

Высокоточное сканирование для электронных астрономических коллекций

© Поляков Е.В. (1),

Федотова Л.А. (2)

(1) Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория (ГАО РАН),

(2) Ленинградское Оптико-Механическое Объединение (ЛОМО)

poliakow@rol.ru

Аннотация

Оцифровка фотопластинок астрометрического ряда с помощью сканеров не обеспечивает сохранения высоких метрологических характеристик снятой информации в силу конструктивных особенностей этих устройств. Предложена схема специальных измерительных шкал, позволяющих превратить сканер в высокоточный измерительный прибор.

1 Введение

В последние годы астрономическое сообщество озаботилось проблемой сохранения фотографического наблюдательного материала, имеющего полуторавековую историю [9], путем конвертации изображений в цифровую форму. Эти данные в числе многих других явятся составной частью Виртуальной Обсерватории [2] и представят фотографическую эпоху в развитии астрономии. Одним из главных критериев качества конвертированного материала выступает здесь позиционная точность элементов оцифрованного изображения.

Для решения указанной задачи наиболее подходящим средством являются прецизионные Автоматизированные Измерительные Комплексы (АИК) - "Galaxy", РММ, СОМОS [6-8]. Однако количество таких систем в мире исчисляется единицами и для большинства стеклотек (архивов стеклянных фотопластинок) они недоступны. Поэтому на многих обсерваториях начата оцифровка пластинок с помощью планшетных сканеров высокого разрешения. Однако само по себе высокое разрешение не гарантирует сохранения точностных характеристик фотоматериала в силу конструктивных особенностей сканеров, а именно, отсутствия контроля за положением светоприемника (ПЗС-линейки) в процессе сканирования.

В России имеется лишь одна астрографическая машина высокого класса. Это АИК "Фантазия" [3], установленная в Пулковской обсерватории. На основании опыта, приобретенного в процессе оцифровки 40 тысяч астронегативов Пулковской стеклотексти как на сканерах, так и на АИК

«Фантазия» [4], в ГАО совместно с ЛОМО разработаны и изготовлены специальные шкалы, обеспечивающие сохранение позиционной точности фотоматериала при оцифровке его на планшетных сканерах.

2 Модернизация планшетных сканеров

2.1 Конструктивные особенности планшетных сканеров

Сканер для оцифровки прозрачных носителей комплектуется из двух функционально схожих блоков - из собственно сканера (нижняя часть) и адаптера для прозрачных носителей (верхняя часть). В этих блоках смонтированы системы позиционирования кареток со светоприемником и осветителем соответственно, движение которых в процессе съемки синхронизировано. Осветитель оснащен газоразрядной лампой высокой светимости, светоприемник состоит из зеркально-линзовой системы, целевых диафрагм и ПЗС-линейки, на которую построчно проецируется изображение.

Обе каретки перемещаются шаговыми двигателями в прерывистом режиме. Каждая из них смещается параллельно самой себе. Параллельность обеспечивается втулками, впрессованными в каретки и скользящими по стальным направляющим. Направляющие осветителя и светоприемника располагаются по-разному: у первого - близко к середине каретки, у второго - с одного края, другой край свободен и движется, опираясь на ролик, по горизонтальной полочке. Точки приложения тяги находятся вблизи втулок. В качестве движителя используется зубчатый ремень. Положение каретки определяется номером шага двигателя. Сканы формируются в моменты пауз в движении. Таким образом, шаг сканирования вдоль оси X определяется оптическими, а вдоль оси Y - механическими характеристиками устройства. Рабочие плоскости сканера и адаптера ограничены стеклянными пластинами, объемы обоих блоков в значительной степени защищены от попадания загрязнений извне.

2.2 Источники ошибок сканирования

В нескольких последних фразах содержится в неявном виде почти весь список источников

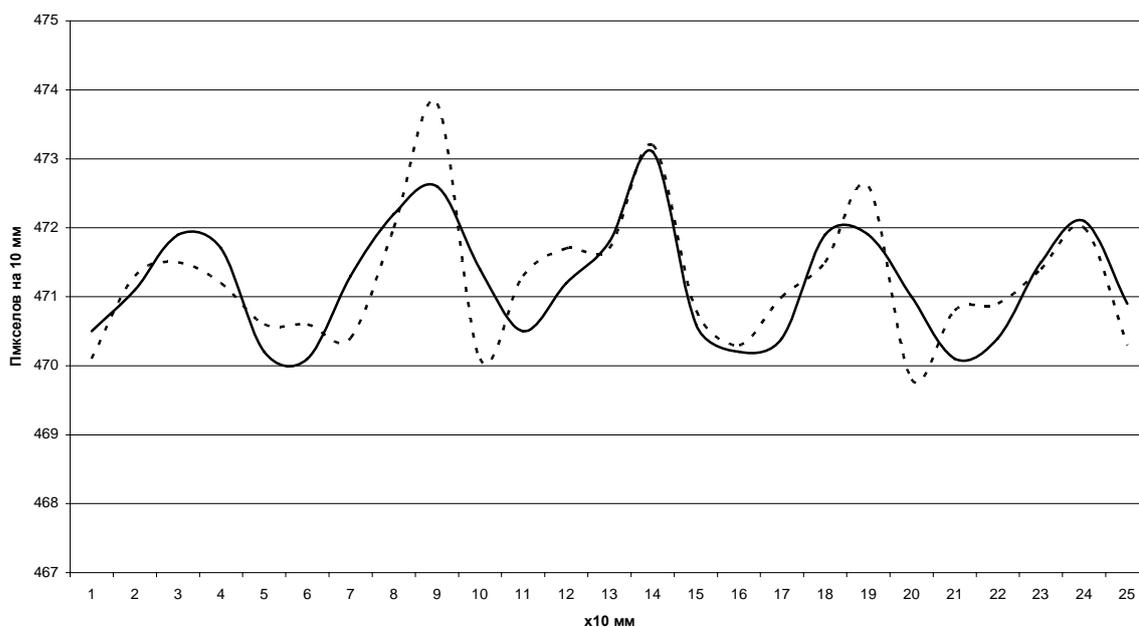


Рис. 1. Шаг сканера UMAX 1200s (рх/см) по измерениям линеек 1 (пунктир, правый край сканируемой области) и 2 (сплошная линия, левый край)

погрешностей сканирования. При тех требованиях, что предъявляются к астрометрическому материалу, - в субмикронном диапазоне величин - направляющие придется считать непрямолинейными, втулки и шестерни - допускающими значительный люфт, шкивы и ролики - имеющими эксцентриситет, зубчатый ремень - подверженным растяжению, положение светоприемника во время оцифровки строк изображения - нестабильным и т.д. Однако самым серьезным недостатком сканеров является отсутствие контроля за положением светоприемника в процессе сканирования. Здесь следует заметить, что сохранение астрометрического качества сканируемых материалов не входит в список задач, для решения которых предназначены неспециализированные сканеры. С этой точки зрения указанный недостаток не является таковым. Действительно, интегральная погрешность, порождаемая перечисленными выше причинами, на площадках малых размеров (< 40x40 мм) в среднем не превышает 4-7 микрон, т.е. относится к субпиксельным эффектам даже при задании весьма высокого разрешения, например, 2400 dpi, которому соответствует элемент сканирования размером чуть более 10 микрон. Погрешности Δu в области $u = u_{\max}$, могут достигать значений $|\Delta u| \approx 20 \div 30$ и более микрон.

В настоящей работе метрологическое тестирование сканера выполнено на основе измерения положения штрихов четырех шкал, снятых с измерительных машин "Аскорекорд", и специальных шкал пулковской разработки, описанных ниже. Все шкалы, распределенные в рабочем поле сканера, сканировались с

разрешением 1200 bpi многократно с интервалами времени от съемки к съемке в пределах 0-30 минут. Всего получено два десятка файлов объемом по 115 МБ, содержащих цифровые копии изображений формата А4. Шкалы «Аскорекорда» в эксперименте считались идеальными, их погрешности не исследовались, а принимались равными нулю, специальные шкалы калибровались на АИК «Фантазия» и снабжались корректировочными матрицами. Тепловое расширение-сжатие шкал в процессе эксперимента не учитывалось. Искажения, порождаемые оптической системой светоприемника, исследовались по измерениям сканов шкал, уложенных вдоль оси X.

Результаты тестирования иллюстрируются рисунками 1-4. На первых двух из них представлены флуктуации масштаба изображения с шагом 10 мм (рис. 1) и 1 мм (рис. 2). В первом эксперименте измерения выполнялись относительно двух линеек, размещенных по краям сканируемой области. Ход обеих кривых согласуется между собой, что указывает на неравномерность движения каретки в целом, различия же обусловлены перекосом каретки во время движения, т.е. нарушением параллельности сканов. Как видно, масштаб оцифрованного изображения изменяется циклически с шагом 50-60 мм, имея крайними значения 470 и 474 линий на миллиметр (1194-1204 dpi при заданном разрешении 1200 dpi). Ошибка масштабирования, таким образом, составляет 0.8%. Однако это сглаженная ошибка. Реальное искажение масштаба, исследованное на мелком шаге, оказывается выше и достигает 2-5% с периодом 3 мм.

Ошибки масштаба приводят к искажению структуры картины, позиционная погрешность

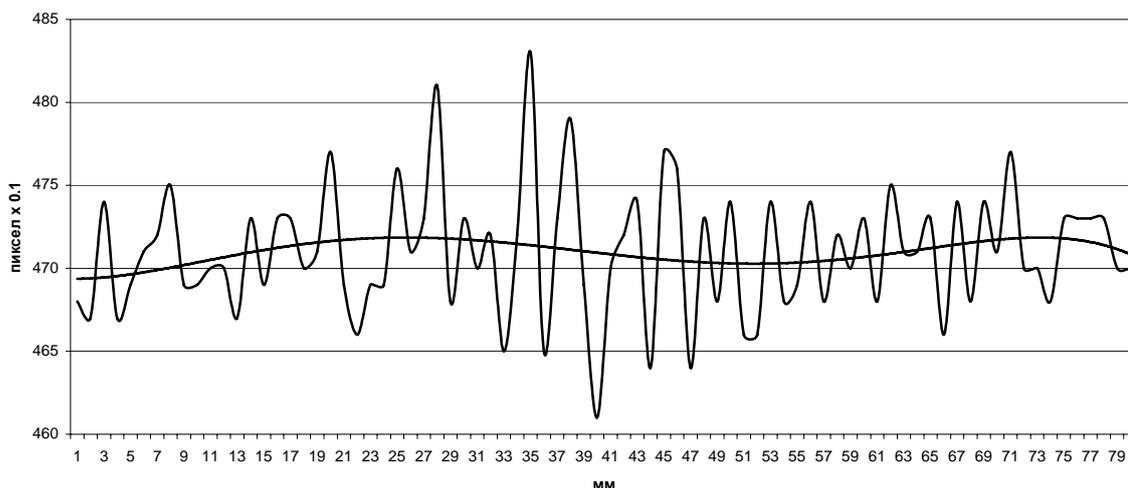


Рис. 2. Шаг сканера UMAX 1200s (px/mm) по измерениям линейки 1

отдельных элементов которой достигает 40-60 мкм (рис. 3).

Анализ результатов измерений позволил выделить две группы несанкционированных движений каретки светоприемника - смещения и перекосы, приводящие к искажениям изображения, выявляемым лишь путем позиционных измерений его отдельных элементов. Не останавливаясь на подробном анализе процессов формирования погрешностей, перечислим основные из них, укажем на их источники, приведем оценки величин.

1. Погрешности в координате X:

- 1.1. Непрямолинейность или прогиб направляющей в вертикальной плоскости, $|\Delta z| < 30$ мкм; следствие - наклон ПЗС-линейки относительно плоскости сканируемой пластинки на угол $\psi \approx \Delta z/L$, погрешность $\Delta x \approx h\psi$. При длине линейки $L \approx 220$ мм и расстоянии от пластинки до призмы $h \approx 45$ мм $\psi < 30''$, $\Delta x < 6$ мкм.
- 1.2. Непрямолинейность направляющей в горизонтальной плоскости на величину Δx ; следствие - смещение линейки на Δx , $|\Delta x|_{\max} < 10 \div 30$ мкм.
- 1.3. Эксцентриситет ведомого ролика на свободном конце каретки светоприемника. Эффект тот же, что в 1.1.
- 1.4. Дисторсия объектива - $|\Delta x|_{\max} < 30 \div 40$ мкм (рис. 4)

Этим, в основном, ограничивается перечень причин, приводящих к искажению изображений вдоль координаты X. Поскольку развертка изображения по X выполняется ПЗС-линейкой, характерной погрешностью является смещение строки в целом, без изменения взаимных положений отдельных ее элементов. Иначе обстоит дело с

механической разверткой, порождающей Y-искажения, связанные с перекосами каретки в процессе ее перемещения и ошибками позиционирования.

2. Погрешности в координате Y:

- 2.1. Непрямолинейность направляющей в горизонтальной плоскости на величину $\Delta x_b < 10 \div 30$ мкм при расстоянии между ведущими втулками $b \approx 150$ мм создает перекося линейки на угол $\varphi \approx \Delta x_b/b$, $\varphi < 60$, $\Delta y \approx x\varphi$, $|\Delta y|_{\max} < 3 \div 10$ мкм. Величина погрешностей возрастает с удалением от оси направляющей.
- 2.2. Наибольший вклад в суммарную погрешность Δy обеспечивают люфты втулок, приводящие к еще большему перекоосу линейки, чем описано в п. 2.1: по непосредственным измерениям с помощью микрометрического индикатора ошибки в зоне высоких значений X достигают величины 25 и более микрон.
- 2.3. Ошибки позиционирования (каретка не выходит в заданное положение) связаны с люфтом шестерен силовой передачи, эксцентриситетом натяжного шкива и растяжением зубчатого ремня. Этот вид погрешностей достигает максимальных величин - $30 < |\Delta y|_{\max} < 40$ микрон - в зоне высоких значений Y, причем, по мере износа элементов механической части ситуация ухудшается.

Суммарная погрешность вдоль оси Y может достигать 60-70 мкм! (рис. 3.)

Приведенные значения ошибок позиционных измерений астрофотографий на сканере, правильнее говоря, измерений изображений, искаженных в процессе сканирования, согласуются с оценками,

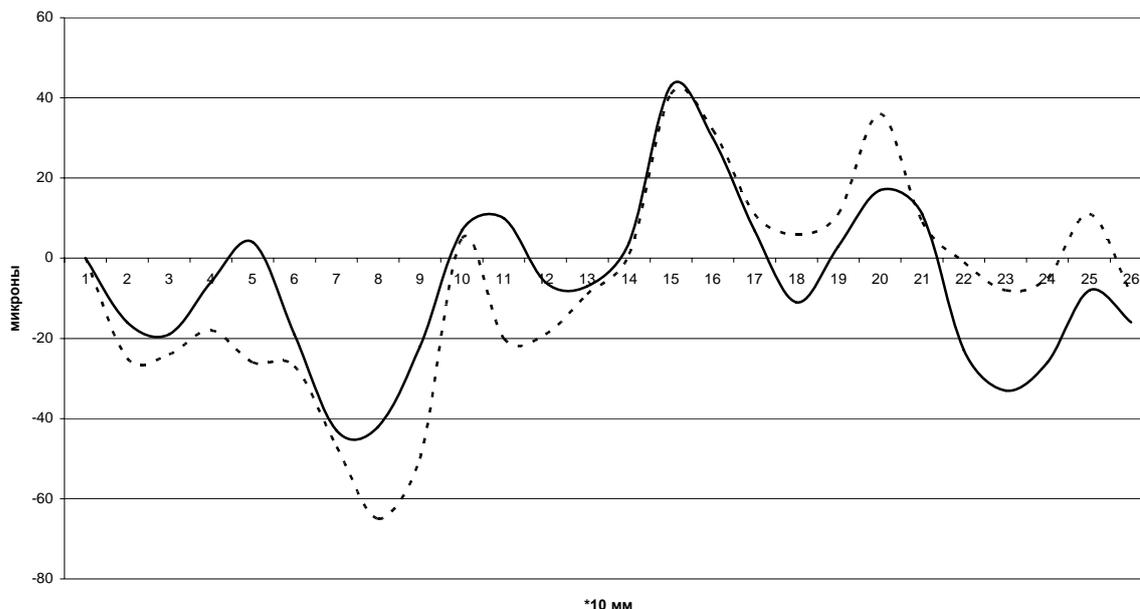


Рис. 3. Ошибки отсчетов сканера UMAX 1200s вдоль оси Y относительно линеек 1, 2

полученными другими авторами и по иным методикам [1,5].

Попытки применения сканеров для оцифровки астрофотографий предпринимаются с момента появления самих сканеров. Для получения предварительных координат объектов на фотопластинках в Пулковке в середине 90-х годов применялся даже ручной сканер. Несмотря на быстрый прогресс в области сканирующих устройств и успешное применение сканера для решения узкого класса задач астрометрии [1], эта техника при наличии в ГАО измерительной машины "Фантазия" рассматривалась и применялась нами лишь как вспомогательное оборудование. Однако растущий интерес к возможности использования сканеров в непрофильной для них сфере - создания электронных астрометрических коллекций [5] - побудил нас, используя накопленный опыт в области оцифровки фотоматериала и имеющуюся прецизионную установку - АИК "Фантазия", предложить дешевый и, надеемся, эффективный вариант дооснащения сканера и превращения его в измерительный прибор с высокими метрологическими свойствами.

Казалось бы, при современном развитии технологий в электронике и микромеханике, наличии миниатюрных датчиков положения поставленная задача легко выполнима, и это действительно так, если не принимать во внимание стоимость датчиков (К\$ 1-3), превышающую стоимость самого сканера. Предлагаемое дешевое решение опирается на применение шкал специальной разметки, превращенных в высокоточный инструмент путем предварительного исследования и сертификации их с использованием дорогих прецизионных датчиков.

2.3 Источники помех на изображениях

Здесь нелишне будет упомянуть о наиболее часто встречающихся помехах на изображениях. Их источниками, как правило, являются царапины, ворс, пылинки на поверхностях предметных стекол сканера и адаптера, и, самое неприятное и трудноудаляемое, - частицы истираемых деталей сканера, которые случайным образом перемещаются по внутренней поверхности предметных стекол под действием электризации, вызываемой работой сканера. Наилучшим решением проблемы помех окажется, по-видимому, изъятие из сканера предметных стекол и замена их на кассету для крепления фотопластины со стороны нижней части устройства. Таким образом, из шести поверхностей, подверженных загрязнению, останутся две - стекло и эмульсия самой фотопластины.

2.4 Разметка шкалы

Проблемы, связанные с использованием планшетных сканеров для астрометрических работ, и методы их решения известны. Это, во-первых, столетней давности метод измерения с помощью однокоординатных приборов, когда выполняется двукратное сканирование фотопластины с поворотом ее на 90 градусов с объединением результатов измерения вдоль точной оси в последующей обработке и, во-вторых, метод замешивания в исходное изображение эталонных маркеров, положение которых известно с высокой точностью, и в систему которых редуцируются результаты измерения исследуемого материала. Оба эти метода исследованы в работе [1]. Хотя применение указанных методов при

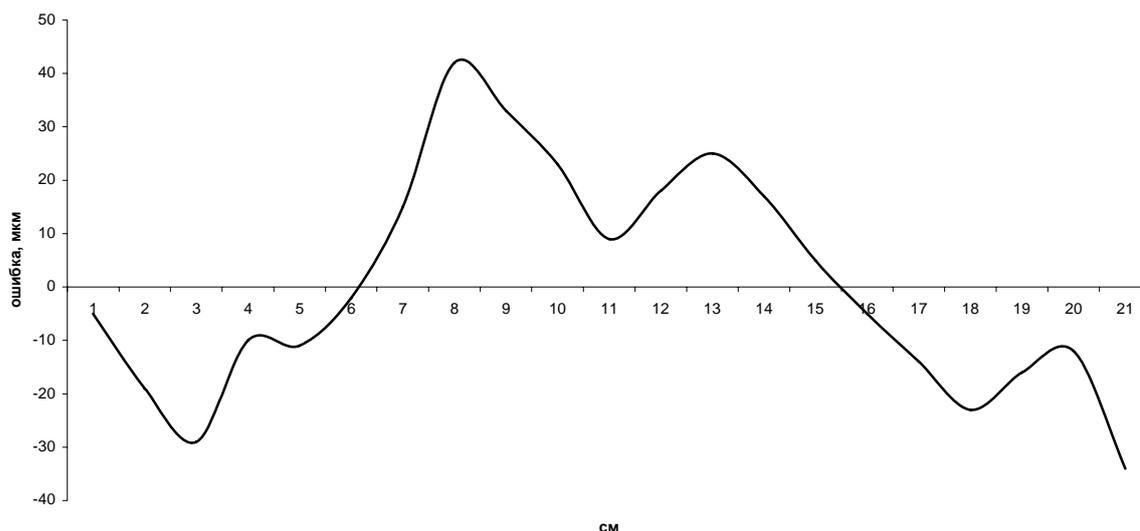


Рис. 4. Дисторсия объектива сканера UMAX 2400s относительно линейки 1

непосредственном измерении фотопластинок приводит к удовлетворительным результатам - позиционная ошибка составляет 1.5-3 мкм [1], они непригодны для формирования цифровых коллекций, поскольку первый из них требует удвоенного объема памяти для хранения, а второй - из-за наличия посторонних включений (маркеров) в исходное изображение, могущих перекрыть важные детали последнего. Кроме того, при сложном распределении позиционной ошибки, иллюстрируемом графиками (рис. 1-4), вряд ли возможно решить задачу аппроксимации поля ошибок посредством ограниченного числа маркеров.

Предлагаемый нами третий метод основывается на применении трех эталонных шкал (рис. 5), две из которых располагаются вдоль оси Y по краям исследуемого изображения, третья - вдоль X над или под изображением и сканируются вместе с ним.

Это, по сути, является расширенным вариантом второго из перечисленных подходов, но представляется более эффективным и лишенным недостатков предшественника, а именно: позволяет непосредственно измерять погрешности для каждого скана в отдельности, т.е. не редуцировать измерения по ограниченному числу опорных маркеров, а компенсировать искажения изображения с высокой степенью детализации, прямо вычисляя позиционные поправки для каждого из элементов изображения. При этом принимается допущение, что ПЗС-линейка является твердотельной, неизгибаемой, положение ее пикселей остается неизменным относительно основы, искажения, порождаемые оптической системой светоприемника постоянны, что на

микронном уровне точности является справедливым.

Шкалы изготавливаются на стеклянной основе путем нанесения штрихов с использованием фотолитографической технологии. Минимальный размер элементов изображения может составлять единицы микрон при точности позиционирования 0,2-0,5 мкм. Однако для работы на сканерах с разрешением 1200-2400 dpi, т.е. при размере элементов изображения 20-10 мкм, ширина штрихов и сплошной линии шкалы (рис. 5) была выбрана, во избежание субпиксельных эффектов, 30 и 50 мкм соответственно, точность позиционирования - единицы микрон.

2.5 Сертификация шкалы

Изготовленные шкалы сертифицируются на АИК "Фантазия" путем высокоточных измерений положения наклонных штрихов и сплошной линии (направляющей). Для каждой из шкал составляется электронный паспорт, представляющий собой файл, содержащий поправки направляющей за непрямолинейность, координаты положения штрихов относительно направляющей, координаты особых точек - помех, дефектов, утолщений, разрывов штрихов и линий. Паспорта шкал используется программой коррекции оцифрованного изображения.

2.6 Применение шкал

Шкалы укладываются параллельно краям фотопластинки с достаточно свободными допусками. Разность нуль-пунктов шкал и отклонение их от направления осей определяются и компенсируются программой в процессе обработки. Фотопластинка сканируется вместе со шкалами и

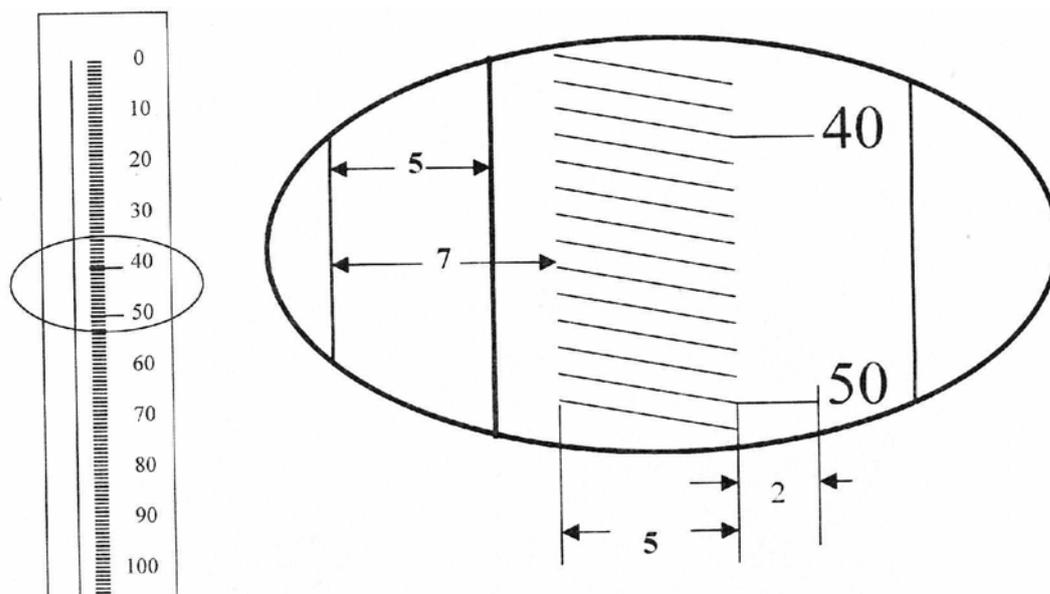


Рис. 5. Схема разметки эталонной шкалы для сканера

составляет с ними единое цифровое изображение. Корректировка изображений на основе измерения шкал осуществляется либо непосредственно при позиционных измерениях объектов, либо на этапе подготовки изображения к измерениям с получением его исправленного варианта.

2.7 Результаты измерений

Тестирование метода с применением шкал выполнялось на серии из шести пластинок с рассеянным скоплением NGC 6866. Размеры поля – 120x120 мм, число звезд 2.8-4.5 тысячи. Измерялись изображения, оцифрованные на АИК «Фантазия» (с разрешением 8820 dpi, точность позиционирования – 0.1 мкм) и на сканере UMAX-2400 (2400 dpi, без позиционных измерений). Ошибка пластинки (сканер относительно «Фантазии») – стандартное отклонение для всех звезд на пластинке – $11 < \sigma_x < 20$ мкм, $17 < \sigma_y < 23$ мкм без коррекции линейками, $1.2 < \sigma_x < 2.7$ мкм, $1.4 < \sigma_y < 3.4$ мкм после коррекции. Заметим, что в эти значения входят и ошибки алгоритма измерения, ошибки за качество изображения и др.

3. Заключение

В работе освещены вопросы, поднимавшиеся в процессе обсуждения выполняемых и планируемых мероприятий по созданию электронных копий стеклотек астрономических обсерваторий России. Использование предлагаемых шкал позволит превратить сканер в высокоточный измерительный прибор и сохранить астрометрическое качество оцифровываемых фотографических наблюдений прошлых эпох.

Литература

[1] Измайлов И.С. Применение сканера общего назначения для позиционных измерений

астрофотографий. - Изв. ГАО РАН, 214, СПб, 2000. С. 533-545.

- [2] Конференция «Виртуальная обсерватория: научные проблемы и методы их решения», 10-11 апреля 2006 г. Институт астрономии РАН, г. Москва
http://www.inasan.ru/rus/conferences/rvo_0406/index.html
- [3] Поляков Е.В., Герасимов А.Г., Пикин Ю.Д., Савастеня А.В., Соколов А.В. Координатно-измерительная машина "Фантазия" для автоматического измерения положений звезд на астронегативах. - ж. "Измерительная техника", № 3, М., 1994, с. 9-11
- [4] Поляков Е.В., Канаева Н.Г., Канаев И.И., Пугач Т.Н. Электронная коллекция изображений из Пулковской стеклотеки. - Труды RCDL-2002, Дубна, 2002, с. 251-262
- [5] Barbieri C. et al. Digitization and Scientific Exploitation of the Italian and Vatican Astronomical Plate Archives. Experimental Astronomy, vol. 15, No.1, 2003, pp. 29-43, Kluwer Academic Publishers logo.
www.skyarchive.org/recent_pub/barbieri_EA.pdf
- [6] Pier J.R. and Monet D.G. The USNO Precision Measuring Microdensitometer Project to Measure the Two Epoch Plate Sets of the Palomar Observatory Sky Survey. - Workshop on Databases for Galactic Structure A.G.D Philip, B.Hauck and A.I Upgren, eds, p. 161-166, 1993, L. Davis Press.
- [7] Pratt N.M. The COSMOS Measuring Machine. - Vistas in Astronomy, 1977, Vol. 21, pp. 1-42. Pergamon Press.
- [8] Pratt N.M. The Performance of GALAXY. - Automation in Optical Astrophysics, The proc.of Colloquium No. 11 of the IAU, Edinburgh, 1970, p.109-118.
- [9] Safeguarding the information in photographic observations, Resolution B3, XXIVth IAU GA, 2000.

High-Precision Scanning for Digital Astronomical Collections

Poliakow E.V., Fedotova L.A.

Digitization of astrographic plates of an astrometric series made by use of scanners does not preserve high metrological characteristics of the read-out information due to construction features of these devices. The proposed special measuring scale rulers allow to transform a scanner into the high-precision measuring device.