

关于 ePSF 模型的一个注记

朱丽莎, 孟小华, 张庆丰

(暨南大学 计算机科学系, 广东 广州 510632)

摘要: 有效点扩散函数 (ePSF) 方法是天体测量中对欠采样星象进行定位的一种重要方法, 其中的一个关键是建立准确的 ePSF 模型。通过对人工模拟星象的实验研究发现, 采样星体数目对 ePSF 网格模型的准确性影响不大, 只要每网格内保证两个采样星体数据, 就基本可以保证获得一个稳定的 ePSF 网格模型。

关键词: 有效点扩散函数方法; 点扩散函数模型; 天体测量

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)12-0036-04

A note about ePSF model

Zhu Lisha, Meng Xiaohua, Zhang Qingfeng

(Department of Computer Science, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Effective point-spread function (ePSF) method is an excellent method, which is always used in the positional measurements of stars in undersampled stellar images. One of the key is constructing a stable ePSF model. In this paper, we investigate the number of sample has little influence on constructing a stable ePSF model through some experiments on artificial simulation astrology. Constructing a stable ePSF model only requires two samples in every cell for a certain grid.

Key words: ePSF; PSF model; astrometry

有效点扩散函数 ePSF (Effective Point-Spread Function) 方法是由 ANDERSON 等^[1]提出的用于测量哈勃空间望远镜 HST(Hubble Space Telescope)星象的方法, 该方法消除了长期困扰 HST 图像测量的相位误差效应, 是一种有效而准确的方法, 不仅可以广泛用于欠采样图像的测量, 甚至也可以用于非欠采样图像的测量^[2,3]。该方法用于欠采样星象的测量, 首先必须建立图像的 ePSF 模型, 然后再利用该 ePSF 模型测量图像中星象的位置。因此建立准确的 ePSF 模型是该方法的关键。

建立准确的 ePSF 模型的基本原理是对不够精确的大量的单个星体的 PSF 模型逐渐精化得出统一的单个图像的 ePSF 模型。虽然原则上选择的星体越多得到的 PSF 模型应该越准确, 但实际上星体越多, 计算量越大, 这将耗费大量的资源和时间, 在实时观测中, 这是不能承受的。此外, 采样星体越多带来的噪声也越多, 未必能够得到很好的 ePSF 模型。反之, 如果星体数目很小, ePSF 模型则将失去准确性, 那么选择多少星体来得到该图像的 PSF 模型就是一个需要讨论的问题。本文对采样星体的个数和 ePSF 模型的准确性关系进行了研究,

指出了模型网格的细密度对准确性更重要, 这对天文测量的实践具有指导意义。本文首先介绍 ePSF 模型的计算过程和算法, 然后详细介绍所做的实验, 最后给出了实验结论。

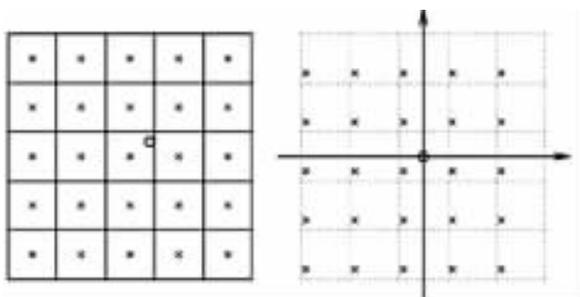
1 ePSF 模型计算方法

ePSF 算法的第一步是计算 ePSF 模型, 第二步是由该模型拟合星体的光通量分布确定星体的位置。第二步的重点是 PSF 模型的计算, 步骤如下:

(1) 从星象图中选取高性噪比的恒星作为采样星体。

(2) 获取采样星体中心周围 $m \times m$ 个像素的方形区域内的光通量分布(如图 1 所示), 每个星体的中心一般来说并不是整数的像素位置, 所以, 星体的中心相对于 PSF 模型的网格中心会有偏差, 如图 1(a)所示, 星体的中心(图中的圆圈)并不一定落在图中像素的中心(图中的 \times)。

(3) 将被采样星体的区域叠加到 PSF 网格区域(图 1(b)显示了一个星体的采样区域叠加于 PSF 网格区域的情况)。在 ePSF 方法中一个图像的 PSF 模型是用离散的规则网格点处的值来表达的, 也就是说, PSF 模型是一个离散网格模型。该方法认为, 星象中的每个星体及其周



(a) 星化及其周边像素的采样 (b) 星体的采样数据叠加到 PSF 网格的情况

图 1 一个星体叠加到 PSF 模型网格中的可能情况

边的像素的灰度值是对 PSF 模型的一个采样,星象中有多少星体,则对该星象的 PSF 模型采样了多少次。

(4)当所有的采样星体及其周边像素值都叠加到 PSF 网格时,将得到如图 2 所示的情况(图中将 PSF 的网格进行了进一步的细分),在每个 PSF 的细小网格内,将有许多星体采样值,按照 3σ 准则,剔除异常采样后再取平均,即可得到所有 PSF 细小网格上的灰度值,从而可以得到准确的实际 PSF 网格模型。

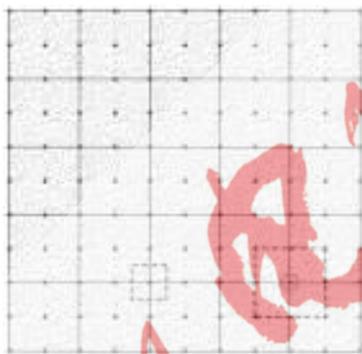


图 2 所有采样星体数据叠加到 PSF 网格后的情况

以上四步结束后,在实际处理中为保证 PSF 网格模型的光滑与对称,还将采用一些措施对其进行光滑和网格中心位置的微调^[1]。

2 实验步骤

因为真实图像的有效点扩散函数是未知的,所以计算出来的点扩散模型无法比较。本实验采用人工图像进行计算比较,包括 3 个步骤:(1)设定人工图像的有效点扩散模型,按照该模型随机生成若干星体,形成一个天文图像;(2)用第二部分所述的方法对人工图像进行 PSF 模型计算;(3)将设定的有效点扩散模型与计算所得的 PSF 模型进行比较,计算模型误差。

2.1 人工图像的生成

要生成人工图像,首先要生成一个天空背景图像,然后在此基础上叠加许多星体。首先生成一个分辨率为 2024×2024 的图像,该图像设定天空背景灰度为 500,并叠加 Poisson 噪声,以模拟真实天空背景。然后在这个图像上叠加了 2500 个具有随机位置的星体。这 2500 个星

体的像素位置服从一种特殊的 position 分布,整数部分是随机的,分数部分服从 $0 \sim 1$ 的之间均匀分布,即所有星象的像素相位是均匀分布的。因为是人工生成的星象,所以可将每个星象的像素相位位置理想化,以利于 PSF 模型的计算,从而确保每网格内包含指定数量的采样星体数据。

根据 KING^[4] 的研究,星象的大部分通量都被包含在一个核中,这个核的灰度分布近似于 Gaussian 分布,或者接近于高斯函数,如 Moffat 函数等,这就是所谓的 PSF 函数。这里对于模拟星体的 PSF 函数采样经典的二维高斯模型,即星体周围每个像素点处的光通量 f 和星体的中心位置之间满足二维高斯关系模型,对于模拟图像来说,就是星体周围的灰度分布满足如下关系:

$$G(x, y) = B + H \times e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R^2}} \quad (1)$$

其中 B 代表背景; H 代表高斯函数的峰值; R 为高斯函数的标准差,它与视宁度有关($\text{seeing} \approx 2.355R$); $G(x, y)$ 代表点 (x, y) 处的灰度值; (x_0, y_0) 表示星体的中心位置。

实验中设定 $R=0.6369$,即视宁度为 1.5,因为 ePSF 方法是用于欠采样图像的一种有效方法,而视宁度为 1.5 的星象被认为是标准的欠采样图像。另外实验中 H 值在 $1000 \sim 65525$ 之间随机取值,是为了保证每颗星体都有较好信噪比,可以作为有效采样星体。整体图像中每个星体还添加了 Poisson 噪声,这是在星象中最常见的噪声。最终生成的点扩散函数是已知的且像素相位均匀分布的星象图,以此作为实验的数据,所生成的图像局部如图 3 所示,整体与此相若。

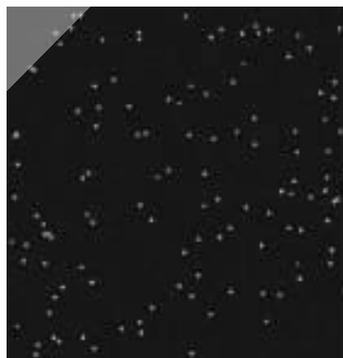


图 3 人工生成星象图的局部

2.2 进行 ePSF 模型计算时的影响因素

在 ePSF 方法中,ePSF 模型也与网格的精细程度有关,假定单位像素划分为 $n \times n$ 个网格, n 即标识了 PSF 网格的精细程度,实验中对不同精细程度的网格进行了考察,即分别考察了 n 取 4,5, ..., 10 等 7 种情况。计算出来的 ePSF 数值模型还与星体采样密度有关,用每网格内采样星体数据的数量 k 来标识采样密度。实验中对每一个 n 值都考察了 k 取 1,2, ..., 20 等 20 种情况,因为是人工生成星象,所以可以严格保证每网格内有要求数

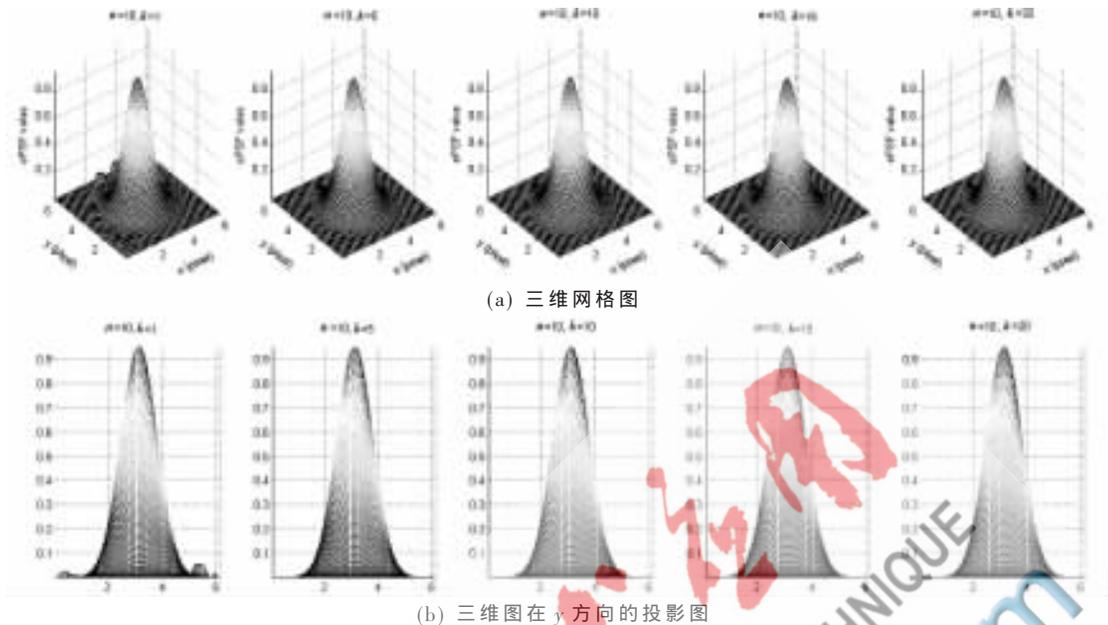


图4 $n=10$, k 取 1、5、10、15、20 时所得到的 ePSF 模型图

表 1 n 、 k 取不同值时得到 PSF 模型的误差量

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	0.284 489	0.288 723	0.285 097	0.288 614	0.288 506	0.290 151	0.291 557	0.290 942	0.290 912	0.290 017	0.290 091	0.289 486	0.289 183	0.289 398	0.289 034	0.288 651	0.289 286	0.289 147	0.288 778	0.288 728
5	0.194 594	0.197 537	0.199 637	0.200 623	0.202 788	0.201 354	0.201 461	0.201 065	0.201 167	0.201 533	0.200 378	0.200 794	0.200 66	0.200 176	0.200 305	0.200 279	0.200 577	0.200 521	0.200 658	0.200 596
6	0.135 997	0.138 863	0.139 503	0.143 373	0.144 866	0.145 039	0.145 399	0.145 029	0.145 309	0.146 152	0.145 533	0.146 174	0.145 637	0.145 474	0.145 523	0.145 983	0.146 171	0.145 897	0.145 786	0.145 915
7	0.104 851	0.101 547	0.103 545	0.104 315	0.105 312	0.103 997	0.104 21	0.104 403	0.104 151	0.104 454	0.104 428	0.106 926	0.104 091	0.105 198	0.105 2	0.104 97	0.105 136	0.105 017	0.105 114	0.104 833
8	0.086 033	0.084 342	0.082 809	0.084 3	0.085 048	0.086 116	0.085 138	0.084 786	0.085 148	0.085 566	0.085 742	0.086 113	0.085 639	0.085 936	0.085 59	0.085 998	0.085 806	0.085 791	0.085 439	0.085 523
9	0.069 725	0.067 716	0.066 223	0.067 34	0.068 182	0.068 331	0.069 569	0.070 505	0.070 764	0.069 962	0.069 938	0.070 028	0.069 75	0.069 53	0.070 102	0.069 91	0.070 242	0.070 116	0.070 101	0.070 443
10	0.055 022	0.054 462	0.055 404	0.055 572	0.055 079	0.054 117	0.054 428	0.054 741	0.054 585	0.054 671	0.054 635	0.054 641	0.054 631	0.054 564	0.054 569	0.054 654	0.054 562	0.054 481	0.054 446	0.054 699

量的采样数据。

2.3 有效点扩散模型与所得 PSF 模型比较

对 n 、 k 不同取值总计 140 种情况计算了 ePSF 模型，并对这些模型数值进行了分析。图 4 所示为 $n=10$ 时，将 k 取值为 1、5、10、15、20 时所得的 5 个 ePSF 模型图。其中图 4(a) 是三维网格图，图 4(b) 是三维图在 y 方向的投影图。

事实上每个 PSF 模型和准确 Gauss 模型都是有差别的，图 5 显示了 $n=10$ 、 $k=5$ 时所得 PSF 模型和准确的 Gauss 模型的差别。图 5 是两者之差的三维网格图，可以看出其最大误差处在网格中心，其峰值很小不超过

0.05。其他 PSF 模型和准确模型的差值图均与图 5 形状类似，当然其误差峰值不同，因此采用准确模型和计算的 PSF 模型之间的最大差值来衡量计算模型的误差。图 4、图 5 大体反映了 $n=10$ 时 k 取不同值所得的 ePSF 模型的情况及其误差情况。当 n 取其他值时也有类似的情况。

图 6 所示为 n 、 k 取不同值时所得 PSF 模型的误差，表 1 是这些模型误差的数值表。

从图 6 可以看出，PSF 模型的误差和网格的细密关系比较密切，网格越密，误差值越小，在网格固定的情况下， k 取不同的值，模型误差变化不大。从表 1 的数据可以知道，对于固定的网格划分， k 取不同值时，模型误差

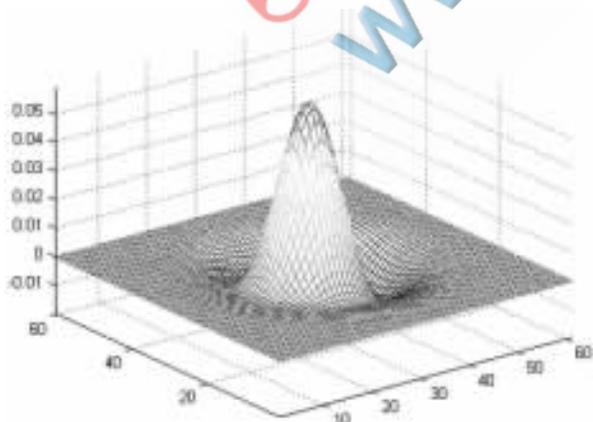


图 5 $n=10$ 、 $k=5$ 时计算所得 ePSF 模型的误差分布图

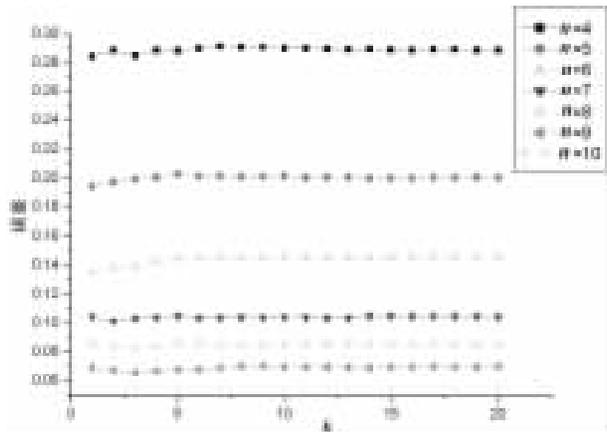


图 6 不同 n 、 k 值得到的 PSF 模型的误差

的绝对变化在 0.01 以内,相对变化在 1% 以内。理论上来说, k 取值越大,相邻模型变化就越小,极限情况下,模型应该收敛到一个统一模型,这种极限模型称为稳定模型。一个网格划分对应一个稳定模型。从图 6 和表 1 可以看出, k 取任何值,所得模型都很接近该网格划分对应的稳定模型,考虑到 k 取 1 时所得模型不够光滑,因此,认为 k 取 2 所得模型很接近稳定模型。由此可以看出,在计算 PSF 模型时,网格的细密程度对计算模型的准确性影响很大,当网格划分固定后,只要保证每网格内有两个采样数据就可以得到稳定的模型。总体来说,采样星体数目达到 $2n^2$ 个就可以得到较好的稳定模型。

本文通过对模拟欠采样星象的处理实验,可知处理欠采样星象使用 ePSF 方法计算 PSF 模型时,每个网格的采样星体越多,计算结果越逼近一个稳定模型,这个稳定模型和真实模型的误差主要由网格划分的细密程度来决定,网格划分越密,模型误差越小。当网格划分固定时,每网格内有两个采样数据时即可得到一个较精确的稳定模型,即采样星体数目对 ePSF 网格模型的准确性影响不大。但在实际处理中,由于星体的相位差分布不均,因此平均每网格采样星体数目应该大于 2。该结论在实际应用 ePSF 方法时,对更精确的建模有一定的指导意义。

参考文献

- [1] ANDERSON J, KING I R. Toward high-precision astrometry with WFPC2. I. Deriving an Accurate Point-Spread Function[J]. PASP, 2000,112:1360-1392.
- [2] ANDERSON J, BEDIN L R, PIOTTO G, et al. Ground-based CCD astrometry with wide field images I. Observations just a few years apart allow decontamination of field objects from members in two globular clusters[J]. A & A, 2006,454:1029-1045.
- [3] 张志渊,彭青玉. ePSF 拟合法与 Gaussian 拟合法的比较[J]. Astronomical Research & Technology, 2010,7(2):132-139
- [4] KING I R. The profile of a star image[J]. PASP, 1971, 83:199-201.
- [5] 李展,彭青玉,韩国强. CCD 图像数字定心算法的比较[J].天文学报, 2009,50(3):340-348.

(收稿日期:2011-04-18)

作者简介:

朱丽莎,女,1981 年生,硕士,主要研究方向:计算机应用。

孟小华,男,1965 年生,副教授,硕士生导师,主要研究方向:计算机应用。

张庆丰,男,1971 年生,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:图像处理。