

摘要

光学时域巡天的一大任务是快速准确地在巡天图像中发现暂现源。发现暂现源的方式一般有两种：星表匹配和图像相减。这两种方法依赖于准确的图像天测位置定标和流量定标。文章对天测位置定标、流量定标和图像相减中相关方法和软件的应用进行了研究。

为探究 Astrometry.net 和 SCAMP 两个软件在天测位置定标时的应用差异以及以不同方式运行软件所得定标效果的差别，分别介绍了两款软件位置定标的原理，以 ZTF 的 100 张巡天图像为测试图像，以 Gaia DR2 为参考星表，分别以 4 种不同的定标流程对测试图像进行了位置定标。从总计算耗时、星表匹配情况、和坐标 RMS 偏差这三个方面，比较了不同流程所得定标结果，同时也与 ZTF 给出的定标结果进行了对比。结果表明，Astrometry.net 能够快速给出粗略的线性定标结果，SCAMP 则可快速在前者的基础上直接进行扭曲修正，两者相结合的定标流程平均耗时仅为 1s，所得定标结果的平均赤经赤纬 RMS 偏差均小于 70 毫角秒，优于仅使用 Astrometry.net 所得定标结果。由此可见，搭配使用 Astrometry.net 和 SCAMP 可以实现更快速且更准确的天测位置定标，可推广应用到时域天文巡天项目的数据处理上。

在流量定标方面，使用 SExtractor 对相同的 100 张测试图像进行了生长孔径测光、自动孔径测光和 PSF 测光，并分别使用 PS1 星表的孔径星等、Kron 星等和 PSF 星等对测光结果进行流量定标。同时也使用单一最优孔径测光进行了定标用于对比。在 14 等到 20.5 等亮度范围内对这些不同测光方法得到的所有图像定标结果的平均进行了对比。结果表明，生长孔径测光方法相较单一最优孔径更适合对较稀疏星场图像进行测光和定标，但其对暗于 19 等（信噪比约低于 30）的源的定标结果存在系统性偏暗，幅度最大在 0.05 等以内；在较密集星场下生长孔径测光方法对较暗源的定标结

果相较于单一最优孔径测光则存在明显的系统性偏亮，在最暗处的偏差幅度可达 0.08 等。自动孔径测光定标只在较亮源（亮于 18 等）处的系统偏差较小（0.01 等以内），对于较暗源，不论是较稀疏星场还是较密集星场都存在明显的系统性偏暗。对于 PSF 测光，其优势仍主要体现在密集星场测光上，特别是其对密集星场中较暗源（暗于 18 等）的定标系统偏差能保持较小的水平（0.01 等以内），而其对于稀疏星场或密集星场中的较亮源的测光定标结果相对于生长曲线孔径测光和自动孔径测光则没有表现出明显优势。

在图像相减相关方面，由于图像相减要求良好的图像对齐，首先从对齐精度、流量保护、运算耗时等三个方面对 SWarp、reproject 中的适应性重采样法和球面多边形交叠法、astroalign 等四个对齐方法进行了实验对比，同样使用 100 对图像作为测试图像。结果表明，在天测位置定标精度足够高（RMS 低于 70 毫角秒）的情况下，SWarp 在这三个方面均是最理想的方法。接着对目前普遍使用的 HOTPANTS 的原理进行了介绍，并对其完整的运行流程进行了详细说明。最后，本文使用模拟的暂现源，训练了一个简单的卷积神经网络模型用于进行相减图像上暂现源候选体的识别，结果显示模型准确率（99.46%）和精度（98.08%）都较高，但召回率较低，仅为 93.05%，主要原因是模型容易将低信噪比（低于 10）的模拟暂现源识别为假源。

关键词 天测位置定标，流量定标，图像对齐，图像相减，卷积神经网络

ABSTRACT

One of the main tasks of optical time domain survey is to discover transients quickly and accurately. There are two general ways to detect transients: catalog matching and image subtraction. These two methods rely on accurate image astrometric calibration and photometric calibration. In this paper, the application of software used in astrometric calibration, photometric calibration and image subtraction are studied.

In order to explore the differences in the application of Astrometry.net and SCAMP in astrometric calibration and the differences in calibration results obtained by running them in different processes, the principles of the two suites of software are introduced respectively, and 100 images from ZTF survey are recalibrated in 4 different processes, using Gaia DR2 catalog as the reference catalog. The calibration results including those given by ZTF are compared in terms of total time cost, catalog matching, and coordinate RMS deviation. We find that if only Astrometry.net is used, the calibration results obtained by two-step running are more accurate than those obtained in one-step running; and using Astrometry.net and SCAMP in combination can be faster and obtain more accurate calibration results than only using Astrometry.net.

For photometric calibration, SExtractor is used to perform growth curve aperture, automatic aperture and PSF photometry on the same 100 images. We use the aperture magnitude, Kron magnitude and PSF magnitude of the PS1 catalog to calibrate the instrumental magnitude obtained by SExtractor. The single optimal aperture photometry and its calibration is also performed for comparison. The calibration results obtained by these different photometry methods are averaged over test images and then compared in the magnitude range of 14 to 20.5. The results show that the growth curve aperture photometry method is more suitable for the calibration of sparse field images compared to single optimal aperture photometry, but there is a systematic darkening for sources

darker than 19($\text{SNR} \lesssim 30$), with a maximum amplitude less than 0.05 mag. In the dense star field however, there is an obvious systematic brightening for the dark source of the growth curve aperture photometry compared to single optimal aperture photometry. The systematic deviation of automatic aperture photometry calibration is small(within 0.01 mag) only at brighter sources(brighter than 18 mag), while for darker sources, the calibration suffers obvious systematic darkening in both sparse and dense fields. For PSF photometry, its advantage is still mainly reflected in the dense star field photometry, especially for the dark source(> 18 mag) in the dense star field where the systematic deviation can still remain relatively small(within 0.01 mag). Compared with growth curve aperture photometry and automatic aperture photometry, the calibration results of PSF photometry for bright source in both sparse and dense fields do not show obvious advantages.

Image alignment is important in image subtraction. We compare four methods which can be used to perform image alignment: SWarp, adaptive resampling method and spherical polygon intersection method in reproject module, and astroalign. The comparison is based on alignment accuracy, flux conservation, and time cost. The results show that SWarp is the optimal method in all three aspects provided that the astrometric calibration accuracy is high enough (RMS deviation less than 70 milliarcseconds) . Then we introduce the principle of HOTPANTS, a software widely used for image subtraction, and present a detailed description of its operational process. Finally, we use simulated transients to train a simple convolutional neural network model for the identification of transients candidates detected in difference images. The results show that the accuracy (99.46%) and precision (98.08%) are relatively high, but the recall rate is low(93.05%). The main reason is that the model is prone to identify the low SNR simulated sources (less than 10) as fake sources.

KEY WORDS astrometric calibration, photometric calibration, image alignment, image subtraction, convolutional neural network

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
目录.....	VI
第一章 引言.....	1
1.1 光学时域巡天和暂现源.....	1
1.1.1 伽马射线暴及其光学余辉的观测.....	1
1.1.2 中微子事件及其光学对应体的观测.....	2
1.1.3 引力波事件及其光学对应体的观测.....	2
1.2 暂现源搜寻的两种方法.....	3
1.2.1 星表匹配.....	3
1.2.2 图像相减.....	4
1.3 本文结构.....	5
第二章 天测定标方法研究.....	6
2.1 引言.....	6
2.2 天测位置定标原理介绍.....	7
2.2.1 Astrometry.net	8
2.2.2 SCAMP	9
2.3 定标对比实验.....	9
2.3.1 测试图像选择.....	9
2.3.2 定标流程和参数设置.....	10
2.3.3 计算定标质量.....	13
2.4 定标结果对比.....	15
2.4.1 线性定标修正前后结果对比.....	16
2.4.2 4种流程定标结果对比.....	17
2.5 讨论.....	19
2.6 程序编写.....	20
2.6.1 主要功能介绍.....	21
2.6.2 辅助功能介绍.....	23

2.7 小结.....	25
第三章 SEXTRACTOR 在测光与流量定标中的应用	27
3.1 引言.....	27
3.2 测光与流量定标实验.....	28
3.2.1 圆孔径生长曲线测光.....	28
3.2.2 PSF 测光	31
3.2.3 流量定标.....	33
3.3 流量定标结果对比.....	37
3.3.1 较稀疏星场.....	38
3.3.2 较密集星场.....	42
3.4 小结.....	45
第四章 图像相减相关方法研究.....	47
4.1 图像对齐方法简介.....	47
4.1.1 SWarp	47
4.1.2 reproject	48
4.1.3 astroalign.....	49
4.2 不同对齐方法的对比实验.....	50
4.2.1 测试图像选择.....	50
4.2.2 实验流程.....	50
4.3 不同对齐方法结果对比.....	53
4.4 HOTPANTS 图像相减软件研究.....	54
4.4.1 原理介绍.....	55
4.4.2 运行过程介绍.....	56
4.5 基于卷积神经网络的暂现源识别模拟实验.....	62
4.5.1 暂现源的模拟.....	62
4.5.2 图像相减与找源.....	63
4.5.3 卷积神经网络的结构与训练结果.....	64
4.5.4 小结与展望.....	65
第五章 总结.....	67
参考文献.....	69

攻读学位期间发表的学术论文目录.....	73
致谢.....	74

第一章 引言

1.1 光学时域巡天和暂现源

时域天文学在最近十来年间快速发展，一系列巡天项目被陆续提出并投入运行，例如 Catalina Real-Time Survey^[1]，Panoramic Survey Telescope, and Rapid Response System^[2]（Pan-STARRS），All Sky Automated Survey for SuperNovae^[3]（ASAS-SN），Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System^[4]（ATLAS），Zwicky Transient Factory^[5]（ZTF）及其前身 Palomar Transient Factory^[6]（PTF/iPTF）等，以及即将到来的 Legacy Survey of Space and Time^[7]（LSST）项目。这些巡天项目的研究对象包括太阳系内天体，银河系内变星以及整个宇宙中的各种爆发现象等随时间的变化行为，暂现源（transient）在其中就是重要的一类观测目标。暂现源是指在相对较短的时间尺度内发生的天文现象，典型的例如超新星，伽马射线暴，潮汐瓦解时间，引力波事件和中微子事件等。为了对这些暂现源进行发现和观测，巡天望远镜往往会采取特定的巡天策略，例如对某一片固定天区进行高频率反复拍摄，建立对于 ToO（Target of Opportunity）事件的快速响应机制等。我所在团队主要的搜寻观测的暂现源对象有伽马射线暴的光学余辉，高能中微子事件光学对应体，以及引力波光学对应体。

1.1.1 伽马射线暴及其光学余辉的观测

伽马射线暴（简称伽马暴）是发生在宇宙学距离上的伽马射线暴发的现象，一般根据伽马射线的持续时标分为短暴（持续时间小于 2s）和长暴（持续时间大于 2s）。也可根据物理起源分为并合暴和塌缩暴，前者被认为源于双中子星的并合，持续时标一般较短且能谱较硬，大部分属于短暴；后者则源于大质量恒星的塌缩，持续时标一般较长且能谱较软，大部分属于长暴。伽马暴一般伴有持续时间较长的多波段辐射，称为伽马暴余辉，源于伽马暴喷流与暴周环境的相互作用。通过对各波段余辉进行观测，我们就能对伽马暴的暴发过程、喷流结构、暴发环境等进行分析，并对相应物理模型做出限制。

地面光学望远镜一般是通过接收空间高能卫星的警报从而对伽马暴进行后随观测的。目前对伽马暴进行探测的主要卫星为美国的 Swift 卫星和 Fermi 卫星，前者观测能段较

低（Swift/BAT 的观测能段为 15-150keV¹），但能给出较精确的定位（Swift/XRT 的定位误差一般小于 5 角秒，Swift/UVOT 则能达到亚角秒级别定位精度）；而后者观测能段较高但定位精度较差（Fermi/LAT 的观测能段为 20MeV-300GeV^[8]，定位误差一般在 1 度以内；Fermi/GBM 的观测能段为 8keV-40MeV^[8]，定位误差小则 1 度，大则 10 度以上）。对于 Swift/BAT 探测到的伽马暴，如果 Swift/XRT 给出了定位，我们只需要使用小视场的望远镜对该位置进行指向即可开始跟踪观测。因为坐标误差很小，通常与图像半高全宽在同一量级，我们可以很容易地在图像上定位源的位置并判断是否观测到了余辉的光学对应体，据此判断观测是否继续。而对于 Fermi/LAT 卫星探测到的伽马暴，由于定位误差较大，我们必须先找到目标的确切位置才能做连续的跟踪观测。为了尽可能快速找到光学对应体，我们必须使用视场较大的望远镜对卫星给出的误差天区进行多轮的覆盖搜寻观测，借助过往巡天信息，通过星表匹配和图像相减等方法搜寻新出现的源作为伽马暴余辉的候选体，如果找到了，再使用小视场望远镜进行后续的跟踪观测证认。

1.1.2 中微子事件及其光学对应体的观测

位于南极的 IceCube 中微子天文台可以探测到宇宙中的高能中微子暴发事件，这些中微子事件的物理起源目前尚不确定，可能的候选体有活动星系^[9]，超新星，潮汐瓦解事件等。如果能够通过后随观测发现中微子事件的电磁对应体，我们就能联合电磁信号和中微子信号对对应的天文现象的本质做进一步的讨论和研究。

IceCube 探测到高能中微子暴发事件后会发布警报，给出事件的坐标及其误差，以供地面望远镜进行搜寻。IceCube 给出的定位误差半径通常较大，我们需要使用大视场望远镜进行搜寻观测，通过星表匹配和图像相减等方法以寻找潜在的光学对应体。由于中微子暴发的光学对应体不一定是新出现的源，也可能是亮度在近期发生过变化的源^[12]，因此需要通过巡天等手段对已知源的光变情况进行记录，从而快速了解在中微子事件误差圈内是否有这样的源存在并作为候选体进行监测。

1.1.3 引力波事件及其光学对应体的观测

致密双星的并合事件，如双黑洞并合、双中子星并合、中子星黑洞并合等，被认为能够发射引力波。自 2015 年起，人们开始使用引力波探测器对来自宇宙的引力波信号进行探测，目前已经完成了 3 轮探测。在第二轮探测的尾声，引力波事件 GW170817

¹https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/bat_desc.html

被 Advanced LIGO/Virgo 探测器网络所发现，这是人们首次探测到来自双中子星并合的引力波事件，与其成协的伽马暴 GRB 170817A 紧随其后被 Fermi 和 INTEGRAL 卫星独立探测到，这使得此次事件成为首个引力波和电磁波联合探测的事件，标志着多信使天文学的时代的到来。

在过往的引力波探测中，由于探测器技术和数量的限制，一个事件误差天区的面积通常较大，地面光学望远镜除了使用大视场望远镜进行覆盖搜寻观测外，还采取星系搜寻观测的搜寻策略，即使用小视场望远镜对误差圈内的较可能是引力波宿主星系的已知星系进行观测，这种策略比较适合对距离较近的引力波事件进行搜寻，GW170817 的光学对应体 AT 2017gfo 就是通过这种搜寻策略^[13]被发现的。同样，我们需要使用星表匹配和图像相减等方法去寻找可能的光学对应体以确定其具体位置，并进行跟踪观测。

1.2 暂现源搜寻的两种方法

由于暂现源的光学对应体的亮度一般是处于变化中的，越快发现对应体，就能越早对其进行观测已获得更完整的观测数据。目前，光学时域巡天所产生的数据量越来越大，为了高效地从巡天图像中实时寻找暂现源候选体，我们必须借助计算机来进行搜寻工作。当前，我们主要通过两种方法^[14]进行暂现源搜寻：星表匹配和图像相减。

1.2.1 星表匹配

星表匹配是指将含有位置和亮度等信息的新观测的某一天区图像星表与相应天区的已知源参考星表进行交叉匹配，以寻找亮度发生变化的源和新出现的源。参考星表通常可以来自对同一天区的历史观测，也可以来自其它已有光学巡天的星表，如 Pan-STARRS 巡天、SDSS 巡天等。若选择从同一天区的历史观测构建参考星表，较好的做法是先对历史观测中质量较好的图像进行叠加，再从叠加图像中找源形成参考星表。图像叠加的好处一是可以获得较深的极限星等使得参考星表尽可能完备以防止星表匹配出现将已知源识别为新源的情况；二是可以提高源的信噪比，减小测量误差；三是可以去除单张图像中存在的噪点、宇宙线等假源，使得参考星表中尽可能都是真源。但受限于图像分辨率等因素，一部分源会在叠加图像上与其邻近的源混在一起，导致参考星表对这样的源有所缺失，此时就可以使用仪器分辨率更高的巡天星表进行匹配。

已知的时域巡天中，Catalina Real-Time Survey^[1]和 Pan-STARRS 的 3π 巡天^[14]即使用该方法进行暂现源的探测。

使用星表匹配进行暂现源搜寻的主要优点为耗时短、不会额外引入假源，但缺点在于若图像星场较密集，或暂现源在图像上所在的背景比较复杂（例如与其它点源混合，或处于星系附近），这可能导致误匹配或遗漏的情况。

星表的交叉匹配过程依赖于星表中源的坐标，而变星的寻找又依赖于星表中的星等，因此星表匹配依赖于上游数据处理中良好的天测位置定标和流量定标。

1.2.2 图像相减

图像相减是将新观测的图像“减去”由过往在同一片天区的图像所构建的模板图像，得到一张能够反映两张图像变化的减后图像。通过在减后图像上进行找源，就能知道新观测的图像中是否存在发生变化的源，例如亮度变化的源，新出现的源，消失的源，移动的源等。

目前应用于时域天文的图像相减主流方法基于 Phillips 和 Davis 提出的 PSF 匹配^[15]原理。由于新图像和模板图像的拍摄时间不同，拍摄条件和参数也就不完全相同（如视宁度，大气透明度，曝光时间等），这导致两张图像的点扩散函数（PSF）不完全一样。通常会选择观测条件更好，点扩散函数更窄的图像作为模板图像。PSF 匹配的目的就是找到一个能反映 PSF 变化卷积核，使得模板图像卷积上该卷积核后能尽可能接近新图像，这样就可以将两张图像进行相减。Alard 等人^[16]提出了一种基于最小二乘法原理的计算卷积核的方法，计算出的卷积核能够随图像像素位置的变化而变化，应用于 PSF 不均匀的图像能够达到较好的相减效果，基于这种方法开发的软件^[18]也被天文学界广泛使用。近年来也有基于不同原理的新方法被提出，如 Zackay 等人提出了一套基于统计学原理的图像相减方法 ZOGY^[20]。Sedaghat 和 Mahabel^[21]提出了一套基于深度学习卷积神经网络来实现图像相减的方法。

使用图像相减方法搜寻暂现源的主要优点是不会遗漏处于星系附近或与其它点源混合在一起的目标，这也能够使得对目标的测光不受周围环境的干扰。缺点则在于耗时相对较长，减后图像上容易存在系统性的残留^{[14][20]}导致大量假源被探测为候选体。因为潜在的真源与假源混杂在一起，故需要另外解决真假源识别的问题。

一般情况下，参与相减的两张图像的指向并不完全相同，而大多数图像相减方法需要两张图像上相同的源在相同的位置上，如果位置稍有偏差就会造成减后图像上存在大量假源，故在进行图像相减之前需要先进行高精度的图像对齐。目前使用较多的

图像对齐方法依赖于图像的天测位置定标，因此准确的位置定标对图像相减也至关重要。另外，相减的两张图像的测光零点也并不相同，因此一般还需要在相减之前先将其中一张图像的零点往另一张图像对齐，使减后图像的零点保持一致，而这就依赖于上游数据处理中准确的流量定标。目前的一些软件例如 HOTPANTS^[19]在内部计算时已经将零点的差别考虑在内，因此不需要额外进行零点的对齐，详见第四章。

1.3 本文结构

如前所述，不论是星表匹配还是图像相减，搜寻结果的可靠性都依赖于前置的对图像的天测位置定标和测光与流量定标的准确性，因此研究尽可能准确的位置定标和流量定标的方法是十分必要的。本文第二章介绍了对两款天测定标软件和方法的应用研究。第三章介绍了测光与流量定标软件和方法的应用研究。第四章介绍了图像对齐相减相关软件和方法的应用研究。第五章对本文内容进行总结讨论。

第二章 天测定标方法研究

2.1 引言

现阶段光学波段天文图像基本上是由望远镜配备的CCD (Charge Coupled Device) 芯片相机采集的FITS (Flexible Image Transport System) 格式图像。为了测量图像上特定源的亮度或视星等, 一般采用较差测光^[22]或图像相减的方式。对于前者, 先在观测图像(有时称为测光图像)上选取一些参考星, 通过比较参考星的仪器星等和这些参考星在巡天星表中的视星等从而得到图像零点, 再对上述特定源的仪器星等进行零点修正, 从而得到该源基于巡天星表的视星等。对于选取的参考星, 是通过其赤经赤纬坐标来和巡天星表中的对应目标进行匹配的。观测图像的位置定标越准确, 图像源与参考星表中源的坐标匹配结果就越可靠, 否则就可能出现误匹配(图像某源与匹配上的星表中的源不是同一个源)的情况从而影响零点的准确度。同时, 获得并报告特定源的赤经赤纬坐标信息也是测光数据处理的主要目标之一。显然, 观测图像上各源的位置定标是整个测光数据处理过程中非常重要的一环。

从图像像素坐标到赤经赤纬坐标的转换关系的系数及相关信息被记录为FITS文件头中的一系列特定关键字的数值和备注信息, 这些关键字被称为图像的WCS^[23] (world coordinate system) 信息。根据文^[24], 从图像像素坐标到天球坐标的转换可分三步: 第一步为从像素坐标 (pixel coordinates) 转换到以度为单位的投影平面坐标 (projection plane coordinates); 第二步为从投影平面坐标转换到本地球面坐标 (native spherical coordinates); 第三步为从本地球面坐标转换到最终的天球坐标 (celestial spherical coordinates)。第二步的操作视投影类型而定, 有固定的转换公式, 在图像中常使用心射正切投影 (TAN^[24]); 第三步为不同球面坐标系下的坐标转换, 转换公式也是固定的, 因此天测位置定标实际要计算的就是第一步转换的转换系数。

理想情况下, 从像素坐标到投影平面坐标的转换可以由线性变换来近似描述, 包括坐标的平移、旋转、伸缩、切变等, 但由于大气和仪器等因素(如大气折射^[25], 大气湍流, 望远镜CCD缺陷, 光路缺陷, 重力形变等), 望远镜拍摄到的图像相比于理想的投影平面存在一定程度的扭曲。为了保证图像各个区域坐标均具有足够的准确性,

一般的方法是在线性变换之外引入高阶多项式作为修正项来拟合图像扭曲以修正其造成的坐标偏差。若望远镜视场较小且仪器状态良好，则对所拍图像定标时仅计算线性转换系数（后文简称为线性定标）可能就足以满足需求，但对于巡天图像这类视场较大的图像（如1度左右），边缘部分扭曲会比较明显，此时就需要额外计算高阶修正系数（后文简称为扭曲修正）以得到理想的定标结果。

当前，Astrometry.net^[26]和 SCAMP^[27]是被使用较多的两个天测位置定标软件，前者主要特点为在没有任何关于图像位置的信息时也可以计算一套完整的 WCS 信息，而后者主要功能为对一套初始的 WCS 信息进行修正。本文首先介绍两款软件的定标原理，接着以 ZTF（Zwicky Transient Facility，是美国的一项正在进行中的时域巡天项目）巡天^[28]的科学图像为测试图像，计算并比对了在输入源表相同情况下，以 4 种不同方式运行两款软件得到的天测定标质量。最后介绍了我所编写的相关程序工具。文中所使用的 Astrometry.net 版本为 0.89，SCAMP 版本为 2.10。

2.2 天测位置定标原理介绍

如前所述，从像素坐标到天球坐标转换的关键在于像素平面坐标到投影平面坐标的转换。若不考虑扭曲修正，则二者之间的转换关系由 FITS 头中的 CDi_j 给定，i 和 j 取值 1 或 2。线性转换公式为：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{CD1}_1 & \text{CD1}_2 \\ \text{CD2}_1 & \text{CD2}_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

其中 (u, v) 为以参考点为原点的像素坐标， (x, y) 则为以同一参考点为原点的投影平面坐标，参考点由关键字 CRPIX1，CRPIX2 给定。若考虑扭曲修正，则依据所使用的扭曲修正类型，或是先修正像素坐标 (u, v) 再进行线性转换，或是先进行线性转换再修正投影平面坐标 (x, y) 。

天测定标软件一般通过图像星表和参考星表之间的比较分析来计算坐标转换中的各项系数。对于 Astrometry.net，使用者既可以输入图像让软件来完成找源生成图像星表，也可以直接输入准备好的图像星表让软件直接进行定标。而对于 SCAMP，使用者需要提前使用软件 SExtractor^[29]生成图像源表，再将其输入 SCAMP 进行定标修正。

2.2.1 Astrometry.net

Astrometry.net是通过匹配图像星表中的星标（asterism）和参考星表中的星标来计算图像的WCS信息的。一个星标由4颗星组成，根据这4颗星的坐标可以计算出一个能代表它们之间相对位置关系的哈希码；如果这4颗星既在图像星表中也在参考星表中，则由它们的像素坐标计算出的哈希码和由他们在参考星表中的天球坐标计算出的哈希码是接近的（由于位置测量误差和扭曲的存在，它们的哈希码不完全相同）。

Astrometry.net 根据不同的光学巡天星表，构建了不同尺度的遍布全天的星标，这些星标的哈希码以及组成相应星标的星的天球坐标被存储在为一系列 index 文件¹以供查找比对。Astrometry.net 会根据亮度排序，依次对图像星表中的源构建星标并计算哈希码，在 index 文件中寻找哈希码相近的星标作为匹配星标。Astrometry.net 会根据找到的匹配星标计算 WCS 信息，据此计算图像上其它源的天球坐标，并与 index 文件中其它源的天球坐标进行比较，通过贝叶斯决断方法来判断该匹配是否为真。若匹配为真，则完成计算；若为假，则继续验证其它的匹配星标。

作为可选项，Astrometry.net可以根据匹配上的源计算图像扭曲修正系数，其所采用的扭曲修正多项式为SIP^[30]（Simple Imaging Polynomial），修正对象为像素坐标（ u, v ），公式为：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CD1_1 & CD1_2 \\ CD2_1 & CD2_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u + f(u, v) \\ v + g(u, v) \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

其中 $f(u, v)$ 和 $g(u, v)$ 分别为两方向坐标的修正多项式函数，形式如下：

$$f(u, v) = \sum_{p,q} A_{p,q} u^p v^q, \quad p + q \leq A_ORDER \quad (2-3)$$

$$g(u, v) = \sum_{p,q} B_{p,q} u^p v^q, \quad p + q \leq B_ORDER \quad (2-4)$$

A_ORDER 和 B_ORDER 为两个方向的修正阶数，一般是相等的，可以通过命令行参数设置。 $A_{p,q}$ 和 $B_{p,q}$ 为多项式中的系数。

Astrometry.net是用C语言编写的开源免费软件，可以在Linux系统和MacOS系统上安装²，安装后可通过solve-field命令来运行。

¹<http://data.astrometry.net/>

²安装方法见 <https://astrometrynet.readthedocs.io/en/latest/>

2.2.2 SCAMP

SCAMP需要使用者提供一个初始的WCS信息，通过独立的两步完成对WCS信息的修正。第一步为模式匹配（pattern matching），目的是对初始WCS中的线性定标系数进行修正；第二步为计算天测解（astrometric solution），目的是在给定线性定标的基础上计算扭曲修正。使用者可以根据需要，只运行其中一步，或者两步都运行。

在模式匹配中，SCAMP首先依据初始WCS信息，把参考星表中的天球坐标投影转换为像素坐标。通过互相关分析比较图像星表像素坐标对和参考星表像素坐标对的间距和方位角的二维分布（见文[27]第3节），SCAMP可以得到初始WCS中的像素比例尺和旋转角度的修正量，并据此更新WCS和参考星表像素坐标。通过同样的方法比较图像星表像素坐标和参考星表像素坐标在像素平面上的分布，SCAMP可以得到两套坐标之间的平移偏差，从而对初始WCS中的指向信息进行修正。

在计算天测解中，SCAMP对图像星表和参考星表的源进行匹配，通过最小化加权坐标差值平方和（见文[27]第4节）的方法计算扭曲修正系数。SCAMP采用的扭曲修正多项式为TPV^[25]，修正阶数最高可设为7阶，修正对象为投影平面坐标（ x , y ），修正公式见文[25]中的式1和式2。

2.3 定标对比实验

2.3.1 测试图像选择

本文选择了随机的均匀分布于北天的100个坐标，在每个坐标位置处选择一张兼具较好视宁度和较深极限星等的r波段ZTF巡天科学图像¹作为测试图像。每张图像的视场约为 52×52 平方角分，像素数量为 3072×3080 ，像素比例尺为1.012角秒/像素。图2-1展示了测试图像的半高全宽、极限星等²以及用于天测定标的源（见2.3.2节）数量分布直方图。半高全宽和极限星等均从图像的FITS头中获取。

¹下载方式见 https://irsa.ipac.caltech.edu/docs/program_interface/ztf_api.html

²极限星等为与参考星表较差后的对应波段的视星等

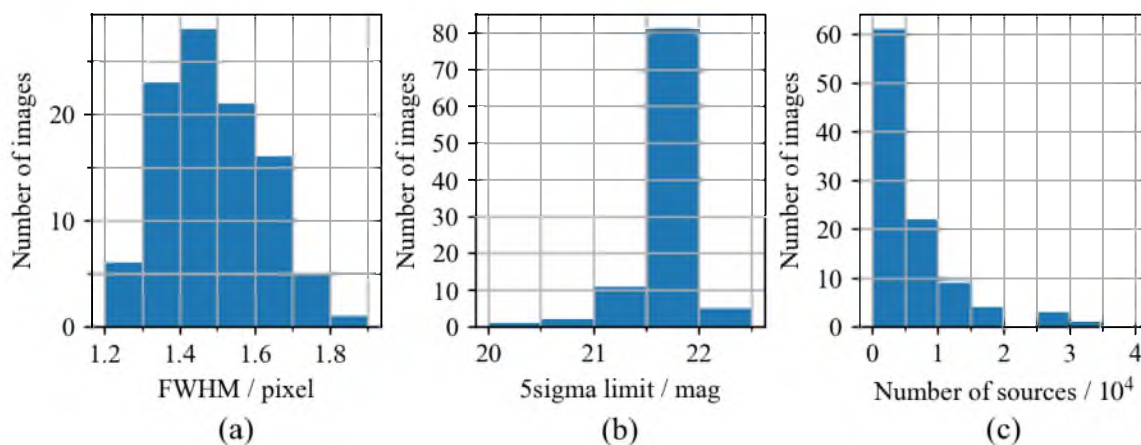


图2-1 测试图像半高全宽、极限星等以及用于定标源数量的分布

每张ZTF科学图像的FITS头中都带有准确的WCS信息。为了量化测试图像的扭曲程度，我们利用图像的WCS信息，计算每个像素位置对应的计及和不计及扭曲修正参数的天球坐标之间的偏差，取所有像素位置的偏差距离的最大值作为图像扭曲程度的量化指标。图2-2展示了随机选取的一张图像的扭曲情况。在此指标下，所有测试图像中扭曲程度最大为1.46角秒，平均为0.75角秒。图2-3展示了图像扭曲程度的分布直方图。

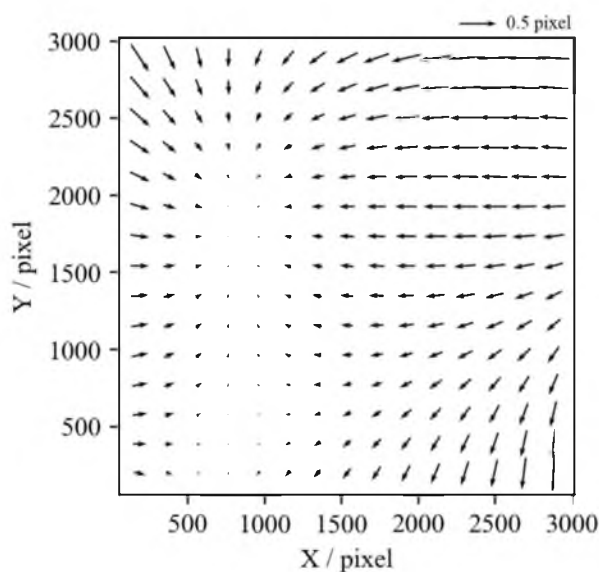


图2-2 图像的扭曲，箭头方向代表扭曲方向

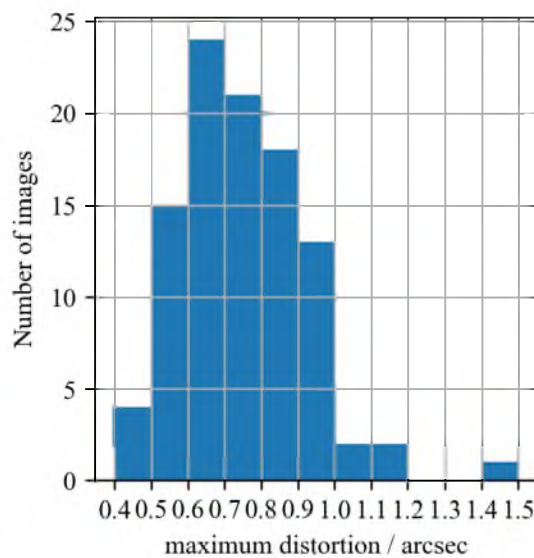


图2-3 测试图像最大扭曲偏差的分布

2.3.2 定标流程和参数设置

首先删除图像已有的WCS信息，使用SExtractor对图像进行找源，并基于该软件给出

的每个源的测量结果来筛选适合用于做定标的源。找源时的重要参数设置见表2-1。筛选时，对源的半高全宽进行3倍标准差筛选以剔除半高全宽过大的源，仅保留FLAGS为0的源以去掉测量结果可能不准确的源，同时去掉椭率大于0.5、信噪比低于10的源，最后得到用于天测定标的图像星表。

表2-1 SExtractor重要参数设置

参数	取值	说明
DETECT_MINAREA	5	探测阈值以上最小面积要求（像素）
DETECT_THRESH	5.0	探测目标阈值（sigmas）
ANALYSIS_THRESH	5.0	分析目标阈值（sigmas）
FILTER	N	是否使用过滤器
PHOT_AUTOPARAMS	2.5, 3.5	MAG_AUTO参数，Kron因子和最小半径（像素）

依次通过4种不同流程进行位置定标，分别为：

- (1) 运行solve-field命令，一次性进行线性定标和扭曲修正；
- (2) 首先运行solve-field进行线性定标（使用-T参数），再次运行solve-field，在第一次运行的基础上（使用-v参数）进行包括扭曲修正在内的计算；
- (3) 首先运行solve-field进行线性定标，接着运行SCAMP直接进行扭曲修正；
- (4) 首先运行solve-field进行线性定标，接着运行SCAMP进行线性定标的修正，最后运行SCAMP进行扭曲修正。

计算的扭曲修正均为4阶，与图像自带的修正阶数一致。这4种流程按次序分别编号为流程1到流程4。不同流程中运行solve-field时固定的命令行参数选取和设置见表2-2，不固定的参数只有搜索中心坐标的设置、是否计算扭曲修正及其阶数的设置和是否验证已有WCS的设置；不同流程中运行SCAMP时固定的重要参数设置见表2-3，不固定的只有是否进行模式匹配和扭曲修正。Astrometry.net的参考index文件选为基于Tycho-2星表和Gaia DR2星表的5200系列，SCAMP所使用的参考星表选为Gaia DR2星表。所有计算过程均在内存为16GB，芯片为Apple M1 Pro的14英寸MacBook Pro笔记本电脑上运行。

表2-2 solve-field命令行参数设置

命令行参数	取值	说明
--scale-low	0.7	图像视场下限（度）
--scale-high	0.9	图像视场上限（度）
--scale-units	degwidth	视场上下限的单位
--radius	0.8	搜索半径（度）
--crpix-center	-- ^a	指定图像中心为参考点
--width	3072	图像宽度（像素）
--height	3080	图像高度（像素）
--x-column	XWIN_IMAGE	输入图像星表中横坐标的列名称
--y-column	YWIN_IMAGE	输入图像星表中纵坐标的列名称
--sort-column	FLUX_AUTO	对图像星表进行排序的列名称

^a: 该命令行参数不用取值，选定即可。

表2-3 SCAMP重要参数设置

参数	取值	说明
ASTREFMAG_LIMITS	12.0, 18.0	参考星表中用于定标的星等范围
PIXSCALE_MAXERR	1.2	像素比例尺最大误差倍数
POSANGLE_MAXERR	5.0	最大方位角偏差（度）
POSITION_MAXERR	1.0	最大位置偏差（角分）
PROJECTION_TYPE	SAME	投影类型
DISTORT_KEYS	XWIN_IMAGE, YWIN_IMAGE	图像星表中扭曲修正所依赖的列名称
DISTORT_DEGREES	4	扭曲修正阶数
NTHREADS	1	运行线程数

2.3.3 计算定标质量

考虑到不同使用环境对天测定标的准确性要求不同，本文使用定性和定量两个指标来衡量天测定标的质量。定性指标选为定标后图像星表源坐标是否在全图范围内与参考星表源坐标相匹配，匹配阈值选为 0.5 倍图像半高全宽。用于匹配的参考星表选为 Gaia DR2 星表。定量指标则选为定标后的图像源坐标与参考星表中对应源坐标的 RMS 偏差。具体计算方法如下。

第一步，使用 SExtractor 对定标后图像分别以高低阈值进行两次探测，高探测阈值和分析阈值选为 5.0，低探测阈值和分析阈值选为 1.0。以与 2.3.2 节中相同的筛选条件对高阈值星表进行筛选，再向参考星表进行坐标匹配，接着将参考星表向低阈值图像星表匹配。如果与高阈值星表源配对的参考星表源在低阈值星表中配对的源不是当前高阈值星表源，则判定为误匹配。在高阈值星表中去掉所有误匹配的源。计算余下源坐标与匹配上的参考星表源坐标之间的距离，作为图像星表源坐标的偏差。需要指出的是，SExtractor 不能识别由 SIP 多项式描述的扭曲修正关键字，因此对于 Astrometry.net 给出的定标结果，我们先使用 python 包 sip_tpv¹ 将 SIP 关键字转换为 TPV 关键字，再使用 SExtractor 进行找源。

第二步，对图像划分为 10 行 10 列的网格阵列，将每个网格内源的坐标偏差除以 0.5 倍图像半高全宽，再剔除 5 倍标准差² 之外的异常值后，取平均值作为当前网格内源坐标准确性的衡量，最后得到的数组即可反映图像各区域坐标偏差情况。图 2-4 展示了与图 2 对应的图像只进行线性定标和进行扭曲修正后的坐标偏差图。如果数组内所有值均小于 1，则认为图像星表在全图范围内与参考星表相匹配，定性为定标质量好；如果数组内大于 1 的值的个数大于 0 且不超过 10，则定性为定标质量中等；否则定性为定标质量差。

第三步，计算剔除异常值后余下所有源的赤经赤纬坐标偏差（定标后的坐标减去参考星表的坐标）以及相应的 RMS，做为该图像天测定标质量的定量指标。图 2-5 展示了同一张图像只进行线性定标和进行扭曲修正后的坐标偏差分布图。

¹https://github.com/stargaser/sip_tpv

²为更好剔除异常值，此处标准差计算方法选为 84.13 百分位与 15.86 百分位差值的一半。

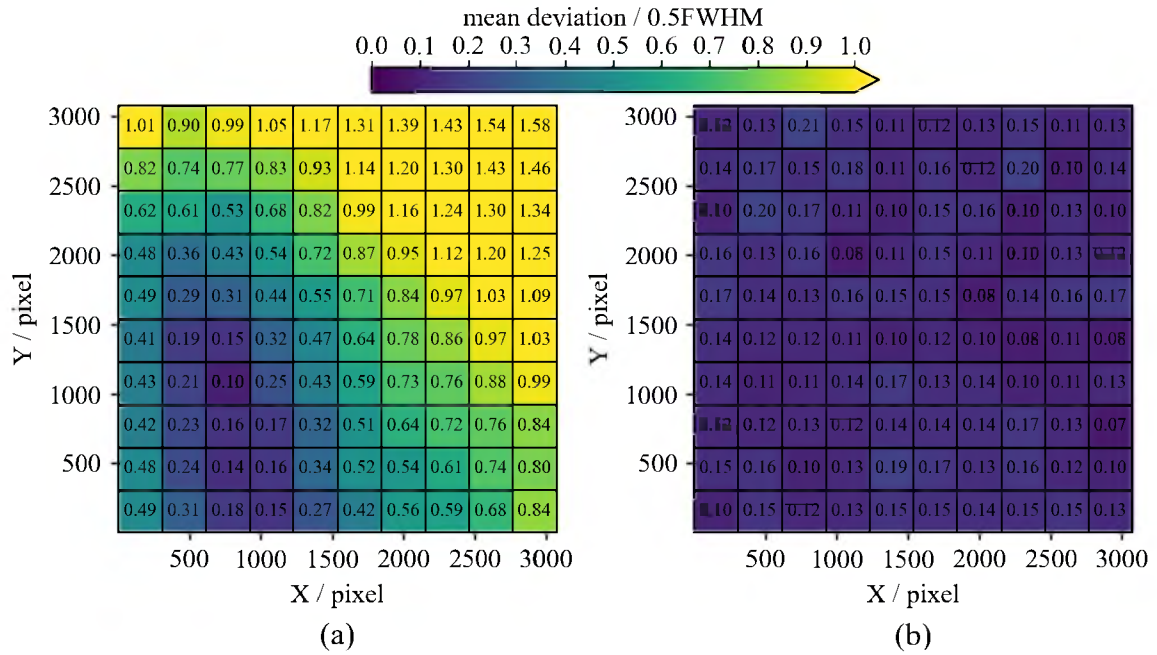


图2-4 图像各区域坐标偏差图。(a) 仅线性定标; (b) 扭曲修正后定标。

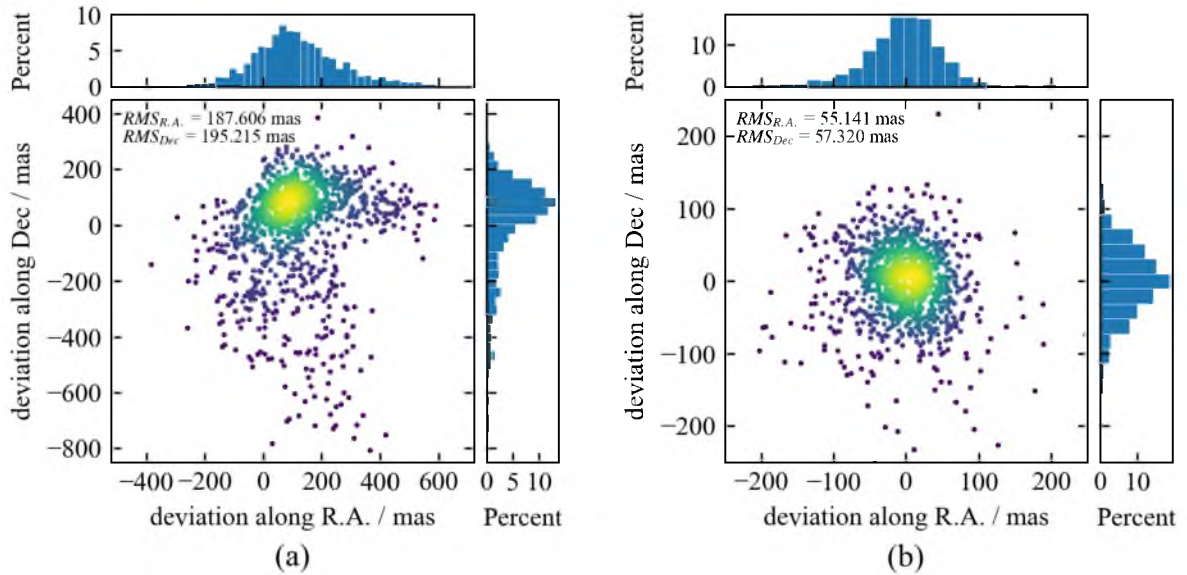


图2-5 图像源赤经赤纬偏差分布。(a) 仅线性定标; (b) 扭曲修正后定标

除了以上提到的指标，赤经赤纬平均偏差及偏差的标准差与星等的关系图也能直观地展示定标质量的好坏。图2-6展示了同一张图像在扭曲修正前后赤经赤纬偏差随星等的分布图，可见经过扭曲修正后，赤经赤纬方向的平均偏差和偏差的弥散都显著减小。

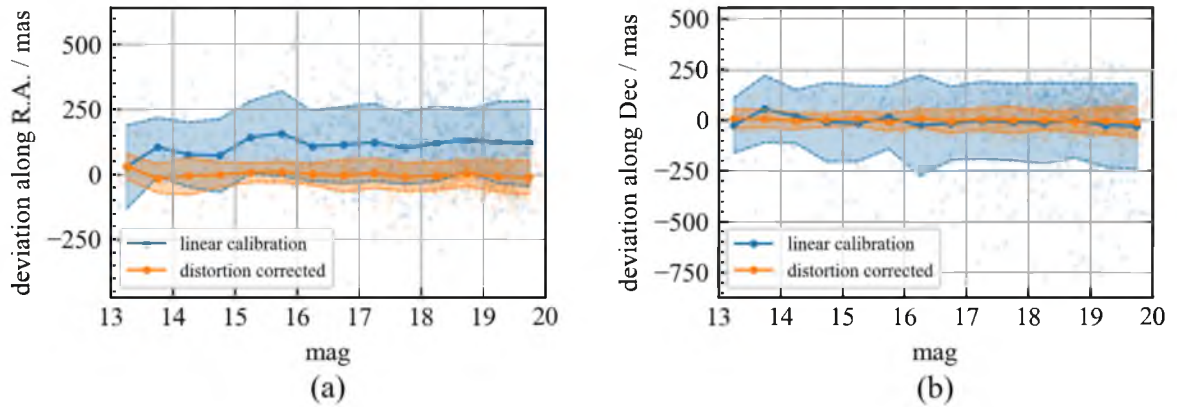


图2-6 图像源赤经(a)和赤纬(b)偏差随星等分布图。图中蓝色代表仅线性定标，橙色代表扭曲修正后定标。背景点代表每个源的星等和坐标偏差，以点连接的实线代表不同星等处的平均坐标偏差，阴影部分代表坐标偏差的一倍标准差。

2.4 定标结果对比

本节从总计算耗时，定性的星表匹配情况和定量的坐标RMS偏差这三个方面对不同定标方式取得的结果进行比较。比较对象除了2.3.2节中提及的4种定标流程的结果，也包括Astrometry.net仅线性定标的结果和SCAMP仅做线性定标修正的结果，以及ZTF图像已有的定标结果。表2-4记录了这些定标结果的平均计算耗时，定标质量分别为好、中等、差的图像占比，以及100张图像平均的赤经赤纬方向RMS偏差。

表2-4 不同定标方式的耗时，定性质量统计和平均赤经赤纬RMS偏差

定标流程	平均耗时 (s)	定标质 量好的 图像占 比 (%)	定标质量 中等的图 像占比 (%)	定标质 量差的 图像占 比 (%)	平均赤 经RMS 偏差 (mas)	平均赤纬 RMS偏差 (mas)
Astrometry.net线 性定标	0.72	29	40	31	329.18	314.60
SCAMP线性定 标修正	4.59	68	32	0	184.17	169.82
流程1	1.64	83	8	9	177.81	173.26

流程2	5.95	96	4	0	73.39	69.99
流程3	1.00	100	0	0	68.68	64.36
流程4	5.59	100	0	0	67.80	63.69
ZTF定标结果	--	100	0	0	68.66	64.58

2.4.1 线性定标修正前后结果对比

定标流程4中包含SCAMP对Astrometry.net给出的线性定标结果进行修正的步骤，因此可以对修正前后的线性定标质量进行比较。图2-7展示了修正前后定标质量分别为好，中等，差的图像数量分布。该图表明，经过SCAMP修正后，定标质量好的图像占比由29%升高至68%，而质量差的图像占比由31%降至0%。图2-8展示了修正前后赤经赤纬方向RMS偏差的分布，可看出经过修正后，两方向RMS偏差分布均更集中且均值更小。图2-9展示了运行solve-field进行线性定标和单线程运行SCAMP进行线性定标修正的耗时分布，可以看出Astrometry.net一般在1秒内即可完成图像的线性定标，而SCAMP则需要4到5秒才能完成线性定标的修正。

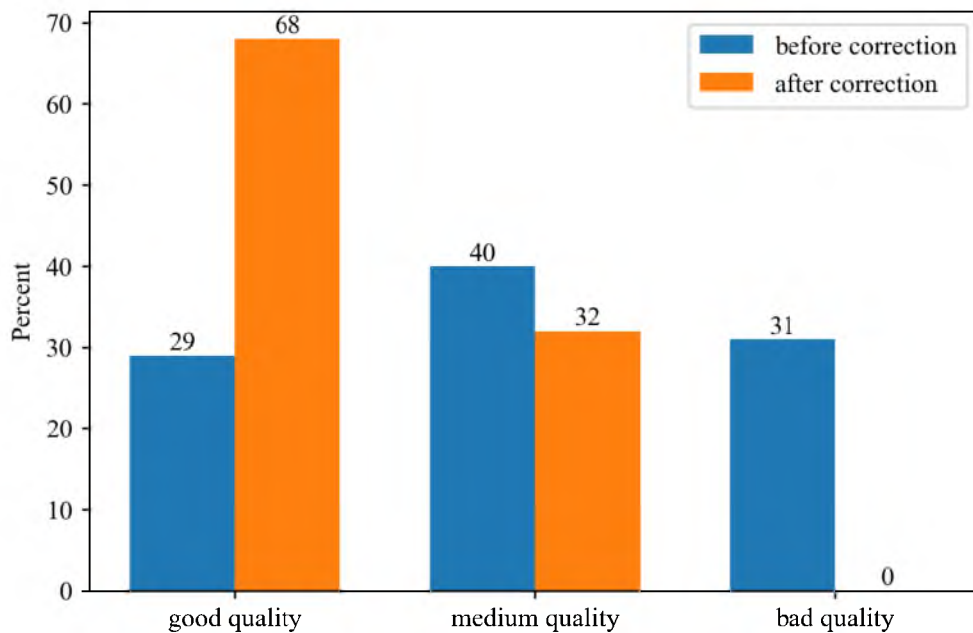


图2-7 SCAMP修正前后线性定标的定性质量分布

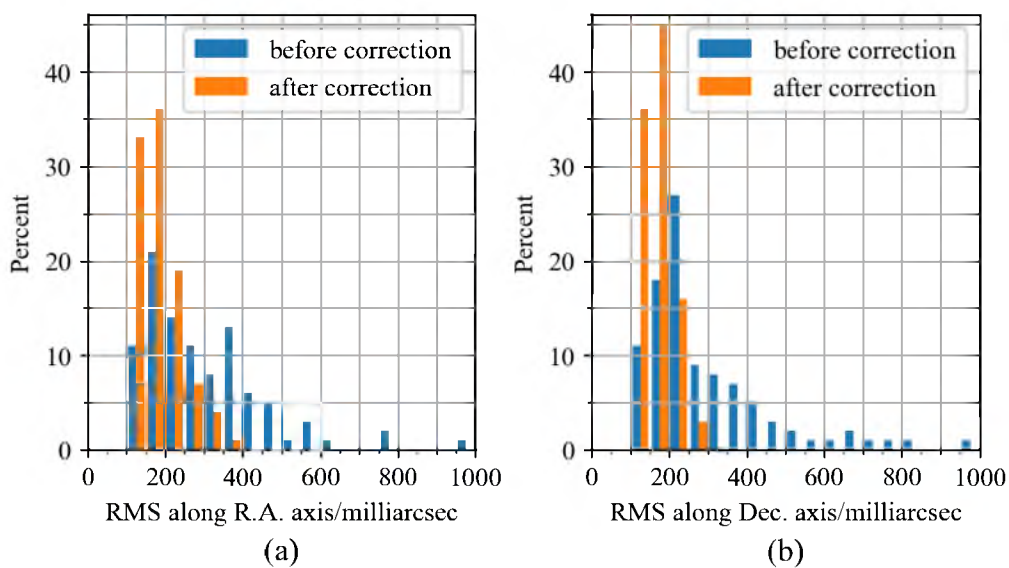


图2-8 SCAMP修正前后线性定标的赤经(a)赤纬(b)方向的RMS偏差分布

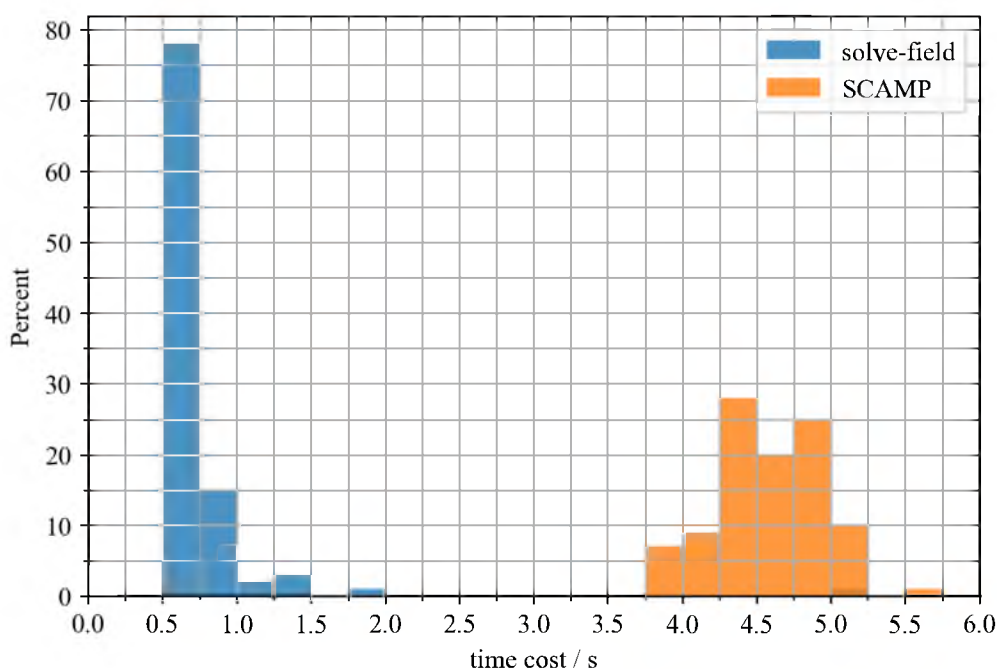


图2-9 solve-field进行线性定标和SCAMP进行线性定标修正的耗时分布

2.4.2 4种流程定标结果对比

这一节对4种不同定标流程所得定标结果的质量进行对比。图2-10展示了4种流程定标质量分别为好，中等，差的图像数量分布。从图中可以看到，流程1的定标结果中质量好的占比最低，仅为83%，流程2的定标结果中质量好的占比则提升至96%，但仍没有达到100%。相比之下，由SCAMP参与定标的流程3和流程4所得定标结果中质量

好的占比均达到了100%。这表明搭配使用Astrometry.net和SCAMP进行定标比仅使用Astrometry.net进行定标的效果要好。图2-11展示了4种流程定标后赤经赤纬方向RMS偏差的分布，可以看到流程2、3、4所得定标结果的RMS偏差分布差别不大，集中程度和平均偏差均优于流程1所得结果。值得注意的是流程3和4定标结果的差别很小，说明在使用SCAMP做扭曲修正前，是否对Astrometry.net给出的线性定标结果进行修正对最终定标结果的准确度影响较小。图2-12展示了4种定标流程的总耗时分布，该图表明流程3的总耗时最少，大部分图像在1秒内就可以完成定标，这说明SCAMP计算扭曲修正耗时极短；总耗时最长的为流程2，一般需要5到6秒才能完成图像的定标，这是因为在流程2中，Astrometry.net在第二次运行的过程中会使用多个不同尺度的index文件进行验证并计算扭曲修正，因此耗时较长。

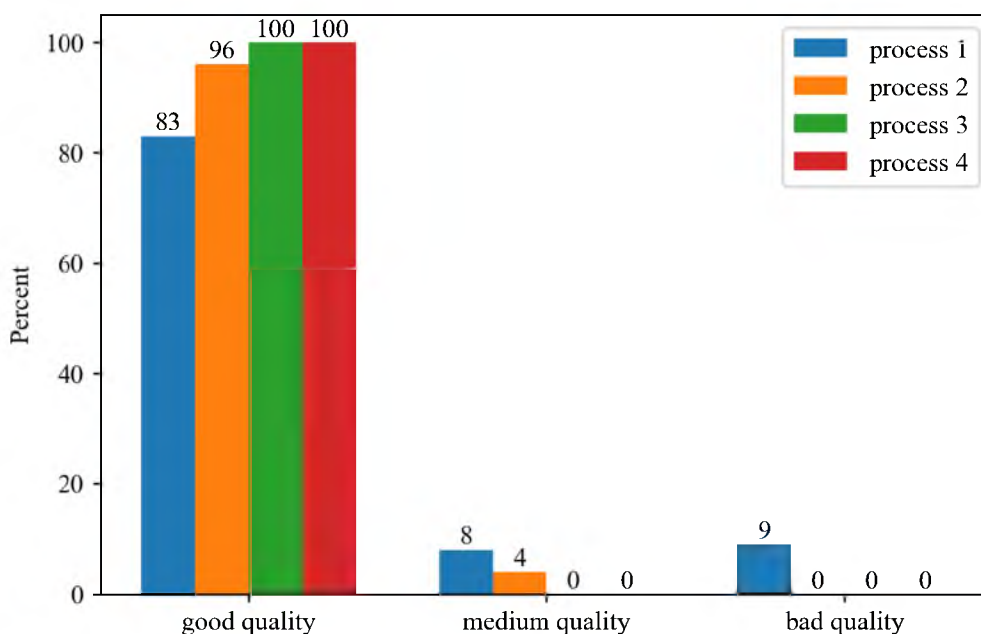


图2-10 4种定标流程结果的定性质量分布

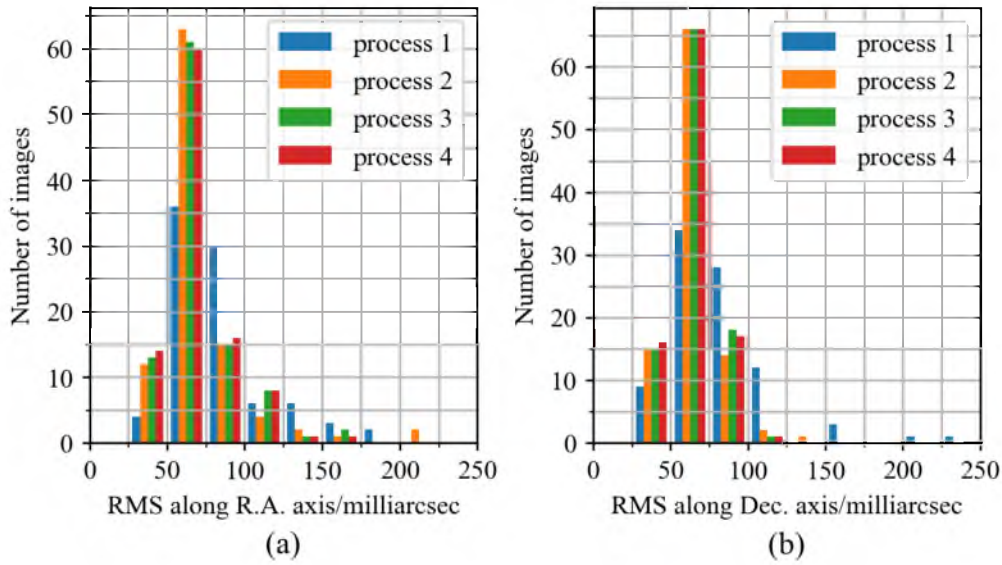


图2-11 4种定标流程所得结果的赤经(a)赤纬(b)方向的RMS偏差分布

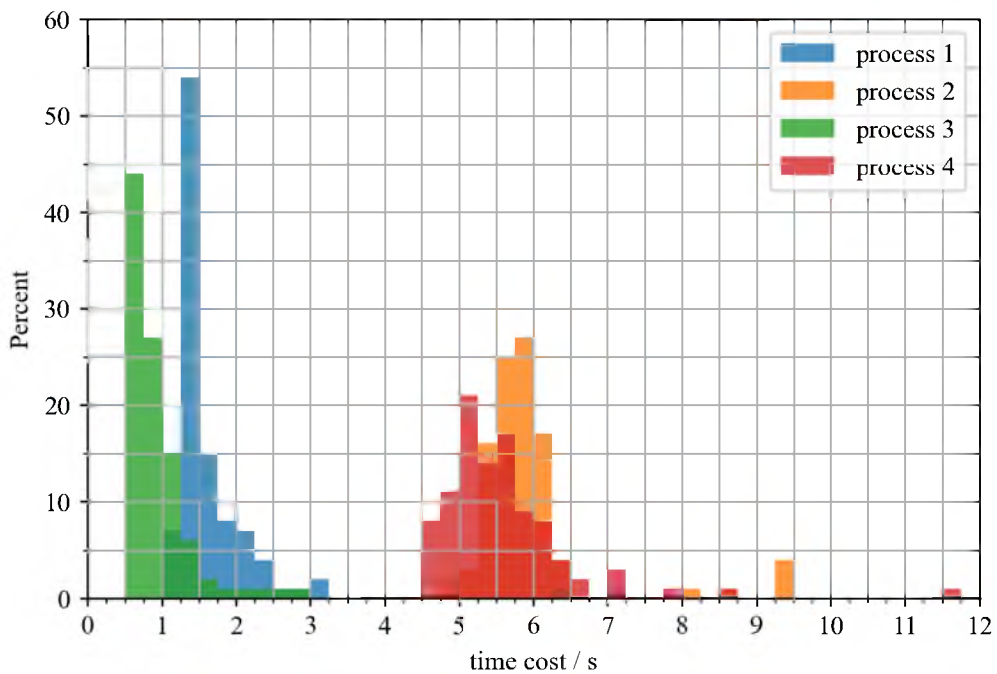


图2-12 4种定标流程总耗时分布

2.5 讨论

结合2.4.1节和2.4.2节的对比结果以及两款软件定标原理可知，Astrometry.net相比于SCAMP的主要优点为在没有预先WCS估计的情况下以较快速度对图像进行线性定标，缺点在于若要进行扭曲修正，一次性定标则虽然耗时短但质量较差，分两次定标则虽然质量较好但耗时较长；而SCAMP相比于Astrometry.net的主要优点在于能够快速地基

于给定的线性定标结果进行扭曲修正，而其对给定线性定标进行修正虽然能够显著提升定标质量但耗时较长。搭配Astrometry.net和SCAMP可以实现快速且准确的天测位置定标。

同时需要指出的是，（1）如果实际拍摄图像的扭曲程度比本文中测试使用的ZTF图像的扭曲程度严重，那么有可能导致Astrometry.net线性定标质量太差从而使得SCAMP无法通过直接扭曲修正获得足够准确的定标，此时很可能需要先进行一次线性定标的修正再进行扭曲修正；（2）本次实验所选择的测试图像均为质量较好的图像，对于深度较浅、视宁度较差的图像（图像的科学价值会随之降低），不同定标方式之间的对比结果可能会发生变化；（3）本文在使用Astrometry.net的solve-field命令时输入的搜索中心坐标为根据图像已有WCS信息计算出的准确中心坐标，而实际数据处理中往往只能知道图像大致的指向坐标，因此实际的解算耗时可能会更长。

2.6 程序编写

由于手动运动 SCAMP 需要首先运行 SExtractor 来生成图像源表，且 SCAMP 运行完成后仅生成一个包含解算出的 WCS 文本文件，还需手动将此文件中的 WCS 信息载入到图像的 FITS 头中使之生效，过程较繁琐，不便于我们在日常观测的数据处理中快速调用。因此我使用 python 变成语言编写了一个模块，将 SCAMP 和 Astrometry.net 的调用进行封装，并在模块中提供了一些相关的辅助功能。此模块提供命令行工具和作为 python 包在程序中调用两种使用方式，本节将对模块作为命令行工具使用进行大致介绍。

模块提供的命令行工具名为 astools，提供 7 个不同的子功能（即 7 个次级命令），其中调用 Astrometry.net 和 SCAMP 以及搭配两款软件对输入图像进行天测位置定标是三个主要功能，除此之外还提供 4 个相关的辅助功能。图 2-13 展示了该命令行工具的帮助信息。该命令行工具需要系统上已经安装 SExtractor，Astrometry.net 和 SCAMP 三个软件。

```

(pyraf) astrom > astools -h
/Users/liuxing/work/astround/scripts/astrometry_alt/astrom/astrom/main.py
usage: astrom [-h] [-v] {lazy,astnet,scamp,getcat,loadwcs,delwcs,segimg} ...

Do astrometric calibration via Astrometry.net and SCAMP.

positional arguments:
  {lazy,astnet,scamp,getcat,loadwcs,delwcs,segimg}
                                functionalities.
  lazy                          do `astnet` and `scamp` and `loadwcs` in one command.
  astnet                        call Astrometry.net
  scamp                         call SCAMP
  getcat                        retrieve catalogs
  loadwcs                       load wcs from a head file.
  delwcs                        delete wcs info from a image.
  segimg                        segment image

optional arguments:
  -h, --help                    show this help message and exit
  -v, --version                 show program's version number and exit

```

图 2-13 天测定标命令行工具帮助信息

2.6.1 主要功能介绍

三个主要功能分别由三个次级命令提供：astnet、scamp、lazy。

次级命令 astnet 提供对 Astrometry.net 软件的调用，图 2-14 展示了该次级命令的帮助信息。使用该命令后，程序将首先调用 SExtractor 对输入图像进行找源并生成图像源表，再调用 solve-field 命令根据图像源表进行天测位置定标，并在指定的文件夹路径下生成定标后的 FITS 图像文件。该次级命令提供了相关的选项用于设置 SExtractor 找源的参数和 solve-field 定标的参数。

次级命令 scamp 提供对 SCAMP 软件的调用，图 2-15 展示了该次级命令的帮助信息。使用该命令后，程序将首先调用 SExtractor 对输入图像进行找源并生成图像源表，接着调用 SCAMP 软件对图像源表进行天测定标的修正，并将修正后的 WCS 信息添加到输入图像的 FITS 头中，在指定路径下生成一个新的 FITS 图像。此次级命令还需要用户提供参考星表作为输入，由于 SCAMP 软件对参考星表的格式有特殊要求，因此另一个次级命令 getcat 提供了相关的星表下载功能。使用 scamp 次级命令时也可以直接输入 SExtractor 生成的图像源表，此时一般还需用户提供一个包含待修正 WCS 信息的文本文件，程序将只调用 SCAMP 软件对输入的 WCS 信息进行修正，在指定路径下生成包好修正后的 WCS 信息的文本文件。

```
(pyraf) astronom > astools astnet -h
/Users/liuxing/work/astround/scripts/astrometry_alt/astrometry/astrometry/main.py
usage: astrometry astnet [-h] [--minarea int] [--dthresh float] [--athresh float]
                        [--filter str] [--dbthres int] [--dbcont float]
                        [--enax float] [--l float] [--h float] [--u str] [--3 str]
                        [--4 str] [--5 float] [--6 int] [--V str] [--to int] [--D str]
                        [-O]
                        image

Use SExtractor to obtain catalog as input to Astrometry.net.
Currently, only support one image at a time.

Example
-----
简单调用, sex参数默认:
- python main.py astnet image.fits -3 20.184 -4 38.310 -5 1.0 -to 4 -O -D ./wcs

自己调节sex参数(比如图像源很少时可以降低阈值,使用filter),并使用视场上下限加速求解:
- python main.py astnet image.fits --minarea 5 --dthresh 1.5 --athres 1.5 --filter ./test/default.conv --dbthres 64 --dbcont 0.0001 -l 0.7 -H 0.9 -u degw -3 20.184 -4 38.310 -5 1.0 -6 0 -to 4 -O -D ./wcs

positional arguments:
  image                input image filename.

optional arguments:
  -h, --help            show this help message and exit
  --minarea int        sex's DETECT_MINAREA. (default: 5)
  --dthresh float      sex's DETECT_THRESH. (default: 1.5)
  --athresh float      sex's ANALYSIS_THRESH. (default: 5.0)
  --filter str         sex's FILTER_NAME. (default: None)
  --dbthres int        sex's DEBLEND_NTHRESH. (default: 32)
  --dbcont float       sex's DEBLEND_MINCONT. (default: 0.005)
  --enax float         max ellipticity. (default: 0.5)
  -l float, --scale-low float
                        solve-field's --scale-low.
  -h float, --scale-high float
                        solve-field's --scale-high.
  -u str, --scale-units str
                        solve-field's --scale-units. (degw, mmw, spw). (default: degw)
  -3 str, --ra str     solve-field's --ra.
  -4 str, --dec str    solve-field's --dec.
  -5 float, --radius float
                        solve-field's --radius. (Required)
  -6 int, --extension int
                        solve-field's --extension. (default: 0)
  -V str, --verify str
                        solve-field's --verify.
  -to int, --twalk int
                        tweak order, use 0 if distortion correction is not needed. (default: 2)
  -D str, --dir str   place all output files/dirs in the specified directory
  -O, --overwrite     overwrite any existing files. (default: False)
```

图 2-14 次级命令 astnet 帮助信息

```
(pyraf) astronom > astools scamp -h
/Users/liuxing/work/astround/scripts/astrometry_alt/astrometry/astrometry/main.py
usage: astrometry scamp [-h] [--minarea int] [--dthresh float] [--athresh float]
                       [--filter str] [--dbthres int] [--dbcont float]
                       [--enax float] [--header str] [--refcat str] [--maglim str]
                       [--match] [--scale-err float] [--pang-err float]
                       [--pos-err float] [--solve] [--proj str] [--do int]
                       [--snthres float] [--xcol str] [--ycol str] [--ext int]
                       [-D str] [-O]
                       input

Use SExtractor to obtain catalog as input to SCAMP.
A reference catalog is needed, which can be obtained via 'astrometry getcat ...'.
Currently, only support one image at a time.

Example
-----
输入图像和参考星表(ldac格式),进行线性修正和4阶扭曲修正:
- python main.py scamp image.fits --refcat ref.cat.fits --match --solve -do 4 -D ./wcs

输入图像星表(ldac格式)和参考星表(ldac格式),提供一个header文件,只进行线性修正.'-proj SAME'使得CTYPE为TAN,不指定也可以:
- python main.py scamp catalog.fits --refcat ref.cat.fits --header wcs.head --match --proj SAME -D ./wcs

输入图像星表(ldac格式)和参考星表(ldac格式),提供一个header文件,只进行4阶扭曲修正:
- python main.py scamp catalog.fits --refcat ref.cat.fits --header wcs.head --solve -do 4 -D ./wcs

修正一张xshooter的母星图像,通过--pos-err参数指定图像wcs大概偏差:
- python main.py scamp ./test/testing_xsh.fits --dthres 1.5 --athres 1.5 --refcat ./test/test_xsh/legacy_22.91_-41.52_0.02.ldac.fits --match --pos-err 0.05 --proj SAME -O -D ./test/test_xsh

positional arguments:
  input                input image/catalog filename.

optional arguments:
  -h, --help            show this help message and exit
  --minarea int        sex's DETECT_MINAREA. (default: 5)
  --dthresh float      sex's DETECT_THRESH. (default: 1.5)
  --athresh float      sex's ANALYSIS_THRESH. (default: 5.0)
  --filter str         sex's FILTER_NAME. (default: None)
  --dbthres int        sex's DEBLEND_NTHRESH. (default: 32)
  --dbcont float       sex's DEBLEND_MINCONT. (default: 0.005)
  --enax float         max ellipticity. (default: 0.5)
  --header str         SCAMP's HEADER_NAME. (Required if the input is catalog with no wcs info)
  --refcat str         SCAMP's ASTREFCAT_NAME. 参考星表路径. (Required)
  --maglim str         SCAMP's ASTREFCAT_LIMITS. 参考星表中选择的星等范围. (default: 0.0,99.0)
  --match              SCAMP's MATCH. 是否进行线性修正. (default: False)
  --scale-err float    SCAMP's PIXSCALE_MAXERR. 像素比例尺的倍数误差. (default: 1.2)
  --pang-err float     SCAMP's POSANGLE_MAXERR. 方位角的误差. (default: 5.0)
  --pos-err float      SCAMP's POSITION_MAXERR, in arcmin.图像整体偏差. 角分. (default: 1.0)
  --solve              SCAMP's SOLVE_Astrom. 是否进行扭曲修正. (default: False)
  --proj str           SCAMP's PROJECTION_TYPE. 投影模式. 如果要用 solve, 选 TPV, (SAME, TPV, TAN). (default: TPV)
  -do int, --distort int
                        SCAMP's DISTORT_DEGREES. 扭曲修正阶数. (default: 3)
  --snthres float     SCAMP's SNR lower threshold. SCAMP选择的信噪比下限. (default: 10.0)
  --xcol str           X coordinate colname. 如果输入星表, X坐标的列名称. (default: XWIN_IMAGE)
  --ycol str           Y coordinate colname. 如果输入星表, Y坐标的列名称. (default: YWIN_IMAGE)
  --ext int            which fits extension to solve. (default: 0, same as astnet)
  -D str, --dir str   place all output files/dirs in the specified directory
  -O, --overwrite     overwrite any existing files. (default: False)
```

图 2-15 次级命令 scamp 帮助信息

次级命令 lazy 用于组合使用 Astrometry.net 和 SCAMP 两款软件对输入图像进行定标, 图 2-16 展示了该次级命令的帮助信息。使用该命令后, 程序首先调用 SExtractor 对输入图像进行找源并生成图像源表, 接着调用 solve-field 命令基于图像源表对图像

进行定标，再调用 SCAMP 在前者的基础上进行定标的修正。通过命令行选项，可以分别指定 solve-field 和 SCAMP 的修正参数，例如，对于本章中所使用的 ZTF 测试图像，可以指定 solve-field 仅进行线性定标和 SCAMP 仅进行扭曲修正，从而结合两款软件的优点加快整体定标速度。

```
(pyraf) astrom > astools lazy -h
/Users/liuxing/work/astrom/scripts/astrometry_alt/astrom/astrom/main.py
usage: astrom lazy [-h] [--minarea int] [--dthres float] [--athres float]
                  [--filter str] [--dbthres int] [--dbcont float]
                  [--max float] [-L float] [-H float] [-u str] [-3 str]
                  [-4 str] [-5 float] [-6 int] [-V str] [-to int] [--refcat str]
                  [--maglim str] [--match] [--scale-err float]
                  [--pang-err float] [--pos-err float] [--solve] [--proj str]
                  [-do int] [--snthres float] [--xcol str] [--ycol str]
                  [-D str] [-O]
                  image

call solve-field to solve a pre-result as input for scamp to calibrate.

Example
加载一张 hmt 图像的 wcs, 先使用 astnet 做 4 阶扭曲修正, 再使用 scamp 做 4 阶扭曲修正:
python main.py lazy ./test/testing_hmt.fits --refcat ./test/test_hmt/gaia_dr3_224_94_41_48_1.00.ldac.fits --ra 224.9376 --dec 41.4862 --radius 1 -to 4 --solve -do 4 -O -D ./test/test_hmt

positional arguments:
  image                  input image filename.

optional arguments:
  -h, --help            show this help message and exit
  --minarea int         ###'s DETECT_MINAREA. (default: 5)
  --dthres float        ###'s DETECT_THRESH. (default: 1.5)
  --athres float        ###'s ANALYSIS_THRESH. (default: 5.0)
  --filter str          ###'s FILTER_NAME. (default: None)
  --dbthres int         ###'s DEBLEND_NTHRESH. (default: 32)
  --dbcont float        ###'s DEBLEND_MINCONT. (default: 0.005)
  --max float           max ellipticity. (default: 0.5)
  -L float, --scale-low float
                        solve-field's --scale-low.
  -H float, --scale-high float
                        solve-field's --scale-high.
  -u str, --scale-units str
                        solve-field's --scale-units. {degw, amw, app}. (default: degw)
  -3 str, --ra str      solve-field's --ra.
  -4 str, --dec str     solve-field's --dec.
  -5 float, --radius float
                        solve-field's --radius. (Required)
  -6 int, --extension int
                        solve-field's --extension. (default: 0)
  -V str, --verify str solve-field's --verify.
  -to int, --tweak int  tweak order, use 0 if distortion correction is not needed. (default: 2)
  --refcat str          SCAMP'## ASTREFCAT_NAME. 参考星表路径. (Required)
  --maglim str          SCAMP'## ASTREFMAG_LIMITS. 参考星表中选择的星等范围. (default: 0.0,99.0)
  --match               SCAMP'## MATCH. 是否进行线性修正. (default: False)
  --scale-err float     SCAMP'## PIXSCALE_MAXERR. 像素比例尺的倍数误差. (default: 1.2)
  --pang-err float      SCAMP'## POSANGLE_MAXERR. 方位角的误差. (default: 5.0)
  --pos-err float       SCAMP'## POSITION_MAXERR. in arcmin. 位置整体偏差. 角分. (default: 1.0)
  --solve               SCAMP'## SOLVE_Astrom. 是否进行扭曲修正. (default: False)
  --proj str            SCAMP'## PROJECTION_TYPE. 投影模式, 如果要 solve, 选 TPV. (SAME, TPV, TAN). (default: TPV)
  -do int, --distort int
                        SCAMP'## DISTORT_DEGREES. 扭曲修正系数. (default: 3)
  --snthres float       SCAMP'## SNR_lower_threshold. SCAMP 光源的信噪比下限. (default: 10.0)
  --xcol str            X coordinate colname. 如果输入星表, X 坐标的列名称. (default: XWIN_IMAGE)
  --ycol str            Y coordinate colname. 如果输入星表, Y 坐标的列名称. (default: YWIN_IMAGE)
  -D str, --dir str     place all output files/dirs in the specified directory
  -O, --overwrite       overwrite any existing files. (default: False)
```

图 2-16 次级命令 lazy 帮助信息

2.6.2 辅助功能介绍

四个辅助功能分别由四个次级命令提供：getcat、loadwcs、delwcs、segimg。

次级命令 getcat 提供下载参考星表的辅助功能，主要用于搭配 scamp 次级命令进行定标。图 2-16 展示了该次级命令的帮助信息。目前该命令可下载的星表有 Gaia DR2 星表、Gaia DR3 星表、Legacy Survey 星表和 PanSTARRS 星表。不同的星表的深度不同，在相同大小天区内所涵盖源的数目不同，因而适用于不同深度和不同视场大小的图像。对于视场较大的图像（如 0.5 度以上），一般可使用 Gaia 星表作为参考星表；对于视场偏小的图像（如 10 角分左右），则可使用 PanSTARSS 星表作为参考星表；而对于视场极小且较深的图像（如 1 到 2 角分），Gaia 星表和 PanSTARRS 星表很可能没有视场中任何一个源或者只有几个源的信息，此时可尝试使用较深的 Legacy

Survey 星表。用户需要指定需要下载的星表的中心坐标和半径以及星表名称，程序将通过国家天文科学数据中心¹提供的数据库接口加载符合要求的星表文件，并将下载的文件转换为符合 SCAMP 输入要求的格式，连同原始下载文件存储在指定路径下。

```
((pyraf) astrom > astools getcat -h
/Users/liuxing/work/astround/scripts/astrometry_alt/astrom/astrom/main.py
usage: astrom getcat [-h] --ra str --dec str --radius float
                  [--catname str [str ...]] [-D str] [-O]

Download catalog as .csv file, and generate .reg file and FITS_LDAC file which is required by SCAMP.
R.A, Dec, radius are required. Default catalog is Gaia DR3.

Example:
- getcat --ra 20.184 --dec 38.310 --radius 1.0 --catname gaia-dr3 -D ./test -O

optional arguments:
  -h, --help            show this help message and exit
  --ra str              center ra coordinate, degree of hh:mm:ss. (Required)
  --dec str            center dec coordinate, degree or [+]-dd:mm:ss. (Required)
  --radius float        radius, in degree. (Required)
  --catname str [str ...]
                        catalog name. {gaia-dr2,gaia-dr3,legacy,panstarrs}. (default: gaia-dr3)
  -D str, --dir str    place all output files/dirs in the specified directory
  -O, --overwrite      overwrite any existing files. (default: False)
```

图 2-16 次级命令 getcat 帮助信息

次级命令 loadwcs 提供将指定文本文件中的 WCS 载入到指定图像 FITS 头中的辅助功能，图 2-17 展示了此次级命令的帮助信息。次级命令 astnet 和 scamp 在运行后均会在指定路径下各自的工作文件夹内生成一个含有定标后 WCS 信息的文本文件，使用 loadwcs 命令可以将这些文件中的 WCS 信息载入到指定的图像的 FITS 头中。

次级命令 delwcs 提供删除指定图像中 WCS 信息的简单功能。

次级命令 segimg 提供分割图像的辅助功能，图 2-18 展示了该次级命令的帮助信息。对于视场过大的图像（如 2 度以上），直接对整张图像进行天测位置定标可能无法得到好的定标准确度，此时可能需要先将图像进行切割再对每张子图分别进行天测位置定标。用户可以指定沿图像 X 轴和 Y 轴分割的份数，以及重叠部分的大小，程序将对图像进行分割，并将分割后的子图像存储在制定路径下。对于有 WCS 信息的输入图像，程序会对子图中的 WCS 信息做相应修改以保证子图的 WCS 信息不发生偏离，但程序只修改 WCS 中的线性部分，不会修改扭曲修正部分，因此部分子图的 WCS 信息可能不会完全准确，需要重新进行定标。

¹<https://nadc.china-vo.org>

```

(pyraf) astrom > astools loadwcs -h
/Users/liuxing/work/astround/scripts/astrometry_alt/astrom/astrom/main.py
usage: astrom loadwcs [-h] --header str [--ext int] [-D str] [-O] image

load wcs from a head file to the image.
substitute the image's wcs with the one in a head file.
a new image will be generated, the original one won't be changed.

Example
-----
- python main.py loadwcs image.fits --header image.head -O -D ./wcs

positional arguments:
  image                fits image

optional arguments:
  -h, --help          show this help message and exit
  --header str        header file, generated from `astrom astnet/scamp`. (Required)
  --ext int           fits extension. (default: 0)
  -D str, --dir str  place all output files/dirs in the specified directory
  -O, --overwrite    overwrite any existing files. (default: False)

```

图 2-17 次级命令 loadwcs 帮助信息

```

(pyraf) astrom > astools segimg -h
/Users/liuxing/work/astround/scripts/astrometry_alt/astrom/astrom/main.py
usage: astrom segimg [-h] -nx int -ny int [-o int] [-e int] [-D str] [-O]
                    image

This little script segment input image into several pieces.
Name of output images are like input_x_y.fits.

Example
-----
把图像分成2x2份:
- python main.py segimg ./test/testing_not.fits -nx 2 -ny 2 -e 1 -O -D ./segimg

positional arguments:
  image                input image

optional arguments:
  -h, --help          show this help message and exit
  -nx int             number of pieces along x axis. (Required)
  -ny int             number of pieces along y axis. (Required)
  -o int, --overlap int
                    overlap in pixels, optional. (default: 0, could still be small overlap if size of image cannot be divided exactly).
  -e int, --extension int
                    fits extension containing imagedata and wcs header, optional. (default: 0)
  -D str, --dir str  place all output files/dirs in the specified directory
  -O, --overwrite    overwrite any existing files. (default: False)

```

图 2-18 次级命令 segimg 帮助信息

2.7 小结

本章介绍了Astrometry.net和SCAMP两个软件的天测位置定标原理，以ZTF的100张巡天科学图像为测试图像，从计算耗时、图像星表与参考星表匹配情况、坐标RMS偏差三个方面比较了使用两款软件以4种不同的定标流程进行定标的结果。研究发现，虽然Astrometry.net能够在没有预先WCS信息估计的情况下快速地一次性进行线性定标和扭曲修正，但定标准确性逊于耗时较长的分两步计算；而采用Astrometry.net计算线性定标搭配SCAMP进行扭曲修正的方法，可以做到在耗时和准确性上均优于仅使用

Astrometry.net进行定标。本章最后介绍了使用python语言编写的程序模块，该模块可用于方便的对两款软件进行调用，同时提供了相关的辅助功能。在后续的研究工作中，可以进一步探究是否存在更好的选源方式、更好的软件参数设置以进一步提高定标的速度和准确性。

第三章 SExtractor 在测光与流量定标中的应用

3.1 引言

测光是指对某波段天文图像上的源的流量进行测量，测量结果一般表示为星等。测光一般分为两步，首先测量出源的仪器星等，再将仪器星等修正到标准测光系统下的大气外视星等。以 CCD 图像为例，仪器星等 M_{inst} 由源的流量在图像上贡献的计数值（ADU, analog-to-digital units）的总和 S 计算而来，两者关系为：

$$M_{\text{inst}} = -2.5 \log_{10}(S) \quad (3-1)$$

测量源的仪器星等的常用方法一般可分为两种：孔径测光和 PSF（Point Spread Function, 点扩散函数）测光。孔径测光是指对源进行定心后，将特定大小和形状的孔径内的像素数值直接进行相加再减去背景的贡献，得到源的总计数 S 进而得到仪器星等。孔径的形状可以根据不同情形原则，一般以圆孔径和椭圆孔径^[31]为比较常见的孔径形状。PSF 测光是一种模型拟合测光，PSF 是指点源在探测器面上所成像的二维流量分布轮廓，通过使用某些函数形式（如二维高斯型函数）去拟合该流量轮廓，再对拟合结果进行积分即可得到源的总流量。

从仪器星等改正到大气外视星等这一步称为流量定标。同一张图像上，一个源的仪器星等与其在标准测光系统下的大气外视星等 M_{cal} 之间的关系可写为^[22]：

$$M_{\text{cal}} = M_{\text{inst}} + k_a \times \text{airmass} + k_c \times \text{color} + ZP \quad (3-2)$$

其中， k_a 为大气消光系数，airmass 为大气质量， k_c 为颜色改正系数，color 为源的颜色（一般表示为两个波段的星等之差），而 ZP 为仪器零点。颜色改正就是为了修正由不同波长大气消光不同造成的星等偏差以及由观测图像和标准星等所用滤光片波长范围和透过率不完全相同造成的星等偏差¹。确定转换关系中的各项参数需要借助测光参考星来完成。参考星的选择有两种方式：（1）选择一组测光标准星^[33]（这些标准星通常具有精确的已知亮度和颜色，没有亮度变化），在测光夜对这些标准星进行多次观测从而得到不同大气质量下视星等和仪器星等的差值，通过拟合即可求出大气消光系数、颜色改正系数以及仪器零点，从而使用这些参数对每一幅科学图像中源的仪器星等进行

¹ http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/color_terms/color_terms.html

行相应的改正以得到视星等；（2）在已有的巡天星表与待测图像上重合的源中选择一组合适的参考星来进行定标，由于每张图像上的源的大气消光量可视为相同，因此 3-2 式中大气质量的改正项和仪器零点可合并为一项，可称其为图像零点，此时需要在每张图像中选择参考星用于拟合出一个图像零点和一个颜色项系数，以对图像上其它的源的仪器星等进行改正来得到其视星等。本章采用第 2 种流量定标方法。

SExtractor 是由 Emmanuel Bertin 使用 C 语言编写的成熟且广泛应用的测光数据处理软件，该软件提供对图像源进行探测、定位、流量（计数）测量等一系列功能，可以同时对该图像进行多孔径尺寸的圆孔径测光（MAG_APER）、自动孔径测光（MAG_AUTO，是一种椭圆孔径测光）、PSF 测光（MAG_PSF，需结合 PSFEx¹软件使用）等不同类型的测光。本章使用与第二章相同的 ZTF 图像作为测试图像，使用 PanSTARRS1 星表作为参考星表，分别使用圆孔径测光，椭圆孔径测光和 PSF 测光对测试图像进行流量定标，对这三种不同测光方法给出的流量定标结果进行对比考察。同时，ZTF 科学图像的 FITS 头中记录了 ZTF 的数据处理管线计算得到的图像零点和颜色项系数，同时 ZTF 也提供每张图像的星表，因此本章也将 ZTF 的定标结果进行了对比展示。

3.2 测光与流量定标实验

3.2.1 圆孔径生长曲线测光

一般在测光时希望尽可能将源的所有流量都能包括在内，这要求相对较大的孔径。但孔径大也意味着背景噪声对测量结果造成的误差增加。图 3-1（a）展示了不同孔径直径（像素单位）下，4 个不同亮度的源的孔径测光误差（由 SExtractor 的 MAGERR_APER 给出）随孔径直径的变化，从图中可以看出，孔径大小对测光误差的影响对于亮源相对较小，但对于暗源则较大。为了减小暗源的测光误差，存在一种“最优孔径”^[40]的概念，能提供最高信噪比的孔径大小即为最优孔径大小。图 3-1（b）展示了同样 4 个源的信噪比随孔径直径的变化，可看出一般在孔径直径达到约 4 倍半高全宽之前就已经达到了最高信噪比，这是一个相对较小的孔径，因为直径为 6 倍半高全宽一般才能包括接近全部的流量^[40]。因此如果使用最高信噪比进行测光，势必会

¹ <https://github.com/astromatic/psfex>

导致漏掉一些流量。同时通过图 3-1 (b) 可看出, 亮源和暗源的信噪比最大的孔径尺寸一般是不同的, 前者较后者偏大一些。为了保证每个源的测量能有最优信噪比的同时弥补上遗漏的流量, 可以采用孔径的生长曲线^[41] (growth curve, GC) 来对最优信噪比孔径测量值做修正。生长曲线表征了一个点源的测量流量随测光孔径的变化关系, 理论上, 在理想情况下图像上所有点源都应符合这一关系^[42]。生长曲线可用相邻两孔径之间仪器星等变化量随孔径增加而变化的曲线来表示, 当孔径增加至足够大时, 该变化量将趋于 0。通过生长曲线, 我们可以对每个源都选择一个最优孔径给出的仪器星等, 再使用生长曲线计算该孔径处和最大孔径处星等的预期差值, 进而对最优孔径下的仪器星等进行修正。生长孔径一般需要使用一组非饱和¹的、信噪比高的、孤立的亮星来构建。

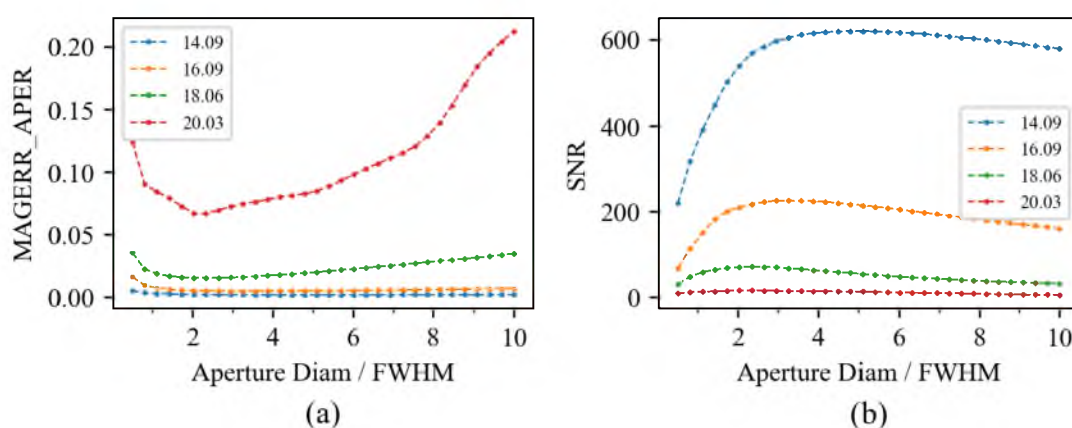


图 3-1 不同测光孔径直径大小 (以星像半高全宽为单位) 对不同亮度源仪器星等误差的影响 (a) 和信噪比 (b) 的影响。

本实验首先使用 SExtractor 对图像进行找源和测光, 表 3-1 展示了部分参数设置。同时设置测光孔径为最小 0.5 倍半高全宽, 最大 10 倍半高全宽的等间隔的 32 个²孔径。得到原始星表后, 首先去掉 FLAGS 大于 0³、MAG_AUTO 为 99、MAG_APER 含有 99、MAG_PSF (见 3.2.2 节) 为 99 的源以得到“有效”星表。接着在有效星表中筛选构建生长曲线的星。具体筛选的 4 个条件为: (1) 距离边缘 30 个像素以上; (2) 信噪比

¹ 测试图像线性饱和值由 FITS 头中的 SATURATE 关键字给出, SExtractor 可以自动识别。

² 在本地运行时, 32 个孔径是 SExtractor 能支持的上限, 超过 32 个的部分的测量仪器星等均为 0;

³ FLAGS 是 SExtractor 对每个源给出的标记值, 用于记录某些源在测量过程中存在的可能导致测量结果不可靠的因素, 如饱和、截断等等。FLAGS 为 0 则代表源的测量结果没有受到这些因素干扰;

¹在 100 以上；（3）椭率小于 0.3；（4）半径为 10 倍半高全宽的范围内没有其它源。对同时满足这 4 个条件²的源按照亮度进行排序，选择前 50 颗星作为构建生长曲线的星。计算每颗星的生长曲线，取所有星的生长曲线的平均值作为该图像的生长曲线。图 3-2 展示了一张测试图像的生长曲线。

表3-1 SExtractor参数设置

参数	取值	说明
DETECT_THRESH	1.5	探测目标阈值 (sigmas)
ANALYSIS_THRESH	1.5	分析目标阈值 (sigmas)
FILTER	N	是否使用过滤器
PHOT_AUTOPARAMS	2.5, 3.5	MAG_AUTO参数, Kron因子和最小半径 (像素)
DEBLEND_NTHRESH	64	脱混时亚阈值个数
DEBLEND_MINCONT	0.001	脱混最小比例参数
BACKPHOTO_TYPE	LOCAL	背景计算类型

对有效星表中每个源计算其信噪比最高（仪器星等误差最小）的孔径，将图像生长曲线上从该孔径开始直到最大孔径内的星等差全部相加，即可得到每个源的生长曲线修正值，将修正值与每个源信噪比最大孔径对应的仪器星等相加即可得到改正后的孔径星等。图 3-3 展示了不同星等源的孔径修正值分布，可见整体趋势为亮源孔径修正值较小（即最优孔径大）而暗源修正值较大（即最优孔径小），同时也可见暗源的修正值的弥散分布比亮源的要大。

除了计算生长孔径修正的孔径仪器星等，实验中还取所有测光孔径中成为最优孔径频次最高的孔径大小作为全局最优孔径，记录下改孔径下的仪器星等作为对比。实验发现，100 图像中，58 张图像的全局最优孔径为第 5 个孔径（约 2.03 倍半高全宽），41 张图像的全局最优孔径为第 4 个孔径（约 1.73 倍半高全宽），1 张图像的全局最优孔径为第 3 个孔径（约 1.42 倍半高全宽）。

¹ 通过 1.0857/MAG_AUTO 得到。

² 并非所有图像都有同时满足这 4 个条件的源。对于特别密集的星场图像，第 4 个条件可能会筛选掉几乎所有的源。在测试过程中有一张图像没有能同时满足条件的源，因此这张图像没有参与后续的比对分析。

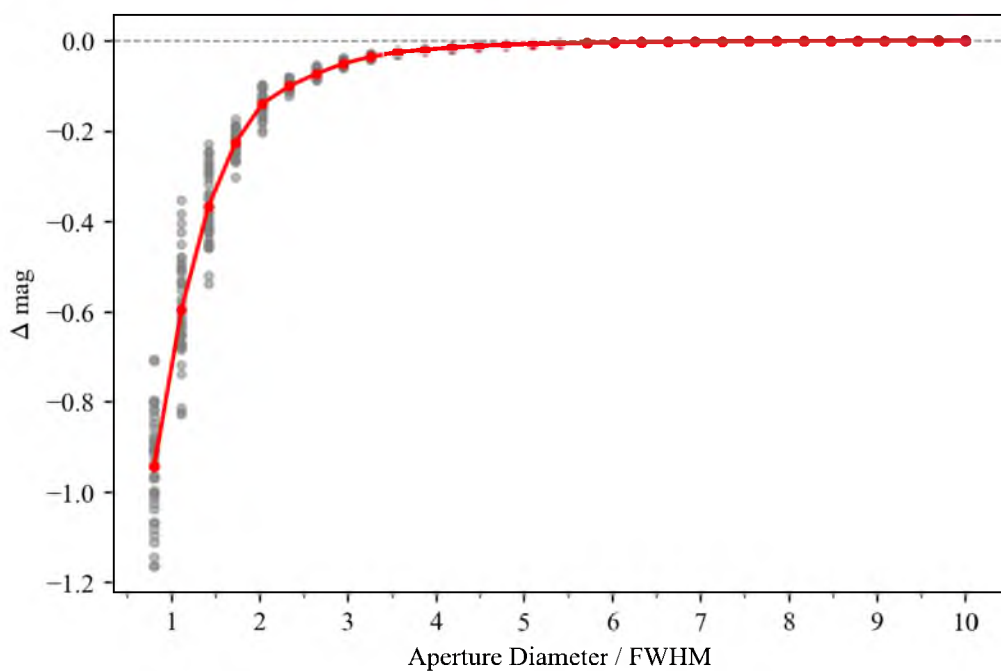


图 3-2 一张测试图像的生长曲线

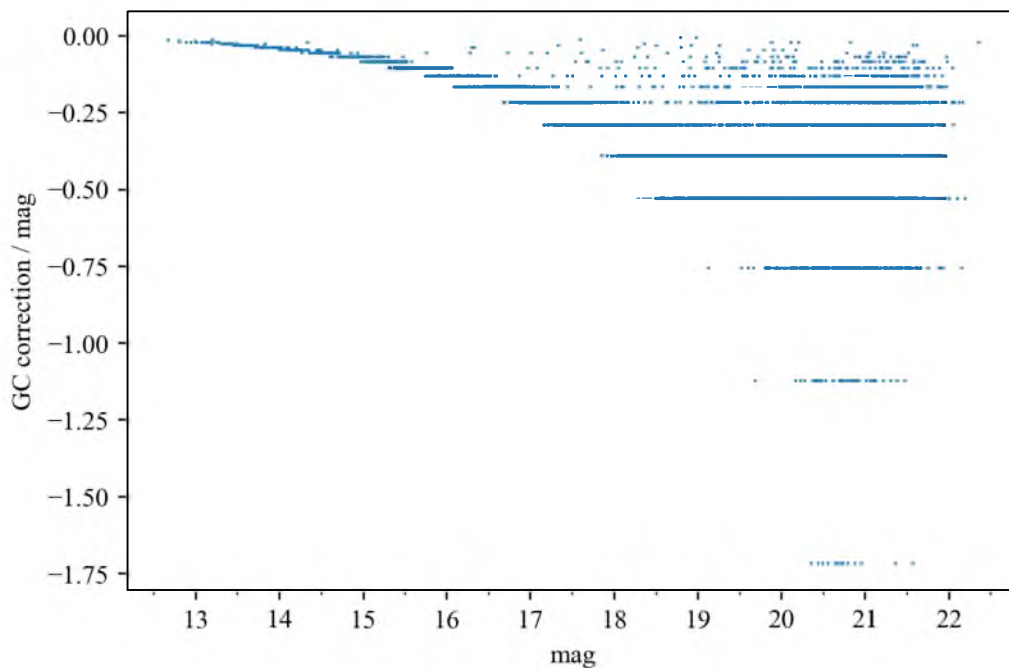


图 3-3 不同亮度源的生长孔径修正量分布

3.2.2 PSF 测光

PSF 测光可分为两步：抽取 PSF 和 PSF 拟合测光。SExtractor 自身并没有抽取 PSF 模型模板的功能，需要先使用同一作者编写的 PSFEx 软件抽取出一个 PSF 模型，再输入 SExtractor 进行 PSF 拟合测光。而 PSFEx 软件本身依赖于 SExtractor 生成的一个初步

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/515000203323011040>