

文章编号 1004-924X(2012)05-0957-06

CCD 辐射响应函数矩阵的建立与应用

任建伟^{1*}, 张艳琪^{1,2}, 叶 钊^{1,2}, 全先荣^{1,2}

- (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 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了采用物理意义明确的函数式来表述大格式电荷耦合器件(CCD)的性能参数,直观地实现对面阵 CCD 辐射性能的评价,本文提出利用“辐射响应函数矩阵”概念来表述 CCD 每个像元的辐射性能参量。首先,分析了该矩阵各元素的物理意义,提出了对 CCD 每个像元的绝对辐射响应度、响应非线性度、暗噪声、信噪比以及非均匀性的描述方法。其次,对面阵 CCD KAI-16000 进行辐射性能检测,并利用回归分析计算出各像元的响应系数。最后,以测试结果为例,讨论和描述该矩阵的应用和结果。实验结果表明:该 CCD 近似成线性响应,通过矩阵函数可以计算出 CCD 非均匀性为 3.1%,暗噪声为 3.84。此方法实用,满足对大格式 CCD 直观表述的要求。

关键词:电荷耦合器件;辐射响应;函数矩阵;光电性能;响应度

中图分类号:TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122005.0957

Establishment and application of CCD radiation response function matrix

REN Jian-wei^{1*}, ZHANG Yan-qi^{1,2}, YE Zhao^{1,2}, QUAN Xian-rong^{1,2}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)
* Corresponding author, E-mail: Renjw@ciomp.ac.cn

Abstract: To describe the parameters of a big format Charge Coupled Device (CCD) by a function with definit physical meaning and to evaluate its radiation response performance directly, a concept of “radiation response function matrix” was proposed to describe the radiation response parameters of each pixel of the CCD. Firstly, by analyzing the physical concept of each element, some parameters such as absolute radiate response, nonlinearity, dark noise, Signal-to-Noise Ratio (SNR) and the non-uniformity of each pixel of the CCD were characterized by the matrix. Then, response characteristic coefficient of each pixel was obtained using the model of multiple regression analysis by a test on the area CCD KAI-16000. Finally, by taking the result for an example, application of this matrix was discussed. Experimental results show that the response of this CCD is linear, and its non-uniformity is 3.1%, dark noise is 3.84. These results demonstrate that the method is feasible and practical, and it can satisfy the requirement of the description of a big format CCD.

收稿日期:2011-09-13;修订日期:2011-11-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

Key words: Charge Coupled Device (CCD); radiation response; function matrix; photoelectrical performance; response

1 引言

在军事遥感领域,电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)作为一种重要的光电成像元件,在获取图像信息方面显示出巨大的能力。由于其成像通透性和明锐度均得到充分的认可,CCD 已经发展成为成像领域的重要应用部件^[1-2]。随着面阵 CCD 在遥感领域的广泛应用,制造厂商和应用部门开始更多地关注 CCD 器件的辐射性能。由于 CCD 的辐射性能在很大程度上决定了遥感系统的性能^[3-4],因此,CCD 成像系统辐射性能的评价成为一项非常重要的工作,是判断任务完成情况的主要依据之一。

CCD 器件的辐射响应性能参量主要包括辐射响应度、响应非均匀性、非线性度、暗噪声^[3]等。近些年,也有在大面阵 CCD 器件的评价中引入三维噪声评价的。目前,这些参量的检测技术已经成熟,但是对于表述面阵 CCD 的方法还有待改进,尤其对于大格式 CCD 而言,采用一个物理意义明确的函数式来表述 CCD 所有的性能参数是十分必要的。本文提出了一种以函数矩阵来表述 CCD 每个像元辐射性能参量的方法,并以面阵 CCD KAI-16000 为例,测试各参量并对其性能进行了评价。

2 辐射响应函数矩阵

CCD 图像每个像元输出数码值 DN 与其光敏面上所接收的光辐照度 E 之间的关系可用泰勒级数公式描述^[5-7]:

$$DN = DN_0 + R_1 \cdot E + R_2 \cdot E^2 + R_3 \cdot E^3 + \dots + R_n \cdot E^n, \quad (1)$$

其中, DN_0 的物理含义是 CCD 在零辐照下的信号输出(暗信号输出); R_1 是 CCD 的线性响应系数,也称为绝对辐射响应度; $R_2, R_3, R_4, \dots, R_n$ 为二次以上的高次响应系数。

式(1)中,高次项系数越接近于 0, CCD 响应越接近线性。此时, CCD 响应关系为线性响应,这种定量关系可简化为^[8-9]:

$$DN = DN_0 + R_1 \cdot E. \quad (2)$$

对于 $m \times n$ 像元的面阵 CCD 来讲,每个像元的输出数码值可以认为是矩阵上的一个元素,因此, CCD 的输出数码值可以用一个 $m \times n$ 的矩阵来表述。同样, $m \times n$ 像元面阵 CCD 的暗信号、线性响应系数、高次项系数均可以用 $m \times n$ 矩阵来表述。由于 CCD 每个像元均满足式(1),因此可以用“辐射响应函数矩阵”表示 CCD 每个像元的辐射响应性能,即为:

$$\begin{bmatrix} DN_{1,1} & & DN_{1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & DN_{i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ DN_{1,m} & & DN_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DN_{0,1} & & DN_{0,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & DN_{0,i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ DN_{0,1,m} & & DN_{0,m,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{1,1} & & R_{1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & R_{i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ R_{1,m} & & R_{m,n} \end{bmatrix} \cdot E + \dots + \begin{bmatrix} R_{n,1} & & R_{n,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & R_{n,i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ R_{n,m} & & R_{n,n} \end{bmatrix} \cdot E^n.$$

该矩阵包含了所有像元的式(1)描述的辐射响应函数。组成该矩阵函数中的各矩阵含义如下:

2.1 面阵 CCD 输出数码值矩阵

$$\begin{bmatrix} DN_{1,1} & & DN_{1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & DN_{i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ DN_{1,m} & & DN_{m,n} \end{bmatrix} \text{ 称为面阵 CCD 输出数}$$

码值矩阵, $DN_{i,j}$ 为面阵 CCD 第 i 行第 j 列像元的数码输出值。

根据该矩阵计算 CCD 数码输出的平均值为:

$$\overline{DN} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n DN_{i,j}}{m \times n}. \quad (3)$$

信噪比是指 CCD 信号输出与均方根噪声信号之间的比值,是衡量 CCD 成像质量的重要指标。采集 L 个稳定照明条件下的 CCD 数码输出

值,建立数码值矩阵,可以求出每个像元 L 次数码输出的均值和噪声,进而求得 CCD 的信噪比。

面阵 CCD 第 i 行第 j 列像元的信噪比可以用如下公式计算:

$$SNR_{i,j} = \frac{\overline{DN}_{i,j}}{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L (DN_{i,j,k} - \overline{DN}_{i,j})^2}{L-1}}}, \quad (4)$$

其中, $DN_{i,j,k}$ 为 CCD 第 i 行第 j 列像元的第 k 幅图像的输出数码值; $\overline{DN} = \frac{\sum_{k=1}^L DN_{i,j,k}}{L}$ 为第 i 行第 j 列像元 L 幅图像的平均数码输出值。

2.2 暗信号矩阵

暗信号是大多数光电器件所共有的特性,是图像产生噪声的原因之一。暗信号是指在没有光照情况下,CCD 的输出数码值。

在函数矩阵中,当辐射照度 $E=0$ 时:

$$\begin{bmatrix} DN_{1,1} & & DN_{1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & DN_{i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ DN_{1,m} & & DN_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DN_{0,1,1} & & DN_{0,1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & DN_{0,i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ DN_{0,1,m} & & DN_{0,m,n} \end{bmatrix}$$

其中, $\begin{bmatrix} DN_{0,1,1} & & DN_{0,1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & DN_{0,i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ DN_{0,1,m} & & DN_{0,m,n} \end{bmatrix}$ 称为面阵 CCD

的暗信号矩阵。 $DN_{0,i,j}$ 为面阵 CCD 第 i 行第 j 列像元的本底输出。

通过暗信号矩阵可以计算 CCD 的暗信号均值:

$$\overline{DN}_{Dark} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n DN_{0,i,j}}{m \times n}. \quad (5)$$

若建立 L 个暗信号矩阵,可以计算 CCD 的暗噪声:

$$DN_{Dark,noise} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L \sum_{i,j} (DN_{0,i,j,k} - \overline{DN}_{i,j,Dark})^2}{L-1}}, \quad (6)$$

其中, $DN_{0,i,j,k}$ 为 CCD 第 i 行第 j 列像元第 k 幅图

像的暗信号; $\overline{DN}_{i,j,Dark} = \frac{\sum_{k=1}^L DN_{0,i,j,k}}{L}$ 为第 i 行第 j 列像元 L 幅图像的平均暗信号。

2.3 线性响应系数矩阵

$$\begin{bmatrix} R_{0,1,1} & & R_{0,1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & R_{i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ R_{0,1,m} & & R_{0,m,n} \end{bmatrix}$$

称为线性响应系数矩阵。

其中, $R_{i,j}$ 为面阵 CCD 第 i 行第 j 列像元的线性响应系数。

在同一照度,每个像元的输出差异表示像元之间响应度的非一致性,该参量表征 CCD 的响应非均匀性(PRNU),主要描述 CCD 输出特性之间的关系。造成不均匀性的原因,除了材料与工艺的不均匀性外,也与器件转移效率的不均匀性有关,另外,各放大器性能的不均匀性也是引起不均匀性的一个重要原因。通过线性响应系数矩阵,可采用各像元间线性响应系数的标准差除以线性响应均值来表征面阵 CCD 的响应非均匀性:

$$PRNU = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (R_{i,j} - \overline{R}_1)^2}{m \times n - 1} \cdot \overline{R}_1. \quad (8)$$

(4) 响应非线性矩阵

$$\begin{bmatrix} R_{2,1,1} & & R_{2,1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & R_{2,i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ R_{2,1,m} & & R_{2,m,n} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R_{3,1,1} & & R_{3,1,n} \\ & \ddots & \\ \vdots & R_{3,i,j} & \vdots \\ & & \ddots \\ R_{3,1,m} & & R_{3,m,n} \end{bmatrix}$$

等高次项系数称为非线性矩阵。

其中, $R_{2,i,j}, R_{3,i,j} \dots$ 为面阵 CCD 第 i 行第 j 列像元的高次项响应系数。

通过多项式回归分析可计算求解各响应系数,若二次项系数很小以至于影响可以忽略,则称 CCD 成线性响应,通过分析线性拟合的相关系数可以得到 CCD 响应的非线性特征。

3 测试实例

实验选用面阵 CCD 为 KODAK 公司生产的行间转移型面阵 CCD 图像传感器 KAI-16000, 总像素数达到了 $4\ 960 \times 3\ 324$, 有效感光区域像素数为 $4\ 872 \times 3\ 248$, 面阵 CCD KAI-16000 的外形尺寸和内部结构分别如图 1 和图 2 所示。

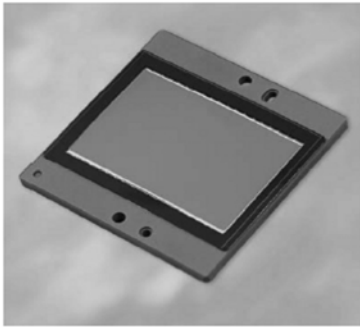


图 1 KAI-16000 的外形尺寸

Fig. 1 Formal size of area KAI-16000

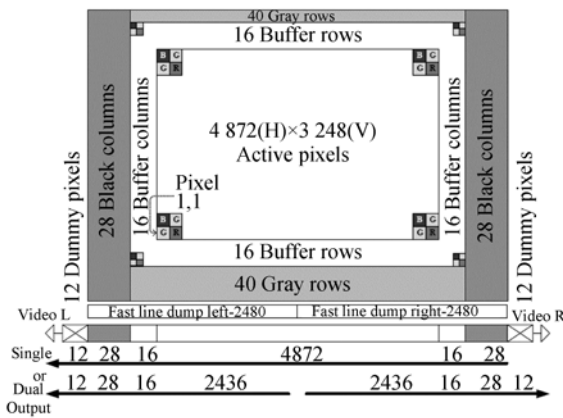


图 2 行间转移面阵 CCD 内部结构

Fig. 2 Inner structure of area CCD

由于面阵 CCD 的辐射响应性能检测主要是计算入射辐照度与 CCD 数码输出之间的函数关系, 因此, 可以应用数学统计理论中的回归分析来处理这两个物理量之间的函数关系。通过测试多组 CCD 的数码输出以及预先获得的已知量 E , 用回归分析的方法可以确定响应系数 R_1, R_2 等。

实验设备主要由定标光源和 HR-1024 光谱辐射计组成。定标光源采用溴钨灯直接照明 CCD 的方法, 根据平方反比定律可知, 此照明方式可以在 CCD 上产生均匀光斑, 非均匀性在 0.5% 以下。通

过改变溴钨灯与 CCD 之间的距离, 改变 CCD 上的辐射照度, 并采集各辐射照度下 CCD 的输出^[10]。

由于面阵 CCD KAI-16000 像素数量庞大, 因此给出 7 组入射辐照度下 (100, 100)、(100, 101)、(101, 100)、(101, 101) 4 个像元对应的输出数码值为例, 计算各响应系数, 如表 1 所示。

表 1 示例像元入射辐照度、输出数码值

Tab. 1 Illumination and DN of example pixels

辐照度	DN			
	(100,100)	(100,101)	(101,100)	(101,101)
0.138	993	987	989	989
0.107	770	766	767	744
0.070	535	531	536	529
0.043	357	362	361	360
0.026	238	237	230	228
0.014	149	148	150	151
0.007	86	85	84	83

由于各像元均满足式(1), 因此采用多项式回归分析方法, 其计算结果如表 2 所示。

表 2 示例像元响应系数

Tab. 2 Response coefficients of example pixels

辐射度	像元序号			
	(100,100)	(100,101)	(101,100)	(101,101)
DN_0	56	57	55	55
R_1	6 752.87	6 707.64	6 739.46	6 663.38
R_2	2.3	1.6	1.3	2.1
R_3	0.18	0.15	0.26	0.11

将面阵 CCD 每个像元的数码输出值、暗信号 DN_0 、线性响应系数 R_1 以及高次响应系数 R_2, R_3 用“辐射响应函数矩阵”表述为:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ DN_{100,100} & DN_{100,101} \\ \vdots \\ \dots & \dots \\ \vdots \\ DN_{101,100} & DN_{101,101} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 56 & 57 \\ \vdots \\ \dots & \dots \\ \vdots \\ 55 & 55 \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vdots \\ 6\ 752.87 & 6\ 707.64 \\ \vdots \\ \dots & \dots \\ \vdots \\ 6\ 739.46 & 6\ 663.38 \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot E + \begin{bmatrix} \vdots \\ 2.3 & 1.6 \\ \vdots \\ \dots & \dots \\ \vdots \\ 1.3 & 2.1 \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot E^2 + \dots$$

通过矩阵可计算以下各参量值为:

(1) 每个像元的绝对辐射响应系数:将线性响应系数矩阵中各元素显示在坐标系中如图 3 所示。

(2) 暗信号均值: $\overline{DN}_{Dark} = 47.4$; 暗噪声: $DN_{Dark,noise} = 3.84$.

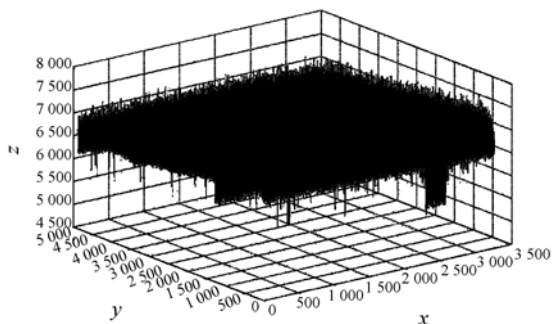


图 3 面阵 CCD 绝对辐射响应度

Fig. 3 Absolute radiometric responsibility of area CCD

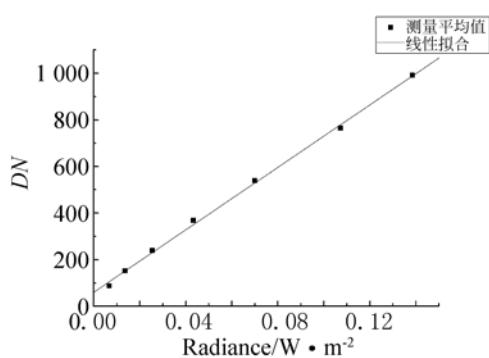


图 4 CCD 响应曲线

Fig. 4 Response of CCD

(3) 响应非均匀性: $PRNU = 0.031$.

以 CCD 第 200 行第 300 列像元为例,通过矩阵可知,此像元的辐射响应关系为

$$DN = 50.80 + 6\,696.59E + 1.3E^2.$$

其中,常数项 $DN_0 = 50.80$,一次项系数即绝对辐射响应度 $R_1 = 6\,696.59$,二次项系数很小可以忽略,那么 CCD 响应近似为线性响应。线性拟合相关系数为 0.999。

4 结 论

本文测试了面阵 CCD 器件绝对辐射响应度,建立了“辐射性能函数矩阵”来储存 CCD 所有像元的绝对辐射响应度以及高次项响应系数。通过分析高次项系数获得了响应的非线性关系,通过比较各像元的绝对辐射响应度差异获得了响应度的非均匀性以及其它辐射参量。测试结果显示,面阵 CCDKAI-16000 响应曲线近似为线性,均匀性较好。在实际测量中,该面阵 CCD 的平均暗信号为 55,而通过建立 CCD 辐射响应矩阵,计算暗信号值为 47.4,说明输出码值很小时按公式(1)计算精度不够,该问题有待进一步研究。

通过建立矩阵数据库,存储不同模式下面阵 CCD 器件的辐射性能参数,输入像元序号,即可调出面阵 CCD 各参量直接进行比较,挑选出高性能的 CCD 器件。

参考文献:

[1] 韩心志,焦世举. 航天光学遥感辐射度学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1994.
HAN X ZH, JIAO SH J. *Space Optics Remote Sensing Radiance*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1994. (in Chinese)

[2] 胡君,王栋. 空间光学遥感器的多光谱 TDICCD 信号检测与生成[J]. 光学精密工程,2009,8(11): 1810-1818.
HU J, WANG D. Detection and generation of multi-spectral TDICCD signals for space optical remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 8

(11): 1810-1818. (in Chinese)

[3] 叶培建,刘福安,曹海翔. 线阵 CCD 器件主要性能参数及测试方法[J]. 中国空间科学技术,1997,6(3): 44-51.
YE P J, LIU F A, CAO H Y. The main performances and test method of the linear charge coupled device[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1997, 6(3): 44-51. (in Chinese)

[4] 奕中杰. 线阵 CCD 光电参量测试系统的研究[J]. 光学精密工程,1994,2(4): 140-149.
LUAN ZH J. Study a test system of linear CCD photoelectronic parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(4): 140-149. (in Chinese)

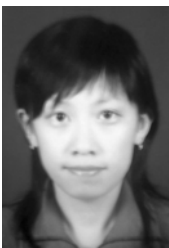
[5] 任建伟,万志,李宪圣,等. 空间光学遥感器的辐射

- 传递特性与校正方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1186-1190.
- REN J W, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1186-1190. (in Chinese)
- [6] 陈凤, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(3): 415-419.
- CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)
- [7] 任建伟, 刘则沟, 万志, 等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
- REN J W, LIU Z X, WAN ZH, *et al.*. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1491-1497. (in Chinese)
- [8] 崔敦杰. 光学遥感器的辐射定标纪念建所五十周年论文及论文摘要汇编(一)[C]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2002: 148-154.
- CUI D J. Radiometric calibration of optical remote sensor [C]. *Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences*. 2002: 148-154. (in Chinese)
- [9] 张立国, 李豫东, 刘则沟, 等. TDI-CCD 总剂量辐射效应及测试[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(12): 2924-2930.
- ZHANG L G, LI Y D, LIU Z X, *et al.*. Influence of total dose effects on TDI-CCD and corresponding test methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2924-2930. (in Chinese)
- [10] 车念曾, 闫达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- CHE N Z, YAN D Y. *Radiance and Luminosity* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. (in Chinese)

作者简介:



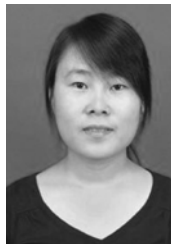
任建伟(1956—),男,吉林长春人,高级工程师,研究生导师,主要从事光谱/辐射测试设备的开发研制和光学遥感辐射校正方面的研究。E-mail: Renjw@ciomp.ac.cn



张艳琪(1985—),女,吉林市人,硕士研究生,主要从事空间光学遥感器实验室辐射定标以及辐射校正方面的研究。E-mail: 3kg.c@163.com



叶 钊(1985—),男,天津塘沽人,博士研究生,2008年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光电仪器辐射定标及相关系统的设计与控制。E-mail: sunyeath@gmail.com



全先荣(1987—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事遥感图像辐射校正方面的研究。E-mail: xianrong870721@163.com