



红外与激光工程
Infrared and Laser Engineering
ISSN 1007-2276, CN 12-1261/TN

《红外与激光工程》网络首发论文

题目: 空间引力波探测激光外差干涉信号模拟系统
作者: 韩爽, 佟琚泽, 王振鹏, 于涛, 隋延林
网络首发日期: 2021-09-18
引用格式: 韩爽, 佟琚泽, 王振鹏, 于涛, 隋延林. 空间引力波探测激光外差干涉信号模拟系统[J/OL]. 红外与激光工程.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20210918.1240.002.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。

空间引力波探测激光外差干涉信号模拟系统

韩爽^{1,2}, 佟琨泽^{1,2}, 王振鹏^{1,2}, 于涛^{1*}, 隋延林¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要：由于激光外差干涉测量系统光机平台无法模拟多普勒频移，并且商用信号发生器无法实现多种类、高复杂度的星间外差干涉信号模拟，不能对空间引力波探测的相位计进行全面测试。通过分析外差干涉信号的特性，研究信号模拟系统的实现原理及方法，设计了空间引力波探测激光外差干涉信号模拟系统。首先，应用直接数字合成器（DDS）模拟外差干涉信号。其次，通过频率偏移方式模拟多普勒效应，应用混合同余算法生成散粒噪声并调制到外差干涉信号中。最后，基于FPGA搭建系统硬件平台，通过示波器及频谱分析仪分析生成信号的时频特性。实验结果表明，信号模拟系统在2~20 MHz的频率范围内杂波抑制度为-53 dBc，谐波（二次）抑制达到-47 dBc，生成信号的时频特性符合理论预期，满足空间引力波探测相位计的地面测试需求。

关键词：信号模拟；空间引力波探测；激光干涉测量

DOI:10.3788/IRLA20210572

中图分类号：TN249

Simulation System of Laser Heterodyne Interference Signal for Space Gravitational Wave Detection

HAN Shuang^{1,2}, TONG Jun-ze^{1,2}, WANG Zhen-peng^{1,2}, YU Tao^{1*}, SUI Yan-lin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academic of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the limitation of the optical-mechanical platform of the laser heterodyne interferometry system, the Doppler frequency shift cannot be simulated. Moreover, commercial signal generators cannot realize various types of high-complexity inter-satellite heterodyne interference signal simulations. It difficult to conduct ground test of the phasemeter for Space Gravitational Wave Detection detailed. Therefore, the characteristics of heterodyne interference signals were analyzed, the realization principle and method of signal simulation system were studied, and then the simulation system of laser heterodyne interference signal for space gravitational wave detection was designed. First, the simulation of the heterodyne interference signal was applied to the DDS. Then, the influence of Doppler effect was simulated by offsetting the overall frequency. Next, based on the mixed congruential algorithm, the shot noise was generated and modulated into the heterodyne interference signal. Finally, with the usage of FPGA, the system hardware platform was built. The time domain and frequency domain characteristics of generated signals were analyzed by oscilloscope and spectrum analyzer. The experimental result shows that the spurious suppression of the system is -53 dBc and the harmonic suppression is -47 dBc at 2-20 MHz. The signal generated by the system is in good agreement with the expectations which satisfies the ground test requirements of the phasemeter for space gravitational wave detection.

Key words: Signal simulation ; Space gravitational wave detection; The laser interferometry

基金项目：国家重点研发计划课题：多物理场综合弱力测量系统（2020YFC2200604）

0 引言

2016 年 2 月, 美国的地基激光干涉引力波天文台 (LIGO) 公开了人类历史上第一次直接探测到的引力波结果^[1], 但受到地面的臂长限制以及地表低频震动的影响, 有效探测频段均在 1 Hz 到 1 kHz 的高频段上^[2]。在空间进行引力波探测可以探测到引力波资源更为丰富的中低频段^[3-4], 目前的空间引力波探测计划主要有美国 NASA 和欧洲 ESA 合作的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 计划^[5]以及中国的“太极”计划^[6]和“天琴”计划^[7], 且均已经通过技术验证卫星完成了部分关键技术的测试^[8-11]。

“太极计划”预计发射三颗卫星在太空中组成臂长 300 万公里的等边三角形编队, 通过测量相位的方式推导出测试质量间的位移变化, 以此来反演引力波信息^[12]。实现相位测量功能的载荷称为相位计, 要求在 0.1 mHz~1 Hz 的频率范围内相位测量精度优于 $1\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[6,13]。根据空间引力波探测的任务需求, 激光链路需要同时具备测试质量的相对位移测量、时钟边带调制、激光测距通信等功能^[2,14], 因此相位计需要同时对主载波拍频、时钟边频、导频以及测距通讯编码进行处理, 过程复杂且精度要求极高。因此, 在地面上对相位计进行全面测试是完成空间工程任务的重要基础。

目前国内外针对空间引力波探测相位计的研究主要集中在单项功能及性能测试, 各个单项功能的测试信号主要由激光外差干涉测量光机平台生成或

采用商用信号发生器模拟^[12,14]。相位计的全功能集成研究正处于起步阶段, 但是激光外差干涉测量系统光机平台状态更改难度大, 无法全面模拟在轨各工况下的噪声, 且无法实现多普勒频移。商用信号模拟器不能实现多种类、高复杂度的星间外差干涉信号模拟, 均不能满足相位计全面测试的需求, 因此需要设计空间激光外差干涉信号模拟系统。

目前国内外仅阿尔伯特·爱因斯坦研究所 (Albert Einstein Institute in Hannover, AEI) 的 Iouri Bykov 为 LISA 的相位测量系统设计了专用的信号模拟器, 但是并没有专门的文献对设计过程及原理进行描述^[15,16]。

基于相位计的地面测试需求, 分析外差干涉信号的特性, 研究信号模拟系统的实现原理及方法, 设计了空间引力波探测激光外差干涉信号模拟系统 (简称信号模拟系统)。信号模拟系统能产生三个独立的参数可调的正弦信号、PRN 序列脉冲信号、多普勒变频信号以及功率谱恒定的白噪声等多种信号源, 频率覆盖范围 2~20 MHz。该系统在现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 中实现, 通过 RS422 与 PC 端通信, 支持 PC 端更改模拟的信号参数, 具有可编程性强、操作简单等优点。通过示波器及频谱分析仪验证了模拟信号的时频特性, 实验证明, 该信号模拟装置模拟的信号符合理论预期, 满足相位计的地面测试需求。

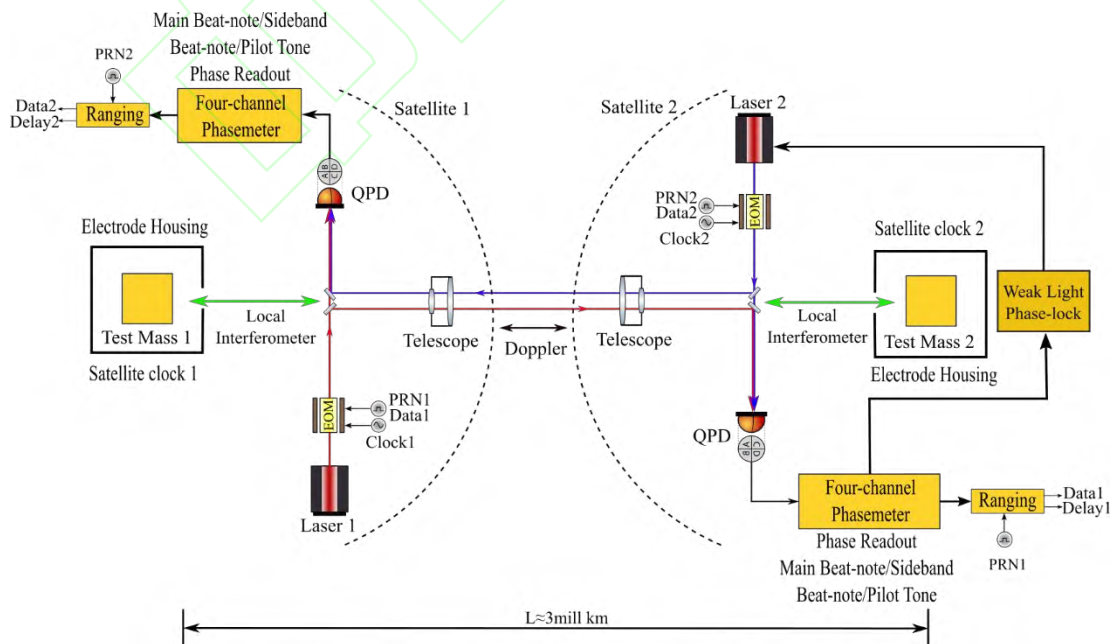


图 1 空间引力波探测激光外差干涉原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of principle of space gravitational wave detection laser heterodyne interference

1 空间引力波探测原理及信号特性

1.1 空间引力波探测原理

空间引力波探测激光外差干涉原理如图 1 所示。两卫星分别载有独立的激光光源（激光 1 和激光 2），卫星 2 接收来自卫星 1 发出的激光 1，在卫星 2 上的测试质量 2 反射后与激光 2 发生干涉，通过四象限光电探测器（Quadrant Photoelectric Detector, QPD）转化为电信号。通过相位计读出激光 2 和接收激光的相位差，应用弱光锁相的方式将激光 2 和接收激光进行差频相位锁定，使激光 2 携带接收激光的相位信息。将锁定后的激光 2 向卫星 1 发射，经卫星 1 的测试质量 1 反射后与激光 1 发生干涉，则外差干涉信号中包含了两卫星间测试质量的距离变化信息^[12]。通过相位计测量卫星 1 中激光干涉信号的相位变化，就可以反演由引力波所引起的测试质量间的距离变化。相位变化与距离变化之间的关系式为：

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为相位变化， ΔL 为测试质量间距离变化， λ 为应用的激光波长。

1.2 空间激光外差干涉信号的特性

空间激光外差干涉信号（简称外差干涉信号）的主体信号包括主载波拍频、两个时钟边频以及测距通信编码。引入的关键噪声包括多普勒频移以及散粒噪声。

1.2.1 空间激光外差干涉信号的主体信号

a、主载波拍频与时钟边频

M.Tinto 等人提出将振荡器的时钟噪声信号倍频并通过电光调制器（Electro-Optic Modulator, EOM）调制到载波激光相位上，在产生的时钟边频信号中提取出时钟噪声，进而在时间延迟干涉技术（Time-Delay Interferometry, TDI）的数据组合中消除^[17]。为了不影响科学信息的顺利读出需要保留强载波信号，只有 10% 的激光功率能用于时钟边带传输，且时钟边频的频率与主载波拍频的频率至少需要相差 1 MHz 来保证三个拍频信号频率可以分别被相位计捕获。由于多普勒频移的存在，“太极计划”预计主载波拍频频率保持在 3 MHz~19 MHz 的频率范围内，时钟边频的频率范围为 2 MHz~20 MHz^[13]。

b、通信测距编码

应用直接序列扩频（Direct Sequence Spread

Spectrum, DS/SS）方案实现激光测距通信功能。该方案将[0,1]序列形成的伪随机噪声（Pseudo-Random Noise, PRN）码与较低速率的数据信号进行异或编码后，应用 BPSK 原理相位调制在载波激光中^[14]。测距通信应用的 PRN 码为偶数长度，1024 个码片为一个周期，且每一组 PRN 码的自相关性在对准时刻出现峰值，其余时刻接近于 0。这样可以在接收端的相位计中应用 PRN 序列的时间对准进行解调处理，读出数据信息并确定延迟时间，进而计算出航天器间的绝对距离。

如图 2 所示为空间引力波探测测距通信系统的设计参数，系统时钟为 70 MHz，PRN 码片速率为 2.2 MHz（70 MHz/32），与约 34 kbps（2.2 MHz/64）的数据进行编码后，得到频率约 2.1 kHz 的一个序列周期，该周期中包含了 1024 个 PRN 码片，携带了 16（1024/64）个数据信息。为了不影响科学测量，测距通信编码仅占整体功率的 1%。

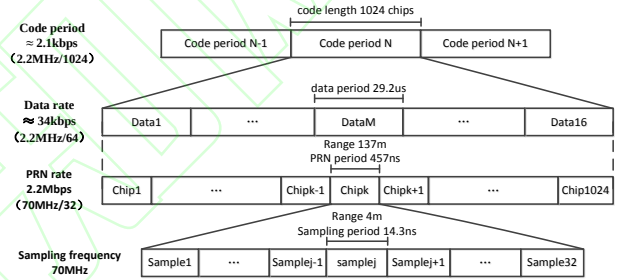


图 2 测距通信系统的设计参数

Fig.2 The design parameters of the ranging and communication system

1.2.2 空间激光外差干涉信号中的关键噪声

空间引力波探测任务中对主体信号影响最大的关键噪声来源为多普勒频移和散粒噪声。

a、多普勒频移

由于轨道动力学，航天器间会产生相对速度，在信号中引入多普勒频移 f_D ，近似为：

$$f_D \approx f_L \frac{v}{c} \quad (2)$$

其中， f_L 是本地激光的发射频率。 v 是航天器间视线速度， c 为光速。系统工作时，卫星 1 与卫星 2 发射的激光频差预先确定，由于多普勒效应的影响卫星 2 接收到的光信号将会发生频率变化。根据“太极计划”目前的轨道估算出的多普勒频移的变化速率约为 1~3 Hz/s^[13]，在“太极计划”的五年工作寿命中，这种由于多普勒引起的频率变化约为 ±5 MHz^[13]。接收端的相位计通过频率捕获功能可以获取受多普勒效应影响的外差信号的频率，其结

果可以消除多普勒频移的影响，使相位计可以读出外差信号的相位。

b、散粒噪声

散粒噪声是光学测量中最基本的噪声之一，从统计物理可知，激光器发射的光子数本身是有涨落的，这种涨落服从泊松分布，QPD 检测到光子的统计相位分布会引入散粒噪声^[3]。

假设激光功率为 P ，单位时间光子数为 N ，光子数 ΔN 服从泊松分布，激光的相位涨落 $\Delta\phi$ 和光子数涨落存在关系：

$$\Delta\phi \geq \frac{1}{\Delta N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \sqrt{\frac{hf}{P}}$$

$$V = \frac{\eta G_{TIA} \sqrt{P_S P_L \gamma}}{N} J_0^2(m_{sb}) \sin[2\pi(f_{het} + f_D)t + \phi + m_{prn} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n p(t - nT_c) + n(t)]$$

$$+ \frac{\eta G_{TIA} \sqrt{P_S P_L \gamma}}{N} J_1^2(m_{sb}) \{ \sin[2\pi(f_{sb1} + f_D)t + \phi_{sb1} + n(t)] + \sin[2\pi(f_{sb2} + f_D)t + \phi_{sb2} + n(t)] \}$$
(4)

其中， η 为 QPD 的响应度， G_{TIA} 为跨阻抗放大器的增益， N 是光电二极管的段数（QPD 中 $N=4$ ）， P_S 和 P_L 分别是接收的信号光功率和本地激光功率， γ 为外差干涉效率， $J_k(m)$ 表示第一类第 k 阶贝塞尔函数， $m_{sb} \approx 0.45$ 为相位调制指数，在此小调制指数下，贝塞尔函数仅保留 J_0 和 J_1 项。 f_{het} 、 f_{sb1} 、 f_{sb2} 分别为主载波拍频以及上下时钟边频的频率， f_D 为多普勒频移引起的频率变化， ϕ 、 ϕ_{sb1} 、 ϕ_{sb2} 分别为主载波拍频、上下时钟边频的相位，其中包含科学信息。 $m_{prn} \approx 0.2 \text{ rad}$ 代表测距通信调制指数。 c_n 为二进制 [0,1] 序列组成的 PRN 码，脉冲形状由周期 $1/T_c$ 的 $p(t)$ 给出。 $n(t)$ 代表散粒噪声。

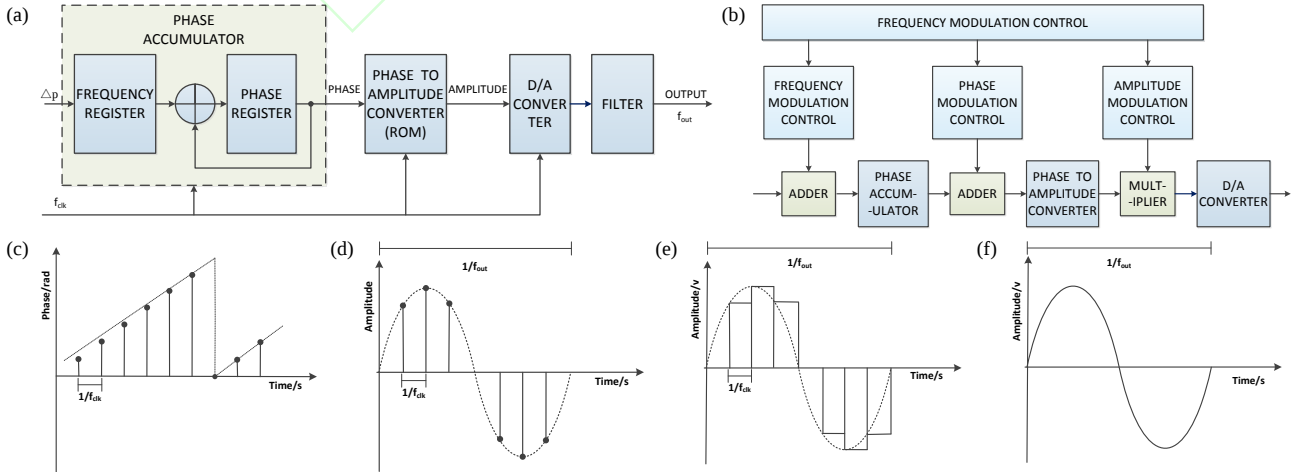


图3 (a) 直接数字合成器基本原理结构图；(b) 带调制功能的直接数字合成器原理框图；

$$\Delta f \geq \frac{1}{\Delta N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \sqrt{\frac{hf}{P}}$$

(3)

其中 h 为普朗克常数， f 为激光频率。虽然散粒噪声可以写作函数形式，但实际上呈现出具有平均功率谱密度的白噪声分布。

根据 QPD 输出的光电流与接收的干涉光功率成正比的性质，去掉 QPD 不能响应的高频部分并忽略直流分量，经跨阻放大器（Trans-Impedance Amplifier, TIA）输出的单个象限段电压公式为：

(c) PR 的输出波形；(d) ROM 的输出波形；(e) DAC 的输出波形；(f) 滤波器输出波形

Fig.3 (a) Schematic diagram of the basic principles of the direct digital synthesizer; (b) DDS block diagram with parametric modulation function;

(c) The output of PR; (d) The output of ROM; (e) The output of DAC; (f) The output of lifter

PA 由 48 位频率寄存器、全加法和相位寄存器 (Phase Register, PR) 组成。频率寄存器存储一个数字相位增量字 (PIR)，每个时钟脉冲 PIR 被添加到 PR 保存的数据中。PIR 表示每 $1/f_{clk}$ 秒增加一个相角到先前的值 (f_{clk} 为系统时钟频率)，从而在 PA 输出处产生一个线性增加的相位数字值，如图 3 (c) 所示。ROM 是一个正弦查找表 (LUT)，它将数字相位信息转换为正弦波的幅值，因此得到一个离散的近似正弦序列，如图 3 (d) 所示。通过 DAC 可以得到量化的模拟正弦波，如图 3 (e) 所示。随后经过滤波器得到了近似的正弦信号，如图 3 (f) 所示。

DDS 的全数字生成方式方便对生成的正弦信号进行数值调制。改变 PIR 的值实现信号频率的调整，在 PA 与 ROM 间添加加法器增加相位偏置实现相位调制，在 ROM 生成离散近似正弦序列后，通过乘法器进行比例缩放实现幅值调节。带参数调制功能的 DDS 实现原理框图如图 3 (b) 所示，以此为基础可实现各种复杂的调制方式。

2.2 混合同余法原理

混合同余法生成均匀分布随机数有自由度高、变换简单且周期可控的优点，用于模拟功率谱恒定的白噪声，迭代式如下：

$$x_{n+1} = (a \cdot x_n + b) \bmod M, x_0 \quad (5)$$

式中 a 为因子， x_0 为初始值， b 为常数， M 为模。 x_n 是在 $(0, M)$ 内服从均匀分布的随机变量。由式 5 可以看出混合同余法是一种递归的算法，从一个初始值出发可以得到一组不超过 M 的整数数列。但式子中 a 、 x_0 、 b 、 M 不能随意取值，否则会破坏统计特性。经试验表明，应用以下参数产生的随机序列有较好的统计特性^[19]。

$$x_{n+1} = (2045x_n + 1) \bmod 2^{20}, x_0 = 16807 \quad (6)$$

3 空间激光外差干涉信号模拟系统

3.1 信号模拟系统的设计

3.1.1 设计要求及参数

根据公式 4 的外差干涉信号模型并结合相位计的地面测试需求，空间激光外差干涉信号模拟系统

设计需要满足以下要求：

第一、需要三个独立的通道分别生成可以自由调节参数、有固定的频率差 ($0, \pm 1 \text{ MHz}$) 的三个正弦信号；

第二、需要灵活的对三个信号调频、调相、调幅；

第三、需要在模拟器内部生成 PRN 码用于 DS/SS 测距通信；

第四、需要模拟输出功率水平可调的散粒噪声；

第五、需要能够灵活调节加入的主体信号和噪声的种类及参数。

表 1 空间激光外差干涉信号的模拟参数

Tab.1 Simulation parameter of spatial laser heterodyne interference signal

signal	parameters	value	Power portion
System	system clock	70 MHz	
The main signal	Main beat-note	15 MHz	89%
	Sideband beat-notes	14、16 MHz	10%
	Sideband modulation index	0.45	
	communication modulation index	0.2 rad	1%
	PRN rate	2.2 MHz	
	Data rate	34 kbps	
key noise	Doppler shift rate	100 kHz/1 ms	
	Shot noise	55 dB、75 dB	

模拟的外差干涉信号参数见表 1。为了能够在仿真图中快速观察到多普勒频移速率的作用效果，仿真中将多普勒频移速率更改为 100 kHz/1 ms，实际应用中为 $1 \sim 3 \text{ Hz/s}$ ^[13]。

3.1.2 方案设计

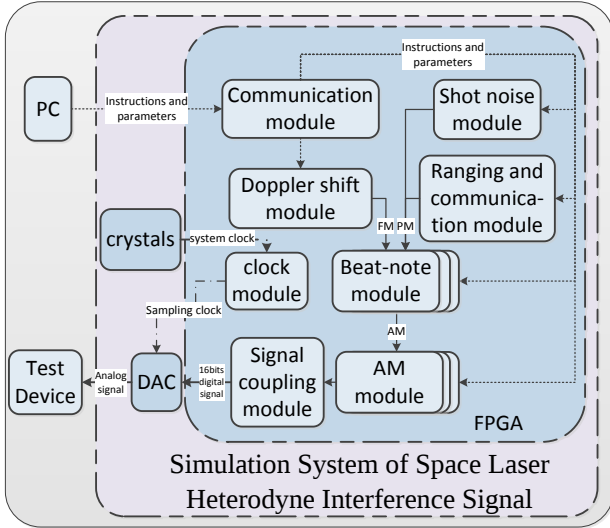


图 4 空间激光外差干涉信号模拟系统的设计方案

Fig.4 Design scheme of the simulation system of space laser heterodyne interference signal

信号模拟系统需要灵活调节加入的主体信号和噪声的种类及参数，设计程序时需将每一个模块独立出来，便于通过 PC 端控制各个模块的启停，并进行参数设定。PC 端与信号模拟系统通过 RS422 协议进行通信，传输波特率为 115200 bps。信号模拟系统输出的信号接入测试设备进行时频特性的测试。具体方案设计如图 4 所示，其中虚线剪头表示指令与参数的流向，实线箭头表示数据流向。

3.2 硬件平台设计

硬件平台主要包括晶振单元、FPGA 单元、DAC 单元，如图 5 (a)、(b) 所示，其中 DAC 单元包括 DAC 以及 DAC 的后端模拟放大电路。

晶振单元用于为 FPGA 单元提供外部时钟，结合后续优化及工程测试需求，应用 SUNNY 公司陶瓷 SMD 系列中 SCO-53 33 50-80M 型号的晶振为系统提供 80M 的外部时钟输入。

FPGA 单元生成 16 位幅值的外差干涉信号，并为 DAC 单元提供采样时钟。采用 K7 系列中 XC7K325T 型号的 FPGA，拥有丰富的逻辑资源，方便日后进行功能添加及系统程序优化。

DAC 单元包括 DAC 和 DAC 后端模拟电路。选择 LTC1668 作为 DA 转换芯片，该芯片支持 16 位并行数据输入，采样时钟范围 50 MHz~75 MHz，建立时间至少为 8 ns，保持时间最小 4 ns。DAC 后端模拟放大电路设计如图 5 (c) 所示： I_A 、 I_B 为 LTC1668 的两路输出电流，输出范围 0-10 mA。经过后端模拟电路放大，输出电压 V_{OUT} 的范围为 ± 1 V，电压信号经低通滤波器后通过

SMA 端口输出至测试设备中。

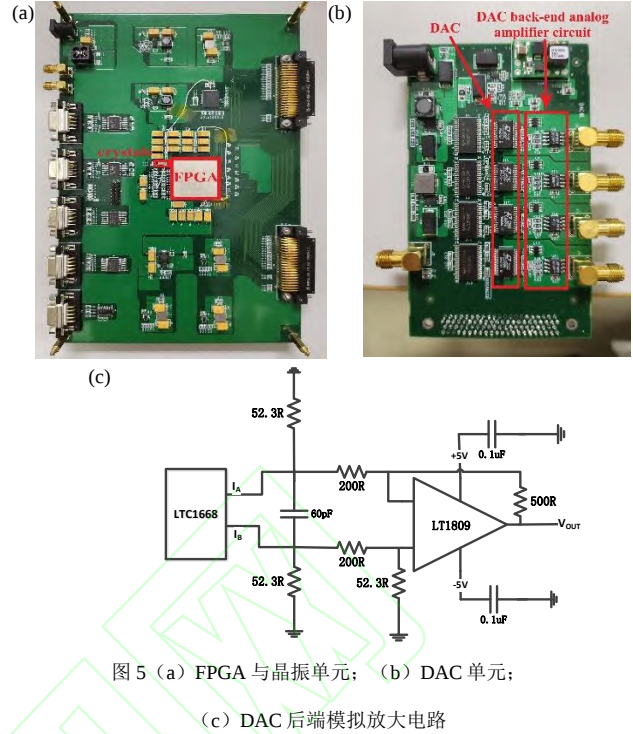


图 5 (a) FPGA 与晶振单元; (b) DAC 单元;

(c) DAC 后端模拟放大电路

Fig.5 (a) FPGA and crystal oscillator unit; (b) DAC unit;

(c) Schematic diagram of DAC back-end analog amplifier circuit

3.3 程序设计

如图 4 所示，程序主要包括时钟模块、通信模块、三个拍频生成模块、三个幅度调制模块、多普勒频移模块、测距通信模块、散粒噪声模块以及信号耦合模块。

时钟模块将 80 MHz 的外部时钟分为 70 MHz 的系统时钟 f_{clk} 和有相位偏移的 DA 采样时钟 f_{DAC} 。

通信模块读取 PC 发出的指令、参数及测距通信传输的数据信息，并分配到其余各个模块中。

三个拍频生成模块可以同时进行三个不同频率的正弦拍频信号输出。PC 端可以设置三个拍频信号的初始频率，程序中留有 48 位的频率调制端口 (pinc 端口) 以及 48 位相位调制端口 (poff 端口)，可以输出频率范围为 2~20 MHz 的 16 位幅值正弦信号。

多普勒频移模块可以从通信模块获得 PC 端发出的指令及频移速率，本程序能够实现频率的最大移动范围为 2~20 MHz，移动速度为 100 kHz/1 ms，通过 pinc 端口同时实现三个拍频信号的频率调制。

测距通信模块可以从通讯模块获得 PC 端的指令及数据，将数据与内置查找表中的 PRN 码异或为测距通信编码，应用 BPSK 原理通过 poff 端口

调制在主载波拍频的相位中，通过 PC 设置调制指数。

散粒噪声模块生成功率谱恒定的白噪声，通过拍频生成模块的 poff 相位偏置端口进行相位调制。

幅度调制模块为乘法器，分别对三组信号进行幅度调制，使主载波拍频与时钟边频满足理论功率比。三个幅度调制模块输出的三路拍频信号在信号叠加模块耦合成一路线号，并行输入至 DAC 单元中。

3.4 外差干涉信号的模拟仿真结果

在 ISE14.7 平台上应用 VHDL 语言进行系统编程，应用 modelsim 观察输出波形的时域特性，并与 matlab 联合进行信号数据的频域特性分析。

3.4.1 多普勒频移功能的仿真结果

为了更好的测试多普勒频移的作用效果，仅模拟主载波拍频信号及多普勒频移的功能。主载波拍频起始频率为 15 MHz，多普勒频移变化速度为 100 kHz/1 ms，实现的频率变化范围为 2~20 MHz。由 DDS 的舍入误差引起的频率误差不超过 1.4×10^{-7} Hz，可忽略。理论的频率变化与实际仿真输出的频率变化如图 6 所示，蓝色实线为信号的理论输出频率，红色虚线为信号仿真的实际输出频率，频率变化符合预期要求。

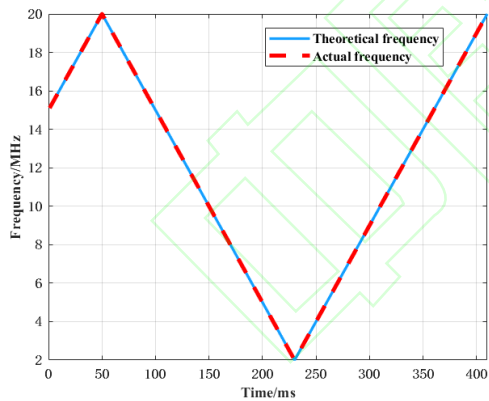


图 6 多普勒频移功能的理论与仿真结果对比图

Fig.6 The comparison diagram of the theory and simulation results of doppler frequency shift function

3.4.2 主体信号的频谱分析仿真结果

根据表 1 的主体信号参数进行程序编写，包括三个拍频信号以及测距通信编码。理论上，主载波拍频与上下时钟边频的功率相差约为 25 dB，扩频通信编码主瓣占据带宽约为通信编码速率的二倍。将数据从 modelsim 导入 matlab 中进行频域分析，结果如图 7 (a) 所示。

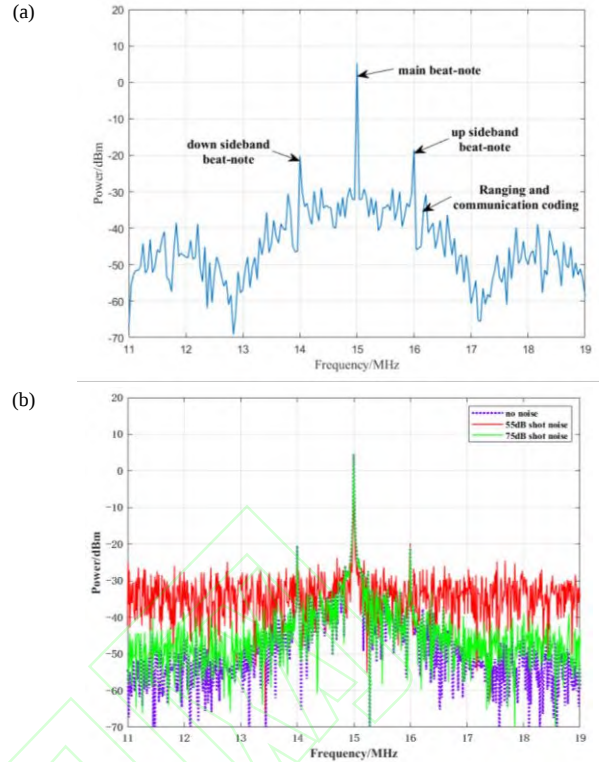


图 7 (a)主体信号的频谱图;(b)耦合散粒噪声的主体信号的频谱图

Fig.7 (a)Spectrum diagram of the main signal ;(b)Spectrum diagram of the main signal coupled with shot noise

仿真结果中，主载波拍频与上下时钟边频的功率相差约为 25.4dB，上下时钟边频的功率有微小偏差，这是由于傅里叶变换加窗截取的数据非整周期导致的。扩频通信编码主瓣占据带宽约为 4.4 MHz，符合扩频通信的理论频谱带宽。综上所述，仿真的外差干涉主体信号的频域特性与理论预期一致。

3.4.3 耦合散粒噪声的主体信号仿真结果

在主体信号中分别添加信噪比为 55 dB 和 75 dB 的散粒噪声进行仿真测试，设计参数见表 1，仿真结果如图 7 (b) 所示。

其中紫色点线代表无噪声的主体信号频谱图，红色实线及绿色实线分别代表在主体信号中添加信噪比 55 dB 和 75 dB 的散粒噪声的频谱图，可以看出，当信噪比过低时，噪声信号完全淹没了测距通信扩频的频谱，这会增加通信的误码率，因此尽可能降低噪声水平是完成空间引力波探测任务的重要研究方向。

4 信号模拟系统的测试结果

通过硬件平台验证信号模拟系统的基本功能及信号质量，选用 Tektronix 公司 MDO3024 型号的示波器观察信号时域特性，应用 RIGOL 公司 DSA705 型号的频谱分析仪分析信号频域特性。并

对系统的信号频率范围、杂波抑制以及谐波（二次）抑制能力进行测试。

4.1 信号模拟系统的性能验证结果

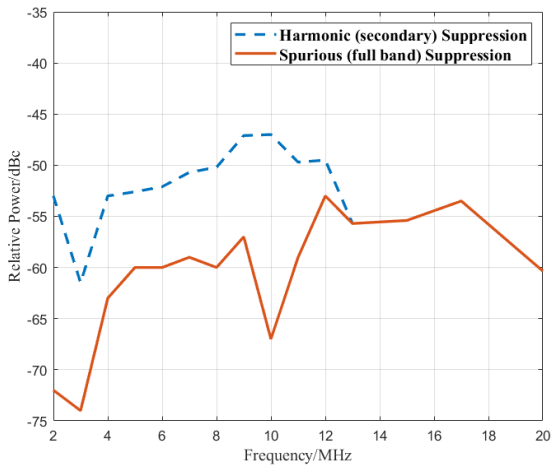


图 8 2~20 MHz 频段内谐波抑制程度示意图

Fig.8 Schematic diagram of harmonic clutter suppression in the frequency range of 2~20 MHz

模拟系统最终实现的各个基本参数如下：四个 16 位并行数据处理的 DAC 通道、70MSPS 采样率，幅值输出范围为 $\pm 1.08\text{V}$ 。如图 8 所示，由于使用了低通滤波器，模拟的信号频率在 13 MHz 以上无二次谐波影响，结果表明在 2~20 MHz 的频率范围内杂波抑制（红色实线）程度可达 -53 dBc，谐波抑制（二次）可达到 -47 dBc 以下。

4.2 空间激光外差干涉信号的模拟性能测试

为方便观察生成信号的频域特性，以下实验均不涉及多普勒频移功能。

用信号模拟系统生成主载波拍频与两个时钟边频耦合后的信号，应用示波器观察到的信号波形如图 9（a）所示，可以看出幅度的规律增减，由于边频的功率仅占 10%，所以信号“拍”的现象不明显。应用频谱分析仪对该信号进行频域特性分析，结果如图 9（b）所示。经测量，主载波拍频与两个时钟边频信号的幅值比相差约 25.08 dB，无杂散动态范围可达 62.8 dBc，满足相位计的测试需求。

应用信号模拟系统生成外差干涉信号的主体信号，包括主载波拍频、两个时钟边频以及测距通讯编码。应用频谱分析仪对输出信号进行频谱分析，结果如图 9（c）所示。从图中可以看出测距通信扩频的频谱特征明显，且与时钟边频功率相差约 20 dB，测试结果与理论及仿真结果相符，并且由于频谱分析仪中采样点数更多，得到的模拟效果比仿真结果更接近理论频谱。

应用信号模拟系统生成在主体信号中耦合 75 dB 散粒噪声的信号。应用频谱分析仪对输出信号进行频谱分析，结果如图 9（d）所示，测距通信扩频的频谱大部分被噪声覆盖，预期效果与仿真结果（图 7（b）绿色线）吻合。

综上所述，信号模拟系统生成的信号频域特性符合理论预期，满足相位计地面测试需求。

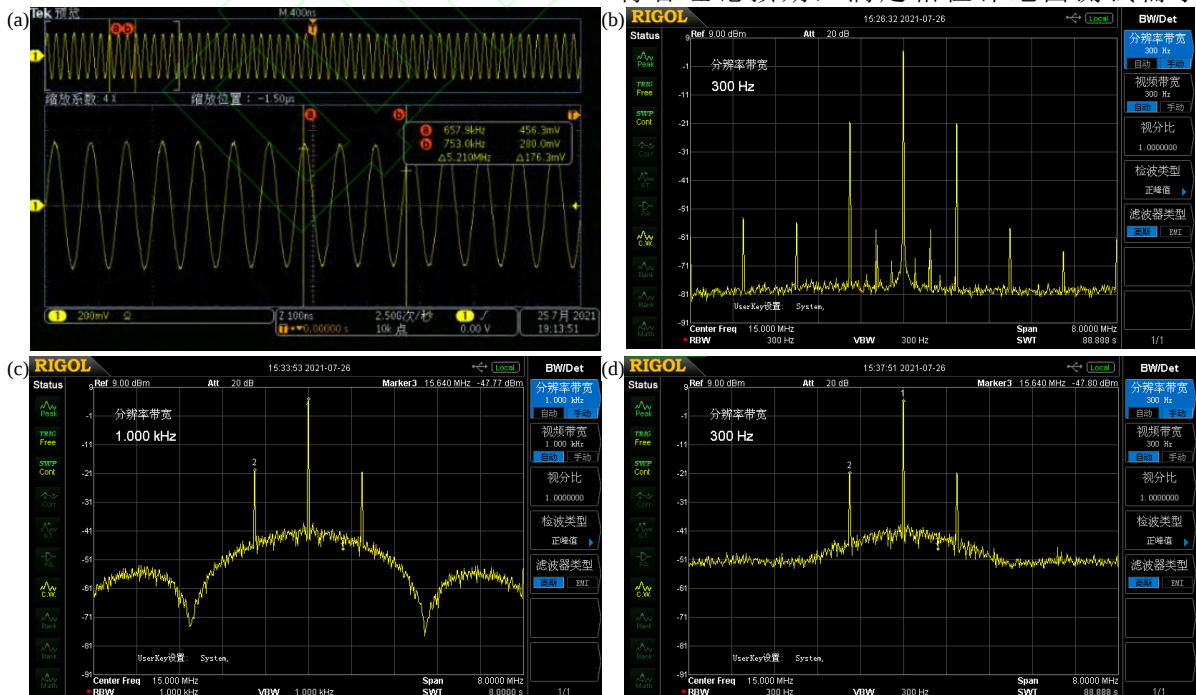


图 9 (a)主载波拍频与两个时钟边频耦合信号的波形图;(b) 主载波拍频与两个边时钟频耦合信号的频域图;

Fig.9 (a) The waveform of the main carrier beat coupled with the two time side-beat; (b) Frequency domain diagram of the main carrier-beat coupled with two time side-beat; (c) The main signal spectrum of heterodyne interference signal; (d) Spectrum diagram of the principal signal coupled with 75dB shot noise

5 结论

根据空间引力波探测“太极计划”对相位计进行地面测试的需求,根据激光外差干涉信号的理论特性及参数,设计了空间激光外差干涉信号模拟系统。介绍了空间引力波探测的工作原理,分析了空间激光外差干涉信号的特性,研究了主体信号以及噪声的数字模拟方法,并基于 FPGA 硬件平台,搭建了激光外差干涉信号模拟系统。仿真结果表明,多普勒频移的功能模拟符合预期要求。实验结果表明,信号模拟系统的频率范围在 2~20 MHz 时杂波抑制比为-53 dBc,谐波(二次)抑制达到-47 dBc,模拟信号的时频特性符合理论预期,满足空间引力波探测相位计的地面测试需求。

参考文献:

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 116(6): 061102.
- [2] 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 Zh K, et al. Time-delay interferometry for space-based gravitational wave detection [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 275-88.(in Chinese)
- [3] 罗子人,白嫻,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. Space laser interferometry gravitational wave detection[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4):415-447. (in Chinese)
- [4] 刘志国,朴云松,乔从丰.多波段引力波宇宙研究和空间太极计划[J].现代物理知识,2016,28(5):28-33.
Liu Zh G, Pu Y S, Qiao C F. Multiband gravitational wave cosmic research and space Tai Chi Program[J]. *Modern Physics*, 2016,28(5):28-33. (in Chinese)
- [5] Pitkin M, Reid S, Rowan S, et al. Gravitational wave detection by interferometry (ground and space) [J]. *Living Reviews in Relativity*, 2011, 14(5):1-75.
- [6] 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)
- [7] Milyukov V K. TianQin space-based gravitational wave detector: key technologies and current state of implementation[J]. *Astronomy Reports*, 2020, 64(12): 1067-1077.
- [8] Bachman B, Vine G D, Dickson J, et al. Flight phasemeter on the Laser Ranging Interferometer on the GRACE Follow-On mission[C]. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2017, 840(1): 012011.
- [9] Wang Zh, Lei J G. Development and on orbit test of Taiji-1 inertial reference[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36(11n12): 2140008.
- [10] Luo Z R, Guo Z K, Jin G, et al. A brief analysis to Taiji: Science and technology[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102918.
- [11] Luo J, Bai Y Z, Cai L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185013.
- [12] 刘河山. 面向空间引力波探测的激光差分干涉相位计研究[D].北京: 中国科学院力学研究所, 2015.
Liu H S. The research on phasemeter of heterodyne laser interferometry for the space gravitational wave detection[D]. *Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of science*, 2015.(in Chinese)
- [13] Luo Z R, Wang Y, Wu Y L, et al. The Taiji program: a concise overview[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A108.
- [14] Luo Z R, Yu T, Liu H Sh. The phasemeter of Taiji-1 experimental satellite[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021,36(11n12):
- [15] Delgado E J J. Laser ranging and data communication for the laser interferometer space antenna[M]. *Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz University*, 2012.
- [16] Barke S, Brause N, Bykov I, et al. LISA metrology system-final report[J]. 2014.
- [17] Tinto M, Hartwig O. Time-delay interferometry and clock-noise calibration [J]. *Physical Review D*, 2018, 98(4): 042003
- [18] Vankka J, Halonen K A I, Halonen K. Direct digital synthesizers: Theory, design and applications[M]. *Springer Science & Business Media*, 2001.

[19] 秦雪陈. 混合同余法产生随机噪声的 FPGA 实现[J]. 电子
设计工程, 2015, 23(9): 123-126
Qin X Ch. Mixed congruential method to generate random

noise on FPGA[J]. *Electronic Design Engineering*, 2015,
23(9): 123-126.(in Chinese)

作者简介: 韩爽(1997-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 2019 年于四川大学获得学士学位, 目前在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士学位。主要从事空间引力波探测相位计测试系统相关设计方面的研究。E-mail: hanshuang19@mails.ucas.ac.cn。电话: 18545765987, 地址: 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

作者简介: 佟珺泽(1997-), 男, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 2019 年于沈阳航空航天大学获得学士学位, 目前在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士学位。主要从事空间引力波探测相位计方面的研究。E-mail: tongjunze20@mails.ucas.ac.cn。

作者简介: 王振鹏(1997-), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 2019 年于沈阳航空航天大学获得学士学位, 目前在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士学位。主要从事空间引力波探测器相位计方面的研究。E-mail: wangzhenpeng20@mails.ucas.ac.cn。

通讯作者简介(导师): 于涛(1980-), 男, 吉林省长春市人, 硕士研究生导师, 副研究员, 2006 年于吉林大学获得硕士学位, 主要从事空间引力波探测激光干涉测量系统方面的研究, E-mail: yut@ciomp.ac.cn。电话: 13944839215

作者简介: 隋延林(1992-), 男, 辽宁省大连市人, 博士研究生, 助理研究员, 2014 于四川大学获得电子科学与技术学士学位, 2019 年于中国科学院大学机械电子工程获得工学博士学位, 主要从事空间引力波探测相位计电子学方面的研究, yanlinsui@gmail.com。