

УДК 552.38

## Оперативный контроль и исследование поправок делений лимба

Р. И. Гумеров, Т. Р. Кирьян, Г. И. Пинигин

С учетом особенностей и возможностей меридианного круга с программным управлением проанализированы и предложены наиболее удобные формулы отсчета круга при условии полностью исследованного лимба. Представлена методика оперативного контроля и учета ориентировки микроскопов, основанная на детальном анализе функции разности углов между диаметрами.

Разработан метод оперативного определения поправок диаметров лимба через шесть или три градуса, наиболее пригодный для меридианных кругов с программным управлением. Посредством розетки с углом  $42^\circ$  определены поправки шестиградусных диаметров пулковского горизонтального меридианного круга (ГМК) в диапазоне температур от  $+20$  до  $-18^\circ\text{C}$ . Выявлены тенденции температурных изменений системы делений стеклянного лимба ГМК. Случайная составляющая положения диаметров равна  $\pm 0.04''$ , поправки систематической составляющей в отсчет круга не превышают  $0.1''$ .

*IMMEDIATE CONTROL AND INVESTIGATION OF LIMB DIVISION CORRECTIONS, by Gumerov R. I., Kir'yan T. R., Pinigin G. I.*—The most efficient formulae for circle reading with a well-studied limb are analysed and proposed taking into account peculiarities and capabilities of the computer controlled meridian circle. The procedure is tested and proposed for immediate control and correction of the microscope orientation. The method is based on a detailed analysis of the function of the difference of angles between the diameters. The elaborated method of an immediate determination of limb diameter corrections with a step  $6^\circ$  or  $3^\circ$  is most suitable for computer controlled meridian circles. Using a rosette with an angle  $42^\circ$  the corrections to the  $6^\circ$  diameters of the Pulkovo Horizontal Meridian Circle are determined for the temperature range from  $+20$  to  $-18^\circ$ . Tendencies of temperature variations of the glass limb divisions are detected. An accidental component of the diameters' position is  $\pm 0.04''$ . Systematic component corrections for the circle reading do not exceed  $0.1''$ .

При определении поправок всех пятиминутных делений лимба пулковского горизонтального меридианного круга (ГМК) способом, описанным в [5], использованы три розетки с углами между диаметрами  $42^\circ 00'$ ,  $33^\circ 20'$ ,  $33^\circ 45'$ . Выбирая розетку с углом  $42^\circ 00'$ , можно быстро определить шестиградусные поправки диаметров. При этом на все операции по автоматической установке круга и отсчеты микроскопов ГМК необходимо 17 мин [3]. Для оценки влияния наклона микроскопов измерения розеток повторялись с установками, отличающимися от первоначальных на  $180^\circ$ . В результате вместо 30 установок за 3.5 оборота круга выполнено 60 установок за 7 оборотов, на что потребовалось 34 мин.

Для оценки систематической составляющей ошибок делений решались уравнения розетки с углом  $42^\circ 00'$  цепным способом при условии, что сумма поправок всех шестиградусных диаметров равна нулю. Уравнения розетки можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \Delta_0 - \Delta_{42} &= \beta_1 - \beta_{cp} = l_1, \\
 \Delta_{42} - \Delta_{84} &= \beta_2 - \beta_{cp} = l_2, \\
 &\dots \dots \dots \\
 \Delta_{96} - \Delta_{138} &= \beta_{29} - \beta_{cp} = l_{29}, \\
 \Delta_{138} - \Delta_0 &= \beta_{30} - \beta_{cp} = l_{30},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $\beta_i$  — последовательные измерения угла между диаметрами разных участков лимба;  $\Delta_k$  — поправка  $k$ -го диаметра;  $\beta_{cp} = \frac{1}{30} \sum_1^{30} \beta_i$ .

Если  $\Sigma \Delta_k = 0$ , получаем  $\Delta_0 = -(l_{30} + 29l_{29}/30 + 28l_{28}/30 + \dots + l_1/30)$  или  $\Delta_0 = l_1 + 29l_2/30 + \dots + 2l_{29}/30 + l_{30}/30$ .

В соответствии с выводами [4] периодические процессы исследуются цепным способом с минимальными искажениями. В работе [4] сделан вывод о нецелесообразности применения цепного способа при количестве звеньев более 8—12. Этот вывод справедлив лишь при оценке

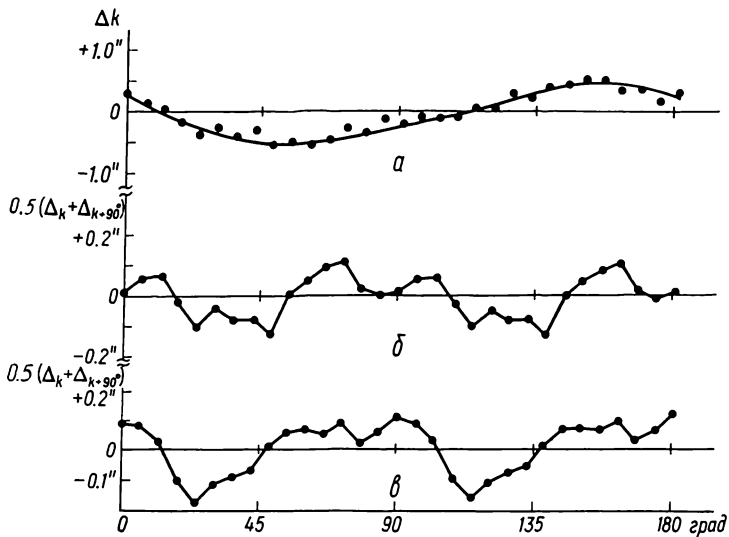


Рис. 1. Кривые поправок диаметров  $\Delta_k$  и поправок в отсчет круга  $0.5(\Delta_k + \Delta_{k+90})$

ошибки одного отсчета микроскопа ( $\pm 0.2''$ ), характерной для визуального отсчета. Современная точность отсчета круга по одному микроскопу достигает  $\pm 0.05''$  [3]. Отметим, что в этом случае количество звеньев может быть увеличено до 108—192. При методике определения поправок делений круга, использованной на ГМК, количество звеньев равно 30. Тогда при двух отсчетах круга в каждом положении, выполняемых для контроля правильности отсчета, максимальная ошибка интервала должна составлять  $\pm 0.1''$ . Малая продолжительность измерений каждой розетки позволила выполнить несколько серий измерений при одинаковых условиях, что также повышает конечную точность исследований.

Итак, решая систему уравнений вида (1), получим поправки диаметров лимба через шесть градусов. С мая 1984 г. по апрель 1985 г. выполнены измерения 18 розеток при температурах от  $+20$  до  $-18^\circ\text{C}$ . Ошибка одного определения поправки диаметра, полученная по повторным значениям в группе розеток, измеренных при одинаковых условиях, в среднем оказалась равной  $\pm 0.06''$ . Средние по четырем розеткам поправки шестиградусных диаметров, относящиеся к измерениям в октябре 1984 г. при средней температуре  $+6.1^\circ$ , показаны на рис. 1, а.

Сравнение полученных данных с результатами полного исследования, проведенного в это же время, показало их идентичность. Расхождения поправок не имели систематического хода и не превышали случайных ошибок определения (ошибка определения поправки при полном исследовании равна  $\pm 0.02''$ ).

Спектральный анализ средних систем поправок показал, что с понижением температуры мощность низкочастотных составляющих уменьшается, а высокочастотных — повышается (рис. 2). Например, при аппроксимации кривой поправок полиномом третьей степени основное отклонение составляет  $\sigma = \pm 0.085''$ , при  $t = +20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = \pm 0.152''$  при  $t = -18^\circ\text{C}$  т. е. для крайних температур  $\sigma$  увеличивается почти в два раза. Влияние данной закономерности на поправки в отсчет круга от-

ражается в основном в виде фазового сдвига без заметного изменения амплитуды.

На рис. 1 приведены кривые поправок в отсчете круга (угол между диаметрами  $90^\circ$ ) для крайних температур  $t=+20^\circ\text{C}$  (кривая б) и  $t=-18^\circ\text{C}$  (кривая в).

Для выяснения причин температурной зависимости системы поправок диаметров рассмотрены функции разности углов между диаметрами, измеренных с поворотом круга на  $180^\circ$ , т. е.  $\Delta B = \beta_\alpha - \beta_{\alpha+180}$ , где

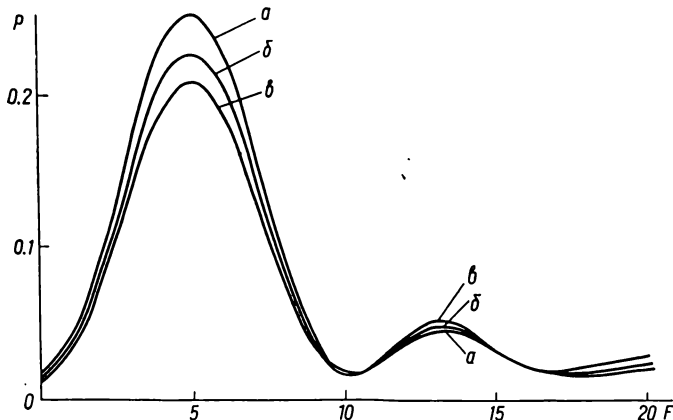


Рис. 2. Спектр поправок диаметров для различных условий измерений:  $+20^\circ\text{C}$  (а);  $-10^\circ\text{C}$  (б);  $-18^\circ\text{C}$  (в)

$\beta_\alpha$  — угол между диаметрами при установке круга  $\alpha$ . Разности  $\Delta B$  искажены влиянием углов наклона оптических осей микроскопов  $\gamma_i$  к плоскости нанесения штрихов при смещениях лимба относительно микроскопов  $\Delta L_i$  [1]. Значения  $\Delta L_i$  обычно вызваны биением лимба, т. е. неперпендикулярностью лимба к оси вращения, параллельными смещениями лимба относительно первоначального положения, отклонениями его поверхности от плоской. Как показали исследования в работах [1, 2], поверхности металлических кругов большого диаметра могут значительно уклоняться от плоских. Происходит искажение синусоидального закона изменения  $\Delta L_i$  вследствие биения лимба. Это приводит к усложнению вида функции  $\Delta B$  и искажению результатов исследований ошибок диаметров и отсчета круга по четырем микроскопам.

Современные стеклянные лимбы (значительно меньшего диаметра) характеризуются оптической точностью изготовления плоскости, на которой нанесена штриховая мера. Следовательно, можно ожидать достаточно строгого соответствия законов изменений функций  $\Delta B = 0.5h(\Delta_1 \sin \alpha - \Delta_2 \sin(\alpha + \beta))$  и  $\Delta L = h \sin \alpha$ , где  $h$  — максимальное значение биения лимба,  $\Delta_1 = \text{tg } \gamma_1 - \text{tg } \gamma_2$ ,  $\Delta_2 = \text{tg } \gamma_3 - \text{tg } \gamma_4$ ,  $\alpha$  — угол между первым микроскопом и линией пересечения плоскости круга с плоскостью, перпендикулярной к оси вращения.

В отсчет круга входит величина  $\Delta M = 0.25h(\Delta_1 \sin \alpha + \Delta_2 \sin(\alpha + \beta))$ , учитывающая влияние ориентировки микроскопов относительно круга и биение лимба. Очевидно, в этом случае можно упростить требования к юстировке микроскопов, добиваясь равенства нулю величин  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  (значит и  $\Delta M = 0$ ). При установке круга (когда  $\alpha + \beta = 0^\circ$ ) юстировкой микроскопов диаметра (1, 2) получаем  $\Delta B = 0$ ; следовательно,  $\Delta_1 = 0$ . Далее при  $\alpha = 0^\circ$  юстируем диаметр (3, 4) так, чтобы снова получить  $\Delta B = 0$ . Последнее равносильно  $\Delta_2 = 0$ . Практика применения такой методики в схеме ГМК показывает, что юстировка микроскопов может быть выполнена достаточно быстро и эффективно.

Выявляя особенности функции  $\Delta B$  в зависимости от времени, температуры, положения круга, можно получить разнообразную информацию о стабильности характеристик системы микроскоп — круг. В част-

ности, анализ функций  $\Delta B$ , полученных в диапазоне температур от  $+20^\circ$  до  $-18^\circ\text{C}$ , показал зависимость мощности высокочастотных составляющих от температуры. Это позволило предположить, что обнаруженная зависимость от температуры поправок шестиградусных диаметров может быть вызвана изменениями формы поверхности лимба и ориентировки отсчетных микроскопов с температурой. В таком случае даже при условии  $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$  четные составляющие функции  $\Delta L$  вида  $\Delta h_2 \sin 2\alpha$ ;  $\Delta h_4 \sin 4\alpha$  и т. д. исказят результаты исследования поправок диаметров.

Измерения биений лимба ГМК индикатором показало, что основными его составляющими являются  $24.6 \sin(\alpha + \varphi_1)$  и  $3.5 \sin(2\alpha + \varphi_2)$ . Эти две частоты составляют 99.5 % всей функции  $\Delta L$  (97.5 % —  $\sin \alpha$  и 2.0 % —  $\sin 2\alpha$ ). Как показала проверка, даже незначительными изменениями крепления лимба в оправе можно существенно изменить высокочастотную составляющую биения лимба. При этом амплитуда основной частоты  $\sin \alpha$  остается почти постоянной. В реальных условиях измерений при изменениях температуры от  $+20^\circ$  до  $-18^\circ\text{C}$  вполне возможны деформации стеклянного лимба в металлической оправе, которые проявляются в виде изменения биения лимба и ориентировки отсчетных микроскопов, искажающих отсчет круга.

Выводы: 1. Предлагаемый способ исследования и контроля стабильности шестиградусных делений лимба имеет высокую точность, сравнимую с точностью полного исследования. Малая трудоемкость, простота обработки подчеркивают его преимущества при массовых определениях координат небесных объектов. Представляет интерес розетка с трехградусными диаметрами (угол между диаметрами —  $33^\circ 00'$ , время измерения — 34 мин). 2. Предложенный способ оценки и контроля ориентировки отсчетных микроскопов, основанный на детальном анализе функции  $\Delta B$ , практически прост и доступен для использования на любом меридианном инструменте со стеклянными лимбами. 3. Обнаруженные температурные зависимости поправок шестиградусных диаметров связаны, вероятно, с деформацией стеклянного лимба в металлической оправе и изменениями углов наклона микроскопов. Это определяет обязательный контроль системы делений и взаимной ориентировки лимба и отсчетных микроскопов предложенными способами при длительных рядах наблюдений звезд.

Аналогичные исследования особенностей стеклянных кругов, применяющихся в качестве носителя штриховой меры на современных автоматических меридианных кругах, ведутся и за рубежом [6—8]. Как сообщалось на XIX съезде Международного астрономического союза (1985 г.), на токийском фотоэлектрическом МК также получены данные о сезонных вариациях системы делений стеклянного лимба.

1. Багильдинский Б. К. Исследование системы делений пулковского вертикального круга // Изв. Глав. астроном. обсерватории в Пулкове.— 1960.— № 166.— С. 49—82.
2. Божко И. И. Исследование меридианного круга Репсоляда в Николаеве // Там же.— 1958.— № 161.— С. 170—202.
3. Гумеров Р. И., Капков В. Б., Пинигин Г. И. Автоматический горизонтальный меридианный круг // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.— 1, № 4.— С. 86—91.
4. Немиро А. А. О точности цепного метода // Тр. 15-й астрометр. конф. СССР.— Л.: Наука, 1963.— С. 176—191.
5. Benevides-Soares P., Boczek R. Determination of division corrections // Astron. and Astrophys.— 1981.— 96, N 1.— P. 127—132.
6. Fabricius C., Helmer L., Fogh Olsen H. J. Investigation of diameter corrections of the Brorfelde transit circle // Ibid.— 1980.— 89, N 1.— P. 57—60.
7. Miyamoto M., Ishii H. A scheme for determining division corrections of a photoelectric meridian circle // Publ. Astron. Soc. Jap.— 1982.— 34, N 1.— P. 117—140.
8. Rafferty T. J., Klock B. L. Experiences with the U. S. Naval Observatory glass circles // Astron. and Astrophys.— 1982.— 114, N 1.— P. 95—101.