

EMVA1288 频谱图与信噪比曲线解读

西安远望图像技术有限公司，冯兵，博士

2020年9月21日

1. 引言

符合 EMVA1288 标准的测试报告中，除了有灵敏度、动态范围、信噪比、暗电流、DSNU1288 及 PRNU1288 等性能参数的数值外，还有 20 多张图表，其中有 4 张频谱图，分别是 DSNU 水平与垂直频谱、PRNU 水平与垂直频谱。这四张频谱图具有比 DSNU1288 与 PRNU1288 这两个参数更丰富的含义，能对图像的成像非一致性特性进行更好的表述。DSNU 与 PRNU 也对图像的信噪比有影响，其影响的是图像的“总信噪比”，本文尝试对这四张图以及信噪比曲线图进行解读以协助读者更好的理解 EMVA1288 标准以及其输出的测试报告。

2. EMVA1288 标准的噪声分类

EMVA1288 标准将图像的噪声分成了两类，一类是“时域噪声”，指的是同一个像素，在完全相同的曝光条件下，在不同的图像之间灰度值并不相同，其涨落分布服从泊淞 (Poisson) 分布；另一类是“空域噪声”，指的是在同一幅图像中，在所有像素曝光条件完全相同的条件下，不同像素之间的灰度值并不相同，它包括暗场图像灰度值 (本底) 不同，表示为 DSNU (暗场响应非一致性)，以及不同像素的光电响应不同，表示为 PRNU (光响应非一致性)。但这里的“空域噪声”并不是真正意义上的噪声，只是二维图像的一种空间非均匀性，由于它对特定的图像传感器或相机具有时间不变性，因此是比较容易通过校正来减弱或消除的。

EMVA1288 标准中，暗场噪声、信噪比以及动态范围是评价时域噪声的主要参数，而 DSNU1288 与 PRNU1288 是用来评价空域噪声的主要参数。标准 8.1 节中定义的“**总信噪比**”则将两者结合起来，将空间非均匀性这种“空域噪声”也当成了一种普通噪声，与时域噪声进行叠加，再计算图像的信噪比，就是“总信噪比”，测试报告中的信噪比曲线中就包含有“总信噪比”曲线。**总信噪比表达的是，单帧图像没有进行空间非均匀性校正时呈现出的实际信噪比。**

3. 频谱图的计算与绘制

参考 EMVA1288 标准 R3.1 中文版第 29~31 页，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。

水平谱的计算与绘制步骤如下：

- 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：

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

- 3) 计算所有 M 行的频谱功率的平均值 $p[u]$ ：

$$p[u] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M \hat{y}[m][u] \hat{y}^*[m][u]$$

以上公式中的上标*代表的复数共轭。根据上述公式可以计算功率谱，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。

- 4) 把 DSNU1288 与 PRNU1288 加入到相应的频谱图中。由于 PRNU1288 是相对于均值的一个相对值，所以功率谱与时域噪声都要除以图像均值。
- 5) 再在图中以一条水平线加入时域噪声 $\sigma_{y,stack}$ ，这样就很容易对时域噪声和空域噪声进行对比。

对于垂直频谱图，采用同样的方法计算，只是行和列必须互相交换。

4. 频谱图解读示例

上节中所述的“白噪声”或“空域白噪声”，指的是没有特征的完全符合泊淞（Poisson）分布的“噪声”。在这里的语义环境下，以 DSNU 为例，指的是，如果一台相机，其暗场（本底）图像没有任何有特征的条纹，像素与像素之间的本底非均匀性（DSNU）完全符合泊淞分布，这种非均匀性就是“全白”的白噪声。对这种白噪声（像素之间的非一致性）做出的功率谱曲线，基本上就是一条直线。也就是说在不同的频率谱段，都是一个常数，而这个常数的值就是 DSNU1288。

如果相机的本底不完全是“白”的，例如有横向、纵向或倾斜条纹，那么在其水平或垂直频谱上就会出现与这些条纹的空间频率所对应的尖峰。反之，如果发现频谱图上出现了尖峰，则说明图像上有固定频率的条纹出现了。这样的噪声就不是“纯白”的噪声了，图像中必然有特定频率的干扰条纹。

图 1 为 DSNU 水平频谱示例。频谱图中以一条水平线加入了“时域噪声”，它有非常重要的意义。前面解释了，按 EMVA1288 标准的定义，对于一帧图像来说，它的噪声包括两部分，一部分是“时域噪声”，一部分是“空域噪声”。具体的对于所采集的 DSNU 图像，也就暗场图像来说，它包含的噪声就是本底的时域噪声与 DSNU1288 这两种。在频谱图上，我们同时给出了 DSNU1288 与时域噪声，都是以 DN 值为单位，这样就可以直观的定量的比较，在暗场图像的噪声分量中，是以代表像素之间非均匀性的 DSNU 为主？还是以随机的时域噪声为主？

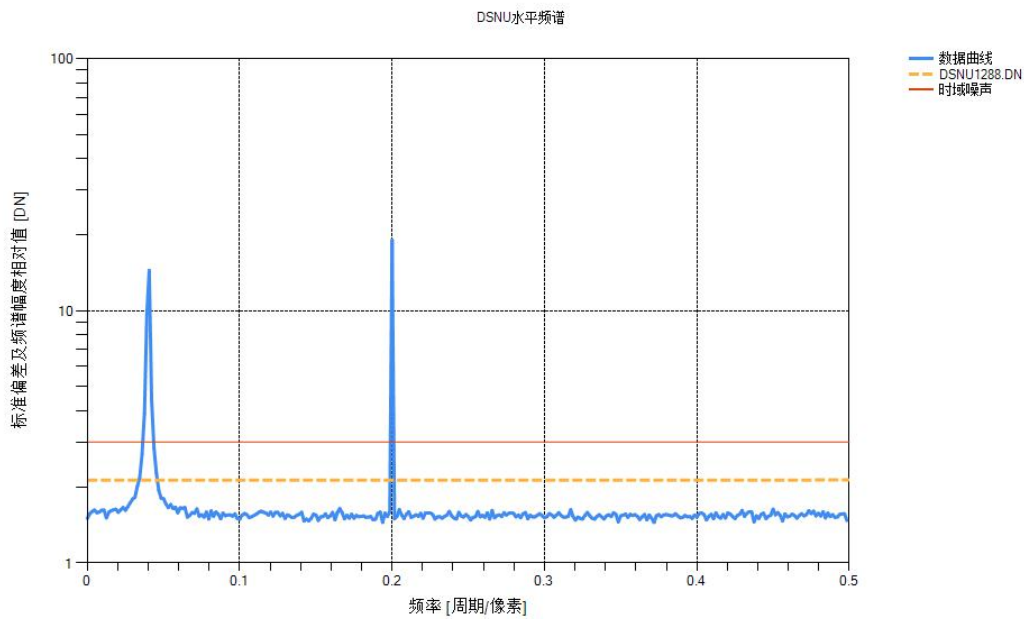


图 1 DSNU 水平频谱

例如图 1 所示 DSNU 水平频谱的示例图中，时域本底噪声约为 3 个 DN 值，而 DSNU1288 是 2.1 个 DN 值，此示例图所代表的这组暗场（DSNU）图像中，如果不考虑那两个尖峰代表的横竖条纹干扰，仅就白噪声来说，以上数据表示随机的时域噪声（3DN）是大于像素空间本底的非均匀性（2.1DN）的。所以，如果频谱图上没有这两个尖峰，直接去观察 DSNU 图像，其主要的噪声表现是时域噪声而不是空域噪声。但我们同时又看到，这两道尖峰的幅值不仅远大于 DSNU1288，而且已经远远大于时域噪声。所以整体上，这条曲线代表的是：在该相机的暗场图像中，最主要的噪声是：有规律的有固定频率的干扰条纹，其次是时域噪声，最后才是像素之间的非均匀性（DSNU1288）。

图 2 是标准中的 PRNU 水平频谱示例图。PRNU 指的是光响应的非一致性，PRNU 频谱图中的时域噪声代表的是用来进行频谱分析的 PRNU 图像的时域噪声。与 DSNU 频谱不同的是，这里的单位不是用的 DN 值，而是百分比。但有了上述

对 DSNU 频谱图的分析，这里的 PRNU 频谱图所代表的含义就不难理解了：它代表的是在半饱和的均匀曝光的 PRNU 图像中，光响应的非一致性导致的“空域噪声”超过了以暗场噪声及光子（电子）数涨落产生的时域噪声，此外，图像中还叠加有固定空间频率的不一定非常明显的干扰条纹。

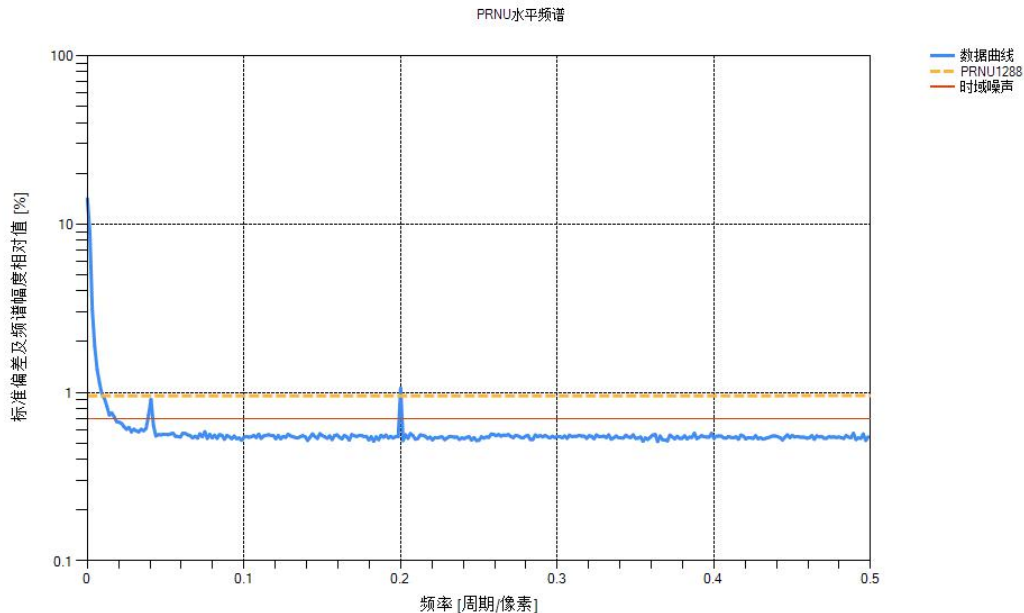


图 2 PRNU 水平频谱

5. 总信噪比曲线解读

图 3 是 SNR 曲线图示例，其中“理想值”曲线代表的是 DSNU 与 PRNU 均为零，量子效率 100%，暗场噪声为零的相机所输出的图像信噪比曲线；“理论值”代表的是不含 DSNU 与 PRNU 这两种“空域噪声”，而仅考虑量子效率与时域噪声时的信噪比曲线；而“总信噪比”中的噪声则同时包含了“时域噪声”与“空域噪声”。

从图 2 我们看到，在 50% 曝光量的半饱和成像条件下，PRNU1288 接近 1%，而此时时域噪声所占的百分比约为 0.7%，低于 PRNU。而随着曝光量的进一步增加，根据 EMVA1288 标准的理论我们知道，时域噪声的占比将进一步降低，这也就导致在图 3 中，随着曝光量的增加，“总信噪比”曲线与“理论值”曲线偏差越来越大。此曲线说明，该相机在曝光量充足时，主要的“噪声”来源于图像传感器的光响应非一致性，而不是时域噪声。

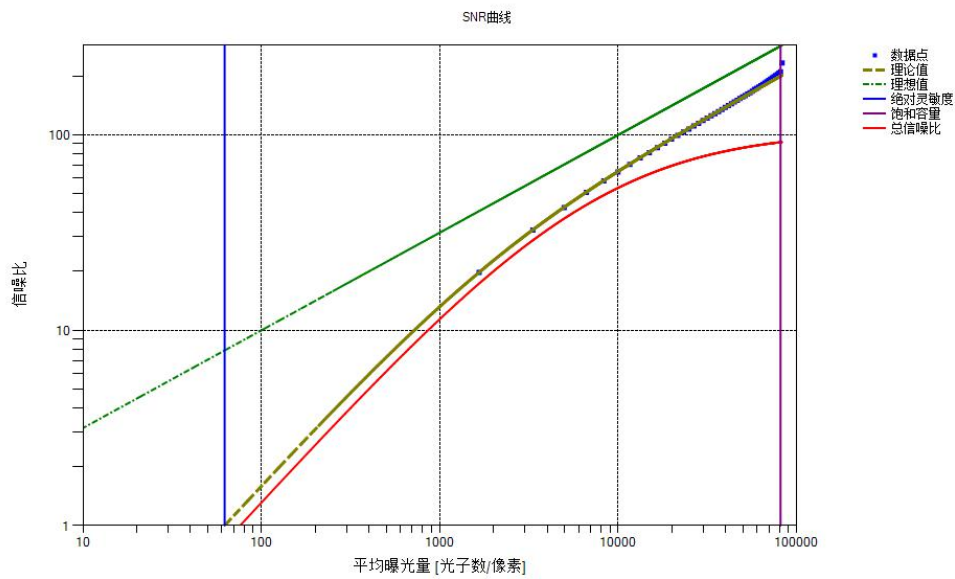


图 3 SNR 曲线图示例

6. 实践经验与评论

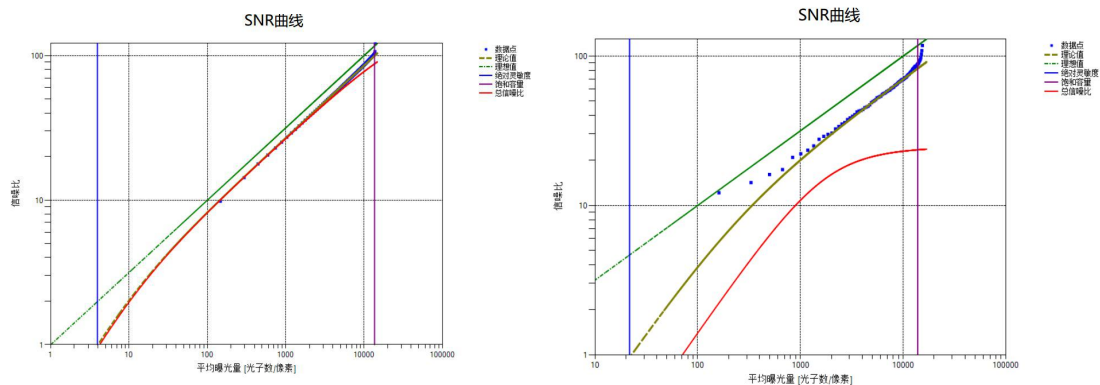


图 4 SNR 曲线图实测图

由于工作的需要，笔者使用 ez1288 相机性能测试仪（www.ez1288.com）测试了大量不同厂商不同型号的相机，有些相机的 DSNU 与 PRNU 值非常小，因此其总的信噪比曲线与“理论值”基本重合，代表了其非均匀性基本可以忽略不计，这样的相机基本不用对其输出的图像进行非均匀性校正，示例如图 4 左。而有些相机，其 DSNU1288 与 PRNU1288 非常大，甚至远大于时域噪声，对于这样的相机输出的图像，可能就必须进行空间非均匀性的校正才能使用了，示例如图 4 右。还有的相机，其 PRNU 或 DSNU 数值并不大，但是频谱图上有大量的尖峰，表明其图像中有大量有规律的条纹，这样的相机可能也必须进行校正后才能使用，示例如图 5。

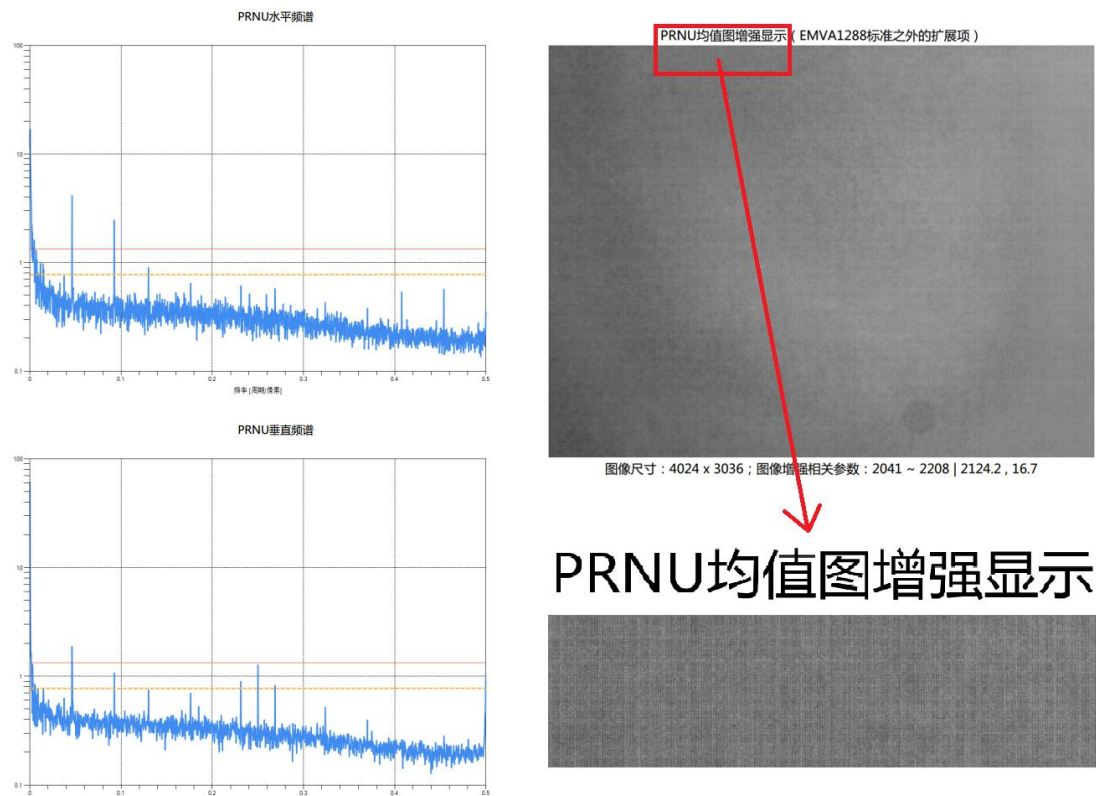


图5 有横竖条纹的 PRNU 图像及其频谱图

一份标准的 EMVA1288 测试报告中除了有各种必测的性能指标数据外，还有 20 多张图表，这些图表比那些性能指标数据含有更丰富的信息。篇幅所限，本文只对测试报告中的 5 张图表进行了解读，希望其能对读者理解与使用 EMVA1288 测试报告有所帮助。

参考文献：

- 1) EMVA1288, Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras, Release 3.1, December 30, 2016, Issued by European Machine Vision Association, www.emva.org.
- 2) EMVA1288 图像传感器与相机性能测试标准 R3.1 (中文版), 2017 年 8 月 25 日, 欧洲机器视觉协会 (EMVA) 发布, 中国机器视觉产业联盟 (CMVU) 译。