

# 光电成像探测系统的性能预测方法

徐保树<sup>1,2,3,4</sup>, 史泽林<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016;

3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 沈阳 110016; 4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 沈阳 110016)

**摘要:** 提出一种光电成像探测系统的性能预测方法。介绍包含传感器、处理器的探测系统模型。根据信号检测理论, 以最小错误概率准则设计似然比探测器, 利用中心极限定理计算错误率。实验结果表明, 随着量化位数的增大, 系统错误率逐渐减少, 且计算错误率与仿真错误率趋于一致。

**关键词:** 光电系统; 成像探测; 性能预测; 假设检验

## Performance Prediction Method of Photoelectric Imaging Detection System

XU Bao-shu<sup>1,2,3,4</sup>, SHI Ze-lin<sup>1,3,4</sup>

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Key Laboratory of Photoelectric Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

4. Liaoning Provincial Key Laboratory of Image Understanding and Visual Computation, Shenyang 110016, China)

**【Abstract】** This paper proposes a performance prediction method of photoelectric imaging detection system. It designs the detection system model including the sensor and processor. Likelihood ratio test detector is designed under minimum error probability which is based on signal detection theory. Analytical expression of false probability is derived based on central limit theorem. Experimental results show that detection error rate drops with the quantitative digits improving, and calculation error rates and simulation error rates are basically the same.

**【Key words】** photoelectric system; imaging detection; performance prediction; hypothesis test

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.03.003

### 1 概述

光电成像探测系统在探测远距离目标时, 目标信号受大气衰减严重, 成像对比度低, 且系统性能受到传感器噪声、量化等因素的限制。为使光电成像探测系统能够满足应用需求, 在系统设计之初需要对其性能进行预测。经典的性能预测方法一般基于信杂比和信号干扰比<sup>[1-2]</sup>, 假设杂波或干扰等随机因素满足高斯分布, 然后根据探测概率和信杂比的关系得到探测概率。但是, 成像过程存在量化等非线性因素, 即便传感器噪声近似服从高斯分布, 图像分布特性与高斯分布也存在较大偏差。基于信息论提出的 Chernoff 界限方法<sup>[3-4]</sup>, 其目的是得到探测错误率的理论界限, 具有一定借鉴意义, 但同样只能在高斯分布假设下应用。在单次图像匹配性能预测基础上, 序列图像匹配概率的估计问题<sup>[5]</sup>得到关注。

中心极限定理是在大样本条件下的统计分析工具, 图像由大量像素构成, 具有足够多的样本点, 满足使用中心极限定理的前提条件, 本文基于中心极限定理, 提出一种光电成像探测系统的性能预测方法。

### 2 光电成像探测系统模型

光电成像探测系统包括成像传感器和处理器 2 个主要部分, 据此本文建立图 1 所示的典型光电成像探测系统模型。其中, 传感器包括噪声和量化 2 个主要因素; 处理器采用似然比检验方法处理获取图像, 并且用于判决场景中目标的存在属性。

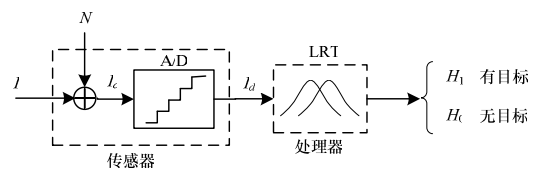


图 1 典型的光电成像探测系统模型

图 1 的具体说明如下:

(1) 传感器

在图 1 中, 假设  $I$  是场景的辐射或反射信息; 经成像转换为模拟图像  $I_a$ ; 被 A/D 转换器量化为数字图像  $I_d$ 。该过程可表示为:

$$I_d = Q(I_a) = Q(I + n) \quad (1)$$

其中,  $N$  是传感器噪声;  $Q(\cdot)$  是量化函数。

传感器噪声可以近似看作高斯分布<sup>[1]</sup>, 模拟图像  $I_a$  出现的概率密度函数:

$$p(I_a) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp\left(-\frac{\|I_a - I\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中,  $\sigma^2$  是噪声方差;  $n$  是图像像素数;  $\|\cdot\|$  是欧式范数。

**基金项目:** 中国科学院国防科技创新基金资助项目(CXJJ-11)

**作者简介:** 徐保树(1985—), 男, 博士研究生, 主研方向: 光电成像系统设计; 史泽林, 研究员、博士、博士生导师

**收稿日期:** 2011-07-26 E-mail: bsxu@sia.cn

模拟图像经 A/D 转换器量化为离散型数字图像  $I_d$ 。  $I_d$  出现的前提是每一个像素同时出现，得  $I_d$  的概率密度函数：

$$p(I_d) = \prod_{i=1}^N \left[ \Phi \left( \frac{I_d(i) - I(i) + \frac{q}{2}}{\sigma} \right) - \Phi \left( \frac{I_d(i) - I(i) - \frac{q}{2}}{\sigma} \right) \right] \quad (3)$$

其中， $q$  是量化误差； $\Phi(\cdot)$  是标准正态分布的累积分布函数。

(2) 处理器

在信号检测理论下，目标探测问题从本质上是假设检验问题，即通过观测图像  $I_d$  检验 2 个备择假设，其可描述为：

$$\begin{cases} H_1: I_d = Q(T+N) \\ H_0: I_d = Q(N) \end{cases} \quad (4)$$

其中， $T$  是目标信息。

由于一般希望错误判决最少，即虚警率和漏警率之和最小，因此选取最小错误概率准则设计探测算法。在最小错误概率准则下，以数字图像的对数似然比检验作为处理器模型，对数似然比检验为<sup>[3]</sup>：

$$\ln L = \sum_{i=1}^N \ln \left[ \frac{p(I_d(i) | H_1)}{p(I_d(i) | H_0)} \right] \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} = 0 \quad (5)$$

当存在目标时， $I=T$ ，记对数似然比为  $\ln L^1$ ；在不存在目标时， $I=0$ ，记对数似然比为  $\ln L^0$ 。

3 理论性能

中心极限定理是在大样本下的分析工具，式(4)中  $\ln L$  是  $n$  个随机变量之和， $n$  是图像像素数，一般远大于中心极限定理的要求。根据中心极限定理， $\ln L$  近似服从正态分布。

当无目标时，探测器可能做出有目标的判决，即虚警率可以表示为：

$$P(\ln L > \ln \tau | H_0) = P(\ln L^0 > \ln \tau) \approx \Phi \left( \frac{\ln \tau - E(\ln L^0)}{\text{Var}(\ln L^0)} \right) \quad (6)$$

当有目标时探测器可能做出无目标的判决，即漏警率可以表示为：

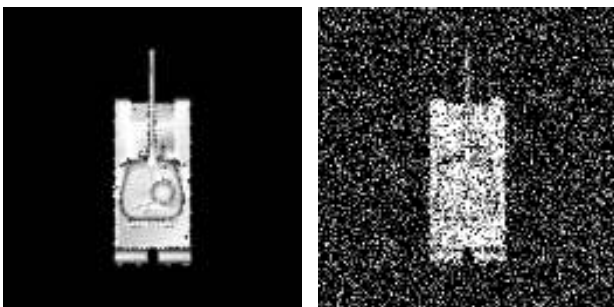
$$P(\ln L < \ln \tau | H_1) = P(\ln L^1 < \ln \tau) \approx \Phi \left( \frac{E(\ln L^1) - \ln \tau}{\text{Var}(\ln L^1)} \right) \quad (7)$$

总的错误率是两者的加权和：

$$P_e = \frac{1}{2} [P(\ln L > \ln \tau | H_0) + P(\ln L < \ln \tau | H_1)] \quad (8)$$

4 实验结果与分析

图 2 为实验图像，实验采用源图像如图 2(a)所示，其是一个 16 位的数字图像，用来近似模拟没有经过量化的目标信息。在源图像上加入高斯噪声之后，得到噪声污染图像如图 2(b)所示，可以看出目标的可探测性随噪声增加而降低。



(a)源图像 (b)含噪图像

图 2 实验图像

4.1 实验设计

在实验中不考虑旋转、平移等参数条件变化，得到理论结果和仿真结果的主要过程：

(1)以实验源图像为输入图像，根据式(6)~式(8)得出错误率计算结果。

(2)采用蒙特卡洛模拟方法得到错误率的仿真结果。

蒙特卡洛仿真方法是根据物理现象本身的统计规律，进行大统计量统计实验方法，或计算机随机模拟的方法。本文借鉴蒙特卡洛仿真方法，具体实现包括如下 3 个步骤：

(1)在源图像上叠加高斯白噪声生成模拟图像。

(2)将模拟图像量化为数字图像。

(3)根据构造的似然比探测器判断图像中是否有目标。

蒙特卡洛方法要求进行大量实验，实验次数越多，结果越精确，并且需要反复迭代上述步骤。如果系统噪声模型准确，那么蒙特卡洛方法能够近似模拟真实成像系统和探测算法的工作流程，反映系统的工作特性。

4.2 实验结果

设定信噪比为 15 dB，量化位数从 1 开始逐渐递增，通过数值解析式和蒙特卡洛仿真得到实验结果，其中，蒙特卡洛方法每一个量化位数进行了 10 000 次，探测错误率与量化位数的关系如图 3 所示。随着量化位数的提高，图 3 中计算结果与仿真结果趋于一致，比如在 8 bit 量化位数时计算错误率是 0.002 5，实验仿真错误率是 0.002 6。随着量化位数的提高，错误率逐渐减少，因此，在低信噪比条件下要求系统有足够的量化位数。当信噪比为 5 dB 时，错误率与量化位数的关系如图 4 所示。

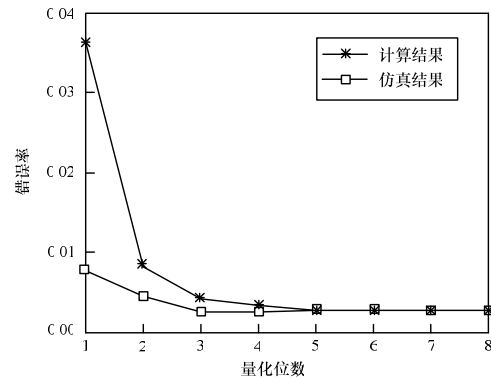


图 3 信噪比 15 dB 时错误率与量化位数的关系

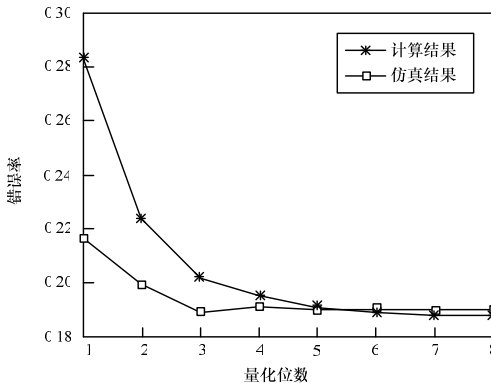


图 4 信噪比 5 dB 时错误率与量化位数的关系

4.3 低对比度下的仿真结果

在军事侦察、监视、导航和制导等远距离成像时，受大 (下转第 11 页)