

文章编号: 0253-2239(2010)01-0091-06

# 光子图像中基于广义似然比检验的目标探测方法

赵磊 俞信 陈翼男 阎吉祥

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 在光子噪声受限条件下的图像中,其信号和噪声均服从泊松分布并呈现散粒状态,且由于该图像信噪比较低,目标难以被探测和识别,为此提出一种基于统计理论和广义似然比检验(GLRT)的目标探测方法来解决该条件下的目标探测问题。该方法在仅有目标物灰度图像已知的情况下,使用泊松分布概率函数和广义似然比检验方法得到统计判决公式,通过该公式计算原始图像中各个位置的检验器值,对光子图像进行目标探测。仿真和实验结果表明,该方法具有较好的目标探测性能,验证了算法的有效性和实用性。

**关键词** 图像处理;统计理论;广义似然比检验;目标探测;泊松分布

中图分类号 TP751 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0091

## Object Detection Method Based on Generalized Likelihood Ratio Tests Method in Photon Images

Zhao Lei Yu Xin Chen Yi'nan Yan Jixiang

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** An object detection method based on statistical theory and generalized likelihood ratio tests (GLRT) method is proposed to solve the object detection problem under photon noise limited condition. The object under photon noise limited condition follows Poisson distribution and present particle states. And the signal-to-noise ratio (SNR) of the image is low, so it is hard to detect and identify. Statistical decision formula has been obtained by Poisson distribution probability function and GLRT method under the known grey level image of object. Object detection is determined after the calculation of GLRT value. Simulations and experiments show that the method has good object detection performance, and the results also verify the effectiveness and practicability of the method.

**Key words** image processing; statistical theory; generalized likelihood ratio tests; object detection; Poisson distribution

### 1 引 言

目标探测在天文观测、军事侦察、运动估计和工业检查中是一项十分重要的任务。在光子噪声受限水平条件下的目标探测方法与以往的探测方法有较大差异,该方法要求在图像分布随机性更大和噪声统计分布特性更加复杂的环境下提取目标,该研究成为了目标探测领域的前沿问题。光子噪声受限条件下的极微弱光图像(即光子图像)不同于以往的灰度图像,这种图像为多个离散的光点状图形。该离散点状图像由于光子噪声受限,在空间上呈现无规则亮点且

图像信噪比(SNR)较低,所以传统的图像探测和处理算法无法对该类图像进行目标探测与处理。

近年来,许多专家和学者针对该问题进行了研究。这些研究大都通过利用光子图像中信号区域和噪声区域的统计分布不同来区分两种区域,这种方法将原图像划分了许多区域,还原后图像无法达到原分辨率<sup>[1~3]</sup>;还有利用传统目标探测方法<sup>[4~11]</sup>来应用到光子图像中的,但是算法探测性能有待提高。本文主要研究在光子图像中目标探测的一种统计处理方法。该方法利用散粒状光子图像在空间上服从

收稿日期: 2009-02-26; 收到修改稿日期: 2009-03-23

作者简介: 赵磊(1982—),男,博士研究生,主要从事光电成像方面的研究。E-mail: zhaolei@bit.edu.cn

导师简介: 俞信(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事自适应光学、微光探测与光电成像方面的研究。

E-mail: yuxin@bit.edu.cn

泊松分布的特点,利用统计处理中广义似然比检验(GLRT)的基本方法推导出目标探测的判决公式。通过使用该判决公式遍历整幅光子图像,判决是否存在目标物,并判定出目标物的空间位置。

## 2 光子图像目标探测问题数学建模

在光子噪声受限条件下,信号光子和噪声光子在空间分布上服从泊松分布<sup>[12,13]</sup>,目标和背景在图像中呈散粒图像,本文提出针对上述问题采用基于GLRT统计处理方法,解决了在未知噪声具体的统计参数时,光子噪声受限条件下的目标探测问题。

建立光子受限条件下目标探测的数学模型,当图像中没有目标存在时,图像中只有噪声;而当有目标存在时,假设图像中只含有图像。则对上述观点提出假设  $H_0$  和假设  $H_1$

$$\begin{cases} H_0 : \mathbf{g} = \mathbf{b} \\ H_1 : \mathbf{g} = \mathbf{f} \end{cases}, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{f}$  表示具有先验知识的目标物体,  $\mathbf{b}$  表示背景噪声,  $\mathbf{g}$  表示独立泊松随机过程。GLRT 所需要的概率分布函数是

$$\begin{cases} p(\mathbf{g} | H_0) = \prod_{i=0}^{N-1} \frac{\exp(-E[b_i])(E[b_i])^{g_i}}{g_i!} \\ p(\mathbf{g} | H_1) = \prod_{i=0}^{N-1} \frac{\exp(-a_i f_i)(a_i f_i)^{g_i}}{g_i!} \end{cases}, \quad (2)$$

其中  $E[b_i]$  表示待测样本背景噪声的数学期望;  $a_i$  表示信号区域中各点的数值系数。

传统的似然比检验方法<sup>[14]</sup>在有噪声条件下,对目标位置有先验知识且噪声的统计特性参数已知条件下的目标探测有很好的效果,由于其使得似然比最大化,是一种优化的目标探测方法。这种方法通过选择不同假设,使得该假设条件下具有更高的条件概率密度值来使得似然比最大化。但是这种方法要求在假设的条件概率密度函数中不能具有未知量,从而可以直接计算检验器结果。而在实际工程应用过程中,目标物在图像中的空间位置和噪声的统计特性参数均未知,且目标物空间位置和噪声统计特性参数是在实时变化的,故这种方法无法使用。这就需要研究一种对条件概率密度函数中目标位置和噪声统计参量不敏感的目标探测新方法。在这种情况下,提出了 GLRT 方法。广义似然比检验器<sup>[14]</sup>定义为

$$\Lambda(\mathbf{g}) = \frac{p(\mathbf{g} | H_1; \hat{\theta}_1)}{p(\mathbf{g} | H_0; \hat{\theta}_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} 1, \quad (3)$$

其中  $\hat{\theta}_1$  和  $\hat{\theta}_0$  为未知参量的最大似然估计量,尽管 GLRT 问题没有最优解,但在实际应用过程中取得很好的效果。

在光子噪声受限条件下的目标探测问题中,假设目标的位置和背景噪声参数未知。则在(3)式中,具体的参数为  $\hat{\theta}_0 = (E[\mathbf{b}])$ ,  $\hat{\theta}_1 = \hat{n}_0$ , 其中  $E[\mathbf{b}]$  为背景噪声的数学期望值,  $\hat{n}_0$  表示目标物在待测图像中位置的最大似然估计值。

利用最大似然估计理论来估计目标物在光子受限条件下待测图像中的位置。位置  $n_0$  的最大似然估计量<sup>[15]</sup>定义为

$$\hat{n}_0 = \arg \max_{n_0} p(\mathbf{g} | n_0). \quad (4)$$

假设待测图像中包括在位置  $n_0$  处的目标物和背景噪声,因此图像  $\mathbf{g}$  的条件概率函数可以写作

$$p(\mathbf{g} | n_0) = \prod_{n \in (R_{n_0})} \frac{\exp(-a_i f_i)(a_i f_i)^{g_n}}{g_n!} \times \prod_{n \in (R_{n_0})^c} \frac{\exp(-E[b_n])(E[b_n])^{g_n}}{g_n!}, \quad (5)$$

其中  $R_{n_0}$  是以目标物位置  $n_0$  为中心的信号区域,  $(R_{n_0})^c$  表示  $R_{n_0}$  的补集,在这里表示除了信号区外的背景噪声区。将上式作为假设  $H_{n_0}$  的条件概率函数,利用(3)式并化简得到

$$\Lambda(\mathbf{g} | n_0) = \frac{p(\mathbf{g} | H_{n_0})}{p(\mathbf{g} | H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_{n_0}}{>}} 1. \quad (6)$$

$$\ln[\Lambda(\mathbf{g} | n_0)] = \sum_{n \in (R_{n_0})} \left[ g_n \ln \left( \frac{a_i f_i}{E[b_n]} \right) + E[b_n] - a_i f_i \right] \underset{H_0}{\overset{H_{n_0}}{>}} 0. \quad (7)$$

上述表达式就是在光子受限条件下,目标物在待测图像中位置为  $n_0$  的广义似然比检验器通用表达式。该广义似然比检验器工作时分为两个步骤:1)定位,对图像中以任一位置为中心的各个子模块使用(7)式计算该位置的广义似然比检验器值,直至遍历整幅图像;2)判断,若各个位置的广义似然比检验器值中最大值为正数,表示该位置具有目标物,若为负数,表示判定该图像中不包含目标物。

通过观察(7)式,式中有两个未知参量分别为  $E[b_n]$  和  $a_i$ , 利用(2)式对两个未知参量进行最大似然估计,可得

$$\begin{cases} \hat{E}[b_n] = \frac{1}{R} \sum_{n \in R} g_n \\ \hat{a}_i = \sum_{n \in (R_{n_0})} g_n \phi / \sum_{n \in (R_{n_0})} f_i \end{cases}. \quad (8)$$

最后,给出基于 GLRT 方法在光子受限条件下目标探测方法的步骤如下:

- 1) 利用(8)式计算噪声的数学期望值  $\hat{E}[b_n]$  和数值系数  $\hat{a}_i$ ;
- 2) 利用(7)式计算待测图像中该位置的广义似然比检验器值;
- 3) 判断目标物是否存在;
- 4) 遍历过程中,以广义似然比检验器值的最大值所在位置作为目标物中心的估计位置。

该方法在实际使用过程中,需要已知目标物图像信息,即实际目标物的灰度图像。将该图像作为目标物模板并使用广义似然比检验方法遍历整个待测图像,直至完成目标探测任务并估计了目标物在待测图像中的空间坐标位置。此外,由于单帧图像光子数目很少,往往无法完成目标探测任务,即使探测出目标,其可信度亦较低,无法实际使用。故需要在使用该算法前,对各单帧图像首先进行阈值预处理<sup>[16]</sup>和叠加操作,使叠加后图像经过 GLRT 算法后得到的探测结果具有实际应用价值。

### 3 仿真研究

为了验证算法的有效性,在光子受限条件下对有先验知识目标物探测进行仿真研究。该仿真过程分为两个过程:光子图像产生和目标探测过程。其中光子图像可以采用数值模拟方法<sup>[17]</sup>来生成。

在仿真过程中,已知待测光子图像(假设该图像有  $M \times M$  个像素),已知模板图像(即目标物灰度图像,假设其有  $N \times N$  个像素,  $N < M$ )。由上述给出

的基于广义似然比检验方法在光子噪声受限条件下目标探测方法步骤如图 1 所示。

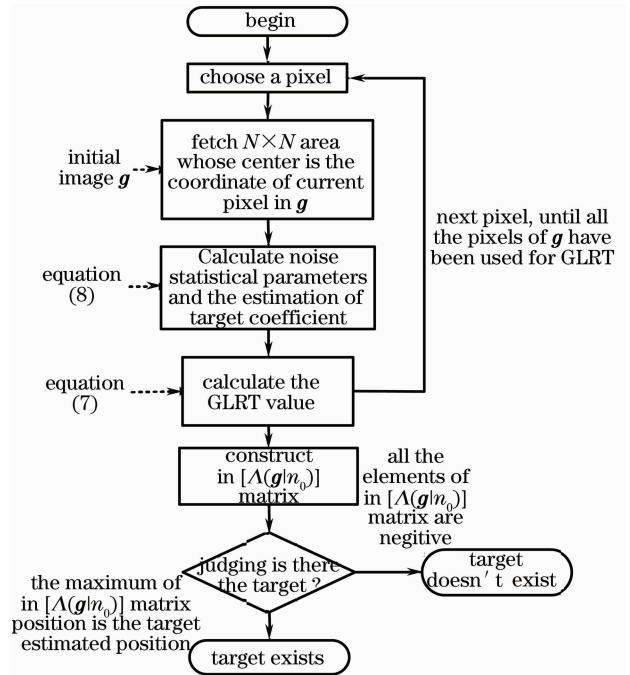


图 1 GLRT 流程图

Fig. 1 Flow chart of GLRT method

选取一幅待测图像,目标物是图像中的英文字母,仿真结果如图 2。图 2(a)是芯片俯视图,该图像作为原始待测图像;经过光子图像生成算法<sup>[17]</sup>后生成的待测图像的单帧光子图像图 2(b),该图像的信噪比(定义为信号光子数目和噪声光子数目的比值)为 1;图 2(c)是从原始待测图像中提取的目标物图像,像素大小为  $9 \times 9$ ;图 2(d)是结果图,图中光点位置是目标物在待测图像中的估计位置。



图 2 仿真结果图。(a)原始待测图;(b)生成的单帧光子图像;(c)目标物图像;(d)目标物位置

Fig. 2 Simulation result. (a) initial image; (b) generated single frame photon image; (c) target image; (d) target position

对于目标物位置判断的准确性,主要研究在不同噪声水平下,该算法对于目标探测位置的准确度。在不同的噪声水平下,各选用 100 幅含有目标物的待测图像,重复 100 次实验,则其准确判断概率  $P_{DL}$  可以用下式表示:

$$P_{DL} = N_{DL}/N, \quad (9)$$

其中  $N_{DL}$  和  $N$  分别为判决到正确位置的实验次数和总实验次数。

在对目标物位置判断的准确性时使用上面方法进行仿真。图 3 为准确判断概率与总光子数目和信噪比的关系曲线。从图中可以看出,准确判断概率随着总光子数目和信噪比(SNR)的提高而提升。

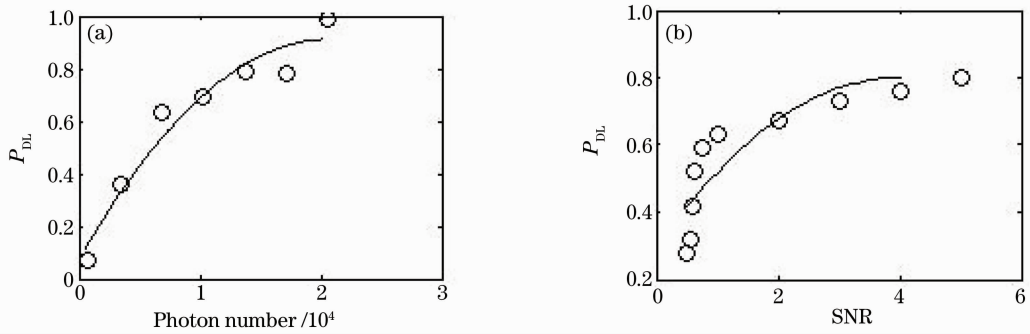


图 3 仿真结果。(a)探测概率随总光子数变化;(b)探测概率随信噪比的变化

Fig. 3 Simulation result, (a) detection probability versus total photon number; (b) detection probability versus SNR

## 4 实验研究

利用近期研制完成的光子探测成像系统<sup>[16]</sup>对

以上统计处理方法进行了实验研究,该系统框图如图 4 所示。

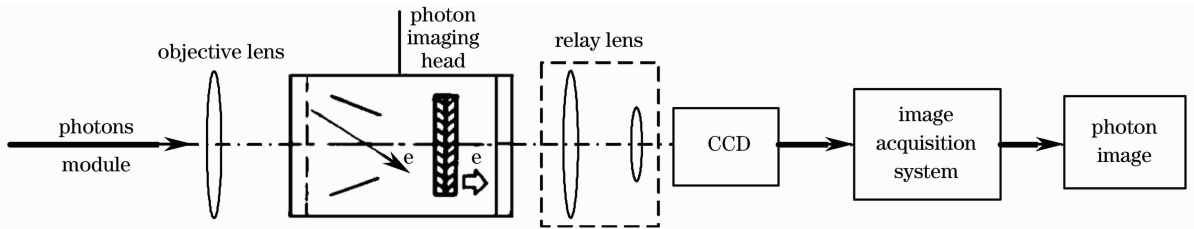


图 4 光子探测成像系统框图

Fig. 4 Schematic diagram of photon imaging system

通过该系统,获得初始光子图像,该图像含有器件的本底噪声,通过一种基于统计信号处理的噪声预处理算法<sup>[16]</sup>去除该噪声。同时将获取的灰度图像变为二值图像,将多帧二值图像叠加在一起达到

一定的总光子数目时,利用上述基于 GLRT 的目标探测算法对采集并预处理后的多帧光子图像进行处理,最后得到目标探测的结果,如图 5 所示。

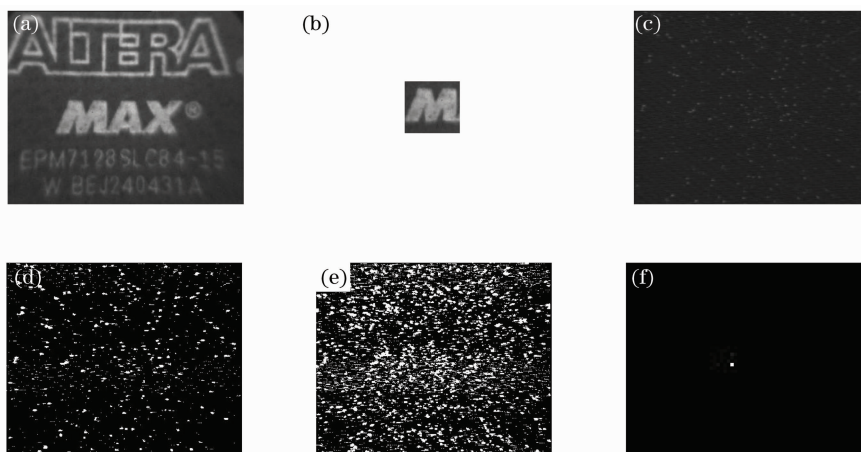


图 5 实验结果。(a)普通图像;(b)模板图像;(c)采集到的初始图像;(d)统计预处理后单帧光子图像;

(e)多帧图像叠加后光子图像;(f)目标探测结果

Fig. 5 Experimental results, (a) general image; (b) module image; (c) obtained initial image; (d) single frame image after statistical pre-processing; (e) photon image after image addition; (f) target detection result

其中,图 5(a)是在强光条件下的目标图像,该图像是数字 IC 芯片上面的型号字母;图 5(b)是所要探测的模板图像;图 5(c)是经过光子探测成像系

统所采集到的原始目标图像;经过初步的统计预处理后得到图 5(d);采集多帧图像进行统计预处理并叠加后得到图 5(e);最后经过目标探测算法后待测

目标物的中心点位置在图 5(f)中的亮点位置显示。

经过多次实验,在系统不同增益条件下,重复实验 50 次,最后得出准确判断概率如表 1 所示。表中

表 1 不同增益下的探测概率

Table 1 Detection probability for different gain

Gain	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4
SNR	1.329	1.32	3.31	3.25	2.776	2.084
Total photon number	186.86	405.2	724.86	1315.98	1818.86	2410.04
$P_{DL}/\%$	22	34	74	74	84	88

同时,该方法对目标物为点目标的情况同样适用。在同样的系统增益条件下,改变输入点目标的光强。在总光子数是 251 个时,准确判断概率是

总光子数目是使用光子探测计数器所得的数值,而上面仿真结果中的总光子计数是使用数值模拟方法后得到的光子数目模拟值,不具有实际的物理意义。

63.3%;而在 454 个总光子数时,准确判断概率是 93.3%。其中实验结果如图 6 所示。

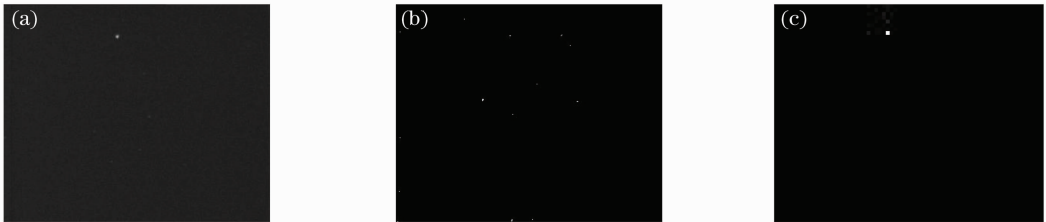


图 6 点目标实验结果。(a)普通图像;(b)统计预处理后单帧光子图像;(c)目标探测结果

Fig. 6 Experimental results for point target. (a) general image; (b) single frame photon image after statistical pre-processing; (c) target detection result

## 5 结 论

本文采用了统计理论和广义似然比检验的方法解决了在光子噪声受限条件下,无法使用传统图像探测算法提取图像目标的问题,提出了一种利用已知目标物灰度值图像的基于广义似然比检验的目标探测算法。该算法利用光子噪声受限条件下图像的统计特性和 GLRT 方法推导出目标判决公式,将该公式作为目标探测的判据。有效地解决了光子图像呈散粒状图像,难以提取目标的问题,有利于区分信号和噪声区域。

仿真和实验结果表明,提出的基于 GLRT 的目标探测算法可以在光子噪声受限条件下有效地进行目标探测,为在极微弱光情况下目标探测和识别提供了一种新方法。研究结果对实际的天文图像和核医学图像等呈散粒分布图像均具有很好的应用前景和价值,仿真和实验结果为进一步建立实际应用系统提供了重要的参考依据。

## 参 考 文 献

- 1 M. P. Cagigal, P. M. Prieto. Low light level images reconstruction[C]. *SPIE*, 1992, **1657**: 236~243
- 2 A. Abu-Naser, N. P. Galatsanos, and M. N. Wernick. ML and Bayesian impulse restoration based object recognition in photon limited noise [J]. *IEEE International Conference on Image*

*Processing*, 2002, **2**: 837~840

- 3 Chen Tianming, Yu Xin, Wang Susheng. Statistical testing in ultra-weak bioluminescence Image[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 806~811  
陈天明,俞 信,王苏生. 超微弱生物发光图象的统计检验[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6): 806~811
- 4 Victor C. Chen, Shie Qian. CFAR detection and extraction of unknown signal in noise with time-frequency Gabor transform [C]. *SPIE*, 1996, **2762**: 285~294
- 5 Gee-in Goo. Correlation filter for target detection and noise and clutter rejection[C]. *SPIE*, 1996, **2753**: 317~332
- 6 Ma Yu, Yu Xin, Wang Susheng *et al.*. Thin samples photon image processing with statistical method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1641~1646  
马 瑜,俞 信,王苏生等. 小样本光子图像的统计处理[J]. *光学学报*, 2000, **20**(12): 1641~1646
- 7 Ma Yu, Yu Xin. The statistic processing of photon image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 422~426  
马 瑜,俞 信. 光子图像统计处理[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 422~426
- 8 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Gu Guohua *et al.*. Dim target detection based on optical flow histogram in low frame frequency in clouds background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1496~1501  
管志强,陈 钱,顾国华等. 基于光流直方图的云背景下低帧频小目标探测方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1496~1501
- 9 Ping Qingwei. Signal detection of laser radar based on the background character parameter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 304~307  
平庆伟. 基于背景特征参数的激光雷达目标检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 304~307
- 10 Ping Qingwei, Xia Guifen. Laser radar target detection based on fractional brownian motion model[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008,

- 35**(1): 106~110  
平庆伟,夏桂芬. 基于分数布朗运动模型的激光雷达目标检测[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 106~110
- 11 A. Abu-Naser, N. P. Galatsanos, M. N. Wernick. Impulse restoration-based template-matching using the expectation-maximization algorithm[J]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 1997, **3**: 158~161
- 12 J. W. Goodman. Statistical Optics[M]. Qin Kecheng, Transl Beijing; Science Press, 1992. 419~470  
J. W. 顾德门. 统计光学[M]. 秦克诚译. 北京: 科学出版社, 1992: 419~470
- 13 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Optoelectronics Statistical Theory and Technology [M]. Beijing; Beijing Institute of Technology Press, 1989. 468~522  
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. 468~522
- 14 Steven M. Kay Fundamentals of Statistical Signal Processing Volume II: Detection Theory[M] LUO Pengfei transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 511~540  
凯. 统计信息处理基础[M]. 罗鹏飞译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 511~540
- 15 Wang Shian. Mathematical Statistics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 21~26  
王式安. 数理统计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 21~26
- 16 Zhao Lei, Yu Xin, Chen Yinan. Statistical analysis of dark noise in photon imaging system[C]. *SPIE*, 2007, **6621**: 66210I
- 17 Zhao Lei, Yu Xin, Chen Yinan. Study on simulation of low light level images and photon images[C]. *SPIE*, 2007, **6833**: 683306