

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРО-ЭВМ HP-55 ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИБЛИЖЕННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

И. ФОРРАИ

Кафедра Общей Геодезии Института Геодезии, Будапештского Технического Университета
(Поступило: 31 августа 1976 г.)

Представлено проф. д-р Л. Хомороди

Введение

Во время астрономических наблюдений производится определение данных времени. Системы осей визирующих инструментов обычно азимутальные, поэтому с их помощью получаем данные в координатной системе горизонта. Они будут действительны только в том случае, если будет дано время в определенной системе измерения времени, в которое данная звезда находилась в точке небесной сферы, определяемой азимутом и зенитным углом.

Значит, одной из задач является определение момента времени наблюдаемого явления. Для этой цели необходимо устройство для определения времени — часы.

В микро-ЭВМ HP-55, производимую фирмой Юлетт—Пакард, встроен миниатюрный кварцевый генератор, частота которого вызывает изменение времени в средних секундах на дисплее. Значит HP-55 может применяться в качестве кварцевых часов для астрономических наблюдений.

1. Характеристика HP-55

HP-55 работает тремя способами. При включении кнопки *RUN* она работает так, как известная геодезистам HP-45. Обе машины по форме и по размерам одинаковые. Главная разница заключается в том, что при положении *RUN* автоматически может проводиться программа, состоящая максимум из 49 операций, которую задали раньше при среднем положении кнопки *PRGM*. Третий способ работ — при нажатии кнопки *TIMER*.

При положении *TIMER* HP-55 работает как цифровой хронометер, на котором в момент начала работы может быть установлена любая величина и который может запоминать между включением и выключением десять моментов времени. Выписывание результатов производится с точностью до 0,01 сек. Моменты времени могут откладываться в памяти при нажатии кнопок с цифрами и таким же образом могут вызываться обратно.

Хранящиеся в памяти моменты времени могут вызываться и в положении *RUN*.

HP-55 может производить сложение в шестидесятичной системе. На ней легко переводить градусы, минуты и секунды угла, или часы, минуты и секунды времени в десятые доли градуса и часа, с точностью в десять значащих цифр, и производить обратный перевод. Это очень важный момент при вычислении результатов астрономических измерений с точки зрения их точности.

2. Пределы использования TIMER

Включим TIMER синхронно последовательным и ритмическим сигналом, передающимся какой-нибудь дариостанцией в системе среднего времени. При этом возникнут следующие проблемы в связи с использованием TIMER:

1. На HP-55 между включением и выключением может храниться десять моментов времени. Степень точности прохождения через нить можно увеличивать либо применением симметричной системы нитей, либо при обычном геодезическом кресте нитей — наблюдением в нескольких фиксированных положениях трубы, отличающихся друг от друга на небольшой угол. В то же время перед каждым наблюдением и после него должен приниматься сигнал по времени и проверяться поправка часов, с помощью которых проверяется точность включения, а также ход часов. Для всего этого отложение десяти моментов времени недостаточно, и это сказывается на степени точности.

2. Предположим, что включение удалось с абсолютной точностью, что продолжительность секунд времени равна продолжительности секунд радиосигналов и что ход часов абсолютно точный. В этом случае все десять возможностей могут использоваться при наблюдении прохождения звезды через нить. В том случае, если мы хотим получить результаты моментов времени, придется остановить часы. На практике это означает, что TIMER надо включать перед наблюдением каждой новой звезды по тактовому сигналу, что делает результаты измерений одной ночи неоднородным из-за ошибок различных включений.

3. Наблюдение прохождения звезды через десять нитей длится несколько минут. За это короткое время ход часов можно считать равным нулю. Поправка часов зависит от точности включения и не всегда равна нулю, и тактовые радиосигналы и секундная шкала часов будут сдвинуты относительно друг друга на величину поправки часов. Ее невозможно определить достаточной точностью, если все ячейки памяти используются для наблюдений прохождения звезды через нить, так как выключение TIMER производится с такой же неточностью, как и включение.

3. Основная проблема

Цель наших исследований заключалась в том, чтобы определить число ячеек памяти, которое может использоваться для наблюдений за звездой и для определения точности хода часов с учетом возникающих ограничений. Для того, чтобы ответить на эти вопросы, надо решить следующее:

- а) может ли быть опущена поправка хода часов;
- б) в какой пропорции надо распределить число ячеек памяти, чтобы точность наблюдений была наивысшей;
- в) какая точность характерна для отдельных операций наблюдения.

4. Определение точности хода часов

По проспекту НР-55 «спешит» или «опаздывает» на 1,5 сек. за 8 часов работы при температуре от 0 °С до + 40 °С градусов. Это примерно $\pm 0,2$ сек. При измерениях ранней весной, летом и осенью точность хода обычно бывает выше. Проводимые в лаборатории испытания точности хода часов дали следующие результаты:

$$\bar{g} = \frac{u_2 - u_1}{\Delta U} = \frac{+ 0,22^s - 0,05^s}{5,6^h} = + 0,03 \text{ s/h}$$

u определяется с точностью $\pm 0,027$ сек.

Поэтому в то короткое время, которое требуется на наблюдение прохождения звезды, точность хода может считаться близкой к нулю.

5. Оптимальная пропорция использования ячеек памяти

Ошибка наблюдений μ состоит из двух других ошибок. Одна из них — ошибка определения прохождения звезды через нить μ_A , а другая ошибка несовпадения ритмического сигнала и момента нажатия кнопки μ_i . Пусть используется для наблюдения прохождения через нить звезды n_1 ячеек, тогда на определение хода часов останется $n_2 = 10 - n_1$ число ячеек. Таким образом

$$\mu_A = \frac{\mu_{sz}}{\sqrt{n_1}}; \quad \mu_i = \frac{\mu_e}{\sqrt{10 - n_1}}$$

где μ_{sz} — точность определения прохождения звезды через одну нить,
 μ_e — точность включения по одному ритмическому сигналу.

По закону распределения ошибок точность наблюдения будет следу-

ющая:

$$\mu = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_i^2} = \sqrt{\frac{\mu_{sz}^2}{n_1} + \frac{\mu_e^2}{10 - n_1}}$$

$$\mu^2 = \frac{\mu_{sz}^2}{n_1} + \frac{\mu_e^2}{10 - n_1} \quad (1)$$

Дифференцируем выражение (1) по n_1 , тогда

$$\frac{d\mu^2}{dn_1} = -\frac{\mu_{sz}^2}{n_1^2} + \frac{\mu_e^2}{(10 - n_1)^2}$$

Выражение (1) будет экстремальна, если первая производная равна 0:

$$\frac{d\mu^2}{dn_1} = -\frac{\mu_{sz}^2}{n_1^2} + \frac{\mu_e^2}{(10 - n_1)^2} = 0; \quad \text{из этого}$$

$$n_1 = \frac{10}{\frac{\mu_e}{\mu_{sz}} + 1} \quad (2)$$

Вторая производная (1) будет равна

$$\frac{d^2\mu^2}{dn_1^2} = \frac{2\mu_{sz}^2}{n_1^3} + \frac{2\mu_e^2}{(10 - n_1)^3} \quad (3)$$

Практически задача имеет смысл при $1 \leq n_1 \leq 9$, так вторая производная будет положительной, а в первой производной μ будет минимальным.

Для того, чтобы на основании (2) предложить конкретные величины n_1 и n_2 , надо определить сначала величины μ_e и μ_{sz} .

5.1. Определение точности наблюдения прохождения звезды через нить

В качестве примера возьмем случай, когда надо регистрировать момент прохождения звезды через горизонтальную нить. Среднюю ошибку прохождения через горизонтальную нить можно вычислить по:

$$\mu_h = \pm \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{N}\right)^2} \cdot \sec^2 \delta \cdot \operatorname{cosec}^2 q \quad (4)$$

При этом a и b являются постоянными, зависящими от методов наблюдения, N — увеличение визирной трубы, δ — деклинация звезды, q — угол, под которым звезда пересекает горизонтальную нить.

Астрономические наблюдения инструментом второго класса с увеличением $N = 30 \div 40$ с применением метода «глаз — рука» в лучшем случае дают результат μ_h примерно $\pm 0,12^s$. При более реальном, но еще подходящем случае, когда звезда с деклинацией в 45° почти под прямым углом пересекает горизонтальную нить, эта величина будет

$$\mu_h = \pm 0,16^s \quad (5)$$

В общем случае эта величина может быть больше и достигать нескольких десятых секунд, но мы в дальнейшем употребляли величину (5).

5.2. Точность ручного определения ритмического сигнала

Исследуем, с какой точностью можно определить с помощью TIMER начало ритмического сигнала.

Видимый на дисплее ритмический сигнал — изменение значения секунд. Включим TIMER и при круглом отсчете секунд нажмем весь ряд кнопок памяти. Так как мы приняли «измеряемую величину» за безошибочной, то разница между значением, которое надо найти, будет являться величиной ошибки ε . На основании трех приемов, каждый из которых состоял из 100 сигналов, были получены величины точности, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

	средняя ошибка $\vartheta = \frac{[\varepsilon]}{n}$	средняя квадрати- ческая ошибка $\mu = \sqrt{\frac{[\varepsilon^2]}{n}}$	средняя системати- ческая ошибка $\alpha = \frac{[\varepsilon]}{n}$
1 прием	0,047 ^s	$\pm 0,058^s$	+0,008 ^s
2 прием	0,044 ^s	$\pm 0,056^s$	+0,014 ^s
3 прием	0,049 ^s	$\pm 0,060^s$	+0,027 ^s
на основании 300 значений	0,047 ^s	$\pm 0,058^s$	+0,016 ^s

Такие же исследования проводились при использовании радиосигналов. Начало этих ритмических сигналов удалось определить с большей точностью. На основании 200 сигналов средняя квадратическая ошибка определения начала одного сигнала $\mu_e^* = \pm 0,037^s$; средняя систематическая ошибка — $0,007^s$.

В эту величину $\mu_e^* = \pm 0,037^s$ входит средняя квадратическая ошибка включения TIMER. Ее величину, то есть величину несовпадения радиосигнала и секундного темпа TIMER, точно определить невозможно. Средняя арифметическая разница, полученных на TIMER, принимается, как самое ве-

роятное значение относительного хода часов. Величина $\mu_e^* = \pm 0,037^s$, полученная как средняя арифметическая, очевидно меньше величины, которую можно получить на основании действительных ошибок. Поэтому впоследствии для характеристики точности мы использовали величину

$$\mu_e = \pm 0,058^s \quad (6)$$

(величину, вычисленную по данным слышимых сигналов, для отличия обозначили звездочкой.)

Возникает и такая возможность, что включение хронометра принимается удачным только в случае положительной субъективной оценки, а в случае неудачи, данная кнопка нажимается повторно. Храня в памяти только такие значения, ни один результат из ста, полученный на основании видимых ритмических сигналов, не отличался от желаемого на величину большую $\pm 0,1^s$. Средняя квадратическая ошибка одного сигнала $\pm 0,040^s$. На основании ста сигналов получим $\mu_e^* = \pm 0,032^s$, а максимальная разница только в одном случае превысила $0,1^s$. Эту возможность мы использовали в наших измерениях для увеличения точности определения хода часов.

Упомянутые ошибки являются личными ошибками автора статьи. Определение начала ритмического сигнала зависит от субъективных ошибок наблюдателя. В принципе мы могли бы учитывать величину средней систематической ошибки, допускаемой различными наблюдателями. На практике на основании результатов пяти наблюдателей было установлено, что величины средних квадратических ошибок примерно одинаковые, и что величина средней и средней квадратической ошибок 1,5—3,5 раза превышает величину средней систематической ошибки. Величина соотношения ошибок, допущенных автором, еще больше. На основании 300 видимых сигналов:

$$\frac{\vartheta}{\alpha} = 2,9; \quad \frac{\mu}{\alpha} = 3,6.$$

На основании 200 слышимых сигналов:

$$\left(\frac{\vartheta}{\alpha}\right)^* = 6,4; \quad \left(\frac{\mu}{\alpha}\right)^* = 5,0.$$

Это значит, что в величине ошибки, характеризующей точность установки по одному сигналу, величина нерегулярного компонента в несколько раз больше величины регулярного. С учетом того, что в последствии для определения относительного хода измерения велись только по небольшому числу сигналов, нет необходимости принимать во внимание величину систематической ошибки.

5.3. Численное решение основного вопроса

Вернемся к основному вопросу: сколько ячеек памяти может использоваться для наблюдений прохождения через нить звезды, и сколько — для определения хода часов.

Заменяем величины (5) и (6) в формуле (3):

$$n_1 = \frac{10}{\frac{\mu_e}{\mu_h} + 1} = \frac{10}{\frac{0,058}{0,160} + 1} = 7,34 \approx 7$$

Значит, оптимальное решение вопроса будет тогда, если семь ячеек будет использоваться на наблюдение прохождения через нить, а три на проверку относительного хода часов.

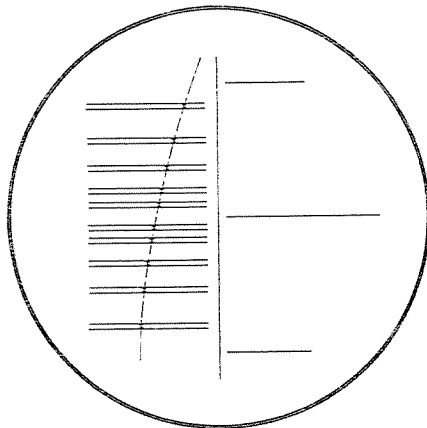


Рис. 1

На практике эту пропорцию мы заменили пропорцией 8 : 2. Главной причиной этого является то, что гораздо удобнее работать с четным числом нитей. (Рис. 1). Это изменение мы можем ввести спокойно, так как оно не отрази-

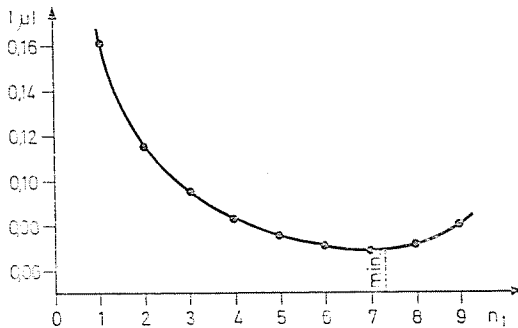


Рис. 2

лось на точности. На рис. 2., который показывает зависимость μ от n_1 , хорошо видно, что средняя квадратическая ошибка становится еле чувствительной вблизи $n_1 = 7,34$. Было уже упомянуто, что точности при $\mu_h = \pm 0,16^s$ является идеальной, и что средняя ошибка прохождения через нить в общем случае может достигать нескольких десятых долей секунды. Это отодвигает величину n_1 в сторону 8 (Рис. 3). Ясно видно, что изменение пропорции 7 : 3 на 8 : 2 на практике не приносит вреда.

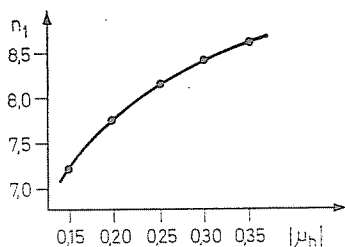


Рис. 3

6. Наблюдения с помощью НР-55

На основании описанного видно, что для успешного применения НР-55 при астрономических наблюдениях необходимо устройство для приема радиосигналов. Такое устройство работает в Космической-Геодезической Обсерватории в Пенце. При наших наблюдениях мы использовали этот радиоприемник.

Само наблюдение за звездой велось призмной астрольбией Ni-2, фирмы Орион. Инструмент Ni-2 является нивелиром с самоустанавливающей линией визирования, со специальной сеткой нитей, дополнений специальной призмой, насадкой и осветительным устройством. Независимо от названия он отличается конструкцией от ртутной астрольбии. Расположенная перед визирной трубой призма преломляет визирную линию на постоянный угол в 60° относительно горизонтального положения. Если инструмент повернуть вокруг его оси, то линия визирования описывает на небосводе альмукантарат. Значит, в этом случае могут применяться такие методы измерений, которые основываются на прохождении звезд через один альмукантарат. Применялся один из этих методов, основанный на проблеме трех высот, числовой метод Гаусса. Он позволяет одновременное определение величин φ и λ .

Этот инструмент бы испробован уже весной 1967 года Андором Шарди [2]. Он использовал в качестве часов хронометер, а моменты прохождения через нить он регистрировал ручным сигнализатором на ленте хронографа. По его исследованиям инструмент Ni-2 точки зрения астрономических из-

мерений является инструментом второго класса. С его помощью при измерениях и за одну ночь были достигнуты результаты лучше $\pm 1,0'' \div \pm 1,5''$, но уже $\pm 0,3''$. Иван Мюллер в своей книге [4] описывает призмную астролябию Ni-2, как инструмент второго класса.

Исследования 1967 года дают хорошую основу для сравнения наших настоящих измерений. Вопрос заключается только в том, можно ли достичь подобную точность при использовании НР-55.

Наблюдения проводились следующим образом: Перед наблюдением каждой звезды на НР-55 устанавливали TIMER и включали по какому-нибудь заранее выбранному сигналу по времени. (Сигналы давались громко и постоянно). Две ячейки памяти использовались для определения хода часов, то есть были нажаты кнопки с числами в момент начала ритмического сигнала. Если это не удавалось по нашему мнению, то нажатие кнопки было повторено. (Выключение TIMER тоже использовалось для определения относительного хода, только здесь уже не было возможности для повторения). Остальные восемь ячеек использовались для наблюдения прохождения звезды через нить, при этом звезды наблюдались по четыре пары при симметричном положении. После наблюдения за одной звездой сейчас же проводилось вычисление средней величины времени прохождения через нить по заранее введенной программе, которая после введения коррекции параллельной кривизны является моментом времени среднего положения звезды. Эта величина записывалась в журнал.

Результаты вычислений здесь не приводим. Полученные результаты очень похожи на результаты исследований 1967 года. По результатам наблюдений за десятью звездами за одну ночь были получены $\mu_\varphi = \pm 0,63''$, $\mu_\lambda = \pm 0,065^s = \pm 0,97''$. Позднее по результатам наблюдений за четырьмя звездами в последующие две ночи были определены величины φ и λ . На таблице II приводятся разницы величины трех φ и λ средней величины, уравновешенной по числу наблюдаемых звезд.

Таблица II

	число наблюдаемых звезд	$\bar{\varphi} - \varphi_i$	$\bar{\lambda} - \lambda_i$
1 прием	10	$+0,2''$	$0,00^s$
2 прием	4	$-0,3''$	$-0,05^s$
3 прием	4	$-0,3''$	$+0,04^s$

Таким образом, применяя инструмент Ni-2 и НР-55 без особых трудностей можно достичь точности, характерной для инструментов второго класса.

7. Преимущества и затруднения

Главное преимущество применения НР-55 — экономия времени. Отпадает необходимость обработки ленты хронографа, что связано с накоплением ошибок. В то же время прямо на месте наблюдений мы располагаем современным вычислительным устройством. Чтобы почувствовать значение этого, перечислим все вычислительные операции, с которыми встречаемся по ходу этого метода: пересчет измеренного зонального времени в местное звездное время, вычисление углов, вычисление коэффициентов и членов системы нормальных уравнений с тремя неизвестными, решение системы нормальных уравнений, инвертирование матрицы коэффициентов нормального уравнения с целью определения соединяющих коэффициентов веса, вычисление поправок в измерения, средних ошибок весовых категорий, и наконец, вычисление точности неизвестных, определенных уравниванием. Все эти вычисления можно сделать после наблюдений за полтора часа с помощью НР-55 по разработанным программам для 10 звезд. (Вычисление координат звезд и некоторых поправок надо провести еще до начала наблюдений).

Хотелось бы обратить внимание на две практические трудности, которые возникают при измерениях на месте. Одной из них является то, что аккумулятор НР-55 даже при полной зарядке способен только один час давать энергию для работы TIMER, поэтому надо иметь в запасе несколько заряженных аккумуляторов. Вторая трудность заключается в том, что надо иметь по возможности либо портативный радиоприемник с хорошей селективностью либо переносные кварцевые часы, которые работают с большей точностью, чем TIMER. В противном случае НР-55 из-за уже описанных свойств не может применяться для астрономических наблюдений второго класса. Применение упомянутых дополнительных устройств в настоящее время имеет определенные трудности, хотя эти трудности носят не технический, а больше коммерческий характер.

Резюме

При астрономических наблюдениях возникает необходимость измерения времени. Обработка лент классических хронографов занимает много времени и требует большого внимания.

В НР-55 карманную программируемую счетную машину фирмы Юлетт—Пакард встроены кварцевые часы. Это и некоторые другие особенности НР-55 дают возможность использовать их в качестве рабочих часов. С точки зрения точности ее очень важно определить пропорцию числа ячеек памяти, которые должны использоваться на определение поправки в относительный ход хронометра и на наблюдение прохождения звезды через нить.

НР-55 может успешно применяться при астрономических наблюдениях второго класса. Это доказывают проведенные испытания.

Литература

1. Лукач, Т.—Шарди, А.: Практическая астрономия.* Будапешт, 1975, изд. Танкёньвки-адо (учебное пособие)
2. Шарди, А.: Новые способы и инструменты в практической астрономии.* (Отчет об исследованиях) Будапешт, 1967
3. ROELOFS, R.: Astronomy Applied to Land Surveying, Amsterdam, 1950
4. MUELLER, I.: Spherical and Practical Astronomy as Applied to Geodesy. New York, 1969

Йожеф Форраи, Н-1521 Будапешт

* На венгерском языке.