



EMVA1288 标准

图像传感器与相机性能测试标准

(Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras)

R3.1 版

2016 年 12 月 30 日

欧洲机器视觉协会（EMVA）发布

www.emva.org

中国机器视觉联盟（CMVU）译

2017 年 8 月 25 日

译者序

相机与图像传感器有很多传统的测试方法或一些专门为某种性能测试而制定的标准,但这些标准有些已经跟不上数字成像的发展步伐,而且其中的一部分也不适合机器视觉(MV)行业使用。另外,由于没有一个统一的标准,各大图像传感器与相机生产商就都采用各自的性能测试标准,这些标准对性能参数的定义、所使用的单位、测试方法与测试条件往往各不相同,专业的MV工程师甚至相机研发人员都很难根据这些数据表来对不同厂商的相机性能进行客观的比较,而用户则更难根据数据表来确定哪一款相机的性能更适合自己使用。

为了解决此问题,欧洲机器视觉协会(EMVA)于2004年2月成立了由Awaiba与Basler牵头,主要的图像传感器与相机生产商均参与其中的EMVA1288标准工作组,目标是建立一个统一的适合MV行业的相机与图像传感器性能测试标准,从而“让机器视觉工程师活得更轻松一点”(Make the MV Engineers lives easier)。经过一年半的研究准备,EMVA于2005年8月正式发布了EMVA1288 A1.0版,相机性能测试终于有了一个统一的标准。

十多年来,EMVA1288标准不断地发展完善,目前已经更新到了R3.1版(2016年12月发布)。该标准现在已经被国外所有主流的相机与图像传感器生产商所承认,也正被大量的行业用户所接受和使用,在国内也正被越来越多的相机生产商及行业用户所认可与使用。

今天,EMVA1288 R3.1标准中文版终于在国内正式面世了。专家介绍,最新的EMVA1288 R3.1标准更规范、更严谨、更科学。

CMVU决定把这个标准翻译成中文版用了近两年的时间,在这期间,行业专家给予了有力指导,行业同仁们给予了大力支持配合。通过大家的共同努力,终于如期完成了标准的翻译工作。同时,我们要看到国外的相机测试做得非常专业,一份按照EMVA1288标准做的相机性能测试报告通常都有十几甚至几十页,各类数据图表非常详实规范。真诚希望中国的相机制造商能够按照并珍惜这份规范的专业性标准,能够把我们国产的相机水平整体提高到一个新的台阶,CMVU会进一步努力把该标准向相关政府部门申报设立为“国家标准”。

在此,也特别提醒大家,相关专家在翻译与审校过程中发现有个别地方英文原版有些小的错误,专家在译文中进行了更正并以脚注方式进行了说明,供读者参考。整个译文可能还会出现小的错漏之处,欢迎大家批评指正。

鸣谢翻译及审校人员

翻译: 徐英莹 副研究员(中国计量科学研究院),将EMVA1288 R3.0版翻译成中文;

审校 1: 郝志航 教授(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所);

审校 2: 庄阿伟 总工程师(福州鑫图光电有限公司 www.tucsen.com);

谢 森 相机业务 SE 总工程师(凌云光技术集团有限责任公司 www.lusterinc.com);

于 渝 总工程师(重庆港宇高科技开发有限公司 www.camyu.net);

审校 3: 冯 兵 博士(西安远望图像技术有限公司 www.LookLong.com),2009年开发出国内第一套完整的EMVA1288测试平台,并成功应用于航天成像器件的筛选中。对EMVA1288 R3.0中文版进行第3次审校并升级到最新的R3.1版。

错漏之处请回复至: yxj@china-image.cn

目 录

1	概述与范围.....	6
2	灵敏度、线性度、噪声.....	7
2.1	线性信号模型.....	7
2.2	噪声模型.....	9
2.3	信噪比.....	9
2.4	信号饱和与绝对灵敏度阈值.....	10
3	暗电流.....	12
3.1	平均值和方差.....	12
3.2	温度依赖性.....	12
4	空间非均匀性和缺陷像元.....	12
4.1	空域方差, DSNU, PRNU.....	13
4.2	非均匀性的类型.....	13
4.3	缺陷像元.....	14
4.3.1	对数直方图.....	14
4.3.2	累积直方图.....	15
4.4	高通滤波.....	15
5	测量设备和方法概述.....	16
6	灵敏度、线性度和噪声的测量方法.....	17
6.1	光源的几何一致性.....	17
6.2	光源的光谱特性.....	18
6.3	辐射量变化.....	18
6.4	辐射量的标定.....	19
6.5	线性度和灵敏度的测量条件.....	19
6.6	基于光子转移方法的测量评估.....	20
6.7	线性度的评估.....	24
7	暗电流的测量方法.....	26
7.1	一定温度下暗电流的评估.....	26
7.2	不同温度下暗电流的评估.....	27

8	空间非均匀性和缺陷像素的检测方法	27
8.1	空域噪声标准差、DSNU、PRNU 及总信噪比	28
8.2	水平和垂直频谱	29
8.3	水平与垂直断面图	31
8.4	缺陷像元特征评估	33
9	光谱灵敏度的测试方法	36
9.1	光谱光源设置	36
9.2	测试条件	36
9.3	校准	37
9.4	评价	37
10	测试结果发布	39
10.1	基本信息	39
10.2	EMVA 1288 数据手册	39
附录 A	文献	41
附录 B	符号说明	42
附录 C	相对于 A2.01 版的修改说明	43
C.1	扩展的特性	43
C.2	扩展了改变光照的方法	43
C.3	测试条件与流程的修改	43
C.4	对于最小时域噪声测量，引入了量化噪声	44
C.5	高通滤波的非均匀性测量	44
附录 D	相对于 R3.0 版的修改说明	44
D.1	变化	44
D.2	增加的功能	45
附录 E	贡献者名单	45

Acknowledgements (致谢, 译文略)

EMVA 1288 is an initiative driven by the industry and living from the personal initiative of the supporting companies and institutions delegates as well as from the support of these organizations. Thanks to this generosity the presented document can be provided free of charge to the users of this standard. EMVA thanks those contributors (see Appendix E) in the name of the whole vision community.

Rights, Trademarks, and Licenses (版权、商标及许可证, 译文略)

The European Machine Vision Association owns the "EMVA, standard 1288 compliant" logo. Any company can obtain a license to use the "EMVA standard 1288 compliant" logo, free of charge, with product specifications measured and presented according to the definitions in EMVA standard 1288. The licensee guarantees that he meets the terms of use in the relevant release of EMVA standard 1288. Licensed users will self-certify compliance of their measurement setup, computation and representation with which the "EMVA standard 1288 compliant" logo is used. The licensee has to check regularly compliance with the relevant release of EMVA standard 1288.

If you publish EMVA standard 1288 compliant data or provide them to your customer or any third party you have to provide the *full data sheet*. An EMVA 1288 compliant data sheet must contain all mandatory measurements and graphs (Table 1). If you publish datasheets of sensors or cameras and include the EMVA 1288 logo on them, it is mandatory that you provide the EMVA 1288 summary data sheet (see Section 10.2). EMVA will not be liable for specifications not compliant with the standard and damage resulting there from. EMVA keeps the right to withdraw the granted license any time and without giving reasons.

About this Standard (关于本标准, 译文略)

EMVA has started the initiative to define a unified method to measure, compute and present specification parameters and characterization data for cameras and image sensors used for machine vision applications. The standard does not define what nature of data should be disclosed. It is up to the component manufacturer to decide if he wishes to publish typical data, data of an individual component, guaranteed data, or even guaranteed performance over life time of the component. However the component manufacturer shall clearly indicate what the nature of the presented data is.

The standard is organized in different sections, each addressing a group of specification parameters, assuming a certain physical behavior of the sensor or camera under certain boundary conditions. Additional sections covering more parameters and a wider range of sensor and camera products will be added successively. There are *compulsory* sections, of which all measurements must be made and of which all required data and graphics must be included in a datasheet using the EMVA1288 logo. Further there are *optional* sections which may be skipped for a component where the respective data is not relevant or the mathematical model is not applicable. Each datasheet shall clearly indicate which sections of the EMVA1288 standard are enclosed.

It may be necessary for the manufacturer to indicate additional, component specific information, not defined in the standard, to fully describe the performance of image sensor or camera products, or to describe physical behavior not covered by the mathematical models of the standard. It is possible in accordance with the EMVA1288 standard to include such data in the same datasheet. However the data obtained by procedures not described in the current release of the EMVA1288 standard must be clearly designated and grouped in a separate section. It is not permitted to use parameter designations defined in any of the EMVA1288 modules for such additional information not acquired or presented according the EMVA1288 procedures.

The standard is intended to provide a concise definition and clear description of the measurement process and to benefit the Automated Vision Industry by providing fast, comprehensive and consistent access to specification information for cameras and sensors. It will be particularly beneficial for those who wish to compare cameras or who wish to calculate system performance based on the performance specifications of an image sensor or a camera.

1 概述与范围

本标准涵盖了具有线性光响应特性的单色与彩色数码相机，面扫描与线扫描相机均可。配有帧（图像）采集卡的模拟相机以及作为相机一部分的图像传感器均可使用本标准。除非有特殊说明，本标准中“相机”一词泛指以上各类产品。

本标准用四个章节对描述相机与图像传感器特性的数学模型和各类参数进行了叙述，其中：

第 2 章：单色与彩色相机的线性度、灵敏度和噪声，

第 3 章：暗电流，

第 4 章：传感器阵列的非均匀性与缺陷像元的特征。

测量设备和测量方法共分为五章。第 5 章是测量设备的总述，第 6~9 章详细描述测量方法：

第 6 章：线性度、灵敏度和噪声，

第 7 章：暗电流，

第 8 章：传感器阵列的非均匀性与缺陷像元的特性，

第 9 章：光谱灵敏度。

为了不妨碍技术进步以及实施者的创造性，本标准对装置的细节不做规定，但测试装置必须符合本标准规定的具体特性。最后，第 10 章描述了如何生成符合 EMVA 1288 标准的数据表。附录 B 为符号说明，附录 C 为对版本 R2.0 的修订说明，附录 D 为对版本 R3.0 的修订说明，附录 E 为本标准贡献者名单。

必须注意，本标准只适用于符合本标准数学模型的测试相机，如果不符合上述条件，则标准不适用，通过测试相机计算得到的参数毫无意义。目前，本标准的适用范围不包括电子倍增相机（EMCCD，[2,3]）和对深紫外线灵敏的相机，这两种相机具有每吸收一个光子产生多于一个电子的特性[7]。

本标准的一般假设包括：

1. 一个像元所收集的光子数取决于辐照度 E （单位 W/m^2 ）和曝光时间 t_{exp} （单位：s）的乘积，即取决于在传感器表面的辐射能量密度 Et_{exp} ；
2. 传感器是线性的：即数字信号 y 随所接收光子数量的增加而线性增加；
3. 在时间与空间上，噪声源都是广义平稳和白色的。描述噪声的参数在时间与空间上具有不变性；
4. 只有总量子效率与波长相关，由不同波长的光产生的效应可以线性叠加；

5. 只有暗电流与温度相关。

上述假设用于描述理想相机与传感器的特性。但是实际传感器与理想传感器多少会有差异。只要差异在允许范围内，本标准仍然适用，并且本标准的任务之一就是描述实际传感器与标准传感器的差异程度。但是，如果两者偏差过大，将导致参数无法确定或者结果无意义，该情况下本标准无法适用。此外，本标准亦无法适用于明显与上述任一假设相悖的传感器，例如：响应曲线呈对数而非线性的相机不适用于本标准。

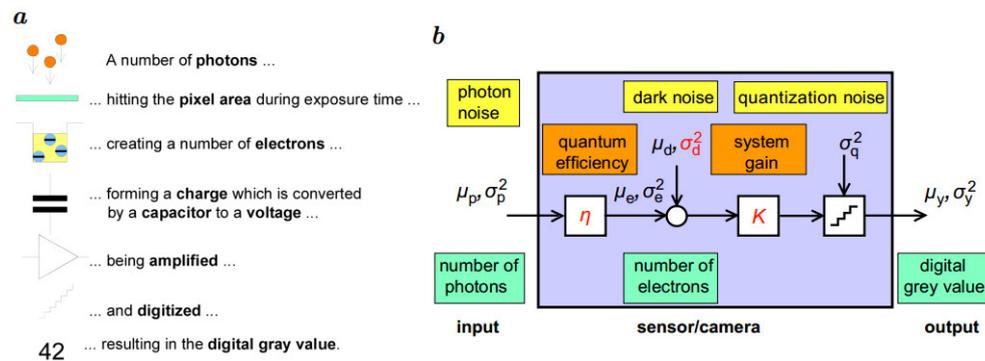


图 1：相机的物理模型(a)与单像素数学模型(b)。用逗号分开的物理量分别是其均值与方差；待测的未知量以红色标记。

2 灵敏度、线性度、噪声

本章介绍了如何定义图像传感器或相机的灵敏度、线性度和时域噪声[4-6, 9]。

2.1 线性信号模型

如图 1 所示，一个数字图像传感器本质上就是，将曝光时间内入射到像元面上的一定数量的光子转换为一定数量的电子，然后通过存贮这些电荷的电容转换为一定幅值的电压信号，此信号经放大量化最终变成数字图像的灰度值。假设一个像元的面积为 A 在一定曝光时间内入射到该像元上的光子数平均为 μ_p 其中，一部分入射光子被吸收并转换为一定电荷量 μ_e 的电子¹，转换为电荷的光子数与入射光子数的比定义为总量子效率：

$$\eta(\lambda) = \frac{\mu_e}{\mu_p} \quad (1)$$

本标准定义的总量子效率对应的是单个像元的总面积，而不仅仅是感光面积。所以，该定义包含了填充因子和微透镜的影响。如公式(1)所示，量子效率与照

¹ CMOS 的工作机理与 CCD 不完全相同，但其数学模型与 CCD 是一样的。

射到像元上光子的波长有关。

在曝光时间 t_{exp} 内，入射到面积为 A 的像元上的平均光子数由下式计算，其中， E 为传感器表面的辐照度，单位为 W/m^2 ， $h\nu$ 为单光子能量。

$$\mu_p = \frac{AEt_{exp}}{h\nu} = \frac{AEt_{exp}}{hc/\lambda} \quad (2)$$

代入光的速度 $c = 2.99792458 \times 10^8 m/s$ 和普朗克常量 $h = 6.6260755 \times 10^{-34} Js$ 。则有：

$$\mu_p[\text{photons}] = 5.034 \cdot 10^{24} \cdot A[m^2] \cdot t_{exp}[s] \cdot \lambda[m] \cdot E[\frac{W}{m^2}] \quad (3)$$

或者应用图像传感器常用的单位：

$$\mu_p[\text{photons}] = 50.34 \cdot A[\mu m^2] \cdot t_{exp}[ms] \cdot \lambda[\mu m] \cdot E[\frac{\mu W}{cm^2}] \quad (4)$$

这些公式将辐射计测得的辐照度（单位为 W/cm^2 ）转化为计算图像传感器特性所需要的光子通量。

在相机的电子学系统中，通过光子辐射而累计的电荷，首先转化为电压值，然后放大，最后通过模数转换器（ADC）转换为数字信号 y 。假设整个过程是线性的，这个过程就可以通过一个量 K 来描述， K 值称为全局系统增益（单位为 DN/e^- ，即单位电荷转换输出的灰度值²）。因此，输出的平均灰度值 μ_y 可表示为

$$\mu_y = K(\mu_e + \mu_d) \quad \text{或} \quad \mu_y = \mu_{y.dark} + K\mu_e \quad (5)$$

其中， μ_d 是在没有光照情况下生成的电子数，该值最终转变成零辐照下的平均暗信号 $\mu_{y.dark} = K\mu_d$ （单位是 DN ）。注意，暗信号一般取决于其他参数，特别是曝光时间和环境温度（见第3章）。

通过公式(1)、(2)、(5)，可以得到平均灰度值 μ_y 与在曝光时间内辐射到像元上的光子数量的线性关系。

$$\mu_y = \mu_{y.dark} + K\eta\mu_p = \mu_{y.dark} + K\eta \frac{\lambda A}{hc} Et_{exp} \quad (6)$$

通过计算传感器输出的灰度平均值与入射到像元的平均光子数之间的关系，

² DN 是一个无量纲单位，指数字图像的灰度值。

公式(6)可以用来验证传感器的线性度。除此之外，公式(6)还可以用来测量响应度 $K\eta$ ，即公式(6)中的线性斜率。如果全局系统增益 K 可以从公式(9)中得到，那么就能从响应度 $K\eta$ 中计算出量子效率值。

2.2 噪声模型

光电转换的电荷数（以电子为单位计算）的波动符合统计规律。根据量子力学，该波动符合泊松（Poisson）分布。因此，该波动的方差等于累积电荷数的平均值，即

$$\sigma_e^2 = \mu_e \quad (7)$$

这种噪声，通常被称为散粒噪声，是由基本物理定律决定的，对各种类型的相机具有普适性。

其他所有噪声源取决于传感器的具体构造和相机的电子器件。对于线性信号模型（第 2.1 节），所有的噪声源可以叠加。为了建立整个相机电子学的黑盒子模型，再考虑两个噪声源就足够了。与传感器的读出和放大电路有关的所有噪声源都可以用一个与信号不相关，方差为 σ_d^2 的正态分布噪声描述。最后的模数转换（如图 1b）增加了另一个噪声源，这种噪声在量化区间呈均匀分布，方差为 $\sigma_q^2 = 1/12DN^2$ [9]。因为所有的噪声源的方差是线性叠加的，所以数字信号 y 的总时域方差 σ_y^2 ，根据误差传递定律有：

$$\sigma_y^2 = K^2(\sigma_d^2 + \sigma_e^2) + \sigma_q^2 \quad (8)$$

综合公式(7)和公式(5)，噪声与输出的数字信号均值有关：

$$\sigma_y^2 = K^2\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y.dark}) \quad (9)$$

该公式是描述传感器特性的核心公式。根据噪声方差 σ_y^2 和光电转换输出平均灰度值 $\mu_y - \mu_{y.dark}$ 的线性关系，可以从斜率得出全局系统增益 K ，由截距得到噪声方差 σ_d^2 。该方法被称为光子转移方法（*photon transfer method*）[6,8]。

2.3 信噪比

信号质量由信噪比（SNR）描述，其定义如下：

$$SNR = \frac{\mu_y - \mu_{y.dark}}{\sigma_y} \quad (10)$$

综合公式(6)(8)，信噪比公式可以改写为：

$$SNR(\mu_p) = \frac{\eta\mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 + \eta\mu_p}} \quad (11)$$

若不考虑量化噪声所引起的微小影响，公式中量化噪声和全局系统增益 K 项可以取消，则信噪比仅取决于量子效率 $\eta(\lambda)$ 和以电子为单位的暗噪声 σ_d 。有两个极端的情况值得注意：满足 $\eta\mu_p \gg \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2$ 的强信号情况和满足 $\eta\mu_p \ll \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2$ 的弱信号情况

$$SNR(\mu_p) = \begin{cases} \sqrt{\eta\mu_p} & \eta\mu_p \gg \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 \\ \frac{\eta\mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2}} & \eta\mu_p \ll \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 \end{cases} \quad (12)$$

上面的公式表明，信噪比曲线的斜率，在低照度时线性增长，在高照度时变为相对缓慢的呈平方根函数增长。

一个真实的传感器可以与量子效率 $\eta = 1$ 、暗场噪声 $\sigma_d^2 = 0$ 、量化噪声可忽略 $\sigma_q^2/K^2 = 0$ 的理想传感器作对比。理想的传感器的信噪比定义如下：

$$SNR_{ideal} = \sqrt{\mu_p} \quad (13)$$

对比实际传感器和理想传感器的信噪比曲线，可以直观地看出实际传感器接近理想传感器的程度。

2.4 信号饱和与绝对灵敏度阈值

对于一个 k 比特的数字相机，其输出的数字灰度值在 0 到 $2^k - 1$ 范围以内。但是实际上的可用灰度范围要小一些。暗场灰度平均值 $\mu_{y,dark}$ 必须高于 0 ，以防因为时域噪声和暗信号的非均匀性（第 6.5 节有更精确的定义）而导致的明显的向下截止。类似的，可知，由于时域噪声和响应非均匀性的影响，最大可用灰度值低于 $2^k - 1$ 。

因此，饱和辐射量 $\mu_{p,sat}$ 被定义为灰度值方差和辐射量关系曲线的最大值所对应的辐射量值（单位：光子/像元）。该定义的合理性在于，根据公式(9)，方差是随着灰度值增大而增大的，但是当灰度值增加到被最大数字灰度值 $2^k - 1$ 箝位时，方差会随着灰度值增大而减小。

通过饱和辐射量 $\mu_{p,sat}$ 可计算出饱和容量 $\mu_{e,sat}$ ，如下式

$$\mu_{e.sat} = \eta\mu_{p.sat} \quad (14)$$

饱和容量不能和满阱容量相混淆。饱和容量一般小于满阱容量，因为在像元达到物理饱和之前，信号已经被箝位到最大数字灰度值 $2^k - 1$ 。

最小可探测辐射量或者绝对灵敏度阈值 $\mu_{p.min}$ ，可以用信噪比（SNR）进行定义，该值即为满足 SNR=1 时的光子数均值。

为此，我们需要知道公式(11)的反函数，以光子数为输出值，而信噪比为变量，则可推导得到：

$$\mu_p(SNR) = \frac{SNR^2}{2\eta} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4(\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2)}{SNR^2}} \right) \quad (15)$$

考虑信噪比在较大或较小值时的情况，公式可以近似如下：

$$\mu_p(SNR) \approx \begin{cases} \frac{SNR^2}{\eta} \left(1 + \frac{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2}{SNR^2} \right), & SNR^2 \gg \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 \\ \frac{SNR}{\eta} \left(\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2} + \frac{SNR}{2} \right), & SNR^2 \ll \sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 \end{cases} \quad (16)$$

上式意味着对于几乎所有的相机，当 $\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 \gg 1$ 时，绝对灵敏度阈值可以被很好地近似为：

$$\mu_p(SNR = 1) = \mu_{p.min} \approx \frac{1}{\eta} \left(\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\sigma_{y.dark}}{K} + \frac{1}{2} \right) \quad (17)$$

信号饱和值与绝对灵敏度阈值的比值被定义为**动态范围（DR）**：

$$DR = \frac{\mu_{p.sat}}{\mu_{p.min}} \quad (18)$$

3 暗电流

3.1 平均值和方差

前面章节介绍的暗信号 μ_d （见公式 5）并不是一个固定值，主要是由于暗信号的一部分源自于热生电子的贡献，因此，暗信号会随着曝光时间的增加而线性增长：

$$\mu_d = \mu_{d.0} + \mu_{therm} = \mu_{d.0} + \mu_I t_{exp} \quad (19)$$

在上面的公式中，所有量的单位均用电子（ $e^-/pixel$ ）表示。这些值可以通过其测量值（单位：DN）除以全局系统增益 K （见式 9）得到。

其中 μ_I 被定义为暗电流，单位为 $e^-/(pixels) \cdot s$ 。根据误差传递定律，暗信号方差被定义为：

$$\sigma_d^2 = \sigma_{d.0}^2 + \sigma_{therm}^2 = \sigma_{d.0}^2 + \mu_I t_{exp} \quad (20)$$

因为热生电子与光生电子一样满足泊松分布（具体见公式 7），即有 $\sigma_{therm}^2 = \mu_{therm}$ 。如果相机或传感器有暗电流补偿功能，则暗电流仅能够通过公式(20)来描述与测量。

3.2 温度依赖性

暗电流的温度依赖性可以通过一种简化形式来模拟。因为热会产生电荷，暗电流随着温度增加近似呈指数关系。可以描述如下：

$$\mu_I = \mu_{I.ref} \cdot 2^{(T-T_{ref})/T_d} \quad (21)$$

常数 T_d 单位为 K 或者 $^{\circ}C$ ，该值指出了引起暗电流加倍的温度间隔：即**暗电流加倍温差**。 T_{ref} 是 EMVA 进行各项测试时的参考温度。 $\mu_{I.ref}$ 即为在该参考温度下测得的暗电流。因为在相机参数中只有暗电流具有很强的温度依赖性，所以只有暗电流温度相关性测量需要在不同的环境温度下进行。

4 空间非均匀性和缺陷像元

到目前为止所讨论的模型仅涉及单个像元。然而，一个像元阵列中不同像元的特性参数是不同的。有时这些不一致性被称为**固定图形噪声(fixed pattern noise, FPN)**。这种表达方法会产生一些误导，因为这种不一致性不是使信号在时间域发生变化的噪声，也许只是在空间上的随机分布。因此，最好将这种效应称为非均匀性。

实质上，非均匀性有两种基本形态。其一是不同像元的暗信号不同，这种效应被称为**暗信号非均匀性**，简称为 **DSNU**。其二是不同像元的灵敏度不同，称之

为光响应非均匀性，简称为 *PRNU*。

EMVA 1288 标准中对非均匀性的描述有三种方式。空域方差（4.1 小节）是综合度量空域非均匀性的简单方式。2. 图谱法（4.2 小节）提供了一种分析图形或周期性空域变化的方法，这些图形或周期性变化可能会对图像处理和人眼观察产生影响。最后，缺陷像元描述（界定）（4.3）是根据应用的具体标准来灵活使用和定义无用或缺陷像元的方法。

4.1 空域方差，DSNU，PRNU

对所有类型的空域非均匀性都可以用空间方差来定义，由此可引出一系列与时域噪声等价但含义不同的方程。对传感器阵列全部像元作平均化处理， L 幅分辨率为 $M \times N$ 的系列暗场图像各像元平均得到的图像 $\langle y_{dark} \rangle$ 与 50% 饱和图像的平均图像 $\langle y_{50} \rangle$ 各自的均值计算公式为：

$$\mu_{y.dark} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \langle y_{dark} \rangle [m][n], \quad \mu_{y.50} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \langle y_{50} \rangle [m][n] \quad (22)$$

其中， M 和 N 是图像的行数和列数， m 和 n 是图像阵列中行和列的具体位置。同样地，暗场和 50% 饱和图像的空域方差 s^2 表示如下：

$$s_{y.dark}^2 = \frac{1}{MN-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\langle y_{dark} \rangle [m][n] - \mu_{y.dark})^2 \quad (23)$$

$$s_{y.50}^2 = \frac{1}{MN-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\langle y_{50} \rangle [m][n] - \mu_{y.50})^2 \quad (24)$$

所有空域方差都用符号 s^2 表示，以区别于时域方差 σ^2 。

EMVA 1288 标准中的 DSNU 和 PRNU 基于空域标准差，其公式如下：

$$DSNU_{1288} = \frac{s_{y.dark}}{K} \quad (\text{单位 } e^-)$$

$$PRNU_{1288} = \frac{\sqrt{s_{y.50}^2 - s_{y.dark}^2}}{\mu_{y.50} - \mu_{y.dark}} \quad (\text{单位 } \%) \quad (25)$$

上述定义中添加下标 1288 的目的是为了与在文献中这些量的不同定义相区别。DSNU₁₂₈₈ 的单位是 e^- ，通过乘以全局系统增益 K 使单位变为 DN。PRNU₁₂₈₈ 定义为相对于平均值的标准差。在这种方法下，PRNU 给出了相对于均值的光响应不一致性的空间标准差。

4.2 非均匀性的类型

上一节定义的方差是一种空域不均匀性的全局测量。然而，一般不能认为空域不一致性是正态分布的，除非这种变化是随机的，即这些变化之间不存在空间

相关性。为此，空间非均匀性的描述必须考虑以下几种效应：

渐进变化：制造的缺陷会引起整个芯片的渐进式的低频变化。这种效应不容易测量，因为这要求对整个芯片进行均匀辐照，这个很难做到。幸运地是这一效应并不会显著降低图像质量，人眼根本看不到影响。另外，镜头遮挡和不一致照明都会导致缓变。因此，对于那些要求整个传感器阵列响应平坦的应用，必须对整个成像系统的渐进变化进行校正。

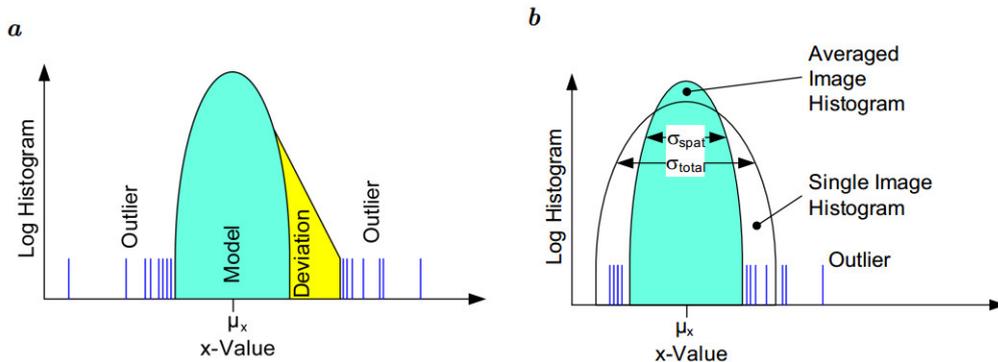


图 2：空间变化的对数直方图：a 模型数据、偏离模型的数据、异常数据的对比；
b 单幅图像和多幅图像平均的对数直方图的对比。

周期性变化：这种类型的失真由相机内部电子器件干扰引起，属于非常糟糕的情况，由于人眼对这种失真特别敏感。同样，它对很多图像处理也会产生干扰。因此，检出这种空域变化就显得尤为重要。谱图（如：空域变化功率谱）的计算可以非常容易的实现周期性变化的检测。在谱图中，周期性的变化在特定空间频率（单位：cycles/pixel）处，呈现尖锐的峰值。

异常值：指那些性能与平均值明显偏离的单像元或者像元团簇。这种类型的不一致性在 4.3 节中讨论。

随机变化：如果空域非均匀性是完全随机的，即没有空间相关性，功率谱是平坦的，该偏差在全部波长上均匀分布，这样的功率谱称为白色功率谱。

从上述描述来看，谱图（如：功率谱）的计算是个好工具。

4.3 缺陷像元

由于应用不同，不能给出一个通用的缺陷像元定义，更合适的方法是采用直方图对像元特性的统计信息进行描述。通过这种方法，测试者可以使用应用指定的准则确定有多少个不可用（或缺陷）像元。

4.3.1 对数直方图

将直方图的 Y 轴用对数表示，对于评价缺陷非常有效（如图 2a）。首先，容易比较具有正态分布的测量直方图，这种直方图在对数坐标图中表现为倒向抛物

线，因此很容易从正态分布中识别出偏离像元。第二，使用对数坐标，即使在数百万像元中也能够很容易地发现少数的几个缺陷像元。

所有直方图的计算都是很多幅图像的像元平均值。这样的直方图只反映空域噪声的统计特性，而时域噪声被平均掉了。这与单幅图像的统计是不同的，单幅图像的统计特性中同时含有空域噪声和时域噪声，从两种统计图的对比中可以很容易观察到平均图像直方图的异常值消失在时域噪声中（图 2b）。

一般很难预测偏离模型多远会影响最终的应用。因为，有的应用是通过人眼观察，而有的则是利用一系列算法处理图像；对于一些像元性能不佳的图片，在人眼观察的应用中可以正常使用，但一些算法却难以容忍。还有些应用需要无缺陷图像，而有些会容忍一定的缺陷，但当性能有偏差的像元数量过大时一些应用也会出现问题。所有的这些信息都可以从对数直方图中读出。

4.3.2 累积直方图

此外，第二种直方图——累积直方图也很有用（图 3）。它是计算超过一定偏差量的像元比例，这很容易和应用需求联系起来。相机或芯片制造商提供的质量准则很容易通过该图画出。通常的准则是，只允许一定数量的像元超过确定的阈值，如图中的矩形区域所示，这被称为阻带。这类似于高频技术中的描述，电子工程师对此应该很熟悉。

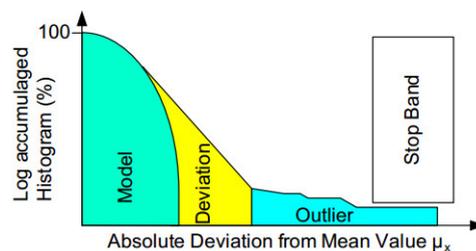


图 3：半对数累积直方图

4.4 高通滤波

这部分专述了由光源缓变导致的光响应分布问题，特别典型的是传感器边缘亮度下降。由于以下两个原因，图像传感器的低频空域变化并不重要。首先是镜头遮挡会造成传感器边缘亮度下降（镜头阴影），除非使用特殊的低遮挡镜头，这种影响将造成显著的低频空域变化。其二是几乎所有的图像处理操作都对缓变现象不敏感。（参看 4.2 节）

为了充分表现相机的特性，降低照明系统的不完美给其带来的影响，在计算 4.3.1 和 4.3.2 中描述缺陷像元特性的直方图时，应先进行高通滤波，这样可以有效抑制传感器低空间频率特性的影响。高通滤波器可用一个箱式滤波器实现，详见附录 C.5。

表 1: EMVA1288 强制测量参数和可选测量参数。

测量类型	强制与否	参考
灵敏度、时域噪声、线性度	是	第 6 章
不均匀性、 缺陷像素	是 是	第 8.1、8.2 节 第 8.4 节
暗电流	是	第 7.1 节
暗电流与温度的关系	否	第 7.2 节
光谱测量 $\eta(\lambda)$	否	第 9 章

5 测量设备和方法概述

根据 EMVA 1288 标准，对相机进行表征需要三种不同的测量设备：

1. 为了测量灵敏度、线性度和非均匀性需要使用均匀单色光源（第 6、8 章）。
2. 测量暗电流温度依赖性时需要能对相机进行温控的设备。在标准温度下测量暗电流不需要特殊装置（第 7 章）。
3. 在传感器敏感的整个波长范围内测量不同光谱量子效率的设备（详见第 9 章）。

后续章节描述了这些测量设备并详细描述了相关的测量过程。在整个测试过程中，所有的相机设置（除了曝光时间的变化）必须保持一致。对于不同的设置（例如增益），必须进行一系列不同的测量，所有会影响到相机特性的各类不同的参数都必须在测试报告中提供。线阵传感器一幅图像至少需要获取 100 行，然后就可以当做面阵传感器来计算除了垂直方向频谱以外的其它参数（8.2 节）。

如表 1 所列出，并不是所有的测量都是强制性的。一个相机的测试报告至少提供所有强制性测量结果，其数据报告才符合 EMVA 1288 要求。如果测试报告中需要可选的测量参数，其测量方法必须完全按照 EMVA 1288 的测试方法进行测量。

图 5 到图 14 是利用仿真数据给出的评估例子，同时也作为验证方法和算法的实例。仿真数据针对 1 个 12bit, 640×480 的相机给出：量子效率为 0.5，暗场均值为 29.4DN，增益 $K=0.1$ ，暗场噪声为 $\sigma_0 = 30e^{-}$ ($\sigma_{j,\text{dark}} = 3.0 \text{ DN}$)；仿真相机还具有一点非线性。DSNU 包含一个空域白色分布标准差为 $s_w = 1.5\text{DN}$ 的随机分量，

并且在水平与垂直方面各有两个振幅为 1.5DN 的正弦分量，其频率分别是 0.04 和 0.2 周期/像素。PRNU 是一个标准差为 0.5%（相对于均值）的白色（随机）空域分布。此外，仿真数据中还加入了大约 3% 的边缘非均匀光照的二次衰减。

6 灵敏度、线性度和噪声的测量方法

6.1 光源的几何一致性

灵敏度、线性度和非均匀性的测量时，要求光源均匀地照射到没有安装镜头的图像传感器上。因此，测试时在被测传感器接受面距离 d 处，放置直径为 D 的盘状漫反射光源均匀照射传感器，以保证每个像元在一定角度范围内都能接收到整个光源面发出的光线。在此，定义装置的一个 f 数为：

$$f_{\#} = \frac{d}{D} \quad (26)$$

根据 1288 标准，测量中必须保证 $f_{\#}=8$ 。

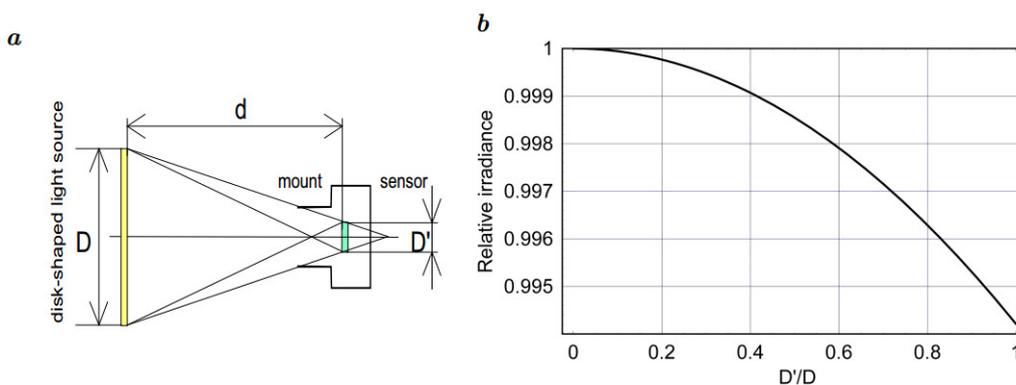


图 4: a 用于辐照图像传感器的盘形光源光学装置; b 距离为 $d=8D$ 处直径为 D 的理想积分球盘形光源照射到直径为 D' 的图像传感器边缘的相对照度曲线。

测量所用的均匀光源最好选择积分球光源（当然这只是建议使用而非必须选用）。然而，即使是一个完美的积分球光源，照射到传感器面上光线的均匀性还与传感器的直径有关，如图 4b 所示。由图 4b 可知，当距离为 $d=8D$ ($f_{\#}=8$)、图像传感器的直径等于面光源直径时，相对照度大约只下降了 0.5%。由此可知，传感器面的直径不能大于面光源的开口直径。

实际的光照装置，即使使用积分球光源，仍会因为以下几个因素而导致其具有较差的均匀性：

镜头接口的反射：镜头接口壁的反射会导致明显的不均匀性，特别是当镜头接口的内壁设计不当，又没有仔细地发黑处理时，或如果图像传感器的直径大小与镜头接口内壁孔径大小接近的时候，尤为显著。

光源的各向异性：在某种程度上，一个实际的积分球总会残留一定的不均匀性。而其他类型的光源均匀性会更差。因此，定义光照的空间非均匀性 ΔE 是很有必要的。光源的空间非均匀性可以由被测图像传感器面上光照度的最大值与最小值之差与平均照度比值的百分比来表示：

$$\Delta E[\%] = \frac{E_{max} - E_{min}}{\mu E} \cdot 100 \quad (27)$$

建议 ΔE 应不大于 3%，这是根据线性度是在传感器整个响应 5%~95%范围内的测量而导出的结果（详见 6.7 节）。

6.2 光源的光谱特性

灰阶（黑白）相机的测量需要使用半峰全宽（FWHM）小于 50 nm 的单色光。黑白相机的测试，推荐使用中心波长对应被测相机最大量子效率的光源。彩色相机的测试，则必须选用具有不同波长的光源，其中每个波长必须接近不同色彩通道的最大响应波长。通常是红、绿、蓝三种颜色，也可以是不同色彩通道的结合，包括紫外和红外通道。

上述光源可以是 **LED 发光二极管**或宽波段光源（例如具有合适的带通滤波的白炽灯或弧光灯）。所使用光源的峰值波长 λ_p 、质心波长 λ_c 、半峰全宽 FWHM 都必须具体说明。最好是用光谱仪直接测量这些参数，但也可以使用光源生产商提供的数据。对于使用带通滤光片的卤素光源来说，一个比较好的办法是使用光源黑体辐射谱与滤光片的透过率曲线的乘积来进行估算。

注意要用光源的质心波长按照公式 2 来计算光子数。

6.3 辐射量变化

通常情况下，有三种改变传感器接收的辐射量（即传感器单位面积接收的辐射能量）的方法：

I. 恒定光照下的曝光时间可变

在这种情况下，光源的辐亮度是固定的，辐射量是随曝光时间的改变而变化的。辐射量 H 是由辐照度 E 与相机曝光时间 t_{exp} 的乘积给出的。因为暗信号通常会依赖于曝光时间，所以要求测量每个曝光时间下的暗场图像。此调光方法的绝对校准精度取决于相机设置的曝光时间与真实的曝光时间之差别。

II. 恒定曝光时间下的连续可变照明

在这种情况下，光源辐照度的变化可以通过任何可能的技术来实现，前提是这种技术的可重复性必须足够好。如果采用 LED 光源，通过电流

变化很容易实现这个目标。辐射量 H 等于辐照度 E 与相机曝光时间 t_{exp} 的乘积。此方法的绝对校准精度取决于相机设置的曝光时间与真实的曝光时间之差别。

III. 恒定曝光时间下的脉冲照明

在这种情况下，传感器辐射量的变化是通过调整 LED 光源的脉冲宽度来实现的。当开关开启时，LED 被供给恒定电流，辐射量 H 等于 LED 的辐照度 E 与脉冲宽度 t 的乘积。传感器的曝光时间设置应为大于 LED 最大脉冲宽度的固定值。LED 光源的脉冲是由相机的“积分使能”或“选通”信号触发。LED 脉冲相对于积分开始时间必须有一个短延时，且必须与曝光间隔相匹配，以避免触发抖动问题的发生。当然，也可以采用外部触发源，同步触发传感器曝光和 LED 发光。脉冲光照技术不能用于卷帘快门模式。

根据第一章中的基本假设 1 和 2，以上三种方法是等同的，因为采集到的光子数量或数字灰度值仅与辐照度 E 和时间的乘积有关。因此，对于 2.1 节中描述的线性响应模型的相机来说，三种测量是也等同的。根据被测相机的性能和可选用的相关设备，可采用三种改变辐射量方法中的任何一种技术实现对相机的测试。

6.4 辐射量的标定

辐射量必须使用放置在图像传感器位置上并且已经校准过的光电二极管进行标定。在给出标定数据时，必须同时给出计量单位测量的该光电二极管的校准精度以及测量装置可能产生的附加误差。根据光源的波长，校准的绝对精度在 3%~5% 之间。选用的光电二极管需要每两年重新校准一次。这也将是测量量子效率的最小系统误差。

为了应用光子转移法（2.2 和 6.6 节）和保证传感器线性度测量（2.1 和 6.7 节）的准确性，对不同辐照水平的相对校准精度必须要远高于绝对精度。因此，校准曲线与线性回归曲线的标准差必须低于最大值的 0.1%。

6.5 线性度和灵敏度的测量条件

温度：测试在室温或者高于室温的受控温度下进行，温度的控制方式必须具体说明。相机壳体温度的测试可以通过放置在镜头接口处并具有良好的热接触的温度传感器来实现。如果是制冷型相机，要明确设置的温度。在相机达到热平衡之前，不要开始测试。

数字分辨率：为了尽可能地减小测试中量化的影响，将相机的位数设置得尽可能的高。

增益：把相机增益设置得尽可能的小以保证每个像元能达到满阱且信号不溢出。如果采用这种最小的增益，暗噪声 $\sigma_{y,dark}$ 小于 0.5 DN，暗噪声的测试结果是

不可靠的。（这情况只会发生在少数采用高质量传感器的 8 bit 相机上。）由于只有时域暗噪声的上限部分纳入了计算，动态范围将主要受限于量化噪声。

偏置：将相机的偏置设置的尽可能的小，但要足以保证包含时域噪声和空域非均匀性的暗信号不引起明显的截止。这可以通过设定偏置为适当数值，使出现截止（灰度为零值）的像元数小于 0.5 % 来实现。这种限制可以通过计算灰度直方图来很容易地检查出来，**保证像元的零值率低于 0.5%。**

辐照度值的分布：至少采用 50 个等间隔的曝光时间或辐射量值来产生从暗场灰度值到最大灰度值之间的各个灰度值。只有对于生产性测量，曝光数值可以低到只用 9 个合适的点。

采集图像的数量：在每种辐射量条件下，采集两幅图像。为了避免在采集图像开始时的瞬变现象，A、B 两幅图像应从动态图像序列中获取。由于暗场灰度值与曝光时间有关（详见第 3 章），要求暗场测量时在每个曝光时间拍摄两幅图像用来计算暗场灰度值的平均值和方差。

6.6 基于光子转移方法的测量评估

如第二章所述，应用光子转移法和进行量子效率计算，均需要同时测量单个像元在以光子数/像元为单位的辐照度下的平均灰度和时域方差。以下是平均灰度值和方差的计算：

平均灰度值：明场时，在每种辐照度条件下，传感器有效面积的 N 个像元的平均灰度值 μ_y 可以由两幅 $M \times N$ 图像 y^A 与 y^B 的 i 行和 j 列取平均计算得到：

$$\mu_y = \frac{1}{2NM} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (y^A[m][n] + y^B[m][n]) \quad (28)$$

同理，也可以通过计算得到暗场的平均灰度值 $\mu_{y.dark}$ 。

灰度值的时域方差：一般情况下，时域噪声的计算要求拍摄更多的图像。然而，根据第一章中关于噪声源的静止、均匀性假设，通过计算两幅图像方差的均值是足够的：

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2NM} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (y^A[m][n] - y^B[m][n])^2 \quad (29)$$

由于两个变量差值的方差是两个变量方差之和，故（29）式中计算方差时出现了除以 2 的运算。

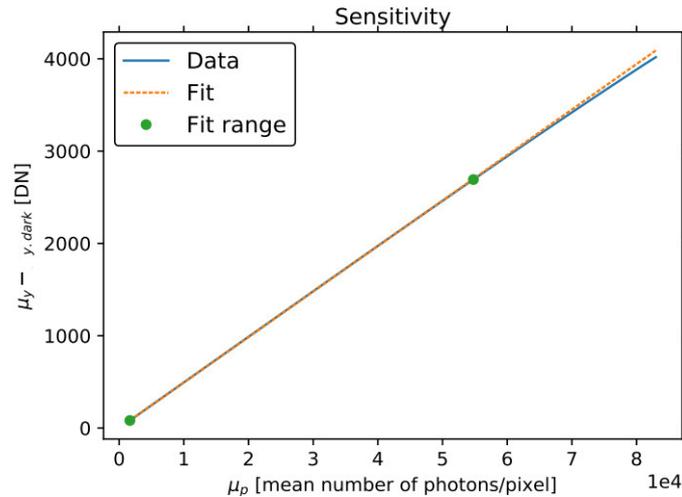


图 5：测定相机响应度 $R=K\eta$ 的测量曲线示例。这张图画出了测量的由平均光诱导所产生的灰度值 $\mu_y - \mu_{y.dark}$ 与辐照度 H （光子/像素）的关系， H 的单位是光子数/像元，线性回归关系为 $R=K\eta$ 。图中绿点标记的是饱和值 0~70% 范围内的线性回归关系。对于彩色相机，图中必须包含每个色彩通道的数据。如果辐射量通过曝光时间改变（详见第 6.3 节方法 I），那么必须提供表示曝光时间 t_{exp} 与 $\mu_{y.dark}$ 关系的第二张图。

根据光子转移方法，推导出来的性能参数有：

饱和灰度值 $\mu_{y.sat}$ ：饱和灰度值 $\mu_{y.sat}$ 是指时域标准差 σ_y 取最大值时的平均灰度值（如图 6 中的绿色小方块所示）。推荐采用如下程序来找到此值：从光子转移曲线的最右侧开始搜索，第一个满足其左侧相邻的连续两个点的值都小于当前值的点，确定为“饱和点”。对于一个平滑的光子转移曲线来说，它与方差最大的点是一致的。其它有确定值的合理的算法也可以使用，但所使用的算法必须被明示，且在 EMVA 网站(www.emva.org)上发表的参考数据组中使用此算法时，所得到的结果必须与官方公示结果一致。

响应度 $R=K\eta$ ：根据（6）式，零偏置时，下面关系式的斜率给出响应度为

$$\mu_y - \mu_{y.dark} = R\mu_p$$

该线性回归曲线所使用的所有的数据点必须位于最小灰度值与 70% 饱和 $(0.7 \cdot (\mu_{y.sat} - \mu_{y.dark}))$ 范围内，如图 5 所示。

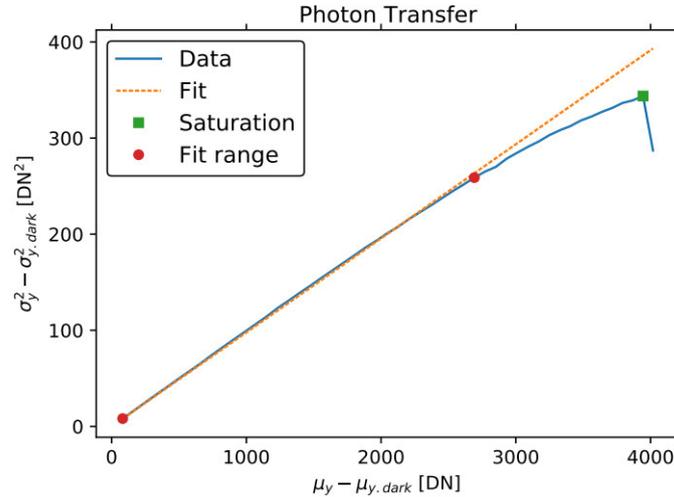


图 6：测定相机全局系统增益 K 的测量曲线示例（光子转移曲线）。图中画出了光诱导方差 $\sigma_y^2 - \sigma_{y, dark}^2$ 与平均光诱导灰度值 $\mu_y - \mu_{y, dark}$ 之间的线性回归关系曲线，可以用来确定全局系统增益 K 。红点³标识了用于线性回归的位于 0 到 70% 饱和的数据范围。图中以百分比标出了系统增益 k 的 1 倍 σ 的统计不确定度⁴，它是在线性回归计算时得到的。

系统增益 K ：根据公式 (9)，零偏置时，下面关系式的斜率给出绝对增益因子 K ：

$$\sigma_y^2 - \sigma_{y, dark}^2 = K(\mu_y - \mu_{y, dark})$$

选择与响应度评估所使用的相同的数据范围（如图 6 所示）来计算 $\sigma_y^2 - \sigma_{y, dark}^2$ 与 $\mu_y - \mu_{y, dark}$ 的最小二乘法回归曲线，其斜率即为系统增益 K 。

量子效率 η ：量子效率 η 是响应度 $R = K\eta$ 与系统增益 K 的比值：

$$\eta = \frac{R}{K} \quad (30)$$

对于黑白相机，量子效率可以用带宽小于 50 nm 的单波段进行测量。由于彩色相机需要对各色通道进行全面的测量，所以各色通道在每个波段下的量子效率都需要测定和报告。对于采用彩色滤光模板的彩色相机，重复模板中的每个像元的位置都必须分别分析。例如对于贝尔模板的彩色相机，一共要测量四个彩色通道：通常是两个独立的绿色通道、一个蓝色通道和一个红色通道。

时域暗噪声：需要计算两个值。

³ 译者注：英文原文写的绿 (Green) 点，实际应该是红点，小绿方块是饱和点。

⁴ 译者注：英文 R3.0 版中有此统计不确定性数据 $K=0.098 \pm 0.2\%$ ，但 R3.1 版图中没有。

- 1、 在第 6.3 节的曝光时间可变测量方法 I 中，时域暗噪声是 $\sigma_{y.dark}^2$ 对曝光时间的线性关系曲线的截距。采用 6.3 节的测量方法 II 和 III 时，需要进行最小曝光时间的附加测量来估计 $\sigma_{y.dark}$ 。用这个最小值来计算动态范围。这个值给出了一个给定数字分辨率和具有量化噪声的相机的实际性能。
- 2、 为了计算以 e⁻为单位的时域暗噪声（不考虑量化噪声的），减去量化噪声有：

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_{y.dark}^2 - \sigma_q^2} / K \quad (31)$$

当 $\sigma_{y.dark}^2 < 0.24$ 时，时域噪声主要由量化噪声所主导，并且没有可靠的评估方法（参见 C.4 节）。在此条件下， $\sigma_{y.dark}$ 必须被设置为 0.49，不考虑量化效应，以 e⁻为单位，时域暗噪声取上限值：

$$\sigma_d < \frac{0.40}{K} \quad (32)$$

绝对灵敏度阈值 $\mu_{p.min}$ ：根据 2.4 节的 (17) 式，可以计算得到绝对灵敏度阈值 $\mu_{p.min}$ 。

饱和容量 $\mu_{p.sat}$ ：饱和容量 $\mu_{p.sat}$ 为灰度值方差与光子数关系曲线最大值点对应的光子数。以电子为单位的饱和容量 $\mu_{e.sat}$ 由 (14) 式计算。

信噪比 (SNR)：根据公式 (10)，所测量的灰度平均值和方差可用于计算实际的信噪比。将测量得到的量子效率 η ，暗场噪声 σ_d ，量化噪声 σ_q 代入公式(11) 可计算得到线性模型下的理论信噪比；将这两套信噪比数据画在双对数坐标图中（如图 7）。此外，还可以计算饱和辐射量时的最大信噪比：

$$SNR_{max} = \sqrt{\mu_{e.sat}} \quad (33)$$

其单位为 dB($20\log_{10}SNR$)和 bits(\log_2SNR)。

动态范围 DR：根据 2.4 部分 (18) 式的定义，可以计算动态范围，单位为 dB($20\log_{10}DR$)和 bits(\log_2DR)。

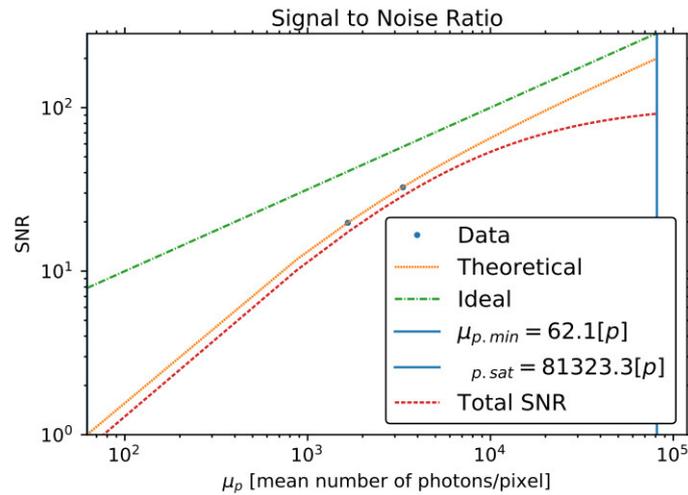


图 7: SNR 曲线图示例。图中包含 SNR 测量值, 根据线性响应相机的模型公式 (11) 式和测定的 σ_d^2 和 η 值得到的理论曲线, 根据公式 (48) 计算得到的包含 DSNU 与 PRNU 效应的总的信噪比曲线, 由理想传感器模型公式 (13) 在没有暗噪声和量化噪声, 且量子效率为 1 条件下得到的 SNR 曲线。图中垂直的虚线标注的是绝对灵敏度阈值和饱和容量。

6.7 线性度的评估

根据 6.5 节, 线性度评估至少要使用 9 组平均灰度值 $\mu_y [i]$ 和辐照度值 $H[i]$ 。采用最小相对偏差的原则通过最小二乘线性回归来确定其线性关系:

$$y = a_0 + a_1 H \quad (34)$$

其中 a_0 是截距, a_1 是斜率, 如图 8a。在下列方程中将使用 $y[i] = \mu_y [i] - \mu_{y, dark} [i]$ ⁵。因为我们要使相对偏差最小, 所以不是让:

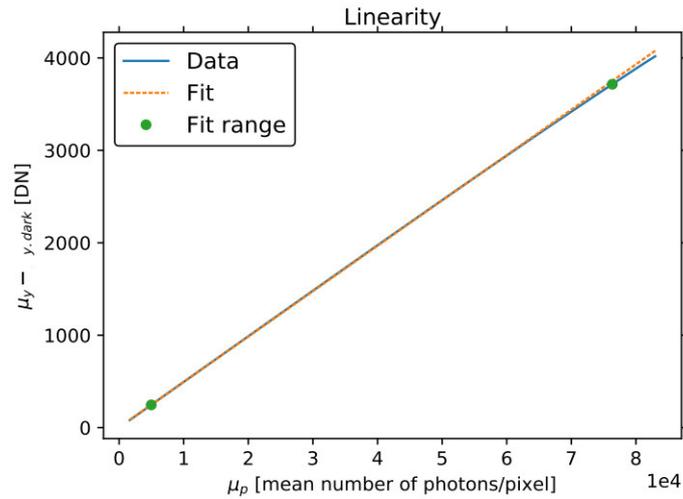
$$\sum_i [y[i] - (a_0 + a_1 H[i])]^2$$

最小, 而是让下式最小:

$$\sum_i \frac{1}{y[i]^2} [y[i] - (a_0 + a_1 H[i])]^2$$

⁵ 这里的暗场均值使用了 i , 它只对 6.3 节中方法 I 有意义, 对方法 II 与 III, 则直接使用 $\mu_{y, dark}$

a



b

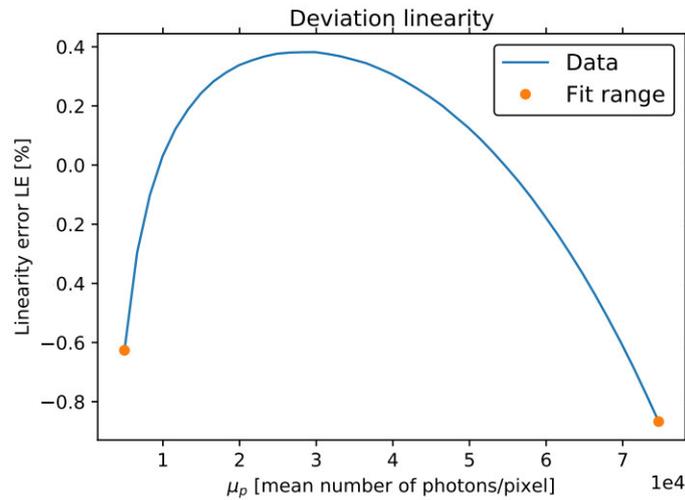


图 8：线性度评估示例：a.灰度值与暗场值之差与辐照度的关系曲线，及包含整个测量范围的线性回归曲线。两个绿点标记出了用来进行线性回归计算的 5%~95%饱和范围。 b.由线性回归曲线的偏离量来确定线性误差 LE。图中以两个圆点标示出了饱和的 5%到 95%范围，在此范围内参照公式 (38) 与 (39) 来计算最大与最小误差。

这相当于是一个加权最小二乘线性回归方法，其中 $y[i]$ 的权重是 $1/y[i]^2$ 。由此可采用最小二乘法数学公式得到计算截距 a_0 与斜率 a_1 的计算公式：

$$a_0 = \frac{1}{\Delta} [\sum H[i] / y[i] \sum H[i] / y[i]^2 - \sum H[i]^2 / y[i]^2 \sum 1/y[i]] \quad (35)$$

与

$$a_1 = \frac{1}{\Delta} [\sum H[i] / y[i]^2 \sum 1/y[i] - \sum H[i] / y[i] \sum 1/y[i]^2] \quad (36)$$

其中：

$$\Delta = (\sum H[i] / y[i]^2)^2 - \sum H[i]^2 / y[i]^2 \sum 1 / y[i]^2 \quad (37)$$

本节中所有的计算只取 5%到 95%饱和范围($\mu_{y.sat}-\mu_{y.dark}$)内的 $y[i]$ 与 $H[i]$ 值。

采用此回归算法，测量值的相对偏差计算公式为：

$$\delta_y[i][\%] = 100 \frac{y[i] - (a_0 + a_1 H[i])}{a_0 + a_1 H[i]} \quad (38)$$

线性误差则被定义为 5%到 95%饱和范围内的最大与最小偏差：

$$LE_{max} = \max(\delta_y) \quad \text{与} \quad LE_{min} = \min(\delta_y) \quad (39)$$

这也就定义了相对于线性回归线的正负偏差最大值。

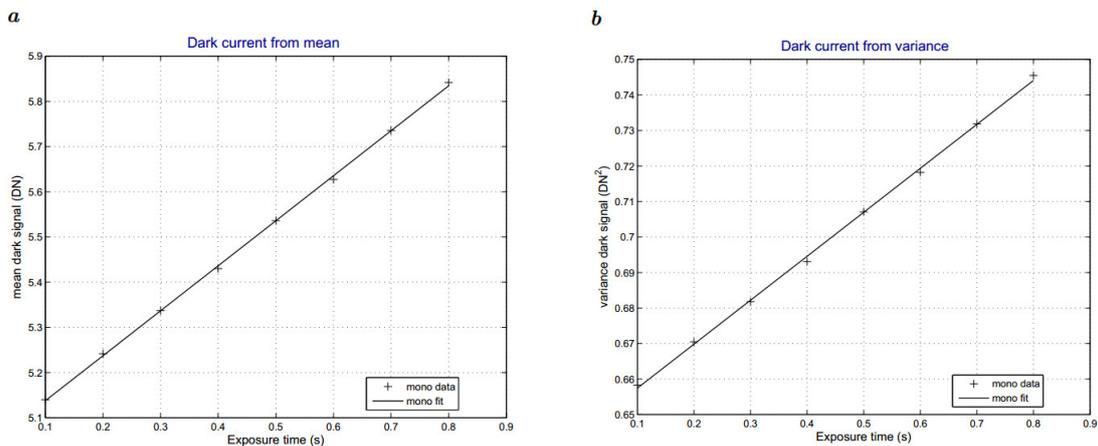


图 9：暗电流测量示例：暗场灰度与方差值对曝光时间的关系曲线及其线性回归线

7 暗电流的测量方法

7.1 一定温度下暗电流的评估

暗电流测量要求没有光源照射。由第 3 章的公式 (19) 和 (20) 可知，暗电流可以通过随曝光时间线性增加的暗场灰度值 (y_{dark}) 的均值或方差来测量。当然，首选暗场均值法，因为均值法比方差法对暗电流的估计更为准确。但是，如果相机有暗电流补偿的话，暗电流只能用方差法来估计。

测量暗电流时，至少要选择 6 个等间隔的曝光时间。如果暗电流很小，则需选择比灵敏度、线性度和噪声测量长得多的曝光时间。

测量得到暗场平均灰度值或者暗场灰度值方差与曝光时间线性关系曲线(图 9)后，就可以由这两种曲线的斜率给出暗电流。由测量的暗场灰度值线性回归直接得到的暗电流单位为 DN/s。利用测定的增益 K (单位 DN/ e^-) 可以把暗电流

单位转换为 e^-/s 。

如果相机曝光时间不能设置的足够长，则无法获得有意义的暗电流数值，由线性回归得到的这个值连同 1σ 误差也必须报告。这种情况下，如果 $\mu_I + \sigma_I > 0$ ，至少可以给出一个暗电流的上限。而自动饱和曝光时间也有个下限，即：

$$t_{sat} > \frac{\mu_{e.sat}}{\mu_I + \sigma_I} \quad (40)$$

7.2 不同温度下暗电流的评估

暗电流的加倍温差是采用上述方法在不同壳体温度下测量得到的暗电流所确定的，测量范围应该包含相机工作的整个温度范围。将相机感光口遮住，放置在一个温度控制箱内或通过其他方式控制测试温度，把壳体温度控制到下一次测量所需要的温度值。对于内部有温度控制和图像传感器制冷功能的相机，则不需要采用温箱，其暗电流的温度依赖性只能在相机可正常工作的温度范围内进行测试。

每次温度变化后，需要等待相机稳定后再进行测量。通过连续地监测相机在最大曝光时间时的暗场值，可以很容易判断相机温度是否已经稳定。在每个温度时，如第 7.1 节所述，通过改变曝光时间进行一系列的测试来得到暗电流。

为了确定暗电流加倍温差，必须画出温度 T 与暗电流对数之间的关系曲线。根据公式 (21)，可以得到一个线性关系式：

$$\log_{10}\mu_I = \log_{10}\mu_{I.ref} + \log_{10}2 \cdot \frac{T - T_{ref}}{T_d} \quad (41)$$

以上线性回归曲线的斜率 $\log_{10}2/a_1$ 的 a_1 就是暗电流加倍温差 T_d 。

8 空间非均匀性和缺陷像素的检测方法

测量空间非均匀性和缺陷像素特征值所使用的设备与第六章描述的测量灵敏度、线性度和噪声的设备相同。因此两者的基本测量条件是一样的(见 6.5 节)。

所有描述非均匀性的量都必须采用多幅图像的均值得到。这是因为时域噪声的值 ($\sigma_y \approx 1\%$) 一般都大于空域参数变化的方差 ($S_y \approx 0.3-0.5\%$)。采用 L 幅图像的平均值可以抑制时域噪声。

典型数据指出至少需要采集 $L=16$ 幅图像 y 的序列，这样平均以后 s_y^2 才能大于 σ_y^2 / L 。选取较少数量的图像平均使该方法可以用于快速在线检测。然而，最好将时域噪声的值抑制到不再影响空域噪声的标准差，一般来说这就要求采用 $L=100\sim 400$ 幅图像进行平均：

$$\langle y \rangle = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} y[l] \quad (42)$$

对一系列的暗场图像与 50%饱和图像使用此方法来分别得到 $\langle y_{dark} \rangle$ 与 $\langle y_{50} \rangle$ 。

8.1 空域噪声标准差、DSNU、PRNU 及总信噪比

由公式 (23) 与 (24) 知道, L 幅图像平均的测量方差是由空域噪声与时域噪声残留方差之和组成的。空域噪声可以由测量方差减去时域噪声残留方差得出:

$$s_y^2 = s_{y.measured}^2 - s_{y.stack}^2/L \quad (43)$$

时域噪声的方差必须按下式由相同的 L 幅图像序列 $y[l]$ 对每个像元方差的平均进行计算获得:

$$\sigma_{s[m][n]}^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} \left(y[l][m][n] - \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} y[l][m][n] \right)^2 \text{ 与 } \sigma_{y.stack}^2 = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \sigma_{s[m][n]}^2 \quad (44)$$

然后, $DSNU_{1288}$ 和 $PRNU_{1288}$ 的值可以通过第 4.1 节的公式 25 求得:

$$DSNU_{1288} = \frac{s_{y.dark}}{K} \quad (\text{单位 } e^-) \quad (45)$$

和

$$PRNU_{1288} = \frac{\sqrt{s_{y.50}^2 - s_{y.dark}^2}}{\mu_{y.50} - \mu_{y.dark}} \quad (\text{单位 } \%) \quad (46)$$

$DSNU_{1288}$ 与 $PRNU_{1288}$ 代表的空间非均匀性可以被当成“噪声”加入到 SNR 中从而形成“总信噪比”。由公式 (46) 中 $PRNU_{1288}$ 的定义, 方差 s_y^2 可以被表示为:

$$s_y^2 = s_{y.dark}^2 + (PRNU_{1288})^2 (\mu_y - \mu_{y.dark})^2$$

利用公式 (45) 中 $DSNU_{1288}$ 的定义, 并根据公式 (6) 将灰度均值用平均光子数来代替, 则用以 DN^2 为单位的空域非均匀性方差:

$$s_y^2 = K^2 (DSNU_{1288})^2 + (PRNU_{1288})^2 K^2 (\eta \mu_p)^2 \quad (47)$$

将以电子为单位的空域非均匀性方差 s_y^2/K^2 (单位 e^-) 加入 SNR 公式中就得到总信噪比 (Total SNR) 计算公式:

$$SNR(\mu_p) = \frac{\eta \mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + (DSNU_{1288})^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2} + \eta \mu_p + (PRNU_{1288})^2 (\eta \mu_p)^2}} \quad (48)$$

按此公式模型计算得到的总信噪比被加入到了图 7 的信噪比曲线中。

8.2 水平和垂直频谱

基于 DSNU 图 $\langle y_{dark} \rangle$ 与 PRNU 图 $\langle y_{50} \rangle - \langle y_{dark} \rangle$ 来计算频谱图。50%饱和图像的频谱图也可以计算，但非强制要求。水平谱的计算步骤如下：

1. 二维图像 y 减去均值；
2. 计算每一行矢量 $y[m]$ 的傅里叶变换：

$$\hat{y}[m][v] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y[m][n] \exp\left(-\frac{2\pi i n v}{N}\right) \quad \text{for } 0 \leq v < N \quad (49)$$

3. 计算所有 M 行的频谱功率的平均值 $p[v]$ ：

$$p[v] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \hat{y}[m][v] \hat{y}^*[m][v] \quad (50)$$

以上公式中的上标*代表的复数共轭。根据公式（50）可以计算光功率谱，采用这样的方式计算白噪声的功率谱可以得到一条平的功率谱，它和空域噪声方差的平均值 S_y^2 相一致。

频谱图中画出了光功率谱的均方根 $\sqrt{p[v]}$ 对空间频率 v/N (周期/像素) 的曲线。图中的空间频率只画出来 $v=0 \sim N/2$ (奈奎斯特频率) 内的一半曲线，这是因为功率谱是偶对称的：

$$p[N-v] = p[v] \quad \forall v \in [1, \frac{N}{2}]$$

在这些图中，空域白噪声的标准差和白噪声的大小直接相关。请注意在光功率图中波峰的值并不等于相应空间频率周期性特征的峰值。这些周期性特征的幅值 a 可以通过将在功率谱中属于该峰的功率谱累加得到：

$$a = 2 \left(\frac{1}{N} \sum_{v_{min}}^{v_{max}} p[v] \right)^{1/2} \quad (51)$$

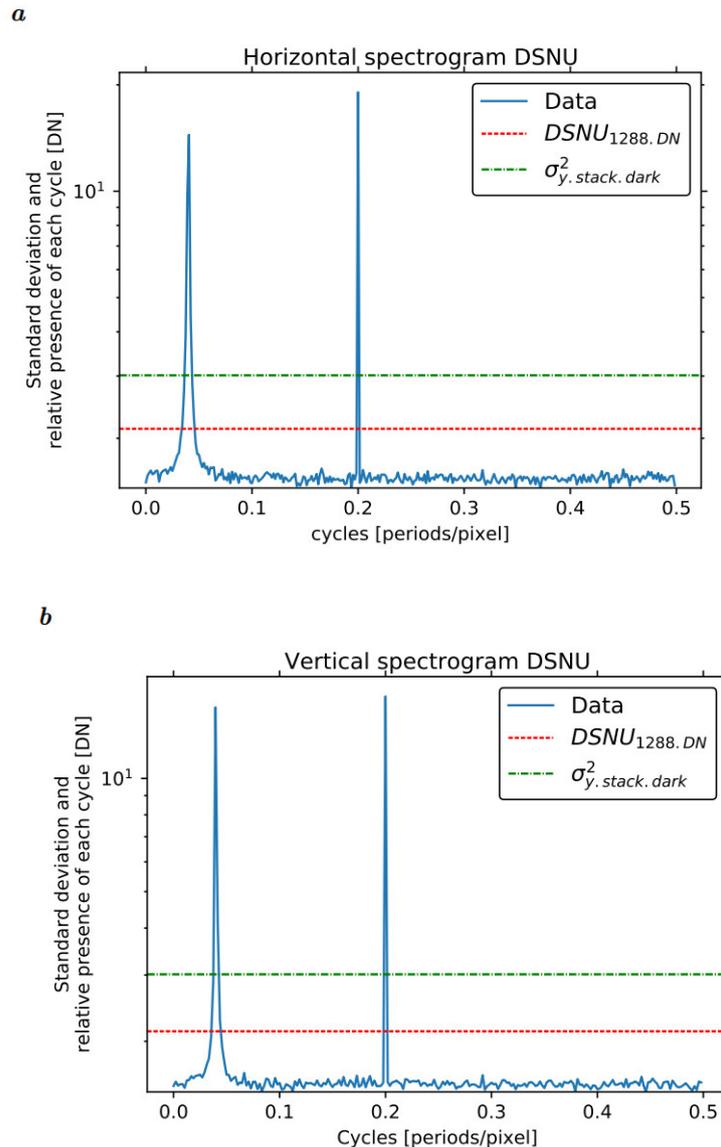
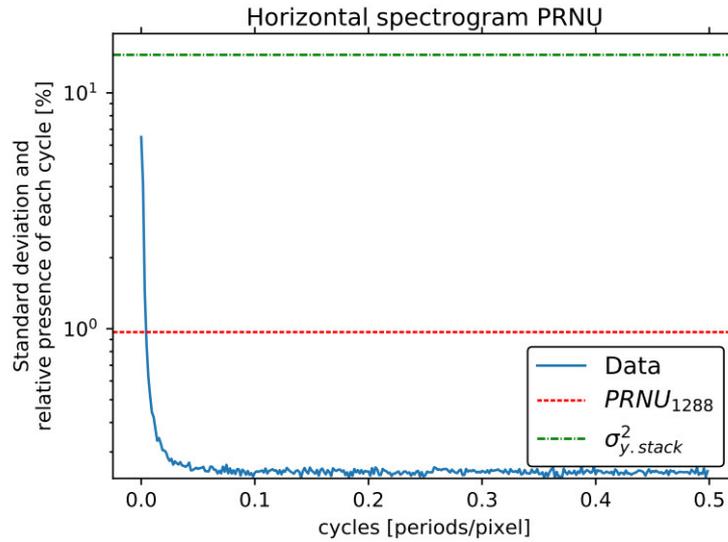


图 10: 暗场图像的谱图举例: a 水平谱图 b 垂直谱图。

对于垂直频谱图（仅限于面阵相机），采用同样的方法计算（图 10b 和图 11b），只是行和列必须互相交换。

4. 把 $DSNU_{1288}$ （公式 45）与 $PRNU_{1288}$ （公式 46）加入到相应的频谱图中（图 10 与图 11）。由于 $PRNU_{1288}$ （公式 46）是相对于均值的一个相对值，所以功率谱与时域噪声（见下一项）都要除以图像均值。
5. 再在图中（图 10 与图 11）以一条水平线加入时域噪声 $\sigma_{y.stack}$ （公式 44），这样就很容易对时域噪声和空域噪声进行对比。
6. 对于空域方差的白噪声部分， $S_{y.white}^2$ ，由功率谱中值给出。这个中值可以方便地计算出来，通过将向量 \mathbf{P} 中的 N 个数值按照升序重新排列得到一个新的向量 \mathbf{P}_{sorted} ，所需中值就是新向量的中间值 $\mathbf{P}_{sorted} [N/2]$ 。

a



b

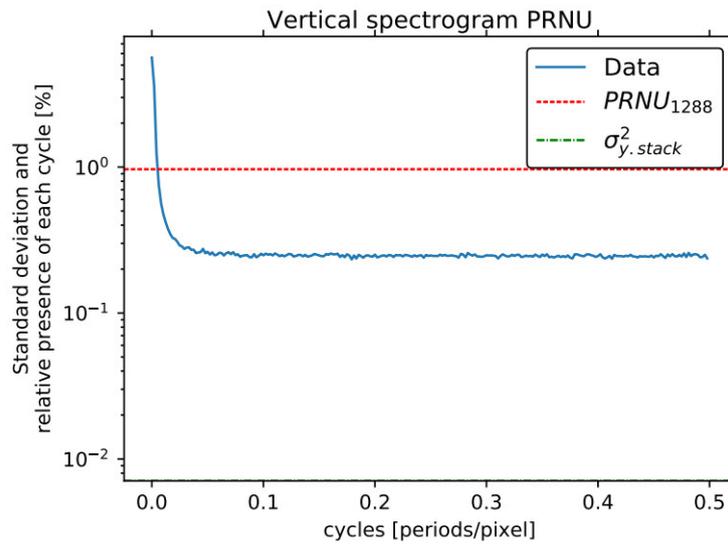


图 11: 光电响应的谱图举例: a 水平谱图 b 垂直谱图。

8.3 水平与垂直断面图

空间非均匀性通过 DSNU 与 PRNU 的水平与垂直断面图来进一步描述。总共 4 张图，每张图包含 4 个断面（例如图 12）。

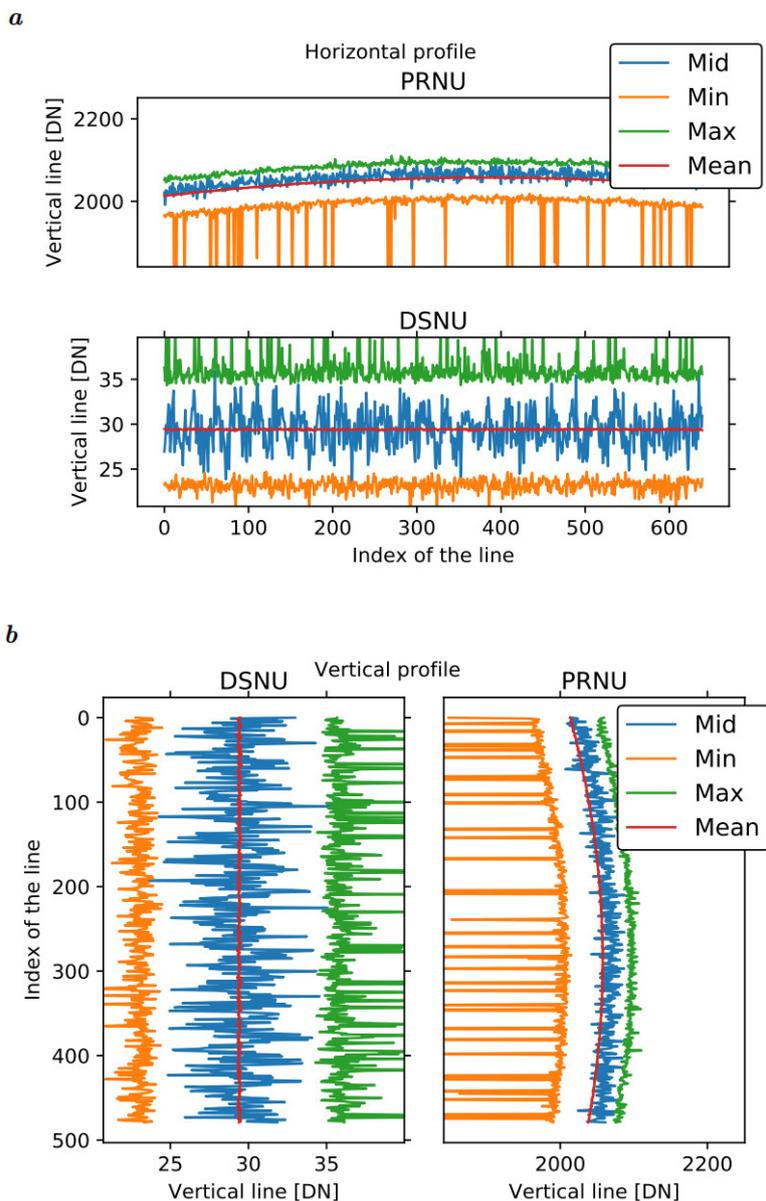


图 12: 断面图示例: a 水平断面图 b 垂直断面图

- **中间值 (middle):** 位于图像正中间的第 $M/2$ 水平行 (或垂直的第 $N/2$ 列)。正确的行或列号的计算方法是: 从 0 开始计数, 取比 $M/2$ (或 $N/2$) 小的最大整数。
- **平均值 (mean):** 所有行 (或列) 的均值。
- **最大值 (max):** 所有行 (或列) 中每一个水平 (或垂直) 位置的最大值。此断面图能很好的显示出可能仅有几个像素的过大的缺陷点, 例如 DSNU 图中的热像素。
- **最小值 (min):** 所有行 (或列) 中每一个水平 (或垂直) 位置的最小值。此断面图能很好的显示出可能仅有几个像素的灰度值太小的缺陷点, 例如 PRNU 图中的光不敏感像素。

所有的断面图直接采用 4.1 节中的暗场均值图像 $\langle y_{\text{dark}} \rangle$ 与 PRNU 图像 $\langle y_{50} \rangle - \langle y_{\text{dark}} \rangle$ 来进行计算，不进行诸如高通滤波之类的任何校正。

断面图的取值范围设置方法如下：

- **DSNU 断面图：**以最小值断面均值的 0.9 倍为下限值，以最大值断面均值的 1.1 倍为上限值。
- **PRNU 断面图：**以均值断面均值的 0.9 倍为下限值，以均值断面均值的 1.1 倍为上限值。

DSNU 与 PRNU 断面图均以 DN 为坐标轴单位。

8.4 缺陷像元特征评估

在评价 PRNU 图像 $\langle y_{50} \rangle - \langle y_{\text{dark}} \rangle$ 之前，该图像必须按照第 4.4 节和附录 C.5 进行高通滤波处理。评价 DSNU 图像 $\langle y_{\text{dark}} \rangle$ 不应进行高通滤波。

每一幅图像的平均和高通滤波非均匀图像 y 的对数直方图计算步骤如下。建议采用以下方法以获得最优平滑直方图。它基于非均匀性图像是由 L 幅整数值的图像取平均而得到的这一个简单事实，因此这些图像的灰度值一定都是 $1/L$ 的整数倍，最优区间宽度也就应该取 $1/L$ 的整数倍⁶。

1. 计算图像 y 的最小值和最大值 y_{\min} 和 y_{\max} 。
2. 把 y_{\min} 与 y_{\max} 之间的区间分成 $Q = \frac{L(y_{\max} - y_{\min})}{I} + 1$ 份相等间隔的段，每段的最优化间隔是 I/L 。 I 为正整数，且小于或等于 256，可以采用如下公式计算得到：

$$I = \text{floor} \left[\frac{L(y_{\max} - y_{\min})}{256} \right] + 1 \quad (52)$$

3. 采用以上分段方法来计算图像中所有像素的灰度直方图，不同灰度值对应的分段位置采用下式计算：

$$q = \text{floor} \left[\frac{L(y - y_{\min})}{I} \right] \quad (53)$$

采用这种方法，直方图中的全部 Q 段（编号为 $0 \sim Q-1$ ）所包含的灰度范围为 y_{\min} 到 $y_{\max} + (I-1)/L$ 。

计算与平均值的偏差时用这些分段的中间值：

$$y[q] = y_{\min} + \frac{I-1}{2L} + q \frac{I}{L} \quad (54)$$

⁶ 译者注：原文英文版中此处为“ L 的整数倍”，译者认为有错，将其改为了“ $1/L$ 的整数倍”。

4. 画出半对数直方图。x 轴采用每段相对于均值的偏差，y 轴值必须从小于 1 的值开始，这样就可以观测到单个的缺陷像素。⁷
5. 以虚线的形式加上和非白均匀性方差 s_{nw}^2 一致的正态概率密度分布到直方图中，对分段宽度为 I/L 的 $M \times N$ 像素的图像，其分布为：

$$p_{normal}[q] = \frac{1}{L} \cdot \frac{NM}{\sqrt{2\pi}s_{nw}} \cdot \exp\left(-\frac{y[q]^2}{2s_{nw}^2}\right) \quad (55)$$

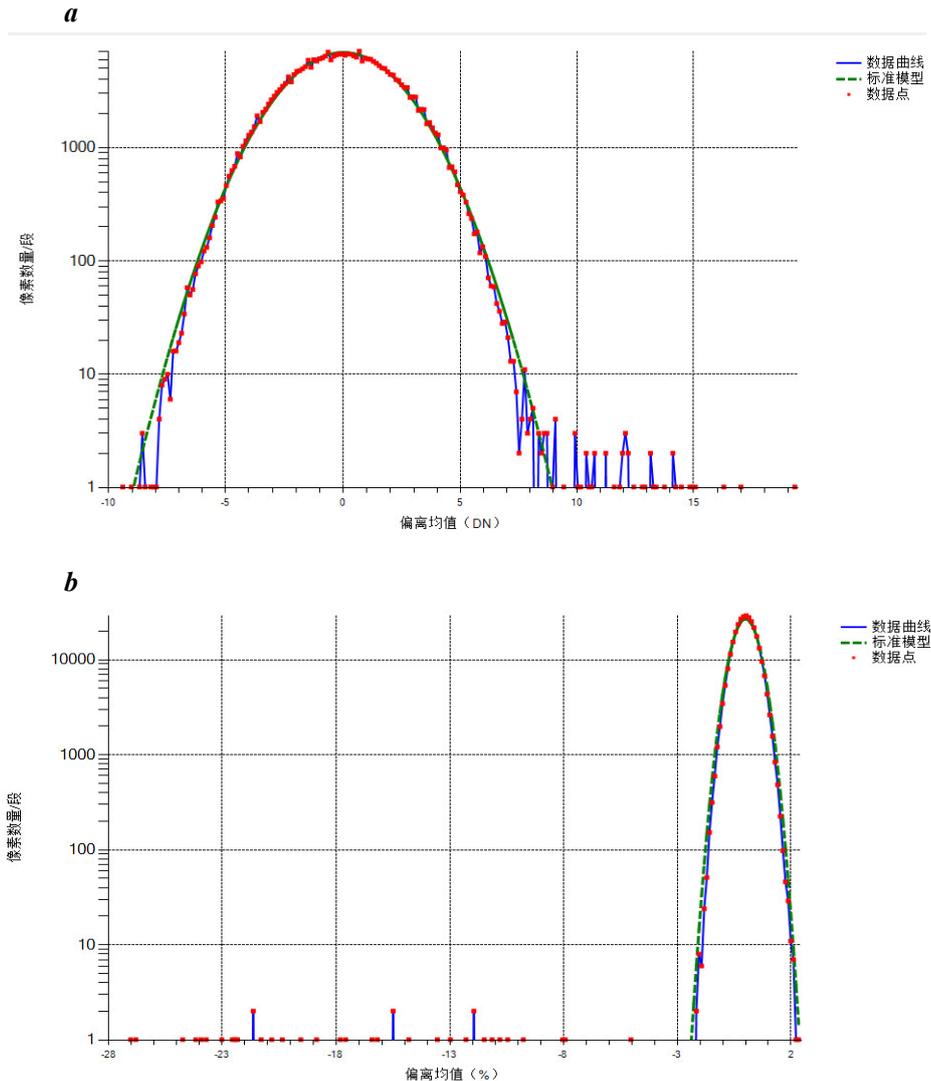


图 13：对数直方图举例：**a** 为暗场信号非均匀性(DSNU)对数直方图，**b** 光响应非均匀性(PRNU)对数直方图。虚线是根据公式 55 计算的正态概率密度分布模型，模型中的标准方差为非白噪声标准方差 s_{nw} 。

⁷ **译者注：**要在图上能有效显示计数为 1 的缺陷像素，英文版标准要求 y 轴值从小于 1 的值开始，但英文标准中的图 13a 实际是从 1 开始的，以原图的显示方式未能成功显示出计数为 1 的缺陷像素。同时原版标准中图 13a、图 13b、图 14a、图 14b 的横坐标均有错误，因此译者将中文版的这 4 张图使用了 ez1288 (www.ez1288.com) 由官方图像集生成的坐标正确的图来替代。图中纵坐标最小值仍然为 1，但增加了“数据点”显示方式，从而有效地显示出了计数为 1 的单个缺陷像素。

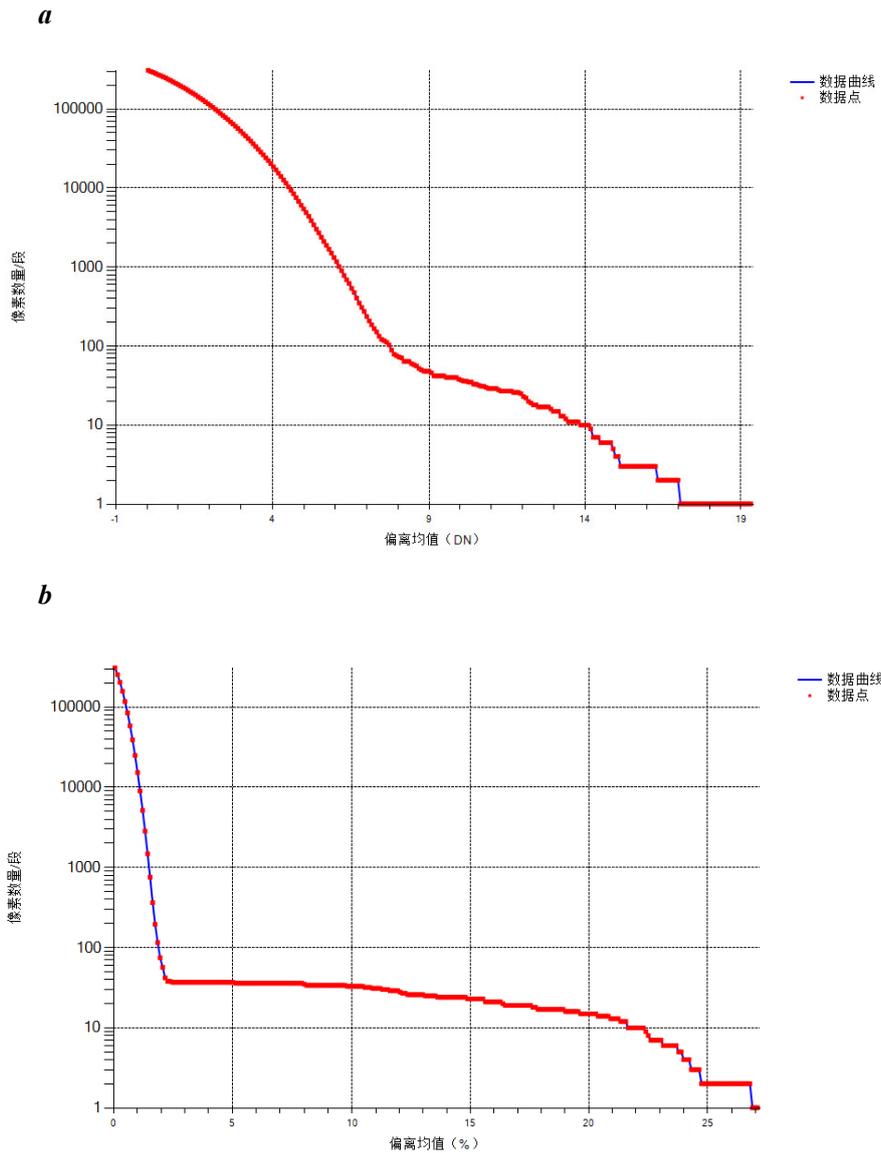


图 14: 累计对数直方图举例: **a** 暗场信号非均匀性 (DSNU) 累计对数直方图, **b** 光响应非均匀性 (PRNU) 累计对数直方图。

累计对数直方图给出了与平均值之间绝对偏差的概率分布(概率密度函数的积分)。因此, 累积对数直方图给出了与平均值存在一些绝对偏差的像元数和绝对偏差的关系, 计算包括以下步骤:

1. 将非均匀图像 y 减去平均值并取绝对值:

$$y' = |y - \mu_y| \quad (56)$$

2. 求出 y' 的最大值 y'_{max} ; 最小值是 0。余下的计算步骤与前面计算非累加直方图的方法是一样的, 只是把最小值 y_{min} 换成 0, 最大值 y_{max} 换成 y'_{max} 。
3. 将最大值与 0 之间至少分成 $Q = Ly'_{max}/I + 1$ 个宽度同为 I/L 的段, 其中 I 为满足如下条件的小于或等于 256 正整数:

$$I = \text{floor} \left[\frac{L y'_{max}}{256} \right] + 1 \quad (57)$$

4. 按以上分段对全图所有像素值进行直方图统计，灰度值与段号的对应关系如下：

$$q = \text{floor} \left(\frac{L y'}{I} \right) \quad (58)$$

计算相对于均值偏差时使用每段各自的均值：

$$y'[q] = \frac{I-1}{2L} + q \frac{I}{L} \quad (59)$$

5. 计算累计直方图：如果 $h[q']$ 是直方图的 Q 值，则累计直方图的值可以表示为：

$$H[q] = \sum_{q'=q}^Q h[q'] \quad (60)$$

6. 画出累计直方图 $H[q]$ 对 $y'[q]$ 的半对数曲线。用每组值相对应的平均值作为 x 轴，为了能够观测到单个的缺陷像素， y 轴的值必须从小于 1 的值开始。

DSNU 和 PRNU 的对数直方图和累计对数直方图都通过计算并绘出，图 11 和图 12 共给出了四幅图例。

9 光谱灵敏度的测试方法

9.1 光谱光源设置

量子效率的光谱依赖性的测试需要单独的实验设备，即需要一个可以扫描一定波段范围的光源。这种设备可以是一个具有宽频段光源的单色仪或者一个可以通过其他任何手段进行不同波长切换的光源。应用合适的光学设备去确认光源是否具有如第 6.1 节描述的那样的几何特性，即直径 D 的光源必须均匀照射到传感器的阵列或标定光电二极管上，而传感器与光源的距离 d 须满足 $d = 8D$ 并且 $D' \leq D$ 。如果选择了不同的孔径 d/D ，则必须在报告中注明。设置整个系统使测试时所使用的所有波长的光子辐照度基本相同对测试是有益的。

光谱测量要求相当高，由于很难做到整个传感器的均匀照射，因此只用传感器的部分区域来进行光谱测试也是允许的。

9.2 测试条件

本节总结了测试条件。

传感器区域：指定传感器中用于测试的区域（全部、一半或...）；

操作点：本测试的操作点必须与其它所有测试的操作点保持一致。

带宽：光源的半峰全宽（英文全称 full width at half maximum，英文简写 FWHM）的带宽需要小于 10 nm。如果技术上做不到如此狭窄的半峰全宽，那么半峰全宽的带宽可以放宽到 50 nm。半峰全宽值一定要记录到测试报告上。需要注意的是，根据 ISO13655 和 CIE15.2 的规定，如果半峰全宽大于 10 nm，将不可能对彩色传感器进行色彩还原评价。有些图像传感器的量子效率随着光源波长的变化呈现明显的震荡（图 13）。如果这种震荡出现，各传感器之间的量子效率峰值的位置会有所不同。因此，只要描述了滤波过程和滤波宽度，是允许进行平滑的。

波长范围：扫描的波长范围应该覆盖传感器所能响应的全部的波长。一般地，要至少包含从 350 nm 到 1100 nm 的波长范围。对于紫外敏感的传感器，波长范围应该相应扩展到更低的波长，一般会低到 200 nm。如果技术可行，测试点数量的选择必须满足：没有缝隙地覆盖整个波长范围。这就意味着相邻的测试波长距离要小于或等于两倍的半峰全宽。

信号范围：务必调节曝光时间到一个设定值，以保证在所有波长下都可以获得足够大的信号输出。如果对于不同的波长，光源的辐射量呈现很大的变化，则需要采用不同的曝光时间进行多次光谱扫描。在每个波长的测试前后以及每个曝光时间，都需要采集一幅暗场图像。

9.3 校准

实验设备的校准与单色仪的校准一致（见第 6.4 节）。校准时用一个标定好的光电二极管放置于图像传感器的位置进行测量。通过测试传感器表面所在位置的辐照度，再依据公式（2）可计算得到在曝光时间内的入射光子数 $\mu_p(\lambda)$ 。

9.4 评价

经测定的波长与量子效率的相关性是传感器全部像元或是选定区域像元的平均值。对于彩色相机，光谱响应的评价必须对所有颜色分别进行评价，方式与第 6.6 节结尾处描述的一样。

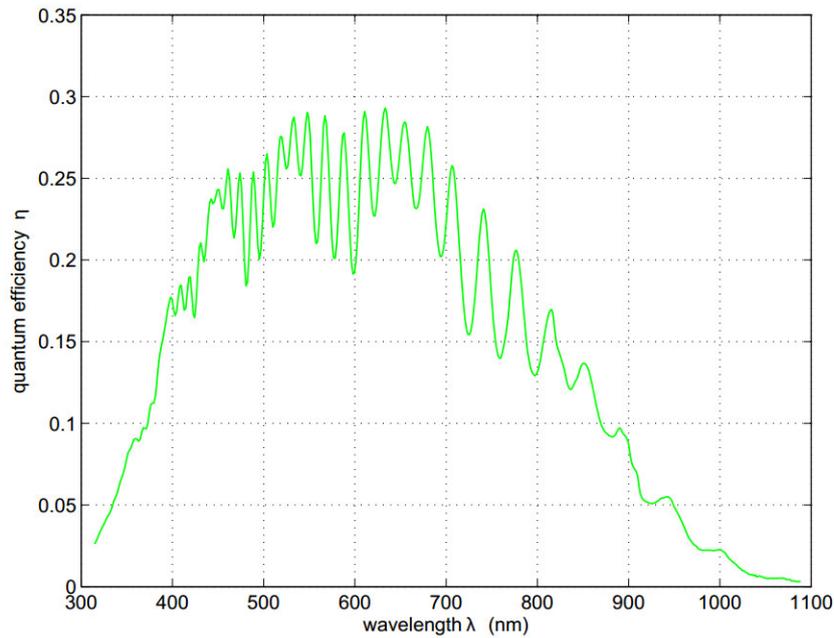


图 15: 量子效率的光谱测试例子, 测试范围 300~1100 nm, 半峰全宽 10 nm, 无平滑。

对各选定波长的评价过程包括以下步骤:

1. 计算光谱测试图的灰度均值。
2. 从光谱测试图的灰度均值中减去暗场的灰度均值。
3. 除以全局系统增益 K 得到电荷值。其中, K 值通过第 6.6 节描述的线性度与灵敏度测量方式, 在相同工作条件下计算得到。
4. 除以通过第 9.3 节的光谱校正曲线进行过校正的光子均值 $\mu_p(\lambda)$, 最后获得量子效率:

$$\eta(\lambda) = \frac{\mu_y(\lambda) - \mu_{y.dark}}{K \cdot \mu_p(\lambda)} \quad (61)$$

图 15 为一个示例曲线。

10 测试结果发布

本节阐述了任何一个相机必须提供的基本信息以及冠名 EMVA 1228 必须提供的数据。

10.1 基本信息

项目	描述
供应商	名称
型号	名称
数据类别 ¹	单次测量、典型值、保证值、保证寿命
传感器类型	CCD, CMOS, CID, ...
传感器对角线尺寸	英寸或毫米（如果是线性器件提供长度尺寸）
镜头类别	说明匹配的镜头
分辨率	有效区域的分辨率：宽×高（用像素表示）
像素尺寸	宽×高（ μm ）
仅 CCD 适用	
读出类型	逐行/隔行扫描
传输类型	行间转移、帧转移、全帧传输、帧行间转移
仅 CMOS 适用	
快门类型	全局：所有像元在同一时刻开始与停止曝光。卷帘：曝光逐行顺序开启（各行稍有延时）；每行曝光时间相同。其它：在数据手册中定义
重叠能力	有重叠：第 n 帧的读取与第 n+1 帧的曝光可同时进行。无重叠：第 n 帧的读取与第 n+1 帧的曝光按序列进行。其它：在数据手册中定义
最大读出速率：	在规定的工作点（参数设置不变）
暗电流补偿：	定义是否具有暗电流补偿
接口类型：	Analog ² , USB2, IEEE1394a or b, CameraLink, ...
工作点设置：	描述用于 EMVA 1288 测试的工作参数设置（包括：增益、偏置、最大曝光时间、相机模式等）
EMVA1288：	明确标示所使用的测试设备、所基于的 EMVA1288 的版本以及做了哪些非强制性的 EMVA 1288 数据测试

注 1：明确数据类别的定义，如样本数量，抽样方式等。数据类别可能随参数的不同而变化，如 保证值适用于大多数参数，典型值在生产环境中不易于测量。因此必须要指明是什么类别。

注 2：明确模拟相机使用的帧捕获器

10.2 EMVA 1288 数据手册

数据手册按以下方法进行结构安排：

- 封面(可选)：可以无任何内容。典型的封面包含有公司名称、相机的功

能、特征及照片，排版方式随意。如果有封面，应该在封面上加 EMVA1288 标志。

- 概要：用一页或更多页描述所使用的测试设备、测试基于的 EMVA1288 版本号、基本的相机参数以及相机测试所在的工作点参数（参见数据手册示例模板第 1 页）。如果进行了光谱响应测量，那量子效率曲线图应该在本节展示。进行测试时获得的数据在有需要时必须能被提供。
- 各测试点的总结页：每一页都是一个测试点（总共可能有 N 个）的测试结果总结（参见示例模板第 2 页）。摘要页包含测试点参数，一个光子转移曲线图（图 6），一个 SNR 曲线图（图 7）和一个在第 6-9 节中详细描述了的包含表 2 中所有参数的单列表格。表 2 中非必测参数也必须列出来以明确说明没有测量这些参数。页眉左侧加上 EMVA1288 徽标，右侧加上公司徽标。
- 各测试点的详细测试结果：对每个测试点，用一组页面来给出详细的测试结果，包含大尺寸的图，以及用来对图进行补充说明的包含额外数据的表格，还有每个测试点更详细的测试条件描述（如增益、各类设置、ROI、曝光范围、工作温度等）

EMVA1288 R3.1 版以一个单独的文件提供了一个数据手册示例模板，该模板生成方法参见 <https://github.com/emva1288>。它清楚地标明了各类图表与相机参数在数据手册中的位置以及参数图的坐标设置。

表 2：EMVA 1288 强制和非强制参数分类列表

测量类型	强制与否	参考
量子效率	是	规定采用光源的中心波长与 FWHM 波长
增益 K , $1/K$	是	单位: DN/e ⁻ 及 e ⁻ /DN
暗噪声	是	单位: ND 与 e ⁻
DSNU ₁₂₈₈	是	单位: ND 与 e ⁻
最大信噪比 (SNR _{max})	是	比例或 dB 或 bits
SNR _{max} ⁻¹	是	%
PRNU ₁₂₈₈	是	%
非线性误差 LE _{min} , LE _{max}	是	%
绝对灵敏度阈值	是	标示中心波长, 用电子、光子或光子/μm ² 为单位
饱和容量	是	标示中心波长, 用电子、光子或光子/μm ² 为单位
动态范围(DR)	是	用比例、dB 或 bits 为单位
暗电流	是	DN/s 与 e ⁻ /s
倍增温差 T_d (K)	否	见 7.2 节

附录 A 文献

- [1] Aster, R. C., Borchers, B., and Thurber, C. H.: Parameter Estimation and Inverse Problems, vol. 90 of *International Geophysics Series*, Academic Press, Boston, 2 edn., doi: 10.1016/B978-0-12-385048-5.00030-6, URL <https://sites.warnercnr.colostate.edu/aster/2014/07/24/parameter-estimation-and-inverse-problems/>, 2013.
- [2] Denvir, D. J. and Conroy, E.: Electron multiplying CCDs, in: *Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision*, edited by Shearer, A., Murtagh, F. D., Mahon, J., and Whelan, P. F., vol. 4877 of *SPIE Proc.*, pp. 55–68, 2003.
- [3] DeWeert, M. J., Cole, J. B., Sparks, A. W., and Acker, A.: Photon transfer methods and results for electron multiplication CCDs, in: *Applications of Digital Image Processing XXVII*, edited by Tescher, A. G., vol. 5558 of *SPIE Proc.*, pp. 248–259, 2004.
- [4] Dierks, F.: Sensitivity and Image Quality of Digital Cameras, Tech. rep., Basler AG, 2004.
- [5] Holst, G. C. and Lomheim, T. S.: *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*, SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, 2 edn., 2011.
- [6] Janesick, J., Klaasen, K., and Elliott, T.: CCD charge collection efficiency and the photon transfer technique, in: *Solid State Imaging Arrays*, edited by Dereniak, E. L. and Prettyjohns, K. N., vol. 570, pp. 7–19, Proc. SPIE, doi: 10.1117/12.950297, 1985.
- [7] Janesick, J. R.: *Scientific Charge-Coupled Devices*, SPIE, Bellingham, WA, doi: 10.1117/3.374903, 2001.
- [8] Janesick, J. R.: *Photon Transfer*, SPIE Press, doi: 10.1117/3.725073, 2007. [9] J'ahne, B.: *Digital Image Processing*, Springer, Berlin, 6 edn., doi: 10.1007/3-540-27563-0, 2005.
- [10] Labsphere: *A Guide to Integrating Sphere Theory and Applications*, technical guide, see <http://www.labsphere.com/>, 2003.
- [11] Labsphere: *Integrating Sphere Uniform Light Source Applications*, technical guide, see <http://www.labsphere.com/>, 2003.
- [12] Montgomery, D. C., Peck, E. A., and Vining, G. G.: *Introduction to Linear Regression Analysis*, John Wiley & Sons, 5 edn., URL <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470542810.html>, 2012.
- [13] Theuwissen, A. J. P.: *Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices*, Kluwer Academic Publishers, doi: 10.1007/0-306-47119-1, 1995.
- [14] Widrow, B. and Kollar, I.: *Quantization Noise — Roundoff Error in Digital Computation, Signal Processing, Control, and Communications*, Cambridge Univ Press, URL www.cambridge.org/9780521886710, 2008.

附录 B 符号说明

参数	单位	说明
A	μm^2	传感器单元（像元）面积
c	m/s	光速
d	mm	传感器平面到光源（开口口径）的距离
D	mm	光源的开放（口径）的直径
D'	mm	图像传感器直径
$DSNU_{1288}$	DN	暗信号非均匀性
DR	1, dB, bits	动态范围
E	$\text{W}/\text{m}^2, \text{Photons}(\text{s}/\text{pixel})$	传感器平面辐照度
F	1	非白因子，见公式 49
h	Js	普朗克常数
H	$\text{Ws}/\text{m}^2, \text{Photons}(\text{s}/\text{pixel})$	传感器平面辐射量（曝光量）
k	m^{-1}	波数
K	DN/e^-	数码相机的全局系统增益
$PRNU_{1288}$	%	光响应非均匀性
SNR	1, dB, bits	信噪比
p	-	功率谱
R	DN/p	响应率（斜率特性曲线）
s	-	空域标准差（其右下标的含义参见表格后的索引）
s^2	-	空域方差（其右下标的含义参见表格后的索引）
s	DN	数字图像序列
t_{exp}	s	曝光时间
y	DN	数字灰度值
y	DN	二维数字图像
η	1	总量子效率，见公式 1
λ	nm	光波长
μ	-	索引下参数的平均值
ν	Hz	光频率
σ	-	时域标准差（其右下标的含义参见表格后的索引）
σ^2	-	时域方差（其右下标的含义参见表格后的索引）

索引	单位	说明
d	e^-	暗信号, 单位 e^-
dark	DN	暗信号, 单位 DN
e	—	电子数量
min	—	绝对灵敏度阈值
p	—	光子数量
q	—	量化噪声
sat	—	传感器饱和度
[l]	—	在图像序列中选择一幅图像, l 的范围从 0 到 $L-1$
[m]	—	在图像中选择一行, m 的范围从 0 到 $M-1$
[n]	—	在图像中选择一列, n 的范围从 0 到 $N-1$

附录 C 相对于 A2.01 版的修改说明

本章概述了对 EMVA1288 标准 2.01 版本的修改。其中, C.1 对扩展部分进行了说明。为了改进该标准并且简化标准的用法, 新标准中做了少量必要的变化。在 3.0 版本中所有的变化具有向下兼容性, 即 2.0 版本的测试结果依然有效。

C.1 扩展的特性

以下内容为 3.0 版本中所新增的特性:

1. 新标准不仅包括了灰度相机, 同时包含了彩色传感器与相机。
2. 通过对数直方图对缺陷像元进行了灵活的表述。

C.2 扩展了改变光照的方法

在 2.01 标准中, 光子转移方法(灵敏度与噪声测量)必须在连续光照以及不同曝光时间下进行测量, 而线性度测量必须在恒定曝光及脉冲光源(不同脉宽)下进行。由于相同类型的测量需要进行两次, 很不方便。

在 3.0 标准中, 6.3 节中提到的任意方法均能改变辐射量, 这样同一套测试数据即可以用光子转移方法(第 6.6 节)进行评估, 也可以用于线性误差的评估(第 6 节)

C.3 测试条件与流程的修改

对测量条件进行统一, 描述更为准确:

1. 对于光子转移法, 平均值是根据公式 (28), 由两幅图像计算得出, 这不同于 A2.01 版本中只用第一幅图进行计算。
2. 为了避免相机在线性度测量及非均匀性测量(6.5 节)时的向下溢出, 统一规定了进行相机偏置设置的方法。而在 A2.01 中, 线性度, 光子转移及非均匀性测量采用的是不同的规定。

3. 用于灵敏度、线性度及噪声测量的数据点数目增加至 50，仅在生产测试中允许采用 9 个数据点。
4. 规定了进行非均匀性测量所需的图像数量。通过矫正残余的时域噪声（第 8 节），目前可以仅仅采用 16 幅图像来对传感器的非均匀性进行评价。
5. 对比新版本中的公式 11 与 A2.01 版本中的公式 15，信噪比定义不再包含空域噪声。这是因为能够通过适当的阴影矫正技术可有效降低单张图像的空间非均匀性，然而却无法降低其时域噪声。
6. 对平均灰度值与辐射量的关系进行回归曲线拟合的灰度值范围，更适用于非线性条件。在 A2.01 版本中，该范围是从暗图像到最大时域方差的 80%，现在减少到 70%。
7. 绝对灵敏度阈值的计算（公式 17）精度更高。由于 A2.01 版本中未引入 1/2 的修正项，难以满足暗噪声非常低（仅几个电子）的相机的精度要求。
8. 线性度 LE 必须在饱和点 5%-95% 的区间内测定（第 6.7 节）。
9. 对暗电流的测量必须至少包含 6 个等间隔的曝光时间点（第 7.1 节）
10. 为了更正确地分析缺陷像素而引入了一个高通滤波器，这样可以避免 PRNU 的测试结果被均匀性不太好的光源所影响（第 4.4 节）。除了频谱及其衍生结果的计算（第 8.2 节）外，包含空间方差评估（第 8.1 节）的其它所有非均匀性评测，都必须使用高通滤波器。
11. 放宽了光谱测量的条件（第 9 章）。 f 数现在可以不是 8，但必须被报告。

C.4 对于最小时域噪声测量，引入了量化噪声

在早期版本中，线性相机模型忽略了量化噪声，这使低量化位数（如 8bit）相机的测试过程更为复杂。因为对于这类相机，其暗场图像的时域噪声的标准差甚至低于量化间隔，因此在 EMVA 的 V1 与 V2 版本中要求相机的增益应该越小越好，但其最小暗场噪声应该大于 1DN，以免量化噪声影响测试结果。

根据蒙特卡罗数值模拟结果，本版引入了量化噪声 $\sigma_y^2 = 1/12DN^2$ ，对时域噪声的计算方法进行了校正。（详细理论分析请参考原版英文标准附录 C.4）

C.5 高通滤波的非均匀性测量

该节是对缺陷测量所用的图像如何进行高通滤波及其效果的具体理论分析。（详见原版英文标准附录 C.5）

附录 D 相对于 R3.0 版的修改说明

本节总结 EMVA1288 标准 R3.1 相对于 R3.0 版本的变化。

D.1 变化

这些变化包括：

1. 光源的光谱规范（第 6.2 节）：必须标示出光源的质心波长 λ_c 。使用质心波长 λ_c 而不是峰值波长 λ_p 来计算光子数（公式 2）。

2. 有时候在光子转移方法中直接取方差最大值并不能正确地确定饱和灰度值(第 6.6 节), 因此引入了一个更复杂的算法代替了简单的找最大值的方法。
3. 改变了计算非线性度的算法: 使用相对偏差而不是绝对偏差以适应现代图像传感器越来越大的动态范围。
4. 非白噪声因子被删除(第 8.2 节), 因为 R3.0 版本提供的算法被证明可重复性不够好以致于难以提供有用的数据。如果未来发现了更好的算法, 此参数将在未来的版本中重新加入到标准中。
5. 改进了直方图分段宽度的计算方法以提供一个没有缝隙的看起来更好的直方图(第 8.4 节)

D.2 增加的功能

以下功能被增加到了 R3.1 版本中:

1. 最重要的一点, R3.1 提供了一个数据手册示例模板(第 10.2 节)。
2. 增加了总信噪比: 在第 8.1 节中给出了定义, 根据公式 48 计算出的模型曲线被加入到了图 7 的信噪比曲线中。
3. 增加了水平与垂直断面图(第 8.3 节)

附录 E 贡献者名单

EMVA 非常感谢对本标准 R3.1 版本做出贡献的 EMVA1288 标准委员会的如下成员, 以字母顺序排序: :

- Aphesa SPRL, Harz`e, Belgium
- Basler AG, Ahrensburg, Germany
- e2v technologies plc, Essex, England
- HCI, Heidelberg University, Heidelberg, Germany
- Image Engineering GmbH & Co. KG, K`oln, Germany
- JAI A/S, Copenhagen, Denmark
- MATRIX VISION GmbH, Oppenweiler, Germany
- Matrox Electronic Systems Ltd., Dorval, Quebec, Canada
- PCO AG, Kelheim, Germany
- STEMMER IMAGING GmbH, Puchheim, Germany
- SVS-VISTEK GmbH, Seefeld, Germany
- TVI Vision Oy, Helsinki, Finland

EMVA1288 的历史可以追溯到 2004 年, 最早的发起者是 Awaiba 公司的 Martin W`any 与 Basler 公司的 Fritz Dierks。在初始阶段做过重要贡献的还有 Dalsa 公司的 Albert Theuwissen 与 PCO 公司的 Emil Ott。A01 版在 2005 年 8 月发布, 然后在 2007 年 8 月发布了 A02 版, 在 2010 年 11 月发布了 R3.0 版。EMVA1288 委员会创立时的主席是 Martin W`any, 自 2008 年以后至今, 委员会主席是 Bernd J`ahne (HCI, Heidelberg University)。