

ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ДИАМЕТРОВ ЗВЕЗД. ВОЗМОЖНОСТИ 6-МЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА

Для решения определенного круга астрофизических задач требуется знать угловой размер звезды. Это одна из немногих характеристик, которая может быть получена непосредственно из наблюдений. Объединяя ее с другими наблюдательными данными, можно определить некоторые основополагающие параметры, характеризующие звезду. Так, имея угловой диаметр и измеряя интегральный поток от звезды, можно вычислить ее эффективную температуру. Если при этом известно расстояние до звезды, можно определить ее линейный радиус, который является одним из исходных параметров в теории внутреннего строения звезд. Кроме того, появляется возможность получить эмпирическую точку на диаграммах спектр-светимость и светимость-радиус, которые отражают эволюцию звезды. В случае переменных звезд, зная изменения размеров звезды и объединяя их с данными фотометрии и спектроскопии, можно попытаться выявить характер процессов, ответственных за переменность. Для этого требуются угловые диаметры, известные с точностью до 1—2%.

Методы определения угловых диаметров звезд подразделяются на прямые и косвенные. К прямым методам относятся все интерферометрические, например интерферометрия интенсивностей, амплитудная и спекл-интерферометрия и метод лунных покрытий. Косвенные — это, в основном, фотометрические методы.

Последние годы характеризуются обилием новых результатов, полученных прямыми и фотометрическими методами. Так, многократные наблюдения некоторых объектов (*μ Gem*, *RZ Ari*, *Y Tau*, ψ *Vir*) методом лунных покрытий позволили оценить их угловые диаметры с ошибкой не более 2% [1]. Самые последние спекл-интерферометрические измерения *α Ori* и *α Her* также имеют беспрецедентную для этих звезд точность — 1—2% [2, 3]. Наряду с этим утверждается [4, 5], что результаты, полученные фотометрическими методами, не уступают, а в некоторых случаях и превосходят по точности прямые измерения.

В основе всех фотометрических методов лежит соотношение $E = (\theta/2)^2 H$ (1), где H — интегральный поток с поверхности звезды; E — освещенность от звезды на границе земной атмосферы в абсолютных единицах; θ — угловой диаметр в радианах. Основным источником ошибок в данном случае кроется в расчете H . Если $H = \sigma T_e^4$ (звезда излучает как абсолютно черное тело и T_e — эффективная температура), то задаваясь, скажем

2%-ной точностью в определении θ , мы должны знать T_e с точностью до 1%. Необходим также правильный учет межзвездного поглощения.

В действительности же пользуются соотношением $\theta = 2 (E_v/H_v)^{1/2}$ (2), где H_v — монохроматический поток, рассчитываемый на основе некоторой модели атмосферы звезды, а E_v — монохроматическая освещенность. Наиболее перспективным представляется применение этого соотношения в инфракрасной области ($\lambda > 1$ мкм) [4, 5]. В этом диапазоне длин волн поток H_v слабо зависит от принятого значения эффективной температуры. Поэтому считается, что даже весьма приближенное знание T_e дает возможность получить значение θ , близкое к истинному. В этой области незначительны эффекты бланкетирования линиями, более надежно определены источники непрозрачности и влияние межзвездного поглощения мало.

Однако для холодных звезд (с $T_e \lesssim 3600$ К) влияние бланкетирования, обусловленное молекулярным поглощением, становится в инфракрасной области уже значительным, а его интерпретация и учет, на основе имеющейся информации, не могут считаться уверенными. К тому же принятые для них в настоящее время модели атмосфер не являются надежными. В частности, классические предположения о ЛТР, плоско-параллельной и однородной атмосфере вряд ли справедливы.

В особенности это относится к звездам типа Миры Кита, которые имеют протяженные и сильно стратифицированные атмосферы. Это означает, что наблюдаемые спектры этих звезд обусловлены вкладами от многих атмосферных слоев с разной температурой, причем циклические изменения температуры в таких слоях до некоторой степени не зависят друг от друга [6].

Однако Скагл и Стрекер [5] применили соотношение (2) и к холодным звездам, вплоть до M9, включая три мириды (*o Cet*, *R Leo*, *NML Tau*) и две углеродные звезды (*Y CVn*, *TX Psc*). Полная неопределенность в эффективной температуре модели, принятой для данной звезды, может достигать, по мнению авторов, ± 150 К. Для получения углового диаметра использовался весь спектральный диапазон 1—5 мкм, в котором можно считать, что полный вычисленный поток пропорционален T_e^4 . Тогда значение θ для звезды с $T_e = 5000$ К, вследствие только переноса «ошибок модели», определяется с погрешностью 6%, но для звезды с $T_e = 2500$ К эта погрешность достигает уже 12%.

Точность же современных наблюдений (получение E_v) определяется в основном точностью абсолютной калибровки, которая оценивается в 10% [7], а внутренние ошибки, по-видимому, не превышают 5%. В то же время может появиться дополнительная неопределенность в E_v , обусловленная переменностью звезды.

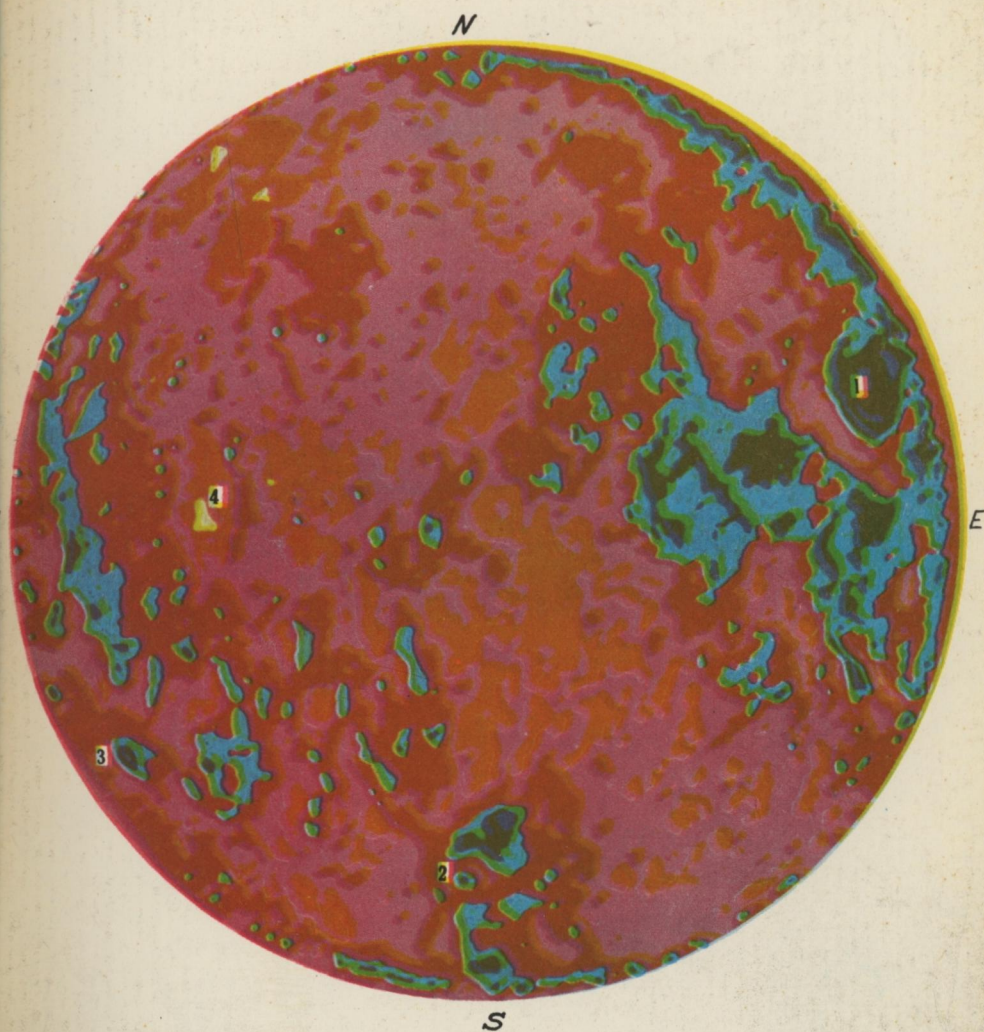
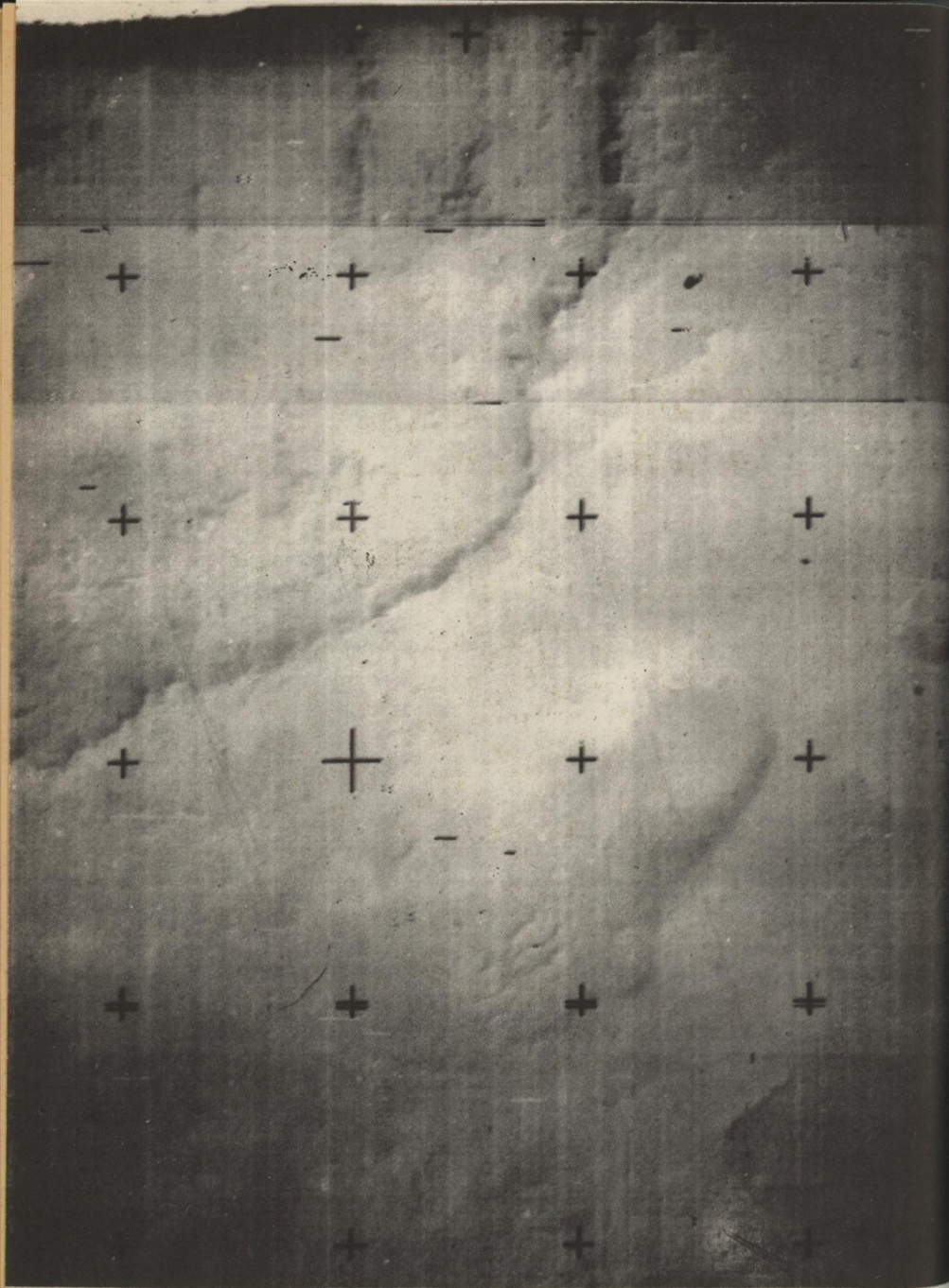


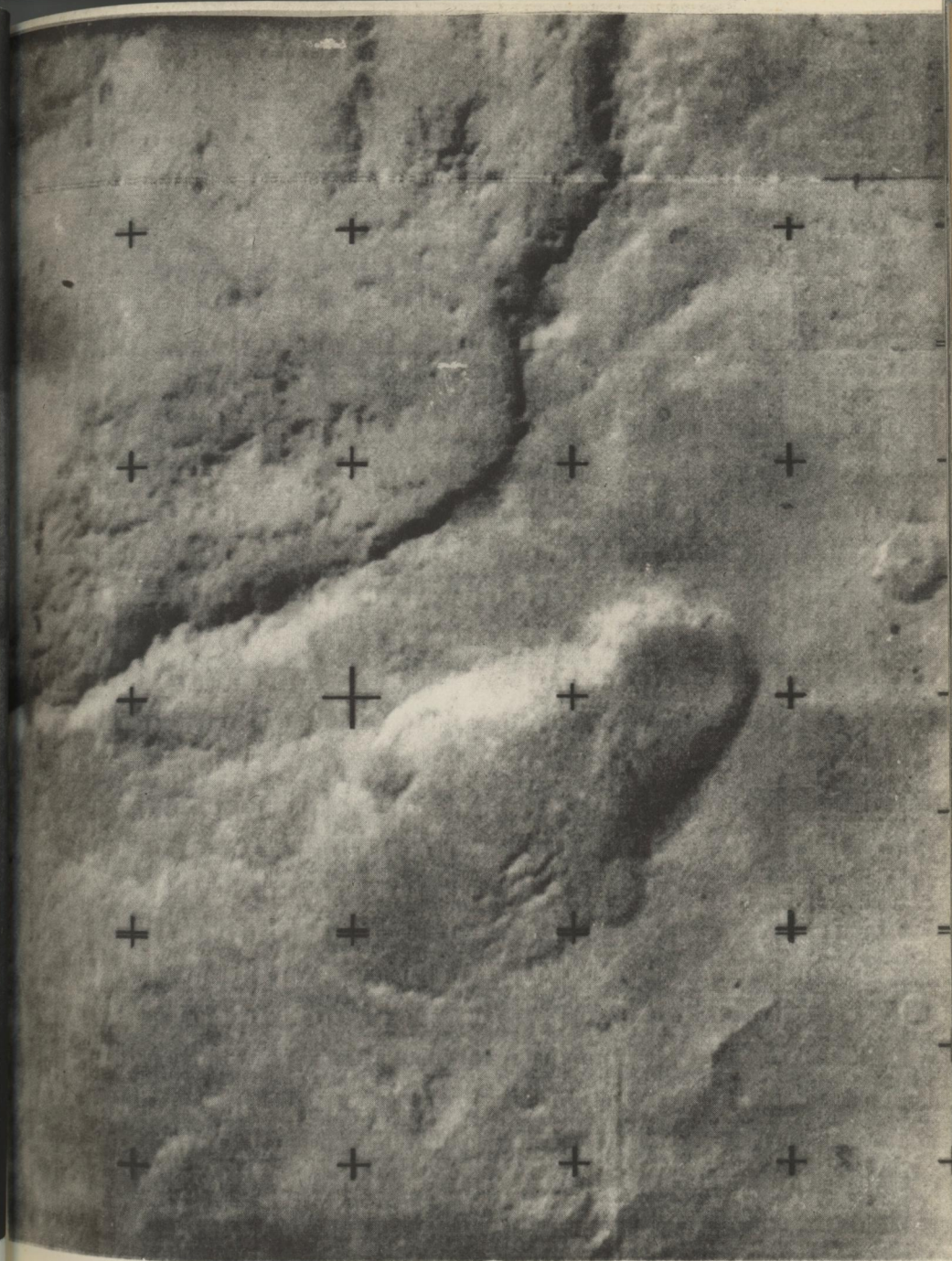
Рис. 1. Карта цвета Луны: 1 — Море кризисов; 2 — Тихо; 3 — Гримальди; 4 — Аристарх.

Порядок цветов, соответствующий возрастанию показателя цвета: синий; темно-зеленый; голубой; коричневый; пурпурный; желтый; белый

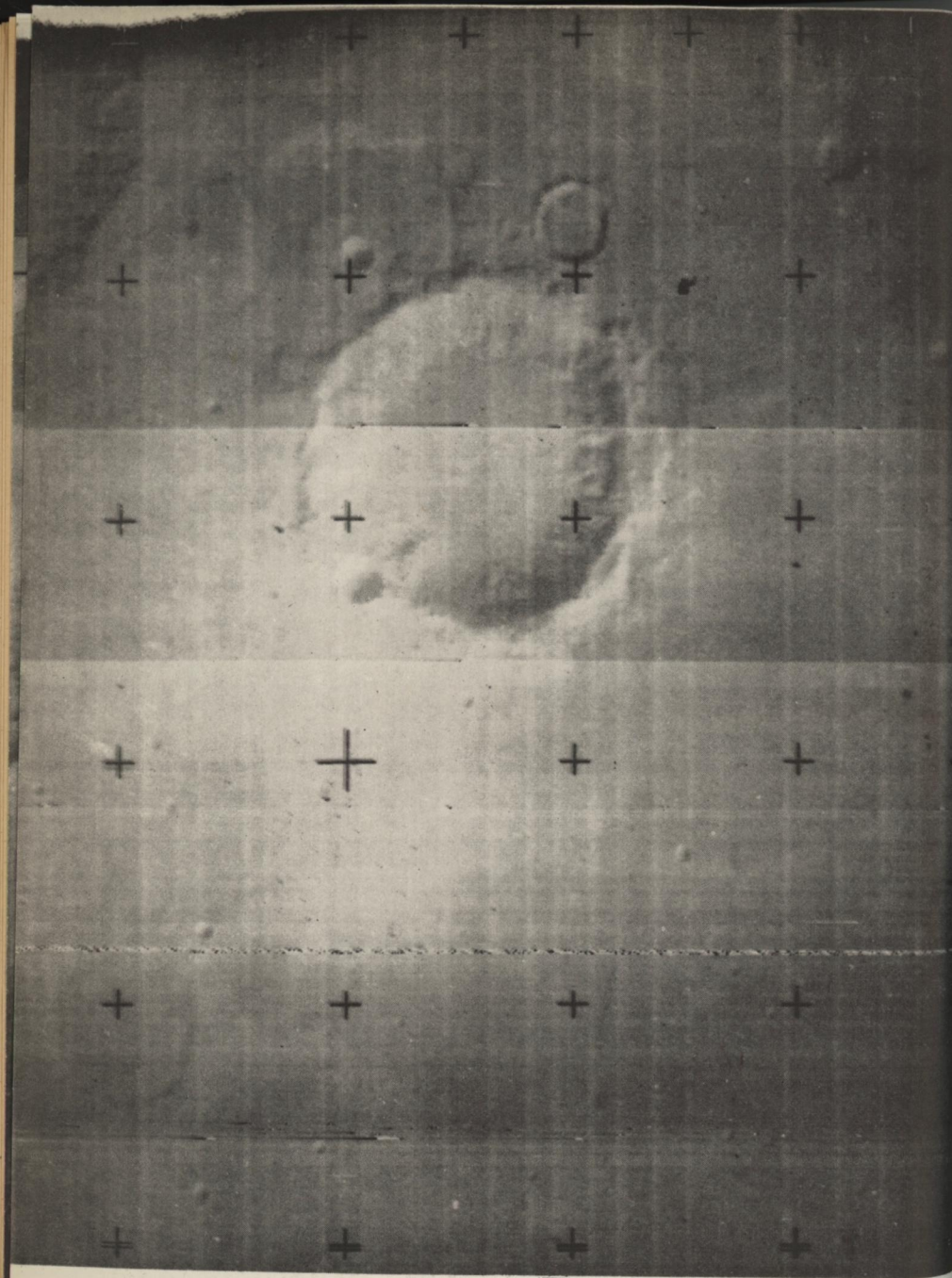


a

Рис. 2. Исходное изображение (*a*) мало контрастное и содержит дефекты в виде полос. Другие дефекты выражены слабее. На обработанном изображении (*б*) устранены полосы и произведена гамма-коррекция ($\gamma=2$)

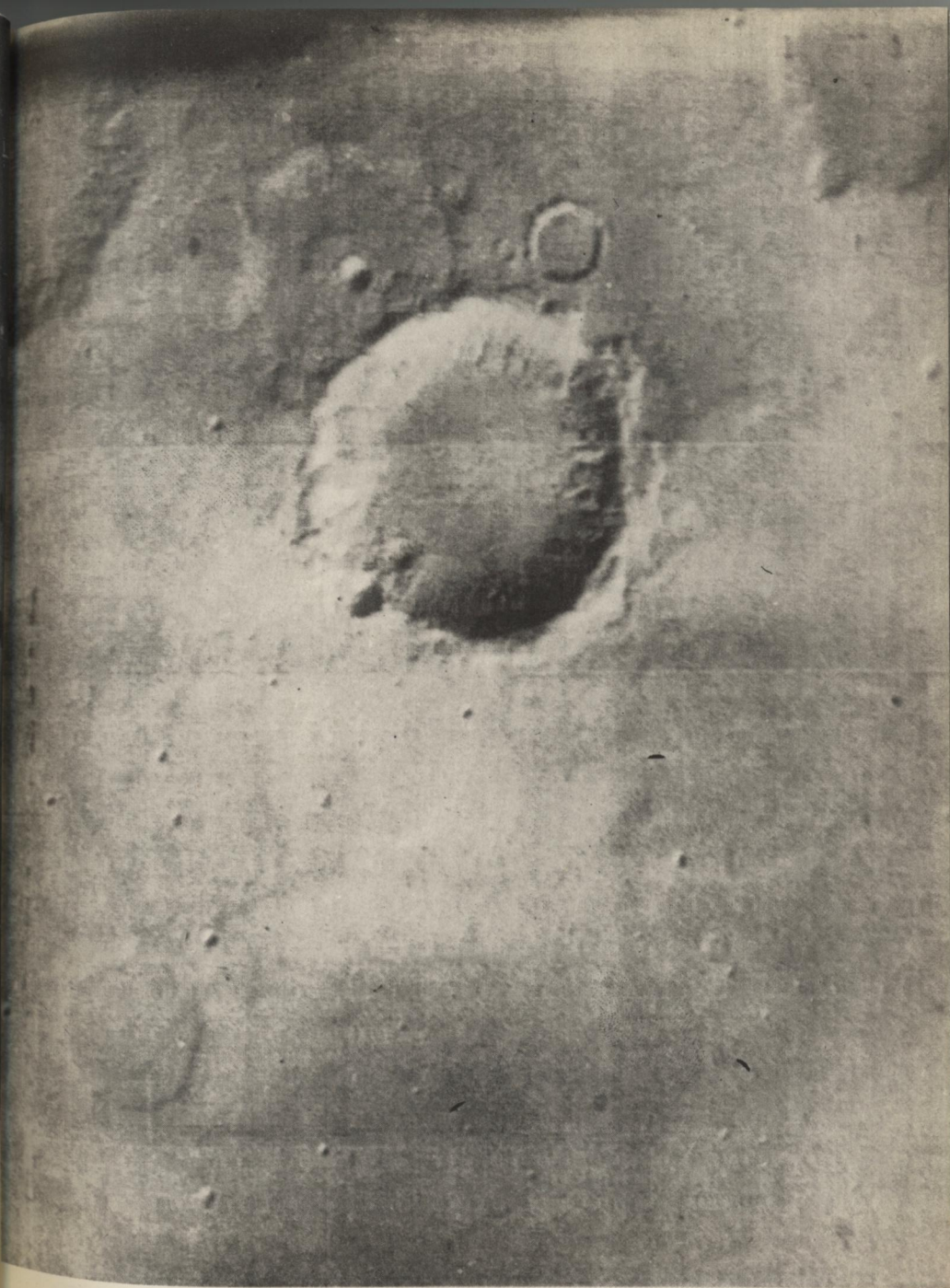


б



a

Рис. 3. На исходном изображении (а) есть вертикальные и горизонтальные полосы и импульсные помехи. Изображение (б) — результат обработки. Вариант с $\gamma=2$



б

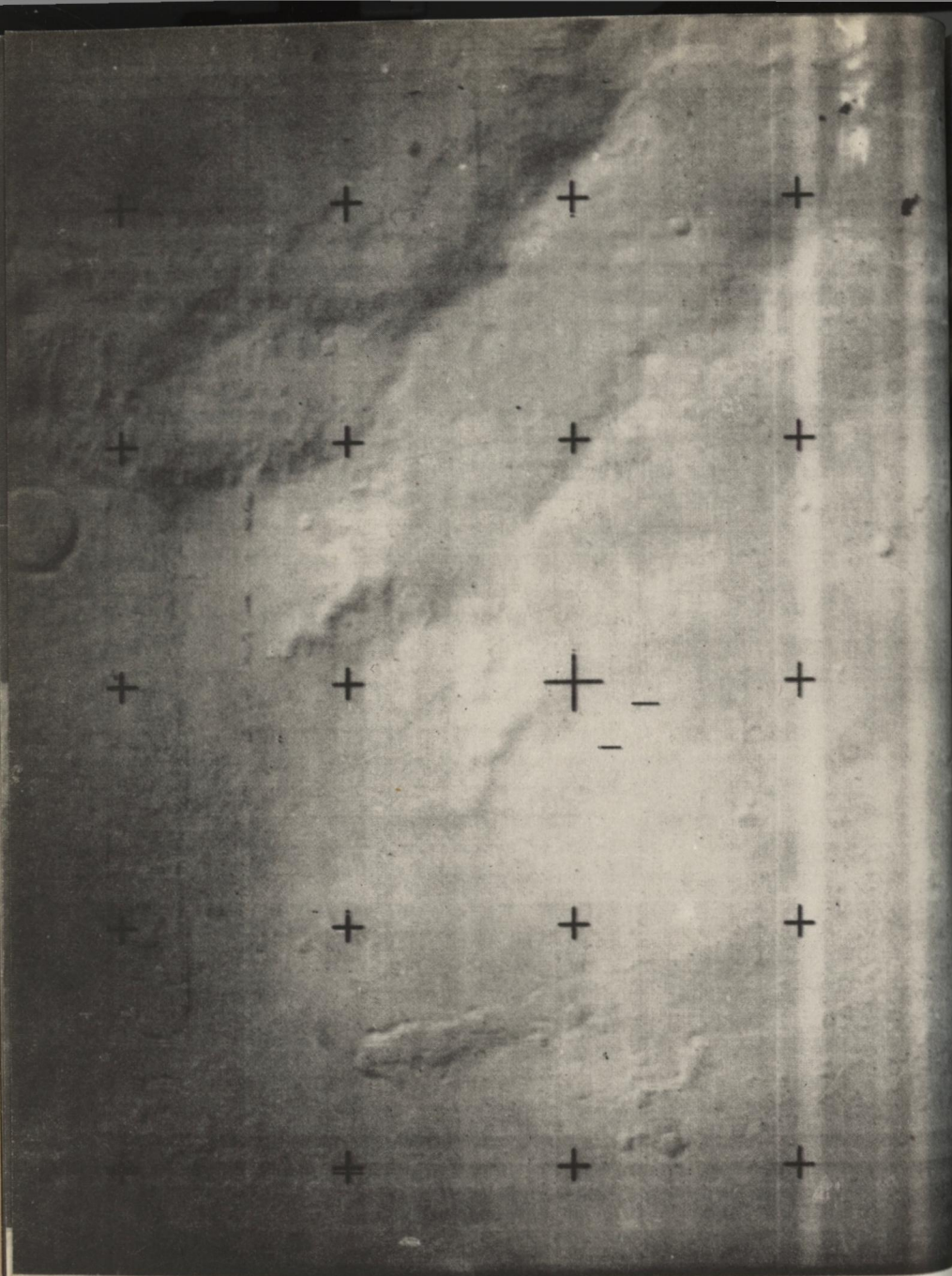


a

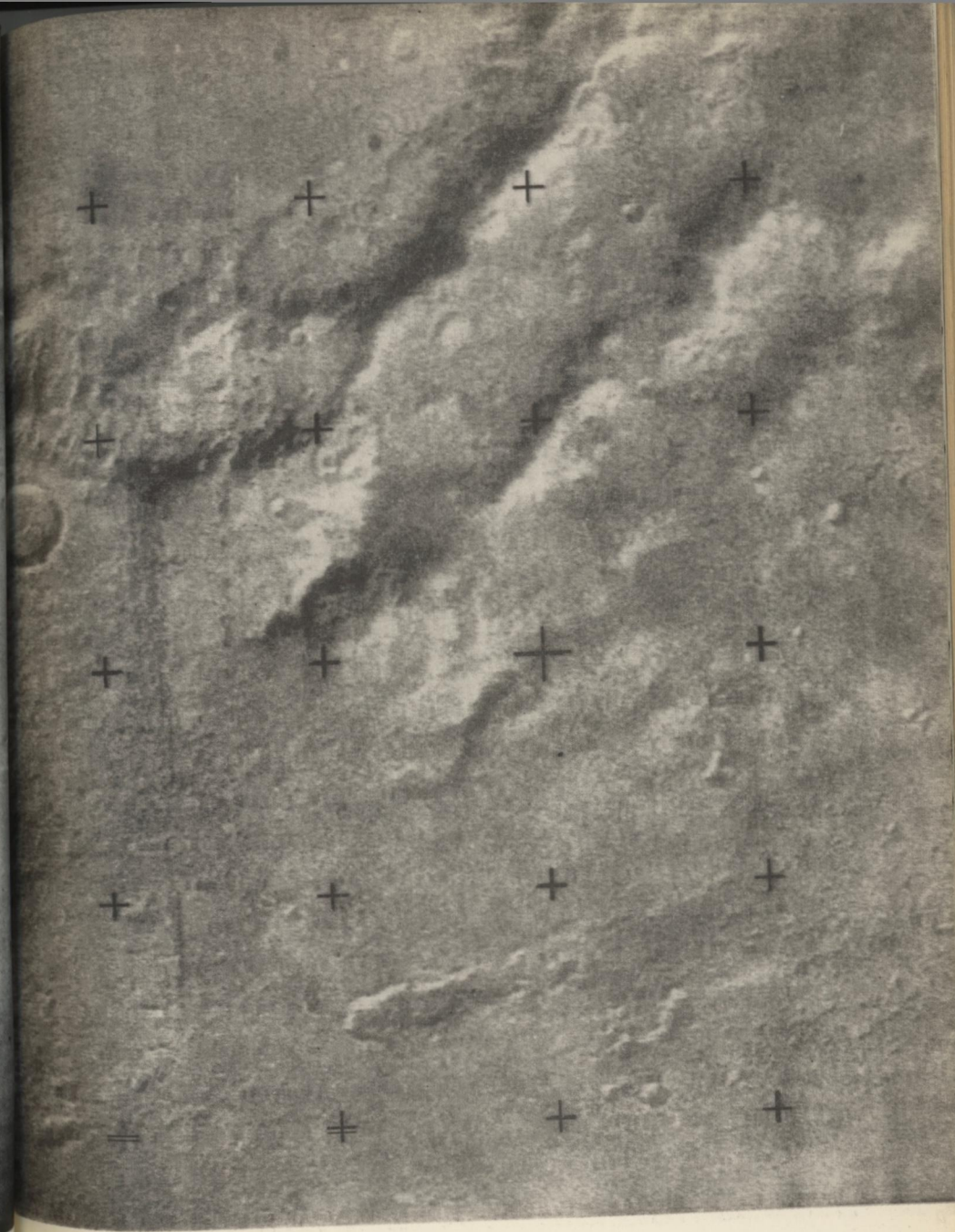
Рис. 4. На исходном изображении (а) видны скачки яркости (по-видимому, вследствие скачкообразной регулировки усиления). Число локальных дефектов и импульсных помех небольшое. Обработанное изображение (б) содержит много деталей, невидимых на исходном снимке.



б



a



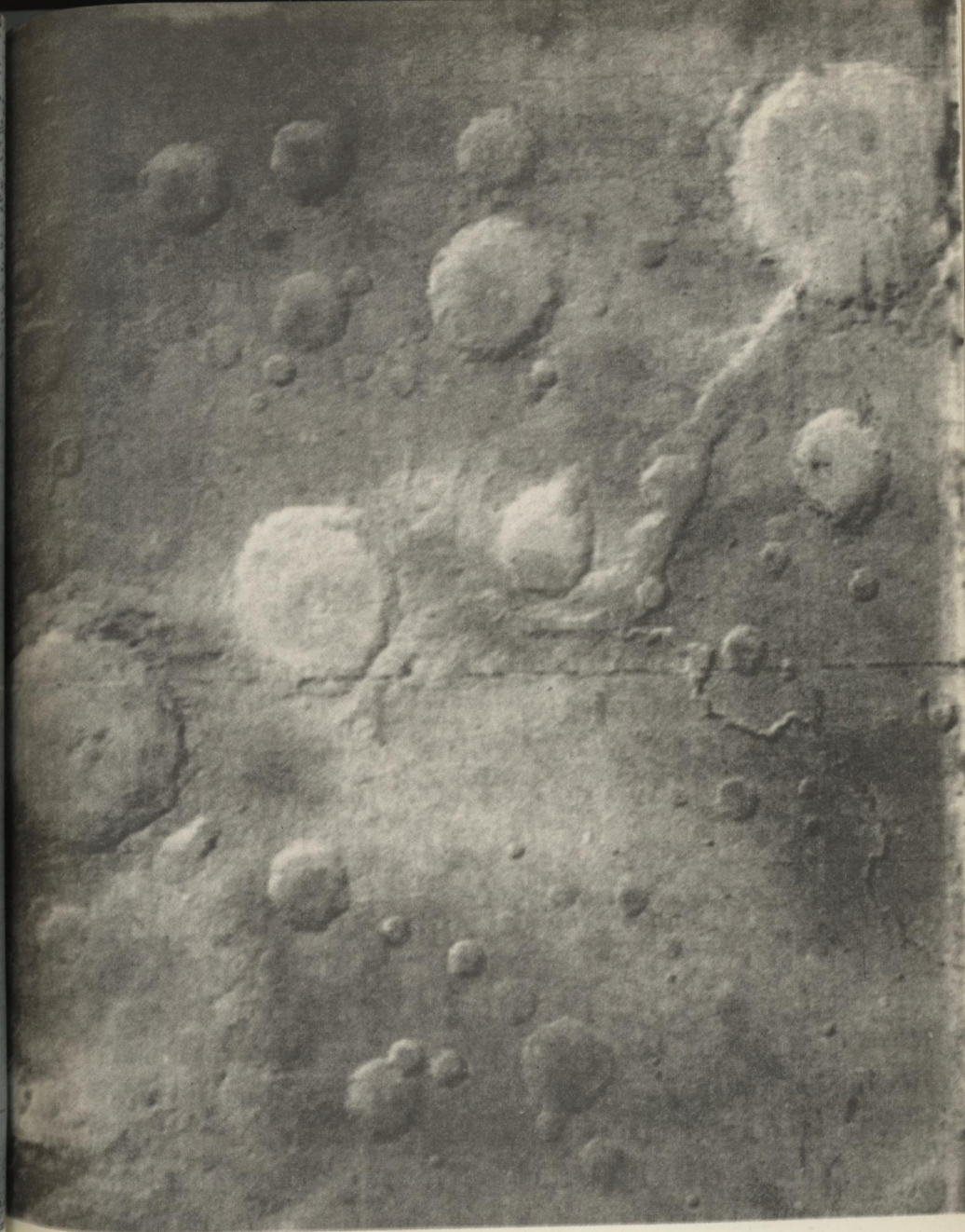
б

Рис. 5. На исходном изображении (а) видно сильную неравномерность яркости по полю. На обработанном изображении (б) выравнена яркость и устранены другие дефекты



a

Рис. 6. Исходное изображение (а) несколько испорчено ошибками цифрового тракта. Другие дефекты выражены слабее. На обработанном изображении (б) видно много деталей, незаметных на исходном снимке



б

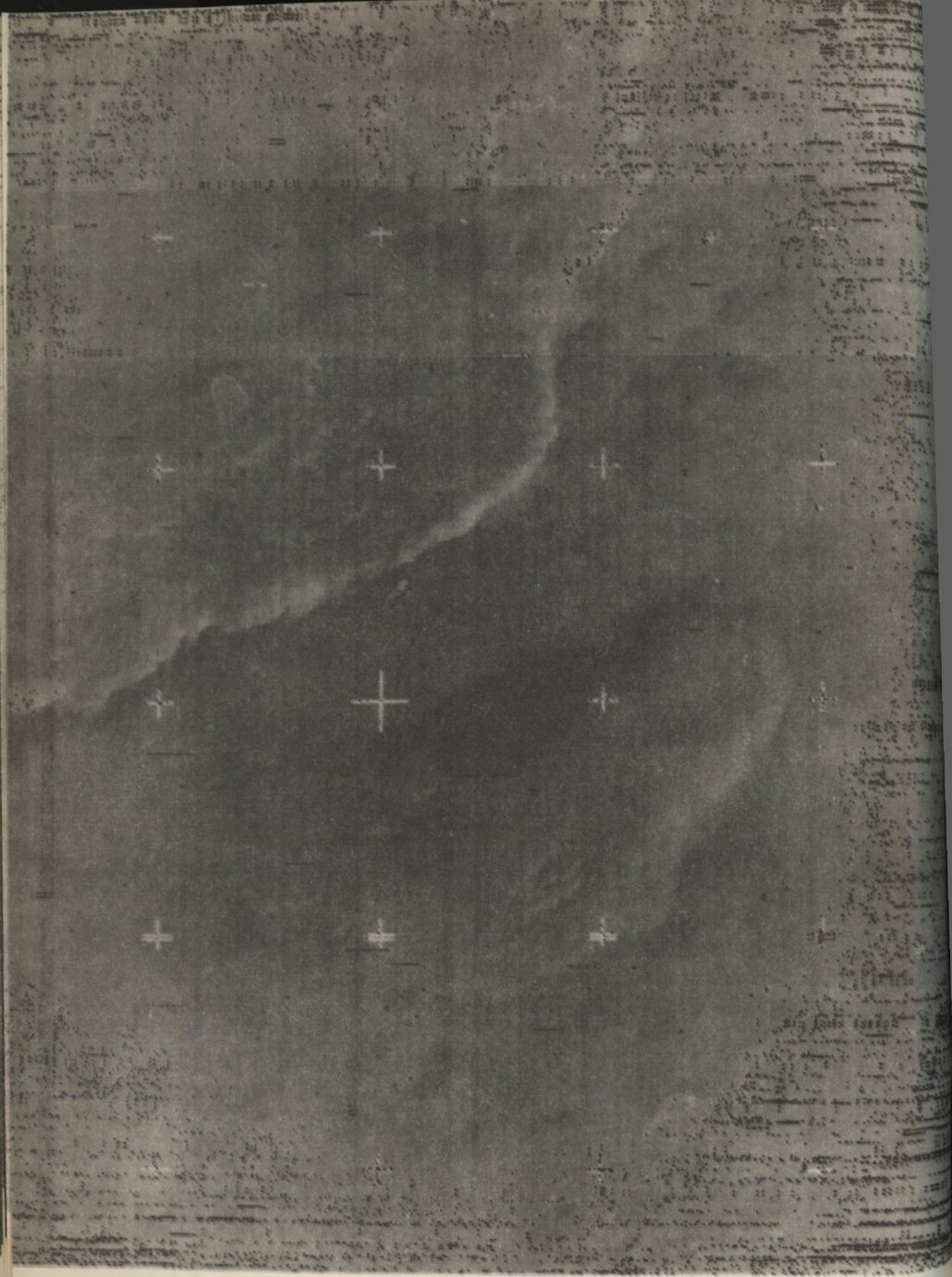


Рис. 7. Показанное на рис. 2, а изображение, воспроизведенное непосредственно с магнитной ленты, на которой были ошибки в цифровом коде. Негатив



Рис. 8. На изображении рис. 7 выравнена яркость по полю и частично подавлены нижние пространственные частоты

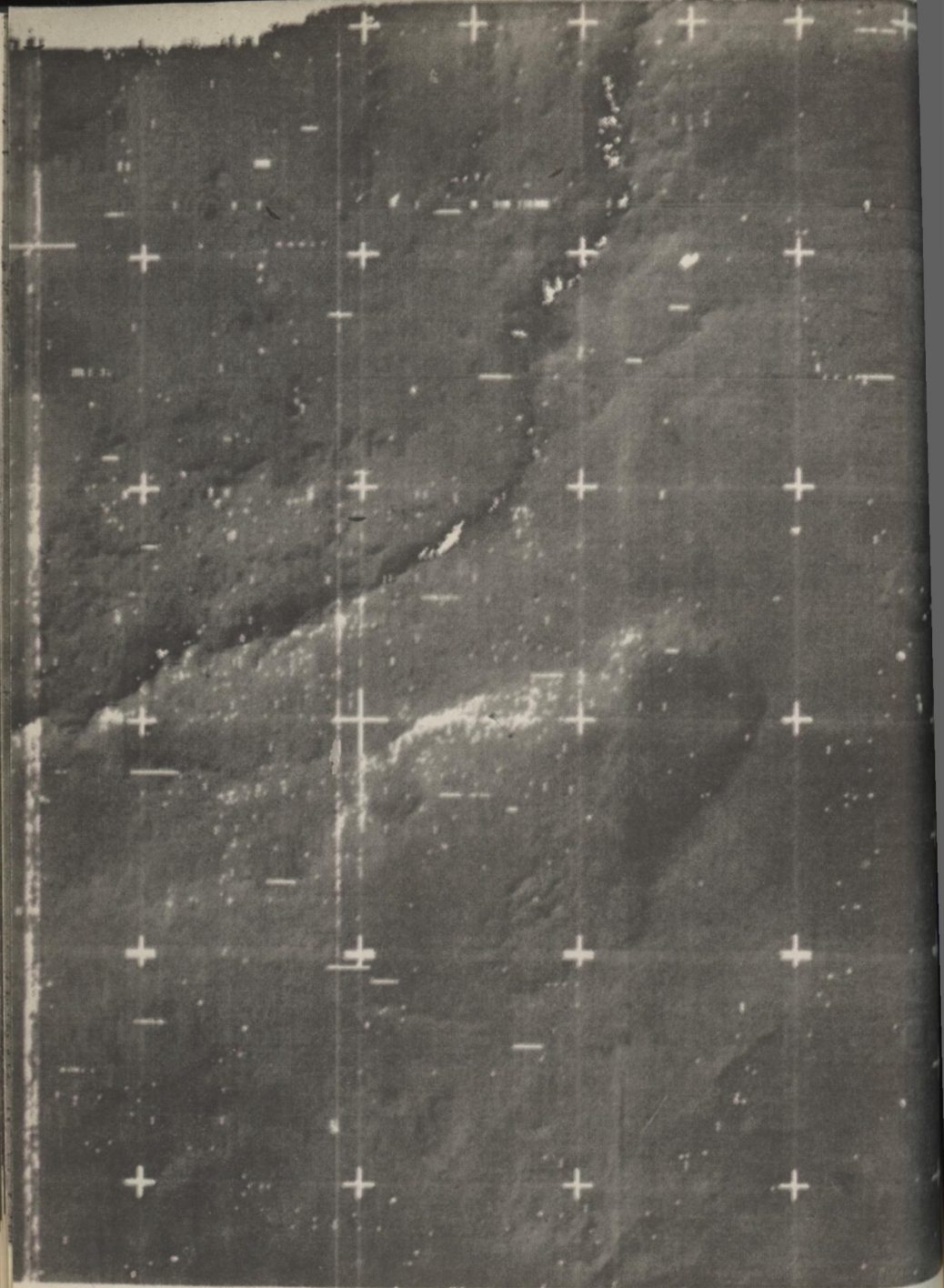


Рис. 9. На фоне изображения рис. 8 показано маску, отмечающую импульсные помехи

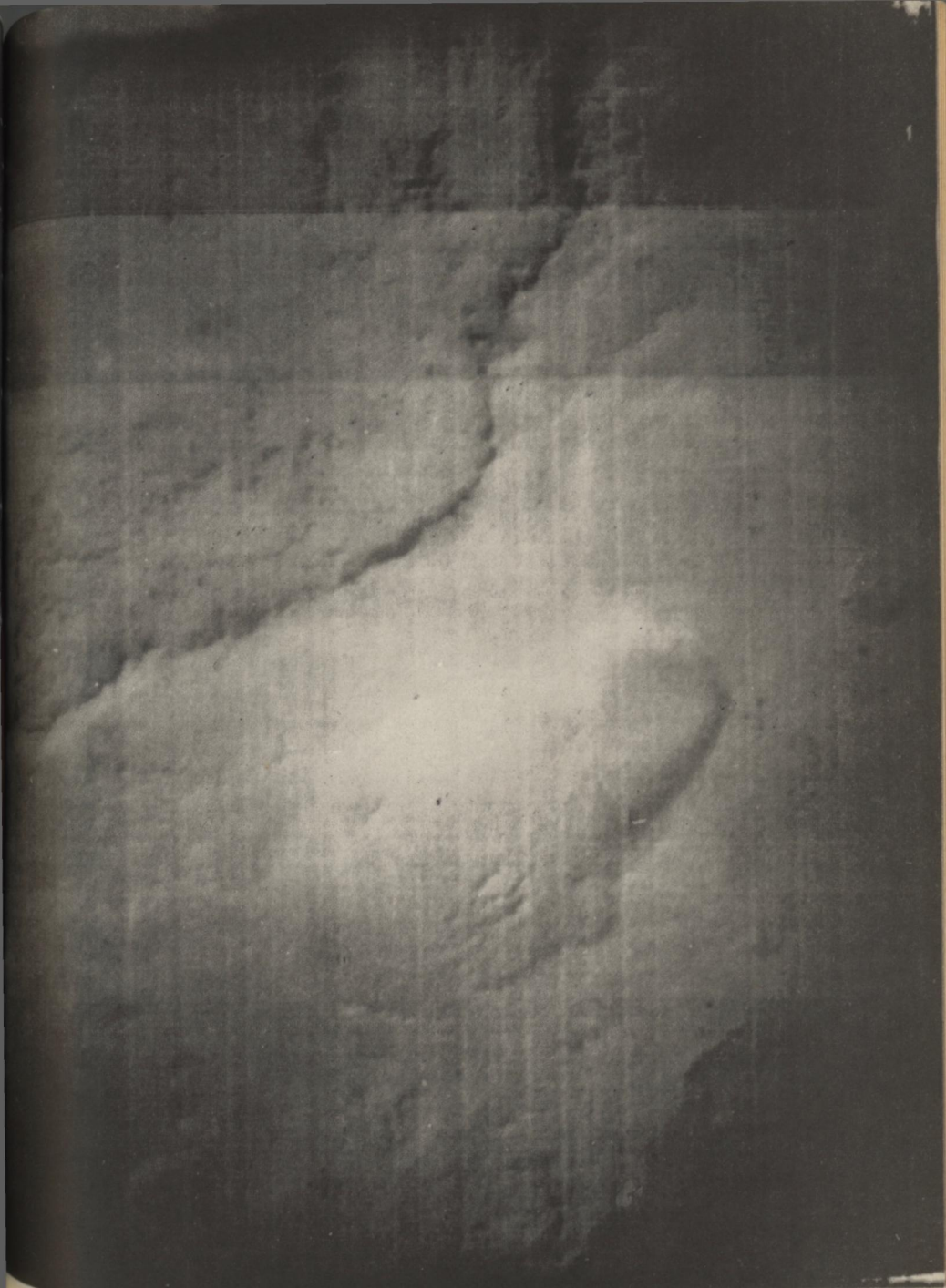


Рис. 10. Результат фильтрации изображения, показанного на рис. 2, *a*. Устранены импульсные помехи, отмеченные на изображении рис. 9

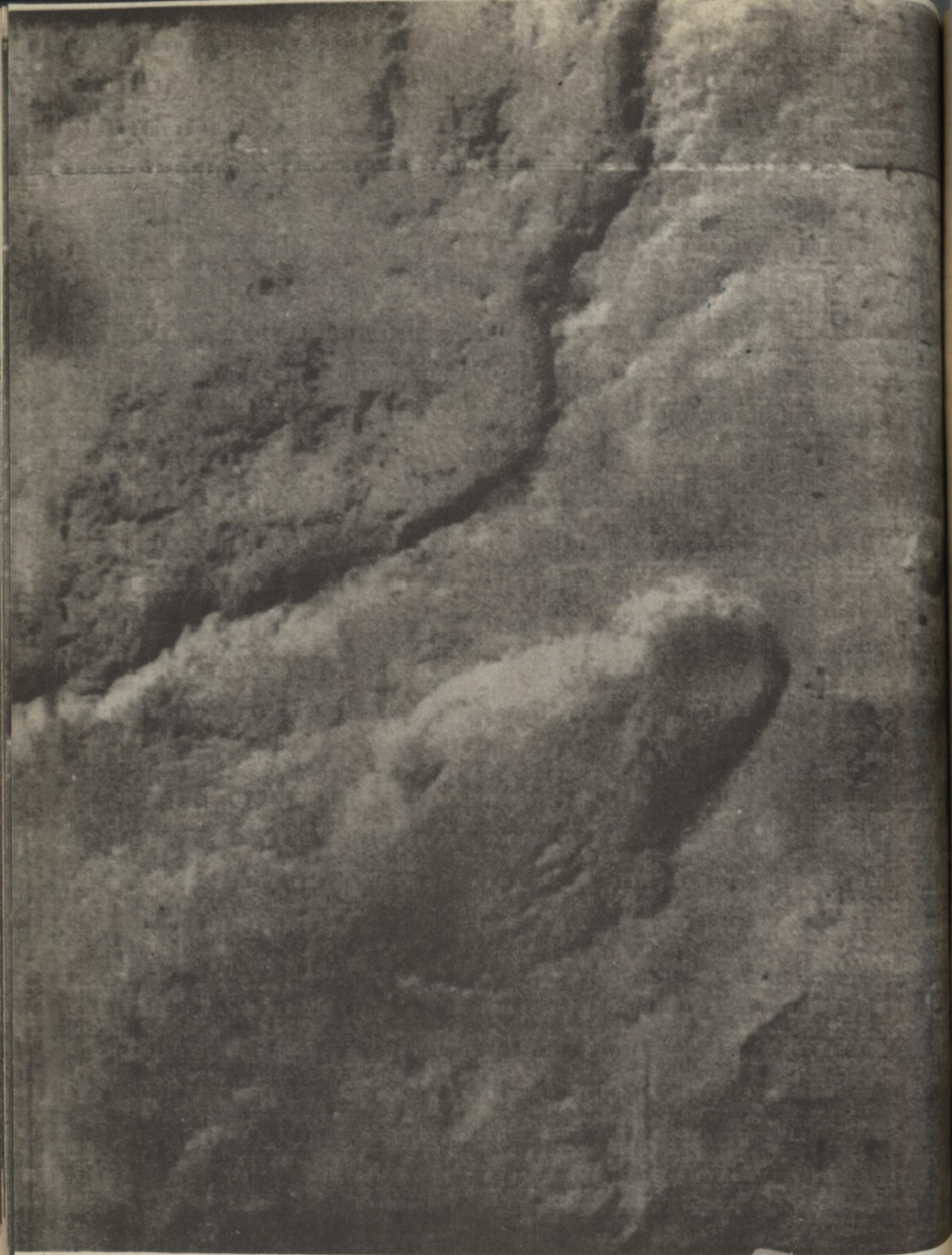


Рис. 11. Результат выравнивания яркости, частичного подавления нижних пространственных частот и устранения полос на изображении, показанном на рис. 10.

Таким образом, суммарная ошибка в определении θ для очень холодных звезд может достигать 20%.

Обратимся теперь к прямым измерениям угловых диаметров, которые не зависят от теории моделей звездных атмосфер, от абсолютной калибровки E_ν , от межзвездного поглощения.

При этом следует иметь в виду следующее. Все характеристики объекта, доступные наблюдениям с помощью приборов, которые регистрируют квадратичные по полю величины, адекватно описываются функцией взаимной когерентности. По определению $\Gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2; \tau) = \Gamma_{12}(\tau) = \langle A(\vec{r}_1, t + \tau) A^*(\vec{r}_2, t) \rangle$ (3),

где $A(\vec{r}, t)$ — комплексная амплитуда поля излучения объекта вблизи Земли (аналитический сигнал), а угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю реализаций. Величина $\Gamma_{12}(0)$, представляющая собой значение функции корреляции в двух точках пространства в одно и то же время, однозначно, посредством пространственного преобразования Фурье, связана с распределением яркости по источнику. А временное преобразование Фурье величины $\Gamma_{12}(\tau)$, выражающей корреляцию в одной точке пространства для двух значений времени, дает спектральное распределение энергии объекта. Фотометрические методы сводятся к анализу этого измеренного распределения, на основе которого выбирается модель атмосферы звезды, к расчету согласно этой модели потока H_ν и определению углового диаметра по формуле (2). При достаточном количестве априорной (конкретно-физической) информации об объекте и ее надежности подобные методы могут претендовать на определенную точность, в противном случае можно получить самые неожиданные результаты, достаточно далекие от действительности. Таковым может оказаться применение фотометрических методов к самым холодным звездам, включая звезды типа Миры Кита. Прямые же методы основаны на измерении пространственной когерентности света, приходящего от звезды, так как величина $\Gamma_{12}(0)$ определяется размерами источника. Чтобы извлечь эту информацию о размерах, так же необходима, как и при всяких измерениях вообще, априорная информация об объекте. Но в данном случае она носит самый общий характер. Примерами могут служить предположения об ограниченности источника в пространстве, о круговой симметрии распределения яркости, и, наконец, о законе распределения яркости по объекту. Вот тогда и остается один неизвестный параметр — угловой размер. Правда, для всех интерферометрических методов требование круговой симметрии в принципе необязательно. Его, в случае необходимости, можно заменить требованием центральной симметрии распределения яркости по источнику. Наглядней всего это демонстрируется на примере спекл-интерферометрии, которая имеет дело с двумерными сигналами и позволяет сравнительно просто измерять сплюснутость звезды. Следует отме-

тять, что предположения о круговой симметрии и законе распределения яркости (ограниченность источника подразумевается безоговорочно) обязательны для всех фотометрических методов. Однако учет потемнения к краю происходит в данном случае естественным образом при вычислении потока H , на основе принятой модели атмосферы.

Наличие на звезде пятен также может привести к искажению величины θ . Причем фотометрические методы, игнорируя это явление, дадут заниженные значения углового диаметра, в то время как интерферометрические — завышенные. В последнем случае измеренный угловой диаметр определяется также пространственным распределением этих пятен по диску и может меняться во времени.

Фотометрическими методами можно оценить только видимый размер фотосферы. Но, если определить радиус звезды как расстояние от центра, на котором оптическая глубина принимает значение ~ 1 , то видимый размер должен зависеть от длины волны наблюдения. Этот эффект может быть заметным у холодных звезд, в спектрах которых присутствуют мощные молекулярные полосы поглощения [2, 8]. Только прямые измерения углового диаметра в этих полосах (а также в континууме для сравнения) могут установить эффективный уровень их образования.

Программа наблюдений на 6-метровом телескопе, осуществляемая в настоящее время АО ХГУ в сотрудничестве с САО АН СССР, как раз и предполагает определение методом спекл-интерферометрии угловых диаметров красных гигантов, сверхгигантов, звезд типа Миры Кита в континууме и полосах поглощения TiO . Для переменных звезд предусматриваются синхронные измерения блеска V и показателей цвета $(V-R)$ и $(R-I)$ в системе $UBVRI$.

Как известно, метод спекл-интерферометрии основан на сравнительном анализе функций спектральной плотности короткоэкспозиционных изображений исследуемой звезды и точечного источника (звезды сравнения). Он позволяет измерять угловые диаметры звезд на дифракционном пределе крупных телескопов. Возможность экстраполяции за дифракционный предел определяется, в конечном итоге, точностью оценки спектральной плотности и априорной информацией о распределении яркости по диску звезды.

Чтобы определить объекты, угловые диаметры которых могут быть измерены со спекл-интерферометром на 6-метровом телескопе, была построена диаграмма (рис. 1). Для этого использовалась эмпирическая зависимость $F_V(V_0, \theta) - (V-R)_0$ (F_V — так называемый параметр визуальной поверхностной яркости), прокалиброванная Барнесом, Эвансом, (Б-Э) по 76 звездам, для которых имелись прямые измерения угловых диаметров [9, 10]. Полученные соотношения при известной VR фотометрии позволяют оценить угловой диаметр звезды

с точностью $\sim 15\%$. Однако, возможна дополнительная систематическая ошибка, которая, по оценкам Лэйси [11], не превышает 5% .

Хотя соотношения Б-Э предполагают использование непокрасненных звездных величин V_0 и колор-индексов $(V-R)_0$, влияние поглощения при выборе объектов не учитывалось. Но для холодных звезд $((V-R)_0 \geq 0,80^m)$: $\log \theta = 0,760 - 0,2V_0 +$

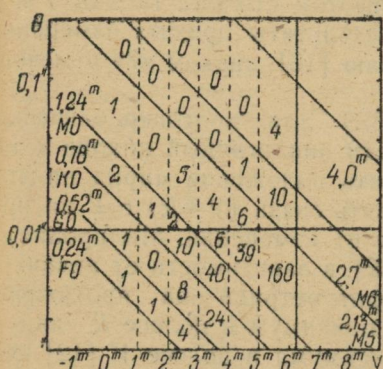
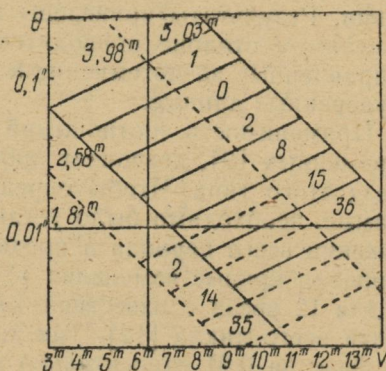


Рис. 1. Диаграмма, связывающая θ с V и $(V-R)$. Наклонные линии соответствуют соотношениям Б-Э при $(V-R) = \text{const}$. Сплошной вертикальной линией обозначен предел чувствительности спекл-интерферометра; сплошной горизонтальной линией — предел по разрешению. Числа в клетках соответствуют количеству звезд ($\delta \geq -15^\circ$), параметры V и $(V-R)$ которых заключены в пределах, ограниченных линиями

Рис. 2. Диаграмма, связывающая θ с V и $(V-R)$ для звезд типа Миры Кита. Остальные обозначения те же, что и на рис. 1. Штриховые линии относятся к миридам с $P < 300^d$.



$+0,642(V-R)_0$ (4), где θ — угловой диаметр в миллисекундах. При среднем поглощении в V , равном $1,6^m/\text{кпс}$, это приведет к систематической ошибке в угловом диаметре $\sim 15\%$ для звезд, находящихся на расстоянии ~ 1 кпс. Однако, для звезд более ранних спектральных классов, чем КО $((V-R)_0 < 0,80^m)$, эта ошибка может быть значительной, поэтому диаграмма для этих звезд носит скорее качественный характер.

Чувствительность спекл-интерферометра, установленного на БТА, в полосе $100 \text{ \AA}$ и накоплении до 200 кадров, позволяет пока регистрировать объекты до 6^m . С другой стороны, отсутствие достаточно полной фотометрической информации об объектах слабее $6,25^m$ ограничило наш анализ этим пределом (сплошная вертикальная линия на диаграмме). Рассмотрению подлежали только объекты с $\delta \geq -15^\circ$.

Опыт спекл-интерферометрии на 6-метровом телескопе показывает, что можно достаточно надежно измерить угловой диаметр, равный $0,015''$. При линейном размере $800 R_\odot$ звезда, имеющая такой угловой диаметр, находится на удалении 1 кпс.

Из-за влияния межзвездного поглощения соотношение (4) дает значение $\theta = 0,01275 \pm 0,00255''$, вместо $0,015''$. Поэтому, чтобы не потерять объекты, доступные измерению ($\theta \geq 0,015''$), предел по разрешению на диаграмме был принят равным $0,010''$ (сплошная горизонтальная линия).

На основании соотношений Б-Э были рассчитаны угловые диаметры всех звезд, находящихся на диаграмме выше этой линии. Результаты приведены в шестом столбце таблиц 1 и 2. В седьмом столбце приводятся результаты прямых измерений, исправленные за потемнение к краю [10], знаком «?» отмечены неуверенные данные.

Применимость соотношений Б-Э для долгопериодических переменных [9], позволяет провести аналогичный анализ и для звезд этого типа. Чтобы определить положение мирид на диаграмме, необходимо было установить связь $(V-R)$ с V на протяжении всего периода и пределы их изменения. Мы проанализировали кривые изменения $(V-R)$ в зависимости от величины V для 12 звезд с известной VR фотометрией на протяжении почти всего цикла [12]. Так как максимум в полосе R сдвинут по фазе на $0,01$ относительно максимума в полосе V [12], ход кривых для этапов возрастания и убывания блеска получается несколько различным. Мы пренебрегли этим различием и для каждой из 12 звезд методом наименьших квадратов получили связь V с $(V-R)$ в виде $(V-R) = kV + \text{const}$ и определили среднее значение коэффициента наклона k . Анализ был проведен отдельно для короткопериодических ($P < 300^d$) и долгопериодических ($P \geq 300^d$) мирид. Различие в k для этих групп оказалось сравнимым с внутренними ошибками, после чего обе группы были объединены и получено среднее значение k по всем 12 звездам — $0,46 \pm 0,06$.

Нижний предел изменения показателя цвета для короткопериодических (86 звезд) и долгопериодических (67 звезд) мирид был определен усреднением значений $(V-R)$ вблизи нулевой фазы, взятых из работы Барнеса [12]. Получены следующие значения: $1,81 \pm 0,40^m$ и $2,58 \pm 0,55^m$ соответственно.

Из-за отсутствия достаточного количества фотометрических наблюдений вблизи минимума, верхний предел изменения $(V-R)$ определялся следующим образом. Для звезд, по которым был определен нижний предел $(V-R)$, из каталога Кинана [13] были взяты значения m_V в средних максимумах и минимумах, и для каждой из двух групп звезд была определена средняя разность этих значений m_V . Умножая ее на k и прибавляя к нижнему пределу, мы оценили верхний предел изменения $(V-R)$, равный $3,98 \pm 0,73^m$ и $5,03 \pm 1,29^m$ для первой и второй групп соответственно.

Таким образом, мы получили возможность построить для мирид диаграмму, аналогичную диаграмме на рис. 1 (рис. 2).

1. Звезды постоянного блеска

GC	Звезда	Sp	V	V-R	$\theta_{Б-Э}$	θ	Примечание
1096	—	M7III	6,19 ^m	3,00 ^{m?}	28?	—	1
1400	β And	M0III	2,05	1,24	14,0	—	2
3547	—	M6Y?	6,10	2,70?	19?	—	1
3643	α Cet	M2III	2,52	1,34	13,1	16,0	3
5605	α Tau	K5III	0,87	1,23	23,7	21,8	3
7554	π Aur	M3,5III	4,25	1,69	10,0	—	2
8208	μ Gem	M3IIa	2,83	1,54	15,2	14,0	3
13044	α Hya	K3IIIa	1,97	1,04	10,8	—	2
15971	—	M5Y?	5,34	2,13?	11?	—	1
17543	δ Vir	M3III	3,38	1,53	11,6	—	2
19242	α Boo	K2IIIp	-0,06	0,97	24,8	24,9	3
20029	β uMi	K4III	2,08	1,11	11,4	—	2
21838	δ Oph	M1III	2,72	1,28	10,9	26,0	3
24428	—	M6III	6,22	2,70?	18?	—	1
24432	γ Dra	K5III	2,22	1,14	11,2	14,0	3
27294	—	M5III	5,35	2,13?	11?	—	1
30880	—	M5III	5,28	2,13?	12?	—	1
32401	—	M5III	5,03	2,13?	13?	—	1
32759	—	M5III	5,34	2,13?	11?	—	1

2. Переменные звезды

GC	Звезда	Sp	V	V-R	$\theta_{Б-Э}$	θ	Примечание
2426	—	M5Y?	5,50 ^m	2,13 ^m	11?	—	1
3517	RZ Ari	M6III	5,60	2,34	13,9	10,3	3
3682	ρ Per	M4III	3,32	1,79	17,6	19,0	3
6841	CE Tau	M2Ib	4,30	1,78	11,0	—	4
7451	α Ori	M2Iab	0,37	1,59	50,9	52,0	3,12
7969	G aem	M3III	3,28	1,49	11,5	—	2
12657	RS Cnc	M6III	5,95	2,89	26,6	—	4
15032	VY Leo	M5IIa	5,78	2,25	11,0	—	4
20170	RR UMi	M4,5III	4,59	1,86	10,8	—	4
22172	g Her	M6III	4,94	2,50	23,8	26,0	3
23277	α Her	M5II-Ib	3,07	2,16	34,1	37,1	3
25959	δ^2 Lyr	M4II	4,30	1,78	11,0	—	5
25996	R Lyr	M5III	3,93	2,02	18,6	21,0	3
28720	EU Del	M6III	5,84	2,32	12,0	—	6
28930	U Del	M5II	5,10	2,13?	13,0?	—	1
30440	μ Cep	M2Ia	4,17	2,10	17,9	—	5
32135	β Peg	M2II-III	2,41	1,51	17,7	20,6	3

В табл. 3 для самых ярких мирид приводятся угловые диаметры, вычисленные по соотношениям Б-Э, а также фотометрия для соответствующих фаз. В восьмом столбце помещены результаты прямых измерений.

Из диаграмм 1 и 2 видно, что, если для звезд спектральных классов, ранее чем КО, возможности спекл-интерферометрии на

3. Звезды типа Миры Кита

Звезда	<i>Sp</i>	m_X	Фаза	<i>V</i>	<i>V-R</i>	θ в д	θ	Примечание
<i>oCet</i>	M5,5e—M9,0	3,4—9,3 ^m	0,09	3,50 ^m	2,55 ^m	50	63	3, 8, 9
			0,38	7,00	4,00	85	66	3, 8, 9
<i>R Leo</i>	M7e—M9,0	5,8—10,0	0,27	7,88	4,18	74	76	3, 8, 10
χ <i>Cyg</i>	S 7,2e—M 8,2	5,2—13,4	0,99	4,30	2,41	28	—	7, 8, 11
<i>T Cep</i>	M 6,5e—M 8,5	6,1—10,1	0,98	5,38	2,86	33	—	7, 8, 11
<i>R Aql</i>	M 6,5e—M 9,0	6,2—11,5	0,01	6,19	2,66	17	—	7, 8, 11

Примечания к табл. 1, 2, 3

(1) Сп. кл. и кл. св., *V* из [14]; (*V-R*) определен по зависимости спектр-показатель цвета [15]. (2) Сп. кл. и кл. св., *V* и (*V-R*) из [16]. (3) Сп. кл., кл. св. и фотометрия для данной фазы из [10]. (4) Сп. кл., кл. св., *V* и (*V-R*) из [15]. (5) Сп. кл. и кл. св., *V* и (*V-R*) из [16]. (6) ОКПЗ для максимума дает: $m_V=5,84^m$ и $R=3,52^m$ [17]. (7) *V* и (*V-R*) из [12]. (8) Сп. кл. и звездные величины в среднем максимуме и минимуме из [13]. (9) Фазы взяты из [8]. (10) Фаза из [9]. (11) Фаза выч. по элементам из [18]. (12) Измеренный угловой диаметр взят из [2], так как он относится к континууму (см. в тексте) и определен с высокой точностью.

6-метровом телескопе ограничиваются предельным разрешением, то для холодных звезд более существенным ограничением является предел по чувствительности. Но у звезд поздних спектральных классов максимум кривой распределения энергии смещен в красную область, и переходом к наблюдениям в этом диапазоне можно расширить число объектов, доступных исследованию.

Табл. 1, 2, 3 содержат 41 объект. Диаметры 15 из этих объектов уже определены разными методами, но точность этих определений, за редким исключением, пока недостаточно высока. Кроме того, необходимы наблюдения в разных разном выбранных участках спектра, а в случае переменных звезд — и в разных фазах. Крайне важны систематические измерения звезд типа Миры Кита, охватывающие возможно больший диапазон изменений блеска. В этом отношении метод спекл-интерферометрии находится пока вне конкуренции.

Комплексное изучение даже немногочисленной группы холодных звезд с привлечением синхронных фотометрических и спектроскопических наблюдений может дать много полезной информации о строении этих объектов.

Список литературы: 1. Ridgway S. T., Wells D. C., Joyce R. R. Angular diameters for 11 late-type stars by the lunar occultation technique. — *Astrophys. J.* 1977, 82, No 6, p. 414—430. 2. Wilkerson M. S., Worden S. P. Further speckle interferometric studies of α Orionis. — *Astron. J.*, 1977, 82, No 8, p. 642—645. 3. Worden S. P. The angular diameter of α Herculis A. — *Astrophys. J.*, 1975, 201, No 2, Part 2, L 69—L 70. 4. Blackwell D. E., Shal-

lis M. J. Stellar angular diameters from infrared photometry. Application to Arcturus and other stars; with effective temperatures. — Mon. Not. R. astr. Soc., 1977, 180, No 1, p. 177—191. 5. Scargle J. D., Strecker D. W. Cool stars: effective temperatures, angular diameters and reddening determined from 1—5 micron flux curves and model atmospheres. — Astrophys. J., 1979, 228, No 3, p. 838—853. 6. Wing R. F. Mira variables: an informal review. — Contributions from the Perkins observatory, 1979, ser. II, No 80, 34 p. 7. Johnson H. L. The absolute calibration of the Arizona photometry. — Comm. Lunar Planetary Lab., 1965, 3, No 53, p. 73—78. 8. Labeyrie A., Koechlin L., Bonneau D., Blazit A., Foy R. Strong TiO-related variations in the diameters of Mira and R. Leonis. — Astrophys., J., 1977, 218, No 2, L75—L78. 9. Barnes T. G., Evans D. S. Stellar angular diameters and visual surface brightness-I — Mon. Not. R. astr. Soc., 1976, 174, No 3, p. 489—502. 10. Barnes T. G., Evans D. S., Moffett T. J. Stellar angular diameters and visual surface brightness — III. An Stellar Angular diameters and visual surface brightness — III. An improved definition of the relationship. — Mon. Not., R. astr. Soc., 1978, 183, p. 285—304. 11. Lacy C. H., Radii of nearby stars: an application of the Barnes Evans relation. — Astrophys. J. Suppl. Ser., 1977, 34, No 4, p. 479—492. 12. Barnes T. G. An observational study of Mira variables. I. The near-infrared photometry. — Astrophys. J. Ser., 1973, 25, No 221, p. 369—392. 13. Keenan P. C. A catalogue of spectra of Mira Variables of types Me and Se. — Contributions from the Perkins observatory, 1966, ser. I, No 70, 46 p. 14. Фотометрический и спектральный каталог ярких звезд/Н. С. Комаров, А. В. Драгунова, В. Ф. Карамыш, Л. Ф. Орлова. — К.: Наук. думка, 1979. — 536 с. 15. Lee T. A. Photometry of high — luminosity M-type stars. — astrophys. J., 1970, 162, No 1, Part 1, p. 217—238. 16. Куликовский П. Г. Каталог всех звезд ярче 4,5^m в системе V/Справочник любителя астрономии. — М.: Наука, 1971. — 632 с. 17. Второе дополнение к третьему изданию общего каталога переменных звезд/Б. В. Кукаркин, П. Н. Холопов, Ю. Н. Ефремов и др. — М.: Наука, 1974. — 413 с. 18. Астрономический календарь. Постоянная часть. — М.: Наука, 1973. — 728 с.

Поступила в редколлегию 05.08.80.

УДК 520.82

В. Н. УВАРОВ

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АПЕРТУРНОГО РАСЩЕПИТЕЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНУЮ АТМОСФЕРУ

Основным фактором, ограничивающим разрешение астрономических телескопов с апертурой более 10—20 см, является земная атмосфера, создающая амплитудно-фазовое возмущение светового поля, вследствие чего значительно ухудшается способность системы атмосфера — телескоп передавать информацию в области высоких пространственных частот. В результате происходит падение контраста и замытие мелких деталей изображения.

В последнее время появился ряд методов видения через турбулентную атмосферу [1]. Однако большинство из них требует знания обычно неизвестной передаточной функции, связанной с атмосферой. В связи с этим наиболее перспективным

представляется метод синтеза неискаженного изображения объекта по его парциальным изображениям [2, 3]. Сущность этого метода заключается в том, что каждое парциальное изображение получают с помощью безыбыточной апертурной маски, представляющей собой непрозрачный экран с набором отверстий, размер которых меньше пространственного радиуса корреляции оптических неоднородностей атмосферы. Взаимное расположение пар отверстий не повторяется. При этом окна пропускания в области пространственных частот не перекрываются.

Считая фазовое возмущение Δ_i на i -м отверстии маски в первом приближении постоянной величиной, можно для каждого частотного окна записать уравнение, связывающее регистрируемую фазу $\varphi(f)$ компоненты Фурье изображения с невозмущенной фазой $\psi(f)$: $\varphi(f) = \psi(f) + \Delta_i - \Delta_j$ (1).

Для одной маски это позволяет записать недоопределенную систему $l(l-1)/2$ уравнений вида (1) с $l(l-1)/2 + (l-1)$ неизвестными невозмущенными фазами и фазовыми возмущениями.

Поскольку область пропускания пространственных частот безыбыточной апертурной маски меньше области пропускания полной апертуры, то для получения изображений во всем диапазоне частот полной апертуры необходимо использовать несколько масок разной конфигурации, чтобы сделать систему уравнений (1) определенной. Решение ее восстановит неискаженное изображение.

Названный метод, по существу, является последовательным и обладает низкой чувствительностью, так как маски пропускают малую часть потока. Все это побудило авторов [1] отнести его к числу представляющих «только академический интерес».

Однако можно предложить свободную от этих недостатков модификацию метода, которая заключается в том, чтобы осуществить параллельную регистрацию парциальных изображений через все необходимые апертурные маски, используя одновременно всю апертуру телескопа. Для этого нужно выполнить следующие условия.

Во-первых, необходимо выделить на апертуре безыбыточные маски, обеспечивающие полное покрытие как апертуры телескопа, так и требуемой области пространственных частот.

Практически расчеты таких структур убеждают в возможности таких разбиений, хотя корректный анализ вопроса о существовании представляет трудности.

Можно показать, что максимальное число элементов в безыбыточной маске не меньше, чем $(2n)^{1/3}$, где n — полное число субапертур. Если предположить, что на апертуре можно выделить безыбыточные маски с числом субапертур порядка $n^{1/3}$, то число масок будет порядка $n^{2/3}$. Вклад отдельной маски в ча-

стотной плоскости составит величину порядка $n^{2/3}$. Их суммарный вклад составит величину порядка $n^{1/3}$, в то время как для полной апертуры число различных пространственно-частотных участков равно $2n$. Таким образом, требуемая степень переопределенности может быть достигнута при большом n .

Во-вторых, необходимо обеспечить возможность раздельной регистрации изображений от каждой маски. Это может быть достигнуто несколькими способами.

В качестве примера кратко опишем одно из устройств, реализующих эти требования. Это так называемый апертурный расщепитель изображений, представляющий собой мозаичную структуру. Он устанавливается в выходном зрачке телескопа и содержит избыточные наборы оптических элементов. Каждый такой набор фактически является объективом, формирующим парциальное изображение. При этом элементы одного набора не содержат пар элементов, взаимное расположение которых повторяется, а размер каждого элемента не превышает радиус корреляции оптических неоднородностей в масштабе зрачка. Это обстоятельство позволяет в каждом парциальном изображении устранить замытие, обусловленное совместным действием неоднородной атмосферы и избыточности апертуры. Для того, чтобы устранить взаимные помехи разных парциальных изображений, оптические оси разных наборов поступательно смещены относительно друг друга. В результате этого парциальные изображения не перекрываются. Элементы расщепителя имеют равные проекции на апертурную плоскость. Поэтому центры элементов являются узлами плоской периодической решетки, содержащей n узлов и разбитой на избыточные наборы, каждый из которых содержит в среднем l узлов.

Следует заметить, что шум, обусловленный действием неоднородной атмосферы, и шум фоторегистратора по-разному сказываются на результирующем изображении. Более того, воздействие атмосферного шума существенным образом зависит от вида входной апертуры и метода получения изображения. В связи с этим целесообразно оценить эффективность разных способов формирования изображений с учетом специфики шумов.

Для этого рассмотрим изображение небесного объекта (полное или парциальное), зарегистрированное матричным фотодетектором (фотоэмульсией или фотокатодом), содержащее Q фотоотсчетов, где $Q = \eta I \frac{\pi d_0^2}{4} \Delta \lambda l$ (2); η — квантовый выход фотодетектора; $I \frac{\pi d_0^2}{4} \Delta \lambda$ — число фотонов, поступающих через одну субапертуру.

Число элементов дифракционного разрешения в изображении

$$N = \frac{O^2}{(\lambda/D)^2} = O^2 (d_0/\lambda) \cdot \eta, \quad (3)$$

где O — угловой диаметр объекта; d_0 — линейный размер суб-апертуры; λ — длина волны света.

Поскольку регистрация изображения — случайный процесс, то среднее число фотоотсчетов в элементе q равно квадрату среднего значения сигнал-шум $k_0 q = k_0^2 = Q/N = I \frac{l}{n} \beta$ (4),

$$\text{где } \beta = \frac{\eta \cdot \Delta \lambda \cdot k^2 \cdot \pi}{O^2 \cdot 4}.$$

В том случае, если сигнал представлен изменением числа фотоотсчетов Δq_c на фоне q , то отношение сигнал-шум в этом случае

$$k^2 = \frac{(\Delta q_c)^2}{(\Delta q_\phi)^2} = \frac{(\Delta q_c)^2}{q^2} \cdot \frac{q^2}{(\Delta q_\phi)^2} = c^2 k^2 = c^2 I \frac{l}{n} \beta, \quad (5)$$

где c — контраст изображения; Δq_ϕ — флуктуации фона.

Для оценки чувствительности разных методов необходимо использовать максимально достижимое значение контраста, определяемое частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) инструмента.

Для телескопа, не подверженного действию атмосферы, все избыточные квазикомпоненты суммируются с точностью, которая обеспечивается качеством оптики и не зависит от яркости источника. В этом случае ($c_{\max} = T(f)$, $l = n$)

$$K_{\text{св}} = T(f) \sqrt{I \beta}, \quad (6)$$

где $T(f)$ — ЧКХ инструмента.

Воздействие атмосферных шумов приводит к необратимому разрушению оптического согласования избыточных компонент. При этом энергия изображения в окрестности частоты f ослабляется в $n \cdot T(f)$ раз [4]. Тогда $c_{\max}^2 = T(f)/n$, $l = n$)

$$K_{\text{атм}} = \sqrt{I \beta / n}. \quad (7)$$

Использование безыбыточной маски устраняет замышающее воздействие атмосферного шума, однако из-за уменьшения светового потока значение сигнал-шум ухудшается. В этом случае ($c_{\max} = 1/l$, $n > l$)

$$K_{\text{маск}} = \sqrt{T(f) \cdot I \cdot \beta / n}, \quad (8)$$

мощность изображения и минимальная интенсивность почти не зависят от воздействия атмосферы.

Приближенную оценку эффективности расщепителя можно сделать, заметив, что апертурный расщепитель фактически объединяет n/l апертурных масок и во столько же раз в среднем увеличивает число измерений

$$k_{\Sigma} = k_{\text{маск}} \sqrt{n/l} = \frac{V/\beta}{l}. \quad (9)$$

Поскольку $l \approx n^{1/3}$ [5], то из (6), (7) и (9) видно, что отношение сигнал-шум оказывается хуже, чем для внеатмосферного телескопа, но существенно лучше, чем для телескопа в атмосфере. Причем выигрыш в звездных величинах Δm тем больше, чем больше диаметр телескопа D $\Delta m \sim 1.6 \log D$ (10).

Это позволяет считать использование расщепителей на современных крупных телескопах перспективным для повышения их информативности.

Особенно эффективно использовать расщепитель в совокупности с разрабатываемыми в настоящее время гигантскими наземными телескопами диаметром $D \geq 20$ м. Подобные зеркала неизбежно должны обладать сильными аберрациями. Применение расщепителя дает возможность устранить фазовые ошибки, вызывающие аберрации, наряду с ошибками атмосферы и тем самым позволяет достичь дифракционного предела разрешения.

При создании сверхгигантских оптических телескопов в космосе использование подобных расщепителей будет более экономично, чем использование чрезвычайно сложных прецизионных систем контроля и управления главного зеркала,

Список литературы: 1. Методы обработки световых полей при наблюдении объектов через турбулентную среду/П. А. Бакут, Н. Д. Устинов, И. Н. Троцкий, К. Н. Свиридов. — Зарубежная радиоэлектроника, 1976, № 7, с. 15—42. 2. Rogstad D. H. A technique for measurement of visibility phase at optical interferometer in presence of atmospheric seeing appl. opt. 1968, N 7, p. 585—588. 3. Rhodes W. T., Goodman J. W. Interferometric technique for recording and restoring images degraded by unknown aberration. — J. opt. soc. am., 1973, 63, N 6, p. 647—657. 4. Roddier F. Speckle interferometry through smool multiple apertures: michelson stellar interferometer and aperture synthesis in optic. — opt. communs., 1973, 10, N 1, p. 103—105. 5. Уваров В. Н. О возможности получения изображений с дифракционным разрешением при наблюдении сквозь неоднородную атмосферу. — Докл. АН УССР, 1979, № 10, А, с. 839—841.

Поступила в редколлегию 05.08.80.

ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗАТМЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ СИСТЕМ (РЕЗУЛЬТАТЫ МАШИННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Моделированию спектра мощности затменных систем уже было посвящено ряд работ [1, 2, 3]. В них рассматривалась возможность измерения диаметров компонентов методом спекл-интерферометрии [3], а также изменение пространственного спектра мощности интересующих объектов в зависимости от относительного положения компонентов (фазы затмения) [1, 2].

В статье рассматриваются вопросы машинного моделирования ожидаемого спектра мощности затменных переменных систем, обсуждаются требования, предъявляемые к точности обсуждаемой методики, вероятные отклонения результатов моделирования от реальных физических характеристик звездных или субзвездных систем [4].

Теоретические предпосылки. Смысл спекл-интерферометрии сводится к восстановлению квадрата модуля пространственного спектра распределения яркости по изучаемому объекту — $|f(\rho)|^2$ до граничной частоты телескопа (ρ_D).

В случае затменной системы (модель однородного диска) можно получить ожидаемый вид функции $|f(\rho)|^2$, применяя оператор Фурье—Бесселя к разности двух круговых функций (одна — единичная, другая характеризуется величинами n и k) с учетом фазового множителя $\exp(-2\pi i a u)$ (a — расстояние между центрами круговых функций, выраженное через отношение диаметров компонентов, u — компонент вектора линейной пространственной частоты, вдоль которой сдвинуты круговые функции

$$|f(\rho)|^2 = \frac{1}{4\rho^2} [J_1^2(\pi\rho) - 2nk \cos(2\pi a u) J_1(\pi\rho) J_1(\pi n\rho) + n^2 k^2 J_1^2(\pi n\rho)], \quad (1)$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода; $\rho^2 = u^2 + v^2$, u и v — компоненты вектора линейной пространственной частоты; n и k — отношения диаметров и поверхностных яркостей затменного компонента к видимому, соответственно.

Можно сконструировать, по крайней мере, две функции, с помощью которых можно характеризовать наличие затменного компонента на диске звезды. Первая из них, образованная как разность между спектрами мощности звезды с компонентами и без него:

$$\Delta f(u, v) = \frac{1}{\langle |g(u, v)|^2 \rangle} \left[\frac{|f(u, v)|^2}{|f(u_0, v_0)|^2} \langle |g(u, v)|^2 \rangle - \right.$$

$$-\frac{|f_*(u, v)|^2}{|f_*(u_0, v_0)|^2} < |g(u, v)|^2 > \Big] = \frac{|f(u, v)|^2}{|f(u_0, v_0)|^2} - \frac{|f_*(u, v)|^2}{|f_*(u_0, v_0)|^2}, \quad (2)$$

вторая — как их частное:

$$G(u, v) = \frac{|f(u, v)|^2 < |g(u, v)|^2 > |f(u_0, v_0)|^2}{|f_*(u, v)|^2 < |g(u, v)|^2 > |f_*(u_0, v_0)|^2} = \frac{J_1^2(\pi\sqrt{u^2+v^2}) - 2nk \cos(2\pi au) J_1(\pi\sqrt{u^2+v^2}) J_1(\pi n \times \times \sqrt{u^2+v^2}) + n^2 k^2 J_1^2(\pi n \sqrt{u^2+v^2})}{J_1^2(\pi\sqrt{u^2+v^2})} = \frac{1}{G(u_0, v_0)}, \quad (3)$$

где $|f_*(u, v)|^2$ — спектр мощности звезды без компонента; $< |g(u, v)|^2 >$ — оптическая передаточная функция телескоп + атмосфера; $f(u_0, v_0)$, $f_*(u_0, v_0)$ и $G(u_0, v_0)$ — значения функций при $u=v=0$.

При использовании формулы (3) следует иметь в виду, что она непрерывна только для объектов с угловым диаметром $d_{\text{рад}} < d_k = 2 \cdot 1,22 \lambda / D$, где λ — длина волны наблюдения, D — диаметр апертуры телескопа. Для объектов с $d > d_k$ функция (3) терпит разрывы соответственно в корнях функции Бесселя $J_1^2(\pi\sqrt{u^2+v^2})$.

Результаты моделирования. Вычисление производилось для 900 точек, что с учетом симметрии пространственного спектра соответствует 3600 значениям функции. Находились функции (2), (3), для значений $n=0,1, 0,25, 0,5$; $k=1$ и $k \neq 1$, при фазе затмения $a=0$ и $a=(1-n)/2$, что соответствует нахождению затменного компонента в центре и на лимбе звезды, соответственно. При $a=0$ функции (2), (3) обладают осевой симметрией. Этот случай можно отдельно не определять, поскольку значения функций реализуются при любом a , если $u=0$ ($\Delta f(u, v)|_{a=0} = \Delta f(0, v)|_{a \neq 0}$; $G(u, v)|_{a=0} = G(0, v)|_{a \neq 0}$). Функции считались до граничной частоты $\rho_D = 0,5 \cdot 1,22 \lambda / D$, что соответствует дифракционному разрешению телескопа.

Проведенные расчеты показали, что можно обнаружить затменные компоненты, установить их размеры, а также сделать вывод относительно чувствительности спекл-интерферометрии (см. табл.).

Некоторые результаты машинного моделирования представлены на рисунках 1—4: функции (2) — рис. 1, функции (3) — рис. 2, 3. На рис. 4 также представлена функция $G_{\text{пр}} =$

Точность обработки	Контраст k	Предельно обнаружимый компонент $n(d_k = 1,22\lambda/D)$
$\sim 1\%$	1,0	$\geq 0,1 d_k$
$\sim 1\%$	$0,25 \div 0,5$	$\geq 0,25 d_k$
$\sim 3\%$	$\geq 0,25$	$\geq 0,5 d_k$
$\sim 5\%$	1,0	$\geq 0,25 d_k$
$5 \div 10\%$	$\geq 0,5$	$\geq 0,5 d_k$

$=G_{nr}(k)$ для $n=0,25, 0,5$ при $\rho=0,5, 1,0$ (общий вид ее не представлен, поскольку может быть легко получен из функции (3)).

Наличие достаточной информации об исследуемом космическом объекте даст возможность по его спектру мощности (полученному с известной точностью) добиться разрешения, превышающего критерий Релея.

Расчеты, проведенные в данной работе, верны для любого большого телескопа, с помощью которого могут измеряться угловые диаметры звезд на пределе дифракционного разрешения.

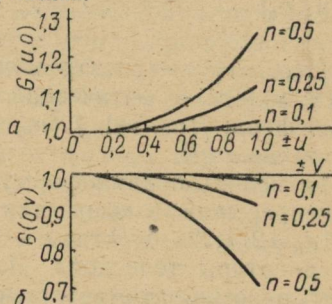
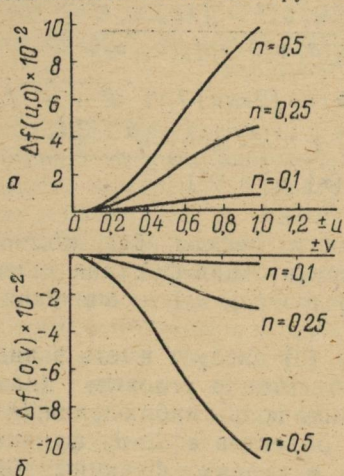


Рис. 1. Нормированная на нулевую пространственную частоту функция $\Delta f(u, v)$ ($a=(1-n)/2, k=1$); а — $\Delta f(u, 0)$, б — $\Delta f(0, v)$; $u=v=1,0$ — граничная частота

Рис. 2. Нормированная на нулевую пространственную частоту функция $G(u, v)$ ($a=(1-n)/2, k=1$); а — $G(u, 0)$, б — $G(0, v)$; $u=v=1,0$ — граничная частота

Анализ других методов, где для аналогичных задач используется кривая блеска яркого компонента, показал, что требования к точности в нашем случае несколько меньше.

Наличие потемнения к краю не изменит принципиально полученный результат. Функция Бесселя, входящая в выражения (2), (3), образовалась

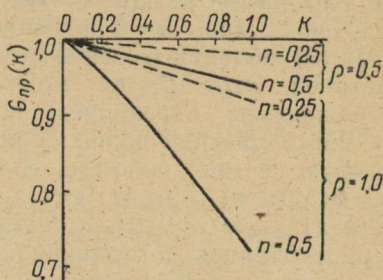
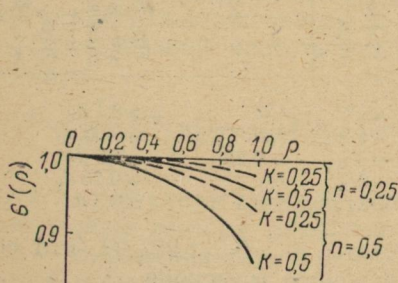


Рис. 3. Нормированная на нулевую пространственную частоту функция $G'(\rho)$ ($k \neq 1$); $\rho=1,0$ — граничная частота

Рис. 4. Нормированная на нулевую пространственную частоту функция $G_{nr}(k)$

из-за действия оператора Фурье—Бесселя на круговую функцию (выполняющую роль распределения яркости до диска звезды) $B\{circ(2r)\}=J_1(\pi r)$. Следовательно, в функциях (2), (3) необходимо будет выполнить замену $B\{circ(2r)\}=J_1(\pi r)$ на выражение B {функция потемнения к краю}.

Коэффициент контрастности выбирается так, чтобы при $k=1$ чувствительность функции (1) к затменному компоненту была максимальной, а при $k=0$ отсутствовала вовсе. Тогда его можно ввести равным $k=$

$$\frac{I_{\text{в}}(\lambda_{\text{эфф}}) - I_{\text{т}}(\lambda_{\text{эфф}})}{I_{\text{в}}(\lambda_{\text{эфф}})}, \quad \text{где } I_{\text{в}}(\lambda_{\text{эфф}}) \text{ и } I_{\text{т}}(\lambda_{\text{эфф}}) — \text{интенсивности видимого}$$

и затменного компонентов на эффективной длине волны $\lambda_{\text{эфф}}$, соответственно. Эффективная длина волны наблюдения должна быть такой, чтобы $k > 0,5$ (для планет это требование выполняется автоматически, поскольку они являются непрозрачным экраном на фоне звезды, т. е. $k=1$). Если имеется априорная информация об измеряемой затменной системе, касающаяся их спектральных классов и светимостей, то оптимальный спектральный интервал может быть найден.

Использование обсуждаемой методики предполагает два наблюдения: первое — в момент покрытия, второе — когда компонент отсутствует на диске звезды. Первому наблюдению соответствует главный минимум кривой блеска субзвездной или звездной систем. При достижении точности в измерении спектральной плотности $\sim 1\%$, существует принципиальная возможность обнаружения прохождения планет по диску звезд. Момент прохождения планеты по диску звезды можно предсказать по кривой лучевых скоростей, полученной с точностью $\sim 5\text{—}10$ м/с. Как доказывают в [5], требуемая точность в определении лучевых скоростей достигается при измерениях ее поляриметрическим измерителем, где высокая точность обеспечивается калибровкой по эмиссионным линиям спектра сравнения.

С созданием более чувствительной аппаратуры круг задач можно значительно расширить. Звезды, имеющие неправильный период изменений блеска, исследуются на наличие у них на поверхности больших пятен. Метод используется для измерения диаметров спутников планет Солнечной системы, в частности спутника Плутона, для наблюдения стадии расширения и отделения светящихся оболочек у звезд на разных этапах развития (где выполняются условия $k > 1$, $a = 0$).

Список литературы: 1. Захожай В. А. К вопросу определения диаметров компонентов затменных переменных звезд. — Вестн. Харьк. ун-та, 1978, № 176. Физика Луны и планет. Фундаментальная астрометрия, вып. 13, с. 85—91. 2. Захожай В. А. Применение когерентной оптической системы к поиску холодных спутников у звезд. — Астрометрия и астрофизика, 1979, № 37, с. 85—88. 3. Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images. — Astron. and astrophys., 1970, 6, p. 85—87. 4. Александров Ю. В., Захожай В. А. Что такое планеты. — Астрон. вестник, 1980, 14, № 3, с. 129—132. 5. Serkowski K. Feasibility of a search for planets around solar-type star with a polarimetric radial velocity meter. — Icarus, 1976, 27, No 1, p. 13—24.

Поступила в редколлегию 05.08.80.

УДК 523.39

Д. Г. СТАНКЕВИЧ

ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ЦВЕТА ЛУНЫ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время снизился интерес к фотографической фотометрии в связи с недостаточной точностью классических фотографических методов. Источником ошибок являются низ-

кая фотометрическая точность фотоэмульсии в случайном отношении, наличие многих трудноучитываемых систематических ошибок, краевые эффекты и нелинейность характеристической кривой. Дальнейшая фотографическая обработка производится обычно с получением копий исходного снимка, применением эффекта Сабатье для выделения изолиний и т. д. При этом неизбежно вносятся новые ошибки.

Однако в качестве первичного приемника излучения фотоэмульсия сохраняет ряд преимуществ перед фотоэлектрическими приемниками. Являясь полностью параллельным приемником, она превосходит все иные по пропускной способности, что сокращает время наблюдения и, тем самым, снижает требования к постоянству условий наблюдения. Фотоэмульсия остается непревзойденной и по плотности записи информации, достигающей на мелкозернистых эмульсиях 10^5 — 10^6 бит/мм². Все это вместе с простотой фотографических наблюдений делает привлекательными методы, в которых фотопластинке оставлена лишь роль первичного приемника излучения, а вся последующая обработка производится цифровыми методами. Цифровая обработка изображений может исправить систематические ошибки фотоэмульсии, практически не внося новых ошибок. Для повышения точности в случайном отношении необходимо производить усреднение по большому числу снимков.

При вводе в ЭВМ изображение представляется в виде массива отсчетов пропускания фотопластинки в узлах некоторого (обычно прямоугольного) раstra. При этом положение и ориентация его относительно раstra могут быть различными на разных снимках. Для усреднения изображений необходимо установить соответствие между отсчетами в разных изображениях — совместить их.

В общем случае два изображения неизменяющегося объекта могут отличаться сдвигом, поворотом и неравенством масштабов. В практике астрономических наблюдений масштаб остается обычно неизменным с высокой точностью. Вполне возможно предотвратить и поворот фотопластинки как относительно объекта съемки, так и относительно раstra, в котором пластинка фотометрируется. Сдвиг изображения контролировать с нужной точностью практически невозможно. Устранять его приходится на этапе цифровой обработки. При этом параметры могут быть определены либо человеком-оператором, отождествляющим на экране дисплея характерные детали изображения, либо чисто программным способом, основанным на поиске экстремума некоторой функции, характеризующей качество совмещения двух изображений. Учитывая, что последние содержат

шум, в качестве критерия совмещения можно использовать корреляционную функцию совмещаемых изображений:

$$K(\xi, \eta) = \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m a(x, y) \cdot b(x - \xi, y - \eta),$$

где x, y — координаты в плоскости изображения; $a(x, y)$, $b(x, y)$ — значения яркости в первом и втором изображениях соответственно; ξ, η — параметры сдвига.

Как известно, максимум $K(\xi, \eta)$ достигается при наиболее вероятных значениях ξ и η в том случае, если шум распределен по закону Гаусса.

С точностью до сложения с константой и умножения на -2 совпадает с корреляционной функцией другой критерий — интеграл от квадрата разности

$$k(\xi, \eta) = \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m [a(x, y) - b(x - \xi, y - \eta)]^2 = \\ \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m [a^2(x, y) + b^2(x - \xi, y - \eta)] - 2K(\xi, \eta).$$

К сожалению, вычисление этих функций сопряжено с умножением, которое выполняется в универсальных ЭВМ медленнее других операций, что приводит к затрате чрезмерного времени на совмещение.

Сократить вычисления позволяет предлагаемый в качестве критерия интеграл от модуля разности совмещаемых изображений:

$$k'(\xi, \eta) = \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m |a(x, y) - b(x - \xi, y - \eta)|.$$

Этот критерий достигает минимума при вероятнейшем значении параметров сдвига в том случае, если шум распределен по экспоненциальному закону. Недостатком $k'(\xi, \eta)$ является неаналитичность в точке минимума, так как

$$k'(\xi, \eta) = \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m |a(x, y) - b(x - \xi, y - \eta)| = \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^m |a(\vec{M}) - \\ - b(\vec{M} - \vec{\mu}_0) + \frac{db}{d(\Delta\mu)} |\Delta\mu| = C + mn \left| \frac{db}{d(\Delta\mu)} \right| \cdot |\Delta\mu|,$$

где $\vec{M}$ — вектор в плоскости изображения; $\vec{\mu}$ — вектор сдвига;

μ_0 — сдвиг, соответствующий наилучшему совмещению и $\Delta\mu = \mu - \mu_0$.

Таким образом, функция $k'(\xi, \eta)$ имеет коническую особенность в точке минимума, что делает неприменимыми обычные методы поиска экстремума функций. Однако и в этом случае поиск минимума осуществляется достаточно легко. Например, если считать $k'(\xi, \eta)$ в окрестности минимума эллиптическим конусом, характеризующимся 6 параметрами, то по 6 значениям $k'(\xi, \eta)$ можно определить его уравнение, а значит, и координаты вершины, т. е. решить задачу совмещения.

Предложенный метод применен в статье к построению карты цвета Луны (см. вклейку, рис. 1). Исходные снимки получены 24.01.78. в $18^h 10^m \div 18^h 15^m$ всемирного времени. Фаза Луны на момент съемки — $6,8^\circ$, зенитное расстояние $z=42^\circ$, параметры либрации $\beta=5,6^\circ$, $\lambda=-1,8^\circ$. Инструментом служил рефрактор Цейсса $D=130$ мм, $F=1950$ мм. Луну снимали на панхроматическую 35-миллиметровую «Фото-65» со светофильтрами ЗС-11 и ОС-13, при длительности экспозиции 0,25 и 0,03 с в каждом фильтре соответственно. Эффективные длины волн для данного сочетания эмульсии и фильтров составляют 0,54 и 0,63 мкм.

Снимки фотометрировали на автоматическом цифровом двухкоординатном микрофотометре АЦМФ — ХУ ГАО АН УССР. Этот прибор подробно описан в работе [1]. Фотометрирование производили квадратным окном 140×140 мкм в квадратном растре 128×128 элементов с шагом, равным стороне окна. На диаметре изображения Луны укладывалось 120 элементов. Значения пропускания квантовались на 256 уровней и регистрировались на перфолене. Было фотометрировано по 8 снимков в каждом спектральном диапазоне.

Дальнейшую цифровую обработку производили в ИРЭ АН УССР на созданной там на основе ЭВМ ЕС-1020 системе цифровой обработки изображений [2]. Совмещение изображений производилось с использованием критерия $k'(\xi, \eta)$ с точностью до 0,5 элемента. Для этого вычислялась функция $k'(\xi, \eta)$ в области $-3 \leq \xi \leq 4$, $-3 \leq \eta \leq 4$, и за положение наилучшего совмещения принимали то, в котором $k'(\xi, \eta)$ имела минимальное значение. При этом подтвердился вывод о коническом виде $k'(\xi, \eta)$ вблизи минимума. После определения параметров сдвига изображения сдвигали до нужного положения и усредняли с равным весом внутри каждых 8 изображений в данном фильтре.

Два усредненных таким образом изображения переводили из пропусканний в интенсивности по впечатанному в пленку 20-ступенчатому клину, который фотометрировали на АЦМФ-ХУ в тех же условиях, что и изображения Луны. При таком пере-

воде автоматически учитывается нелинейность характеристической кривой фотоматериала. Зависимость контраста от длины волны не учитывалась.

К переведенным в яркости усредненным изображениям применялась описанная выше процедура совмещения, после чего изображение в оранжевом фильтре поэлементно делилось на изображение в зеленом. Так как зависимость цвета от фазы невелика, то никакой коррекции за фазу ($6,8^\circ$) не делалось.

Полученную таким образом карту выводили на фототелеграфное устройство с четкостью 1024×1024 элемента, причем промежуточные элементы получены интерполяцией.

Относительная погрешность определения цвета, найденная по внутренней сходимости 8 пар снимков, составляет 7%. На карте выделено 7 градаций цвета с интервалом 5%. Разрешение карты составляет $15''$ (1 элемент разложения). Большая погрешность указывает, что было бы желательным увеличить число усредняемых изображений, что не вызывает принципиальных трудностей.

Список литературы: 1. Парусимов В. Г., Полянский А. В. Аппаратные средства цифровой обработки астрономических изображений. См. статью наст. вестн. 2. Цифровая обработка изображений в ИРЭ АН УССР/А. А. Бабичев, А. Д. Егоров, Н. К. Заец и др. См. статью наст. вестн.

Поступила в редколлегию 05.08.80.

УДК 520.82

В. Г. ПАРУСИМОВ, А. В. ПОЛЯНСКИЙ

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Использование современной вычислительной техники для обработки астрономических изображений затруднено отсутствием промежуточного звена, позволяющего направить поток астрономической информации в ЭВМ и представить результаты ее обработки в требуемой форме. Поэтому разработка аппаратуры ввода-вывода изображений для астрономических задач является одной из актуальных проблем астрономического приборостроения.

В статье освещены результаты работы, выполненной в этом направлении в Главной астрономической обсерватории Академии наук УССР.

В 1976 году был разработан и пущен в эксплуатацию автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр АЦМФ—ХУ, предназначенный для фотометрирования и ввода в ЭВМ Единой системы (ЕС-1022) астрономических изображений, зарегистрированных на фотографических пластинках. Микрофотометр обеспечивает как прямой ввод результатов фото-

метрирования в память машины, так и автономную работу с использованием перфоленты в качестве промежуточного носителя информации.

Устройство обладает следующими параметрами: рабочий ход по оси X 90; рабочий ход по оси Y 60 мм; диапазон измерения оптической плотности 0—4; погрешность измерения оптической плотности в диапазоне 0—2 не более $\pm 0,01$, в диапазоне 2—4 не более $\pm 0,03$; (указанные погрешности соответствуют площади фотометрируемого элемента 50×50 мкм²); шаг сканирования по координатам X и Y ; минимальный 4,17, максимальный 263 мкм; дискретность изменения шага 4,17 мкм; погрешность позиционирования не более $\pm 4,17$ мкм; скорость измерения в режиме прямого ввода в ЭВМ 100 изм/с (при минимальном шаге сканирования); в режиме вывода на перфоленту 25 изм/с (при шаге сканирования от 4,17 до 66 мкм).

Микрофотометр состоит из следующих основных узлов и блоков: устройства сканирования, блока управления сканированием, фотоумножителя, усилителя постоянного тока, преобразователя аналог-код, блока обмена данными, блока перфорирувания, блока центрального управления, блока защиты и сигнализации.

В устройстве применена оптико-механическая плоскостная развертка. Узел сканирования состоит из двухкоординатной каретки, несущей измеряемую фотопластинку, с приводами перемещения по осям X и Y оптических систем измерительного и контрольного световых каналов. Каретка перемещается в системе прямоугольных координат X и Y дискретно и в плоскости, перпендикулярной к оптической оси осветителя. Перемещение каретки осуществляется шаговыми реверсивными двигателями посредством прецизионных ходовых пар винт-гайка. Контроль измерительного тракта фотометра в режиме измерения производится автоматически переключением измерительного и контрольного световых пучков с помощью быстродействующего электромеханического коммутатора.

Функции сканирования фотопластинки в заданных пределах и с заданным шагом, отсчет и хранение координат X и Y , а также коммутацию измерительного и контрольного световых каналов выполняет блок управления сканированием. Он же присваивает порядковый номер (или адрес) каждому измерению. Пределы и шаг сканирования, а также начальный адрес измерения задаются оператором с пульта управления. Текущие координаты X , Y и адрес индицируются на панели визуального контроля микрофотометра.

В микрофотометре используется прямоотсчетный метод измерения оптической плотности по двухлучевой схеме.

Аналоговый сигнал с фотоумножителя, соответствующий либо плотности почернения измеряемой площадки на пластинке, либо интенсивности контрольного светового пучка, повышается

усилителем постоянного тока и попадает затем на вход аналого-цифрового преобразователя. Здесь аналоговый сигнал преобразуется в 11-разрядное двоичное число. С выхода преобразователя данные в цифровом виде заносятся в блок обмена данными. На панели индикации имеются отдельные цифровые табло как для результатов измерения плотности, так и для контрольных отсчетов. Визуализация контрольных отсчетов дает оператору возможность следить за состоянием измерительного тракта фотометра и своевременно обнаруживать неполадки в устройстве.

Погрешности измерения оптических плотностей, обусловленные временным дрейфом параметров измерительного тракта фотометра, устраняются программным путем в ЭВМ по серии контрольных измерений, необходимая частота которых устанавливается оператором на основании данных исследования дрейфа.

В блок обмена данными, помимо результатов фотометрирования и контрольных отсчетов, поступают также из блока управления сканированием текущие номера измерений, необходимые при выводе информации на перфоленду.

В режиме прямого ввода блок обмена данными обеспечивает передачу данных в память машины через устройство сопряжения с каналом ЭВМ, а также прием из ЭВМ управляющей информации и передачу в ЭВМ признаков состояния микрофотометра. В зависимости от требуемой точности определения оптической плотности и качества фотографического материала блок обмена данными может работать в однобайтовом и двухбайтовом режимах передачи данных. В двухбайтовом режиме вводятся все 11 разрядов результата и представляются в памяти машины полусловом, а в однобайтовом — результат округляется до 8 разрядов и представляется в памяти машины одним байтом.

Режим прямого ввода в ЭВМ, безусловно, очень эффективен для задач, в которых используется большой объем исходных фотометрических данных, например, при исследовании космических объектов большой протяженности. Однако существует широкий класс астрономических задач (изучение планет Солнечной системы, спектрофотометрия звезд и др.), использующих сравнительно небольшое количество фотографической информации, часто неоднородной по содержанию. В этом случае, а особенно на этапе разработки и освоения методики исследования, более рациональным (временные затраты и эффективность использования оборудования) может оказаться режим автономной работы цифрового микрофотометра с использованием промежуточного носителя информации.

Выбор перфоленды в качестве носителя информации для автономного режима был обусловлен тем, что необходимые для этой цели технические средства доступны и позволяют сравни-

тельно легко обеспечивать их нормальное функционирование в измерительном комплексе.

В то же время средства перфорирования являются наименее надежным звеном в цепи передачи данных в ЭВМ. Был принят ряд мер по снижению влияния этого фактора на достоверность результатов измерений: на перфоленту, помимо результатов фотометрирования, выводили также диагностическую информацию для обеспечения программного контроля и восстановления массива в памяти машины, в случае его частичной порчи на стадиях ввода и вывода; в устройстве осуществлялся непрерывный построчный контроль перфорирования; и в случае обнаружения сбоя, производился повторный вывод результата; устройство прекращало работу при достижении количества сбоев некоторой определенной величины, являющейся критерием работоспособности блока перфорирования, и сигнализировало оператору об аварийной ситуации; в устройстве использовались два перфоратора, работающих попеременно для повышения надежности и увеличения рабочего резерва.

Помимо описанных режимов работы, в цифровом микрофотометре имеются вспомогательные режимы: построчное перфорирования и одиночных измерений. Построчное перфорирование используется для вывода на перфоленту дополнительной информации и осуществляется вручную с пульта управления. Режим одиночных измерений в сочетании с ручным сканированием фотопластинки позволяет произвести предварительный анализ изображения с целью выбора оптимальных параметров его дискретизации.

Рабочие циклы устройства в различных режимах организует блок центрального управления. Совместно с блоком защиты и сигнализации центральное управление производит рабочие и аварийные остановки, а также локализует основные неисправности микрофотометра.

Результаты фотометрирования, выполненного на микрофотометре АЦМФ—ХУ с пространственным разрешением 16,7 и 130 мкм в формате 128×128 элементов (рис. 1, 2), свидетельствуют о высокой надежности, хорошей повторяемости результатов, простоте обслуживания устройства.

Достаточно высокие координатная и фотометрическая точности, большой диапазон измерения оптической плотности делают разработанный микрофотометр пригодным для многих астрономических исследований.

Основным фактором, который ограничивает область применения устройства, является его относительно низкая производительность (не более 100 изм./с), характеризующая все известные автоматические микрофотометры с оптико-механической плоскостной разверткой [1, 2]. Практически, ограничение наступает уже при объеме фотометрических измерений порядка 10^5 — 10^6 отсчетов, поскольку время, затрачиваемое устройством



a

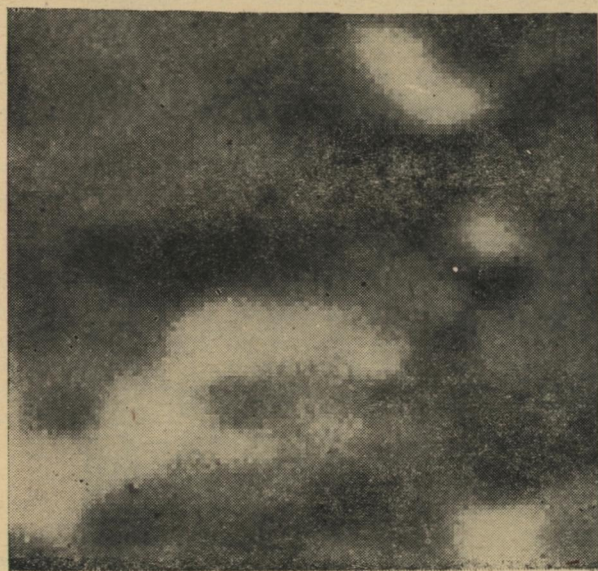


б

Рис. 1. Фотографическое изображение кометы Мркоса 1957 г.: *a* — исходный снимок; *б* — результат фотометрирования с пространственным разрешением 130 мкм



a



б

Рис. 2. Фотографическое изображение Луны: *a* — исходный снимок; *б* — результат фотометрирования фрагмента с пространственным разрешением 16,7 мкм.

на подготовку такого количества данных, может превышать десятки часов.

Между тем, ряд практических задач обработки изображений требует ввода в ЭВМ полностью или связанными фрагментами фотографических изображений с четкостью 100 линий на мил-

лиметр и выше и размером до 30×30 см², т. е. содержащих до 10^9 информативных элементов и более. Сюда относятся задачи фотографической астрометрии и звездной астрофизики, анализа и дешифрирования космических снимков и т. д. Для обработки таких изображений в разумные сроки требуется скорость фотометрирования до 10^6 элементов в секунду.

Для решения подобных задач создается прецизионный бысродействующий микрофотометр, рассчитанный на обработку фотографических пластинок и плоских пленок больших форматов.

Не углубляясь в детальное описание разрабатываемого микрофотометра, отметим лишь некоторые, наиболее существенные, особенности устройства и принципы, положенные в его основу.

В устройстве используется оптико-механический принцип плоскостного сканирования. В качестве приводов сканирования изображения применены высокоскоростные двигатели постоянного тока. Отказ от традиционной кинематической схемы сканирования, используемой в оптико-механических плоскостных развертках и основанной на преобразовании с помощью ходовой винтовой пары вращательного движения вала электропривода в поступательное перемещение носителя с изображением, позволил значительно повысить скорость сканирования. Так, разработанные для этих целей линейные электродвигатели обеспечивают перемещение каретки массой 5 кг со скоростью 1 м/с при потребляемой мощности всего в несколько десятков ватт.

Механизм сканирования основан на базе прецизионных цилиндрических направляющих с антифрикционными подшипниками скольжения и с магнитной разгрузкой.

Для обеспечения высокой точности позиционирования координатные измерения выполняются интерферометрическим лазерным измерителем линейных перемещений с ценой деления 0,32 мкм.

Измерение оптической плотности в устройстве производится методом прямого отсчета с периодическим контролем температурного и временного дрейфа параметров осветительно-измерительного тракта. В качестве генератора сканирующего раstra-элемента используется гелий-неоновый лазер малой мощности со стабилизированным до 0,1% потоком излучения. Схема стабилизации светового потока ОКГ основана на электрооптическом эффекте с использованием в качестве регулирующего элемента в цепи обратной связи ячейки Керра. Эти меры способствуют повышению чувствительности блока фотометрирования устройства и снижению погрешности измерения оптической плотности.

Расчетные параметры разрабатываемого микрофотометра: максимальный формат обрабатываемых изображений 30×30 см², точность позиционирования не хуже 1 мкм, фотомет-

рическая точность 0,1—0,5%, минимальный размер фотометрируемой площади 5×5 мкм², быстроедействие не менее 10^5 изм/с.

Описанные устройства предназначены, главным образом, для решения задач, которые требуют высокой координатной и фотометрической точности, и исходным материалом в которых являются фотографические снимки высокого разрешения.

В то же время при некоторых исследованиях в планетной астрономии, службе Солнца и др., связанных с обработкой больших серий однотипных изображений невысокой четкости, требования к параметрам измерительных устройств сравнительно невелики, а существенным фактором для их реализации является производительность устройств.

Среди существующих в настоящее время устройств ввода изображений наиболее подходящие для этих целей — с электронной разверткой на базе электронно-лучевых трубок. Их быстроедействие может достигать 10^5 отсчетов в секунду и более, и если не принимать специальных мер для повышения точности сканирования и фотометрирования (как правило, сложных и громоздких), то оказываются значительно надежнее и проще механических и требуют меньших затрат как при разработке и изготовлении, так и при эксплуатации.

Из устройств этого класса разрабатывается устройство ввода изображений с 35-миллиметровой фотопленки. По своим параметрам оно, в основном, аналогично электронному устройству ввода, созданному в Институте радиофизики и электроники АН УССР [3] и предназначено для быстрого ввода в ЭВМ фотографических изображений формата, не превышающего 25×25 мм², с четкостью не более 1024×1024 элементов и с оптической плотностью, лежащей в пределах 0—2,5. Время ввода одного изображения не превышает 100 с. Устройство обеспечивает точность фотометрирования, равную 1%, и точность позиционирования, не хуже 25 мкм.

Цифровая обработка изображений тесно связана также с использованием аппаратных средств другого типа — устройств вывода изображений. С их помощью осуществляется вывод из ЭВМ и регистрация результатов обработки. Из них в настоящее время разрабатываются два устройства — электронное и механическое.

Электронное — предназначается для быстрого вывода из ЭВМ полутоновых изображений и их регистрации на 35-миллиметровую рулонную фотопленку. Формат изображений равен 25×25 мм², их четкость — 1024×1024 элементов.

Время вывода одного изображения не превышает 100 с. Устройство не рассчитано на высокую координатную точность, и область его применения ограничивается, в основном, выводом промежуточных результатов обработки, которые могут представлять интерес на стадиях отработки методики исследований.

Для точного вывода служит механическое устройство вывода, основанное на развертке барабанного типа и работающее с меньшей скоростью. Изображения регистрируются на плоскую фотопленку формата 24×30 см². Четкость их равна 2048×2560 элементам при относительной координатной погрешности, не превышающей 0,025%. Время вывода одного изображения составляет 7 мин.

Оба устройства рассчитаны на вывод как черно-белых, так и цветных изображений. При регистрации черно-белых экспонирование пленки производится только один раз, в то время, как для цветных снимков эта операция повторяется три раза для каждого изображения — в красной, зеленой и синей областях спектра. Поэтому время вывода цветных изображений в три раза больше, чем черно-белых.

Разрабатываемые средства вывода изображений обеспечивают возможность представления астрономических результатов в самой разнообразной форме: полутоновых изображений, карт и эквиденситограмм, двух- и трехмерных графиков и т. д.

Эффективность цифровых методов обработки изображений обуславливается не только возможностями аппаратных средств ввода-вывода и уровнем математического обеспечения, но и степенью участия пользователя в процессах обработки. Важную роль в этом играют такие вспомогательные средства, как полутоновые и алфавитно-цифровые (знаковые) дисплеи, служащие для визуального контроля операций ввода-вывода и отдельных этапов обработки и обеспечивающие диалоговый режим работы оператора с системой. Поэтому разработка этих средств необходима в такой же мере, как и разработка устройств ввода-вывода.

Для контроля операций ввода-вывода, выполняемых медленными механическими устройствами (в частности, для контроля работы микрофотометра АЦМФ—ХУ), разработано и эксплуатируется видеоконтрольное устройство на скиатронах (электронно-лучевых трубках с темновой записью). Эти ЭЛТ способны многие часы при отсутствии посторонней засветки экрана сохранять записанное на нем изображение, и поэтому они очень удобны для этих целей.

Вместе с тем малый диапазон яркости экрана и, как следствие этого, низкая контрастность изображений, присущие трубкам этого типа, снижают эффективность визуального контроля работы аппаратуры. Поэтому в устройстве применены два скиатрона. Один из них работает в режиме записи полутонового изображения, а другой регистрирует на экране каждый фотометрический разрез снимка, представляемый в виде двухмерного графика зависимости амплитуды плотности (либо интенсивности экспонирующего луча) от координаты X .

С одной стороны, это повышает надежность контроля работоспособности устройств ввода-вывода, а с другой — обеспечи-

вает возможность более детального предварительного анализа изображений, проводимого с целью выбора оптимального режима их дискретизации.

Устройство осуществляет визуализацию изображений, четкость которых не превышает 1024×1024 элементов, а количество уровней квантования оптической плотности равно 256. Максимальное быстродействие индикатора — не более 10^3 элем./с.

Два других устройства этого типа — полутоновый индикатор на ЭЛТ с длительным послесвечением люминофора и знаковый дисплей, находятся на стадии разработки.

Первый из них предназначен для контроля работы быстрых устройств ввода-вывода и просмотра результатов обработки. По сравнению со скиатронным индикатором, он характеризуется лучшими техническими показателями. В частности, верхний предел четкости изображений доведен до 2048×2048 элементов, а его быстродействие увеличено до 10^5 элем./с.

Знаковый дисплей служит средством взаимодействия оператора с вычислительной машиной в режиме диалога и может использоваться как на стадиях разработки математического обеспечения, так и в процессе обработки изображений. Устройство обеспечивает двусторонний обмен информацией между оператором и ЭВМ в реальном масштабе времени. Алфавит устройства включает в себя русские и латинские буквы, арабские цифры, знаки арифметических операций, разделительные знаки и некоторые другие специальные символы.

Выводимая на экран страница текста может содержать до 1024 символов, каждый из которых изображается в растре 8×8 элементов. Скорость вывода текста составляет 24 страницы в секунду. Ввод информации в вычислительную машину выполняется оператором с рабочего пульта дисплея.

Все устройства ввода-вывода изображений и вспомогательные средства ориентированы для работы в комплексе с электронными вычислительными машинами и под управлением Единой системы. Они осуществляют обмен информацией в соответствии со стандартами, принятыми в этой системе.

Разработанный комплекс аппаратных средств охватывает широкий круг задач обработки астрономических изображений и обеспечивает их реализацию цифровыми методами. Его внедрение в астрономическую практику будет способствовать более рациональному использованию наблюдательного материала и в целом повысит эффективность и уровень астрономических исследований.

Список литературы: 1. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. — М.: Энергия, 1976, с. 150. 2. Цифровой автоматический микроденситометр с управлением от ЭВМ/Л. А. Браилко, М. П. Гришин, А. М. Иванов и др. —

УДК 520.82

Е. В. ЗДОР

ПОЛУТОНОВЫЙ ИНДИКАТОР В СИСТЕМЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Как было отмечено в работе [1], для обеспечения интерактивного режима в систему цифровой обработки изображений, созданной в ИРЭ АН УССР, включен индикатор для вывода полутоновых изображений. Использование его разрешило оперативно контролировать промежуточные и конечные результаты обработки, минуя фотографический процесс. Кроме того, ПИ позволил контролировать работу устройств ввода-вывода, чтобы проверить, укладывается ли диапазон изменения прозрачности на вводимом материале в интервал, правильно передаваемый устройством ввода. ПИ также может быть применен в качестве сервисного устройства при наладке устройств ввода-вывода.

Описываемый индикатор предназначен для вывода изображений, имеющих 256 градаций яркости, с четкостью от 64×64 до 1024×1024 элементов. В нем предусмотрены два режима работы: медленный и быстрый. В медленном режиме индикатор работает синхронно с контролируемым устройством. При этом в ПИ поступает изображение, подаваемое на вход или поступающее с выхода контролируемого устройства. Скорость выдачи изображения на индикатор определяется возможностями контролируемого устройства.

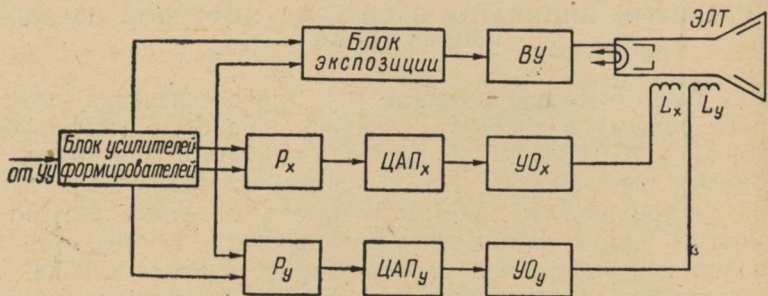
В быстром режиме выводу на индикатор подлежит изображение, хранимое на магнитном диске и передаваемое в ПИ через оперативную память ЭВМ. Скорость вывода изображения определяется быстродействием устройств ЭВМ и в первую очередь дискового накопителя.

В одном из вариантов быстрого режима вывод изображения на индикатор сопровождается простейшей его обработкой (предыскажением, гамма-коррекцией и т. п.), не изменяющей экземпляра изображения, хранимого на диске.

Полутоновый индикатор стандартным способом подключается через устройство управления к каналу ЕС ЭВМ (рисунок). Изображение строится на экране электронно-лучевой трубки с длительным послесвечением в дискретном растре 1024×1024 элементов. При четкости выводимого изображения 1024×1024 элементов каждый элемент изображения представлен соответствующим элементом раstra. При меньшей четкости размер изображения на экране ЭЛТ остается прежним, но увеличива-

ется размер элемента изображения. Каждый элемент изображения в этом случае представлен группой элементов раstra, имеющей форму квадрата со стороной $1024/n$ элементов, где n — четкость выводимого изображения, которая может принимать значения 64, 128, 256, 512 и 1024.

Растр строится путем дискретного отклонения электронного луча магнитным полем, создаваемым двумя катушками L_x и L_y ,



Структурная схема полутонного индикатора

образующими отклоняющую систему. Ток в катушки подается с выходов усилителей UO_x и UO_y , на входы которых подаются сигналы с выходов цифроаналоговых преобразователей $ЦАП_x$ и $ЦАП_y$, преобразующих координатные коды, загружаемые в регистры R_x и R_y .

Необходимая яркость элемента раstra устанавливается блоком экспозиции, который с помощью видеоусилителя (ВУ) в нужный момент отпирает электронный луч на время, определяемое кодом экспозиции, поступающим из устройства управления. Ток открытого луча поддерживается видеоусилителем постоянным независимо от кода экспозиции.

Блок усилителей-формирователей преобразует к стандартной форме цифровые сигналы, поступающие из устройства управления по согласованным линиям связи. Координатные коды и код экспозиции передаются по одним и тем же линиям и сопровождаются соответствующими идентифицирующими сигналами, с помощью которых передаваемый код заносится в регистры R_x , R_y или регистр экспозиции R_e . Электронный луч отпирается после занесения информации в регистры R_x , R_y и R_e через время, достаточное для окончания переходных процессов в отклоняющей системе.

При построении изображений высокого качества (высокой четкости и с большим числом градаций яркости) индикатор оказывается весьма чувствительным ко всякого рода наводкам. Это привело к решению размещать все цифроаналоговые преобразователи в корпусе индикатора и передавать сигналы из устройства управления только в цифровом виде.

В настоящее время ПИ эффективно используется в системе цифровой обработки изображений. С ее помощью были выпол-

нены исследования по цифровой обработке изображений поверхности Марса, переданным с космических аппаратов «Марс-3» — «Марс-5» [2], и по построению карты цвета Луны методами цифровой обработки изображений [3].

Список литературы: 1. Цифровая обработка изображений в ИРЭ АН УССР/ А. А. Бабичев, А. Д. Егоров, Н. К. Заец и др. См. статью наст. вестн. 2. Усиков О. Я., Парусимов В. Г., Корнієнко Ю. В. Цифрова обробка зображень поверхні Марса з космічних апаратів «Марс-3» — «Марс-5». — Вісн. АН УРСР, 1979, № 7, с. 63—75. 3. Станкевич Д. Г. Построение карты цвета Луны методами цифровой обработки изображений. См. статью наст. вестн.

Поступила в редколлегию 05.08.80.

УДК 520.82

С. А. КАНЫГИН

ГРАФОПОСТРОИТЕЛЬ НА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКЕ В СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Большинство известных устройств ввода-вывода изображений [1—3] действует следующим образом. Устройство ввода сканирует изображение. Яркость каждого элемента раstra представляется в виде кода. Последовательность кодов, соответствующая всему изображению, вводится в ЭВМ, где обрабатывается. Вывод происходит в обратном порядке.

Подлежащие обработке фотоснимки могут иметь значительные недостатки, как правило, обусловленные специальными условиями съемки. Часто именно эти недостатки приводят к необходимости обработки данных снимков на ЭВМ. Чтобы получить даже от весьма неудачных снимков максимум информации, требуется проводить операцию выбора режима ввода. В простейшем случае — это регулировка чувствительности считывающего узла.

Для контроля результатов коррекции режима ввода используется полутонный индикатор-устройство, отображающее весь вводимый или выводимый кадр на экране ЭЛТ с длительным послесвечением [4]. Однако непосредственно в процессе выбора режима ввода для контроля этого процесса удобнее отображать отдельные строки вводимого изображения в виде его фотометрических разрезов. Индикатор, реализующий данный способ отображения информации (строчный индикатор), оказалось полезным включить в систему [1] дополнительно к полутонному индикатору. Строчный индикатор позволяет оценить значения максимальной и минимальной яркости изображения, положение информативно ценных участков кадра в динамическом диапазоне считывающего узла устройства ввода. Он также может использоваться для визуального оперативного контроля работоспособности системы [1] и позволяет в некоторых случаях извлечь информацию из фотоснимка, не прибегая к его анализу на ЭВМ.

Данное устройство является в сущности специализированным осциллографом с цифровым входом. Структура изображения на экране строчного индикатора показана на рис. 1.

Кривые 3, 4, 5 — графики соседних строк раstra, видимые одновременно за счет послесвечения экрана. Положение точек графиков соответствует яркостям элементов вводимого фотоснимка. Чем больше яркость, тем выше расположены точки. Фактически каждый график является фотометрическим разрезом данного изображения вдоль строки раstra. Яркости элементов раstra в системе [1] представляются в виде параллельного 8-разрядного двоичного кода.

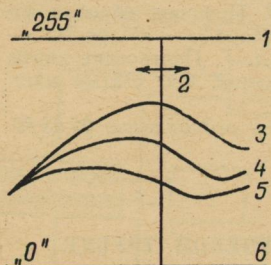


Рис. 1. Представление информации на экране строчного индикатора

Это соответствует квантованию на 256 уровней. Прямые 1 и 6 — графики строк, коды всех элементов которых равны 255 и 0 соответственно. Они высвечиваются непрерывно, задавая масштаб картинки.

Прямую 2 можно перемещать по экрану, как показано стрелкой, при помощи ручки управления. Код элемента, изображение которого лежит на прямой 2, выводится на цифровое табло и может запоминаться.

При проведении коррекции режима ввода, меняя чувствительность считывающего узла, добиваются, чтобы графики располагались по возможности в верхней части картинки. Это соответствует области наименьшей погрешности фотометрирования. Однако при этом графики строк не должны сливаться в пределах информативно ценных участков изображения с прямой 1, что указало бы на переполнение (перегрузку считывающего узла).

Устройство и работа строчного индикатора. В системе обработки изображений [1] ввод кодов яркостей элементов осуществляется параллельно по восьми информационным шинам. По девятой служебной шине передается управляющий сигнал. Его перепады указывают, что код данного элемента фотоснимка установлен на информационных шинах и может быть считан. Коды элементов во времени сгруппированы построчно. Промежуток между перепадами управляющего сигнала, соответствующими передаче последнего элемента предыдущей строки и первого элемента следующей, значительно увеличен. По нему индикатор опознает начало строки и начинает высвечивать следующий график.

Структурная схема строчного индикатора приведена на рис. 2. Луч ЭЛТ по горизонтали отклоняется линейно, как в осциллографе. Время прямого хода равно времени ввода-вывода строки изображения. По вертикали же за время передачи одного элемента луч перемещается так, чтобы последовательно

высветить точки прямой 6, графика строки и прямой 1. Во время перемещения луча от точки к точке ЭЛТ заперта.

Коды элементов и управляющий сигнал, поданные на вход индикатора, обработываются специализированным процессором

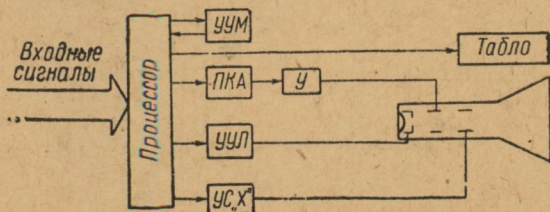


Рис. 2. Структурная схема строчного индикатора

(П), выполненным на микросхемах серий К155, К158. Процессор опознает начало каждой строки и выдает при этом сигнал, синхронизирующий узел развертки по горизонтали (УРх). Этот узел вырабатывает пилообразное напряжение, поданное на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. Перемещением луча по вертикали также управляет процессор. За время ввода одного элемента он выдает на вход преобразователя код-аналог (ПКА) последовательность кодов: 00, код элемента, FF (или 255 в десятичной системе). Эти коды ПКА преобразует в напряжение, пропорциональное их величинам. Повышенное усилителем (У), это напряжение отклоняет луч ЭЛТ по вертикали, устанавливая его в положение, соответствующее точкам графиков. Когда луч установлен в требуемое положение и окончились переходные процессы в ПКА и усилителе, сигналом от процессора через узел управления лучом (УУЛ) ЭЛТ отпирается и высвечивается точка графика.

Любой элемент изображения может запоминаться в процессоре на время ввода строки или на неограниченное время. Узел управления меткой (УУМ) вырабатывает импульс, задержку которого относительно начала строки можно регулировать. По этому импульсу процессор, во-первых, формирует на экране ЭЛТ вертикальную линию, во-вторых, текущий код элемента запоминается в специальном регистре, управляющем цифровым табло. Табло выполнено на двух вакуумных индикаторах ИВ-3, выдает информацию в 16-ричной системе.

В настоящее время строчный индикатор успешно используется в системе цифровой обработки изображений [1] и позволяет выбирать оптимально режим ввода весьма различных по характеристикам фотоснимков.

Список литературы: 1. Цифровая обработка изображений в ИРЭ АН УССР/ А. А. Бабичев, А. Д. Егоров, Н. К. Заец и др. См. статью наст. вестн. 2. Ярославский А. П. Устройства ввода-вывода изображений для ЭВМ. — М.: Энергия, 1968. — 88 с. 3. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Макрелов В. П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. — М.: Энергия, 1976. — 152 с. 4. Здор Е. В. Полутонный индикатор для системы цифровой обработки изображений. См. статью наст. вестн.

Поступила в редколлегию 05.08.80.