

非扫描激光雷达系统的多脉冲积累信噪比分析

高峰 杨进华 姜成昊* 朱彦

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 激光雷达系统信噪比(SNR)直接影响了系统距离像和强度像的好坏。运用信号相关检测理论,分析了多脉冲积累下的非扫描激光雷达系统信噪比。考虑到雪崩光电二极管(APD)阵列、工作环境因素和激光雷达系统参数等,对多脉冲积累下的信噪比进行了仿真分析。在100个脉冲积累数目下,信噪比提高了9.35 dB,之后随脉冲积累数目的继续增加,信噪比提高的幅度不明显。研究表明:运用脉冲积累这一方法能够提高系统信噪比。

关键词 激光技术;激光雷达;信噪比;多脉冲积累;雪崩光电二极管阵列

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051401

SNR Analysis under Multi Pulse Accumulation of Non-Scanning Lidar System

Gao Feng Yang Jinhua Jiang Chenghao Zhu Yan

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Signal-to-noise ratio (SNR) of lidar system affects directly the quality of the range image and intensity image. Using the theory of signal correlation detection, SNR of non-scanning lidar system is analysed under multi-pulse-accumulation condition. Simulation and analysis of SNR are conducted under considering APD arrays, work environment factors, lidar system parameters. SNR is improved by 9.35 dB under 100 pulses accumulation, and the sequential improvement is not obvious with increase of pulse accumulation. It is shown that SNR of lidar system can be improved by using pulse-accumulation method.

Key words laser technique; lidar; signal-to-noise ratio; multi-pulse accumulation; Avalanche Photodiode arrays

OCIS codes 140.5680; 040.1240; 040.1345; 040.5160; 250.1345

1 引言

激光雷达系统的信噪比是衡量系统性能的重要指标和参数,它与系统的发射接收性能和激光传输过程紧密相关,常常成为激光雷达设计的依据和性能优劣的衡量标准。非扫描型激光成像雷达采用高灵敏度雪崩光电二极管(APD)阵列探测器接收目标的回波光信号,不仅能够实现高分辨率的距离三维像^[1],实现对隐藏目标的识别,也能够实现强度三维像,且有较高的角分辨率,在战场侦察、目标识别等军事领域有着广阔的应用前景。多脉冲积累探测技术已经广泛应用于微波雷达系统,在激光雷达系统方面的研究还较少,特别是基于APD阵列的非扫描激光雷达系统,目前还未见应用报道。多脉冲积累探测是非扫描激光雷达的关键技术之一,采用多脉冲积累探测技术,可以使激光雷达系统获得较高的探测概率,具有重要的研究价值。美国林肯实验室研究了多脉冲积累下256×256的APD阵列探测理论,并给出了运用脉冲积累方法可以提高信噪比的结论^[2,3];在国内,中国电子科技集团公司第四十四研究所及深圳大学等单位也开展了APD阵列技术的研究工作,主要以器件研制和小面阵APD阵列应用研究为主^[2,4]。本文运用信号相关检测方面的理论,进行了基于APD阵列的非扫描激光雷达系统的多脉冲积累信噪比的分析。

收稿日期: 2011-12-16; **收到修改稿日期**: 2012-01-09; **网络出版日期**: 2012-03-12

作者简介: 高峰(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: peakg11@163.com

导师简介: 杨进华(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电测试,机器视觉及图像处理理论及应用等方面的研究。E-mail: yangjh@cust.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: lengyu17@126.com

2 APD 阵列非扫描激光雷达系统原理及噪声

2.1 APD 阵列非扫描激光雷达系统

基于 APD 阵列的非扫描激光雷达原理如图 1 所示^[5]。

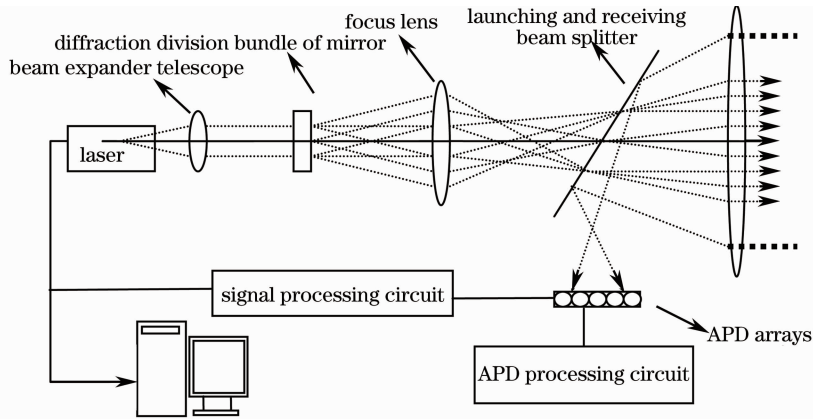


图 1 非扫描激光雷达系统原理

Fig. 1 Principle of non-scanning lidar system

激光雷达系统所受到的影响因素^[4]很多：大气变化、目标的大小、反射率的高低、发射接收光学系统的传递效率以及 APD 处理电路的热噪声等。这些为激光雷达信噪比的求解带来了一定的困难，目前对于信噪比的研究都只是基于单脉冲的，考虑的影响因子也不尽相同。然而采用多脉冲发射，运用脉冲积累理论不仅可以提高非扫描激光雷达对目标的探测距离，还可以改善目标的距离像、强度像，对提高现实战场中隐蔽目标（如树丛中的坦克、车辆）的发现概率具有重要的现实意义。本文从多脉冲积累的角度出发，分析了激光雷达系统信噪比，做出了仿真分析，得出了多脉冲积累能够提高系统信噪比的结果。

2.2 APD 阵列非扫描激光雷达系统噪声

激光雷达系统噪声分内部噪声和外部噪声^[7,8]。外部噪声主要有大气的后向散射和太阳光辐射引入的噪声等。内部噪声主要是 APD 的暗电流噪声和热噪声。

1) 背景噪声电流

由于太阳光的介入，引发了太阳光噪声电流，太阳噪声的电流为

$$i_{\text{solar}} = \frac{R_{\lambda} A_{\text{rec}} T_{\text{rec}} E_{\lambda} \rho \Delta \lambda (f_{\text{IFOV}})^2 \exp(-\alpha R)}{\pi}, \quad (1)$$

式中 R_{λ} 是探测器灵敏度， A_{rec} 是探测器的有效面积， T_{rec} 是接收光学系统透射率， E_{λ} 是太阳光谱辐照度， ρ 是目标反射率； $\Delta \lambda$ 是滤光片光谱宽度， f_{IFOV} 是接收瞬时视场（在扫描成像过程中一个光敏探测元件通过发射系统投射到地面上的直径或对应的视场角度）， α 是大气衰减系数， R 是发射系统到目标的距离。

2) 大气后向散射噪声电流

激光光束在大气中传播时会发生散射作用，进而引发大气后向散射噪声电流

$$i_{\text{bscat}} = \frac{R_{\lambda} A_{\text{rec}} T_{\text{rec}} T_{\text{emit}} \sigma \beta_{\text{scr}} \beta (c/2) E_L \exp(-2\sigma_0 r_{\text{obs}} \beta_{\text{scr}})}{R_s^2(l)}, \quad (2)$$

式中 T_{emit} 发射光学系统透射率， σ 是消光系数， β_{scr} 是散射消光系数比， β 是散射方向与照明方向成 180° 时的散射系数， c 是光速， E_L 是发射激光能量， σ_0 是大气质量消光系数， r_{obs} 是探测器到最近散射点的距离， $R_s(l)$ 是散射点与系统之间的距离。

3) 目标辐射噪声电流

由于目标自身辐射产生的噪声电流满足下式：

$$i_{\text{emit}} = \frac{R_{\lambda} A_{\text{rec}} T_{\text{rec}} T_{f2} M_{\lambda} (f_{\text{IFOV}})^2 \epsilon}{\pi}, \quad (3)$$

式中 T_{f2} 是滤波器系数， M_{λ} 是带宽内目标的光通量； ϵ 是目标的发射率。

4) 探测器暗电流和热噪声电流

由于探测器件自身工作过程中会伴随着暗电流的产生,从而引发了探测器暗电流和热噪声电流。探测器暗电流为

$$i_{\text{drk}} = J_{\text{drk}} A_{\text{det}}, \quad (4)$$

式中 J_{drk} 是单位面积暗电流, A_{det} 是探测器有效面积。热噪声电流为

$$i_{\text{Th}} = \sqrt{\frac{4kTB_{\omega}}{R_t}}, \quad (5)$$

式中 R_t 是 APD 探测器的等效负载电阻, k 是玻尔兹曼常数, T 是热力学温度, B_{ω} 是探测器噪声带宽。

5) 噪声等效功率分析^[8]

系统总的背景噪声满足下式:

$$i_{\text{bkgd}} = i_{\text{solar}} + i_{\text{emit}} + i_{\text{bscat}}, \quad (6)$$

综合考虑内外噪声对探测器 APD 的影响,系统的噪声等效功率由下式给出:

$$P_{\text{NE}} = \frac{\sqrt{i_{\text{Th}}^2 + 2q(i_{\text{bkgd}} + i_{\text{drk}})M^2[k_e M + (2 - 1/M)(1 - k_e)]B_{\omega}}}{R_{\lambda} M}, \quad (7)$$

式中 M 是探测器增益, k_e 是电离率。

3 信噪比分析

3.1 APD 阵列激光雷达信噪比

信噪比(SNR)定义为信号的峰值功率与噪声功率的均方根值的比值,是评价系统性能的重要参数。激光功率的空间分布如下式所示:

$$P_1(\omega) = \left(\frac{E_L}{b_w}\right) \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-2\left(\frac{\omega}{b_{ws}}\right)^2\right], \quad (8)$$

式中 E_L 是激光信号脉冲能量, b_w 是脉冲在 $1/e^2$ 点处的半径, $b_w = \omega_{1/2}/(2\ln 2)^{1/2}$, $\omega_{1/2}$ 是脉冲波形峰值强度 50% 的前沿半峰全宽, b_{ws} 是激光束宽。

APD 阵列非扫描激光雷达系统中,探测器 APD 阵列是多像素探测器件,单个像素处的信噪比 SNR 由下式给出

$$R_{\text{SN}}(n_1, n_2) = \frac{P(n_1, n_2) \eta_B \rho T_{\text{opt}} A_{\text{rec}} \exp[-2(\alpha R a_s r_{\text{obs}} \beta_{\text{rat}})]}{\pi R^2 P_{\text{NE}}}, \quad (9)$$

式中 $P(n_1, n_2)$ 是像素 (n_1, n_2) 处的激光峰值功率, η_B 是在视场(FOV)中的几何重叠因子, T_{opt} 是发射和接收光学系统的透射率乘积, a_s 是散射系数, β_{rat} 是障碍物直径与到该障碍物距离的比值。该式直接反应了单个像素处的信噪比。

由以上分析可得出整个 APD 阵列上的信噪比^[9]满足下式:

$$R_{\text{SN}} = \frac{\{E_L/bw \sqrt{2/\pi} \exp\{-2[(n_1 - n_{\text{mid}}) f_{\text{IFOV}}/bw_s]^2\} \exp\{-2[(n_2 - n_{\text{mid}}) f_{\text{IFOV}}/bw_s]^2\}}{\pi R^2 P_{\text{NE}}} \times \eta_B \rho T_{\text{opt}} A_{\text{rec}} \exp[-2(\alpha R a_s r_{\text{obs}} \beta_{\text{rat}})]}, \quad (10)$$

式中 n_{mid} 是 APD 阵列中心像素位置值。

3.2 多脉冲积累探测分析^[3]

回波信号包含了被测目标的速度、形状和反射率等信息,彼此之间是按照一定的规律周期性传播的,即能够用确定的时间函数加以描述,具有时间相关性;噪声没有规律,随机产生,信号的大小、频率波动很大,不能被预测,即不能用确定的时间函数描述,时间相关性很小^[10,11]。激光雷达探测是一个随机过程,通过对系统的噪声分析,可以得出:系统的外部噪声中,背景噪声起主导作用,满足高斯概率密度分布^[12],多个脉冲序列之间的噪声都是相互统计独立分布的。因此,基于随机的高斯白噪声模型来研究激光探测噪声是可行的。图 2、图 3 分别给出了噪声模型和噪声的自相关分析模型。

激光雷达系统工作期间,由于发射激光器的高重复频率,系统接收机将会接收几个到几百个成串脉冲,利用信号的相干性和噪声的随机性,对整个脉冲串而非单个脉冲进行处理,信号由于具有时间相关性而实现了叠

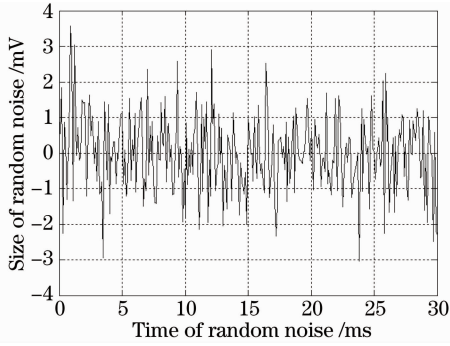


图 2 噪声模型

Fig. 2 Noise model

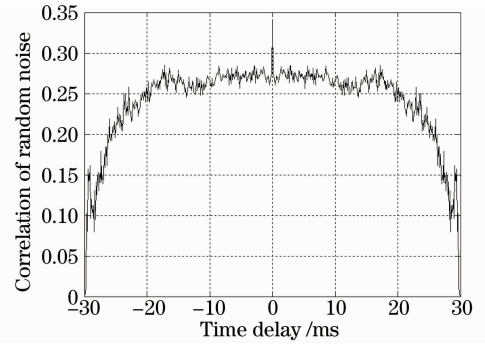


图 3 噪声自相关分析模型

Fig. 3 Analysis model of noise self-correlation

加,而噪声却因为其随机性,积累的效果极其不明显。因此,运用多脉冲积累探测技术,可以显著的提高激光雷达系统的信噪比,从而能将淹没在噪声中的弱信号检测出来^[11]。假设,多脉冲激光雷达的重复周期为 T ,脉宽 τ ,峰值功率为 P_w ,平均功率为 P_T ,系统探测周期 T_m ,则系统在一个探测周期内的脉冲个数 n_p 满足下式^[13]:

$$n_p P_w \tau = P_T T_m. \quad (11)$$

多个激光雷达脉冲回波相叠加的过程称为激光雷达的脉冲积累。脉冲积累分为相干积累和非相干积累两类,激光雷达的脉冲积累过程是非相干的^[14]。激光雷达回波在积累的过程中,由于信号之间具有时间相关性,目标处的回波强度、幅度都会有较为明显的改善,这使得系统的信噪比会有所提高,称之为系统信噪比积累改善因子 $I(n_p)$ 。Peebles^[15]提出了下面一个根据经验推导的改善因子的表达式,其精度在 0.8 dB 之内:

$$I(n_p) = 6.79(1 + 0.235P_D) \left[1 + \frac{\lg(1/P_{fa})}{46.6} \right] \lg n_p [1 - 0.140 \lg n_p + 0.018310(\lg n_p)^2]. \quad (12)$$

多脉冲回波积累的过程中,由于噪声的随机性,极少数相关噪声信号也会部分积累,进而会出现 SNR 的下降,称为多脉冲回波积累损失。它在一定程度上限制了改善因子,下面给出了脉冲积累改善因子和脉冲积累损失 L 之间的关系:

$$L = n_p / I(n_p). \quad (13)$$

基于以上的分析,编写了基于多脉冲积累下的激光雷达系统信噪比方程分析函数 lidar_eq,仿真中的 APD 阵列采用德国 Silicon Sensor 公司的 MOD501306 系列,室温 23 °C 下,增益 $M=100$ 时,最小量子效率 $\eta=80\%$ ($\lambda=905$ nm),每个像元的暗电流为 0.6 nA,灵敏度为 60 A/W。目标为视野内 500 m 处一粗糙平面,其表面粗糙度 $R_a > 1.6 \mu\text{m}$ (目测),仿真实物模型如图 4 所示。在 Matlab 运行环境下实现了信噪比的仿真分析,得到了脉冲积累下信噪比明显改善的结果。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

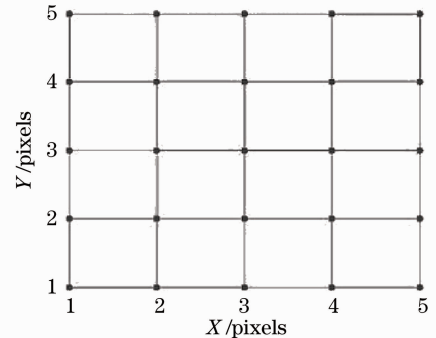


图 4 APD 阵列像素在仿真目标上的分布

Fig. 4 Distribution of pixels of APD arrays on the simulation target

Parameters	Values	Parameters	Values
laser wavelength	905 nm	APD pixels	5×5
transmittance of emission system	0.8	instantaneous field of view	55 μrad
transmittance of receiving system	0.85	detector gain	100
scattering coefficient	0.992	unit-area dark current	0.6 nA
scattering-extinction coefficient ratio	0.0545	effective area of detector	205×205 μm ²
air-quality extinction coefficient	0.74 km ⁻¹	detection range	500 m
detector of quantum efficiency	85%	pulse energy	350 μJ

单脉冲下激光雷达信噪比仿真结果如图 5 所示。30 个、50 个、100 个脉冲积累下激光雷达信噪比仿真结果分别如图 6、图 7、图 8 所示。

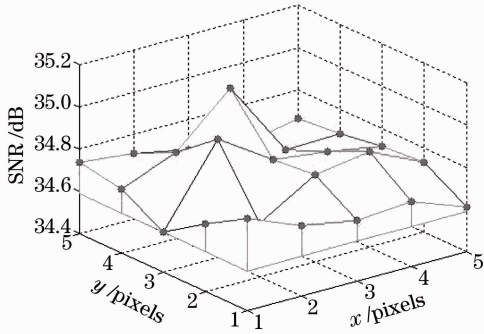


图 5 单个脉冲 SNR 分布

Fig. 5 Distribution of SNR under single pulse

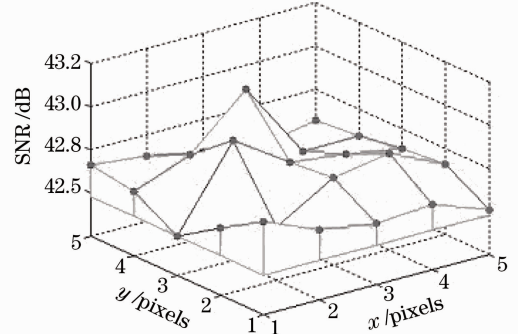


图 6 30 个脉冲积累 SNR 分布

Fig. 6 Distribution of accumulated SNR under 30 pulses

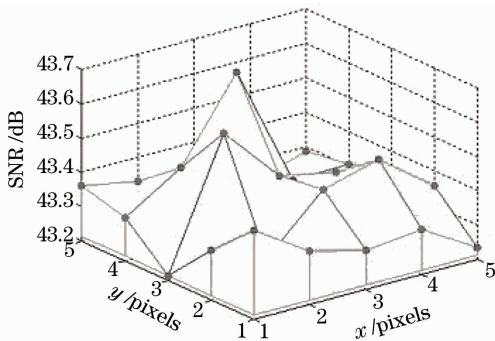


图 7 50 个脉冲积累 SNR 分布

Fig. 7 Distribution of accumulated SNR under 50 pulses

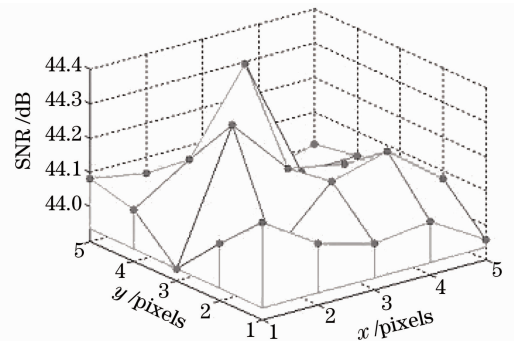


图 8 100 个脉冲积累 SNR 分布

Fig. 8 Distribution of accumulated SNR under 100 pulses

以上分别给出了不同积累脉冲数目下的信噪比 SNR 分布图,通过比较分析可以看出:随着脉冲积累数目的增加,信噪比 SNR 有较大改善。积累的脉冲数目较小时,信噪比 SNR 的改善效果较为明显,随着脉冲积累数目的增多,信噪比 SNR 的改善效果开始变得缓慢起来。其中,30 个脉冲积累与单个脉冲比较,信噪比提高了 6.99 dB;50 个脉冲积累与单个脉冲比较,信噪比提高了 8.62 dB;100 个脉冲积累与单个脉冲比较,信噪比提高了 9.35 dB。下面给出了信噪比相对于脉冲积累数目变化的曲线图,如图 9 所示。

通过对图 9 的分析,可以得出这样的结论:多脉冲积累探测能够在一定的脉冲积累数目下有效地提高信噪比,但是信噪比并不会因脉冲积累数目的增多而无限地增加,积累数目较小时,SNR 提高的幅度较大,随着脉冲积累数目的增多,测量时间加长,由于极少数相关噪声的部分叠加结果的累积,信噪比的脉冲积累改善和脉冲积累损失同时会随脉冲积累数目的增多而增加,最后致使信噪比提高的幅度不明显。

4 结 论

本文运用信号相关检测方面的理论对非扫描激光雷达系统的信噪比进行了分析。在多脉冲积累分析方面,引入了 Peebles 给出的脉冲积累改善因子理论,这在信噪比仿真实验方面得到了体现。在综合考虑系统噪声的基础上,基于德国 Silicon Sensor 公司的一款 5×5 系列 APD 阵列性能参数,对系统信噪比进行了仿

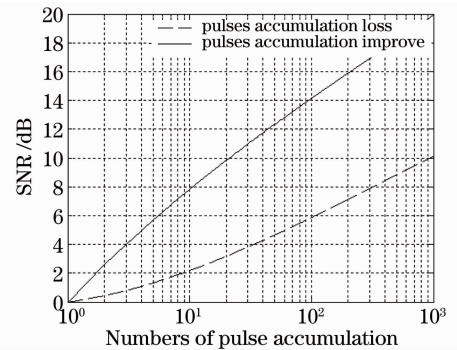


图 9 信噪比—脉冲积累数变化曲线

Fig. 9 SNR versus numbers of pulse accumulation

真分析。仿真数据结果表明,100个脉冲积累数目下,信噪比提高了9.35 dB,之后随脉冲积累数目的增多,信噪比提高幅度不明显。今后的重点工作是结合实验系统,根据具体的实验数据进一步分析多脉冲积累下的激光雷达系统信噪比。

参 考 文 献

- 1 Li Ziqin, Li Jinxin, Wang Qi. Suppressed algorithm of lidar's range image background[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1469~1472
李自勤, 李金新, 王 骐. 激光雷达距离像背景抑制算法研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1469~1472
- 2 Li Fan, Wu Shuangyang, Yang Hongguo *et al.*. Multi-element array detecting technology of Ladar[J]. *Infrared & Laser Engng.*, 2009, **38**(2): 0295~0299
李 番, 邬双阳, 杨红果 等. 激光雷达多元阵列探测技术[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(2): 0295~0299
- 3 Michael E, O' Brien, Daniel G. Fouche. Simulation of 3D laser radar systems[J]. *Lincoln Lab. J.*, 2005, **15**(1): 37~60
- 4 Ni Shuxin. Review on development of the new image laser radar systems[J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(s): 732~736
倪树新. 新体制成像激光雷达发展评述[J]. 激光与红外, 2006, **36**(s): 732~736
- 5 Li Qi, Chi Xin. Principle and technology of 3D ladar on a single pulse using Geiger-mode APD arrays[J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(12): 1116~1119
李 琦, 迟 欣. 基于盖革模式 APD 阵列的单脉冲 3D 激光雷达原理和技术[J]. 激光与红外, 2006, **36**(12): 1116~1119
- 6 Dai Yongjiang. The Principle of Lidar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 28~30
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 28~30
- 7 Zhang Yong, Zhao Yuan, Liu Liping *et al.*. Range resolution improvement of scannerless laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1270~1274
张 勇, 赵 远, 刘丽萍 等. 一种提高非扫描激光雷达距离分辨率的方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1270~1274
- 8 Robert J. Grasso, George F. Dippel, Leonard E. Russo. A model and simulation to predict 3D imaging ladar sensor systems performance in real-world type environment[C]. *SPIE*, 2006, **6303**: 1~12
- 9 Ren Ximing, Li Li, Yang Dongbin. SNR analysis of 3D imaging Ladar based on APD arrays[J]. *Laser and Infrared*, 2010, **40**(2): 132~135
任熙明, 李 丽, 鄢冬斌. 基于 APD 阵列三维成像激光雷达信噪比分析[J]. 激光与红外, 2010, **40**(2): 132~135
- 10 Zhang Mingyou, Lü Ming. Signal Detection and Estimate[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 176~180
张明友, 吕 明. 信号检测与估计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 176~180
- 11 Liu Jun, Zhang Binzhen. Weak Signal Detection Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 40~79
刘 俊, 张斌珍. 微弱信号检测技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 40~79
- 12 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Photoelectric Statistical Theory and Technology[M]. Beijing: Beijing Insitute of Techonlogy Press, 1989. 294~432
周仁忠, 阎吉祥. 光电统计理论与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989. 294~432
- 13 Zhang Yu, Zhao Yuan, Yang Yong *et al.*. Computer simulation and experiments for laser multi-pulse detection[J]. *Infrared & Laser Engng.*, 2007, **36**(1): 60~63
张 宇, 赵 远, 杨 勇 等. 激光多脉冲探测的计算机模拟与实验研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(1): 60~63
- 14 Shen Liping, Li Changchun, Yin Shenyan. Employing pulse accumulation method to improve the ranging perform ance of anticollision radar[J]. *J. Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2006, **29**(4): 29~32
申利平, 李昌春, 尹申燕. 采用脉冲积累方式提高防撞雷达探测性能[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, **29**(4): 29~32
- 15 Bassem R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni. MATLAB Simulations for Radar Systems Design[M]. Zhu Guofu, Huang Xiaotao, Li Xiangyang *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. 58~61
Bassem R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni. 雷达系统设计 MATLAB 仿真[M]. 朱国富, 黄晓涛, 黎向阳 等译. 电子工业出版社, 2009. 58~61