

基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真

杨 馥 贺 岩 周田华 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光实验室, 上海 201800)

摘要 为使星载激光高度计实现高空间分辨率, 提出了一种联合采用伪随机码调制光纤激光器和单光子计数的测距方法。讨论了此方法的实施方案, 推导了此方法用于测高时的信噪比公式。对方案中的激光发射功率、接收望远镜口径对信噪比的影响进行了数值模拟。对系统参数进行分析, 得到了相关参数的关系和优化的参数。结果表明接收望远镜口径为 0.8~1 m, 激光出射功率约为 10 W, 伪随机码调制宽度为 600 μ s, 调制速率为 1 GHz 时, 基于伪随机码调制和单光子计数的星载激光测高计能够使系统信噪比达到 10, 距离分辨率达到 15 cm。

关键词 激光技术; 激光遥感; 星载激光高度计; 伪随机码调制; 单光子计数; 信噪比

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082901.0021

Simulation of Space-Borne Altimeter Based on Pseudorandom Modulation and Single-Photon Counting

Yang Fu He Yan Zhou Tianhua Chen Weibiao

(Laboratory of Novel Laser Technique and Application System, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China)

Abstract A method combining pseudorandom modulation of the fiber laser and single-photon counting is proposed to realize a high spatial resolution for the space-borne laser altimeter. The detailed principle of detection is presented, and the equation of the signal-to-noise ratio for the altimeter is given. The relationships between the signal-to-noise ratio with the laser power and the receiving telescope aperture are numerically simulated. The relationships between the parameters and the optimized parameters are obtained after analysis. Results show that the space-borne altimeter can reach the signal-to-noise ratio of 10, and the distance resolution of 15 cm when the receiving telescope aperture is between 0.8 m and 1m, laser power is about 10 W, pseudorandom modulation pulse width is 600 μ s, modulation frequency is 1 GHz. This system can meet the requirement of altimetric measurement under the condition of space-borne environment.

Key words laser technique; laser remote sensing; space-borne laser altimeter; pseudorandom modulation; single-photon counting; signal-to-noise ratio

1 引 言

激光雷达当前的应用日益广泛^[1~6], 激光高度计作为激光雷达的一种, 本质是一种激光测距技术, 搭载在卫星平台上可以精确地获取卫星平台到行星表面的距离, 结合卫星姿态、定位信息, 通过轨道的重复测量可获取高分辨率的三维数字高程, 因此在

地球科学、深空探测中得到广泛应用。目前, 已经成功进行发射的星载激光高度计, 如地球观测的 GLAS^[7], 月球探测的 Clementine^[8]、嫦娥一号^[9], 火星探测的 MOLA^[10]等, 均采用传统的脉冲激光测距技术, 通过发射巨脉冲, 采用时间间隔测量技术来获取距离信息。这种方式结构简单, 但激光器工

收稿日期: 2008-09-24; 收到修改稿日期: 2008-10-07

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z102)资助课题。

作者简介: 杨 馥(1983-), 女, 博士研究生, 主要从事激光测高雷达的仿真以及实验方面的研究。

E-mail: yangfu_sh@126.com

导师简介: 陈卫标(1969-), 男, 研究员、博士生导师, 主要从事激光遥感、遥测, 激光雷达方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn

作在窄脉冲高功率下,提高激光重复频率难度高,激光器的风险大,因此地面的空间分辨率难以提高。而提高地面空间分辨率是对地观测的发展趋势,除了进一步提高传统脉冲测距能力外,一些新的测量方案在不断被提出,如基于微脉冲激光器的光子计数测距,基于频率调制脉冲压缩的相干测量机制等新技术。文献[11]中提出了基于连续激光器的伪随机调制测距技术用于大气探测激光雷达。

基于伪随机码调制和单光子计数的高重频光纤激光测高技术,结合伪随机码调制激光测距技术、小信号探测的单光子计数技术和高效率的连续光纤激光器技术,设计一套星载激光测高仪;并针对星载测量的特点,进行系统参数的设计和优化,给出星载条件下的模拟结果。

2 测量原理

基于伪随机码调制和光子计数的星载激光测高

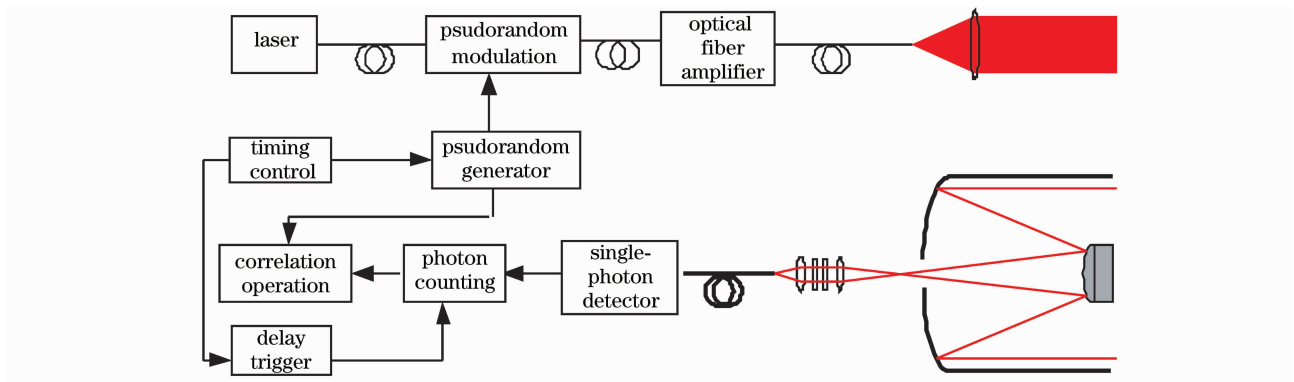


图 1 伪随机码调制测高的原理框图

Fig. 1 Schematic of altimeter based on pseudorandom modulation

系统中采用的调制伪随机码为 M 序列码,为二进制,非 0 即 1。 m 阶 M 序列码的码元个数为 $N = 2^m - 1$ 。在给定 m 个非全 0、非全 1 的初始值后,通过 m 位移位寄存器按照如表 1 所示的反馈多项式即可产生剩余的 $N-m$ 个 M 序列码码元,其中的十号代表异或运算。以 $m = 3$ 阶 M 序列码为例,将 $a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 = 1$ 作为其初始值,按照表 1 中的 3 阶反馈多项式即可得到 $a_4 = a_2 + a_1 = 0, a_5 = a_3 + a_2 = 1, a_6 = a_4 + a_3 = 1, a_7 = a_5 + a_4 = 1$ 。

根据雷达方程可知,针对发射码元“1”,系统接收到的信号光功率为

$$P_{\text{sig}} = \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} P_{\text{T}} \frac{\pi D^2}{(4R)^2} \rho = P_{\text{T}} g, \quad (1)$$

计组成框图如图 1 所示。激光器采用人眼安全波长、通信波段成熟的 1550 nm 光纤激光器。输出激光通过 Mach-Zehnder 调制器,根据伪随机码序列对激光产生强度调制,经光纤放大器放大后由一小口径的发射望远镜耦合输出。目标激光回波信号由另一大口径望远镜接收,准直后经过干涉滤光片,再由透镜耦合进入多模光纤,经单光子探测器将光子信号转化为输出的电脉冲信号。光子计数器中设有阈值甄别电路,可对单光子探测器输出的电脉冲进行判决,高于阈值的判决为码元 1,低于阈值的判决为码元 0。由单光子计数器甄别后的码元序列将与原始伪随机码做相关运算,相关峰值对应的时刻给出了目标距离导致的延时量,从而可提取目标的距离信息。时序控制器用于控制调制序列的周期,时序控制器输出作固定延时后,触发光子计数器对回波信号计数。

式中 η_{atm} 、 η_{sys} 为大气和激光雷达系统光学透射率, D 为望远镜口径, R 为测量距离, ρ 为目标反射率, P_{T} 为激光发射的平均功率, g 为响应函数。

应用于测距系统的接收信号表达式与文献[12]中的接收信号表达式有所不同。对于测距系统,其信号主要来源于被测距离目标反射信号中被接收望远镜收集的那部分光,气溶胶和分子的后向散射信号可不被考虑。因此对于同一目标,所有发射码元的响应函数应该是一致的。对于测距系统,系统接收信号的表达式为(2)式:

$$y(i) = x_i g + b_i = P_{\text{T}} a_i g + b_i \quad (2)$$

其中 x_i 为发射码元的功率, b_i 为背景噪声, a_i 为发射码元序列。

表 1 1 到 40 阶 M 序列码反馈多项式

Table 1 Feedback polynomials of M sequences from 1 to 40 degrees

deg m	$h(x)$	deg m	$h(x)$	deg m	$h(x)$
1	$x + 1$	15	$x^{15} + x + 1$	29	$x^{29} + x^2 + 1$
2	$x^2 + x + 1$	16	$x^{16} + x^5 + x^3 + x^2 + 1$	30	$x^{30} + x^{16} + x^{15} + x + 1$
3	$x^3 + x + 1$	17	$x^{17} + x^3 + 1$	31	$x^{31} + x^3 + 1$
4	$x^4 + x + 1$	18	$x^{18} + x^7 + 1$	32	$x^{32} + x^{28} + x^{27+x} + 1$
5	$x^5 + x + 1$	19	$x^{19} + x^6 + x^5 + x + 1$	33	$x^{33} + x^{13} + 1$
6	$x^6 + x + 1$	20	$x^{20} + x^3 + 1$	34	$x^{34} + x^{15} + x^{14} + x + 1$
7	$x^7 + x + 1$	21	$x^{21} + x^2 + 1$	35	$x^{35} + x^2 + 1$
8	$x^8 + x^6 + x^5 + x + 1$	22	$x^{22} + x + 1$	36	$x^{36} + x^{11} + 1$
9	$x^9 + x^4 + 1$	23	$x^{23} + x^5 + 1$	37	$x^{37} + x^{12} + x^{10} + x^2 + 1$
10	$x^{10} + x^3 + 1$	24	$x^{24} + x^4 + x^3 + x + 1$	38	$x^{38} + x^6 + x^5 + x + 1$
11	$x^{11} + x^2 + 1$	25	$x^{25} + x^3 + 1$	39	$x^{39} + x^4 + 1$
12	$x^{12} + x^7 + x^4 + x^3 + 1$	26	$x^{26} + x^8 + x^7 + x + 1$	40	$x^{40} + x^{21} + x^{19} + x^2 + 1$
13	$x^{13} + x^4 + x^3 + x + 1$	27	$x^{27} + x^8 + x^7 + x + 1$		
14	$x^{14} + x^{12} + x^{11} + x + 1$	28	$x^{28} + x^3 + 1$		

接收到的信号序列 y_i 将与原始伪随机调制码 a'_i 做互相关运算,如(3)式所示:

$$S_l = \sum_{i=0}^{N-1} y_i a'_{i-l} = \sum_{i=0}^{N-1} [P_T g + b_i] a'_{i-l} = P_T g \sum_{i=0}^{N-1} a_i a'_{i-l} + \sum_{i=0}^{N-1} b_i a'_{i-l},$$

$$l = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中

$$\sum_{i=1}^N a_i a'_{i-l} = \frac{N+1}{2}, \quad l \bmod N = 0$$

$$\sum_{i=1}^N a_i a'_{i-l} = 0, \quad l \bmod N \neq 0 \quad (4)$$

式中 $N = 2^m - 1$ 为码元总个数。 a'_i 和 a_i 之间有简单的换算关系, $a'_i = 2a_i - 1$, 即 $a_i = 1$ 时, $a'_i = 1$; $a_i = 0$ 时, $a'_i = -1$ 。

所以 S_l 的最大值如(5)式所示,自相关运算最大值对应的时刻即包含目标所处的距离信息:

$$S_{l_{\max}} = \frac{N+1}{2} P_T g + \sum_{i=0}^{N-1} b_i a'_{i-l} \quad (5)$$

其中 S_l 的单位为瓦特。将(5)式转换为接收到的光电子数,可用(6)式表示:

$$L = \left(\frac{N+1}{2} P_T g + \sum_{i=0}^{N-1} b_i a'_{i-l} \right) \frac{\Delta t \eta_Q}{h\nu} = S_{\text{signal}} + N_{\text{noise}}, \quad (6)$$

其中 Δt 为码元宽度, η_Q 为量子效率, $h\nu$ 为单光子能量。

观察(6)式可发现, L 由两部分组成。一部分代表真实的信号光电子数目,由 S_{signal} 表示;另一部分为噪声引起的光电子数目,由 N_{noise} 表示。

系统中的信号光电子数和噪声光电子数均服从泊松分布,而泊松分布的特性是均值和方差相等。所以回波信号在一个完整序列码周期内光电子数的方差 V_l 如(7)式所示:

$$V_l = \bar{L} = \left(\frac{N+1}{2} P_T \bar{g} + \sum_{i=1}^N \bar{b}_i a'_{i-l} \right) \frac{\Delta t \eta_Q}{h\nu} = \bar{S}_{\text{signal}} + \bar{N}_{\text{noise}} \quad (7)$$

式中 \bar{L} , \bar{g} , \bar{b}_i , \bar{S}_{signal} , \bar{N}_{noise} 分别为 L , g , b_i , S_{signal} , N_{noise} 的平均值。

信噪比 R_{SN} 可以表示为:

$$R_{\text{SN}}' = \frac{S_{\text{signal}}}{\sqrt{V_l}} = \frac{S_{\text{signal}}}{\sqrt{\bar{L}}} = \frac{S_{\text{signal}}}{\sqrt{\bar{S}_{\text{signal}} + \bar{N}_{\text{noise}}}} = \frac{P_T (N+1) g \Delta t \eta_Q}{2 h\nu \sqrt{\left(\frac{P_T (N+1) \bar{g}}{2} + \sum_{i=0}^{N-1} \bar{b}_i a'_{i-l} \right) \frac{\Delta t \eta_Q}{h\nu}}}, \quad (8)$$

观察(1)式可发现,响应函数 g 和大气透射率 η_{atm} 、目标距离 R 、目标反射率 ρ 以及系统参数决定的雷达系统光学透射率 η_{sys} ,接收望远镜口径 D 有关。在同一套系统下(即 η_{sys} 和 D 不变),对同一目标(即 R 和 ρ 不变),在天气晴朗的情况下(大气透过率 η_{atm} 可视为定值),可认为响应函数 g 和平均响应函数 \bar{g} 相等。另外, a'_i 由 $\frac{N+1}{2}$ 个‘1’以及 $\frac{N-1}{2}$ 个‘-1’组成,而在实际系统中码元数 N 一般较大, a'_i 中码元‘1’的个数和‘-1’的个数几乎相等,而平均背景噪声功率 \bar{b}_i 变化很小。所以, $\sum_{i=1}^N \bar{b}_i a'_{i-l}$ 这一项很小, \bar{N}_{noise} 可以忽略不计。

当对同一目标的信号叠加 n 次,信噪比将会得

到 \sqrt{n} 倍的递增。考虑 n 次叠加,简化后的信噪比 R_{SN} 表达式如(9)式所示。

$$R_{\text{SN}} = \frac{S_{\text{signal}} \sqrt{n}}{\sqrt{S_{\text{signal}} + N_{\text{noise}}}} = \sqrt{n S_{\text{signal}}} = \sqrt{\frac{n P_{\text{T}} N_{\text{g}} \Delta t \eta_{\text{Q}}}{2 h \nu}} = \sqrt{\frac{\eta_{\text{Q}} P_{\text{sig}} T}{2 h \nu}} = \sqrt{\eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} P_{\text{T}} \frac{\pi D^2}{(4R)^2 \rho} \frac{\eta_{\text{Q}} T}{2 h \nu}} \quad (9)$$

式中 $T = \Delta t n$ 为总积分时间。从 R_{SN} 的表达式中可以看出,在系统参数、目标特性(距离 R ,反射率 ρ)确定之后,系统信噪比 R_{SN} 仅和总积分时间 T 和发射功率 P_{T} 有关,而与具体 M 序列码的阶数 m 无关。

3 参数优化

对星载激光测高仪来说,系统的信噪比、空间分辨率是影响系统性能的主要参数。由于系统采用调

制的连续激光器,其测量重复频率取决于调制的重复频率,因此可以实现非常高的重复频率。根据卫星的飞行速度、信号存在的距离区间(对流层以下25 km,这个决定了模糊距离)及信号处理需要的时间,调制重复频率可达到1 kHz,对应的空间分辨率远高于传统的脉冲激光测高仪。

3.1 伪随机码调制激光测高系统的信噪比

由(9)式可知,系统的信噪比主要取决于系统参数、目标特性、总积分时间及发射功率。对星载系统来说,由于受到条件的限制,如望远镜的尺寸、系统功耗等,因此合理优化设计系统参数,对系统的研制至关重要。表2列出了系统模拟计算所采用的固定参数,而其它参数由数值模拟后确定。为了简化,尽可能选择高量子效率的单光子探测器,目前在1550 nm波段的单光子探测 InGaAs 雪崩光电二极管(APD)的量子效率可达20%。

表2 系统模拟时固定参数列表

Table 2 Fixed parameters of system simulation

Parameter	Discription	Parameter value
R	Orbit altitude	400 km
η_{Q}	Quantum efficiency of the detector	0.2
η_{atm}	Atmospheric loss factor(round trip)	0.5
η_{sys}	System loss factor	0.5
B_{rec}	Bandwidth of the detector	1.5 GHz
ρ	Target reflectivity	0.1
T_{e}	Temperature	300 K
R_{es}	Resistance	50 Ω
λ	Wavelength of the detector	1550 nm

将表2各项参数代入(9)式,整理可得

$$R_{\text{SN}} = 1.546 \times 10^2 \sqrt{P_{\text{T}} T D^2}. \quad (10)$$

3.2 伪随机码调制激光测高系统的距离分辨率

伪随机码调制激光测高系统的距离分辨率由码元宽度 Δt 或者说是调制频率 $f = \frac{1}{\Delta t}$ 决定。它和距离分辨率 Δd_{is} 之间的关系如(11)式所示:

$$\Delta d_{\text{is}} = \frac{1}{2} c \Delta t = \frac{c}{2f}. \quad (11)$$

码元宽度越窄或者说计数率越高就可以获得越高的分辨率。但是根据文献[13]可知,高计数率将会带来严重的后脉冲现象,从而对接收码产生严重的误判现象。再根据文献[14]可知,目前雪崩光电二极管单光子探测器的最高的计数率可达到1

GHz。即最小码元宽度 Δt 为1 ns,对应的距离分辨率 $\Delta d_{\text{is}} = 15$ cm。

3.3 系统参数分析

因为系统测量的重复频率为1 kHz,所以每个周期内的积分时间 T 要小于1 ms,即要满足(12)式:

$$T = (2^m - 1) \Delta t < 1 \text{ ms} \quad (12)$$

取 $\Delta t = 1$ ns,解(12)式可知 M 序列码的阶数 $m < 19.93$ 。根据(10)式可知,为提高信噪比 R_{SN} ,需尽可能大得增加积分时间 T 。所以取 $m = 19$,这样 $T = (2^{19} - 1) \times 1 \text{ ns} = 524 \mu\text{s}$; 19阶 M 序列码的码元数 $N = 2^m - 1 = 524287$ 。

在 $T = 524 \mu\text{s}$ 的情况下,信噪比 R_{SN} 随接收望远镜口径 D 及发射功率 P_{T} 的关系如图2所示。其

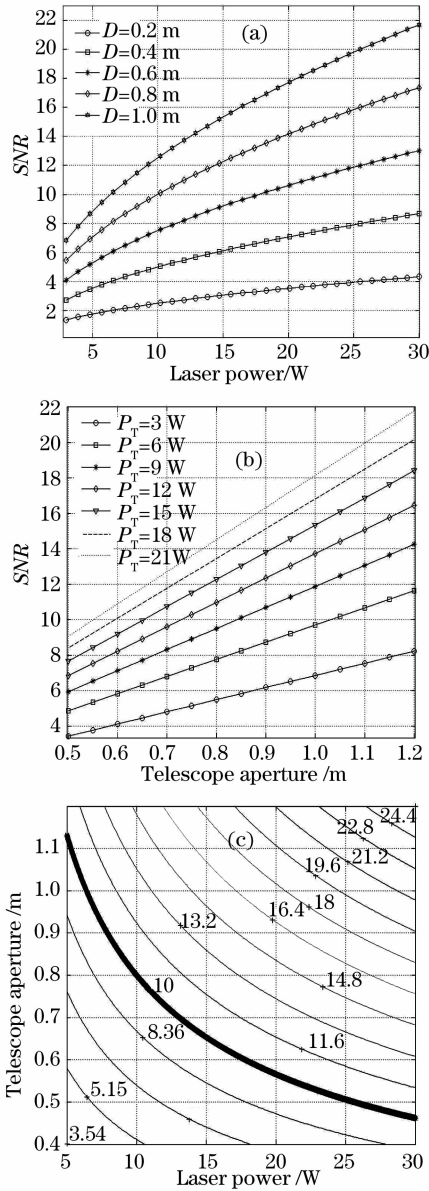


图 2 信噪比在不同接收望远镜口径 D 下随激光出射功率 P_T 的关系(a)和信噪比在不同激光出射功率 P_T 下随接收望远镜口径 D 的关系(b)和不同信噪比下望远镜口径 D 随激光出射功率 P_T 的变化(c)

Fig. 2 Signal-to-noise ratio as a function of laser power at different telescope apertures (a) and signal-to-noise ratio as a function of telescope aperture at different laser powers (b) and telescope aperture as a function of laser power at different signal-to-noise ratio(c)

中图 2(a)为信噪比在不同接收望远镜口径 D 下随激光出射功率 P_T 的关系,从图 2(a)可以看出接收望远镜口径 D 越大,信噪比 R_{SN} 随激光发射功率 P_T 的递增关系越明显;图 2(b)为信噪比在不同激光出射功率 P_T 下随接收望远镜口径 D 的关系,从图 2

(b)中可以看出信噪比 R_{SN} 随望远镜口径 D 呈线性递增关系。 $P_T = 12$ W 之前,出射功率 P_T 的递增对 R_{SN} 的改善作用比较明显; $P_T = 12$ W 之后,出射功率 P_T 的递增对 R_{SN} 的改善作用不大。所以,必须选择合适的接收望远镜口径 D 及激光出射功率 P_T 才能够使系统处于一种最佳的设计状态。图 2(c)给出了不同信噪比 R_{SN} 下,望远镜口径 D 及激光出射功率 P_T 的关系,图 2(c)中每条曲线对应的信噪比值在图中均有标识。为保障系统设计的信噪比大于 10,图 2(c)中,粗线及其右边的曲线才能满足设计要求。将系统设计要求定在 $R_{SN} = 10$,即图 2(c)中的粗线曲线。可以看出在 $P_T = 10$ W 之前,发射功率 P_T 的递增对望远镜口径 D 的降低有明显改善所用;在 $P_T = 10$ W 之后,发射功率的递增对望远镜口径 D 的降低的改善作用比较缓慢。综合图 2 中的三幅图,将发射功率 P_T 定在 10 W,望远镜口径 D 定在 0.8 m 为较理想的设计。

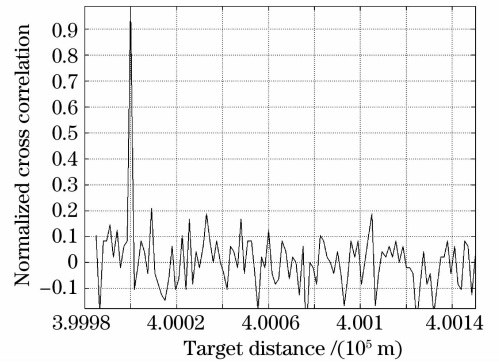


图 3 采用伪随机码调制和单光子计数得到的归一化信号波形

Fig. 3 Normalized signal by pseudorandom modulation and single-photon counting

再考虑设计余量,在表 2 所示参数及 $P_T = 10$ W, $D = 0.8$ m, $T = 600$ μ s 下,基于伪随机码调制和光子计数的星载激光高度计得到的最终归一化的信号波形如图 3 所示。

从图 3 中可以看出系统能够清楚得分辨目标所处的位置在距离系统 400 km 处。对比文献[15]中星载相干测距的方法,该系统结构简单、易实现。只需对激光器出射激光进行简单的强度调制即可。而文献[15]中对应的系统需要对激光器出射激光进行啁啾调制,对激光的相干性及系统的对准要求非常高,否则难以实现相干测量。

4 结 论

讨论了基于伪随机码调制和光子计数的星载激

光测高系统方案,分析了系统参数与系统信噪比的关系。设计了一套系统参数,当望远镜口径为 0.8~1 m,激光出射功率为 10 W,每周期内伪随机码调制时间约为 600 μ s,调制速率为 1 GHz 时,系统能够实现信噪比达到 10,距离分辨率达到 15 cm 的星载测距。仿真结果表明该系统在长距离高精度测距方面将有较大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Lu Xiaomei, Jiang Yuesong, Rao Wenhui. Polarization analysis of the cassegrain telescope used for the lidar polarization active imaging system[J]. *Acta Optic Sinica*, 2007, **27** (10): 1771~1774
路小梅,江月松,饶文辉.激光雷达偏振成像遥感的望远镜系统偏振分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1771~1774
- 2 Zhao Peitao, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. Design of beam-splitting optical path for differential absorption air pollution monitoring lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27** (6): 957~961
赵培涛,张寅超,胡顺星等.差分吸收测污激光雷达光路分束设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):956~971
- 3 Li Qi, Dong Guofeng, Wang Qi *et al.*. Object classification simulation for ladar-passive-infrared imaging combination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1347~1352
李琦,董国峰,王 骐等.用于激光成像雷达和被动红外成像复合的目标分类仿真[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1347~1352
- 4 Cheng Xuewu, Gong Shunsheng, Li Faquan *et al.*. Daytime observation technology of lidar by using atomic optical filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 406~410
程学武,龚顺生,李发泉等.采用原子滤光的激光雷达白天探测技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):406~410
- 5 Zhenzhu Wang, Ruili Chi, Bo Liu *et al.*. Depolarization

- properties of cirrus clouds from polarization lidar measurements over Hefei in spring[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4):235~237
- 6 Zongfeng Ma, Chunxi Zhang, Pan Ou *et al.*. Application of fiber interferometer in coherent Doppler lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4):261~263
- 7 J. B. Abshire, Xiaoli Sun, H. Riris *et al.*. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat mission: pre-launch and on-orbit performance [C]. IGARSS, 2003, 3: 1534~1536.
- 8 Stewart Nozette, P. Rustan, L. P. Pleasance *et al.*. The clementine mission to the moon: Scientific overview [J]. *Science*, 1994, **266** (5192): 1835~1839.
- 9 W. Chen, X. Hou, J. Bi *et al.*. Solid-state laser for laser altimeter in Chang'E lunar explorer [C]. CLEO/Pacific Rim 2007, 2007:1~2.
- 10 Robert S. Afzal. Mars observer laser altimeter: laser transmitter[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33** (15): 3184~3188
- 11 N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba *et al.*. Random modulation cw lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22** (9): 1382 - 1386
- 12 Chikao Nagasawa, Makoto Abo, Hideki Yamamoto *et al.*. Random modulation CW lidar using new random sequence[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(10), 1466~1470
- 13 Damien Stucki, Grégoire Ribordy, André Stefanov *et al.*. Photon counting for quantum key distribution with Peltier cooled InGaAs/InP APD's [J]. *Journal of Modern Optics*, 2001, **48**(13): 1967~1981
- 14 Z. L. Yuan, B. E. Kardynal, A. W. Sharpe *et al.*. High speed single photon detection in the near-infrared [J]. *Appl. Phy. Lett.*, 2007, **91**:1~11
- 15 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Parameter design of spaceborne laser altimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28** (3): 573~577
杨 馥,贺 岩,陈卫标.星载激光相干测高计的参数设计[J]. *光学学报*, 2008, **28** (3): 573~577