

调制函数对偏振调制激光测距精度影响分析

胡 恒¹, 杜小平², 张 朋¹, 渠 晋¹

(1. 装备学院 研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院 航天指挥系, 北京 101416)

摘 要: 为减小传统激光测距方法中复杂电路系统对脉冲计时或相位比较引起的测距误差, 针对偏振调制激光测距技术, 利用电光调制器中晶体折射率随施加电场线性变化的特性, 将待测物体反射的光脉冲调制成时间的函数, 通过所得偏振光两个垂直方向上的光强比值求解待测距离。在研究其测距原理、距离方程及误差分析的基础上, 推得文中测距方法所能达到理论测距精度的表达式, 并分析调制过程中正弦、锯齿、指数三种调制函数对测距精度的影响, 在相同距离范围内, 锯齿函数具有更好的适用性, 正弦函数与指数函数的组合函数具有更高的测距精度。进一步分析正弦函数不同波段对测距精度的影响可知, 采用 $-\pi/6 \sim \pi/6$ 波段调制时其适用性及测距精度都有很大提高。研究结果对提高偏振调制激光测距精度具有重要意义。

关键词: 偏振调制激光测距; 电光调制器; 调制函数; 测距精度

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1006004

Influence of modulation function on precision of laser ranging based on polarization modulation

Hu Heng¹, Du Xiaoping², Zhang Peng¹, Qu Jin¹

(1. Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

2. Department of Space Command, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to reduce the ranging error caused by the pulse timing or phase comparison of the complex circuit system in the traditional laser ranging method, the laser ranging based on polarization modulation was demonstrated. Using the characteristic that the crystal refractive index of the electro-optical modulator changed with the linear change of the applied electric field, the laser pulse reflected by the object to be measured was made into a function of time, and the distance was solved by the ratio of the light intensity in the two vertical directions. Based on the principle of distance measurement, distance equation and error analysis, the accuracy expression of theory ranging that was obtained by the ranging method in the paper, the influence of three kinds of modulation functions of sine, sawtooth and exponential on the accuracy of ranging was analyzed by simulation. In the same distance range, the sawtooth function had better applicability, and the combination of sine and exponential had higher accuracy of ranging. By analyzing the influence of different modulation bands of sine function on the

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

作者简介: 胡恒(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光测距方面的研究。Email: henghu888@163.com

导师简介: 杜小平(1966-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事空间态势感知与目标特性方面的研究。Email: dxp8600@163.com

accuracy of ranging, the applicability and the accuracy were greatly improved by using $-\pi/6-\pi/6$ band. The results will be helpful to improve the accuracy of laser ranging based on polarization modulation.

Key words: laser ranging based on polarization modulation; electro-optical modulator; modulation function; accuracy of ranging

0 引言

激光测距技术采用主动激光光源实现对目标距离的测量,相比其他测距技术,具有抗干扰能力强、测距精度高、体积小、质量轻等优点,被广泛运用于航天、遥感测控、精密测量及工业控制等领域^[1-3]。目前国内外常用的激光测距方法主要有:几何光学测距法、脉冲飞行时间测距法、相位法、调频连续波测距法、偏振调制测距法等^[4-5]。这些激光测距方法的测距精度受限于多个因素,如:激光脉冲宽度、探测器带宽、时间数字转换芯片的时间分辨率、散粒噪声和电子电路产生的时间误差等,若进一步提高测距精度,需对电子设备的性能提出更高要求。偏振调制激光测距技术^[6-10],通过光学途径分析和提取待测距离信息,减少由光电转换过程和电路系统本身引入的测距误差,与前几种测距方法相比,接收端不需要复杂的电路系统,使用电光调制器与 CCD 相结合,简化了装置,可以有效减小噪声的影响,提高测距精度,实现远距离高精度测距。并且其在突破激光三维成像技术如何利用面阵探测器获取目标距离像的问题上起到关键作用,适用于空间碎片监视、空间目标交会对接及无人机着陆等航空航天领域,是近年来研究的重点方向之一。

偏振调制激光测距技术利用电光调制器将偏振光调制成时间的函数,通过所得偏振光两个垂直方向上的光强信息与时间的关系求解待测距离。不同时刻反射的激光脉冲经电光调制器后其两个偏振方向的分量不同,因此不同距离上的回波与两探测器的比值一一对应。其测距精度主要由探测到的光强比值决定,电光调制器加载不同调制电压函数,探测器得到的光强比值不同。文中针对偏振调制激光测距方法,重点分析调制函数波形、波段等对该体制测距精度的影响效应,以期为该系统论证最优调制函数波形及工作波段。

1 偏振调制激光测距原理分析

1.1 偏振调制激光测距原理

电光调制器中晶体的折射率随施加电场线性变化^[11],将反射光的偏振状态线性地改变为施加电压的函数,实现对反射激光脉冲的偏振调制。采用距离选通技术可以抑制大气后向散射,提高系统的信噪比和作用距离。偏振调制激光测距将飞行时间测距法成功应用到面阵探测器上,大大降低了探测器带宽的要求,不需要设计高速计时电路。

偏振调制激光测距原理图如图 1 所示,激光发射系统通过生成具有宽视场的光脉冲照射目标,同时激光光源为延时触发器(DPS)提供一个激励信号,通过控制对电光调制器施加电压时机,决定距离选通大小。然后用大孔径透镜收集由目标反射和散射的光脉冲,经窄带滤波片(NBF)和线偏振片(P₁)入射到电光调制器上,电光调制器沿光轴方向施加线性变化的外加电场,对入射光进行调制变为椭圆偏振光,然后经过偏振光分束器(PBS)将椭圆偏振光分解为两个相互垂直的偏振分量,利用 CCD 探测器获得其光强信息。

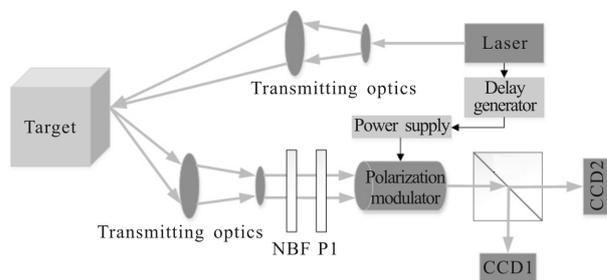


图 1 偏振调制激光测距技术原理图

Fig.1 Principle of laser ranging based on polarization modulation

文中系统中电光调制器,当沿平行于光轴方向施加电场时,新的主轴方向较原来的主轴旋转 45° 。其感应折射率椭球可表示为:

$$\left(\frac{1}{2} + \gamma_{63} E_z\right) \frac{x_1'^2}{n_o} + \left(\frac{1}{2} - \gamma_{63} E_z\right) \frac{x_2'^2}{n_o} + \frac{1}{2} x_3'^2 = 1 \quad (1)$$

式中： n_o 和 n_e 为电光调制器 o 光和 e 光折射率； γ_{63} 为电光系数； E_z 为电场强度。设电光调制器长度为 L ，宽度为 d ，光从其出射后，偏振光的相位差 δ 为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} E_z L = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} V(t) \quad (2)$$

从上式可以看出通过控制 V 的大小变化，可以实现对入射光波的相位调制。当相位差 $\delta = \pi$ 时，可求得半波电压为：

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2 n_o \gamma_{63}} \quad (3)$$

1.2 偏振调制激光测距距离方程

当电光调制器上所施加电压为正弦时，设正弦调制函数的表达式为：

$$g(t) = A \sin[\omega(t-t_0)] \quad (4)$$

式中： t_0 为发射脉冲与电光调制之间的延时。由公式(2)可得电光调制器对入射光产生的相位差为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} V = \frac{\pi A}{V_{\pi}} \sin[\omega(t-t_0)] \quad (5)$$

则激光脉冲飞行时间可以表示为：

$$t = t_0 + \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{V_{\pi} \delta}{\pi A}\right) \quad (6)$$

根据偏振光干涉原理，可推导出测距系统两垂直方向探测器 CCD 接收光强的表达式：

$$I_1 = I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (7)$$

$$I_2 = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (8)$$

式中： I_0 为接收光的单脉冲能量，表达式为 $I_0 = I_1 + I_2$ 。

联立公式(7)、(8)得：

$$\delta = 2 \arccos \sqrt{\frac{I_1}{I_1 + I_2}} \quad (9)$$

由激光脉冲飞行时间测距公式 $R = \frac{c}{2} t$ 得待测目标的距离为：

$$R_{\sin} = \frac{c}{2} t + \frac{ct_0}{2} + \frac{c}{2\omega} \arcsin\left(\frac{2V_{\pi}}{\pi A} \arccos \sqrt{\frac{I_1}{I_1 + I_2}}\right) \quad (10)$$

式中： c 为光在真空中的传播速度。由公式(10)可知，待测距离信息可通过两个 CCD 上能量积累值 I_1, I_2 和正弦调制函数的参数解算出来。

同理，设锯齿波调制函数表达式为：

$$V(t) = k(t-t_0) \quad (11)$$

可得待测目标的距离为：

$$R_k = \frac{ct_0}{2} + \frac{cV_{\pi}}{\pi k} \arccos \sqrt{\frac{I_1}{I_1 + I_2}} \quad (12)$$

设指数调制函数为：

$$f(t) = f_0 e^{a(t-t_0)} \quad (13)$$

可得待测目标的距离为：

$$R_e = \frac{ct_0}{2} + \frac{c}{2a} \ln\left(\frac{2V_{\pi}}{\pi f_0} \arccos \sqrt{\frac{I_1}{I_1 + I_2}}\right) \quad (14)$$

2 测距精度分析

测距精度是判定系统性能好坏的重要标准之一，偏振调制激光测距技术的误差主要来源于 CCD 探测器接收光强比值所产生的误差，一方面来源于系统噪声，另一方面来源于反射激光所携带的距离信息有偏差，这种误差实际是环境产生的，任何测量系统都存在。

2.1 偏振调制激光测距系统噪声分析

对于偏振调制激光测距，系统噪声主要包括背景噪声和 CCD 噪声，为了减少背景噪声产生的影响，在接收镜头前采用窄带滤波片和线偏振片，同时控制 CCD 探测器的曝光时间，可以大大减小背景噪声。而系统中使用的光电探测器件 CCD 是噪声的主要来源，CCD 利用光电效应原理将光信号转化为电信号，在此过程中会伴随有散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声等^[8]。

(1) 散粒噪声 N_{shot}

散粒噪声指注入光强不变时，由于光子的粒子性，单位时间内转化的电荷数不同引入的噪声，与频率无关，并服从泊松分布。在低照度、低反差条件下，当其他噪声被各种方法抑制后，散粒噪声将成为 CCD 的主要噪声，并决定器件的极限噪声水平。在忽略其他噪声的理想状态下，其大小等于曝光时间内探测器接收光强的开平方，可以表示为：

$$N_{\text{shot}} = \sqrt{T} \quad (15)$$

(2) 暗电流噪声 N_{dc}

暗电流噪声与 CCD 内部半导体材料热运动及曝光时间有关，在没有光子入射的情况下，CCD 仍会产生暗电流，所有的 CCD 传感器都会受到暗电流噪声的影响，故减小暗电流噪声的影响对提高系统信噪比具有重要意义。暗电流噪声有很强的温度依赖性，随温度的降低而急剧减小，使其减小到可以忽

略不计的水平。

(3) 读出噪声 N_r

读出噪声是由输出放大器及其后续电子器件引入的噪声, 主要包括复位电路产生的复位噪声和输出放大电路噪声。读出噪声在不同曝光条件下的地位是不同的, 短曝光下其占主导地位, 长曝光下可忽略不计。通常采用“相关双采样”技术来克服读出噪声, 以达到系统所需精度。

(4) 系统信噪比

系统的总噪声可以表示为:

$$N = \sqrt{N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{dc}}^2 + N_r^2} \quad (16)$$

由于 CCD 探测器的暗电流噪声和读出噪声可以抑制, 则 CCD 的总噪声可以表示为^[12]:

$$N = N_{\text{shot}} = \sqrt{I} \quad (17)$$

所以系统信噪比可以表示为:

$$SNR_1 = \frac{I_1}{\sqrt{I_1}} = \sqrt{I_1} \quad (18)$$

$$SNR_2 = \frac{I_2}{\sqrt{I_2}} = \sqrt{I_2} \quad (19)$$

由于激光发射系统的发散角通常为毫弧度量级, 目标对于接收系统而言可以看作小面元。假设目标与系统距离为 R , 激光器输出功率为 P_T , 发射效率为 η_s , 激光在大气中的单程透过率为 η_a , 经过大气传输到达目标处的总激光功率为 $\eta_s \eta_a P_T$ 。由于接收系统和发射系统位置接近, 忽略二者之间的位置差异, 假设目标的反射率为 ρ_r , 接收系统孔径为 D_{rec} , 接收光学系统的接收效率为 η_{opt} , 则 CCD 上接收到的激光功率为:

$$P_R = P_T \rho_r \frac{D_{\text{rec}}^2}{4R^2} \eta_a^2 \eta_s \eta_{\text{opt}} \quad (20)$$

根据功率定义, CCD 每个像元接收到反射或散射的激光脉冲强度可以表示为^[12-13]:

$$I_{\text{rec}} = \frac{\lambda P_R T_m}{hc} = \frac{\lambda}{hc} \frac{D_{\text{rec}}^2}{4R^2} P_T T_m \rho_r \eta_a^2 \eta_s \eta_{\text{opt}} = \frac{\lambda}{hc} \frac{D_{\text{rec}}^2}{4R^2} E_{\text{laser}} \rho_r \eta_a^2 \eta_s \eta_{\text{opt}} \quad (21)$$

式中: T_m 为回波信号接收时间, 对于脉冲激光来说, 一般等于脉宽; E_{laser} 为单个激光脉冲能量。

2.2 不同调制函数下测距精度分析

根据上述分析可知, 偏振调制激光测距技术的距离方程可由 CCD 上探测能量 I_1, I_2 求出, 同样对于

测距精度也由 I_1, I_2 测量的准确度决定。由误差传递公式:

$$\Delta Z^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial I_1} \right)^2 \Delta I_1^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial I_2} \right)^2 \Delta I_2^2 \quad (22)$$

三种调制函数下待测目标距离精度可由公式(10)、(12)、(14)推导出来:

$$\Delta Z_{\text{sin}} = \frac{cV_{\pi}}{2\omega\pi A} \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{2V_{\pi}}{\pi A} \arccos \sqrt{\frac{I_1}{I_1+I_2}} \right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{I_1 I_2}{I_1+I_2}} \left(\frac{\Delta I_1^2}{I_1^2} + \frac{\Delta I_2^2}{I_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$\Delta Z_k = \frac{cV_{\pi}}{\pi k} \sqrt{\frac{I_1 I_2}{I_1+I_2}} \left(\frac{\Delta I_1^2}{I_1^2} + \frac{\Delta I_2^2}{I_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$\Delta Z_c = \frac{c}{4a} \frac{\sqrt{\frac{I_1 I_2}{I_1+I_2}} \left(\frac{\Delta I_1^2}{I_1^2} + \frac{\Delta I_2^2}{I_2^2} \right)^{\frac{1}{2}}}{\arccos \sqrt{\frac{I_1}{I_1+I_2}}} \quad (25)$$

式中: $\Delta I_1/I_1$ 和 $\Delta I_2/I_2$ 是接收脉冲能量的相对误差, 对于偏振调制激光测距系统, 等价于 CCD 上获得能量的相对误差, 即

$$\frac{\Delta I_1^2}{I_1^2} = \frac{1}{SNR_1^2} \quad (26)$$

$$\frac{\Delta I_2^2}{I_2^2} = \frac{1}{SNR_2^2} \quad (27)$$

则在相同的调制时间 T_r 范围内, 目标测距精度表达式可以简化为:

(1) 正弦函数

$$\Delta Z_{\text{sin}} = \frac{cT_r}{\pi^2} \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{\delta}{\pi} \right)^2}} \frac{1}{SNR_0} \quad (28)$$

(2) 锯齿波函数

$$\Delta Z_k = \frac{R_{\text{max}}}{\pi} \frac{1}{SNR_0} \quad (29)$$

(3) 指数函数

$$\Delta Z_c = \frac{cT_r}{4\delta} \frac{1}{SNR_0} \quad (30)$$

式中: SNR_0 为系统信噪比, 表达式为 $\frac{1}{SNR_0} = \frac{1}{\sqrt{I_0}}$;

R_r 为目标相对 R_0 距离, 表达式 $R_r = R - R_0$; T_r 为电压调制时间, 表达式 $T_r = \frac{2R_{\text{max}}}{c}$, R_{max} 为距离门最大值。

3 仿真分析与比较

通过对系统测距精度分析可知,测距误差很大程度上取决于探测器接收到的光强比值,为了提高接受光强比值,可以通过增加光源出射功率、增大探测器接收孔径等方法,但这会增加系统功耗、增加系统体积质量。在不考虑以上方法的前提下,可通过优化调制函数提高测距精度。

通过分析上述正弦、线性、指数三种调制方式下测距精度的表达式,测距精度不仅与系统的信噪比有关,而且与调制函数有关。对于同一系统及目标,系统的信噪比近似恒定,从三种调制函数的测距精度表达式可以看出,正弦、指数调制函数的测距精度均与距离门范围内目标相对距离有关,但是锯齿波调制函数的测距精度只与系统信噪比有关,与目标相对距离无关。

3.1 三种调制函数测距精度比较

当探测物体距离为 1 km 左右时,设系统初始距离 $R_0=960$ m,距离门 $R_{max}=50$ m,偏振调制激光测距系统主要参数如表 1 所示。在相同测距范围内,对三种调制函数的测距精度仿真分析,仿真结果如图 2 所示。

表 1 偏振调制激光测距系统主要参数

Tab.1 Main parameters of laser ranging system based on polarization modulation

Parameter	Value
Wavelength/nm	532
Pulse width/ps	900
Repetition frequency/Hz	100
Energy per pulse/mJ	0.35
Polarization modulator diameter/mm	20
Target reflectivity	0.2

从图 2 中可以看出,正弦函数和指数函数在调制的过程中,分别在距离门末端与开始端出现测距误差急剧增大的现象,原因主要有:(1)正弦函数在接近其峰值电压的过程中斜率逐渐减小至 0,致使其在接近调制范围最大值附近出现误差急剧增大的

情况;指数函数在调制开始时刻斜率急剧增大,使其测距误差急剧减小。(2)在调制开始时刻和调制结束时刻,经过电光调制器的出射光基本处于线偏振光状态,会导致两个 CCD 探测器之间光子分配不均。

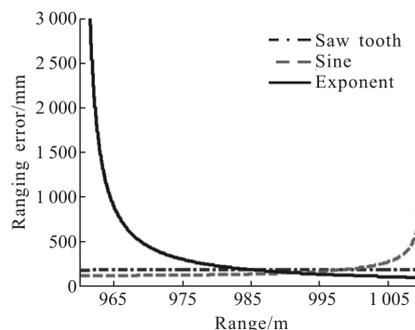


图 2 三种调制函数对系统测距精度影响

Fig.2 Influence of three kinds of modulation functions on system ranging error

根据图 2 所示两调制函数测距误差急剧变化的现象,为了便于观察,截取调制范围 5~45 m 观察三者之间测距精度的关系,如图 3 所示。锯齿函数测距误差随目标距离线性增大;正弦函数测距误差随目标距离逐渐增大,且速度逐渐增大,在大部分测距范围内,测距精度高于锯齿函数;指数函数测距误差随目标距离逐渐减小,且速度逐渐减小。

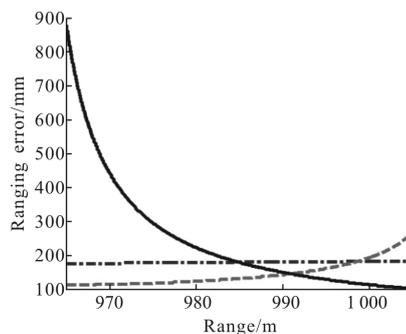


图 3 调制范围 5~45 m 三种调制函数测距精度

Fig.3 Ranging error of three kinds of modulation functions in 5~45 m

由图 3 可知,当采用正弦函数与指数函数相结合的调制方式时,系统测距精度整体上最好。设正弦函数和指数函数测距精度表达式交点处的目标距离为 R_0 ,联立二者精度表达式可得:

$$R_0 = R_0 + \sqrt{\frac{\pi^2}{\pi^2 + 16}} R_{max} \quad (32)$$

若待测目标距离在 $0 \sim R_0$ 之间选择正弦调制函数, $R_0 \sim R_0 + R_{max}$ 之间选择指数调制函数,系统的测距

精度最高,测距误差最大约为 0.145 m。

另一方面,改变距离门大小,即调节电压调制时间 T ,将距离门减小为原来的一半,三种调制函数测距精度如图 4 所示。与图 3 比较可知,三种调制函数的测距误差整体下降, R_0 一定的情况下,距离门越小,系统的测距误差越小。

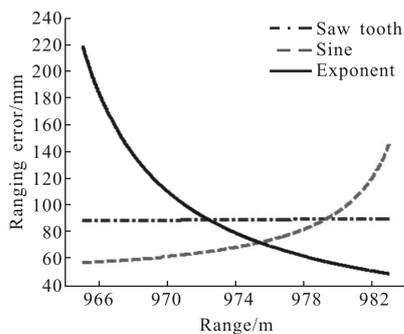


图 4 距离门对系统测距误差的影响

Fig.4 Effect of distance door on ranging error of laser ranging system

3.2 正弦调制函数不同波段测距精度比较

电光调制器若采用单一调制函数,锯齿函数因其测距精度不受距离门内目标相对距离影响,而更具优势,但其在大部分距离门范围内精度都小于正弦函数。若采用正弦函数调制,考虑到其在接近距离门末端时误差会急剧增大的弊端,可以通过对不同调制波段的测距精度进行研究来提高正弦函数的整体调制效果。

因电压调制函数的测距精度与其调制波段函数的斜率有关,在保持距离门一定的情况下,选取 $-\pi/4 \sim \pi/4$ 波段、 $-\pi/6 \sim \pi/6$ 波段与 $0 \sim \pi/2$ 波段进行比较,如图 5 所示。 $-\pi/4 \sim \pi/4$ 对应调制波段较 $0 \sim \pi/2$

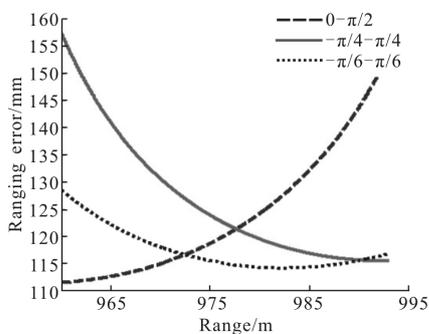


图 5 正弦函数三种波段测距误差比较

Fig.5 Ranging error comparison of sine function for three different modulation intervals

波段的测距精度好,避免了距离门末端时误差急剧增大的弊端,但这种调制波段的电压增加为 $\sqrt{2} V_{\pi}$,在测距过程中会出现多值情况。所以在保持调制电压为 V_{π} 的情况下,选取 $-\pi/6 \sim \pi/6$ 波段进行调制,相比于另外两种波段测距精度有较大提高且误差变化更平稳,但其可测量范围减小为所设定距离门的三分之二。

4 结论

文中在偏振调制激光测距原理的基础上,研究正弦、锯齿、指数三种调制函数对测距精度的影响可知,当采用单一函数调制时,锯齿函数测距精度不受距离门内目标相对距离的影响,具有更好的适用性;当采用正弦函数与指数函数相结合的组合调制函数时,测距精度更高。并且系统测距初始距离一定时,距离门越小,系统测距精度越高。进一步对正弦函数不同波段测距精度分析可知,采用 $-\pi/6 \sim \pi/6$ 波段调制时,可有效避免测距末端误差急剧增大的弊端,测距精度更高,但其可测量的距离范围减小为原来的三分之二。在系统实际应用中,可根据具体情况选择不同的调制函数满足测距需求。

参考文献:

- [1] Mcmanamon P F, Banks P, Beck J, et al. A comparison flash lidar detector options[C]//SPIE Defense+Security, 2016, 9832: 983202.
- [2] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(21): 3146–3148.
- [3] Molebny V, McManamon P, Steinvall O, et al. Laser radar: historical prospective—from the East to the West [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 031220.
- [4] Schmidt B, Tuvey S, Banks P S. 3D sensor development to support EDL (entry, descent, and landing) for autonomous missions to Mars[C]// Proceedings of SPIE, 2012, 8519: 851905.
- [5] Mcmanamon P. Review of ladar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 0901.
- [6] Jo S, Kong H J, Bang H. High definition 3D imaging lidar system using CCD [C]//SPIE Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XX, 2016, 10000: 100001Y.
- [7] Jo S, Kong H J, Bang H, et al. High range precision laser

- radar system using a Pockels cell and a quadrant photodiode [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(5): 1–5.
- [8] Dussault D, Hoess P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras [C]//SPIE International Symposium on Optical Science and Technology-International Society for Optics and Photonics, 2004, 5563: 195–204.
- [9] Bai Caixun, Li Jianxin, Zhou Jianqiang, et al. Interferometric hyperspectral polarization imaging method based on micro-polarization array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0136003. (in Chinese)
柏财勋, 李建欣, 周建强, 等. 基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像方法 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0136003.
- [10] Zhang Haifeng, Cheng Zhien, Li Pu, et al. Design of lidar cooperative target and its application to space rendezvous and docking [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2556–2561. (in Chinese)
张海峰, 程志恩, 李朴, 等. 激光雷达合作目标设计及其在空间交会对接中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2556–2561.
- [11] Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, et al. LiNbO₃ transverse electro-optical modulation characteristics for light pass along optical axis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1227–1232. (in Chinese)
李克武, 王志斌, 张瑞, 等. 沿光轴通光的 LiNbO₃ 的横向光电调制特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1227–1232.
- [12] Zhang P, Du X, Zhao J, et al. High resolution flash three-dimensional LIDAR systems based on polarization modulation [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3889–3894.
- [13] Chen Z, Liu B, Liu E, et al. Adaptive polarization-modulated Method for high-resolution 3D imaging [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 295–298.