

文章编号 1004-924X(2015)11-3219-08

## 遥感相机电子学非线性对调制 传递函数的影响及其判别

李俊霖<sup>1,2</sup>, 郭永飞<sup>1\*</sup>, 李静秋<sup>1</sup>, 兰太吉<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 遥感相机电子学系统在信号转换过程中会产生 V/Q 非线性和 DN/V 非线性, 并均会对成像子系统的调制传递函数(MTF)造成影响。本文研究了这两种电子学非线性的产生机理和对 MTF 的影响并提出了相应的判别方法。从两种非线性的产生机理出发, 建立了 V/Q 非线性和 DN/V 非线性模型, 深入分析了两者的对相机 MTF 的影响并进行了仿真实验。实验表明, 非线性造成了电子学 MTF 的下降, 使其由正常状态下的 0.55 下降为 0.47, 此外还导致 MTF 随照度变化。提出了基于视频响应曲线结合响应非均匀性(PRNU)噪声曲线区分 V/Q 非线性和 DN/V 非线性的方法并进行了仿真验证。仿真实验验证了提出方法的有效性, 为系统设计、改进和非线性补偿提供了有力支持。

**关键词:** 遥感相机; 电子学非线性; 调制传递函数; 视频响应曲线; 响应非均匀性噪声曲线

**中图分类号:** TN386.5; V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3219

## Influence of electronic nonlinearities of space camera on MTF and their discriminance

LI Jun-lin<sup>1,2</sup>, GUO Yong-fei<sup>1\*</sup>, LI Jing-qiu<sup>1</sup>, LAN Tai-ji<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- \* Corresponding author, E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn

**Abstract:** The electronics system in a remote sensing camera will generate V/Q nonlinearity and DN/V nonlinearity in signal conversion processing and both of them effect the Modulation Transform Function(MTF) of the sub-imaging system. This paper focuses on the generation mechanism of two kinds of electronic nonlinearities and the effects of the nonlinearities on the MTF and proposes a discriminant method for the electronic nonlinearities. On the basis of the generation mechanism, the V/Q and DN/V nonlinearity theoretical models are established, their effects on the MTF of the camera are researched and a simulation experiment is performed. Experimentl results show that the MTF falls with electronic nonlinearity from 0.55 under a normal state to 0.47, and it also changes with illumination. Finally, a method based on combination of a video response curve and a Photo-

收稿日期: 2014-12-09; 修订日期: 2015-02-12.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20120331)

response Non-uniformity (PRNU) noise curve is proposed to distinguish the V/Q nonlinearity and DN/V nonlinearity. The simulation is put forward and the feasibility of the proposed method is verified. The research provides strong supports for the design, improvement and nonlinearity compensation of remote sensing cameras.

**Key words:** remote sensing camera; electronic nonlinearity; Modulation Transform Function(MTF); video response curve; Photo-response Non-uniformity(PRNU) noise curve

## 1 引言

传输型遥感相机是以 CCD(Charge Coupled Device)或 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor)为核心成像器件的数字型相机,其成像过程可抽象为将输入光信号转换为输出码值信号的信息传递过程。光信号到达成像靶面后经过光电转换,电荷存储、转移、测量,信号调理,相关双采样,AD 转换等过程,最终转换为视频码值信号,先后完成了光子-电子、电子-电压、电压-码值 3 次转换<sup>[1-2]</sup>。理想情况下,3 次转换均为线性过程,但实际工作中均存在非线性因素。将电子-电压转换产生的非线性定义为 V/Q 非线性,电压-码值转换产生的非线性定义为 DN/V 非线性。两种非线性对相机调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)的影响是本文讨论的重点之一。

MTF 是衡量遥感相机成像性能的核心指标,其体现了相机对不同空间频率目标的分辨能力<sup>[3]</sup>。相机整体 MTF 可近似为光学系统 MTF 和 CCD 采样 MTF 的乘积,CCD 输出响应及处理电路对 MTF 的影响常被忽略,或近似为一个常数(0.95)<sup>[4]</sup>。随着地面像元分辨率等指标的提,相机空间 Nyquist 频率的要求越来越高,为保证遥感相机具有良好的 MTF(通常大于等于 0.2),CCD 电荷转移、测量及处理电路环节对 MTF 的影响已不能忽略。David H. Seib<sup>[5]</sup>和 Norlry M. Blouke<sup>[6]</sup>曾先后对表面沟道和埋藏沟道器件的载流子扩散引起的 MTF 下降进行了分析。但信号转换过程中产生的非线性对 MTF 的影响还未得到应有的重视。本文以电子学响应非线性为切入点,深入分析了 V/Q 非线性和 DN/V 非线性对 MTF 产生的各种影响。

电子学响应非线性在视频响应曲线上能够得以直观体现,但是无法明确区分 V/Q 非线性和 DN/V 非线性哪种因素占据主导作用。V/Q 非线性和 DN/V 非线性产生机理不同,补偿和校正方法也不同。为了有效定位非线性的产生原因,本文提出了利用视频响应曲线结合响应非均匀性(PRNU)噪声曲线区分 V/Q 非线性和 DN/V 非线性的方法,并在原理推导的基础上结合仿真分析和实验验证了该方法的有效性,为设计改进和后期数据校正提供了有力支持。

## 2 V/Q 非线性和 DN/V 非线性

### 2.1 传输型遥感相机信号理想传递模型

传输型遥感相机将输入的光信息转换为最终输出的码值(DN)信息。其中光子-电子转换依据光电效应实现。不考虑电荷扩散、热噪声等因素的影响,理想模型如式(1)所示<sup>[7]</sup>:

$$Q_{\text{PIX}} = R \times E \times T, \quad (1)$$

其中:  $Q_{\text{PIX}}$  为像元存储电荷量,  $R$  为像元响应度(在固定波长下为常数),  $E$  为辐照度,  $T$  为积分时间。

电子-电压转换以测量电容为媒介,在电荷测量环节完成。理想情况下电容  $C$  为常数,该过程模型如式(2)所示:

$$Q_{\text{PIX}} = \int_{V_{\text{TE}}}^{V_{\text{REF}}} C dV = C \times (V_{\text{REF}} - V_{\text{TE}}) = C \times V_{\text{PIX}} \Rightarrow V_{\text{PIX}} = \frac{Q_{\text{PIX}}}{C}, \quad (2)$$

其中:  $V_{\text{REF}}$  为参考电压,  $V_{\text{TE}}$  为信号输出电压,  $V_{\text{PIX}}$  为对应像元的有效输出电压。

电压-码值过程在放大和 AD 转换环节实现。理想情况下,放大电路和 AD 转换均为线性,设信号放大过程增益为  $G_A$ , AD 转换系数为  $G_{\text{AD}}$ , 并设  $G = G_A \times G_{\text{AD}}$ , 则该过程数学模型如式(3)所示:

$$DN_{PIX} = G_A \times G_{AD} \times V_{PIX} = G \times V_{PIX}. \quad (3)$$

综上所述,理想状态下,传输型相机输入光照度信号  $E$  至输出码值  $DN_{PIX}$  的数学模型如式(4)所示,即为线性传递过程。但由于实际半导体工艺、电路设计等因素影响,电子-电压和电压-码值转换过程均会出现一定程度的非线性,严重时会对成像性能造成很大影响<sup>[8]</sup>。

$$DN_{PIX} = R \times T \times E \times G/C. \quad (4)$$

## 2.2 V/Q 非线性和 DN/V 非线性建模与仿真

V/Q 非线性发生在电子-电压转换过程。根据半导体器件(PN 结)的 C-V 特性,测量电容  $C$  并非恒定不变,而是随着两端加载电压  $V$  的增大而减小,该现象在 CMOS 传感器中尤其明显<sup>[9]</sup>。为了简化模型,不妨假设 C、V 成反比例关系(实际应用中可拟合更准确的函数关系,下述推导过程同样适用),即:

$$C = \frac{k}{V}. \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)的积分环节并进一步推导,可得出 V/Q 非线性的数学模型如式(6)所示:

$$V_{PIX} = V_{REF} \times \left(1 - e^{-\frac{Q_{PIX}}{k}}\right). \quad (6)$$

由式(6)可知,两者不再成线性关系,而是指数函数关系。在直角坐标系中描述 V/Q 的非线性关系,结果如图 1 所示。其中:横轴为电荷量  $Q_{PIX}$ ,纵轴为电压  $V_{PIX}$ 。

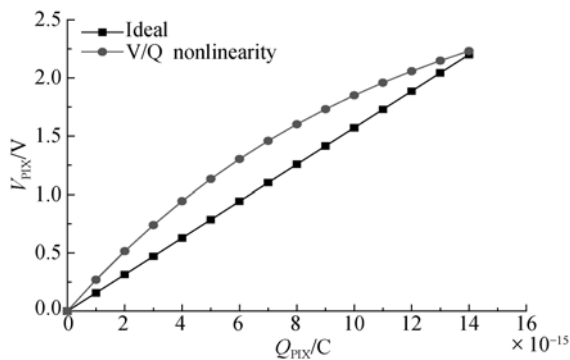


图 1 V/Q 非线性仿真结果图

Fig. 1 Simulation diagram of V/Q nonlinearity

DN/V 非线性发生在电压-码值转换过程。实际工作时,因芯片性能不理想、电路设计缺陷及温度环境变化等因素影响,在动态范围内对应不

同的输入信号幅值<sup>[10]</sup>,  $G_A \times G_{AD}$  会相应发生变化,且变化具有较大随机性,基本表现为在低幅值区受电路本底噪声影响,  $G_A \times G_{AD}$  偏大,伴随幅值增大,  $G_A \times G_{AD}$  随机波动并呈现总体变小趋势,在接近饱和区时  $G_A \times G_{AD}$  偏小。

## 3 电子学响应非线性对 MTF 的影响

MTF 定义为输出调制度与输入调制度之比。在系统输入调制度不变的条件下,理想相机电子学系统的输出调制度应不随整体输入照度水平的变化而变化,即 MTF 只是空间频率  $\omega$  的函数,与其他因素无关<sup>[11]</sup>。

假定输入调制度为 1,则系统的 MTF 等于输出调制度。当系统不存在非线性时,根据式(1)和式(4)推导出 MTF 传递过程如式(7)所示,由式(7)可知,MTF 在电子学传递过程中无损失。

$$MTF_Q = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max} + Q_{min}} = \frac{(Q_{max} - Q_{min}) \times G/C}{(Q_{max} + Q_{min}) \times G/C} = \frac{DN_{max} - DN_{min}}{DN_{max} + DN_{min}} = MTF_{DN}. \quad (7)$$

当系统中存在 V/Q 非线性时,由公式(3)、(6)得出  $MTF_{DN}$  与  $MTF_Q$  的关系如式(8)所示。此时  $MTF_{DN}$  不仅是空间频率  $\omega$  的函数,而且随  $Q_{max}$  的变化而变化。在特定  $Q_{max}$  (半饱和状态),即某一固定照度条件下,  $MTF_{DN}$  与  $MTF_Q$  随空间频率的变化曲线如图 2 所示。

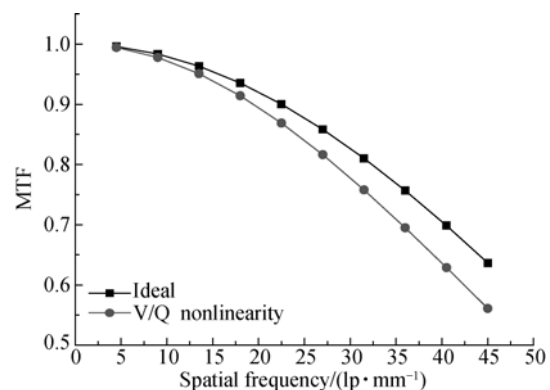


图 2 MTF 随空间频率的变化关系

Fig. 2 Relationship between MTF and spatial frequency

由图 2 可知,  $MTF_{DN}$  在任何频点均低于理想

状态,既 V/Q 非线性造成了 MTF 的损失;在固定空间频率(奈奎斯特频率)下,MTF<sub>DN</sub>与 MTF<sub>Q</sub>随照度变化曲线如图 3 所示。

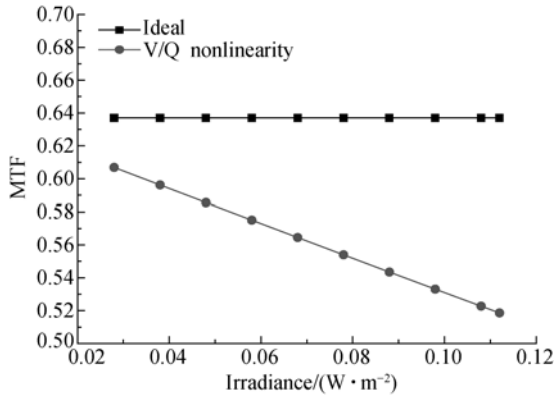


图 3 MTF 随辐射照度变化关系

Fig. 3 Relationship between MTF and irradiance

由图 3 可知,V/Q 非线性导致 MTF 随入射照度的变化而变化,入射照度越高,MTF 越低。

$$MTF_{DN} = \frac{e^{-\frac{Q_{min}}{k}} - e^{-\frac{Q_{max}}{k}}}{2 - e^{-\frac{Q_{min}}{k}} - e^{-\frac{Q_{max}}{k}}} = \frac{e^{\frac{Q_{max}}{k}} - e^{\frac{Q_{min}}{k}}}{2e^{\frac{Q_{max} + Q_{min}}{k}} - e^{\frac{Q_{max}}{k}} - e^{\frac{Q_{min}}{k}}} \neq MTF_Q. \quad (8)$$

设系统理想增益为  $G_{ideal}$ ,若存在 DN/V 非线性,在低照度区  $G_{min} > G_{ideal}$ ,在高照度区  $G_{max} < G_{ideal}$ ,根据式(2)、(3)建立的 MTF 传递模型如式(9)所示:

$$MTF_{DN} = \frac{G_{max} \times Q_{max} - G_{min} \times Q_{min}}{G_{max} \times Q_{max} + G_{min} \times Q_{min}} \neq MTF_Q. \quad (9)$$

由式(9)可知,奈奎斯特频率下,理想的 MTF<sub>Q</sub> 为 0.637。以 DN/V 非线性为 5% 为例,即  $G_{max} = 0.95G_{ideal}$ ,  $G_{min} = 1.05G_{ideal}$ ,奈奎斯特频率下,MTF<sub>DN</sub> 降为 0.61,由此可见, DN/V 非线性同样降低了系统的 MTF。由于在不同输入照度下即对应不同 V 值时的  $G_{max}$  和  $G_{min}$  不同,因此 DN/V 非线性对 MTF 的影响也与输入照度相关。

综上所述,V/Q 非线性和 DN/V 非线性的存在对 MTF 均产生了影响,造成 MTF 在传递过程中有损失以及随照度变化。但两者可能同时存在也可能单独存在,且各自的修正措施不同,因此有效区分两种非线性成为改进系统设计和进行数据补偿的关键。

## 4 V/Q 非线性和 DN/V 非线性判别

系统存在的非线性可以通过视频响应曲线得以直观体现,但是仅依靠视频响应曲线无法有效区分 V/Q 非线性和 DN/V 非线性。为了解决该问题,本文提出一种基于视频响应曲线结合 PRNU 噪声曲线的非线性判别方法。在 CCD(或 CMOS)的线性工作区,系统不存在非线性时,视频响应曲线为斜率固定的直线,PRNU 噪声曲线为水平直线;当仅有 DN/V 非线性时,视频响应曲线产生非线性而 PRNU 噪声曲线仍为水平直线;当仅存在 V/Q 非线性时,视频响应曲线产生非线性,PRNU 噪声曲线随照度变化也发生变化。由此可以首先判定系统中是否存在 V/Q 非线性,并做出修正,直至 PRNU 噪声曲线恢复为水平直线,再进一步根据视频响应曲线判定是否存在 DN/V 非线性,并做出修正。

### 4.1 PRNU 噪声曲线

对 CCD(或 CMOS)的单个像元而言,在动态范围内其响应度可认为是常数<sup>[12-14]</sup>。但不同像元间存在着固定的响应度差异,该差异作为一种噪声定义为 PRNU 噪声。PRNU 噪声采用噪声因子  $\Phi$  来评价,根据式(4)可得出理想线性系统中  $\Phi$  数学模型如式(10)所示:

$$\Phi = \frac{\sigma}{DN_{AV}} = \frac{n}{n-1} \times \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ R_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \right]^2}}{\sum_{i=1}^n R_i}. \quad (10)$$

其中  $DN_{AV}$  和  $\sigma$  分别为消除光子霰粒噪声和暗电平校正后的所有像元 DN 的均值和标准偏差,  $n$  为像元数。PRNU 噪声因子  $\Phi$  随照度变化的曲线称为 PRNU 噪声曲线,理想条件下,PRNU 噪声因子  $\Phi$  只与像元间的响应度差异有关,不随输入照度的改变而改变,因此 PRNU 噪声曲线应为一条水平直线。

### 4.2 V/Q 非线性和 DN/V 非线性判别方法

当系统存在 DN/V 非线性时,视频响应也产生非线性,PRNU 噪声曲线则仍为一条水平直线。DN/V 非线性体现为在不同区间内输出信号幅值的增益  $G$  不同,而 PRNU 噪声曲线的斜率  $\Phi$

的测试是在均匀图像下完成的,一幅图像中所有输出像元处于同一幅度水平,其增益  $G$  相同,在计算过程中作为公共量被抵消,因此 PRNU 曲线不受影响,仍为一条水平直线。

当系统存在  $V/Q$  非线性时,结合式(3)、(6)可以得出 PRNU 曲线的斜率  $\Phi$  如式(11)所示:

$$\Phi = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left(1 - e^{-\frac{Q_i}{K}}\right) - \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - e^{-\frac{Q_i}{K}}\right)}{n} \right]^2}}{\sum_{i=1}^n \left(1 - e^{-\frac{Q_i}{K}}\right)} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left(1 - e^{-\frac{R_i \times E \times T}{K}}\right) - \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - e^{-\frac{R_i \times E \times T}{K}}\right)}{n} \right]^2}}{\sum_{i=1}^n \left(1 - e^{-\frac{R_i \times E \times T}{K}}\right)} \quad (11)$$

在响应度  $R_i$  和积分时间  $T$  固定时,随着入射辐照度  $E$  的变化,视频响应曲线和 PRNU 曲线仿真结果如图 4、图 5 所示。

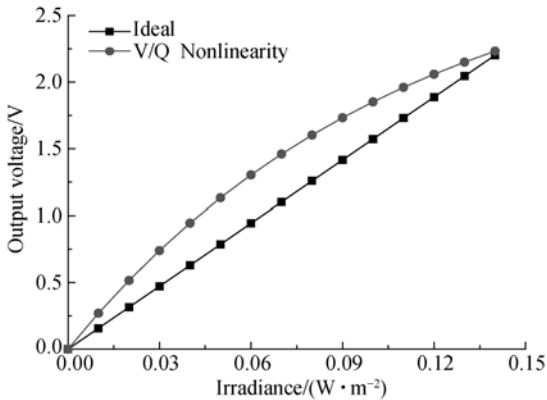


图 4 视频响应曲线

Fig. 4 Video response curves

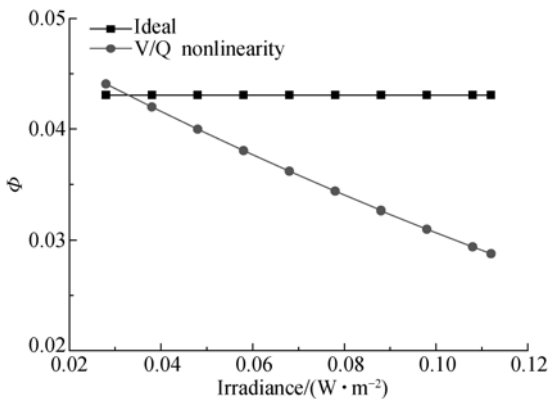


图 5 PRNU 噪声曲线

Fig. 5 PRNU noise curves

由图可见,系统存在  $V/Q$  非线性时,视频响应曲线产生了明显的非线性,PRNU 噪声曲线不再为水平直线,而表现为 PRNU 噪声因子  $\Phi$  随照度提高而下降。

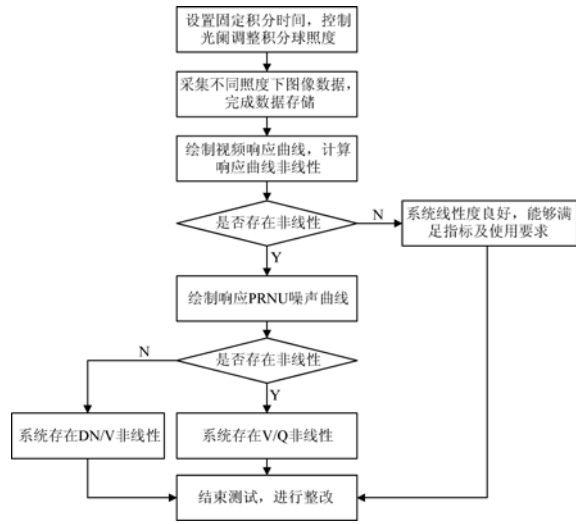


图 6 测试流程图

Fig. 6 Testing process

综上,由  $DN/V$  非线性和  $V/Q$  非线性的产生机理出发,通过视频响应曲线和 PRNU 噪声曲线相结合的测试方法可以有效地区分两种非线性,具体判别流程如图 6 所示。

一般情况下, $V/Q$  非线性属于光电传感器半导体工艺缺陷,在应用中的解决办法通常为更换传感器; $DN/V$  非线性则归因于电路设计缺陷,可根据实际情况通过算法补偿或改进硬件消除影响。

### 5 实验验证

本节通过实验验证结合视频响应曲线和 PRNU 噪声曲线来区分两种非线性方法的有效性。实验环境如图 7 所示,积分球采用 4 个卤素灯提供照明,采用 4 个电机控制光阑以保证在恒定色温下调节照度。利用标准照度计获取照度信息,可实现对照度精确的闭环自动控制。计算机通过串口控制积分球实现从暗场到饱和的等步长照度输出,在每个照度下控制成像系统进行图像采集并存储。随后上位机处理图像,完成视频响应曲线和 PRNU 噪声曲线绘制,根据曲线走势判断成像系统中非线性的存在形式并加以区分。



图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental device

对某在研 CMOS 相机成像电子学系统进行测试,测试在 25℃ 恒温下实现,采用暗电平校正消除暗信号影响。从暗场至饱和照度下进行图像采集,每个照度采集 500 幅图像并计算图像均值,绘制视频响应曲线如图 8 所示,由图 8 可知,视频响应出现了明显的非线性。

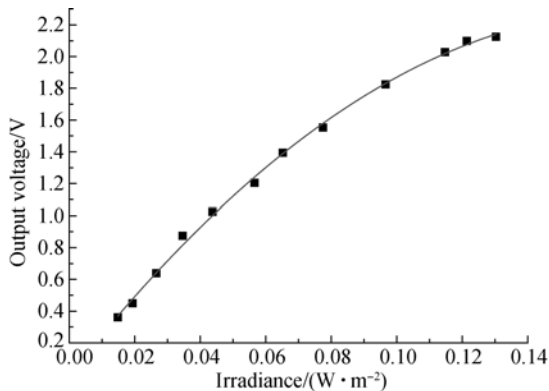


图 8 实测 CMOS 相机视频响应曲线

Fig. 8 Real video response curve of a CMOS camera

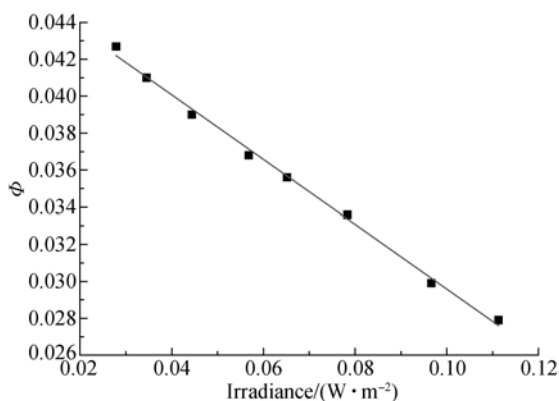


图 9 实测 CMOS 相机 PRNU 噪声曲线

Fig. 9 Real PRNU curve of a CMOS camera

为了确定非线性的类型,进一步完成 CMOS 相机的 PRNU 噪声曲线测试,测试结果如图 9 所示。由图 9 可知,PRNU 噪声因子随着照度的增加逐渐降低,由此判断相机存在较为严重的 V/Q

非线性。在该条件下用矩形靶标完成了 CMOS 相机成像电子学系统 Nyquist 频率处的 MTF 测试,测试结果如表 1 所示。随着照度的增加,MTF 逐渐降低,降幅明显。

为了解决上述问题,更换了新的 CMOS 传感器,然后对视频响应曲线和 PRNU 噪声曲线重新进行测试,测试结果表明,消除了 V/Q 非线性的系统视频响应曲线体现出了良好的线性度(98.75%),PRNU 噪声曲线基本呈现为水平直线,Nyquist 频率处的 MTF 测试结果如表 1 所示。比对结果表明,在消除了 V/Q 非线性的情况下,MTF 测试值有所提升,且基本不随照度变化。

表 1 MTF 测试结果

Tab. 1 MTF test results

输入辐照度 /(W·m <sup>-2</sup> )	V/Q 非线性状态下 MTF 测试结果	线性状态下 MTF 测试结果
0.043 8	0.511	0.547
0.056 6	0.496	0.545
0.065 2	0.487	0.545
0.077 4	0.475	0.544
0.096 6	0.469	0.543

CCD 相机成像电子学预处理电路的非线性(如放大电路负反馈端震荡及非线性)和电源引入的噪声是产生 DN/V 非线性的主要因素,在对某 CCD 相机进行测试时,其视频响应曲线产生了类似于图 8 曲线包络的非线性。为了确定非线性类型,完成了 PRNU 噪声曲线的测试,测试结果如图 10 所示。由图 10 可知,PRNU 噪声因子  $\phi$  不随照度变化而变化,因此判断相机存在 DN/V 非线性。在该条件下用矩形靶标完成了 CCD 相机成像电子学系统 Nyquist 频率处的 MTF 测试,测试结果如表 2 所示。随着照度的增加,MTF 呈下降趋势。

为了解决上述问题,对信号预处理电路印刷电路板(PCB)进行优化设计,以消除了放大器反馈端震荡和非线性失真,采用低压差线性稳压器(LDO)为 AD 器件供电,以有效降低电源噪声。优化后的系统基本消除了 DN/V 非线性,视频响应曲线体现出了良好的线性度(99.13%)。Nyquist 频率处的 MTF 测试结果如表 2 所示。比对结果表明,在消除了 DN/V 非线性的情况下,MTF 测试值有所提升,且基本不随照度变化。

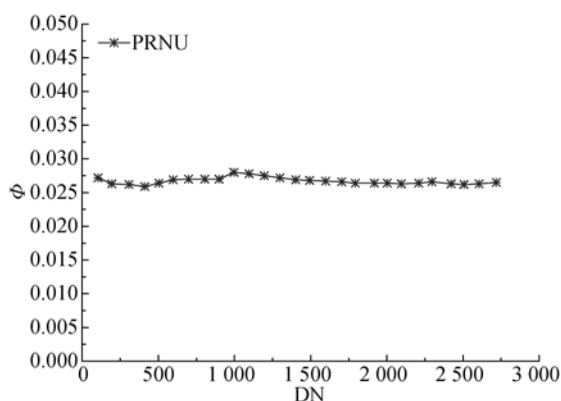


图 10 实测 CCD 相机 PRNU 噪声曲线

Fig. 10 Real PRNU curve of a CCD camera

表 2 MTF 测试结果

Tab. 2 MTF test results

输入辐照度 /( $W \cdot m^{-2}$ )	DN/V 非线性状态 下的 MTF 测试结果	线性状态下的 MTF 测试结果
0.0545	0.524	0.549
0.0683	0.517	0.548
0.0823	0.508	0.546
0.0965	0.501	0.545

## 参考文献:

- [1] 郭汉洲,吕恒毅,曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2195-2200.  
GUO H ZH, LV H Y, QU L X. Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDI CCD in remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2195-2200. (in Chinese)
- [2] JANESICK J R, ELLIOTT T, COLLINSS, *et al.*. Scientific charge-coupled devices [J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(8): 2686-92.
- [3] 张惠鸽,王哲斌,杨存榜,等. CCD 采集系统线性斜率及非线性研究 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1313-1316.  
ZHANG H G, WANG ZH B, YANG C B, *et al.*. Linearity slope and nonlinear scale for CCD sampling and collecting system [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2008, 20(8): 1313-1316. (in Chinese)
- [4] BRENT M C, ANTONIO O. Photo-response non-uniformity error tolerance testing methodology for

试验表明,电子学响应非线性的存在造成了电子学系统 MTF 的下降,并导致 MTF 随照度变化。结合视频响应曲线和 PRNU 噪声曲线能够有效区分 V/Q 非线性和 DN/V 非线性,准确完成系统非线性判断,为设计改进和数据校正提供有力的支持。

## 6 结 论

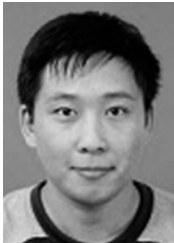
遥感相机电子学系统在信号转换过程中会产生 V/Q 非线性和 DN/V 非线性。两种非线性产生机理不同,但是均对成像子系统的 MTF 造成了影响,不仅降低了 MTF,还导致了 MTF 随入射照度变化。本文从理论出发建立了两种非线性影响 MTF 的数学模型,并完成了仿真,提出了视频响应曲线和 PRNU 噪声曲线相结合以区分两种非线性的评价方法。试验表明,成像电子学响应非线性对 MTF 的影响事实存在,且基本与仿真结果相符;利用视频响应曲线和 PRNU 噪声曲线相结合的方法能够有效区别两种非线性。

CMOS imager systems [J]. *SPIE-IS&T*, 2009 (7242): 724216-1-724216-12.

- [5] DAVID H S. Carrier diffusion degradation of modulation transfer function in charge coupled imagers [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1974, 21(3): 210-217.
- [6] BLOUKE M M, COWENS M W, HALL J E, *et al.*. Ultraviolet downconverting phosphor for use with silicon CCD imagers [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(19): 3318-3321.
- [7] 贺元兴,李新阳. CCD 光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响 [J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408001-1~0408001-8.  
HE Y X, LI X Y. Analysis of influence of CCD's nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0408001-1 ~ 0408001-8. (in Chinese)
- [8] 王德江,董斌,李文明,等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2500-2506.

- WANG D J, DONG B, LI W M, *et al.*. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2500-2506. (in Chinese)
- [9] 施敏. 半导体器件物理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.
- SHI M. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1987. (in Chinese)
- [10] 李晓杰, 任建伟, 李宪圣, 等. 反射式拼接 CCD 相机非均匀性定标与校正 [J]. *液晶与显示*, 2014, 29(6): 1057-1064.
- LI X J, REN J W, LI X SH, *et al.*. Non-uniformity calibration and correction of reflector-based mosaic CCD camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2014, 29(6): 1057-1064. (in Chinese)
- [11] 江登表, 李勃, 陈启美. 用于高动态范围图像生成的 CCD 辐照度标定 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2980-2988.
- JIANG D B, LI B, CHEN Q M. CCD irradiance calibration algorithm for HDR image acquisition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2980-2988. (in Chinese)
- [12] 李豫东, 汪波, 郭旗. CCD 与 CMOS 图像传感器辐射效应测试系统 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2778-2784.
- LI Y D, WANG B, GUO Q. Testing system for radiation effects of CCD and COMS image sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2778-2784. (in Chinese)
- [13] 周前飞, 刘晶红, 居波, 等. 面阵 CCD 航空相机斜视图像的几何校正 [J]. *液晶与显示*, 2015, 30(2): 506-512.
- ZHOU Q F, LIU J H, JU B, *et al.*. Geometric correction of oblique images for array CCD aerial cameras [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 506-512. (in Chinese)
- [14] 陈虎, 凌朝东, 张浩, 等. 基于 FPGA 的实时彩色图像边缘检测算法的实现 [J]. *液晶与显示*, 2015, 30(2): 143-150.
- CHEN H, LING C D, ZHANG H, *et al.*. Real-time FPGA-based implementation of color image edge detection algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 143-150. (in Chinese)

#### 作者简介:



李俊霖(1984—),男,辽宁鞍山人,博士研究生,助理研究员,2009年于天津大学获得硕士学位,主要研究方向为遥感相机成像电子学系统测试技术。E-mail:lijunlin0913@126.com



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电技术应用,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail:guoyf@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)