

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

APS 星敏传感器探测灵敏度研究

刘金国^{1,2}, 李杰³, 郝志航¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 空间光学研究部, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:从噪声中信号的检测理论着手, 推导了恒星信号在有源像元传感器(APS)像面的响应电子数的表示方法, 介绍了APS的主要噪声及噪声模型计算, 得出了ASP星敏感器的信噪比, 并用信噪比阈值推导出APS星敏感器的探测灵敏度模型。通过对典型APS IBIS5的实例计算, 得出在常规光学系统设计参数下, 当信噪比阈值为8.1, 探测概率为99.9%时, 探测灵敏度可达到6.5星等。

关键词: APS; 星敏传感器; 信噪比; 探测灵敏度

中图分类号: V448.22 **文献标识码:** A

Study on detection sensitivity of APS star tracker

LIU Jin-guo^{1,2}, LI Jie³, HAO Zhi-hang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Electronic Information Engineering College, Changchun University, Changchun 130022, China*)

Abstract: The expressions of APS(Active Pixel Sensor) star detected signal and APS noise were given, and signal-noise ratio (SNR) of star sensor was obtained. Based on the theory of inspecting signal from noise and optimal SNR threshold detection principle, the detection sensitivity model was established, and the corresponding APS star sensor detection limit was obtained based on APS IBIS5 and general optical system parameter.

Key words: APS; star tracker; Signal-noise ratio(SNR); detection sensitivity

1 引言

星敏传感器是一种精密的空间姿态敏感器, 星敏传感器的探测灵敏度是指星敏传感器能够探测到的最弱的星的能力, 是设计星敏传感器的一个重要指

标。探测灵敏度高低决定了星敏传感器视场内的星的数量, 探测灵敏度越高, 视场越大, 则可探测到的星数量越多, 因此该参数是建立星敏传感器导航星库和星识别算法的重要依据^[1]。随着微小卫星和纳米卫星的发展, 未来的星敏传感器应当具有重量小、功耗低、抗辐照、高采样频率、高动态范围等

特点,有源像元传感器 APS(Active Pixel Sensor)正是适应未来星敏传感器发展的一种 CMOS 图像传感器^[2-3]。

APS 星敏传感器星等探测灵敏度与 APS 相机系统灵敏度密切相关,相机系统的灵敏度与透镜的孔径尺寸和 APS 的量子效率、填充因子、系统的透镜和曝光时间等因素有关。本文通过研究 APS 的星敏传感器星图的信噪比来研究星敏传感器的探测灵敏度模型,并分析了影响探测能力的因素,针对实际星敏传感器的设计,分析计算了基于典型 APS 的星敏传感器的探测灵敏度。

2 星点目标探测的信噪比判据

星敏传感器星光信号的检测是对所拍摄或跟踪的星图的星识别过程,恒星图像由几个像元构成,其灰度近似成正态分布,并有一灰度最大的像素,因此天空背景下的星点信号的检测可应用白噪声中的脉冲探测方法,探测过程示意图见图 1^[4]。

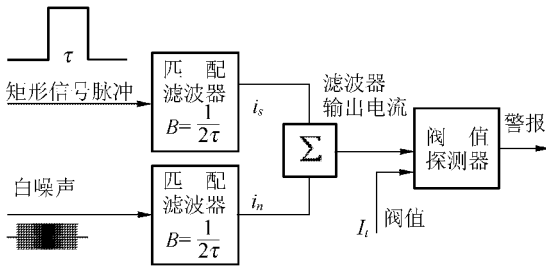


图 1 阈值探测过程示意图

Fig. 1 Threshold detecting process chart

信号和噪声通过匹配滤波器输出,设输入信号为矩形脉冲信号,则信号的输出为同峰值振幅的三角脉冲;滤波器输出的噪声为高斯的,其均方根值 I_n 由下式给出:

$$I_n = \sqrt{i_n^2} = \sqrt{WB} = \sqrt{W/2\tau}, \quad (1)$$

式中 W 为输入的白噪声的频谱功率谱密度 (A^2/Hz); B 为匹配滤波器的噪声带宽, $B = 1/2\tau$, τ 为输入脉冲的宽度。

当探测阈值确定时,平均虚假报警率 \overline{FAR} 是在输出噪声电流 i_n 超过探测器阈值 I_t 时每秒的平均值。这一速度由赖斯给出:

$$\overline{FAR} = \frac{1}{2\sqrt{3\tau}} e^{-I_t/I_n}, \quad (2)$$

可见随着阈值 I_t 的上升, \overline{FAR} 迅速下降。

当信号出现时,将要被检测到的概率 P_d 在信号的峰值的瞬间接近于信号加噪声超过阈值 I_t 的几率,可得:

$$P_d \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}I_n} \int_{I_t - I_s}^{\infty} \exp(-i_n^2/I_n^2) di_n = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{I_s - I_t}{\sqrt{2}I_n} \right) \right], \quad (3)$$

由式(3)可求出要获得特定探测概率 P_d 所需的峰值信号对均方根噪声之比 I_s/I_n 。

图 2 给出这种关系的图解。其中,虚线是噪声的概率密度分布,而实线部分则是信号与噪声叠加后的概率密度分布。当取不同幅度的门限(对应不同信噪比)作为判定有无目标的准则时,其虚警率 P_e (图中网格部分)和探测率 P_d (图中斜线部分)相应发生变化。

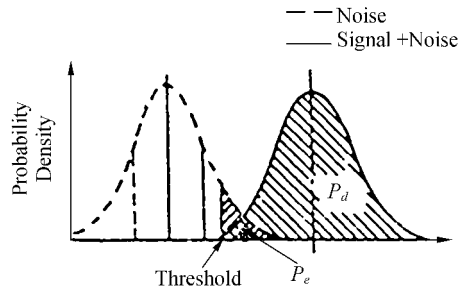


图 2 探测率、虚警率与信噪比阈值

Fig. 2 Detectability, FAR and SNR threshold

实现最佳探测的原则是在一定条件下,获取最大的探测率和最小的虚警率,比如当要求探测率大于 99%,虚警率小于 1%时,可求得信噪比阈值 V_{th} 为 5。

对于星敏传感器而言,对恒星目标实现有效探测,应满足以下判据^[4]

$$SNR = \frac{S}{N} \geq V_{th}, \quad (4)$$

其中: S 为信号光电子数; N 为噪声均方根值; V_{th} 为满足一定探测率和虚警率的信噪比阈值。

3 APS 星敏传感器探测灵敏度模型

3.1 APS 星敏传感器的信噪比计算

3.1.1 APS 对星光信号的响应

星的亮度用星等来表示,天文学给出 0 等星每秒、每平方厘米、每个埃 (\AA) 发出的光子数为 1 000,星等每差 5 等,发光强度相差 100 倍的关

系。得出 m 等星在大气层外的光通量 Φ_m (光子数/cm²Ås)的公式^[4]:

$$\Phi_m = 10^{(15-2m)/5}, \quad (5)$$

APS 星敏传感器光学系统镜头的有效通光孔径面积为 A_l , APS 图像传感器焦平面在曝光时间 T 内接收的星光信号光子数为:

$$N_{ph} = A_l \cdot T_l \cdot \Delta B \cdot \Phi_m \cdot T, \quad (6)$$

其中: A_l 的单位为 cm²; T_l 为镜头的透过率, 一般为 0.6—0.8; ΔB 为波段宽度, 一般为 300~600Å。

当 APS 器件的量子效率 Q_E , 填充因子 K_{fill} , APS 图像传感器上产生的星光信号电荷数为:

$$N_{de} = N_{ph} \cdot Q_E \cdot K_{fill} =$$

$$A_l \cdot T_l \cdot \Delta B \cdot 10^{(15-2m)/5} \cdot Q_E \cdot K_{fill} \cdot T, \quad (7)$$

星光信号为一点目标, 考虑采用亚像元细分技术对质心精度计算的要求, 星点光斑要覆盖一定的像元数, 那么探测到的光斑中心像元的能量大小与光斑的大小有关, 用能量集中度 K 表示光斑中心像元占光斑能量的百分比:

$$S_{center} = N_{de} \cdot \frac{E_{center}}{E_{spot}} = N_{de} \cdot K, \quad (8)$$

代入公式(8), 可得光斑中心像元信号电子数:

$$S = A_l \cdot T_l \cdot \Delta B \cdot 10^{(15-2m)/5} \cdot Q_E \cdot K_{fill} \cdot K \cdot T, \quad (9)$$

一般质心精度计算采用 3×3 窗口, 光斑大小一般要占 4 个像元, K 值为 0.25—0.4^[6]。

3.1.2 APS 噪声及背景噪声

1. APS 噪声源^[6-7]

APS 的噪声来源于其光敏单元的光电二极管、像元晶体管的复位和读出过程, 有源放大器、行列选择开关等。与 CCD 相比, APS 的随机噪声、固定图形噪声、暗电流都很高, 这也是 APS 应用受到限制的主要原因。

(1) 暗电流噪声 n_{DC}

暗电流噪声 (dark current noise) 是一种白噪声, 可以用泊松分布描述, 其等值电子数 n_{dc} 等于暗电流产生的电子数的平方根, 设暗电流产生的电子数为 N_{dark} , 有:

$$n_{DC} = \sqrt{N_{dark}} = \sqrt{J_{dark} A t_{int} / q}, \quad (10)$$

式中 J_{dark} 为暗电流密度, A 为像元面积, t_{int} 为积分时间。由于暗电流信号主要与温度有关, 所以抑制暗电流噪声最有效的措施便是对器件进行致

冷。

(2) 光子散粒噪声 n_{PS}

光子散粒噪声 (photo shot noise) 是在光电成像器件的光敏面吸收光子产生电荷的过程, 是随机过程, 即在一定的入射光照下, 光敏面在任意相同的、瞬时间隔内产生的光电子数不尽相同, 而是在某一平均值上下起伏, 该光电子数的起伏形成光电子散粒噪声。光子散粒噪声与信号是相关的, 它与信号总电荷数的平方根成正比, 是光电元件所固有的噪声, 不能被后续电路所抑制或抵消。设 N_S 为信号总电荷数, 有

$$n_{PS} = \sqrt{N_S}, \quad (11)$$

(3) 非均匀性噪声 n_{NUN}

非均匀性噪声包含暗电流非均匀性噪声和光子响应非均匀性噪声。暗电流非均匀性噪声 (dark current non-uniformity) 是由于各个像元的暗电流不同形成的, 由暗电流非均匀性造成的噪声占暗电流噪声的 30%, 表示为: $n_{DCNU} = 30\% \cdot n_{DC}$ 。光子响应非均匀性 (photoresponse non-uniformity) 是由于光电图像传感器的各个像元对光子的响应存在着微小的差别, 形成了光子响应非均匀性。

(4) 固定模式噪声 n_{FPN}

限制 APS 成像质量的一个重要指标就是固定模式噪声 (fix pattern noise), 主要是由像元中 MOS FET 阈值电压的偏差、像元内源极跟随器的增益偏差、晶体管尺寸的偏差、列放大器增益和偏置的偏差以及复位线阻抗导致的复位电压偏差等造成的。

(5) 热噪声和 1/f 噪声

热噪声和 1/f 噪声是光敏元件本身的噪声。热噪声是电子在光敏器件中的热随机运动产生的一种白噪声, 它的大小与电流无关。1/f 噪声与电流有直接关系, 也叫电流噪声, 是元件本身材料、结构、工艺等原因引起的电流变化。

(6) 复位噪声 n_{reset}

复位噪声又叫 KT/C 噪声, 本质上属于热噪声, 在读出操作过程中对积分电容和采样电容采样时, 需要通过复位晶体管 M_1 导通对积分电容进行复位, 而 M_1 导通时具有一定的沟道电阻, 因此会形成 KT/C 噪声, 由下式表述:

$$n_{reset} = \frac{\sqrt{kTC_{pl}}}{q}, \quad (12)$$

式中 k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, C_{pd} 为光电二极管的等效电容, q 为电子的电量。

(7) 读出噪声 n_{RN}

读出噪声属于暂态噪声,是由于电路通道中各种噪声源(列放大器、可编程增益放大器和模数转换器)引起的信号电平的随机波动,在检测弱光信号时这种噪声对系统的信噪比影响较显著。

3.1.2.2 APS 噪声模型

考虑前述 APS 的各噪声源,APS 的噪声模型可表示为:

$$n_{APS} = \sqrt{n_{\text{dark}}^2 + n_{PS}^2 + n_{NUN}^2 + n_{FPN}^2 + n_{RN}^2 + n_{\text{reset}}^2 + n_{1/f}^2}, \quad (13)$$

考虑系统采用双采样电路可以抑制 $1/f$ 噪声和复位噪声,并且光子的散粒噪声可由信号电子数表示,非均匀性噪声由暗电流非均匀性噪声和光子响应非均匀性噪声组成,则上式可表示为:

$$n_{APS} = \sqrt{N_{\text{dark}} + N_S + n_{NUN}^2 + n_{FPN}^2 + n_{RN}^2}, \quad (14)$$

3.1.2.3 背景噪声

背景噪声相当于 10 等星所辐射的能量在 APS 上产生的电子数^[7],由公式(5),取 $m=10$,有:

$$B = N_{ph} \cdot Q_E \cdot K_{\text{fill}} = A_l \cdot T_l \cdot \Delta B \cdot 10^{-1} \cdot Q_E \cdot K_{\text{fill}} \cdot T, \quad (15)$$

4. APS 像面上的总噪声

APS 总的噪声均方根可表示为:

$$N = \sqrt{S + B + N_{\text{sensor}}^2}, \quad (16)$$

其中 N_{sensor} 表示由 APS 的噪声源引起的噪声,表示为: $N_{\text{sensor}} = \sqrt{N_{\text{dark}} + n_{NUN}^2 + n_{FPN}^2 + n_{RN}^2}$; S 表示信号电子数,即 $S = N_S$ 。

3.1.3 APS 星光信号的信噪比

APS 星光信号的信噪比表示为:

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S + B + N_{\text{sensor}}^2}}, \quad (17)$$

3.2 探测灵敏度模型

根据信噪比判据,系统星等探测灵敏度模型可得

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S + B + N_{\text{sensor}}^2}} \geq V_{th}, \quad (18)$$

由上式可解得:

$$S \geq \frac{V_{th}^2 + \sqrt{V_{th}^4 + 4V_{th}^2(B + N_{\text{sensor}}^2)}}{2}, \quad (19)$$

S 带入公式(7),得系统星等探测灵敏度的数学评估模型为:

$$m \leq 7.5 - 5 \lg \left(\frac{V_{th}^2 + \sqrt{V_{th}^4 + 4V_{th}^2(B + N_{\text{sensor}}^2)}}{2 \cdot A_l \cdot T_l \cdot \Delta B \cdot K_{\text{fill}} \cdot K \cdot T \cdot Q_E} \right), \quad (20)$$

3.3 影响探测灵敏度大小的因素

由上述分析可知,影响探测灵敏度大小的因素主要有以下几个方面:

(1) 光学系统的影响。探测灵敏度与光学镜头透过率,光学系统孔径,以及星点像光斑能量集中程度有关。由于设计一般要求 $F\# = f/D$ 一定,光学系统的孔径的增大,同时要求焦距增长,这会增加系统的重量,而单独增加 D 会给光学系统设计带来困难,该项指标受星敏感器总体设计和光学系统设计的限制。而星点像光斑能量集中程度大小受质心算法的限制,一般不能超过 0.5。

(2) APS 的参数大小的影响。APS 的量子效率和填充因子越高,APS 的信号电子数越多,灵敏度越高。一般 APS 的量子效率 Q_E 为 0.3—0.7,填充因子 K_{fill} 为 0.3—0.7,也有器件给出的是量子效率和填充因子的积。此外,APS 噪声水平对灵敏度的影响较大,通过冷却 APS 器件、采用相关双采样技术,和软件去噪(比如固定图像噪声等)可以降低噪声。

(3) 背景辐射对探测灵敏度影响较小,当在信号处理中采用阈值处理时,可以把背景噪声滤掉。

(4) 信噪比阈值的影响。信噪比阈值取的越大,探测率越高,但探测灵敏度将下降。

(5) 积分时间。积分时间越长,灵敏度越高。然而积分时间过长,会导致系统更新速度的下降,而且会出现图像的拖尾,降低图像质心的精度而影响测量精度。

4 实例分析

星敏感器设计的光学系统参数为: $F\# = 1.4$, 焦距 56 mm, 孔径 D 为 40 mm, 孔径面积为 $1\,257\text{ mm}^2$, 光学系统带宽 $3\,000\text{ \AA}$, 镜头的透过率为 0.7。APS 采用 Fill Factory 的 IBIS5^[8], 其量子效率和填充因子的积为 30%, 能量集中度取 0.4。设 APS 的积分时间为 0.1 s, APS 的暗电流为 150 pA/cm^2 , 像元大小 $6.7\text{ }\mu\text{m} \times 6.7\text{ }\mu\text{m}$, 因此每个像元上的暗电流电子数为 42, 非均匀性噪声

的均方根 $\sqrt{n_{NUN}^2} = 32$; 固定模式噪声的均方根 $\sqrt{n_{FPN}^2} = 16$; 读出噪声的电子数 $n_{RN}^2 = 80$, 可得 $N_{\text{sensor}}^2 = 1\ 362$ 。背景 10 等星的电子数 $B = 39$ 。取 99.9% 的探测率, 则 $V_{th} = 8.1$ 。上面各参数代入公式(20)得星等灵敏度 m 为 6.5。

5 结 论

本文从噪声中信号的检测理论着手, 通过研究基于 APS 器件的星敏感器星图的信噪比来研

究星敏感器的探测灵敏度, 推导出计算探测灵敏度的模型, 并就影响探测能力的因素进行了分析, 给出了具体 APS 星敏感器实例的探测灵敏度的计算结果。从计算结果看出, APS 器件应用于星敏感器的探测灵敏度水平已经能够满足星敏感器的需要。虽然目前 APS 灵敏度的总体水平低于 CCD, 但 APS 应用于星敏感器的优势明显, 探测灵敏度能够达到一定水平, APS 星敏感器的研究应用和发展的前景十分光明。

参考文献:

- [1] SCHMIDT U. Autonomous star tracker based on active pixel sensors (APS) [J]. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, 2004, 554, (6): 355-358.
- [2] HOPKINSON G R, PURLL D J, ABBEY A F, *et al.* A short, active pixel array device in space missions [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2003, 513: 327-331.
- [3] LIU L J, LI J G, XUE K, *et al.* CMOS APS imaging system application in star tracker [J]. *SPIE*, 2005, 5633: 536-542.
- [4] 无线电公司(美). 电光学手册 [Z]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
Radio Company (USA). *Electrooptics Manual* [Z]. Beijing: National Defence Industry Press, 1978. (in Chinese)
- [5] 李杰. APS 星敏感器关键技术的研究 [D]. 中科院博士论文, 2005.
LI J. Study on the key technology of APS star tracker [D]. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences*, 2005. (in Chinese)
- [6] TIAN H, FOWLER B, GAMAL A E. Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, 36(1).
- [7] 张晨, 陈朝阳, 沈绪榜. APS 星跟踪器探测灵敏度研究 [J]. *光电工程*, 2004, 31(10): 17-20.
ZHANG CH, CHEN ZH Y, SHEN X B. Study on detection sensitivity of APS star tacker [J]. *Photoelectricity Engineering*, 2004, 31(10): 17-20. (in Chinese)
- [8] IBIS5A-13000 Imager. <http://www.fillfactory.com/html/products/html/ibis5.htm> [Z]. 2005.

作者简介: 刘金国(1968—), 男, 吉林长春人, 研究员, 从事 CCD 图像传感器应用技术研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn