

ЛАЗЕРНЫЙ НИВЕЛИР ДЛЯ ЮСТИРОВКИ РАТАН-600

*Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев, А. П. Лавров,
П. А. Фридман, О. В. Чуканов*

Приведено описание схемы и основных элементов лазерного нивелира, а также результаты его испытания в лабораторных условиях. Нивелир создан на базе стандартного геодезического инструмента Ni-004. В качестве визирного луча используется луч лазера, а в качестве нивелирной рейки — прибор с зарядовой связью (ПЗС) линейного типа, объединенный в один блок с устройством управления. Этот блок соединен с преобразователем отсчетов в цифровую форму и далее — с микро-ЭВМ «Электроника-60». Положение сфокусированного лазерного луча на ПЗС-фотоприемнике можно определять по отсчетам на цифровом индикаторе, входящем в состав преобразователя отсчетов (ручной режим — режим наладки), или с помощью ЭВМ выводить результаты измерений на печать, перфоленду, записывать на магнитную ленту. Прибор разработан применительно к задаче юстировки поверхности отражающих элементов радиотелескопа РАТАН-600, однако может быть использован и для других целей. На данном этапе реализованная точность определения относительного высотного положения ПЗС-фотоприемника оценивается средней квадратической ошибкой 25—35 мкм при длине визирного луча до 13 м.

The description of the circuit main elements of the laser level and the results of laboratory tests are given. The level is made on the base of the standard geodetic device Ni-004. The laser beam is used as the aim-beam and the linear charge-coupled-device (CCD) — as the level gauge. The CCD readings are transformed in digital form and passed to the microcomputer «Electronica-60». The position of the laser beam on the CCD-photoreceiver may be determined in two ways: manual and automatic. In the second case the data are written on the punch tape or magnetic tape. This laser level is constructed for the surface adjusting of the reflecting elements of RATAN-600 radiotelescope, but may be used in some other applications. The to-day precision of the relative position of the CCD-photoreceiver is estimated by 25—35 mkm r. m. s. while the length of the laser beam is about 13 m.

Повышение точности отражающей поверхности радиотелескопов рефлекторного типа всегда было важной проблемой в радиоастрономии и радиотелескопостроении, причем с годами требования к точности все более повышаются. Это особенно заметно в последнее время в связи с переходом к миллиметровому диапазону. При этом наряду с повышением точности отражающей поверхности увеличиваются и размеры радиотелескопов. Например, точность поверхности 100-метрового Боннского радиотелескопа [1] доведена до 0.7 мм, в Испании построен инструмент с диаметром зеркала 30 м и проектной точностью (после юстировки) <0.1 мм [2], а в Японии — 45-метровый радиотелескоп с проектной точностью около 0.12 мм [3]. Естественно, что для получения таких прецизионных радиозеркал следует выполнять высокоточные измерения с применением специальных приборов и устройств, в состав которых, как правило, входят лазеры, специальные фотоприемники и ЭВМ. Это позволяет не только повысить точность измерений, но и автоматизировать процесс юстировки, что весьма существенно, так как при юстировке крупных радиозеркал необходимо выполнять большое количество измерений [3—5].

Работы по повышению точности отражающей поверхности проводятся и на радиотелескопе РАТАН-600 в связи с запланированными работами по расширению диапазона в сторону миллиметровых волн [6]. Одной из составных частей этих работ является формирование прецизионной поверхности отражающих элементов [7]. Поскольку число таких элементов велико (895 для кругового отражателя и 124 — для плоского) и на каждом элементе нужно проконтролировать положение 600 точек, возникает необходимость в автоматизации контрольных измерений, осуществляемых в настоящее время посредством геоме-

трического нивелирования [8]. Проведенные ранее исследования [9] показали, что данная задача может быть решена с использованием лазера и приборов с зарядовой связью [10, 11]. Ниже приводятся результаты дальнейшей разработки лазерного нивелира для юстировки отражающих элементов РАТАН-600.

Принцип работы лазерного нивелира. Структурная схема лазерного нивелира, испытанного в лабораторных условиях, показана на рис. 1. В качестве визирного луча использован луч малогабаритного (длина резонатора 250 мм) гелий-неонового лазера, пропущенный через оптическую систему нивелира Ni-004 [12]. Стабильность положения луча в вертикальной плоскости обеспечивается высокими механическими качествами нивелира и возможностью контроля

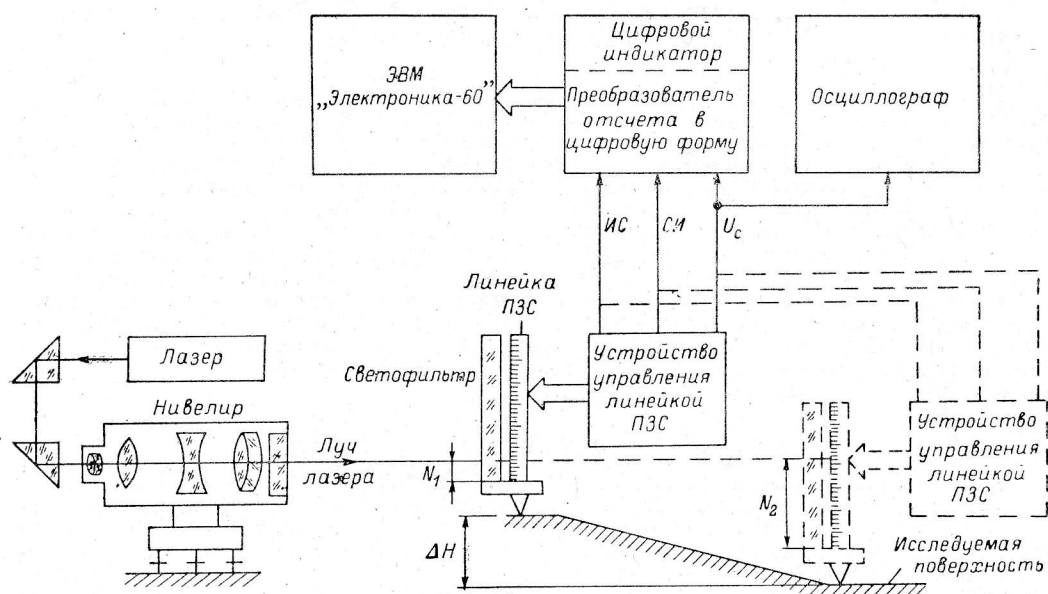


Рис. 1. Структурная схема лазерного нивелира и схема процесса измерений.

его по цилиндрическому уровню. Фокусировка луча на ПЗС-фотоприемник (ПЗС-ФП) осуществляется при помощи фокусирующей системы Ni-004. Приемная часть состоит из линейного ПЗС-ФП, устройства управления ПЗС-ФП, преобразователя отсчета с ПЗС-ФП в цифровую форму с цифровым индикатором и микро-ЭВМ «Электроника-60». Для визуального контроля выходного сигнала с ПЗС-ФП используется осциллограф.

Приемная часть служит для измерения перемещения пятна сфокусированного луча лазера по элементам ПЗС-ФП при изменении его, т. е. ПЗС-ФП, высотного положения. Перемещение пятна определяется по изменению положения его центра относительно начального элемента. В данном макете в предположении симметричности распределения интенсивности света в пятне реализован следующий алгоритм: положение центра пятна определяется как полусумма двух отсчетов, задаваемых точками пересечения некоторого опорного уровня передним и задним фронтами выходного сигнала ПЗС-ФП. При несимметричном распределении интенсивности света в пятне использование такого алгоритма приводит к некоторой ошибке, но она поддается учету.

Схематически процесс нивелировки показан на рис. 1. Если N_1 и N_2 — отсчеты по ПЗС-ФП в точках I и II контролируемой поверхности, то разность высот ΔH этих точек в миллиметрах определяется как

$$\Delta H = (N_1 - N_2) \tau,$$

где τ — шаг дискретизации ячеек ПЗС.

Устройство управления ПЗС-фотоприемником. В описываемом приборе был применен ПЗС-ФП упрощенной организации с совмещенными секциями на-

копления и сдвига и прозрачными поликремниевыми электродами [13], но можно использовать ФП и с другой организацией, а именно с отдельными секциями (регистрами) накопления и сдвига [14, 15]. Примененный фотоприемник имеет четырехфазную систему управления. Он содержит 500 линейно расположенных фоточувствительных элементов с шагом расположения (шагом дискретизации проецируемого светового распределения) 24 мкм и шириной 200 мкм. Общая длина фоточувствительной области составляет 12 мм. Для управления работой ПЗС-ФП было разработано устройство управления (УУ), структурная схема которого показана на рис. 2. Оно во многом аналогично устройству управления 50-элементными ПЗС-ФП, описанному в [13]. При разработке УУ были использованы цифровые КМОП-микросхемы серии К 564 (561). Они непосредственно стыкуются с ПЗС-ФП по питающему напряжению и быстродействию. Кроме того, данные микросхемы характеризуются малым энергопотреблением.

Устройство управления задает периодический режим работы ПЗС-ФП и вырабатывает все напряжения, необходимые для работы регистра сдвига (4)

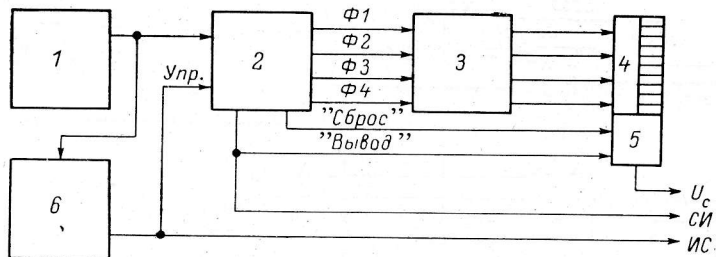


Рис. 2. Структурная схема устройства управления ПЗС-ФП.

1 — задающий генератор; 2 — управляемый генератор фазных напряжений; 3 — буферные усилители мощности; 4 — регистр сдвига ПЗС-фотоприемника; 5 — выходной узел ПЗС-ФП; 6 — формирователь интервалов накопления и считывания.

выходного узла (5) ПЗС-фотоприемника. В соответствии с идеологией работы ПЗС-ФП с совмещенными секциями [13] УУ выполнено в виде управляемого генератора (2) фазных напряжений $\Phi 1$ — $\Phi 4$ и импульсов управления выходным узлом. Управление генератором осуществляется формирователем интервалов накопления и считывания (6). Буферные усилители мощности (3) необходимы при работе на емкостную нагрузку, т. е. ПЗС-ФП. Работа формирователя интервалов (6) и управляемого генератора (2) синхронизируется задающим генератором (1). УУ позволяет изменять скорость вывода информации из ПЗС-ФП и время накопления (экспозиции). В наших экспериментах скорость вывода составляла $50 \cdot 10^3$ элементов/с, что соответствует времени вывода сигнала со всех 500 элементов в 10 мс, время накопления составляло 40 мс.

Сигнал на выходе ПЗС-ФП представляет собой последовательность импульсов, число которых равно числу фоточувствительных элементов, т. е. 500. При амплитуде управляющих импульсов 15 В максимальный выходной сигнал U_c , снимаемый с ПЗС-ФП, достигает 3 В. Выходной сигнал подается на преобразователь отсчетов для дальнейшей обработки и контролируется по экрану осциллографа. Помимо выходного сигнала на преобразователь отсчетов подаются синхронимпульсы СИ, частота следования которых равна частоте вывода информации, и стробирующий импульс ИС.

Преобразователь отсчета с линейного ПЗС-ФП в цифровую форму. Преобразователь отсчетов с линейного ПЗС-ФП в цифровую форму (ПО), функциональная схема которого представлена на рис. 3, состоит из трех основных узлов: компаратора, счетчика с индикацией в десятичном коде (цифровой индикатор) и схемы, определяющей логику работы ПО. Как уже указывалось выше, от устройства управления ПЗС на ПО подаются три сигнала (рис. 3 и 4): выходной U_c (рис. 4, а), СИ с частотой 50 кГц (рис. 4, б) и ИС (рис. 4, в). Сигнал U_c представляет собой последовательность импульсов, амплитуда которых пропорциональна освещенности соответствующих ячеек ПЗС. Компаратор преобразует серию импульсов максимальной амплитуды (участок фокусировки луча лазера) в прямоугольный импульс (рис. 4, г), ширина которого зависит от порогового

уровня $U_{\text{пор}}$ (рис. 4, а). В моменты t_1 и t_2 , соответствующие фронту и спаду этого импульса, с помощью формирователей Φ_1 и Φ_2 (рис. 3) вырабатываются импульсы (рис. 4, е). После предварительного сброса всех триггеров (кнопка «Сброс») нажимается кнопка «Пуск» и триггер T_0 дает разрешение на прохождение СИ через схему I_1 на вход схемы I_2 (рис. 3). На эту же схему подан и стробирующий импульс ИС. ПО работает в двух режимах: ручном (режим наладки) и автоматическом (основной рабочий режим; переключатель «Ручн. + Автомат»).

В ручном режиме измерений разрешение на прохождение импульсов СИ на счетчик дает триггер T_2 . Он устанавливается в разрешающее состояние пер-

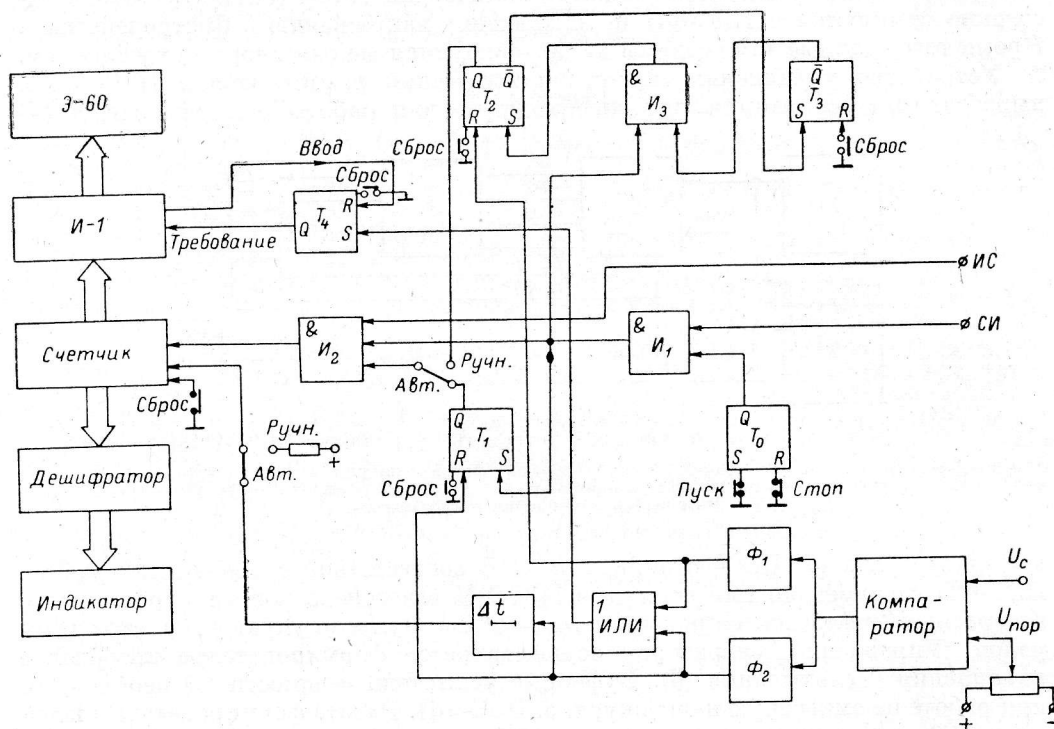


Рис. 3. Функциональная схема преобразователя отсчета по линейке ПЗС в цифровую форму.

вым синхроимпульсом СИ, прошедшим через I_1 и I_3 . После перехода в это состояние дальнейшее поступление СИ на T_2 блокируется триггером T_3 . Импульс t_1 перебрасывает триггер T_2 и останавливает счет импульсов. На индикаторе высвечивается отсчет, соответствующий моменту t_1 . Для следующего измерения необходимо последовательно нажать кнопки «Сброс» и «Пуск». Таким образом, в ручном режиме смещение пятна определяется по смещению его переднего фронта. Как уже указывалось выше, этот режим является наладочным.

В автоматическом режиме импульсы t_1 и t_2 (рис. 4, е) вызывают срабатывание триггера T_4 , который выдает сигнал «Требование» в ЭВМ «Электроника-60», после чего происходит ввод показаний счетчика в ЭВМ. Для связи с ЭВМ «Электроника-60» использована интерфейсная плата И-1. После приема кода триггер T_4 сбрасывается сигналом «Ввод», поступающим от ЭВМ. Импульс t_2 перебрасывает T_1 в положение, запрещающее дальнейший счет синхроимпульсов СИ (рис. 4, д), и через интервал Δt сбрасывает счетчик в «нулевое» положение (рис. 4, ж). Следующий цикл начинается с приходом нового стробирующего импульса ИС и серии синхроимпульсов СИ. Первый СИ устанавливает T_1 в разрешающее для схемы I_2 положение, и очередные два отсчета (по t_1 и t_2) вводятся в ЭВМ.

Программа ввода данных построена по принципу опроса готовности устройства И-1, т. е. по существу ПО. Пары отсчетов, соответствующие моментам t_1 и t_2 , накапливаются в оперативной памяти ЭВМ и осредняются. После осредне-

ния 100—1000 отсчетов на печать выводится средняя величина $(t_1+t_2)/2$. Эта операция способствует упрощению юстировочного процесса, так как вся обработка результатов измерений проводится в реальном масштабе времени. При симметричной форме фокального пятна средний отсчет соответствует положению максимума пятна. Такое определение среднего отсчета по фронту и спаду импульса (рис. 4, *г*) позволяет уменьшить ошибки, связанные с небольшой расфокусировкой, происходящей при перемещении ПЗС-ФП.

Эксперимент. Экспериментальная проверка работоспособности и возможностей макета лазерного нивелира была проведена в лабораторных условиях.

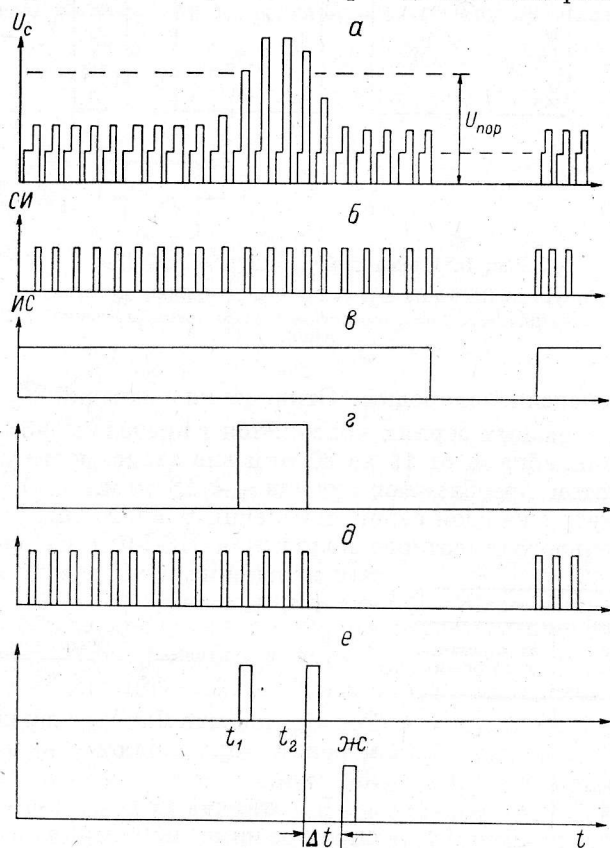


Рис. 4. Временные диаграммы для платы преобразования.

а — выходной сигнал с ПЗС — U_c ; *б* — синхронимпульсы СИ; *в* — стробирующий импульс ИС; *г* — импульс на выходе компаратора; *д* — последовательность синхронимпульсов на входе счетчика; *е* — импульсы «Требувание», поступающие в ЭВМ; *ж* — импульс сброса счетчика в автоматическом режиме.

Основное внимание было уделено определению точности нивелирования лазерным лучом в различных (хотя и лабораторных, но не всегда благоприятных с точки зрения турбулентности воздуха) условиях. Длина визирного луча была выбрана в соответствии с производственными условиями: 5.5 и 13 м. Измерения выполнялись в ручном и автоматическом режимах. Схема измерений и обработки показана на рис. 5. В фиксированных по высоте положениях ПЗС-ФП, контролируемых при помощи индикатора часового типа с ценой деления 10 мкм (массив X_i), снимаются показания цифрового индикатора ПО, характеризующие высотное положение ПЗС-ФП (массив Y_{ji} , j — номер хода). Для каждого фиксированного значения X_i вычисляются усредненные по всем ходам значения Y_i и средние квадратические (ср. кв.) ошибки m_i , характеризующие отклонения измеренных значений Y_{ji} от соответствующих средних. Ряды Y_i аппроксимируются прямыми и по величинам v_i (отклонениям от аппроксимирующих прямых) определяются ср. кв. ошибки m , усредненных значений Y_i . Измерения выполнялись сериями из 10 ходов. За один «ход» измерений оп-

ределялось изменение высотного положения ПЗС-ФП через 0.5 мм практически по всей длине фотоприемника. Результаты измерений частично представлены в таблице.

При измерениях в ручном режиме величины m_i принимают значения от 11 до 50 мкм, причем в основном они меньше 36 мкм. Согласно критерию Кочрена

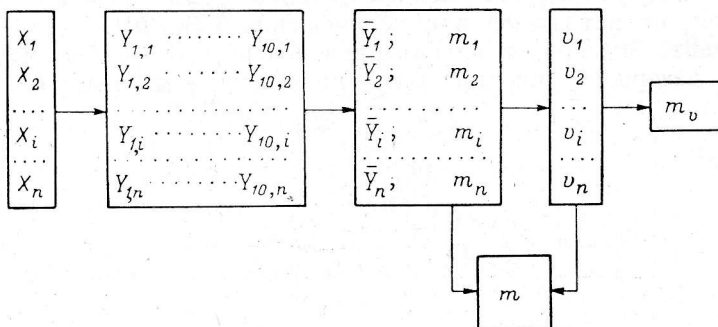


Рис. 5. Схема измерений и обработки.

X_i — фиксированные положения ПЗС-ФП; Y_{ji} — отсчеты по цифровому индикатору ПО; \bar{Y}_i , m_i , v_i — результаты обработки; m — ср. кв. ошибка определения высотного положения ПЗС-ФП из одного измерения.

($q=5\%$), все дисперсии однородны. Отклонения значений \bar{Y}_i от аппроксимирующих прямых в разных сериях колеблются в пределах ± 38 мкм и характеризуются ср. кв. ошибками от 11 до 20 мкм вне зависимости от длины визирного луча, при этом преобладают значения < 18 мкм.

Поскольку внутри каждой серии измерения равноточны, то точность определения относительного высотного положения ПЗС-ФП из одного измерения для каждой из серий можно выразить одним числом, а именно

Величины m_i , мкм	Количество, %	
	Ручной режим	Автоматический режим
≤ 12	< 5	5
13—24	53	68
25—36	38	22
37—48	< 4	5
≥ 49	< 1	—

$$m = \sqrt{\frac{\sum (m_i^2 + v_i^2)}{n}}$$

Эти ср. кв. ошибки при ручном режиме измерений принимают значения от 28 до 34 мкм.

В отличие от ручного в автоматическом режиме измерения выполнялись ходами в прямом и обратном направлениях.

Методика юстировки отражающих элементов РАТАН-600 предполагает выполнение контрольных измерений при двух горизонтах инструмента, поэтому из результатов измерений для дальнейшего анализа был сформирован путем осреднения прямых и обратных ходов новый массив данных. Как видно из таблицы, ср. кв. ошибки ПЗС-ФП в фиксированных положениях (m_i) принимают значения от 10 до 48 мкм, при этом 73 % их не превышают 24 мкм и лишь 5 % заключены в интервале между 37 и 48 мкм. Все дисперсии однородны. Величины \bar{Y}_i колеблются относительно аппроксимирующих прямых со ср. кв. ошибками от 8 до 11 мкм, а величины m принимают значения от 14 до 23 мкм.

Поскольку в данном цикле все измерения были выполнены практически при неизменном горизонте инструмента и на одних и тех же участках ПЗС-ФП, представляется небезынтересным сопоставить между собой результаты различных серий путем сравнения отклонений усредненных значений \bar{Y}_i от аппроксимирующих прямых. На рис. 6 показаны графики величин v_i , полученных из первой и последней серии. Видимая близость графиков подтверждается величиной коэффициента корреляции ($r=+0.755$), намного превышающим критическое значение, при котором еще отвергается гипотеза о наличии связи ($r_{кр} = -0.44$). Наблюдающееся же различие соответствующих величин v_i — влияние

ошибок измерений. Тогда, используя значения Δv_i , можно оценить точность определения высотного положения ПЗС-ФП десятью приемами: она характеризуется ср. кв. ошибкой $M=5$ мкм.

Наличие автоматического режима позволило смоделировать процесс контрольного нивелирования поверхности юстируемого щита. ПЗС-ФП последовательно устанавливался на высоты, соответствующие проектному положению реальных точек поверхности (по индикатору часового типа), и в этих положениях показания с ПЗС регистрировались на перфоленту. При обычной юстировке обработка получаемого из нивелирования массива сводится к нахождению аппроксимирующей поверхности по следующему уравнению поправок:

$$X_i^2 u + X_i w + Y_j t + z - H_{ij} = v_{ij};$$

$$H_{ij} = H_{\text{const}} - h_{ij},$$

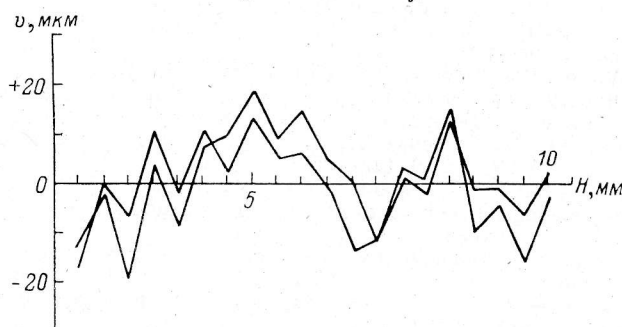


Рис. 6. Сравнение результатов измерений из первой и последней серий (автоматический режим) по отклонениям от аппроксимирующих прямых.

где X_i, Y_j — прямоугольные координаты точек поверхности; u, w, t и z — искомые неизвестные, характеризующие кривизну, поперечный и продольный наклон, а также общее смещение по высоте аппроксимирующей поверхности; H_{ij} — измеренные относительные высоты точек поверхности; v_{ij} — поправки к ним; h_{ij} — отсчеты с ПЗС-ФП, переведенные в миллиметры. В нашем случае приведенное уравнение поправок упрощается, поскольку наклоны аппроксимирующей поверхности могут быть обусловлены только систематическим влиянием, а оно, как это следует из результатов измерений, отсутствовало. Как и в реальных условиях, было получено два массива данных. Первичный контроль качества измерений выполнялся по сходимости результатов вдоль образующих воображаемой поверхности: ср. кв. ошибка определения высотного положения оказалась равной 29 мкм для первого массива и 20 мкм для второго. Аппроксимирующая поверхность была вычислена по данным, полученным как среднее из обоих массивов. Точность измерений лазерным нивелиром, оцененная по отклонениям измеренных значений от аппроксимирующей поверхности, характеризуется ср. кв. ошибкой 25 мкм. В эту величину входят и ошибки контроля перемещения ПЗС-ФП при помощи индикатора часового типа, которые в нашем случае оказались ощутимыми.

Приведенные результаты испытаний доказывают возможность создания и применения на практике для высокоточных измерений лазерного нивелира с использованием ПЗС-ФП в совокупности с ЭВМ. Последнее обстоятельство позволяет не только автоматизировать фиксацию высотного положения ПЗС-ФП и регистрацию результатов измерений, но и производить их полную обработку с получением всех параметров исследуемой поверхности в реальном времени при помощи той же ЭВМ. Стационарность условий предстоящих измерений позволила в известной степени мириться с некоторой громоздкостью инструмента. Тем не менее такие узлы приемной части, как преобразователь отсчетов с цифровым индикатором и ЭВМ с периферийным устройством, сконструированы в передвижной стойке, что придает прибору определенную мобильность. Поэтому не вызывает сомнений, что аналогичные геодезические инструменты (не только нивелиры) найдут применение в геодезической практике. Разработанные устрой-

ства управления ПЗС-фотоприемниками и сопряжения их с ЭВМ могут быть использованы для самых различных измерительных систем.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить признательность Ю. Н. Парийскому за постоянное внимание к данной работе и обсуждение ее результатов.

Литература

1. Хахенберг, Граль, Вилебинский. 100-м радиотелескоп в Эффельсберге. — ТИИЭР, 1973, № 9, с. 158—167.
2. Baars J. W. M., Hooghoudt B. G. A 30 m telescope for mm-wavelengths. — In: Kitt Peak National Observatory Conference «Optical and infrared telescopes for the 1990 s». Proceedings, 1980, 1, p. 458—465.
3. Kaifu N., Akabane K. The Surface-Adjusting System for the 45-m Telescope. — URSI Symposium «MM-Wave Technology for Astronomy», 1980.
4. Greve A., Harth W. Modulated laser surface surveying system for mm-wavelength radio telescope. — SPIE. 1980, European Conference on Optical System and Applications. 1980, 236, p. 110—112.
5. Baars J. W. M. Desing of Large Millimeter Radio Telescopes. — In: International URSI-Symposium 1980 on Electromagnetic Waves. Munich. 1980, p. 143 A/1-4.
6. Исследование точности отражающей поверхности главного зеркала РАТАН-600 (северный сектор) / С. Я. Голосова, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1982, 15, с. 132—150.
7. Амстиславский А. З., Копылов А. И., Просмушкин И. М. Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 89—96.
8. Формирование отражающих поверхностей элементов кругового и плоского отражателей и вторичного зеркала РАТАН-600 / А. Г. Белевитин, А. П. Глумов, Ю. К. Зверев и др. — В кн.: Восьмая конференция по радиоастрономии. Тезисы докл. Пуцшино, 1975, с. 43—44.
9. Использование приборов с зарядовой связью при высокоточном нивелировании / В. А. Арутюнов, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. — Геодезия и картография, 1981, № 12, с. 20—22.
10. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью. М.: Сов. радио, 1976. 127 с.
11. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1981. 136 с.
12. Деймлик Ф. Геодезическое инструментоведение. М.: Недра, 1970. 584 с.
13. Использование приборов с зарядовой связью в системах оптической обработки информации / В. А. Арутюнов, Н. А. Есепкина, Б. А. Котов и др. — Приборы и техника эксперимента, 1982, № 1, с. 98—102.
14. Фоточувствительные схемы с зарядовой связью: состояние и перспективы развития / А. В. Вето, Е. В. Костюков, Ю. А. Кузнецов, Ф. П. Пресс. — Электрон. пром-сть, 1982, № 7, с. 3—6.
15. Выходные устройства систем оптической обработки информации на основе приборов с зарядовой связью / В. А. Арутюнов, Н. А. Есепкина, Б. А. Котов и др. — В кн.: Оптико-электронные методы обработки изображений. Л.: Наука, 1982, с. 147—165.

Поступила в редакцию 21 апреля 1983 г.