

双近贴式 X 射线像增强器成像系统的三维 噪音测量及其分析技术*

李伟^{1,2,3}, 赵宝升¹, 张兴华^{1,2}, 赵菲菲^{1,2}, 张蕊利^{1,2}, 李汉志^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 长安大学 信息工程学院, 西安 710119)

摘要:针对基于双近贴式 X 射线像增强器的射线成像系统,提出了该系统的三维噪音测试及分析方法.分析了各噪音因子的含义,用三维曲线描绘出空间域和时间域噪音的分布情况,结合数字图像处理技术,测量了双近贴式 X 射线像增强器成像系统在微焦斑射线源四种照射条件下的三维噪音,并对其结果进行分析.分析表明,其结果与双近贴式 X 射线像增强器成像系统实际性能相吻合.

关键词:X 射线像增强器;三维噪音;空间噪音;时间噪音;射线成像系统

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)08-1932-5

0 引言

由于双近贴式 X 射线像增强器具有电子增益高、成像面积大、性价比高的优点,应用于各种行业的射线检测系统中.在基于双近贴式 X 射线像增强器的射线成像系统中,图像噪音的类型具有多样性和复杂性的特点^[1-4].这些噪音在图像水平方向和垂直方向都具有独特的特征,而且随时间而变化,即这些噪音的三维特性.原有的一些测试分析手段不能准确反映真实情况.本文用三维噪音模型分析了基于双近贴式 X 射线像增强器的射线成像系统,从系统的角度对射线成像系统进行了测试和分析,弥补了传统噪音分析方法的不足,对射线图像去噪算法的选取具有重要的指导意义.

1 三维噪音的测量模型

在未放置检测物体且焦屏距不变的情况下,固定射线源管电压和管电流和系统其他参量,采集射线成像系统输出端图像,用其采集的连续数字化图像组成的噪音图像数据组,则三维噪音随机响应模型为

$$s(t, v, h) = \bar{s} + N_t + N_v + N_h + N_{tv} + N_{th} + N_{tvh} = \bar{s} + N \quad (1)$$

式中 $s(t, v, h)$ 代表获得的图像数据,是帧、垂直方向和水平方向的函数; \bar{s} 为各个像元输出的均值,它与

信号输入的响应有关; N 为总噪音项,其均值为 0,且其均方根为总输出噪音.可以表示为 7 项沿三维方向即随时间 T 、空间垂直 V 和空间水平 H 波动的噪音,这七项噪音总称为三维噪音.

如图 1,对射线成像系统, m, n 代表了输出图像

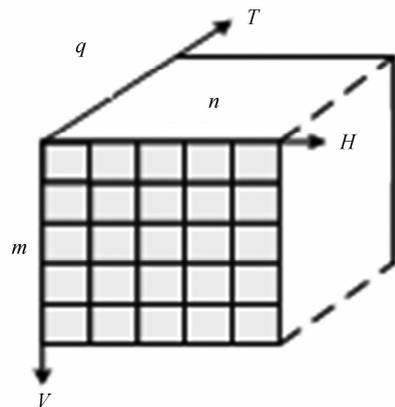


图 1 三维噪音模型坐标系统

Fig. 1 3-D noise model coordinate system

的 V 方向和 H 方向的像元数, q 为采集的帧数.则 q 帧输出图像的各像素信号总平均值为

$$\bar{S} = \frac{1}{qmn} \sum_{t=1}^q \sum_{v=1}^m \sum_{h=1}^n s(t, v, h) \quad (2)$$

系统总噪音的均方值为

$$\sigma^2 = \frac{1}{qmn} \sum_{t=1}^q \sum_{v=1}^m \sum_{h=1}^n |s(t, v, h) - \bar{S}|^2 \quad (3)$$

为了方便求出 7 种噪音的大小,引进方向操作因子的概念,其定义分别为: $D_t\{s(t, [v], [h])\}$ 为像元 (v, h) 各帧信号的平均值; $D_v\{s([t], v, [h])\}$ 为第 t 帧图像第 v 列 (t, v) 所有像元信号的平均值; $D_h\{s([t], [v], h)\}$ 为第 t 帧图像第 h 行 (t, h) 所有

* 西安市科技创新支撑计划(ZH0713)资助

Tel: 029-88887655-89 Email: houqing841128@163.com

收稿日期: 2008-07-07

修回日期: 2008-09-08

像元信号的平均值; $D_{rv}\{s(t, v, [h])\}$ 为 q 帧图像第 v 列 $q \times m$ 个像元信号的平均值, $D_{th}\{s(t, [v], h)\}$ 为 q 帧图像第 h 行 $q \times n$ 个像元信号的平均值, $D_{ch}\{s([t], v, h)\}$ 为第 t 帧图像所有像元 $v \times h$ 个像元信号的平均值, $D_{rvh}\{s(t, v, h)\}$ 为 q 帧图像所有 $q \times m \times n$ 个像元信号的平均值^[5-7].

根据方向因子的定义,分别给出其计算方法

$$D_t\{s(t, [v], [h])\} = \frac{1}{q} \sum_{t=1}^q s(t, v, h) \quad (4)$$

$$D_v\{s([t], v, [h])\} = \frac{1}{m} \sum_{v=1}^m s(t, v, h) \quad (5)$$

$$D_h\{s([t], [v], h)\} = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n s(t, v, h) \quad (6)$$

$$D_{rv}\{s(t, v, [h])\} = \frac{1}{qm} \sum_{t=1}^q \sum_{v=1}^m s(t, v, h) \quad (7)$$

$$D_{th}\{s(t, [v], h)\} = \frac{1}{qn} \sum_{t=1}^q \sum_{h=1}^n s(t, v, h) \quad (8)$$

$$D_{ch}\{s([t], v, h)\} = \frac{1}{mn} \sum_{t=1}^q \sum_{h=1}^n s(t, v, h) \quad (9)$$

$$D_{rvh}\{s(t, v, h)\} = \frac{1}{qmn} \sum_{t=1}^q \sum_{v=1}^m \sum_{h=1}^n s(t, v, h) \quad (10)$$

则利用三维噪声方向因子式(2)可改写为

$$\begin{aligned} \delta^2 = & \frac{1}{qmn} \sum_{t=1}^q \sum_{v=1}^m \sum_{h=1}^n |s(t, v, h) - \bar{S}|^2 = \\ & \frac{1}{qmn} \sum_{t=1}^q \sum_{v=1}^m \sum_{h=1}^n [(D_{ch} - D_{rvh}) + (D_{rv} - D_{rvh}) + \\ & (D_{th} - D_{rvh}) + (D_t - D_{rv} - D_{th} + D_{rvh}) + (D_h - \\ & D_{th} - D_{ch} + D_{rvh}) + (D_v - D_{rv} - D_{ch} + D_{rvh}) + \\ & [s(t, v, h) - D_t - D_v - D_h + D_{rv} + D_{th} + D_{ch} - \\ & D_{rvh}]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

由于时间、空间水平和垂直是三维相互正交,故上式展开后的交叉项对总噪声的影响在统计意义上是线性无关,故系统总噪声的均方值为

$$\delta^2 = \delta_t^2 + \delta_v^2 + \delta_h^2 + \delta_{rv}^2 + \delta_{th}^2 + \delta_{ch}^2 + \delta_{rvh}^2 \quad (12)$$

式中 δ_t 为帧间噪声; δ_v 为列间噪声; δ_h 为行间噪声; δ_{rv} 为随帧变化列噪声; δ_{th} 为随帧变化行噪声; δ_{ch} 为空间噪声,不随帧变化; δ_{rvh} 为随机三维噪声。

表 1 双近贴式 X 射线像增强器成像系统的三维噪声测量结果

μA	δ_t	δ_h	δ_v	δ_{rv}	δ_{th}	δ_{ch}	δ_{rvh}	\bar{S}	$\eta_{\text{SNR}}/\text{dB}$
10	0.143 8	1.105 2	1.820 9	0.994 1	1.040 7	6.466 8	11.913 9	53.375	13.256
90	0.160 3	5.068 3	6.446 2	1.373 0	1.445 3	7.038 2	18.423 6	149.86	18.206 2
170	0.124 3	6.279 9	7.852 5	1.200 6	1.200 6	7.283 7	18.551 0	180.96	19.784 5
250	0.114 7	7.154 8	8.868 9	1.117 8	1.184 6	7.371 4	18.689 8	203.20	20.726 4

从表 1 中可看出,七种噪声在双近贴式 X 射线像增强器成像系统总噪声中所占比重是不同的,按照由小到大的顺序为: δ_t 、 δ_{rv} 、 δ_{th} 、 δ_h 、 δ_v 、 δ_{ch} 、 δ_{rvh} ,即随机三维噪声 δ_{rvh} 贡献量最大, δ_h 、 δ_v 、 δ_{ch} 次之, δ_t 、 δ_{rv} 、

设没有射线入射时的系统零输入响应为 S_0 ,则

$$S_0 = \frac{1}{qmn} \sum_{t=1}^q \sum_{v=1}^m \sum_{h=1}^n s(t, v, h) = \begin{cases} u=0\text{kV} \\ i=0\mu\text{A} \end{cases} \quad (13)$$

考虑到 S_0 对系统输出信号的影响,则系统三维噪声的信噪比为

$$\eta_{\text{SNR}} = 20 \lg \left[\frac{D_{rvh} - S_0}{\sqrt{\delta^2}} \right] \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

2 三维噪声测量系统

在图 2 中,1 为射线源;2、3 为稳压电源;4 为双近贴 X 射线像增强器;5 为光学透镜;6 为 CMOS 工业相机;7 为计算机;8 为显示器.通过计算机 7 控制在铅屏蔽箱中的微焦斑射线源 1 的入射电压值与电流值,射线源 1 直接入射双近贴 X 射线像增强器 4 前表面,透镜与 CMOS 相机耦合的光学系统 5、6 直接采集像增强器后表面荧光屏上的图像数据至计算机 7,并在显示器 8 上呈现.

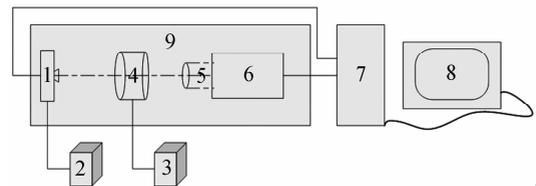


图 2 测量系统框图

Fig. 2 Diagram of a measuring system

3 三维噪声测量及分析

实验过程采用焦斑为 $33 \mu\text{m}$ 的 X 射线源,焦距为 1 m ,在射线垂直入射条件下,保持射线源管电压不变 (50 kV),不同入射条件下(将管电流从 $10 \mu\text{A}$ 线性增大至 $250 \mu\text{A}$).以像元数为 1000×1000 的 32 帧图像序列为对象,测量了双近贴 X 射线像增强器耦合 CMOS 相机光学成像系统的 \bar{S} ,七个方向的噪声变量 δ_i 和 η_{SNR} .

全过程在铅屏蔽箱材料的暗室中进行,室温为 20°C .双近贴式 X 射线像增强器成像系统的三维噪声及信噪比的测量结果如表 1.

δ_{th} 相对较小,其中 δ_t 基本可以忽略.与可见光微光像增强器三维噪声变化规律^[1]不同的是: δ_t 、 δ_{rv} 、 δ_{th} 随着射线管电流值的增大,在低灰度区(灰度值 $50 \sim 150$)升高趋势比较明显,随着射线剂量的加大,

输出图像灰度值的增加(灰度值 150~255), δ_i 、 δ_{rv} 、 δ_{rh} 略有下降,这说明射线剂量的增大使图像背景亮度达到一定程度时,与时间相关的噪声变量(即每帧输出图像之间的差别)呈减小的趋势,且对图像质量的影响程度很小(作者也在管电流不变,管电压线形增大的条件下测量,结论与此类似).

而 δ_i 、 δ_{rv} 、 δ_{rh} 、 δ_{rch} 随着射线剂量的加大,在低灰度区升高趋势比较明显,高灰度区($\mu A = 90 \sim 250$) 升高趋势减缓.系统信噪比升高趋势也随之减缓.

图3~图9给出了射线源管电压为 50 kV,管电流为 170 μA 时,系统七种噪声的分布曲线.

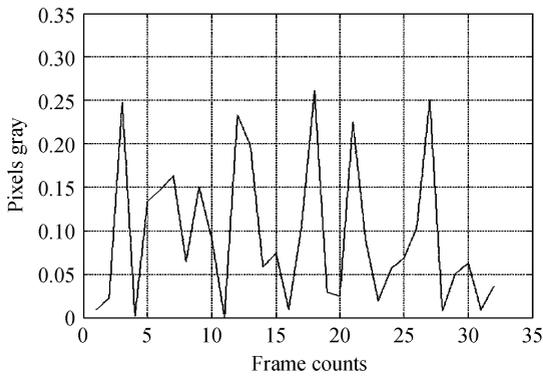


图3 帧间噪声(δ_i)分布曲线
Fig. 3 Inter-frame noise(δ_i)

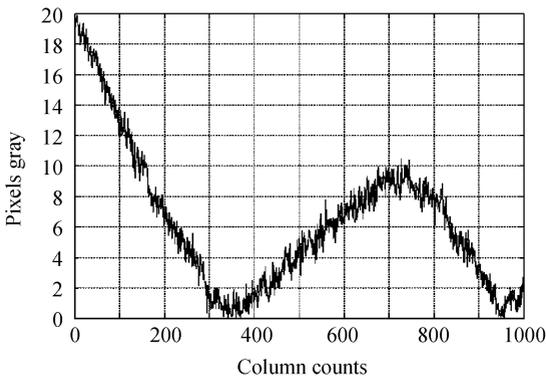


图4 列间噪声(δ_v)分布曲线
Fig. 4 Inter-column noise(δ_v)

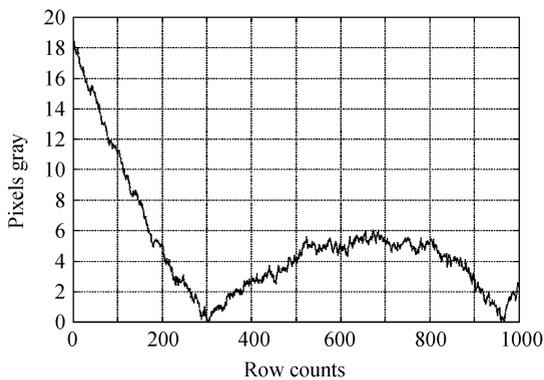


图5 行间噪声分布曲线(δ_h)
Fig. 5 Inter-row noise(δ_h)

从图3可以看出,帧间噪声分布起伏较大,但是帧间噪声水平很低;从图4、图5中可以看出,列间噪声和行间噪声分布起伏较大,但是噪声水平较低;

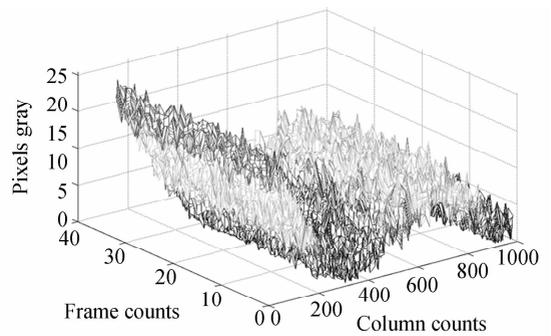


图6 随帧列间噪声(δ_{rv})分布图
Fig. 6 Frame-varying column noise(δ_{rv})

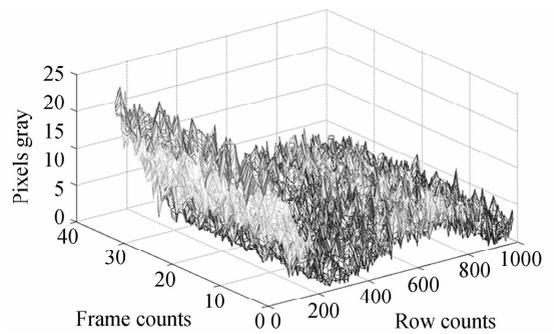


图7 随帧行间噪声分布图(δ_{rh})
Fig. 7 Frame-varying row noise(δ_{rh})

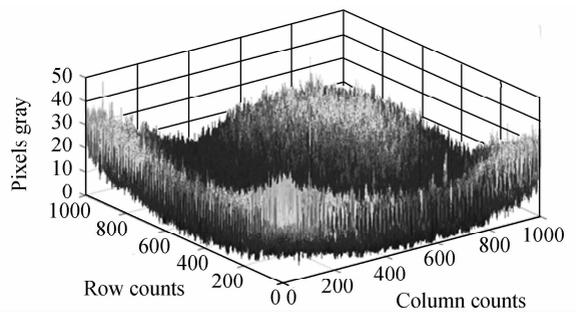


图8 空间噪声分布图(δ_{ch})
Fig. 8 Spatial noise(δ_{ch})

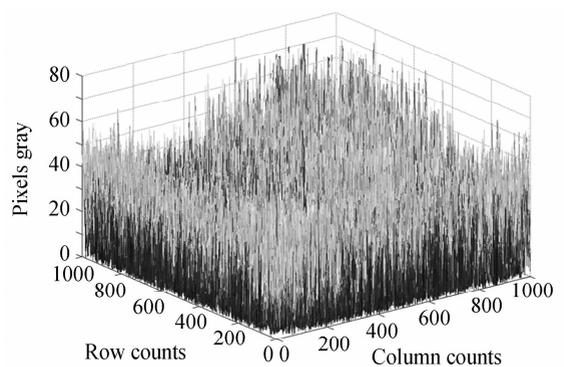


图9 第15帧随机三维噪声分布图(δ_{rch})
Fig. 9 15th frame random 3-D noise(δ_{rch})

从图 6、图 7 中可以看出,与图 4、图 5 类似,噪音分布起伏较大,但噪音水平较低.从图 8 中可以看出,噪音分布不均匀,噪音水平较大,说明双近贴式 X 射线像增强器成像系统固定图案噪音较大,整个区域噪音普遍起伏较大主要是由于射线源光强分布不均匀导致双近贴式 X 射线像增强器光响应不一致造成的,而局部区域个别的突起毛刺现象则是由于双近贴式 X 射线像增强器在加工流程时具有的工艺缺陷,比如荧光屏的坏点,针孔,或者在后段成像系统的 CCD 靶面坏点等因素造成的.从图 9 中可以看出,系统的随机噪音分布均匀,且噪音水平最高.从三维噪音的角度来看,三维随机噪音是影响双近贴式 X 射线像增强器成像系统成像质量的最主要因素,其次是由系统固有不均匀性引起的空间噪音.

从以上结果可以看出,如果能有效地降低系统的三维随机噪音、减小系统的固有不均匀噪音,将大幅度地降低系统总体噪音水平,提高系统信噪比;对于双近贴式 X 射线像增强器成像系统来说,系统成像质量将得到很大的提高.

4 结论

由于双近贴式 X 射线像增强器成像系统的特殊性,本文引入了三维噪音模型;模型定量地描述了系统的总体噪音水平,是一种时间域和空间域相统一的噪音模型,利用双近贴式 X 射线像增强器成像系统,本文测量了该系统在射线源管电压值不变,管电流从 $10 \mu\text{A}$ 线形上升到 $250 \mu\text{A}$ 条件下的三维噪音,测量结果和系统的实际性能相吻合.与传统噪音分析方法相比,结合图像处理技术的三维噪音分析

方法,使系统输出图像灰度变化统计特性表现得更直观,对成像系统质量评价和成像质量改善方式和方法的选择具有十分重要的指导价值.

参考文献

- [1] GAMAL A E, FOWLER B A, *et al.* Modeling and estimation of FPN components in CMOS image sensors [C]. *SPIE*, 1998, **3301**:168.
- [2] EIKENBERRY E F. A direct-coupled detector for synchrotron X-radiation using a large format CCD[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1991, **48**(2):110-118.
- [3] JOSEPH D, COLLINS S. Modeling calibration and correction of nonlinear illumination dependent fixed pattern noise in logarithmic CMOS image sensors. Instrumentation and measurement[J]. *IEEE Transactions*, 2002, **51**(5):996-1001.
- [4] ZHAO Bao-sheng. Image quality appraise of the X-ray image intensifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1991, **20**(3):292-299.
赵宝升. X 射线像增强器像质评价 [J]. *光子学报*, 1991, **20**(3):292-299.
- [5] LI Sheng-cai, JIN Wei-qi. The 3-D noise measurement and analysis of low-light-level imaging system [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, **25**(5): 439-442.
李升才, 金伟其. 微光成像系统三维噪音测量及其分析[J]. *北京理工大学学报*, 2005, **25**(5):439-442.
- [6] LI Sheng-cai, XU Zong-chang. 3-D noise measurement and analysis for a low-light-level ICCD Imaging system[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, **27**(3):463-466.
李升才, 徐宗昌. 微光增强型电荷耦合装置成像系统三维噪音模型及其分析[J]. *兵工学报*, 2006, **27**(3): 463-466.
- [7] ZHANG Wei, WANG Yue-feng. Noise measuring technology of image intensifier with three dimensions [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2002, **14**(1):29-32.
张伟, 汪岳峰. 像增强器三维噪音测量技术 [J]. *军械工程学院学报*, 2002, **14**(1):29-32.

3-D Noise Measurement and Analysis for a Double Proximity Focusing X-ray Image Intensifier Radiography Imaging System

LI Wei^{1,2,3}, ZHAO Bao-sheng¹, ZHANG Xing-hua^{1,2}, ZHAO Fei-fei^{1,2}, ZHANG Rui-li^{1,2}, LI Han-zhi^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710119, China*)

Abstract: A double proximity focusing X-ray image intensifier radiography imaging system was made as an experimental object. A new method was used for measuring and analyzing 3-D noise of this system. By analyzing 3-D noise of this system, the distribution of noise both in time field and frequent field with curves of three dimensions was drawn. The 3-D noise of a double proximity focusing X-ray image intensifier radiography imaging system was measured and analyzed under four different conditions with the help of digital image processing technology. The result of measurement and analysis agrees well with the performance of the two side proximity of X-ray image intensifier radiography imaging system.

Key words: X-ray image intensifier; 3-D noise; Spatial noise; Temporal noise; Radiography



LI Wei is pursuing Ph. D. at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. He is majoring in the system of X-ray radiography and image processing.