

基于盖革模式 APD 的啁啾调幅激光雷达分析

方照勋, 张 华, 刘鹏鹏, 李海廷, 路英宾, 高剑波, 陈德章, 卿光弼
(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:针对基于 Gm-APD 的光子计数啁啾调幅雷达, 介绍了 FM-CW 测距原理和光子计数啁啾调幅原理。以分析单个 Gm-APD 像元产生的初级光电子和暗计数噪声为基础, 对回波光信号的探测还原进行了研究和仿真, 并对影响系统性能的关键参数进行了仿真评估。仿真结果表明, 对于本文设计的系统, 探测 2 km 远目标的最小发射功率为 6.4 W; 中频信号的幅度随 Gm-APD 整形脉冲的脉宽增加而增加, 中频信号的信噪比则随 Gm-APD 整形脉冲的脉宽增加而减小。另外, 系统还具有良好的调制失真抑制能力和多目标分辨能力。

关键词:三维成像; 激光雷达; 盖革模式; 光子计数; 调频连续波; 中频信号

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.06.005

Analysis of chirped AM ladar based on Geiger-mode APD

FANG Zhao-xun, ZHANG Hua, LIU Peng-peng, LI Hai-ting, LU Ying-bin
GAO Jian-bo, CHEN De-zhang, QING Guang-bi
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The operating principle and simulation results for the photon counting chirped amplitude modulation (AM) ladar using Geiger Mode avalanche photodiode (Gm-APD) detector are introduced. The key parameters of the system and the recovery of the modulating signal are studied and simulated. The simulation result shows that, for our system to detect a 2 km target, the minimal emitting optical power is 6.4 W. It also shows that the wider the pulse width outputted by the Gm-APD is, the smaller the IF signal is, which is opposite to the SNR. On the other hand, the photon-counting chirp AM ladar has a good ability to control the modulating distortion and distinguish multi-target.

Key words: 3D imaging; ladar; Geiger mode; photon counting; FM-CW; IF signal

1 引 言

近年来, 三维激光成像雷达处于高速发展当中, 对探测距离、成像帧率和图像精细度的要求也不断提高, 这就要求激光器的输出功率和重复频率随之增长。但提高激光器脉冲能量和重复频率的代价非常大; 另外, 受限于系统体积和质量限制, 接收光学系统口径不可能无限增大。因此, 基于 Gm-APD 的三维激光成像雷达已经成为三维激光成像雷达领域一个重要研究方向^[1-3]。

基于 Gm-APD 的啁啾调幅(chirped AM)激光雷达基本原理来自微波段的调频连续波(FM-CW)雷

达, 将 FM-CW 调频测距原理巧妙移植到激光雷达中。虽然 Gm-APD 输出的信号是与光强不成比例的计数脉冲, 但由于探测器上光子的平均到达率正比于光强, 可以通过测量光子平均时间间隔而还原出调幅波形。因此, 如果把 Gm-APD 应用于啁啾调幅雷达, 将能有效发挥 Gm-APD 的高探测灵敏度的优势, 大大降低激光器发射能量, 增加雷达的作用距离, 减小发射光学系统的天线口径, 使系统更加小型

作者简介:方照勋(1986-), 男, 在读硕士, 主要从事激光雷达发射端射频信号源及激光雷达信号处理方面的研究。E-mail: fzx1018@163.com

收稿日期:2011-12-22; **修订日期:**2012-01-14

化和稳定。鉴于 Gm-APD 应用于啁啾调幅雷达有着与传统线性探测器完全不同的探测理论, 本文将对基于 Gm-APD 的激光调幅雷达的探测理论和探测性能进行分析, 并对系统关键参数的设计进行了评估和仿真。

2 基本原理

基于 Gm-APD 的啁啾调幅雷达基本原理框图如图 1 所示, 首先由处理器控制程序向啁啾控制器和 AD 转换器发出开始命令, 啁啾控制器接收到开始命令后控制啁啾信号发生器产生两路啁啾信号, 一路信号作为调制信号对发射激光进行幅度调制, 另一路作为本振信号加载在混频器上。接收光学系统捕获目标反射回波后, 经过窄带滤光片后聚焦在 Gm-APD 阵列上, Gm-APD 输出脉冲经过整形后与本征信号混频, 混频输出信号经过低通滤波、放大、采样后送入处理器进行处理。

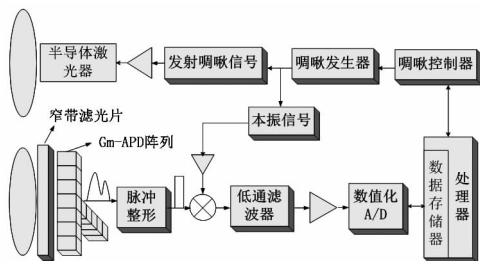


图 1 基于 Gm-APD 的光子计数啁啾调幅雷达原理框图

Fig. 1 photon counting chirped AM radar block diagram

2.1 FM-CW 原理

啁啾调幅激光雷达原理来源于微波段的 FM-CW 雷达, 在光波段, 啁啾调幅激光雷达用啁啾信号对发射激光进行幅度调制 (或称强度调制), 即载波调幅, 副载波调频。图 2 表示 FM-CW 原理的微波或激光雷达的发射和接收信号, 实线部分表示发射啁啾信号 (同样作为本振信号), 虚线部分表示经距离为 R 的目标反射后, 被探测器接收到的啁啾信号。接收信号与发射信号相比, 由于大气往返传输, 接收信号比发射信号延迟了 $\tau = 2R/c$; 另一方面, 对于相对于雷达在径向上有运动的目标, 接收到的啁啾信号频率还会产生一个多普勒频率漂移。从图 1 中可以看到, 任意时刻发射啁啾信号和接收啁啾信号都不相同, 但是如果对二者进行混频, 那么乘积的结果将产生一个拍频信号, 而雷达理论里通常把这个拍频信号叫做中频信号 (intermediate frequency, IF), 在激光调幅雷达中, 中频信号通常在 1 MHz 以下。

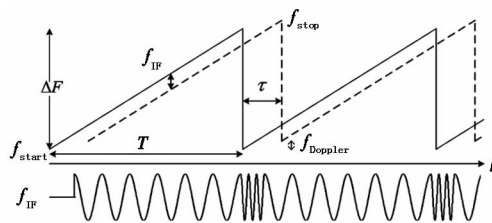


图 2 锯齿波啁啾调制 FM-CW 微波雷达或啁啾调幅激光雷达的发射和接收信号

Fig. 2 transmitted and received signal for the FM-CW radar or chirped AM radar with a sawtooth chirp

对于静止目标, 中频信号 f_{IF} 的频率可以由式 (1) 所示:

$$f_{IF} = \tau \frac{\Delta F}{T} = \frac{2R\Delta F}{cT} \quad (1)$$

其中, 调制带宽 ΔF :

$$\Delta F = f_{stop} - f_{start} \quad (2)$$

方程 (1) 给出了中频信号频率值和目标距离的关系, 因此, 只要获得中频信号的频率值, 就可以计算出目标的距离。如果对 n 个啁啾周期 nT 时间范围内的中频信号进行快速傅里叶变换 (FFT), 那么将可以方便地获得中频信号频率, 变换的频率分辨率为 $1/T$, 相应的距离分辨率:

$$\Delta R = \frac{c}{2n\Delta F} \quad (3)$$

对于运动目标, 中频信号可以表达为:

$$f_{IF} = \tau \frac{\Delta F}{T} \pm f_{Doppler} \quad (4)$$

其中, 多普勒频偏 $f_{Doppler}$ 可以表示为:

$$f_{Doppler} = \frac{2\nu f_{center}}{c} = \frac{2\nu}{c} (f_{start} + \Delta F/2) \quad (5)$$

显然, 这种情况下只对一个啁啾周期进行 FFT 将无法分离出中频信号频率和多普勒频偏。实际上, 相邻啁啾周期的中频信号 FFT 变换结果幅度虽然大致相同, 但他们的相位由于多普勒频偏的因素会有所改变, 即在复平面上, 中频信号的复矢量在以多普勒频率进行旋转^[4-7]。要分离出中频信号频率和多普勒频率, 可以对多个啁啾周期的 FFT 结果进行第二次 FFT 运算, 从而得到中频信号频率和多普勒频率的二维幅度谱, 这种算法通常称为距离-多普勒匹配算法^[4-7]。

2.2 光子计数幅度调制原理

从量子理论来看, 光是连续的光子流, 光强反映单位时间内, 光子流中光子数的统计平均值, 即相邻光子间的平均时间间隔越小, 光的强度越大。因此, 对光强或光功率的调制实际上是对相邻光子间

平均时间间隔的调制^[8],如图 3 所示对光强的正弦调制,图中正弦曲线表示调制后的光强,相应的光子流分布由下部疏密不一的短直线表示。



图 3 正弦调制光子随机到达图样

Fig. 3 random photon arrival pattern for sinusoidal modulating

由于 Gm-APD 输出脉冲的上升沿非常快,通常在 100 ps 量级,从而使 Gm-APD 能对光子到达时间进行比较精确的探测,从而表征相邻光子的时间间隔。因此,Gm-APD 虽然输出的是一系列数字脉冲信号,但是在这些脉冲序列中仍然包含了调制信号的频谱分量。

3 信号模型

3.1 雷达方程

如图 4 所示,调幅激光照射成像区域,目标视场区域反射回波被光学天线捕获。捕获的能量最终照射在 Gm-APD 面阵上,每个 Gm-APD 像元测出激光脉冲的往返时间,换算出所对应的距离后即可得到目标区域的三维图像。

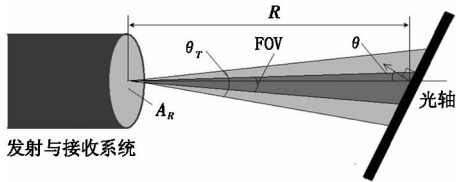


图 4 激光雷达方程模型

Fig. 4 ladar equation model

根据激光雷达距离方程,得到每个 Gm-APD 像元所产生的信号初始光电子 (Primary Electron) 数为:

$$r_{\text{laser}}(t) = E_{\text{emit}}(t - \tau_{\text{target}}) \cdot \frac{\text{FOV}^2}{\theta_T^2} \frac{\rho}{\pi} \cos\theta \frac{A_R}{R^2} \cdot$$

$$\eta_T \eta_R \eta_A \eta_q F_{\text{f-f}} / (h\nu) \quad (6)$$

式中, R 是目标距离; c 是光速; FOV 是单个像素接收视场; θ_T 是发射激光束散角; θ 是光轴与目标表面法线的夹角; ρ 是目标反射率; A_R 是接收系统孔径; η_T 是发射光学系统的透过率; η_R 是接收光学系统透过率; η_A 是大气的单程衰减系数; η_q 是探测器量子效率; $F_{\text{f-f}}$ 是为透镜阵列的等效填充因数。本文分析选取探测器阵列像素 128×128 , 波长 $1.55 \mu\text{m}$, 微透镜阵列等效填充效率为 90%, 其他主要仿真参数

$A_R = 100 \text{ mm}$, $\rho = 0.4$, $\eta_T = 70\%$, $\eta_R = 60\%$, $\eta_q = 35\%$, 大气能见度 20 km, 目标距离 500 m ~ 2 km, 低通滤波器截止频率为 150 kHz, 探测目标大小为 $16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$, 阳光光谱辐照度为 $150 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$, 啁啾起止频率为 10 MHz 和 110 MHz, 啁啾周期为 10 ms, 每帧图像取 4 个啁啾周期进行 FFT, 即 $n = 4$, 对应的测距误差为 0.375 m, 成像帧率为 25 Hz。

噪声信号一般由四个部分组成: 阳光辐射、大气后向散射、被探测目标的黑体辐射和探测器的暗计数^[9], 这四种噪声都能激发初始光电子, 产生速率分别为 r_{sun} , r_{bs} , r_{bb} 和 f_{dark} 。设计良好的主动淬灭 Gm-APD 在近红外波段的暗计数率一般在几十千赫兹, 本文取 60 kHz。在距离选通带宽内, 四种噪声中主要阳光光子噪声占绝对主导地位。

3.2 光子分布函数

研究表明^[10-12], 以上四种初始光电子通常情况下都服从泊松分布, 其产生过程是泊松随机过程。对于泊松随机过程, t_1 到 t_2 时间间隔内, 事件发生 m 次的概率为:

$$P(m; t_1, t_2) = \frac{1}{m!} [M(t_1, t_2)]^m \exp[-M(t_1, t_2)] \quad (7)$$

其中:

$$M(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} r(t) dt \quad (8)$$

是该过程的均值函数^[11], 在本文讨论中, 事件就是指初始光电子的产生, 而 $M(t_1, t_2)$ 则表示 t_1 到 t_2 时间间隔内, 产生的平均初始光电子数。因此, 对基于 Gm-APD 的激光调幅雷达, 可以选择合适的时间步长 ($t_2 - t_1$), 结合式 (6) ~ 式 (8) 可以对 Gm-APD 探测输出的信号进行仿真, 后文仿真分析所用的探测信号都是基于这种方法得到的。

3.3 光子计数探测频谱分析

为了更好地说明基于 Gm-APD 的光子计数探测如何还原目标反射的啁啾调幅光强信号, 本文对 Gm-APD 探测到的 10 ms, 100 MHz 的正弦调幅光强信号进行傅里叶频谱分析, 其归一化的频谱如图 5 所示。其中光强调制深度为 100%, Gm-APD 探测到的光子为 1029 个, 即输出脉冲为 1029, FFT 运算采样间隔 (亦即仿真步长) 1 ns, Gm-APD 整形输出脉宽 1 ns。从图 5 可见, 直流成分的幅度最大, 由于 Gm-APD 整形脉冲比较窄, 频谱很宽, 存在大量的杂散频率, 但是在 100 MHz 处仍然有着极强的频率分量。

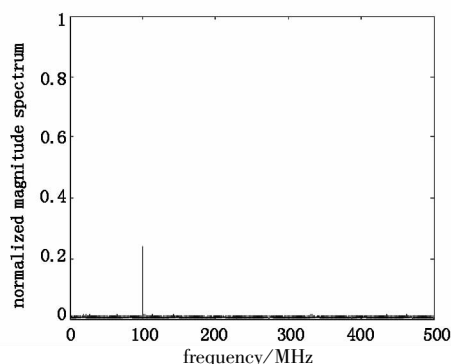


图5 100 MHz 正弦光强回波信号的归一化频谱图
Fig.5 normalized magnitude spectrum for the 100 MHz modulated sinusoidal intensity echo

对于啁啾调制的光信号, Gm-APD 探测输出的信号频谱比较复杂,但在基于 Gm-APD 的啁啾调幅雷达中,只有啁啾频率分量才与同样为啁啾信号的本振信号相位上有相关关系,从而在混频后得到频率稳定的中频信号。另一方面,由于在混频后要经过低通滤波器(LPF)滤波,杂散频率分量与本振信号混频后的信号频率绝大部分都远远大于滤波器截止频率,所以 Gm-APD 输出的探测脉冲频谱中,最终只有啁啾频率分量附近很窄频率带宽内的频率分量起作用,从而获得很高的信噪比。

4 系统关键参数分析

如图 1 所示,该雷达系统性能受到多方面因素影响,主要包括 Gm-APD 输出脉冲宽度、激光光强啁啾调制的失真等。对于激光雷达系统,激光发射功率是其一个重要系统指标,直接关系到系统体积以及实现难度,另外,对多目标的分辨能力也是衡量激光成像雷达性能的重要参数。

4.1 最小发射功率

为了保证系统的稳定,考虑系统运行在极端噪声条件下(阳光直射目标等),目标位于 2 km 处,IF 信号频率选通范围 30 ~ 140 kHz,发射功率为 6.4 W 时仿真结果如图 6 所示,仿真时长为 4 个啁啾周期。

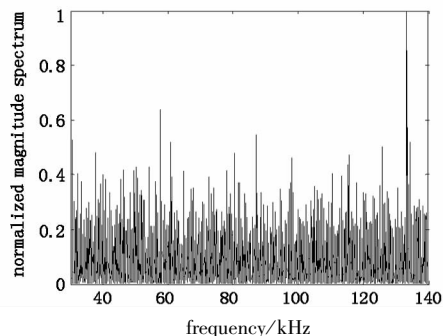


图6 发射功率为 6.4 W 时的中频信号归一化幅度谱
Fig.6 IF signal's normalized magnitude spectrum for the 6.4 W emitting power

计算结果表明,图 6 中最大频率分量为 133.325 kHz,对应的距离为 1999.9 m,在测距误差范围内。另外,图 6 的频谱分布中,噪声频率成分的幅度比较大,信噪比基本达到极限,为 11.04 dB。因此,可以认定系统的最小发射激光功率为 6.4 W。

4.2 Gm-APD 计数脉冲最佳宽度

Gm-APD 输出脉冲经过整形后变成宽度、幅度都相等的计数脉冲。很明显,如果整形后光子计数脉冲宽度过宽会引起对光子到达时间的计时不准从而导致中频信号杂散频率增大;过窄会导致中频信号幅度减小,并可能淹没在噪声当中。图 7 表示在极端噪声条件下,探测 2 km 处目标所需要的发射功率。图 8 所示为 IF 信噪比随脉冲宽度的变化。

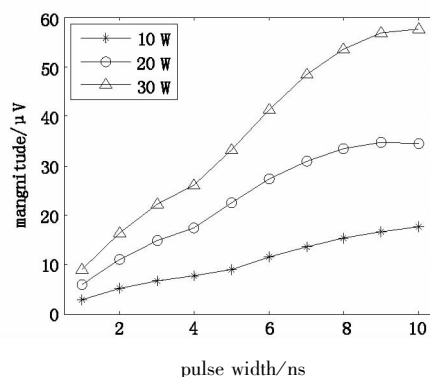


图7 IF 幅度随脉冲宽度的变化
Fig.7 IF signal's amplitude vs. pulse width

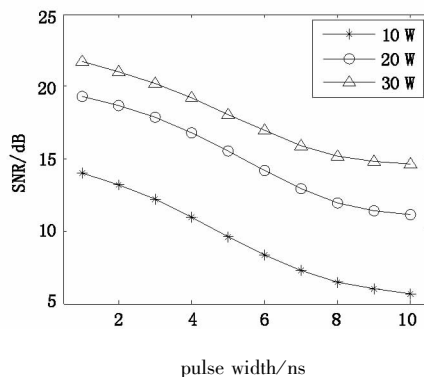


图8 IF 信噪比随脉冲宽度的变化
Fig.8 IF signal's SNR vs. pulse width

从图 7 和图 8 中可见,在同样信噪比条件下,中频信号幅度随着 Gm-APD 整形脉冲的宽度增加而增加,信噪比随着 Gm-APD 整形脉冲的宽度增加而降低,加大激光器发射功率有助于中频信号幅度和信噪比的改善。所以,在设计信号处理电路时,应该根据放大器等效输入噪声水平,兼顾中频信号幅度和信噪比两方面因素选择 Gm-APD 整形脉冲宽度。

4.3 调制失真的影响

在采用传统的线性探测器的啁啾调幅雷达中,对多个啁啾周期进行 FFT 计算时,调制失真会导致中频信号出现劈裂现象——即在中频信号幅度谱中正确中频信号前后出现等频率间隔的频率分量。劈裂的频率间隔基本等于啁啾周期的倒数,其幅度有时甚至比正确的中频信号频率幅度值还大,并且加大发射光功率对分裂的频谱几乎没有改善。可见,调制失真严重降低了中频信号分辨率,并很可能导致对目标的速度测量出现错误。针对调制失真,本文针对 3 dB 调制带宽为 ΔF (即 f_{stop} 频率处光强幅值为 f_{start} 处的一半,本文为 100 MHz) 的发射光信号进行了多次仿真,典型结果如图 9 所示。

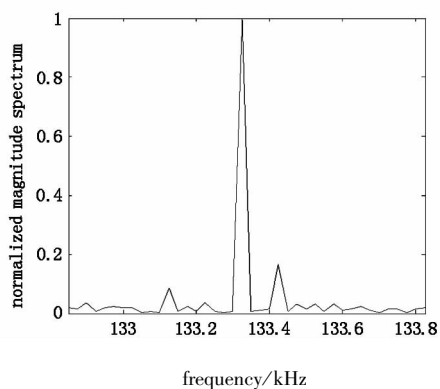


图 9 调制失真下的中频信号幅度谱
Fig. 9 magnitude spectrum for the IF signal with modulating distortion

图像表明,中频信号也存在少量的劈裂的频谱,但其幅度比中频信号的幅度要小得多,不足其 20%。因此,基于 Gm-APD 的光子计数啁啾调幅技术对调制失真有很强的抑制作用,能适应相对复杂的大气环境。

4.4 多目标识别

对于实际应用场景,在探测目标轮廓边缘,或未被完全遮盖隐藏的目标(如被植物遮挡的目标),对应的像素往往会探测到两个或两个以上目标。因此,能否对多个目标进行分辨也是衡量激光成像雷达性能的重要指标。图 10 为极限噪声条件下对 2 km 处以径向速度 100 m/s 远离雷达运动的目标、1.5 km 外以径向速度 50 m/s 靠近雷达运动的目标、1 km 处以径向速度 50 m/s 远离雷达运动的目标探测的仿真结果。

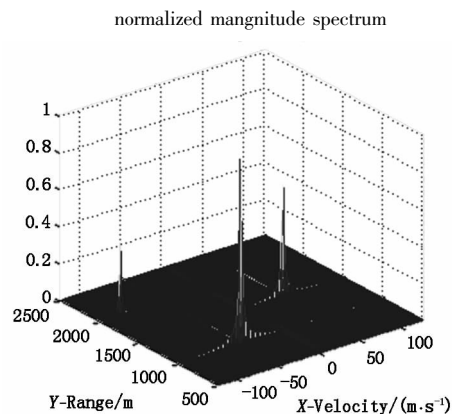


图 10 多目标探测结果

Fig. 10 the result of multi-target detection

从图 10 中看出,基于 Gm-APD 的光子计数啁啾调幅技术清晰地分辨出了三个不同距离、不同速度、不同运动方向的目标。因此,基于 Gm-APD 的光子计数啁啾调幅雷达具备良好的多目标分辨能力。

5 总结

本文介绍了基于 Gm-APD 的啁啾调幅雷达基本测距原理,阐释了光子极限探测下的光子计数啁啾调幅理论,对系统设计作了简要说明,并对影响系统性能的关键参数进行了模拟评估。仿真结果表明,在极端噪声环境下,基于 1550 nm 工作波长的 Gm-APD 啁啾调幅雷达对两公里外目标,要获得 128×128 分辨率的 3 D 图像只需要 6.4 W 的发射功率;雷达中频信号幅度随着 Gm-APD 整形脉冲的宽度增加而增加,信噪比随着 Gm-APD 整形脉冲的宽度增加而降低;另外,基于 Gm-APD 的啁啾调幅雷达具有良好的调制失真抑制能力和多目标分辨能力。

基于 Gm-APD 的光子计数啁啾调幅雷达基本原理与传统 FM-CW 原理的激光雷达相同,但是其基于光子极限探测的特点使其有了新的特性,比如发射功率小、调制失真抑制能力强,从而整个系统更易于集成化和小型化,在近距离应用上有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Steben Johnson, Philip Gatt, Terry Nichols. Photon counting imaging: the digital APD [J]. SPIE, 2006, (1): 60680D-10.
- [2] Philip Gatt, Steven Johnson, Terry Nichols. Dead-time effects on geiger-mode APD performance[J]. SPIE, 2007,

- 6550:65500I.
- [3] Ivelin Bakalski, Joao Pereira Do Carmo, Stephen Bellis, et al. Real time processing enables fast 3D imaging at single photon level[J]. SPIE, 2008, 6950:69500K.
- [4] Min Seokoh, Hong Jinkong. An improvement on accuracy of laser radar using a Geiger-mode avalanche photodiode by time-of-flight analysis with poisson statistics [J]. SPIE, 2010, 7684:76841I.
- [5] Brian C Redman, William C Ruff, Keith Aliberti. Direct detection laser vibrometry with an amplitude modulated ladar[J]. SPIE, 2004, 5412:218 – 228.
- [6] Brian C Redman, Barry Stann, William Ruff, et al. Anti-ship missile tracking with a chirped amplitude modulation ladar[J]. SPIE, 2004, 5413:113 – 124.
- [7] W Ruff, K Aliberti, M Giza, et al. Translational doppler detection using detect chirped amplitude-modulated laser radar[J]. SPIE, 2004, 43(4):358 – 363.
- [8] Drain L E. The laser doppler technique[M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [9] B Gallardo-Hernando, J M Munoz-Ferreras, F Perez-Martinez, et al. Performance evaluation for imaging flaser radars with focal plane array[C]. IET International Conference on Radar Systems, 2007:15 – 18.
- [10] J W Goodman. Statistical optics [M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
J W 顾德门. 统计光学[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [11] Fouche D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. Appl. Optics, 2003, 42(27):5388 – 5398.
- [12] Liu Cihua. Stochastic processes [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2008. (in Chinese)
刘次华. 随机过程[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2008.