

太极计划中的星间激光测距地面电子学验证

邓汝杰 张艺斌 刘河山 罗子人

Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program

DENG Ru-jie, ZHANG Yi-bin, LIU He-shan, LUO Zi-ren

引用本文:

邓汝杰, 张艺斌, 刘河山, 罗子人. 太极计划中的星间激光测距地面电子学验证[J]. *中国光学*, 2023, 16(4): 765–776. doi: 10.37188/CO.2022–0041

DENG Ru-jie, ZHANG Yi-bin, LIU He-shan, LUO Zi-ren. Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 765–776. doi: 10.37188/CO.2022–0041

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术

Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection

中国光学. 2019, 12(3): 486 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0486>

无拖曳控制技术研究及在我国空间引力波探测中的应用

Drag-free control and its application in China's space gravitational wave detection

中国光学. 2019, 12(3): 503 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0503>

空间引力波探测望远镜初步设计与分析

Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection

中国光学. 2018, 11(1): 131 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0131>

应用于空间精密测量的全玻璃光纤耦合器的系统设计

System design of all glass fiber couplers for precise space measurement

中国光学. 2019, 12(3): 432 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0432>

星上剩磁对惯性传感器的影响

Effect of the on-board residual magnetism on inertial sensors

中国光学. 2019, 12(3): 515 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0515>

空间引力波探测任务的入轨误差分析

Injection error analysis of space gravitational wave detection

中国光学. 2019, 12(3): 493 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0493>

文章编号 2097-1842(2023)04-0765-12

太极计划中的星间激光测距地面电子学验证

邓汝杰^{1,2,3}, 张艺斌^{1,2,3}, 刘河山³, 罗子人^{1,3*}

- (1. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要:在空间引力波探测太极计划中, 激光干涉测距系统是获取引力波信号的直接手段, 为了消除激光频率不稳定性对其的影响, 需利用时间延迟干涉技术降低噪声的干扰。时间延迟干涉是一种数据后处理方法, 要实现该技术的结构型, 需对卫星臂长实现精确的绝对距离测量。本文从太极计划的需求分析出发, 分别从信源编码设计、延迟环设计以及数据处理算法等方面介绍测距系统的设计方案。在信源编码中, 文章通过分析 m 序列、gold 序列、Weil 码三种伪随机码的自、互相关性优劣以及长度选取上的灵活性, 最终选择了 Weil 码并筛选出其自相关性最优的移位-截取组合, 将其作为测距系统所用的伪随机码。同时, 基于该测距系统, 搭建了一套地面电子学验证实验装置, 以模拟信号传输的物理过程并验证系统性能。实验主体装置采用一块基于 Xilinx 公司 K7 芯片的自研 FPGA 板卡用以模拟卫星通信测距过程以及实现锁相环、延迟环等功能。实验将 24.4 kbps 的 16 位信息码与 1.5625 Mbps 的 1024 位 Weil 码进行 BPSK 调制, 采样频率为 50 MHz, 通过 10~60 m 的射频同轴电缆进行传输后, 使用质心法对采集数据进行优化, 随后测定该距离。实验结果表明: 在 60 m 范围内, 测距精度优于 1.6 m。实验证明了测距系统原理及设计的可行性, 为下一步的光学系统验证奠定了技术基础。

关键词:空间引力波探测; 绝对距离测量; 伪随机码调制

中图分类号: P228.5 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0041

Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program

DENG Ru-jie^{1,2,3}, ZHANG Yi-bin^{1,2,3}, LIU He-shan³, LUO Zi-ren^{1,3*}

- (1. Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: luoziren@imech.ac.cn

Abstract: In the Taiji program, laser interferometry is utilized to detect the tiny displacement produced by the gravitational wave signals. Due to the large-scale unequal arm, the laser frequency noise is the largest noise budget in the space interferometer system. To reduce the influence of laser frequency noise, a technology called the Time Delay Interferometry (TDI) is utilized to deal with it. The TDI is a kind of data post-pro-

收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-04-06

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)

Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2020YFC2200104)

cessing method, which forms the new data stream by the method of the time delay to initial data. But the premise of TDI needs to obtain accurate absolute arm length between satellites. Thus, for that requirement, we discuss the ranging system scheme and implement a ground electronics verification experiment. The ranging system is based on Direct Sequence Spread Spectrum (DS/SS) modulation, and it mainly includes three parts, which are the signal structure, a Delay Locked Loop (DLL), and a data processing algorithm. In DS/SS modulation, types of pseudo-random code can make a difference to the quality of correlation and the ranging accuracy. Therefore, to design the optimal pseudo-random code, we compare the correlation and flexibility in choosing lengths of the m sequence, gold sequence, and Weil code. Weil code that has a shift-cutoff combination with the best autocorrelation is chosen as the ranging code. The ground electronics verification experiment is set up for simulating the physical process of signal transmission and verifying system performance. The main device of the experiment is a FPGA card based on the K7 chip from Xilinx, which is used to simulate the function of communication and ranging between satellites. Meanwhile, we change the length of the Radio Frequency (RF) coaxial cable to correspond to different ranges. The experimental process can be summarized as follows. Firstly, 16-bit data at 24.4 kbps and 1024-bit Weil code at 1.5625 Mbps are modulated with Binary Phase Shift Keying (BPSK) in the 50 MHz sampling frequency. Then the signal is transmitted through RF coaxial cables of 10 to 60 m in length. In receiving end, the signal is consolidated by DLL and the ranging information is collected. To measure the range accurately, we use a centroid method to optimize the collected data. The results show that the ranging accuracy is better than 1.6 m within 60 m. In conclusion, this experiment proves the principle of the scheme and its feasibility, laying a technical foundation for optical system verification in the future.

Key words: space gravitational wave detection; absolute ranging measurement; pseudorandom modulation

1 引 言

空间引力波探测太极计划,是由中国科学院空间引力波探测工作组于 2015 年正式提出的,将运行于日心轨道的等边三角形星组作为轨道设计方案,通过激光干涉的方法来测量航天器之间由引力波引起的距离变化,进而获取引力波信号的自主计划。以双星激光干涉为例,本地卫星在接收到由远端卫星发射的激光后,将该光束导入至本地激光干涉仪,而后经自由悬浮的测试质量表面反射与本地卫星的激光发生干涉现象,通过测量两测试质量之间激光干涉信号的相位变化,便可反演出由引力波引起的两测试质量之间的距离变化^[1-3]。

由此可见,在太极计划中,空间激光干涉测距系统是获取引力波信号的直接手段,而对于该激光干涉测距系统,激光频率不稳定性是其主要的噪声来源之一,会直接影响最终的测量结果^[4]。

为了提高频率稳定性、降低测量误差,太极计划采用三步法对激光频率不稳定性进行逐级噪声压制,即 Pound-Drever 锁腔技术、锁臂技术以及时间延迟干涉技术 (Time Delay Interferometer, TDI)。其中,TDI 技术是一种后期数据处理方法,而绝对距离测量精度即为其在数据重组时所构造出的干涉仪臂长差^[5]。由此看来,星间绝对距离测量的精度直接影响了 TDI 技术的结果,因此有必要在星间建立高精度的测距链路,以保证引力波测量任务的正常进行。

目前,对于在激光干涉系统下实现高精度的测距功能,欧洲的激光干涉空间天线计划 (Laser Interferometer Space Antenna, LISA) 已在实验室完成了相应的原理演示,正在与干涉系统进行整体的联调工作。当前 LISA 计划已实现在激光功率为 100 pw、采样率为 50 MHz 的情况下,测距精度优于 0.7 m,达到引力波探测的要求^[6-7]。我国尚未有相关的研究工作报道,但在其它领域,我国学者在使用伪随机码测距技术进行测距上已有一定的

研究基础,可为太极计划任务中的测距需求提供一定的参考。如韩旭等人使用伪随机码调制的激光雷达样机,在伪随机码为14阶 m 序列,调制速率为100 MHz的情况下,达到了0.1 m的精度^[8]。

鉴于国内还未有关于引力波探测星间激光测距的研究,本文便以此为出发点,以在激光干涉系统下使用伪随机码测距方式实现精度在1 m量级的测距功能。文章的结构如下:第二部分为需求分析,通过简述TDI原理以说明测距的需求。第三部分为测距系统原理及设计,其分别从信源编码、延迟环设计以及数据处理算法三方面阐述该测距系统。第四部分为地面电子学实验,简述了实验方法的等效性,并对实验结果进行分析。

2 需求分析

由于绝对距离测量的精度会对TDI数据重组时所构造出的干涉仪臂长差造成影响,因此这如何精确地测得星间距离提出了一定的要求。

TDI技术采用数据后处理方式以构建等臂长

的干涉仪,其基本原理是将不同长度干涉臂探测到的数据进行时间平移后,将其重新组合进而构建出等效的等臂长干涉数据,进而通过共模抑制以消除激光频率不稳定性引起的噪声。

若考虑星组之间相对静止,臂长保持不变的话,根据第一代TDI数据模型可完全消除激光频率抖动噪声。但由于卫星运行时受到轨道动力学的影响,臂长是一直在变化的,其相对变化量在1~10%,而根据第二代TDI数据模型,若臂长的绝对距离测量精度达到1 m以内,在一定短时间内则可将激光频率抖动噪声压制到工程需求之内^[4-5,9]。因此必须准确测量出卫星之间的距离,以确保相位信息的准确获取。

3 测距系统原理及设计

3.1 总体框架概述

为简化系统和节约卫星载荷,将星间绝对距离测量与通信系统集成于激光干涉仪中,其位于主干干涉通路中的基本原理图如图1所示^[4]。

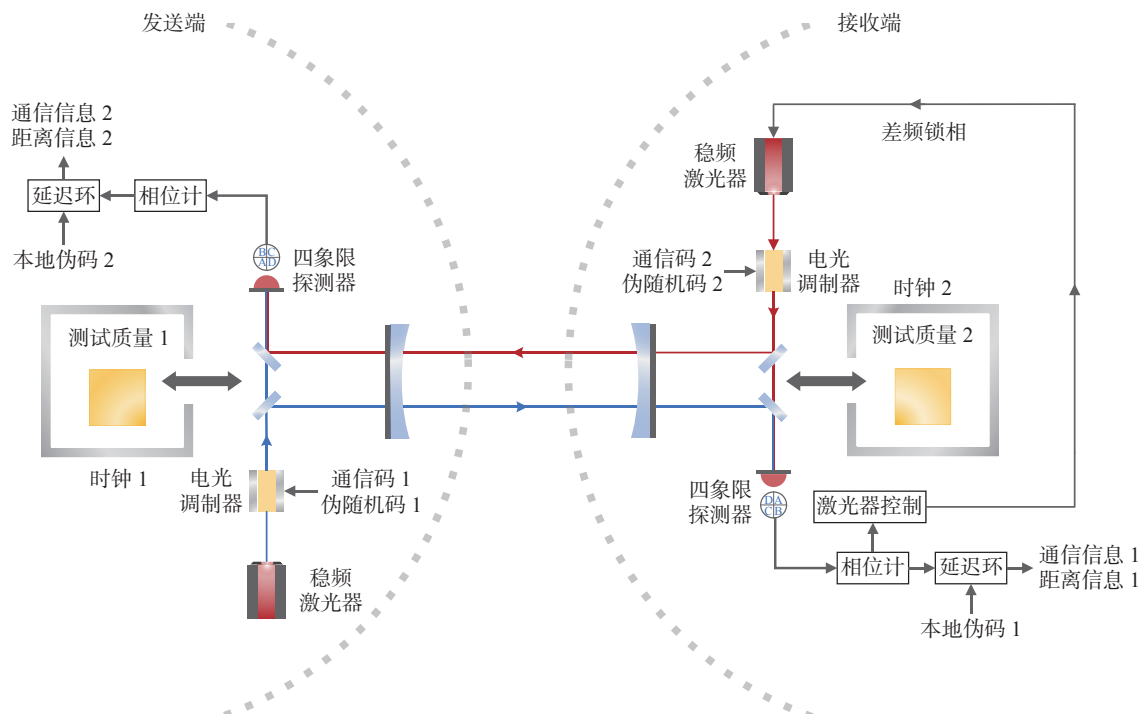


图1 星间绝对距离测量与通信原理图

Fig. 1 Principle diagram of the inter-satellites absolute ranging and laser communication system

图1中,本地航天器将伪随机码和通信码作为复合码,通过电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)调制到激光相位中,而后经信道传输

至远端航天器进行解调与测距,对于传输后的激光光束,其相位会发生一定的变化,利用伪随机码的相关性可测量该相位偏移以求出对应的时间延

迟,进而恢复出通信信息与延迟信息。

为应对太极计划中百万公里距离的测距通信需求,其系统设计与传统的伪码测距系统有着较大差异。一方面,该系统对星间时钟同步要求较高。由于系统分配至测距的激光功率约占总功率的 1%,到达接收端后仅为 pw 量级,因此不同于将信号回传至发送端的传统设计,太极计划的伪码测距工作在接收端进行。该做法需要接收端与发送端同步生成一组伪随机码,以便与接收信号进行相关运算,这便对星间时

钟同步提出了更高要求。另一方面,系统选取了较低的调制深度。一般的扩频通信系统通常会采用 πrad 的 BPSK 调制方式简化解调结构的设计,再将已调信号与伪随机码进行扩频,进而提高信噪比^[10-12]。但在太极计划中,为了减少由调制深度过高带来的非线性噪声以及降低测距系统消耗的激光功率,系统最终选用 0.1 rad 的调制深度,该参数已被证实能够满足实际需求^[4]。本文设计的测距通信系统结构示意图如图 2 所示。

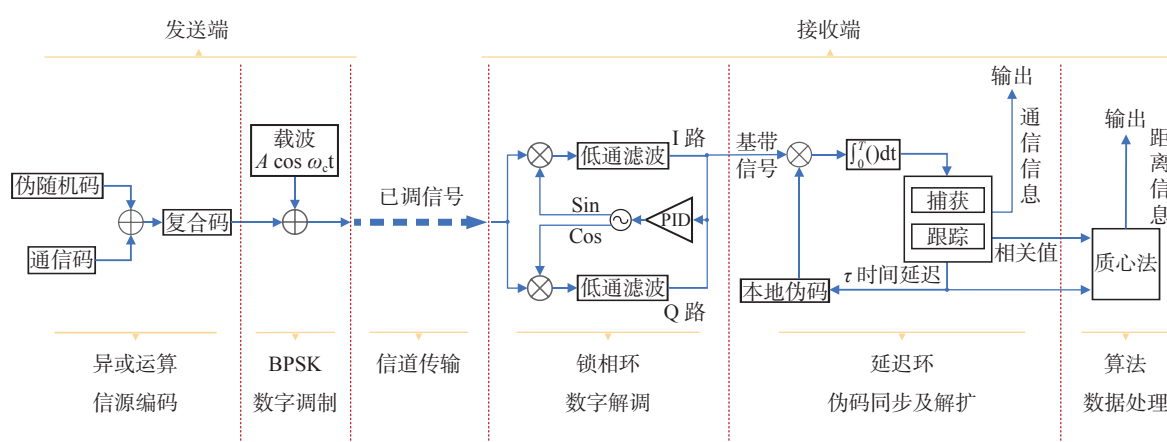


图 2 测距通信系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the ranging and communication system

图 2 中,该系统主要由 5 部分构成,其分别为信源编码、数字调制、数字解调、伪码同步及解扩、数据处理。在信源编码部分,所需传输的基带信号与伪随机码作异或运算后作为复合码进行传输,该过程可看作扩频通信中的扩频。数字调制部分使用的是 BPSK 调制。接收端采用的是先解调后解扩的结构,解调部分使用的是锁相环解调结构^[13]。伪码同步及解扩部分使用的是延迟环结构,通过捕获和跟踪两个环节,调整本地预存伪随机码的相位,使其与接收信号的相位一致,完成伪码同步并提取延迟信息。数据处理部分主要是针对延迟环提取的延迟信息进行优化,利用算法进一步提高测距精度。

其中,数字调制与解调部分可看成是通信系统的主要部分,本文将不予展开。文章主要讲述对测距系统较为重要的部分,即信源编码、伪码同步及解扩、数据处理,下文中将分节进行介绍。

3.2 信源编码设计

3.2.1 信号结构

在信源编码中,通信码与伪随机码异或运算形成复合码,随后经载波调制用于测距和通信,该信号的结构以及参数设计如图 3 所示。

首先需考虑一段复合码的持续时间,该段时间乘以光速后即为单次测距距离的理论最大值。根据 LISA 项目的设计,单次测距距离约为 200 km ,则复合码的频率约为 1.5 KHz ,周期约为 $655.36\text{ }\mu\text{s}$ ^[6,14]。鉴于国内尚未有已通过实验验证的研究,因此本文的信号结构设计参考了 LISA 项目的设计。

随后再确定伪随机码的速率。在该段复合码持续时间内,需传输一个伪随机码周期所有的位数,以便于判断经传输后伪随机码的相位偏移。根据伪随机码的特性和测距原理,伪随机码位数越多,则单个码片对应的时间精度越高,测距结果更精准。但由于拍频频率范围主要集中在

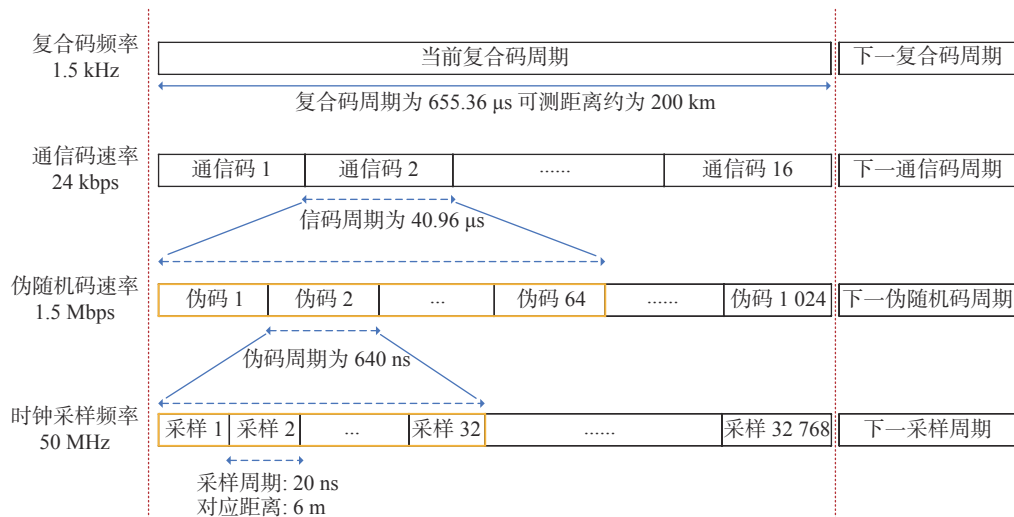


图 3 信号结构设计

Fig. 3 Design of the signal structure

2~20 MHz, 因此伪码速率需小于 2 MHz^[6, 15]。此处选取周期为 1024 的伪随机码, 则码率约为 1.5 Mbps, 单个码片的持续时间为 640 ns, 时间精度为 200 m。

通信码的传输速率同样需从测距方面进行考虑。由于伪随机码速率一般远高于通信码速率, 二者在异或运算时等同于一位通信码对应多位伪随机码, 因此以该方式形成的复合码与原伪随机码相比, 相关性遭到破坏。换句话说, 通信码将原伪随机码平均分成了数份, 测距时所进行的相关运算仅能从其中选取一份与原伪随机码进行运算, 因此, 在伪码同步时伪随机码显现的自相关性优劣取决于该份数的长度, 一份所含的伪码位数越多, 运算时自相关性越良好。此处选取的通信码位数为 16 位, 每 1 位对应 64 位伪随机码, 通信速率为 24.4 kbps, 每位通信码持续时间为 40.96 μs。

关于时钟信号采样频率的选取, 理论上时钟信号频率越高, 其对应的的时间精度越精细, 测距精度越高^[6]。因为当传输后伪随机码相位变化为非整数倍码片数时, 时钟信号可作为参考以测出更精确的相位, 但受限于开发板的指标以及功耗, 此处选取的时钟信号对每位伪随机码码片采样 32 点, 即为 50 MHz, 时钟周期为 20 ns, 对应的的时间精度为 6 m。

至此, 测距通信信号的整体结构便已确定, 通过连续发送该段信号则可达到通信以及测距

的目的。由于两卫星间的臂长远大于一个伪随机码周期的相关时间, 为了达到 200 万公里甚至 300 万公里的测距需求, 在实际引力波探测中需要用到深空测控网络 (Deep Space Network, DSN), 以确定两卫星间共有几个整数倍的相关时间, 再由该段信号测出 200 km 以内的精确距离, 以此实现超远距离的高精度测量^[6, 15]。

3.2.2 伪随机码选取

在信源编码部分, 伪随机码种类的选取同样对测距结果有着至关重要的影响。由于伪随机码的种类繁多, 如 m 序列、gold 序列、L 序列等, 且其自相关、互相关等性质各不相同, 因此, 要在伪随机码族中选取符合性能测度需求的码种^[17]。

LISA 计划所使用的伪随机码是由其项目成员通过数值优化以增强相关性所设计的, 但未提及码的类型^[6]。本文选取的伪随机码种类是目前北斗导航在用的 Weil 码, 选取依据主要从以下三方面考虑: 伪码长度的灵活性、自相关性、互相关性。

由于生成机制, 传统的 m 序列、gold 序列的长度仅满足 $2^n - 1$ 的关系, 可选长度较少, 难以适配实际的应用场景。Weil 码在长度选择上更具灵活性, 它是由一个基于二次剩余理论的 Legendre 序列移位后再与原序列异或运算生成的组合码, 其长度可选取为任意一个质数^[18-19]。

测距是通过检测自相关峰的位置以得到相应

的延迟信息,因此伪码的自相关性越好,相关峰越易被检测。为了得到期望的序列长度,通常会采用截断、补位等方式,但这会导致自相关性变化较大。本文对比了 m 序列、gold 序列、Weil 码以及它们经截断或补位后序列的最大自相关旁瓣绝对值。该参数越小表明伪码的自相关性越好,如表 1 所示。结果显示 Weil 码经截断后其自相关性变化较小,且 dB 值均优于 gold 序列,与处理后的 m 序列相近。

表 1 伪随机码自相关性对比

Tab. 1 Autocorrelation comparison of pseudorandom codes

伪随机码	处理(取最优)	码长	最大自相关旁瓣绝对值	dB值
m序列(本原多项式系数 2011)	无	1023	0.000977	-120.39
	遍历插1或0	1024	0.0469	-86.782
gold序列(本原多项式系数 2011、2157)	无	1023	0.06354	-84.136
	遍历插1	1024	0.082	-81.929
	遍历插0	1024	0.0859	-81.526
Weil码	无	1031	0.0611	-84.544
	遍历截取7位	1024	0.0625	-84.288

互相关性主要考虑的是伪随机码之间相互干扰的问题。由于太极计划组成的三星编队之间需要互相通信,互不干扰,因此共需要 6 组相互正交且互相关性好的伪码。m 序列是最基础的一种伪码,具有极好的自相关性,但同一阶中互相关性良好的码数量不多,因此现代通信一般不采用该码作为测距码。文献 [18] 表明 Weil 码的互相关性略优于 gold 码。

本文设计的 1024 位伪随机码便是由长度为 1031 的 Weil 码经过 7 位的循环截断后得到的,由 Weil 码的生成原理可知,Legendre 序列移位时有 1031 种可能,Weil 码在循环截断时有 1031 个点位可供选择,故生成该 1024 位伪随机码共有 1031×1031 种组合。本文对比了所有伪随机码的最大自相关旁瓣绝对值,以比较其自相关性优劣。基于此,本文共筛选出 620 种移位-截取点,其最大自相关旁瓣绝对值均为 0.0625, dB 值为 -84.288,图 4 为相应的自相关图像。

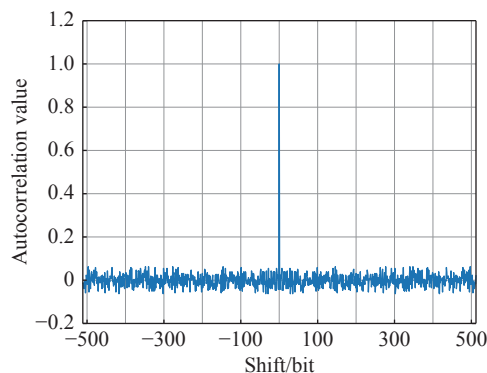


图 4 最优移位-截取点的 Weil 码自相关图像

Fig. 4 The autocorrelation figure of Weil codes in the optimal shift-cutoff combination

3.3 延迟环设计

延迟环的主要功能是完成伪码同步和解扩,获取所需的测距与通信信息。

伪码同步是将接收到的复合码与本地预存的伪随机码进行互相关运算,根据相关峰出现的时刻调整本地伪随机码,使其与接收信号达到相位同步。该过程可分为捕获与跟踪两部分,其示意图如图 5、图 6 所示。

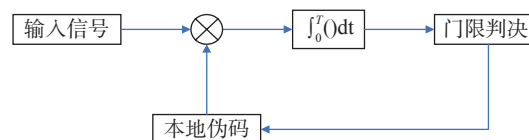


图 5 捕获结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the acquisition structure

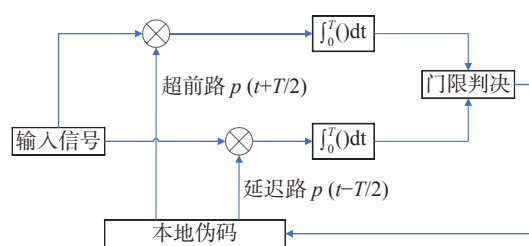


图 6 跟踪结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the tracking structure

捕获阶段实现的是伪随机码粗同步,即让接收的复合码中的某段(1 位通信码所对应的 64 位伪随机码)与该段所对应的本地伪随机码之间的相位差迅速减小到一定范围,通常约为一个伪随机码片的间隔。捕获方法的共同特点是利用本地信号与接收信号做互相关运算,获取相关值,再与设定的门限值比较,判断是否捕获到相关峰^[6]。本文使用的方法是滑动相关捕获法。

跟踪阶段亦称为伪随机码细同步, 如图6所示, 其在捕获的基础上, 在一个伪码码片间隔中进一步调整两序列之间的相位, 使其相位误差更小。首先利用相关峰的对称性, 判断跟踪阶段所需调整的方向, 当两序列无时间延迟时, 超前路与延迟路的相关值应相同, 通过比较延迟与超前两路的相关值, 即可判断调整方向, 该过程的示意图见图7。而后再向相应方向做最小步长的相位移, 直至二者相关值相同, 此时认为二者相位达到同步^[20]。该调整受采样频率的限制, 为50 MHz, 即20 ns。捕获和跟踪阶段所做的相位调整便对应着发送端与接收端之间的距离信息。

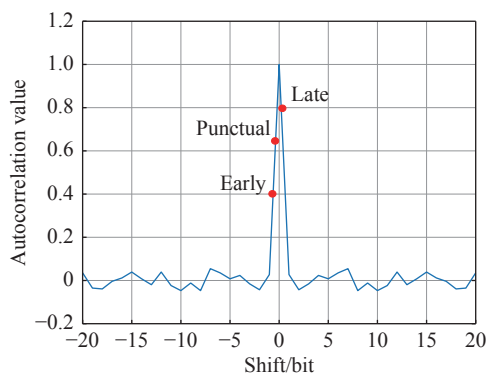


图7 延迟、超前路的相关值对比

Fig. 7 The comparison of the correlation value between delay and ahead signals

完成伪码同步后, 便可进行解扩。由于经锁相环解调后, 已调信号恢复成了基带信号, 但此时通信码与伪随机码仍为复合状态。利用伪码同步后的本地伪随机码与接收的复合码再做一次异或运算, 便可将所需的通信信息恢复。

需要说明的是, 在接收端预存的伪随机码应当与发送端同步生成, 以保证发送信号与接收信号之间只包含因距离传输产生的相位差。目前针对该问题的解决办法是利用高精度的时钟同步, 分析星间传输时的噪声影响, 测出两颗卫星间的时钟差, 使其保持高度同步。本文的分析与实验均基于系统已完成的时钟同步假设而进行。

3.4 数据处理算法

由于时钟采样频率不能无限制地提高, 要达到1 m左右的测量精度, 凭借目前50 MHz的采样频率(时间精度为6 m)是远远不够的。因此, 在数据处理时需根据实验数据的先验知识, 使用算法突破采样率的限制以提高测量精度。

由于延迟环中所做的最小相位调整受限于采样频率, 因此跟踪时所查找到的相关峰并不完全对称。但根据当前得到的峰值和其相邻值, 可判断出真正的相关峰一定位于某两点之间, 如此便可利用一些算法对当前数据进行拟合, 以提高测量精度^[21]。上述过程的示意图如图8所示。

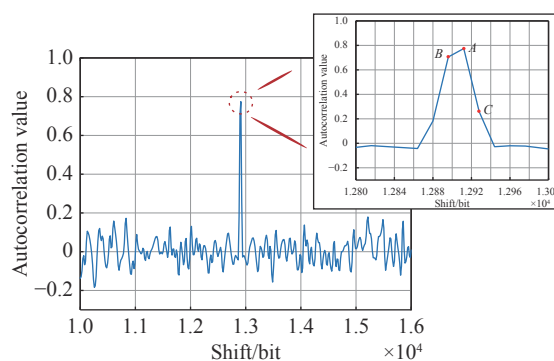


图8 不完全对称的相关峰

Fig. 8 Asymmetric correlation peak

综上, 数据处理算法对于提高测距精度有着可观的影响与重要的意义, 本文使用的处理算法是两点质心法。

4 地面电子学实验

4.1 实验等效性及有效性分析

根据上述方法, 本课题组针对太极计划中的星间激光测距进行了理论分析, 以检验测距系统性能和模拟信号传输的物理过程为目的, 搭建了一套地面电子学实验装置, 为未来的激光实验提供理论基础。

对比在实际太空环境中的星间传输, 本实验与其不同之处主要在于传输媒介以及传输距离。本实验使用射频同轴电缆传输信号; 而在太空环境中, 信号经电光调制器调制后通过激光进行传输。二者在信号传输的物理过程上是相似的, 但由于光学链路受环境因素影响较大, 易引入散粒噪声等干扰, 加大了系统设计的难度, 且本次实验目的旨在模拟物理过程以及验证系统性能, 因此本文采用的是地面电子学实验的方法学进行研究。另一方面, 实验使用10~60 m射频线缆对卫星之间百万公里的距离进行等效, 这是因为伪随机码的测距精度与距离无直接的联系。伪随机码测距的原理是通过其高度的自相关性, 寻找相关

峰的偏移点数, 再与采样周期做对比确定相应时延, 其最终的测距精度由采样周期与数据处理算法共同决定。本文根据约 200 km 的可测距离, 对伪随机码的速率与点数进行了设计, 未来配合深空测控网络便可达到百万公里的测量。因此, 实验使用有限长的射频线对该系统的测距精度进行测试, 具备等效性及有效性。

4.2 实验设置

实验采用电子学验证的方式, 使用一块 FPGA 硬件开发板作为实验主体装置, 用以模拟收发两端的卫星之间的通信、测距过程, 以及实现锁相环、延迟环等功能。使用不同长度的射频线以模拟信号实际传播距离。实验流程框图如图 9 所示。

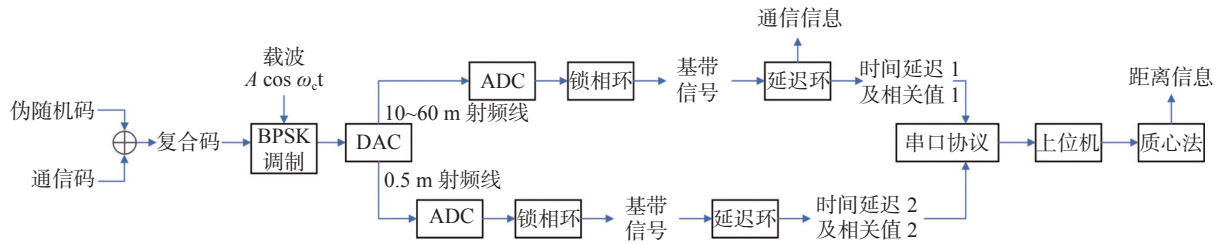


图 9 实验流程

Fig. 9 Experiment flow chat

实验首先将速率为 24.4 kbps 的 16 位信息码与 1.5625 Mbps 的 1024 位 Weil 码进行 BPSK 调制, 载波速率为 6.25 MHz。随即经过数/模转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC) 生成两路模拟信号, 一路(下文称为长距离信号)用于通过 10~60 m 的射频同轴电缆进行 6 次测距实验; 另一路(下文称为短距离信号)用于通过 0.5 m 的射频同轴电缆, 测算本次实验开发板进行 AD/DA 转换、解调滤波等操作时产生的时延, 减少误差。而后信号传输至模/数转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 恢复成数字信号, 在开发板内实现锁相环解调、延迟环伪码同步及解扩功能, 再通过串口协议输出实验数据至上位机, 最后在 Matlab 上使用两点质心法对数据进行处理。

本次地面电子学验证实验所搭建的实验装置如图 10 所示, 主要用到的仪器以及器材有:

(1) 基于 Xilinx 公司 KINTEX-7 系列 XC7K-325T 芯片的自研 FPGA 板卡;

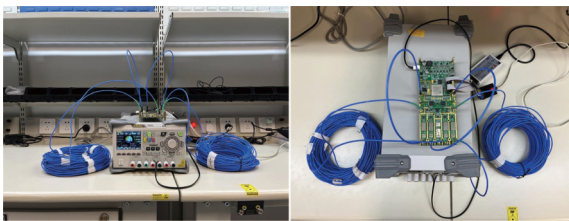


图 10 实验装置

Fig. 10 Experimental equipment

- (2) Rigol 公司 DP832A 可编程直流电压源;
- (3) SS405 射频同轴电缆 0.5 m、10 m、12 m、20 m、30 m、50 m、60 m, 传播速度为 70% 光速;
- (4) USB2.0 转 RS422/485 转接器。

4.3 实验结果及分析

实验对 6 个距离长度进行了测试, 通过更换不同长度的射频同轴电缆以改变传输距离。每次实验共设 20 组测试数据, 每一组数据均在上电后, 对长距离信号和短距离信号分别重复测距 300 次, 随后用两点质心法算出二者对应的距离值并相减。由于信号在射频线内不是以光速进行传播的, 其传播速度与电缆的相对介电系数有关, 经查阅后本次实验所使用的 SS405 射频线的传播速度为 70% 的光速^[22], 因此, 实验数据需乘以 0.7。取 20 组数据的均方差作为测距精度, 所得结果如图 11 以及表 2 所示。

可看出 6 次实验能较为准确地测定距离, 且测距精度均优于 1.6 m, 达到了 1 m 量级的精度, 证明了测距系统原理及设计的可行性。随着测量距离的增加, 测距精度呈现无规律变化。另外, 当测量距离与相关峰移动点数在时钟采样周期下对应的距离较接近时, 测量的平均值会更接近真实值, 对应关系如表 3 所示。

综上, 该实验证明了测距系统原理及设计的可行性, 60 m 范围内, 测距精度优于 1.6 m, 满足本次实验的精度要求。但与 LISA 计划所取得的

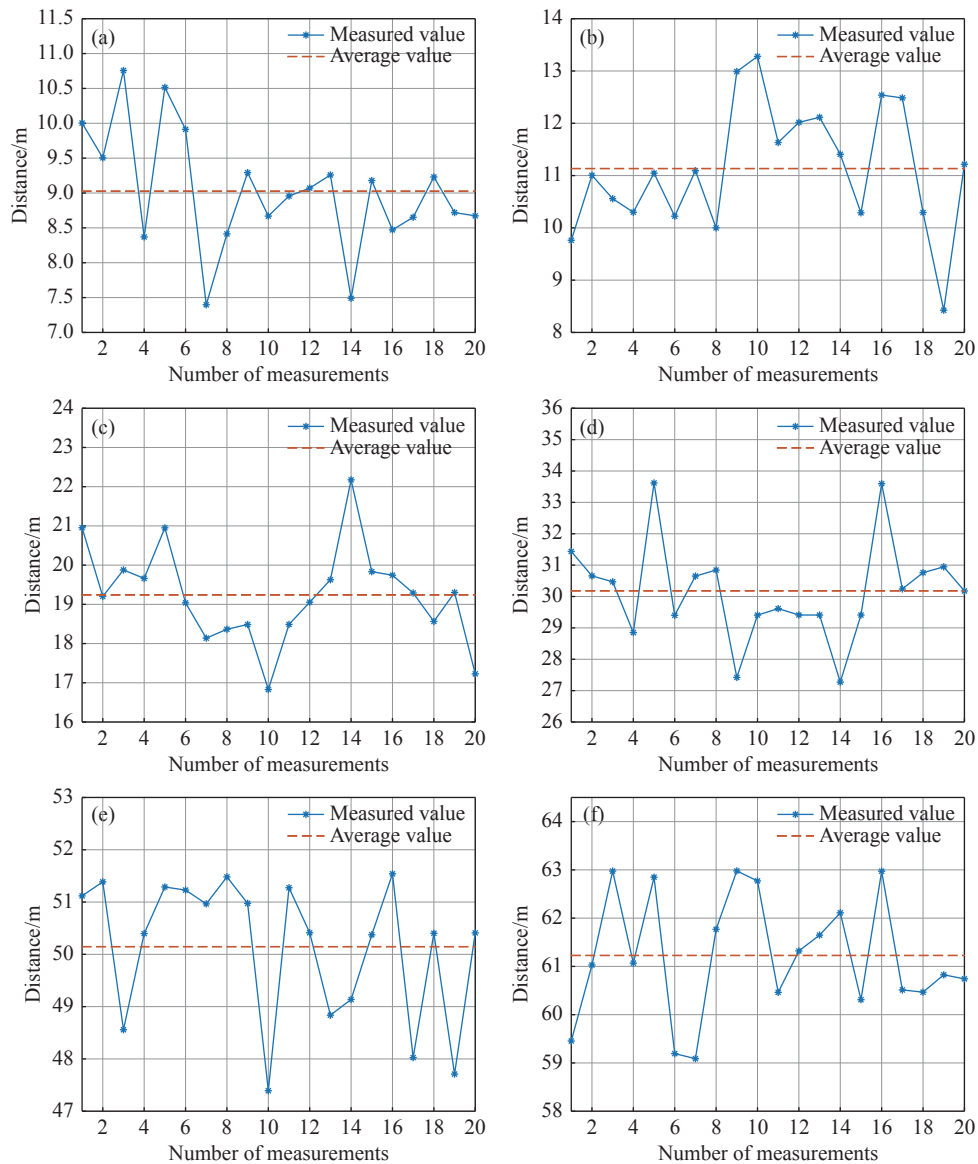


图 11 不同长度射频线的实验结果。(a)10 m; (b)12 m; (c)20 m; (d)30 m; (e)50 m; (f)60 m

Fig. 11 Experiment results with different length cables. (a) 10 m; (b) 12 m; (c) 20 m; (d) 30 m; (e) 50 m; (f) 60 m

表 2 实验结果附表

Tab. 2 Attached table of experimental results

真实值/m	实验平均值/m	均方差(测距精度)/m
10	9.03	0.86
12	11.13	1.21
20	19.24	1.24
30	30.18	1.59
50	50.14	1.35
60	61.23	1.26

0.7 m 测距精度还存在一定差距。从实验结果来看,造成误差的原因以及未来提升的方向集中在以下三方面:

(1) 两点质心法在数据优化中属于较为基础的算法,其根据峰值相邻两点非完全对称的特点,选取峰值所在点与其次高点作为权重点进行运算。该方法存在一定的局限性,当真正峰值位于两个权重点中心区域时,算法精度较高;但真正峰值位于权重点附近时,算法精度不佳。

(2) 实际测量的距离是由长距离信号所测的距离减去短距离信号所测距离,而短距离信号测算开发板处理 AD/DA 转换、解调滤波等操作的时延同样需要使用两点质心法,从而引入了二次误差。

(3) 目前系统的采样频率为 50 MHz,在物

表 3 相关峰移动点数在 50 MHz 采样频率下对应的距离
Tab. 3 Distances corresponding to the number of shifts of the correlation peak at the 50 MHz sampling frequency

相关峰移动点数	光速时对应距离/m	70%光速对应距离/m
1	6	4.2
2	12	8.4
3	18	12.6
4	24	16.8
5	30	21.0
6	36	25.2
7	42	29.4
...
12	72	50.4
14	84	58.8

理层面上限制了距离分辨率,即 6 m 的精度。通过提高采样频率能提升基础精度,如 100 MHz 时对应为 3 m,故降低了数据处理算法的设计难度。

该实验证明了测距系统原理及设计的可行性,测距精度均优于 1.6 m,满足本次实验的精度要求。未来改进方向集中在改进或更换数据处理算法以提高测距精度、降低二次误差,以及优化系统设计,提高采样频率方面。

参考文献:

- [1] 罗子人,白珊,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)
- [2] 罗子人,张敏,靳刚.激光干涉引力波空间阵列核心问题的综合讨论[J]. *科学通报*, 2019, 64(24): 2468-2474.
LUO Z R, ZHANG M, JIN G. Overall discussion on the key problems of a space-borne laser interferometer gravitational wave antenna[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(24): 2468-2474. (in Chinese)
- [3] 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 space-borne gravitational wave detection program "Taiji" and "Taiji-1" satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 3-10. (in Chinese)
- [4] 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 SH, 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. (in Chinese)
- [5] 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.

5 结 论

本文基于引力波探测的背景,从信源编码设计、延迟环设计以及数据处理算法等方面介绍测距系统的设计方案,分析了地面电子学验证的等效性与有效性,并完成了实验。该实验以检验星间激光测距系统的测距性能和模拟信号传输的物理过程为目的,通过 FPGA 硬件开发板和不同长度的射频同轴电缆模拟了卫星收发通信和测距的过程,在距离为 60 m 范围内,测距精度优于 1.6 m。

通过该地面电子学验证实验,证明了测距系统原理及设计的可行性,为下一步的光学系统验证奠定了技术基础。但根据 TDI 技术的原理分析,测距精度需达到 1 m 以内,激光频率抖动噪声水平才能满足工程需求,因此,仍需对实验方案做进一步研究。由实验结果可知,在采样频率一定的情况下,对同一测距结构而言,数据处理算法的选择很大程度上决定了最终的测距精度,因此这也是本文改良实验方案的主要方向。

本文所阐述的星间激光测距方案不仅对于太极引力波探测有较大意义,而且还可适用于未来的空间探测任务。伪随机码测距有着测距精度高,探测范围广的优势,是目前许多导航系统在用的方案。日后随着测距系统的优化,伪随机码的发现以及测距算法的提升等,定能进一步扩大该技术优势,将其运用到更广泛的领域。

- WANG D F, YAO X, JIAO ZH K, *et al.*. Time-delay interferometry for space-based gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 275-288. (in Chinese)
- [6] DELGADO E, JOSÉ J. *Laser Ranging and Data Communication for the Laser Interferometer Space Antenna*[M]. Granada: Universidad de Granada, 2012.
- [7] 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.
- [8] 韩旭, 李志, 吴耀军, 等. 伪随机码调制的高精度星载激光测距雷达[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210250.
HAN X, LI ZH, WU Y J, *et al.*. High precision ranging lidar based on pseudorandom code modulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210250. (in Chinese)
- [9] BAYLE J B, HARTWIG O, STAAB M. Adapting time-delay interferometry for LISA data in frequency[J]. *Physical Review D*, 2021, 104(2): 023006.
- [10] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 7版. 北京: 国防工业出版社, 2012.
FAN CH X, CAO L N. *Principles of Communications*[M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [11] ABOUZAID S H, AHMAD W A, EIBERT T F, *et al.*. Vital signs monitoring using pseudo-random noise coded Doppler radar with Delta-Sigma modulation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(11): 1778-1787.
- [12] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
XIE G. *Principles of GPS and Receiver Design*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [13] 贝斯特. 锁相环: 设计、仿真与应用[M]. 李永明, 译. 5版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
BEST R E. *Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications*[M]. LI Y M, trans. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [14] ESTEBAN J J, BYKOV I, MARÍN A F G, *et al.*. Optical ranging and data transfer development for LISA[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2009, 154: 012025.
- [15] SWEENEY D. *Laser communications for LISA and the University of Florida LISA interferometry simulator*[D]. Gainesville: University of Florida, 2012.
- [16] 张岩奇. 扩频测距技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.
ZHANG Y Q. Research on spread spectrum ranging system[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] 马旭辉. 卫星导航信号扩频码设计与性能评估[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2020.
MA X H. Design and performance evaluation of spread spectrum code for satellite navigation signal[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [18] 张瀚青, 何在民, 叶旅洋, 等. 北斗三号等长Weil码和Gold码性能分析与比较[J]. 计算机仿真, 2019, 36(8): 71-76.
ZHANG H Q, HE Z M, YE L Y, *et al.*. The analysis and comparison of the performance of the Equi-length Weil and gold codes[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(8): 71-76. (in Chinese)
- [19] 叶旅洋. 北斗三号 B1C 信号模拟产生与性能分析[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
YE L Y. Simulation generate and performance analyse on BDS-3 B1C signal[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [20] 陈诚. 高动态直接序列扩频通信系统关键算法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
CHEN CH. Research and implementation of key algorithms for high dynamic direct sequence spread spectrum communication system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [21] 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 SH, YANG F, YE X CH, *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. (in Chinese)
- [22] 张杏兴, 谢光荣. 同轴电缆及电缆组件装配工艺介绍[J]. 机电元件, 2013, 33(4): 23-27,35.
ZHANG X X, XIE G R. The process introduction to coaxial cable and cable assembly[J]. *Electromechanical Components*, 2013, 33(4): 23-27,35. (in Chinese)

作者简介:



邓汝杰(1998—),男,广东东莞人,硕士研究生,现就读于国科大杭州高等研究院,主要从事引力波探测星间激光测距方面的研究。E-mail: dengrujie20@mails.ucas.ac.cn



张艺斌(2000—),男,甘肃天水人,硕士研究生,现就读于国科大杭州高等研究院,主要从事引力波探测星间激光通信方面的研究。E-mail: zhangyibin201@mails.ucas.ac.cn



刘河山(1988—),男,安徽阜阳人,博士,副研究员,2015年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院力学研究所副研究员。研究领域涉及激光干涉测距、高精度相位测量、精密指向控制、激光锁相等。E-mail: liuheshan@imech.ac.cn



罗子人(1980—),男,湖南长沙人,博士,研究员,2010年于中国科学院数学与系统科学研究院获得理学博士学位,现为中国科学院力学研究所研究员。太极计划首席科学家助理,主要从事引力波探测的空间激光干涉测距技术的理论分析和方案设计方面的研究。E-mail: luoziren@imech.ac.cn