

## 一种面向空间应用的激光测距方案设计与实验

杨 冉<sup>1,2</sup>, 张高飞<sup>1,2</sup>, 张紫辰<sup>1,2</sup>, 尤 政<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084;

2. 清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 针对空间应用背景对激光测距系统“宽测程、高精度、实时测量”的要求, 使用相位式激光测距法中分散的直接法设计了一种激光测距方案, 其理论测程可以达到 10 km, 测距精度可以达到 0.1 m。对激光器和窄带滤光片提出了技术指标要求, 对雪崩光电二极管(APD)进行了选型, 并通过对空间环境背景噪声的分析和对空间非合作目标测程方程的分析验证了技术指标选择和 APD 选型的合理性。实验结果表明: 该系统最大测距误差为 8.71 cm, 符合“测距精度优于 0.1 m”的技术指标要求, 同时具有较高的动态性能, 测距时间不超过 1 ms。此外, 系统具有较小的整体功率和质量, 分别为 13.29 W 和 693 g, 可作为天基应用的有效载荷。

**关键词:** 相位式激光测距; 空间应用; 测距精度; 动态性能

**中图分类号:** TP247; TN713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0700-07

## Design and experiment of a laser ranging scheme for aerospace applications

Yang Ran<sup>1,2</sup>, Zhang Gaofei<sup>1,2</sup>, Zhang Zichen<sup>1,2</sup>, You Zheng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In response to the requirements of "wide measurement range, high accuracy, real-time measurement" to laser ranging system in aerospace applications, a laser ranging scheme was designed by using dispersed direct phase ranging method. The theoretical measurement range can reach 10 km and the degree of ranging accuracy is within 0.1 m. The laser system, narrow-band filter and the APD photodiode were particularly required by analyzing the space background noise (including space radiation, earth radiation and solar radiation) and range equation for non-cooperative space targets. The experimental results indicate that the maximum ranging error of the system is 8.71 cm, and the system has high dynamic performance with the ranging time less than 1 ms. Moreover, the power consumption and quality of the prototype is small (13.29 W and 693 g respectively), which makes the system a suitable payload for space-based applications.

**Key words:** phase laser ranging; aerospace application; ranging accuracy; dynamic performance

收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-08-20

基金项目: 国家 863 计划(20124302056)

作者简介: 杨冉(1987-), 男, 硕士生, 主要从事激光测距技术方面的研究。Email: russell247@163.com

导师简介: 尤政(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微光机电系统集成、微纳卫星技术等方面的研究。

Email: yz-dip@mail.tsinghua.edu.cn

## 0 引言

在天基空间目标监视领域,相比于传统的被动光学探测系统,激光测距系统具有测距精度高、体积较小、成本较低、不受空间光照条件和目标自身亮度影响的优势<sup>[1]</sup>。利用激光准直性强、相干性好的特点,激光测距技术在空间中应用潜力巨大<sup>[2]</sup>,应用领域主要包括空间碎片探测、交会对接、卫星编队飞行、激光高度计等<sup>[3]</sup>。目前,美国、日本、俄罗斯和欧洲航天局已经将激光测距技术广泛应用于上述领域。而我国对于面向空间应用的激光测距技术研究相对不足,得到实际应用的实例则更少,2007年我国发射的嫦娥一号探月卫星所搭载的激光高度计是我国唯一一套应用在空间中的激光测距系统<sup>[4]</sup>。因此,开展面向空间应用的激光测距技术的研究具有重大意义。

文中设计的激光测距系统以空间交会对接和卫星编队飞行星间测量为应用背景。在空间交会对接领域,航天器间距为几百米至几公里时,主要依靠激光雷达进行导航,同时对测距精度的要求较高,为厘米量级<sup>[5]</sup>;在卫星编队飞行领域,主星与从星之间的间距通常为几十米至几公里,并且由于激光测距系统一般与光学扫描器共同工作,因此需要进行实时测距<sup>[6]</sup>。综上所述,需要设计出的激光测距系统具有较宽的测程、较高的测距精度和较好的动态性能。

利用相位式激光测距方法中分散的直接法对空间测距方案进行了设计,通过空间非合作目标测程方程分析和空间背景噪音分析,确定了对激光器和窄带滤光片的技术指标要求,并进行了雪崩光带二极管选型。实验分析结果表明,该系统满足“宽测程、高精度、高动态性能”的应用背景需求。

## 1 激光测距系统总体方案设计

激光测距系统的总体方案如图1所示,采用了分散的直接法对空间目标进行距离测量。为了避免多个相差悬殊的高低频率同时存在给电路带来的干扰,只使用了两把测尺,即两种调制频率。系统的工作原理为:调制电路模块产生频率为 $f_{s1}$ 和 $f_{s2}$ 的混频正弦信号,对激光发射模块中的激光器进行调制;激光器发射的携带调制信号信息的激光光束经目标物体反射后返回,被接收模块接收;将发射信号和接收信号接

入粗尺信号处理模块和精尺信号处理模块,经过滤波、放大、整形和鉴相后,分别得出各自的测距结果。将这两个结果进行相加,即可得到最终的测距结果。

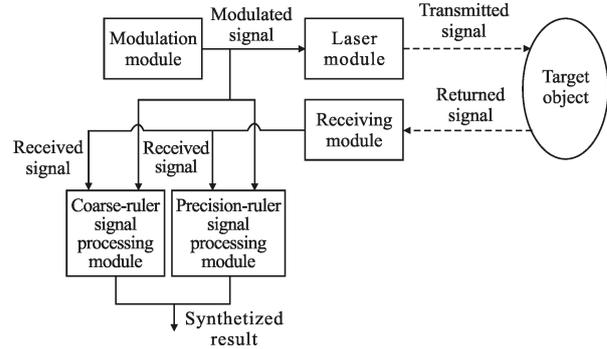


图1 双测尺激光测距系统总体方案

Fig.1 Blocking diagram of dual-ruler laser ranging scheme

在进行测尺长度选择时,应遵循以下原则:粗尺长度应保证量程,而选择精尺长度时需保证在一定鉴相精度的条件下达到测距精度;粗尺与精尺应当衔接,即粗尺的测距精度应小于等于精尺测尺长度的1/10。测尺长度 $L_s$ 与调制频率 $f_s$ 之间的关系为:

$$L_s = \frac{c}{2f_s} \quad (1)$$

根据对系统测程的技术指标要求,选择粗尺长度 $L_{s1}$ 为10 km,对应的粗尺调制频率 $f_{s1}$ 为15 kHz;综合考虑电路设计难度和测距精度要求,选择精尺长度 $L_{s2}$ 为100 m,对应的精尺调制频率 $f_{s2}$ 为1.5 MHz。为了满足粗尺和精尺间的衔接性要求,须有:

$$L_{s1} \times \theta_1' \times 10 \leq L_{s2} \quad (2)$$

为满足系统整体测距精度小于0.1 m的技术指标要求,须有:

$$L_{s2} \times \theta_2' \leq 0.1 \text{ m} \quad (3)$$

式中: $\theta_1'$ 和 $\theta_2'$ 分别为粗尺和精尺的鉴相精度,求解可得粗尺和精尺的鉴相精度应高于1/1 000,即粗尺测距精度优于10 m,精尺测距精度优于0.1 m。

## 2 激光发射/接收模块技术指标要求

激光发射/接收模块包括可进行外调制的激光器、窄带滤光片和雪崩二极管(APD)三部分。其中,激光器的作用是发射携带调制信号信息的激光光束;窄带滤光片安装在雪崩二极管前,作用是避免回光信号被太阳辐射噪声所淹没;雪崩二极管接收回光信号,并将其转化成电流信号,送入后级的粗尺/精尺信号处理模块。确定的激光器技术指标为:功率

等于 10 W, 激光束散角小于 0.1 mrad, 激光器波长为 915 nm, 模拟调制带宽大于 1.5 MHz。确定的窄带滤光片技术指标为: 中心波长为 915 nm, 带宽为 3 nm, 峰值透过率大于 70%; 选用的 APD 为 Laser Components 公司生产的 SAR500-H2 型硅雪崩二极管, 关键的技术指标为: 工作波长为 400~1 100 nm, 对 915 nm 光信号的探测灵敏度为  $2.7 \times 10^{-10}$  W, 光敏面面积为  $2.64 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>, 带宽为 10 kHz~100 MHz。下文将通过空间环境背景噪声和空间非合作目标测程方程的分析, 验证上述技术指标选择和 APD 选型的合理性。

### 2.1 空间环境背景噪声分析

在空间环境中, 激光测距系统的探测模块主要受到三种背景光的干扰: 外层空间辐射、地球辐射和太阳辐射。

首先考虑外层空间辐射的影响。在卫星上搭载的距离探测系统的工作背景为 3.5 K 深冷外层空间, 根据维恩公式, 空间辐射的峰值波长为:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{2897.77}{3.5} = 827.9 \mu\text{m} \quad (4)$$

式中:  $b$  为维恩常数;  $T$  为深冷外层空间的绝对温度。可见, 空间辐射峰值波长不在 APD 的响应波长范围之内, 因此可以忽略不计。

之后考虑地球辐射的影响。地球辐射可以近似看作 300 K 的黑体辐射, 地球辐射出射度与波长的关系如图 2 所示。可以看出, 在 APD 的工作波长 (400~1 100 nm) 范围内, 地球背景辐射的影响基本为 0, 可以忽略不计。

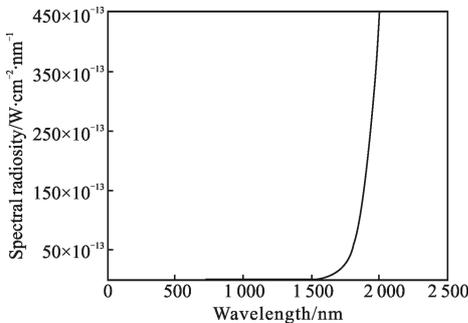


图 2 地球辐射出射度与波长的关系

Fig.2 Relationship between spectral radiosity of the earth and wavelength

最后考虑太阳辐射的影响。通常假定太阳辐射与 5 900 K 黑体辐射的能量分布一致, 如图 3 所示。可见, 在 APD 工作波长内, 集中着太阳辐射大部分

的能量, 因此, 需要加装窄带滤光片, 避免 APD 接收的激光信号被太阳噪声所湮没。

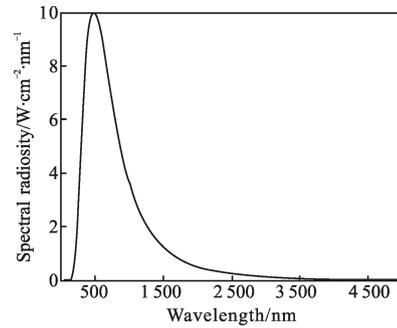


图 3 太阳辐射出射度与波长的关系

Fig.3 Relationship between solar spectral radiosity and wavelength

加装窄带滤光片之后的光强示意图如图 4 所示。其中,  $E_{b0}$  为空间目标处太阳辐射强度, 近似等于太阳常数  $1366 \text{ W/m}^2$ 。  $E_r$  为空间目标处激光强度,  $E_b''$  和  $E_r''$  分别为经过窄带滤光片后的太阳辐射强度和激光强度。当  $E_b'' \leq E_r''$  时, 光电二极管接收的激光信号不被太阳辐射噪声所湮没。

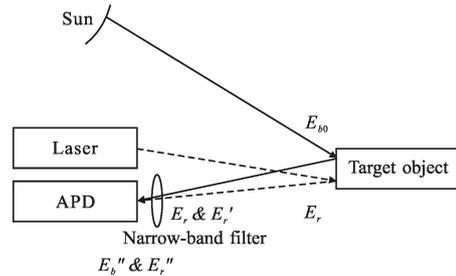


图 4 加装窄带滤光片之后的光强示意图

Fig.4 Light intensity after installing narrowband filter

$E_{b0}$ 、 $E_r$ 、 $E_b''$  和  $E_r''$  之间的关系可以表示为:

$$E_b'' = \eta' \times \eta \times (F_{b(0-\lambda_2)} - F_{b(0-\lambda_1)}) E_{b0} \quad (5)$$

$$E_r'' = \eta' \times \eta \times E_r \quad (6)$$

式中:  $\eta$  和  $\eta'$  分别为光强从目标返回至滤光片过程中的衰减系数和通过窄带滤光片的衰减系数;  $F_{b(0-\lambda)}$  表示小于  $\lambda$  的波段区间内的光谱辐照度占全波段光谱辐照度的比例。当选用中心波长为 915 nm, 带宽为 3 nm 的窄带滤光片时,  $\lambda_2=916.5 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1=913.5 \text{ nm}$ 。通过查找黑体辐射函数表, 可利用插值法求出  $F_{b(0-\lambda_2)}=68.06\%$ ,  $F_{b(0-\lambda_1)}=67.86\%$ 。因此有:

$$(F_{b(0-\lambda_2)} - F_{b(0-\lambda_1)}) E_{b0} = 2.76 \text{ W/m}^2 \quad (7)$$

而  $E_r$  (激光器发射至待测空间目标处的激光强度) 可通过下式计算:

$$E_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \eta_s = \frac{4P_t \eta_s}{\pi \theta_t^2 R^2} \quad (8)$$

式中:  $P_t$  为激光器功率, 为 10 W;  $\eta_s$  为激光在空间真空环境下的衰减常数, 一般取 0.95;  $R$  为激光器与目标物体之间的距离, 取最远距离 10 km;  $\theta_t$  为激光器的束散角, 取 0.1 mrad。解得  $E_r = 12.10 \text{ W/m}^2$ 。可见:

$$E_r > (F_{b(0-\lambda_2)} - F_{b(0-\lambda_1)}) E_{b0} \quad (9)$$

因此根据公式(5)和公式(6), 有  $E_r > E_b$ , 即光电二极管接收的激光信号不被太阳辐射噪声所湮没。

### 2.2 空间非合作目标测程方程分析

根据激光测距系统的应用背景, 当测量目标为非合作目标, 即反射类型为漫反射时, 测距方程为<sup>[7]</sup>:

$$P_r = \frac{16A_r A_s T_t T_r \eta_s \rho}{\pi^2 \theta_t^2 \theta_s^2 R^4} P_t \quad (10)$$

式中:  $P_r$  为 APD 接收到的激光回光功率, 根据要求, 激光器探测灵敏度  $P_0$  应小于  $P_r$ ;  $A_r$  为 APD 接收表面面积, 等于  $2.64 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ;  $A_s$  为探测目标有效反射面积, 取最小面积  $0.04 \text{ m}^2$  (光斑边长 20 cm);  $\rho$  为目标反射系数, 由于空间目标表面大部分为金属, 因此取 0.5;  $T_t$  为发射光学系统透过率, 取 0.9;  $T_r$  为接收光学系统透过率, 约等于窄带滤光片的峰值透过率, 取 0.7;  $\eta_s$  为激光在空间真空环境下的衰减常数, 取 0.95;  $R$  为待测目标的距离, 取最远距离 10 km;  $\theta_t$  为激光器的束散角, 为 0.1 mrad;  $\theta_s$  为反射系数, 由于反射类型为漫反射, 根据朗伯定律, 取  $\theta_s = 1.1 \text{ mrad}$ ;  $P_t$  为激光器的功率, 为 10 W。因此可以解得,  $P_r$  等于  $4.03 \times 10^{-9} \text{ W}$ , 因此有:

$$P_0 = 2.7 \times 10^{-10} \text{ W} < P_r \quad (11)$$

综上所述, 系统选择的雪崩光电二极管满足 10km 测程对于探测灵敏度的要求。对于激光器和窄带滤光片提出的技术指标则可以较好地避免空间背景噪声的影响。

## 3 电路部分设计

调制电路模块、粗尺信号处理模块和精尺信号

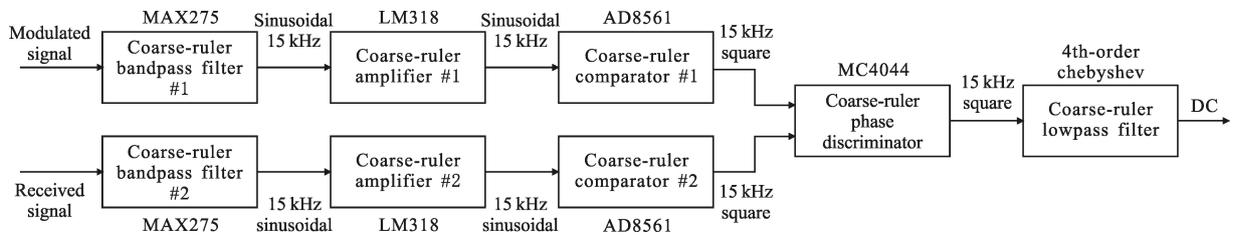


图 6 粗尺信号处理模块原理图及芯片选型

Fig.6 Blocking diagram of coarse-ruler signal processing module and chip selection

处理模块属于激光测距系统的电路部分。

### 3.1 调制电路模块设计

调制电路模块用于产生 15 kHz 正弦信号和 1.5 MHz 正弦信号合成的混频信号, 调制激光强度, 同时该信号还被用作测距鉴相的参考信号。调制电路模块的原理图和芯片选型结果如图 5 所示。其中, 粗尺 DDS 用于产生 15 kHz 的正弦模拟信号, 精尺 DDS 用于产生 1.5 MHz 的正弦模拟信号, 粗尺/精尺放大电路可以对粗尺 DDS 和精尺 DDS 产生的信号幅值进行调节。电压跟随器 1 用于产生 DC 信号, 作用是合成信号的幅值偏置到激光器的发射阈值以上。模拟加法器将高频正弦信号、低频正弦信号和 DC 信号进行加和, 得到幅值符合激光器输入要求的混频信号。电压跟随器 2 主要起到增强带载能力的作用。

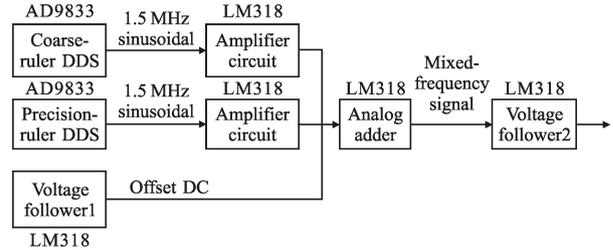


图 5 调制电路模块原理图及芯片选型

Fig.5 Blocking diagram of modulation module and chip selection

### 3.2 粗尺信号处理模块设计

粗尺信号处理模块的原理图和芯片选型结果如图 6 所示。其中, 粗尺滤波器用于滤去光电二极管接收信号中存在的杂波和 1.5 MHz 高频信号成分, 其中心频率为 15 kHz。粗尺放大器用于调节粗尺滤波器输出的正弦信号幅值。粗尺比较器将正弦信号进行整形, 转变为 15 kHz 的方波信号, 以满足粗尺鉴相器对于输入信号为方波的要求。粗尺鉴相器对发射信号和接收信号的相位差进行鉴别, 输出信号为同频率的方波, 其占空比与发射信号与接收信号的相位差成正比。粗尺低通滤波电路将粗尺鉴相器输出的不同占空比的方波信号转化为电平信号, 通过测量其电压值, 可以间接计算

出发射信号与接收信号之间相位差的大小。

### 3.3 精尺信号处理模块设计

精尺信号处理模块的原理图和芯片选型结果如图 7 所示。其中,精尺滤波器用于滤去光电二极管接收信号中存在的杂波和 15 kHz 低频信号成分,其中心频率为 1.5 MHz。精尺衰减器的作用是降低输入正弦信号的幅值,以满足后端混频电路对输入信号的要求。精尺混频器的作用是将频率分别为 1.5 MHz 的主振信号和 1.51 MHz 的本振信号进行混频,并通过后级的带通滤波器滤除 3.01 MHz 的高频成分,输

出频率为 10 kHz 的正弦信号,以达到降频的作用。精尺放大器将此信号进行放大,并经过精尺比较器的整形,输出频率为 10 kHz 的方波信号,以满足后端精尺鉴相器对输入信号为方波的要求。精尺鉴相器对发射信号和接收信号的相位差进行鉴别,输出信号为同频率的方波,其占空比与发射信号与接收信号的相位差成正比。而精尺低通滤波器将精尺鉴相器输出的不同占空比的方波信号转化为电平信号,通过测量其电压值,可以间接计算出发射信号与接收信号之间相位差的大小。

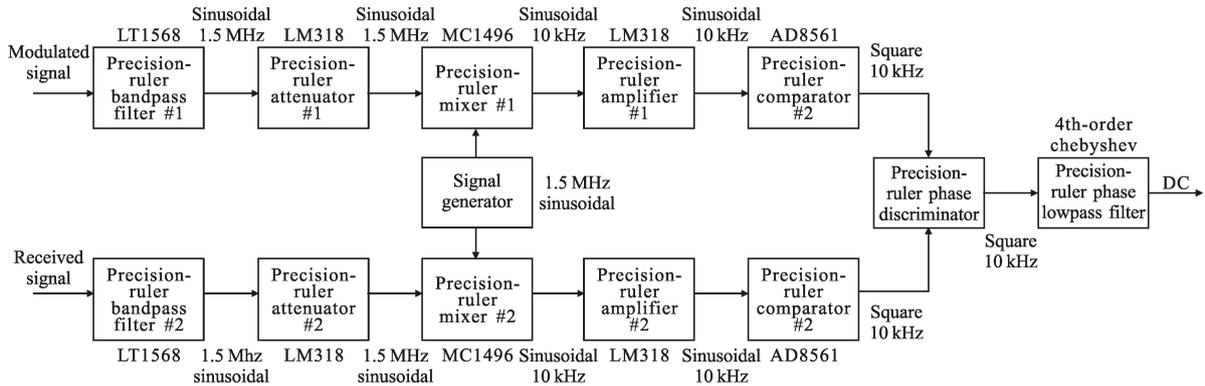


图 7 精尺信号处理模块原理图及芯片选型

Fig.7 Blocking diagram of precision-ruler signal processing module and chip selection

## 4 实验结果与分析

由于粗尺测程较长,为 10 km,无法在实验室环境内进行结合光路的测距实验,因此针对粗尺信号处理模块进行了电路等效实验,将虚拟目标物体距离  $L$  等效为双路输入信号之间的相位差  $\phi$ ,验证了其测距精度和动态性能。根据相位式激光测距法基本原理, $L$  和  $\phi$  之间的关系为:

$$L = \frac{c\phi}{4\pi f} \quad (12)$$

式中: $f$ 为粗尺调制频率,为 15 kHz。

其次针对精尺信号处理模块进行了结合光路的实际测距实验,对其测距精度和动态性能进行了验证。最后对系统的功耗和质量进行了分析和总结。

### 4.1 粗尺信号处理模块电路等效实验

粗尺信号处理模块的测试环境如图 8 所示。设置双路信号发生器的输出信号为 15 kHz 的方波,幅值为 0~4.5 V(High-Z 模式下),分别接入粗尺信号处理模块的两个输入端,之后对粗尺低通滤波器的输出信号进行测量。依据“长时间标定、短时间测量”的

原则,首先对粗尺信号处理模块的输出结果进行标定,其次对 50°、150°和 250°三个点进行测量,验证粗尺信号处理模块的测距精度和动态特性。

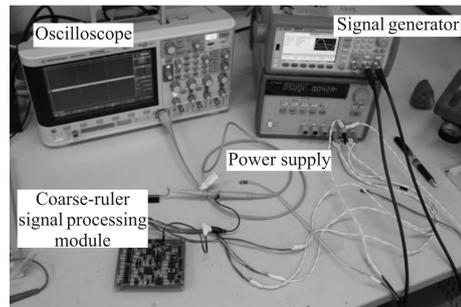


图 8 粗尺信号处理模块测试环境

Fig.8 Testing environment of coarse-ruler signal processing module

#### 4.1.1 标定阶段

设置信号发生器的两路输出信号之间的相位差分别为 20°、40°、60°、...、340°,对粗尺低通滤波器输出的 DC 电平进行采样,采样时间为 4 ms(相当于 60 个周期),采样点数为 2 000 点,之后计算 DC 电平平均值,与该相位差所对应的距离进行线性拟合,拟合结果如图 9 所示。

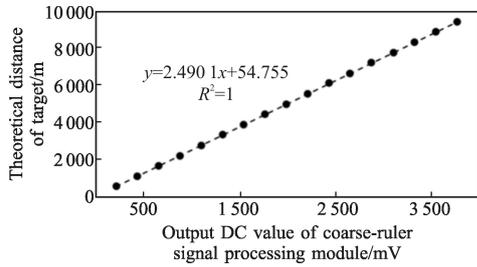


图 9 粗尺信号处理模块输出 DC 值与目标距离间关系

Fig.9 Relationship between output DC value and distance of coarse-ruler signal processing module

4.1.2 测量阶段

设置信号发生器的两路输出信号之间的相位差分别为  $50^\circ$ 、 $150^\circ$  和  $250^\circ$ ，对粗尺低通滤波器输出 DC 电平进行采样，采样时间为  $1\text{ ms}$ ，采样点数为 500 点，计算 DC 电平平均值，之后根据线性拟合方程计算对应的距离，并求得与理论距离之间的误差，结果如表 1 所示。可见，当测距时间为  $1\text{ ms}$  时，粗尺信号处理模块测距误差最大为  $4.38\text{ m}$ ，符合“测距精度优于  $10\text{ m}$ ”的衔接性要求，同时验证了粗尺信号处理模块的高动态性能：测距时间不超过  $1\text{ ms}$ 。

表 1 粗尺信号处理模块测距误差

Tab.1 Ranging error of coarse-ruler signal processing module

Phase difference/ $^\circ$	Theoretical distance/m	DC value /mV	Distance measured/m	Ranging error/m
50	1 388.89	536.96	1 391.83	2.94
50	1 388.89	536.87	1 391.61	2.72
150	4 166.67	1 651.27	4 166.58	-0.09
150	4 166.67	1 652.18	4 168.85	2.18
250	6 944.44	2 767.86	6 947.01	2.57
250	6 944.44	2 768.59	6 948.82	4.38

4.2 精尺信号处理模块测距实验

结合光路和调制电路模块对精尺信号处理模块进行实际测距实验(5~30m),实验平台如图 10 所示。图(a)为发射模块、接收模块和信号处理模块,图(b)为反射镜,图(c)为总体图。使用的激光器型号为 LE-LS-650-20THM-C,关键技术参数为:中心波长  $650\text{ nm}$ ,连续波(CW)输出功率为  $1\sim 20\text{ mW}$ ,模拟调制带宽为  $20\text{ MHz}$ ,激光束散角为  $1\text{ mrad}$ 。使用的光电二极管为 Thorlabs 公司生产的 DET210 硅光电二极管,关键技术参数为:对于  $650\text{ nm}$  红光的响应度为  $0.4\text{ A/W}$ ,接受区域直径  $1\text{ mm}$ ,工作带宽为  $2.652\text{ MHz}$ 。选用的反射镜为卓立汉光公司生产的 OMB50 型  $400\sim 700\text{ nm}$  宽带铝膜反射镜,对于  $650\text{ nm}$  的红光的

反射率可以达到  $92\%$ 。此外,由于距离增加时反射回光光斑增大,因此在光电二极管前放置凸透镜,增加光电二极管 DET210 接收到的回光光强。

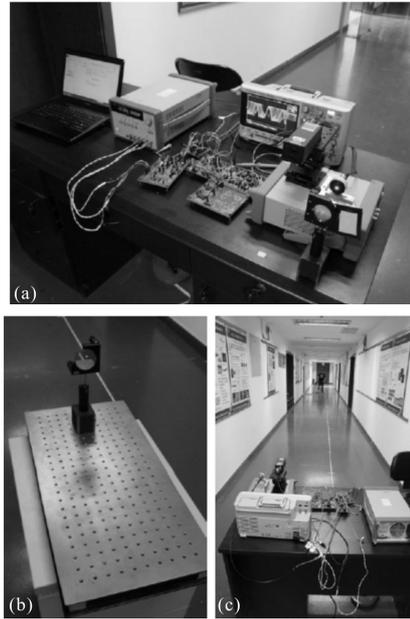


图 10 测距实验平台

Fig.10 Experiment setup for the ranging scheme

同样依据“长时间标定,短时间测量”的思路,测距实验的实验步骤为:

- (1) 使用皮尺(长度  $50\text{ m}$ ,最小刻度  $1\text{ cm}$ )对待测距离( $5\text{ m}$ 、 $6\text{ m}$ 、 $7\text{ m}$ 、 $\dots$ 、 $30\text{ m}$ )进行标定;
- (2) 移动目标(反射镜)至各个待测位置,通过二维高稳定镜架旋钮调节光路,使回光射入凸透镜中心位置;
- (3) 前后、左右调节移动凸透镜位置,使回光汇聚至光电二极管中心,使经过  $I-V$  转换/放大后的接收信号整体幅值在  $-1\sim 1\text{ V}$  左右;
- (4) 对精尺低通滤波器输出 DC 电平进行采样,采样时间为  $5\text{ ms}$ (相当于 50 个周期),采样点数为 2 000 点,计算平均值,之后对 DC 电平值与实测距离值之间的关系进行标定;
- (5) 移动反射镜至  $17.5\text{ m}$ 、 $21.5\text{ m}$  和  $25.5\text{ m}$  处,对精尺低通滤波器输出 DC 电平信号进行采样,采样时间为  $1\text{ ms}$ ,采样点数为 400 点,计算平均值,之后根据步骤(4)得出的线性拟合方程计算对应距离,并与实际距离比对,计算测距误差。

在标定阶段,对精尺信号处理模块输出的 DC 电平值与实测距离( $5\text{ m}$ 、 $6\text{ m}$ 、 $7\text{ m}$ 、 $\dots$ 、 $30\text{ m}$ )进行线性拟合,得到二者之间的关系如图 11 所示。

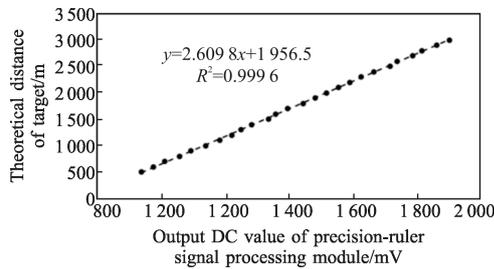


图 11 精尺信号处理模块输出 DC 值与目标距离间关系

Fig.11 Relationship between output DC value and distance of precision-ruler signal processing module

在测量阶段,将反射镜移动至 17.5 m、21.5 m 和 25.5 m 处,按照步骤(5)对 DC 电平进行采样和数据处理,结果如表 2 所示。可见,当测距时间为 1 ms 时,精尺信号处理模块测距误差最大为 8.71 cm,符合“激光测距系统测距精度优于 0.1 m”的技术指标要求。同时验证了精尺信号处理模块的高动态性能:测距时间不超过 1 ms。

表 2 精尺信号处理模块测距误差

Tab.2 Ranging error of precision-ruler signal processing module

Distance/cm	DC value/mV	Distance measured/cm	Ranging error /cm
1 750	1 420.69	1 751.22	1.22
1 750	1 417.84	1 743.78	-6.22
1 750	1 419.98	1 749.35	-0.65
2 150	1 574.71	2 153.19	3.19
2 150	1 574.17	2 151.76	1.76
2 150	1 572.28	2 146.83	-3.17
2 550	1 726.00	2 550.62	0.62
2 550	1 723.43	2 541.30	-8.70
2 550	1 723.85	2 542.40	-7.60

### 4.3 系统的功耗与质量分析

对实验时所用的原理样机进行功耗的测量,测得整体功率为 4.225 W,各个模块的功率分别为:调制电路模块 0.365 W、粗尺信号处理模块 0.470 W、精尺信号处理模块 2.735 W、激光器 0.375 W、光电二极管 0.640 W。因此,当更换最终样机所使用的 10 W 大功率激光器和 APD 时,计算可得系统整体功率为 13.29 W。使用台式电子秤对实验原理样机进行称重,测得系统各模块的总质量为 693 g。综上所述,该方案功耗和质量较小,适合搭载在卫星平台上,成为天基空间测距的有效载荷。

## 5 结论

以空间交会对接和卫星编队飞行星间测距为应

用背景,采用相位式激光测距法中分散的直接法设计了一种面向空间应用的激光测距方案。设计的激光测距系统由调制电路模块、激光发射模块、激光接收模块、粗尺信号处理模块和精尺信号处理模块 5 个子模块组成,采用了两把测尺,测尺频率分别为 15 kHz 和 1.5 MHz,对应的测尺长度分别为 10 km 和 100 m。通过对空间背景噪声(主要包括空间背景辐射、地球辐射和太阳辐射)和非合作目标条件下测程方程的分析,验证了对激光器、窄带滤光片提出的技术指标的合理性和雪崩光电二极管选型的可行性。之后,对粗尺信号处理模块进行了电路等效实验,对精尺信号处理模块进行了结合光路的测距实验。实验结果表明:粗尺信号处理模块最大测距误差为 4.381 2 m,符合“粗尺测距精度优于 10 m”的衔接性要求;精尺信号处理模块最大测距误差为 8.707 4 cm,符合“精尺测距精度优于 10 cm”的技术指标要求。同时验证了激光测距系统具有较高的动态性能,测距时间不超过 1 ms,在天基激光测距领域具有一定的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Huang Tao, Hu Huiling, Hu Yihua, et al. Laser detection in the identification of space target[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 685-689. (in Chinese)
- [2] Gou Ningyi, Zhang Keshu. High speed digital phase-difference measuring methods simulation and implementation in phase-shift laser ranging finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2012, 41(9): 2358-2363. (in Chinese)
- [3] Qi Weiyin, You Zheng, Zhang Gaofei, et al. Applications of laser ranging technology in space [J]. *Aerospace China*, 2008, 5: 38-42. (in Chinese)
- [4] Wang Jianyu, Shu Rong, Chen Weibiao, et al. Laser altimeter on Change'e satellite [J]. *Science China Press*, 2010, 40(8): 1063-1070. (in Chinese)
- [5] Li Li, Ren Ximing. Analysis of RVD LIDAR key technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 108-111. (in Chinese)
- [6] Hu Yihua, Shu Rong. Airborne and spaceborne laser sounding technology and application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 8-13. (in Chinese)
- [7] Li Fan, Wu Ganhua, Han Chunsheng, et al. Improving the ranging performance of ladar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 112-114. (in Chinese)