

ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК УГЛА ПОЛОЖЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕЛЕСКОПА ЗА-320М ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

© 2008 г. А. В. Девяткин, канд. физ.-мат. наук; И. А. Верещагина; А. П. Кулиш; А. В. Шумахер; В. В. Куприянов; А. С. Бехтева

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

E-mail: ver-iraida@yandex.ru, adev@gao.spb.ru

Излагается принцип работы видеоотсчетного устройства, предназначенного для автоматического наведения трубы телескопа на заданный объект. Приводится оптическая схема данного устройства, а также подробно описывается алгоритм, позволяющий по оптическим изображениям координатных шкал, получаемых с видеоотсчетного устройства в режиме реального времени, восстанавливать цифровой отсчет. Данная работа является одним из главных этапов полной автоматизации процесса астрономических наблюдений на одном из телескопов Пулковской обсерватории, которая крайне необходима для решения астрономических задач на современном уровне.

Коды OCIS: 230.0230, 100.0100, 100.2960.

Поступила в редакцию 17.07.2007.

1. Введение

Современные телескопы нового поколения, как правило, являются частично или полностью автоматизированными. Они способны сами по заданной программе регистрировать небесные объекты, при этом процесс регистрации происходит с минимальным участием или вообще без участия человека. Однако огромное количество телескопов предыдущего поколения, требующих наводки вручную, по-прежнему находится в строю, причем эти инструменты часто по своим техническим характеристикам превосходят новые. К их числу относится зеркальный астрограф ЗА-320М Пулковской обсерватории. Данный телескоп был введен в строй в 1997 году [1] и имеет следующие параметры: оптическая схема Кассегрен, диаметр главного зеркала 320 мм, фокусное расстояние 3200 мм. Инструмент оснащен ПЗС-камерой, позволяющей получать изображения звезд до 19 звездной величины. Более детально о конструкции телескопа данного типа можно прочитать, например, в [2, 3].

Тем не менее, автоматизация процесса астрономических наблюдений на инструментах старого образца была бы очень желательной, так как это позволило бы повысить производительность труда в десятки раз. Имея в своем распоряжении автоматизированный телескоп, можно значительно увеличить количество наблюдаемых объектов за одну ночь, а также число решаемых с помощью данного инструмента научных задач. Поэтому было решено осуществить полную автоматизацию процесса наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320М.

Главной проблемой на пути к достижению данной цели явилось то, что данный телескоп, как и

все инструменты старого поколения, для наведения трубы на объект по двум небесным координатам – часовому углу (t) и склонению (δ) – использует штатные круги, точность которых не соответствует точности, требуемой для решения астрономических задач на современном уровне. Поэтому возникла необходимость в оснащении телескопа дополнительными оптическими устройствами, названными видеоотсчетными. Данные устройства дают возможность процесс наведения трубы телескопа на объект осуществлять в автоматическом режиме. Создание такой системы наведения явилось первым шагом на пути к автоматизации процесса наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320М.

2. Оптическая схема видеоотсчетного устройства

Общий вид зеркального астрографа ЗА-320М приведен на рис. 1, где 1 – главная колонна телескопа, 2 и 4 – оси часового угла и склонения соответственно, 6 – противовес, 3 и 5 – созданные нами видеоотсчетные устройства для двух осей – часового угла и склонения. Данные устройства для обеих осей являются идентичными.

Оптическая схема видеоотсчетного устройства приведена на рис. 2. Состоит она из четырех элементов: осветителя 1, стеклянного лимба 2, микрообъектива 3, ПЗС-камеры 4. Стеклянный лимб от теодолита предназначен для более точного наведения трубы телескопа на объект. Если штатные круги обеспечивают точность наведения до 3' [2], то здесь мы имеем дело с точностью, которая может быть доведена до сотых долей угловой секунды, как это делалось в меридианной астрометрии, когда

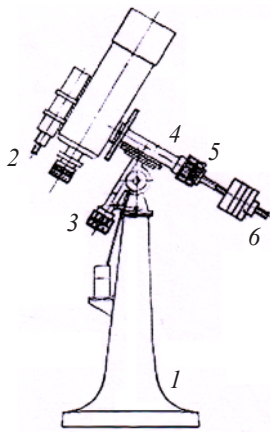


Рис. 1. Общий вид телескопа ЗА-320м. Пояснения см. в тексте.

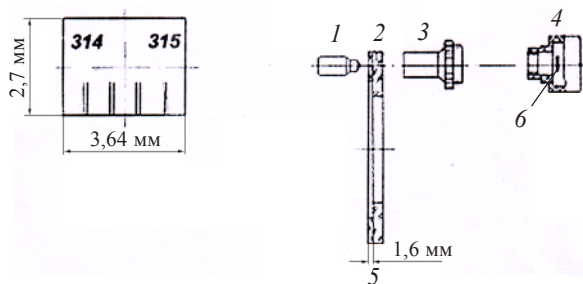


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема видео-отсчетного устройства. Пояснения см. в тексте.

применялись более крупные по размерам лимбы, ошибки штрихов которых исследовались и определялись в [14].

Лимб имеет оцифровку через 1° и двойные штрихи через каждые $20'$. На рис. 2 слева схематически показано типичное изображение участка лимба в поле зрения ПЗС-камеры. Лимб жестко посажен на ось телескопа. Система осветитель–микрообъектив–ПЗС-камера является отсчетной системой. Она закреплена на общем держателе, который, в свою очередь, жестко связан с неподвижным корпусом соответствующей оси телескопа. Элементы отсчетного устройства соосны. Оптическая ось этой системы параллельна оси вращения лимба и перпендикулярна его плоскости.

Осветитель 1 подсвечивает на лимбе 2 участок со штрихами, элемент которого размером $1,3 \times 1,1$ мм (пять промежутков между штрихами) проецируется микрообъективом 3 с увеличением $2,8\times$ в плоскость ПЗС-матрицы 4. Осветитель имеет установочные подвижки вдоль оптической оси в пределах $\pm 1,5$ мм. Контроль равномерности освещения проводится визуально по изображению на дисплее компьютера. Микрообъектив 3 имеет фокусирующую

подвижку вдоль оптической оси относительно плоскости изображения в пределах ± 2 мм от номинала с точностью 0,1 мм. Вместе с тем, он, как единое целое с ПЗС-камерой, имеет подвижки вдоль оптической оси в пределах ± 2 мм для обеспечения резкого изображения шкалы лимба на ПЗС-матрице и юстировочные подвижки поперек и вдоль радиуса лимба для установки расчетного расстояния. ПЗС-камера 4 имеет свои повороты вокруг оптической оси микрообъектива для установки изображения штрихов лимба параллельно столбцам матрицы. Контроль этих юстировочных подвижек осуществляется визуально по изображениям на дисплее компьютера.

Цифрами 5 и 6 на рисунке 2 обозначены плоскости штрихов лимба и изображения соответственно.

3. Определение положения трубы телескопа

Текущее положение трубы телескопа определяется с помощью изображений с двух лимбов – часового угла и склонения. Для осуществления процесса наведения трубы телескопа на заданный объект в автоматическом режиме необходимо автоматически распознавать цифровые отсчеты на данных изображениях. Для этого изображение с ПЗС-матрицы захватывается с помощью видеодрайверов в режиме реального времени и передается на вход компьютерной программы в виде графических файлов в стандартном формате. Таким образом, задача сводится к получению цифрового отсчета с графического изображения шкалы лимба.

Следует отметить, что задача распознавания образов не является новой. В настоящее время существует немало различных программ, позволяющих распознавать изображения [4–13]. К числу самых известных из них относится, например, Fine Reader – очень популярная программа для распознавания букв и цифр на графическом изображении. В последнее время особенно активно развивается способ решения данной задачи с помощью нейронных сетей [6–13]. Однако попытка применить уже существующие программы к нашей задаче оказалась неудачной. Дело в том, что во всех существующих в доступном виде программных пакетах, предназначенных для распознавания образов, делается упор на универсальность: решается общая задача определения и распознавания символа вплоть до принадлежности букв к разным алфавитам. Разумеется, универсальность достигается за счет программных ресурсов. А в нашем случае требуется простое, быстродействующее приложение, поскольку речь идет о работе в реальном времени и от скорости работы программы зависит скорость наведения те-

лескопа на объект. Кроме того, в наших графических изображениях есть своя специфика. Нам надо не только распознать цифры на кадре, но и штрихи, соответствующие минутам и секундам дуги, а также положение этих штрихов относительно цифрового отсчета. Поэтому было решено создать специальный алгоритм, решающий данную задачу с учетом ее специфики.

Наша задача усложняется тем, что изображения с лимбов могут иметь различного рода оптические искажения, учесть которые в общем виде достаточно проблематично. Например, как видно из рис. 3, каждое изображение имеет довольно сложный “фон”, т. е. детали, которые присутствуют на всех изображениях данного лимба. Кроме того, изображения цифр (целой части отсчета) искажаются оптическими аберрациями, вследствие которых одни и те же цифры на разных кадрах выглядят по-разному, что наглядно продемонстрировано на рис. 4. Задача также сильно усложняется тем, что расстояния между штрихами, т. е. делениями, соответствующими дробной части отсчета, искажаются оптической дисторсией, что видно из графика, приведенного на рис. 5 для одного из лимбов. Но самой большой проблемой является то, что кроме общих деталей фона, присутствующих на всех изображениях, каждое отдельное изображение может иметь свои детали, так называемые “пятна” (stains), которые могут возникать в любой его части и таким образом закрывать собой часть штрихов или цифр. Безусловно, качество графических изображений за-

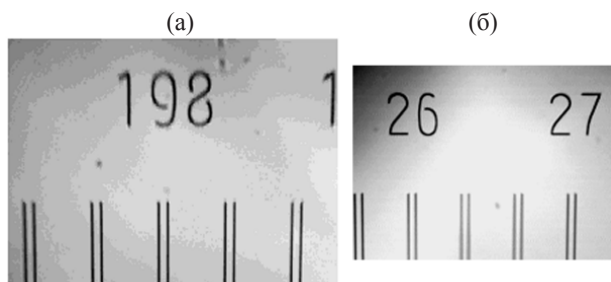


Рис. 3. Типичные изображения координатных шкал лимбов t (а) и δ (б).



Рис. 4. Цифра 1 на разных изображениях лимба t .

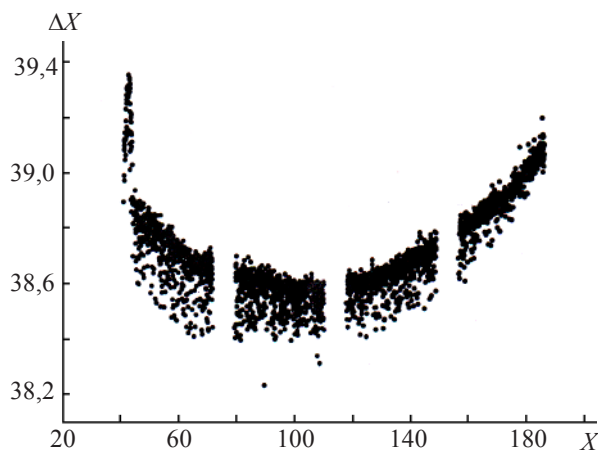


Рис. 5. Неоднородность расстояний между штрихами для лимба δ в пределах кадра (дисторсия). По горизонтальной оси отложена ширина кадра в пикселах (X), а по вертикальной – расстояние между каждой парой штрихов также в пикселах (ΔX).

висит от качества оптической системы, с помощью которой они получают. Но даже самая совершенная оптическая система не застрахована от подобных искажений. Кроме того, при работе в реальных условиях прибор может загрязняться со временем, а также могут возникать оптические деформации под воздействием температурных изменений, которые в нашем климате весьма существенны. Поэтому полезно иметь алгоритм, который будет учитывать все эти возможные искажения при распознавании отсчета.

3.1. Предварительная обработка изображений

Задача учета общих деталей (фона) изображений была решена следующим образом. Для начала для каждого лимба было получено несколько изображений, которые назвали “шаблонными”. По этим изображениям вычислялось медианное значение интенсивностей света для каждого пиксела с координатами i, j . Вычисление именно медианного, а не среднего значения по всем основным “шаблонам” позволило исключить случайные флуктуации интенсивности в данной точке i, j на отдельных шаблонах. В результате была получена общая для всех шаблонов карта фона, которая должна устраняться при обработке каждого кадра в рабочем режиме и тем самым обеспечивать избавление изображения от ненужных деталей.

Для устранения индивидуальных пятен и неоднородностей фона, присущих только данному кадру, было введено пороговое значение интенсивности света $F = I_{\min} + 0,72(I_{\max} - I_{\min})$, где I_{\max} и I_{\min} – соот-

ветственно максимальное и минимальное значения интенсивности изображения с устраненной неоднородностью фона. Коэффициент 0,72 был определен эмпирически, значение его зависит главным образом от степени зашумленности и контрастности изображений. Завышенное значение порогового уровня приведет к большей зашумленности изображения и, тем самым, к дополнительным трудностям при распознавании цифр; наоборот, при заниженном его значении возможно пропадание отдельных участков цифр или штрихов, или даже целых цифр, имеющих низкую контрастность по отношению к фону. Сигналом, т. е. информативной частью изображения, считаются пиксели, имеющие интенсивность $I_{ij} < F$. Им сопоставляется черный цвет, а пикселям ярче F – белый. Таким образом, изображение переводится в двоичный формат. Это необходимо было сделать для облегчения реализации описанного ниже алгоритма очищения изображения от пятен.

Для этого рассматривались имеющиеся “шаблонные” изображения и выбирались из них несколько “идеальных”, т. е. не имеющих никаких дополнительных пятен, кроме общего фона. Это делалось для того, чтобы с помощью таких “идеальных” шаблонов вычислить средние значения, характеризующие цифры и штрихи, а именно высоту штриха и цифры, расстояние между ними, их ширину. Эти средние характеристики используются в качестве основных критериев отделения пятна от цифры или штриха. Для каждого обрабатываемого изображения определяются области локализации черных пикселей, которые поочередно сравниваются со средними характеристиками цифры и штриха. Пятном считается то, что резко отличается хотя бы по одной из этих характеристик от среднего. Такое пятно “удаляется”, т. е. всем его пикселям присваивается белый (фоновый) цвет. Соответственно, то, что не подпадает под этот критерий, считается цифрой или штрихом.

Наиболее сложной задачей в данной процедуре и во всей рассматриваемой задаче вообще является определение требуемой степени отличия от средней характеристики, поскольку, в силу, например, геометрических искажений, обусловленных оптикой видеокамер, высота и ширина цифр на разных кадрах может заметно различаться. Для определения приемлемого критерия, наряду со средними характеристиками h , были вычислены также оценки максимальных отклонений от этих средних значений σ_h . Тогда если среднее значение некоторой характеристики цифры равно h , то соответствующую характеристику рассматриваемого пятна h следует сравнивать с величиной $(h + \sigma_h)$, если мы хотим убедиться, что величина h не больше среднего,

с величиной $(h - \sigma_h)$ для выяснения того, что величина h не меньше соответствующего среднего.

3.2. Определение целой части отсчета (градусы)

После того как изображение очищено от возможных пятен, отождествляется целая часть отсчета (число градусов от 0 до 359), т. е. рассматривается верхняя часть изображения. Для этого берутся оставшиеся после удаления пятен группы черных пикселей (считается, что все они представляют собой цифры) и вычисляются расстояния между ними по горизонтали. Если это расстояние оказывается меньше 15% общей ширины кадра (величина, подобранная эмпирически), то такие две цифры объединяются в одну группу, т. е. в число.

Если групп цифр (чисел) на изображении оказывается более одного, то из них выбирается ближайшее к центру изображения по горизонтали. Одновременно вычисляется координата середины этого числа, которая потребуется в дальнейшем для определения дробной части отсчета.

Распознавание числа реализовано методом сравнения с шаблонами. При этом число, которое требуется отождествить, разбивается на отдельные цифры, из которых оно состоит, и каждая цифра сравнивается со всеми шаблонами цифр от 0 до 9. Шаблоны для цифр были получены из шаблонных изображений путем разбивки их на отдельные цифры. При этом для каждой цифры мы имеем несколько шаблонов и каждый раз сравниваем со всей совокупностью шаблонов для каждой цифры, т. е. используем статистический подход. Таким образом, в настоящем алгоритме каждая отдельная цифра отождествляемого числа поочередно сравнивается со всеми имеющимися шаблонами 0, затем со всеми шаблонами 1 и т. д. до 9 и вычисляется доля совпадений с каждой из этих серий шаблонов. Окончательно выбирается та цифра, для которой эта доля оказалась наибольшей. Такой подход, как показывает опыт, полностью исключает влияние шумовых и геометрических искажений отдельных цифр (рис. 4). Разбивка же числа на отдельные цифры необходима для того, чтобы избежать возникновения ошибок отождествления вследствие оптических искажений, которые приводят к тому, что расстояния между отдельными цифрами в числе на разных изображениях могут заметно отличаться друг от друга.

Остановимся подробнее на методе сравнения двоичного изображения цифры с отдельным шаблоном. Прежде всего изображение цифры и шаблона приводятся к одинаковому размеру уменьшением большего из этих двух изображений. Делается это для того, чтобы избежать дополнительных

ошибок, связанных с несовпадением размеров в результате геометрических искажений. Также здесь реализована возможность пересчета изображения на другое разрешение (resampling). В данном конкретном случае с ЗА-320М это не используется, так как не дает существенных улучшений, но возможно, что для других оптических систем это окажется полезным. Также вводится критерий ширины: сравниваются только те цифры, для которых разность их ширин не превышает одну треть от ширины большей из цифр. Делается это для повышения быстродействия алгоритма, поскольку, например, цифра “1” по ширине почти в два раза меньше всех остальных и нет никакой необходимости сравнивать ее с другими. Для сравнения используется следующий эвристический прием, направленный также на уменьшение влияния шума. Каждая цифра делится на 4 части (мозаикой), и эти части сравниваются между собой по отдельности. Сравнение происходит по всем пикселям: и черным (информационным), и белым (фоновым). Если общее количество совпадающих пикселей в одной из частей меньше 75%, то число совпадений по данному фрагменту считается нулевым. Иными словами, при слишком большом попиксельном различии фрагментов считается, что “форма” цифр в этих фрагментах разная и данный фрагмент можно полностью исключить из рассмотрения. Наоборот, если число совпадений превышает 95%, оно устанавливается равным 100%, т. е. считается, что “форма” фрагментов одинаковая и приоритет данного шаблона следует увеличить. Окончательно подсчитывается общее число (в процентах) вычисленных таким образом совпадений по всем четырем фрагментам.

Таким образом, в результате последовательного отождествления описанным способом отдельных цифр (если их больше одной) получается искомое число, соответствующее целой части отсчета.

3.3. Определение дробной части отсчета (минут и секунд)

Последним этапом данной процедуры является отождествление дробной части отсчета. Для этого обрабатывается нижняя половина кадра, содержащая вертикальные штрихи. В случае лимбов, используемых на ЗА-320М, как уже упоминалось выше, штрихи нанесены парами с шагом 20', точному значению дробной части отсчета (0', 20', 40') отвечает середина соответствующей пары штрихов (рис. 3).

Прежде всего путем сканирования изображения и выделения областей черных пикселей по горизонтали определяется общее количество штрихов, оставшихся после процедуры удаления пятен. По-

скольку штрихи на изображении расположены парами, прежде всего необходимо вычислить усредненные горизонтальные координаты их середин, “точная” пиксельная координата соответствующего отсчета тогда вычисляется как среднее арифметическое от координат пары штрихов. Координатой отдельного штриха считается усредненная по вертикали вдоль всего штриха X -координата центра тяжести, рассчитанная по всей ширине штриха с некоторым отступом δ_x . При этом используются значения интенсивности, полученные из исходного изображения в градациях серого, а не двоичного (черно-белого) кадра.

$$X = \left(\sum_{y=y_1}^{y_2} X_y \right) / (y_2 - y_1 + 1), \quad (1)$$

где y_1 и y_2 – соответственно нижняя и верхняя границы штриха, а X -координата центра тяжести для данного y

$$X_y = \left(\sum_{x=x_1-\delta_x}^{x_2+\delta_x} x \hat{J}_{xy} \right) / \left(\sum_{x=x_1-\delta_x}^{x_2+\delta_x} \hat{J}_{xy} \right), \quad (2)$$

где x_1 и x_2 – левая и правая границы штриха, а \hat{J}_{xy} – значение смещенной интенсивности негатива исходного изображения $\hat{J}_{xy} = J_{xy} - \min_{x_1-\delta_x \leq x \leq x_2+\delta_x} J_{xy}$, причем $J_{xy} = 1 - I_{xy}$, $I_{xy} \in [0, 1]$ – нормированная интенсивность пикселя с координатами (x, y) на исходном кадре.

Таким образом, горизонтальная пиксельная координата любого из точных отсчетов (0', 20', 40') на изображении вычисляется как среднее арифметическое величин X для соответствующей пары штрихов.

В результате описанной выше процедуры получается набор пиксельных x -координат X_i , $i = 1, \dots, n$, соответствующих отсчетам лимба, кратным 20'. Затем определяется номер k -го “опорного” отсчета, ближайшего слева к середине кадра, и ищется отсчет, ближайший к положению центра числа (он соответствует 0', т. е. целому градусу). Таким образом, определяется абсолютное значение опорного отсчета на лимбе α_0 и, тем самым, интервал $[\alpha_0, \alpha_0 + 20']$, в котором находится значение искомого отсчета лимба α , соответствующее абсолютному положению на лимбе середины кадра. При этом, по ориентировочному расстоянию (в пикселях) между последовательными парами штрихов, учитывается, что из-за наличия пятен часть 20'-ных меток между этими двумя могла не отождествиться.

Последним этапом алгоритма является вычисление положения середины кадра (в секундах дуги)

внутри найденного интервала $[\alpha_0, \alpha_0 + 20']$. Как уже упоминалось (рис. 5), данная задача осложняется тем, что горизонтальный угловой масштаб изображения $\partial\alpha/\partial x$ является неоднородным в пределах кадра, т. е. зависит от координаты x . Вследствие этого, расстояние в пикселах между последовательными $20'$ -ными метками $\Delta X_i = X_{i+1} - X_i$, $i = 1, \dots, n - 1$, оказывается переменным.

Для корректного учета неоднородности масштаба зависимость $\Delta X_i(X_i)$ интерполируется полиномом $\Delta X(x)$ степени $n - 2$. В предположении достаточно гладкой вариации углового масштаба в пределах кадра данный полином можно считать аппроксимацией зависимости углового масштаба $\partial\alpha/\partial x$ от координаты x . Поскольку угловое расстояние между точками X_k и X_{k+1} составляет $20'$, окончательно получаем выражение для искомого отсчета лимба

$$\alpha = \alpha_0 + 20 \left(\int_{X_k}^{X_c} \Delta X(x) dx \right) / \left(\int_{X_k}^{X_{k+1}} \Delta X(x) dx \right), \quad (3)$$

где X_c – x -координата середины кадра.

4. Заключение

Созданная и описанная в настоящей работе система автоматического наведения трубы зеркального астрографа ЗА-320М на заданный объект является важным этапом на пути к полной автоматизации процесса наблюдений на данном инструменте. В результате проведенной работы скорость наведения на объект увеличилась в десятки раз. Если при наведении телескопа на объект в ручном режиме иногда приходилось затрачивать до 15 мин, то теперь максимальное время, требуемое для перемещения трубы в нужное положение, составляет 0,5–3 мин.

В рамках данной работы был создан алгоритм распознавания изображений, позволяющий в автоматическом режиме определять положение трубы телескопа. Данный алгоритм предназначен для оптимального решения конкретной задачи распознавания цифрового отсчета (градус, минута, секунда) из графического изображения участка шкалы лимба. При этом он учитывает практически любые, даже самые сильные, оптические искажения. Данный алгоритм может быть применен не только для автоматического управления телескопом, но и для любой другой оптической системы, для которой может возникнуть подобного рода задача.

К настоящему моменту времени все основные этапы автоматизации процесса наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320М выполнены и данный инструмент функционирует как полностью автоматизированный телескоп современного образца. На

основе данного опыта выполняется процесс автоматизации и на других инструментах Пулковской обсерватории.

Автоматизация процесса наблюдений на данном инструменте позволила увеличить число решаемых задач, а также улучшить качество наблюдений. Так, одной из наблюдательных программ, проводимой на зеркальном астрографе ЗА-320М, является программа наблюдений за объектами, сближающимися с Землей, международная программа, в которой участвуют более 700 обсерваторий всего мира, включая крупнейшие из них, на которых используются специальные телескопы-автоматы, ориентированные только на данную программу. И среди всех этих участников мы занимаем по количеству и по качеству наблюдений 18-е место. Качество же наших наблюдений такое, что за 4 года участия в данной программе ни одно наше наблюдение не было забраковано за несоответствие требуемой точности [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бекашев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин А.В., Горшинов Д.Л., Гришук А.Н., Кулиш А.П., Свиридович А.Г., Шумакер А.В. Зеркальный астрограф ЗА-320м // Известия ГАО. 1998. № 213. С. 249–258.
2. Блажек С.Н. Курс практической астрономии. М: Наука, 1979. 439 с.
3. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М., Наука, 1976. 510 с.
4. <http://ocrai.narod.ru/demoocr.htm>
5. <http://ocrai.narod.ru/hp.html>
6. Cun Y. Le, Matan O., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D., Baird H.S. Handwritten Zipcode Recognition with Multilayer Networks // Proc. of International Conference on Pattern Recognition. Atlantic City, 1990.
7. Krzyzak W., Dai, Suen C.Y. Unconstrained Handwritten Character Classification Using Modified Backpropagation Model // Proc. 1st Int. Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition. Montreal, Canada, 1990. С. 155–166.
8. Seong-Wang Lee, Young Joon Kim. Off-line Recognition of Totally Unconstrained Handwritten Numerals Using Multilayer Cluster Neural Network // Proc. of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition. Jerusalem, Israel. 1994. С. 507–509.
9. Fukushima K. Neocognition: a hierarchical neural network capable of visual pattern recognition // Neural Networks. 1 (2). 1988. С. 119–130.
10. Knerr S., Personnaz L., Dreyfus G. Handwritten digit recognition by neural networks with single-layer training // IEEE Transactions on Neural Networks. 3. 1992. С. 962–968.

11. *Lee Y.* Handwritten digit recognition using K nearest neighbor, radial-basis function, and back-propagation neural networks // *Neural Computation* 3. 1991. С. 440–449.
 12. *Martin G.L., Pitman J.A.* Recognizing hand-printed letters and digits using backpropagation learning // *Neural Computation*. 1991. 3. P. 258–267.
 13. <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>
 14. *Подобед В.В.* Фундаментальная астрометрия. М.: Наука, 1968. 452 с.
-