

基于伪随机码相位调制和外差探测的 星载激光高度计仿真研究

杨 馥¹ 詹亚歌¹ 杨沁玉¹ 薛绍林¹ 贺 岩²

¹ 东华大学理学院, 上海 201620

² 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 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 (PRC) 相位调制光纤激光器和外差探测的测距方法。推导了用于测高时的信噪比公式。对激光发射功率、参考光功率、望远镜口径、调制速率以及 PRC 序列长度对信噪比和距离分辨率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, 当激光出射功率约为 10 W, 参考光功率约为 10 mW, 望远镜口径为 0.4 m, 调制速率为 1 GHz, 单周期内 PRC 序列长度约为 300 μs 时, 基于 PRC 相位调制和外差探测的星载激光测高计能够实现系统信噪比为 10 和距离分辨率为 15 cm 的设计目标。

关键词 激光遥感; 星载激光高度计; 伪随机码相位调制; 外差探测; 信噪比

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s114007

Simulation of the Space-Borne Laser Altimeter Based on Pseudorandom Code Phase Modulation and Heterodyne Detection

Yang Fu¹ Zhan Yage¹ Yang Qinyu¹ Xue Shaolin He Yan²

¹ College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China

² Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract A method base on the techniques of pseudorandom code (PRC) phase modulation of the fiber laser and heterodyne detection to realize a high spatial resolution for the space-borne laser altimeter is proposed. The altimeter's equation of the signal to noise ratio is deduced. The relations between the signal to noise ratio and range resolution with the laser transmit power, local oscillator power, telescope aperture, modulation rate and pseudorandom code length are numerically simulated. The relations between the parameters and the optimized parameters are obtained after the system analysis. Results show that the space-borne altimeter can achieve the design objective of the signal to noise ratio of 10, and the distance resolution of 15 cm when the transmit laser power is about 10 W, local oscillator power is about 10 mW, telescope aperture is 0.4 m, modulation rate is 1 GHz, and PRC length is about 300 μs in a single periodic time.

Key words laser remote sensing; space-borne laser altimeter; pseudorandom code phase modulation; heterodyne detection; signal to noise ratio

OCIS codes 280.3640; 280.3340; 280.3400; 040.2840

1 引言

激光雷达应用日益广泛^[1~3], 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, 因此在地球科学和深空探测中得到广泛的应用。目前, 已经成功发射的星载激光高度计, 如地球观测的 GLAS^[4], 月球探测的 Clementine^[5], 嫦娥一号、二号^[6], 火星探测的 MOLA^[7] 等, 均采用传统的脉冲激光测距技

收稿日期: 2011-07-05; 收到修改稿日期: 2011-09-05

作者简介: 杨 馥(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事先进激光雷达技术的仿真以及实验等方面的研究。

E-mail: fuyang@dhu.edu.cn

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,但是激光器工作在窄脉冲高功率下,提高激光重复频率难度大,激光器的损坏风险大,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的能力外,一些新的测量方案不断被提出,如基于微脉冲激光器的光子计数测距^[8],基于啁啾调幅的相干测量机制^[9]和基于伪随机码(PRC)强度调制的单光子探测^[10]等新技术。文献[11]提出了联合采用 PRC 调制二氧化碳连续激光器和相干探测的激光雷达用于硬靶目标距离测量。

本文基于 PRC 相位调制和相干探测的高重复频率光纤激光测高技术,结合 PRC 相位调制的高分辨率测距技术、高灵敏度的相干探测技术及高效率的连续光纤激光器技术,设计了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 系统测量原理及其系统信噪比

基于 PRC 相位调制和相干探测的星载激光测

高计原理如图 1 所示。系统采用人眼安全波长、通信波段、成熟的单模窄线宽光纤激光器作为光源。输出激光通过 1×2 光纤耦合器分为两束,其中一束作为参考光,另一束作为信号光。电光调制器根据 PRC 序列对信号光产生相位调制,其驱动信号可由 PRC 信号发生器提供。调制后的信号光经光纤放大器放大后,通过环形器 1 号端口经望远镜发射至目标。返回信号光由同一望远镜和环形器接收。由于激光发射和接收采用同一光路,不仅光路简单、易于调节,而且光学耦合效率高。回波信号光与经过声光调制器频移的参考光在耦合器中发生外差相干作用,从而放大回波小信号。声光调制器的驱动信号可由信号发生器提供。相干后的信号为相位不连续的三角波信号,三角波频率与声光调制器的频移量一致。该信号由探测器转化为电信号,经放大后由双通道模拟/数字(A/D)转换卡的通道 1 采集。A/D 转换卡通道 2 采集电光调制器的驱动 PRC 信号,用于提供信号处理时需要的延迟 PRC 信号。外触发电路用于提供 A/D 转换卡和 PRC 信号发生器的触发信号从而保证系统的同步性。系统所有的信号处理过程都可在计算机中完成。

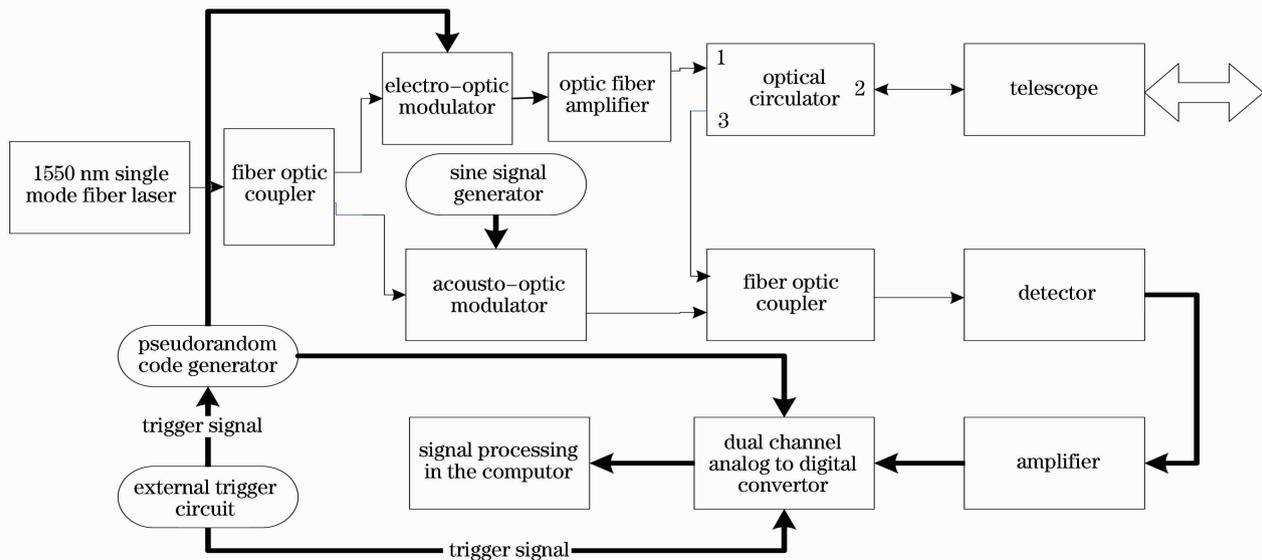


图 1 基于 PRC 相位调制及外差探测的激光测高计原理框图

Fig. 1 Schematic of the laser altimeter based on PRC phase modulation and heterodyne detection

经过 PRC 相位调制后的出射信号为

$$S = A_T \cos[\omega_c t + P'_{RC}(t)\pi + \phi_1], \quad (1)$$

式中 A_T 为出射激光的振幅, ω_c 为出射激光的频率, ϕ_1 为随机相位, PRC 序列 $P'_{RC}(t)$ 为

$$P'_{RC}(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} b_n p(t - nT_0), \quad (2)$$

式中 b_n 为伪随机码,取值非 0 即 1。系统采用 M 序列

PRC,具体产生方法可参考文献[10]。 $p(t)$ 为门函数:

$$p(t) = \begin{cases} 1, & (|t| \leq T_0/2) \\ 0, & (|t| > T_0/2) \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_0 为 PRC 码元宽度。参考信号为

$$L = A_{LO} \cos[(\omega_c + \omega_m)t + \phi_2], \quad (4)$$

式中 A_{LO} 为参考信号振幅, ω_m 为声光调制器的频移量, ϕ_2 为随机相位。系统接收的目标回波功率为

$$P_{sig} = \eta_{atm} \eta_{sys} P_T \frac{\pi D^2}{(4R)^2} \beta, \quad (5)$$

式中 η_{atm} 和 η_{sys} 分别为大气和雷达系统光学透射率,

$P_T = A_T^2$ 为激光出射峰值功率, D 为望远镜直径, R 为目标距离, β 为地面反射率。在不考虑多普勒频移的情况下, 探测器输出信号可表示为

$$i_s(t) = A_S A_{LO} \cos \left[\omega_m \left(t - \frac{2R}{c} \right) + P'_{RC} \left(t - \frac{2R}{c} \right) \pi + \phi_3 \right], \quad (6)$$

式中 R 为被测目标和系统之间的距离, c 为光速, ϕ_3 为随机相位。 A_S 为回波信号振幅, 它和回波信号功率 P_{sig} 的关系为 $A_S = \sqrt{P_{sig}}$ 。从(6)式可看出, 由于 PRC 的相位调制作用, 探测器的输出为相位不连续的频率 (ω_m) 的三角波信号。

因为

$$\cos \left[P'_{RC} \left(t - \frac{2R}{c} \right) \pi \right] = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} a_n p(t - nT_0) = P_{RC} \left(t - \frac{2R}{c} \right),$$

即 $P_{RC}(t)$ 取值 1 或 -1; 分别对应于 $P'_{RC}(t)$ 取值 0, 1。(6)式可简化为

$$i_s(t) = A_S A_{LO} P_{RC} \left(t - \frac{2R}{c} \right) \cos(\omega_m t + \phi_4), \quad (7)$$

式中 ϕ_4 为随机相位, (7)式信号经放大后由 A/D 转换卡通道 1 采集。A/D 转换卡通道 2 的采集信号依次做不同延迟得到 $P_{RC}(t - nT_0)$, 和通道 1 的采集信号相乘并做快速傅里叶变换(FFT)。即

$$S_{IG} = \mathcal{F}(Y) = \mathcal{F}[i_s(t) \times P_{RC}(t - nT_0)] = A_S A_{LO} \mathcal{F} \left[P_{RC} \left(t - \frac{2R}{c} \right) \times P_{RC}(t - nT_0) \times \cos(\omega_m t + \phi_4) \right], \quad (8)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

式中 N 为一个完整 M 序列的码元数, 它和 M 序列的阶数 m 之间满足 $N = 2^m - 1$ 。从(8)式可看出, 当延迟的码元时间 nT_0 和目标导致的延时量 $2R/c$ 一致时, Y 将转变为相位连续的三角函数, 此时的幅度谱在中频 ω_m 处具有最大值。因此, 系统可根据功率谱在中频 ω_m 处具有最大值时对应的延迟码元数 n' 来获取目标距离信息, 即 $R = cn'T_0/2$ 。

当系统参数如表 1 所示时, 伪随机码延迟码元时间和目标导致的飞行时间匹配和不匹配时的幅度谱如图 2 所示。

由图 2 中可见, 当三角波信号相位不连续时, 将极大削弱功率谱在中频 ω_m 的幅度。根据图 2(a) 中的信号峰值(74.63 dBW)及其噪声基底(40 dBW), 可将此时的系统信噪比(SNR)定义为 34.6 dB。保持 PRC 调制速率 1 GHz, 将 M 序列码的阶数分别设定为 12, 13, 14 和 15 阶时, 相应的 M 序列的脉冲长度分别为 4.096, 8.191, 16.388 和 32.768 μs , 得到的系统信噪比与码元序列长度的关系如图 3 所示。

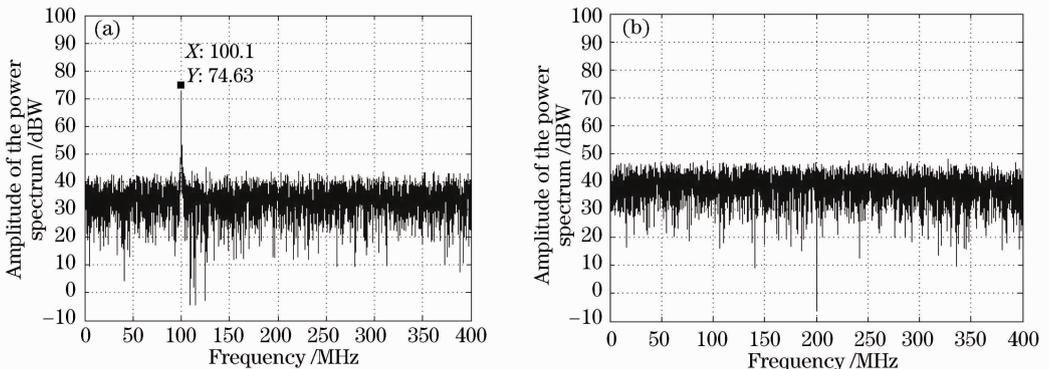


图 2 PRC 延迟码元时间和飞行时间匹配(a)和不匹配(b)时的信号功率谱

Fig. 2 Power spectra of the signal when the PRC delay time (a) match and (b) mismatch the flight time of the target

表 1 系统仿真时的固定参数

Table 1 Fixed parameters of simulation system

Parameter	Discription	Value
R /m	Target distance	100
P_T /W	Transmit power	0.1
D /m	Telescope aperture	0.1
P_{LO} /mW	Local oscillator power	1
ω_m /MHz	Offset frequency of the acousto-optic modulator	100
F /GHz	PRC modulation rate	1
m	Order of the PRC	13
$R_{esp}/(A/W)$	Responsivity of the detector	1
η_{atm}	Atmospheric loss factor (round trip)	0.5
η_{sys}	System loss factor	0.5
η_c	Heterodyne efficiency	0.8
B_{rec} /GHz	Bandwidth of the detector	1.5
β	Target reflectivity	0.1
G	Optical gain for the optical amplifier	1
T_e /K	Temperature	300
R_{es}/Ω	Resistance	50
λ /nm	Wavelength of the detector	1550

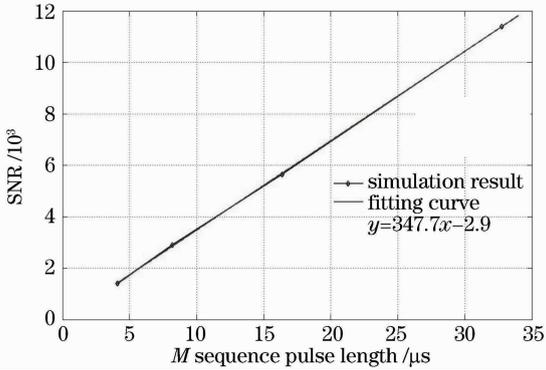


图 3 系统信噪比与 M 序列长度的关系

Fig. 3 SNR versus M sequence length

由图 3 可知,系统信噪比和 PRC 序列长度成线性关系。根据相干激光雷达理论^[12],在参考光足够强的情况下,相干探测的信噪比为

$$R_{SN,coh} = \frac{R_{esp}^2 \eta_c P_{sig} P_{LO}}{2B_e [R_{esp} q (P_{sig} + P_{LO}) + 2k_B T_e / R_{res}]}, \quad (9)$$

式中 R_{esp} 为光电探测器的响应率, η_c 为外差效率, P_{sig} 和 P_{LO} 分别为回波信号光和参考光的功率, B_e 为探测器带宽, q 为电子电量, k_B 为玻尔兹曼常数, T_e 为温度, R_{res} 为探测电路等效电阻,分母中的两项分别代表散粒噪声和热噪声。再考虑到系统信噪比和伪随机码序列长度之间的正比关系,系统最终信

噪比为

$$R_{SN} = \frac{R_{esp}^2 \eta_c P_{sig} P_{LO}}{2B_e [R_{esp} q (P_{sig} + P_{LO}) + 2k_B T_e / R_{res}]} \times kT, \quad (10)$$

式中 k 为比例系数, T 为 PRC 序列长度。系统激光器为连续激光器,PRC 序列长度 T 仅取决于电光调制器驱动信号的长度。根据系统信噪比可推算 $k = 8.2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。

3 系统参数的优化设计

对于星载激光测高计,系统的信噪比和空间分辨率是影响系统性能的主要参数。由于系统采用频率连续调制的激光器,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,它决定了模糊距离)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 星载激光高度计的系统信噪比

由(10)式可知,系统信噪比主要取决于系统参数和 PRC 序列长度。对星载系统来说,由于受到如望远镜的尺寸和系统功耗等条件的限制,因此合理优化设计系统参数,对系统的研制至关重要。表 2 为系统模拟仿真时所采用的固定参数,而其他参数由数值模拟后确定。

表 2 星载激光高度计模拟时的固定参数

Table 2 Fixed parameters of spaceborne altimeter simulation system

Parameter	Discription	Value
R /km	Orbit altitude	400
ω_m /MHz	Offset frequency of the acousto-optic modulator	100
$R_{esp}/(A/W)$	Responsivity of the detector	1
η_{atm}	Atmospheric loss factor (round trip)	0.5
η_{sys}	System loss factor	0.5
η_c	Heterodyne efficiency	0.8
B_{rec} /GHz	Bandwidth of the detector	1.5
β	Target reflectivity	0.1
G	Optical gain for the optical amplifier	1
T_e /K	Temperature	300
R_{es}/Ω	Resistance	50
λ /nm	Wavelength of the detector	1550
G	Optical gain for the optical amplifier	1

将表 2 各参数代入(10)式,整理可得

$$R_{SN} = \frac{4.2 \times 10^4 \times P_T P_{LO} D^2 T}{P_{LO} + 10^{-3}}, \quad (11)$$

3.2 系统距离分辨率

基于 PRC 相位调制和外差探测的激光测高系统距离分辨率由码元宽度 Δt 或者调制频率 $f = 1/\Delta t$ 决定。它和距离分辨率 Δd 之间的关系为

$$\Delta d = \frac{1}{2} c \Delta t = \frac{c}{2f}. \quad (12)$$

如果码元宽度越窄或者调制速率越大就可以获得更精确的距离分辨率,同时也要求探测器的带宽越宽。根据当前器件的成熟度,可将调制速率定在 1 GHz,即最小码元宽度 Δt 为 1 ns,对应的距离分辨率 $\Delta d = 15$ cm。

3.3 系统参考光功率

由(11)式可见,当参考光功率大于 10 mW 时,分母中 10^{-3} 这项可以忽略,此时再提高参考光功率对系统信噪比影响很小。所以将系统参考光功率设定为 10 mW,此时系统信噪比可简化为

$$R_{SN} = 4.2 \times 10^4 \times P_T D^2 T. \quad (13)$$

3.4 望远镜口径

以系统信噪比达到 10 为设计目标。为实现该设计目标,在不同望远镜口径下系统出射功率和 PRC M 序列码长度的关系如图 4 所示。从图中可以看出当望远镜口径 $D < 0.4$ m 时,增加 D 对出射功率及 M 序列码长度有显著改善作用;当 $D > 0.4$ m 时,增加 D 对两者的改善作用趋于缓慢。所以将 D 定在 0.4 m。

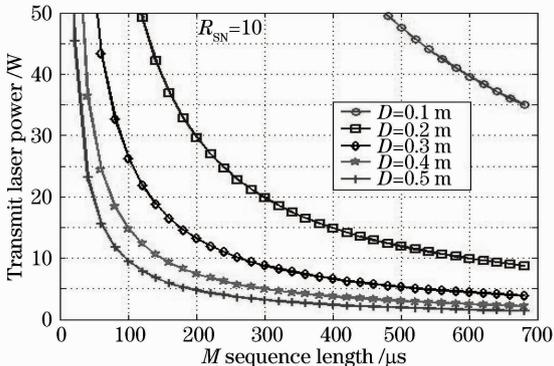


图 4 在不同望远镜口径 D 下激光出射功率与 M 序列码长度的关系

Fig. 4 Laser transmit power versus M sequence length with different D

3.5 PRC 序列长度及激光出射功率

当 $D = 0.4$ m 时,在不同 PRC 序列长度 T 下,系统信噪比和激光出射功率的关系如图 5 所示。图中

以一条粗实线代表系统信噪比为 10 的情况,其与各直线的交点以“★”标识。在不同序列长度 T 时的激光出射功率必须大于此序列长度下“★”点对应的功率,才能满足系统对信噪比要求。从图中可以看出当 $T < 300 \mu s$ 时,加长序列长度 T 对激光出射功率的减小有显著作用;当 $T > 300 \mu s$ 时,加长序列长度对激光出射功率的改善并不明显。因此,将 PRC 序列长度定在 $300 \mu s$,此时,为达到系统设计目标(即系统信噪比为 10),需要的激光出射功率为 5 W。

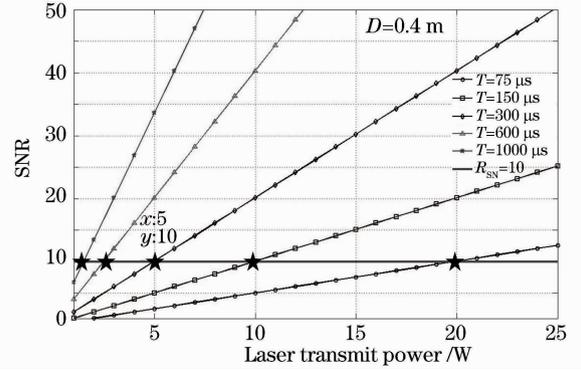


图 5 不同 PRC 序列长度下,系统信噪比与激光出射功率的关系

Fig. 5 SNR versus laser transmit power at different PRC length

针对 1 GHz 的 PRC 调制速率, M 序列的码元长度 $T = (2^m - 1) \Delta t$,故最接近 $300 \mu s$ 序列长度对应的 M 序列码阶数为 18,即 PRC 序列长度为 $T = (2^{18} - 1) \times 10^{-9} \approx 262 \mu s$ 。因此在表 2 所示系统参数及激光出射功率 $P_T = 10$ W,参考光功率 $P_{LO} = 10$ mW,望远镜口径 $D = 0.4$ m,调制速率 $F = 1$ GHz,PRC M 序列码长度为 $262 \mu s$ (即 18 阶)时,系统归一化功率谱如图 6 所示。从图 6 中可以看出

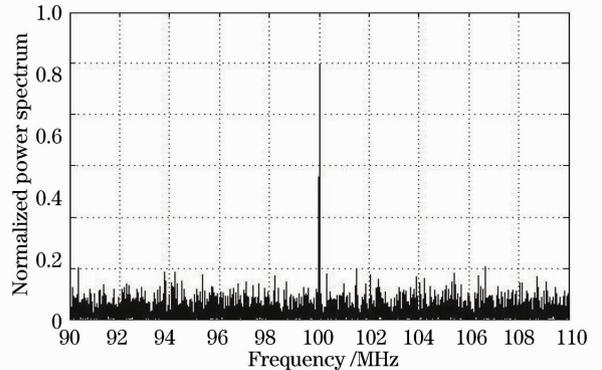


图 6 $P_T = 10$ W, $P_{LO} = 10$ mW, $D = 0.4$ m, $F = 1$ GHz, $T = 262 \mu s$ 时系统的归一化功率谱

Fig. 6 System normalized power spectrum under $P_T = 10$ W, $P_{LO} = 10$ mW, $D = 0.4$ m, $F = 1$ GHz, $T = 262 \mu s$

系统能够实现信噪比为 10 的设计目标。

4 结 论

讨论了基于 PRC 相位调制和相干探测的星载激光测高系统的实施方案,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。当激光出射功率约为 10 W,参考光功率约为 10 mW,望远镜口径为 0.4 m,调制速率为 1 GHz,PRC M 序列长度约为 300 μ s 时,系统能够实现信噪比为 10,距离分辨率为 15 cm 的星载测距目标。在实际应用时,光纤激光器辐照后的衰减、光学系统的对准误差和大气湍流等都会影响系统的性能。目前掺 Yb,Er 光纤激光器的输出功率已经大幅度提高,1 m 以上口径的星载望远镜也可实现,在探测模式上也可采用阵列探测。因此可通过提高发射和接收的规模来弥补未考虑的因素,从而达到系统的预期性能。

参 考 文 献

- 1 Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing *et al.*. Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 19~25
伯广宇,刘 博,钟志庆等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 19~25
- 2 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 315~320
董云升,刘文清,刘建国等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 315~320
- 3 Yuan Lin, Liu Bo, Wang Bangxin *et al.*. Design of mobile 1064 nm Mie scattering lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1721~1725
袁 林,刘 博,王邦新等. 车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达的研制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1721~1725
- 4 J. B. Abshire, X. Sun, H. Riris *et al.*. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: pre-launch and on-orbit performance[C]. *IEEE*, 2003, **3**: 1534~1536
- 5 S. Nozette, P. Rustan, L. P. Plesance *et al.*. The clementine mission to the moon: scientific overview[J]. *Science*, 1994, **266**(5192): 1835~1839
- 6 W. Chen, X. Hou, J. Bi *et al.*. Solid-state laser for laser altimeter in Chang'E lunar explorer[C]. Seoul: Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2007. ThG1
- 7 R. S. Afzal. Mars observer laser altimeter; laser transmitter[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3184~3188
- 8 J. J. Degnan. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements [J]. *J. Geodynamics*, 2002, **34**(3-4): 503~549
- 9 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
- 10 Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua *et al.*. Simulation of spaceborne altimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 21~26
杨 馥,贺 岩,周田华等. 基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 21~26
- 11 J. F. Holmes, B. J. Rask. Coherent, CW, pseudo random code modulated lidar for path resolved optical remote sensing [C]. *SPIE*, 1994, **2222**: 20~28
- 12 C. T. Allen, S. K. Chong, Y. Cobanoglu *et al.*. Development of a 1319-nm laser radar using fiber optics and RF pulse compression[R]. University of Kansas

栏目编辑: 马 沂