji program intends to use laser interferometry to measure the tiny shifts between stars caused by gravitational waves. Limited by satellite loads, laser interferometry systems must be highly integrated measurement systems. First of all, the laser communication link transmits data from the two satellites to the main spacecraft. After the preprocessing is completed, the scientific data is transmitted to the ground station. The main requirement of Taiji program laser communication is real-time communication, with a bit error rate of less than 10^{-6} and a rate of more than 15kbps. To meet the needs of the Taiji program inter-satellite laser communication, this paper proposes the communication scheme and system parameter design based on the phase meter system. The experimental verification system is planned to be set up under laboratory conditions, hoping to verify the rationality of the designed parameters and the implementability of the scheme.

Methods Under laboratory conditions, this paper verifies the validity of the proposed method by setting up a ground electronic simulation system. In order to more closely simulate the actual transmission process of inter-satellite laser communication links, a ground optical verification system is built in this paper. In order to fully simulate the actual situation of inter-satellite laser communication, the ground optical verification system is mainly divided into three parts: spread spectrum modulation, link transmission and phase demodulation. The part of modulation and demodulation is completed on K7-FPGA(Field Programmable Gate Array). The link transmission is performed by a laser with a wavelength of 1064nm. In this experiment, communication codes and PRN(pseudo-random noise code) are modulated to the laser phase by direct sequence spread spectrum at the transmitting end. The information is sent to receiving end through the laser link. On the receiving end, PLL(Phase locked loop) is used for carrier synchronization and DLL(delay loop)for code synchronization. So as to complete the communication function.

Results and Discussions This paper evaluates the demodulation performance by measuring the error rate of mixed code parsing. The mixed codes were transmitted through three experiments, and the correct and incorrect numbers were counted. The test results show that the average error probability of the electronic system and the optical system is 0.20% and 1.3% respectively. The main reason is that the filter has a wide transition band. If the sampling decision is carried out in the transition zone, the problem of phase ambiguity is easy to occur. This phenomenon will lead to

sampling decision errors, which will affect the demodulation performance. In addition, the background noise caused by the components and environment of the system is also the main cause of mixed code error, which is widely found in an optical system and electronic system. And the noise of the optical system is much higher than that of the electronic system. Therefore, the error rate of mixed code analysis in optical verification system is much higher than that in an electronic system. Then the communication bit error rate is measured to evaluate the communication performance of the whole system. The test results show that when 10^6 codes are transmitted by the electronic simulation system and the optical verification system, the number of correct codes received by the three tests is 10^6 . The experimental results show that the ground verification system based on the requirements of the Taiji program inter-satellite laser communication can be effectively integrated with the phase meter system. It is verified that the parameters of the communication system designed in this paper are reasonable. Under the condition that the communication bit rate is 19.5kbps, the bit error rate of the communication system is within 10^{-6} , which can meet the requirements of Taiji program.

Conclusions Based on the current phase meter system, this paper designs the inter-satellite laser communication scheme and system parameters according to the requirements of Taiji program. In this paper, we describe the scheme of inter-satellite laser communication in detail and analyze the reasons for selecting various system parameters. In addition, the validity of the modulation and demodulation system based on FPGA is verified by the electronic simulation system. Secondly, the rationality of laser communication system parameters and the scheme is verified by an optical system. And the communication error rate is tested in this paper. 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 can meet the requirements of laser communication of Taiji program. The conclusions obtained in this paper can lay a solid technical foundation for the laser communication parameters and scheme design of Taiji program in the future.

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

网络首发:

标题: 太极计划星间激光通信参数设计及实验验证

作者: 张艺斌, 邓汝杰, 刘河山, 罗子人

收稿日期: 2022-11-10

录用日期: 2023-01-05

DOI: 10.3788/CJL221407

引用格式:

张艺斌, 邓汝杰, 刘河山, 罗子人. 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(22): 2206001.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

双波段近海激光通信大气参数测量与估算模型修正

高世杰 盛磊 李一芒 吴志勇

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

中国激光, 2015, 42(6): 0613001

空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究

徐淼 史浩东 王超 刘壮 付强 李英超 董科研 姜会林

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

中国激光, 2021, 48(12): 1206002

激光通信天线一体化的摆镜面形优化

李小明 王隆铭 李响 张立中 张家齐

长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

中国激光, 2021, 48(1): 0106006

基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化

董明佶 林宝军 刘迎春 周黎莎

中国科学院光电研究院, 北京 100094

中国激光, 2018, 45(7): 0706004

微弧度量级远场发散角光束发射系统的设计与实现

况耀武 何志平 袁立银 张亮 舒嵘

中国科学院上海技术物理研究所中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

中国激光, 2018, 45(6): 0605004