

文章编号: 0253-2239(2006)10-1488-7

对地观测平台恒星敏感器离焦成像折中设计分析*

郭 强^{1,2}

(¹ 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081)
(² 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 从对地观测平台角秒量级姿态确定需求出发, 在构建星敏感器惯性系成像模型的基础上指出, 恒星在成像面上的定位误差是星敏感器姿态确定误差的主要来源。同时, 结合理想光学系统离焦模型, 分析了星敏感器主要性能指标间的量化关系, 并给出了成像面定位误差最低限。仿真结果表明, 从优化系统性能考虑, 成像模糊区直径为 2~3 个像元的配置是利用星敏感器焦平面的“轻微离焦”来实现亚像元定位的最佳方案, 定位误差可达 0.2 个像元, 能够满足星敏感器惯性姿态确定精度 4"~5" 的要求。理论分析和数值仿真结果可为后续星敏感器指标的提出及仪器设计提供技术参考。

关键词: 成像系统; 星敏感器; 离焦模型; 折中设计; 姿态确定; 亚像元定位

中图分类号: O436 文献标识码: A

Tradeoff Design Analysis for Defocused Imaging of Star Sensor on Space-to-Earth Platform

Guo Qiang^{1,2}

(¹ *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081*)
(² *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract: For the sake of the requirement for attitude determination at arc second order in space-to-earth platform, the imaging model of star sensor in inertial frame is constructed. It is pointed out that the main error for attitude determination of star sensor is the positional error of star in focal plane. Meanwhile, based on the defocused model of ideal optical system, the quantitative relationships among the main indexes of star sensor are analyzed and the minimum projection position error is also given. It is shown from the simulation results that, the blur area's diameter between 2~3 pixels is the best performance scheme using the slight-defocusing of star sensor's focal plane array and the positional error is only 0.2 pixel, which meets the requirement of star sensor about 4~5 arc second in inertial frame. The analyzed and simulated results can be references for the following indexes determination and designing of star sensor.

Key words: imaging system; star sensor; defocused model; tradeoff design; attitude determination; sub-pixel positioning

1 引 言

恒星敏感器(Star Sensor, 简称星敏感器)是对空间恒星进行探测、识别, 并在此基础上得到飞行器三轴指向的姿态测量设备。天文观测数据表明, 天球中绝大多数恒星的自行角速率仅为 $10^{-2}''/a$, 这为飞行

器定姿提供了非常稳定的姿态参考源。因此, 当定姿精度要求达到角秒量级时, 星敏感探测成为首选的姿态测量手段。

国外在该领域的研究最早出现于上世纪中叶, 主要用于飞机和导弹的制导。目前, 已发展到基于

* 国家自然科学基金(40401040)资助课题。

作者简介: 郭 强(1975~), 男, 福建福州人, 博士后, 主要从事卫星资料预处理、图像质量评价及实时信号处理等的研究。E-mail: qiang_g@nsmc.cma.gov.cn

收稿日期: 2005-12-01; 收到修改稿日期: 2006-03-28

$$\begin{cases} x_i^j \cdot \sin \alpha - y_i^j \cdot \cos \alpha = x_p^j, \\ (x_i^j \cdot \cos \alpha + y_i^j \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \delta - z_i^j \cdot \cos \delta = -y_p^j, \end{cases} \quad (3)$$

(3)式给出了对地观测平台上无像差星敏传感器投影面(等同于成像面)成像数学模型。显然,当忽略由星表数据偏差引起的恒星惯性坐标误差后,恒星在投影面上的定位误差成为影响星敏传感器主光轴姿态反演精度的主要因素。实践表明,光学系统的“轻微离焦(Slight Defocusing)”是提高定位精度的可行途径^[2,3],但这将在一定程度上对星敏传感器其他性能产生影响,因此,需要做折中设计与分析。

3 主要性能指标间定量关系分析及数值仿真

星传感器的任务就是测量自身光轴的惯性指向,并在此基础上得到卫星的瞬时姿态。下面将从利用离焦图像改善定位精度的机理分析入手,推导星传感器主要指标间的定量关系。

3.1 亚像元恒星成像面位置确定原理分析

当忽略光学系统引入的像差,则由离焦光学系统产生的恒星像将分布在数个像元内,且满足对称特性。假定单个恒星在图像平面内的中心位置记为 x_c, y_c ,则该位置可由像平面的能量重心所代替,并表示为图像能量密度函数一阶空间矩和零阶空间矩的比值^[4],即满足

$$\begin{cases} x_c = \frac{\iint_{A_{\text{wcn}}} x \cdot I(x, y) \cdot dx dy}{\iint_{A_{\text{wcn}}} I(x, y) \cdot dx dy}, \\ y_c = \frac{\iint_{A_{\text{wcn}}} y \cdot I(x, y) \cdot dx dy}{\iint_{A_{\text{wcn}}} I(x, y) \cdot dx dy}, \end{cases} \quad (4)$$

(4)式中, x 和 y 是图像平面内的坐标, A_{wcn} 是包含有整个星图的中心窗口区域, $I(x, y)$ 是图像(能量)密度函数,即在探测器光敏面上的辐射分布函数。考虑到图像的离散化效应并假定采样输出与对应像元敏感区的辐射积分成比例,则(4)式可改写成如下形式

$$\begin{cases} \tilde{x}_c = \sum_{k=1}^n x_k \cdot I_k / \sum_{k=1}^n I_k, \\ \tilde{y}_c = \sum_{k=1}^n y_k \cdot I_k / \sum_{k=1}^n I_k, \end{cases} \quad (5)$$

(5)式将(4)式中的积分用 n 个像元的加权和来表示,且 \tilde{x}_c, \tilde{y}_c 是得到的恒星像面重心坐标, x_k, y_k 是第 k 个像元几何中心坐标, I_k 是对应的图像密度函数采样值。事实上,在从(4)式到(5)式的转变过程中引入了一定的误差,这主要表现在: x_k, y_k 所代表的像元几何中心并不与像元图像密度重心重合。考虑到 \tilde{x}_c, \tilde{y}_c 在表达式上的对称性,下面将仅对 \tilde{x}_c 计算过程中的误差进行分析。

需要指出的是,在利用(5)式求解恒星投影面位置时,除了上述近似引入的误差外,还有由于像元读出噪声、暗电流、焦平面器件灵敏度的非均匀性及量化效应等因素导致在探测端得到的 I_k 存在一定的不确定性,用 σ_I 来表示。这里假定这两种误差是不相关的,则在 \tilde{x}_c 的总体误差可以表示为^[4]

$$\sigma_{\tilde{x}_c}^2 = \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{\partial \tilde{x}_c}{\partial x_k} \right)^2 \cdot \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial \tilde{x}_c}{\partial I_k} \right)^2 \cdot \sigma_I^2 \right], \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式后可得

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{x}_c}^2 &= \sigma_x^2 \cdot \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{I_k}{I_{\text{total}}} \right)^2 \right] + \\ &\left(\frac{\sigma_I}{I_{\text{total}}} \right)^2 \cdot \sum_{k=1}^n [(x_k - \tilde{x}_c)^2], \quad (7) \\ I_{\text{total}} &= \sum_{k=1}^n I_k. \end{aligned}$$

为了讨论恒星投影位置总体误差与星敏传感器性能的关系,这里定义系统最小信噪比(SNR)为 S_{min} 和表征光学系统离焦特性的最小离焦波形系数 γ_{min} ,则有如下等式成立:

$$S_{\text{min}} = \frac{I_{\text{pixel min}}}{\sigma_I}, \quad \gamma_{\text{min}} = \frac{I_{\text{pixel min}}}{I_{\text{total}}}, \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式可得。

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{x}_c}^2 &= \sigma_{\tilde{x}_c, x}^2 + \sigma_{\tilde{x}_c, I}^2 = \sigma_x^2 \cdot \sum_{k=1}^n \left(\frac{I_k}{I_{\text{total}}} \right)^2 + \\ &\left(\frac{\gamma_{\text{min}}}{S_{\text{min}}} \right)^2 \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \tilde{x}_c)^2, \quad (9) \end{aligned}$$

(9)式表明:恒星在星敏传感器成像面上位置确定误差由能量重心位置误差和辐射测量误差两部分组成。为了进一步估算总体误差量级,对(9)式应用基本不等式可得:

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{x}_c, x}^2 &= \sigma_x^2 \cdot \sum_{k=1}^n \left(\frac{I_k}{I_{\text{total}}} \right)^2 \geq \\ &\sigma_x^2 \cdot n \cdot \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{I_k}{I_{\text{total}}} \right) / n \right]^2 = \frac{\sigma_x^2}{n}, \quad (10a) \end{aligned}$$

$$\sigma_{\bar{x}_c, x}^2 |_{\min} = \frac{\sigma_x^2}{n}, \quad (10b)$$

且 $\forall k, j \in [1, n], k \neq j$ 有 $I_k = I_j$ 成立。

由(10b)等号成立条件可得。

$$\sigma_{\bar{x}_c, I}^2 \geq \left(\frac{\gamma_{\min}}{S_{\min}}\right)^2 \cdot \sum_{k=1}^n \left(x_k - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k\right)^2 > 0,$$

$$\text{即 } \sigma_{\bar{x}_c, I}^2 |_{\min} > 0 \quad (10c)$$

将(10b)式、(10c)式代入(9)式可得

$$\sigma_{\bar{x}_c}^2 |_{\min} = \sigma_{\bar{x}_c, x}^2 |_{\min} + \sigma_{\bar{x}_c, I}^2 |_{\min} > \frac{\sigma_x^2}{n}, \quad (11)$$

(11) 式给出了一个确定离焦光学系统所能达到的最佳成像面定位精度近似与有效像面面积 n 成反比,且幅度测量误差对最终定位误差将产生一定影响;另一方面,提高系统最小信噪比 S_{\min} 并尽量减小最小离焦波形系数 γ_{\min} ,对于抑制幅度测量误差在总体误差中的贡献将起到积极的作用。

3.2 理想离焦光学系统描述

由于恒星的半视场角仅为 $(1 \times 10^{-3})''$ 量级,可

视为点目标,且经过光学系统成像后的星图可认为是光学系统的点扩展函数(PSF)。事实上,当探测器阵列离开光学系统焦平面一个微小距离 δz 时,系统点扩展函数将变大为一个均匀的圆形模糊区,该区的直径 D 为

$$D = \frac{\delta z}{F^\#}, \quad (12)$$

式中 δz 的单位为像元数; $F^\#$ 为 F 数,且通常情况下星敏感器光学系统的 $F^\#$ 接近于 1。Hopkins 在 1955 年已就理想离焦光学系统响应特性进行了完整讨论,详见参考文献[5]。当忽略光学系统衍射效应后,对应于(12)式圆形模糊区的系统调制传递函数一维表达如下:

$$M_{\text{MTF}}(f) = 2 \cdot \frac{J_1(\pi D f)}{\pi D f}. \quad (13)$$

当假定星敏感器光学系统满足线性相位特性时,光学系统点扩展函数的二维表达式满足

$$P_{\text{PSF}}(x, y) = f_{\text{IFFT}} \left[2 \cdot \frac{J_1(\pi D \sqrt{f_x^2 + f_y^2})}{\pi D \sqrt{f_x^2 + f_y^2}} \cdot \exp(-2\pi \sqrt{f_x^2 + f_y^2}) \right]. \quad (14)$$

对比图 2(a)和图 2(b)不难看出:当成像模糊直径 $D=1$ 时,恒星像的主要能量集中在 1 个像元内,系统无离焦,且中心峰值能量占总能量的 36%;当成像模糊直径 $D=5$ 时,恒星的能量主要分布在 5×5 的像元区域内,中心峰值处能量约占总能量的 3%,系统呈“轻微离焦”状态。显然,随着成像模糊

直径的扩大,恒星像点的中心区域响应降低,在背景噪声不变的情况下,这势必引起图像信噪比的下降。因此,从这个意义上来说,利用光学系统离焦后对图像进行插值来改善恒星成像面定位精度,是以牺牲一定的信噪比为代价的。

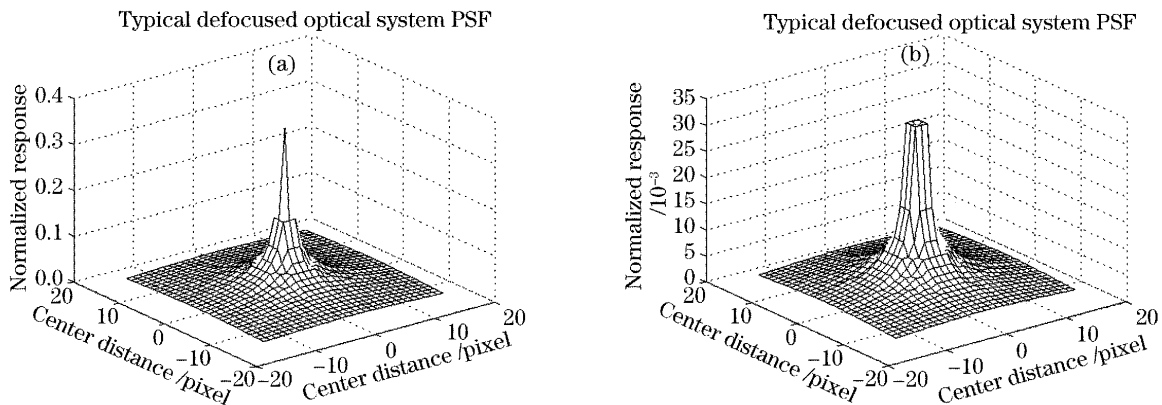


图 2 不同成像模糊半径理想光学系统点扩展函数二维示意图。(a) $D=1$, (b) $D=5$

Fig. 2 Two-dimensional point spread function with different radius of blur imaging area. (a) $D=1$, (b) $D=5$

3.3 主要指标关系定量分析及仿真

星传感器的主要性能指标包括:观测视场、探测器尺寸、像元分辨力、探测星等、量化等级、信噪比、离焦量以及恒星成像面定位精度等方面,下面给出它们间的主要量化关系。

3.3.1 观测视场、探测器尺寸、像元分辨力以及信噪比间的量化关系

记星传感器的观测视场(FOV)为 F_{total} 、探测器阵列的尺寸为 $N \times N$ 、像元分辨力(RES)为 R_{pixel} ,则有

$$R_{\text{pixel}} = F_{\text{total}}/N, \quad (15)$$

另一方面,当假定系统视场角及响应率恒定时,则相对信噪比变化 $\Delta'S$ 近似满足

$$\Delta'S \approx \frac{1}{(\Delta'N)^2}, \quad (16)$$

(16) 式中 $\Delta'N$ 为探测器尺寸 N 的相对变化量。考虑到目前常用星敏感器阵列尺寸介于 $512 \times 512 \sim 2048 \times 2048$ 之间,为了说明问题的方便,假定 $N = 512$ 时的系统信噪比为 1,且用 R_{pixel}^{-1} 来表征探测器的分辨能力(值越大,分辨能力越强),并假定 $R_{\text{pixel}}^{-1} |_{N=2048} = 1$,则(15)式、(16)式所示关系式可由图 3 示意给出。图 3 中曲线的相对变化趋势表明:当星敏感器探测视场和探测器的响应率不变时,系统信噪比和分辨能力随探测器尺寸改变的趋势相反,二者的性能不能同时达到最优,需要折中考虑。

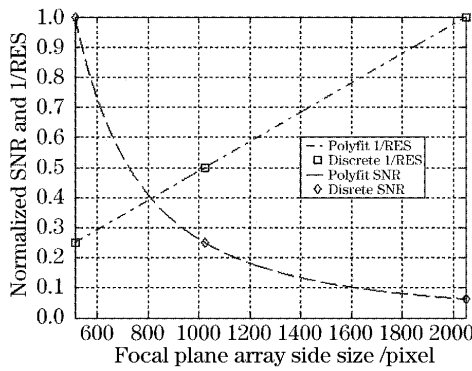


图 3 归一化信噪比与像元分辨力倒数对比示意图

Fig. 3 Normalized signal-noise-ratio versus resolution R_{pixel}^{-1}

3.3.2 探测星等与量化等级的量化关系

天文学中规定恒星亮度相差 5 等的天体亮度相差 100 倍,即星等每相差 1 等,亮度差为 $\sqrt[5]{100} \approx 2.512$ 倍。假定星敏感器可以探测的最弱星等为 M ($M \geq 1$)、饱和探测星等为 1,则为了确保探测性能,系统的整体噪声水平等效星等应不小于 $M+1$ 。若

采用均匀量化方式,则系统的量化阶 N_{scale} 和量化比特数 N_{bit} 应满足

$$N_{\text{scale}} \geq 2.512^M, \quad N_{\text{bit}} \geq \log_2 N_{\text{scale}}. \quad (17)$$

图 4 给出了最小量化比特数 $N_{\text{bit-min}}$ 随最弱探测星等 $M(4 \sim 10)$ 的变化曲线。

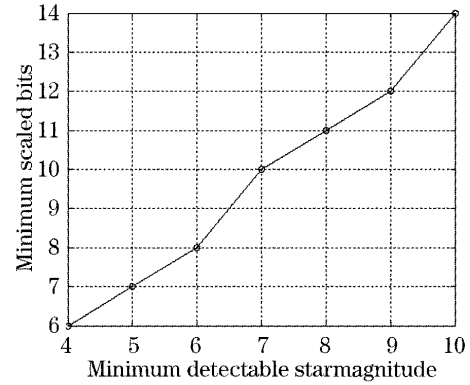


图 4 量化比特随最弱可探测星等变化示意图

Fig. 4 Scaled bit versus minimum detectable starmagnitude

3.3.3 信噪比、离焦量及恒星成像面定位精度间的量化关系

为了便于问题讨论,这里假定星敏感器光学系统的 $F^\# = 1$,则由(13)式可知,此时光学系统的离焦量 δz 在数值上等于星像模糊直径 D 。此外,考虑到(17)式中关于系统整体噪声限及星等探测要求,则(8)式中的 S_{min} 和 γ_{min} 近似满足:

$$\begin{cases} S_{\text{min}} = 2.512, \\ \gamma_{\text{min}} \approx \frac{\sigma_I \cdot S_{\text{min}}}{n \cdot I_{\text{peak}}} = \frac{S_{\text{min}}}{n \cdot 2.512^M} = \frac{1}{n \cdot 2.512^{M-1}}, \end{cases} \quad (18)$$

(18) 式中 I_{peak} 为在探测 1 等星时成像面中心的图像密度采样值。当假定恒星成像位置在正方形像面的几何中心时,记像面半边长为 R ,且 $D = 2R$,则(10c)式可近似为

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{x}_c, I}^2 &= \left(\frac{\gamma_{\text{min}}}{S_{\text{min}}} \right)^2 \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \tilde{x}_c)^2 \approx \left(\frac{1}{4R^2 \times 2.512^M} \right)^2 \cdot 8R \cdot (1 + 2^2 + \dots + R^2) = \\ &= \frac{1}{2R^3 \times 6.310^M} \cdot (1 + 2^2 + \dots + R^2), \end{aligned} \quad (19)$$

同时,取星敏感器无离焦时 $\sigma_x = 0.5$,并将(10b)式和(19)式代入(9)式可得

$$\sigma_{\tilde{x}_c}^2 = \sigma_{\tilde{x}_c, x}^2 + \sigma_{\tilde{x}_c, I}^2 \approx \frac{1}{16R^2} \left[1 + \frac{4}{3} \times \frac{(R+1) \cdot (2R+1)}{6.310^M} \right] \xrightarrow{M \geq 5, R \leq 10} \frac{1}{16R^2} = \frac{1}{4D^2}, \quad (20)$$

(20) 式给出了恒星成像面定位误差的最低限。此外,为了比较不同离焦情况下恒星成像质量的变化,定义相对信噪比 R_{SNR} 如下:

$$R_{\text{SNR}} = \frac{I_{\text{peak}}/\sigma_I}{I_{\text{peak}}^0/\sigma_I} = \frac{I_{\text{peak}}}{I_{\text{peak}}^0} (\%), \quad (21)$$

式中 I_{peak}^0 为无离焦时的 I_{peak} 。

表 1 给出了恒星图像相对信噪比和成像面定位误差随离焦量的变化仿真结果,对应的变化曲线如图 5 所示。很明显,通过星敏感器焦平面的离焦,在提高成像面定位精度的同时,系统整体信噪比也不断下降。因此,从充分发挥系统性能来考虑,在提高定位精度的同时尽量减小信噪比的下降是一种优化的方案,为此定义如下优化系数(d_{OC})来定量描述:

表 1 恒星图像相对信噪比和成像面定位误差随离焦量的变化表

Table 1 R_{SNR} and position error of star image vs. defocus distance

δz / pixel	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
R_{SNR} / %	36.0	23.5	21.0	16.2	11.0	5.0	3.1	2.0	1.5	1.1	0.9	0.7
$\sigma_{x/y}$ / pixel	0.5	0.33	0.25	0.20	0.17	0.13	0.10	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05

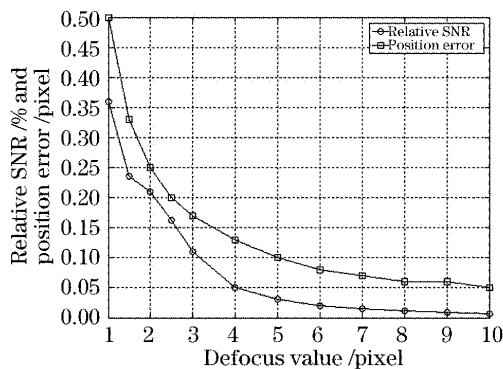


图 5 相对信噪比、位置误差随离焦量变化图

Fig. 5 R_{SNR} and position error vs. defocus distance

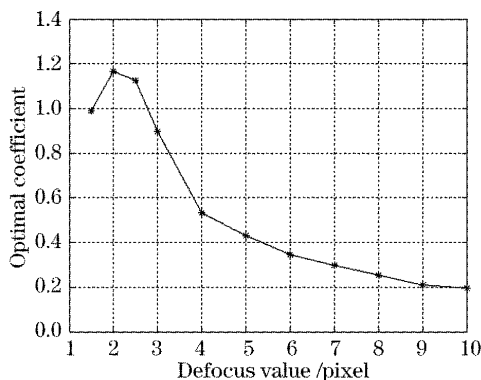


图 6 优化系数随离焦量变化图

Fig. 6 Optimal coefficient vs. defocus distance

4 关于折中设计的几点考虑

上述分析表明:利用光学系统“轻微离焦”后的模糊成像可以得到更高的定位精度,且可进一步改善平台姿态确定精度,但这些都是以牺牲一定的信噪比为代价的。除了上述基本结论外,在具体折中分析时,还需考虑如下三个方面:

$$d_{\text{OC}} = \frac{\sigma_{x/y}^0 / \sigma_{x/y}}{R_{\text{SNR}}^0 / R_{\text{SNR}}} = \frac{\sigma_{x/y}^0 \cdot R_{\text{SNR}}}{\sigma_{x/y} \cdot R_{\text{SNR}}^0}, \quad (22)$$

对于(22)式中定义的 d_{OC} 而言,越大则表明对应的离焦量配置能更好地发挥系统性能,由表 1 中的仿真得到的优化系数曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,当离焦量达到 2~3 个像元时(对应的模糊区域直径约 2~3 个像元), d_{OC} 系数达到最大值约 1.17,从折中设计角度来考虑,此时系统达到最佳性能状态。

1) 图 6 中优化系数曲线给出的最佳离焦方案,模糊区直径 2~3 像元,是在一定条件成立的,而对于实际问题则需要具体分析,这主要表现为:

其一,这里的目标是系统性能的合理配置,即用较小的信噪比牺牲来换取较高的定位精度提升。但在具体应用中,若系统信噪比足够高,则通过扩大模糊区来得到更高的定位性能是完全可行的;

其二,采用离焦方案来获得更高定位精度的前提是:必须要有足够高的信噪比。当采用最优配置时,相对信噪比下降约 -10.5~-4.7 dB,这对系统探测性能提出了新的需求。

2) 表 1 中对应于不同模糊半径的离焦成像方案均是在假定星敏感器光学系统 F 数为 1 时得到的(此时模糊直径与离焦量在数值上相等);但对实际问题分析而言,可结合式(12)及相关地面实验手段来确定具体的光学系统离焦配置。

3) 离焦成像仅为“亚像元”定位提供了可能,但像元的分辨能力与探测视场、探测器尺寸及响应率均有关,且不同配置对系统信噪比的影响各异,需要在设计时折中考虑。

5 结 论

仿真结果表明,从优化系统性能考虑,成像模糊区直径为 2~3 个像元的配置是利用星敏感器焦平面的“轻微离焦”来实现亚像元定位的最佳方案,定位误差可达 0.2 个像元;另一方面,当观测视场为 6° 、探测器尺寸为 1024×1024 时,采用最佳配置方案后系统惯性姿态测量误差为 $4'' \sim 5''$,达到角秒量级要求。理论分析及数值仿真结果将为后续星敏感器指标的提出及仪器设计提供参考。

致谢 该项研究工作得到许健民研究员的大力支持与协助,作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Guo Qiang. The study of some key technologies in information pre-processing for geostationary meteorological satellite [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science, 2005. 37~53 (in Chinese)
郭 强. 地球同步轨道气象卫星资料预处理中若干关键技术研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2005. 37~53
- 2 Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(9): 812~815 (in chinese)
魏新国,张广军,江 洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, **29**(9): 812~815
- 3 Li Xuekui, Hao Zhihang, Li Jie *et al.*. The research on the method of the star's position determination of the star sensor[J]. *Chin. J. Electron Devices*, 2004, **27**(4): 571~573 (in chinese)
李学夔,郝志航,李 杰 等. 星敏感器的星点定位方法研究[J]. 电子器件, 2004, **27**(4): 571~573
- 4 G. Ruffino, D. Accardo. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement [J]. *Acta Astronautica*, 2003, **53**(2): 135~147
- 5 H. H. Hopkins. The frequency response of a defocused optical system[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1955, **231**(1184): 91~103