

## ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ НИЗКОУРОВНЕВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

© 2007 г. В. А. Овсянников, канд. техн. наук; В. Л. Филиппов, доктор физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Предложен метод расчета дальности обнаружения и распознавания систем низкоуровневого телевидения в активно-импульсном и пассивном режимах работы. Метод использует контрастно-частотную характеристику системы – зависимость минимального контраста разрешаемой миры от ее угловой частоты и концептуально схож с соответствующими методами, апробированными в тепловидении.

Коды OCIS: 120.4640.

Поступила в редакцию 15.06.2006.

Современные тенденции в развитии систем наблюдения, поиска и контроля состоят в комплексировании информации, получаемой разнотипными средствами, работающими в различных диапазонах спектра. В частности, для обеспечения наблюдения в ночное время суток наряду с тепловизионными приборами (ТВП) в настоящее время используются активно-импульсные системы низкоуровневого телевидения (АИСНУТ), в которых объединены электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с телекамерой и лазерный источник подсветки, работающий в импульсном режиме.

Комплексирование ТВП с АИСНУТ считается весьма продуктивным [1]. Для обеспечения оптимального сочетания ТВП и АИСНУТ необходимо согласование значений дальности действия соответствующих каналов комплексированной системы. Ниже представлена методика оценки дальности действия АИСНУТ, концептуально максимально приближенная к таковой для ТВП [2]. Она отличается от описанной в работе [3] тем, что в ней рассматриваются оценки дальности обнаружения объектов, расположенных не на равноизлучающем, а на неоднородном фоне, а также дальности их распознавания, т. е. практически более актуальные задачи.

В отличие от ТВП, предельная чувствительность которых, как правило, определяется шумовыми параметрами (разностью температур, эквивалентной шуму), пороговые характеристики АИСНУТ обычно ограничены контрастной чувствительностью зрения оператора.

Рассмотрим вначале оценку дальности действия АИСНУТ в активном режиме.

Для описания АИСНУТ (как, впрочем, и обычных приборов ночного видения) целесообразно по аналогии с температурно-частотной характеристикой, используемой в тепловидении, ввести понятие контрастно-частотной характеристики (КЧХ) – зависимости минимального контраста стандартной

П-образной яркостной миры, еще разрешаемой на изображении, от угловой частоты этой миры [4].

Очевидно, контраст эквивалентной миры (равный контрасту объекта)  $K_M$ , еще разрешаемой на изображении, связан с контрастом ее изображения  $K'_M$  формулой

$$K'_M = K_M K_a K_c K_{\Pi} K_{\Sigma}(v), \quad (1)$$

где  $K_a$  – коэффициент передачи контраста атмосферой;  $K_c \approx 0,9-0,95$  – коэффициент сохранения контраста, учитывающий яркость темного фона;  $K_{\Pi} = 8/\pi^2$  – коэффициент, учитывающий переход от П-образной миры к синусоидальной и усреднение глазом яркости изображения штриха миры по его площади;  $v$  – угловая частота миры,  $K_{\Sigma}(v)$  – результирующая функция передачи модуляции (ФПМ) системы.

Как и для других многокомпонентных систем, ФПМ АИСНУТ может быть аппроксимирована гауссовской функцией

$$K_{\Sigma}(v) = \exp(-2\pi^2\sigma^2v^2)$$

с параметром  $\sigma$ , который определяется ФПМ (также близкими к гауссовским) основных компонентов АИСНУТ – объектива, ЭОП и телекамеры – и согласно данным [5] может быть представлен в виде

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{об}^2 + \sigma_{эоп}^2 + \sigma_{кам}^2}.$$

Здесь

$$\sigma_{об} = \frac{0,43}{p_{об}f}, \quad \sigma_{эоп} = \frac{0,43}{p_{эоп}f}, \quad \sigma_{кам} = \frac{0,86h_3}{Rf\Gamma},$$

где  $p_{об}$ ,  $p_{эоп}$  – предел разрешения объектива и ЭОП,  $f$  – фокусное расстояние объектива,  $R$  – разрешающая способность телекамеры,  $\Gamma$  – линейное увеличение системы ЭОП–оптика переноса (отношение размера изображения объекта на приемнике телекамеры к таковому на фотокатоде ЭОП);  $h_3$  – высота экрана монитора телекамеры.

Под контрастом эквивалентной миры  $K_M$  в (1) понимается отношение

$$K_M = \left| \frac{L - L_{об}}{L + L_{об}} \right| = \left| \frac{r - r_{об}}{r + r_{об}} \right|, \quad (2)$$

где  $L_{об}$ ,  $L$  – энергетическая яркость объекта и фона,  $r_{об}$ ,  $r$  – коэффициенты яркости объекта и фона на длине волны подсветки  $\lambda_0$ .

Поскольку для АИСНУТ обычно реализуется соотношение

$$c\tau_n \ll D,$$

где  $c$  – скорость света,  $\tau_n$  – длительность импульса подсветки,  $D$  – дистанция до объекта, то обратное рассеяние атмосферы практически отсутствует и тогда  $K_a = 1$ .

Для малых размеров изображения штриха миры обнаруживаемый оператором контраст обратно пропорционален корню из площади этого изображения (закон Пьерона [6]), поэтому

$$K'_M = K_0 / (\sqrt{S/D\delta}) = 2\nu\delta K_0 / \sqrt{7}, \quad (3)$$

$$S = 7D^2/4\nu^2,$$

где  $S$  – площадь полосы стандартной миры (формат полос 7:1),  $\delta$  – эффективное значение элементарного поля зрения АИСНУТ, определяемое, по аналогии с ТВП, формулой [2]  $\delta = \sigma/0,55$ ;  $K_0$  – пороговый (обнаруживаемый) контраст, определяемый для углового размера изображения  $\delta'$ , соответствующего  $\delta$  ( $\delta' = 0,58$  мрад), и вероятности обнаружения  $P = 0,5$ .

Из (1) и (3) следует, что искомая КЧХ в относительных единицах имеет вид

$$\frac{K_M K_a}{K_0} = \frac{x}{K_\Sigma(x)} = F(x), \quad (4)$$

где 
$$x = \nu\delta = \frac{ND\delta}{2h}, \quad (4a)$$

$D$  – дистанция до объекта,  $h$  – критический размер объекта (корень квадратный из его видимой площади),  $N$  – число полос разрешаемой эквивалентной миры, укладываемых в критический размер объекта, необходимое для его вскрытия (обнаружения или распознавания) с заданной вероятностью.

Зависимость  $F(x)$  хорошо аппроксимируется формулой

$$F(x) = 0,1 \exp(3,8x^2 + 4,3x). \quad (5)$$

Очевидно, в данной записи КЧХ  $F(x)$  является общей для любой АИСНУТ.

Для оценки порогового контраста  $K_0$  воспользуемся формулой [6]

$$K_0 = K_0^* / (2 - K_0^*), \quad (6)$$

где  $K_0^* = \left( \frac{0,13 + 0,18L^{-0,42}}{\delta'} \right)^{1,5} + 0,02$ ,  $L'$  – яркость изображения фона.

В случае когда время накопления (период кадра) телекамеры равно периоду следования импульсов, средняя воспринимаемая ею яркость экрана ЭОП составляет

$$L' = \frac{\Phi \varepsilon^2 \eta \tau_{об} \tau_{пер} \tau_\phi \tau_a^2 r \gamma}{\pi^2 \theta^2 D^2 T_n}, \quad (7)$$

где

$$\gamma = 683S(\lambda_0) \frac{\int_0^\infty M_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty M_A(\lambda) S(\lambda) d\lambda},$$

$\Phi$  – энергия лазерного импульса на выходе формирующей оптики,  $\theta$  – плоский угол при вершине телесного угла излучения,  $\varepsilon$  – относительное отверстие объектива АИСНУТ ( $\varepsilon < 1$ ),  $\eta$  – коэффициент усиления яркости ЭОП,  $\tau_{об}$  – коэффициент пропускания объектива на длине волны излучения  $\lambda_0$ ,  $\tau_{пер}$  – коэффициент пропускания оптической системы переноса изображения с экрана ЭОП на приемник телекамеры на длине волны  $\lambda_0$ ,  $\tau_\phi$  – коэффициент пропускания оптического фильтра на длине волны  $\lambda_0$ ,  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы на дистанции до объекта на длине волны  $\lambda_0$ ,  $\gamma$  – коэффициент пересчета величины  $\eta$  от источника типа А – черного тела с температурой 2854 К – к лазерному источнику излучения,  $S(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность фотокатода ЭОП,  $M_A(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической светимости источника типа А,  $V(\lambda)$  – кривая видности глаза,  $T_n$  – время накопления.

При этом значение  $L'$  от инерционности люминофора экрана принципиально не зависит [7].

Согласно [2] значение  $N$  (число полос разрешаемой эквивалентной миры) определяется как

$$N = 2,4C \sqrt{-\ln(1-P)}, \quad (8)$$

где  $P$  – заданная вероятность вскрытия объекта,  $C$  – критерий Джонсона, отвечающий решаемой задаче.

Значения критерия Джонсона для ТВП, как известно [5], в среднем составляют

$$C = \begin{cases} 0,75 & \text{– обнаружение} \\ 3 & \text{– классификация} \\ 6 & \text{– идентификация.} \end{cases}$$

Необходимо, однако, отметить, что для “отражательного” (видимого и ближнего ИК) диапазона

спектра значения  $C$  в 1,4–1,5 раза меньше, чем для теплового, ибо тепловые “портреты” различных объектов более схожи, чем яркостные, поскольку они, как правило, не имеют резких границ [8]. Это обстоятельство отражено и в различных уровнях дешифрируемости тепловых и яркостных изображений по шкале NIRS [2, 5], сводящихся к такому же различию соответствующих критериев Джонсона.

С другой стороны, на изображение, формируемое АИЧНУТ, как правило, наложена пестрая картина спеклов, образующихся в результате внутренней интерференции отраженного лазерного излучения, и это, существенно затрудняя дешифрирование изображения, может снизить дальность действия системы примерно в 2 раза [9]. Влияние спеклов, впрочем, может быть значительно ослаблено усреднением нескольких (до 8–10) смежных кадров.

Расчет коэффициента пропускания атмосферы  $\tau_a$  для горизонтальных трасс может быть выполнен с учетом того, что в ближнем ИК диапазоне спектра доминирующим фактором является аэрозольное рассеяние. Тогда согласно [5] имеем:

$$\tau_a = \exp(-\beta D),$$

$$\beta = \frac{3,9}{S_m} \left( \frac{0,55}{\lambda_0} \right)^{0,58 S_m^{1/3}}, \quad (9)$$

где  $\beta$  – показатель ослабления излучения,  $S_m$  – метеорологическая дальность видимости.

Для обеспечения комфортных условий наблюдения изображения и сохранения работоспособности АИЧНУТ в широком диапазоне освещенности фотокатода ЭОП в ней, как правило, используются различные устройства адаптации (регулировка диафрагмы объектива, коэффициента пропускания оптического фильтра и др.) [10]. Благодаря им яркость изображения не превосходит некоторого оптимального значения  $L'_m$ , которое для ночных условий наблюдения может считаться равным  $L'_m = 5-7$  кд/м<sup>2</sup>, чему согласно (6) отвечает значение минимального порогового контраста  $K_{ом} = 0,15$ .

Тогда искомая дальность действия АИЧНУТ может быть определена посредством следующей итеративной процедуры.

Определив по формуле (8) значение  $N$  и приняв на первом шаге  $K_0 = K_{ом}$ , по (4а), (5) находим соответствующее значение дальности

$$D = \frac{2h}{N\delta} F^{-1} \left( \frac{K_m K_a}{K_0} \right) =$$

$$= \frac{1,13h}{N\delta} \left( \sqrt{1 + 0,81 \ln(10 K_m K_a / K_0)} - 1 \right). \quad (10)$$

Полученное значение  $D$  используется для расчета по формулам (6), (7) уточненного порогового контраста  $K_0$ , которое при  $K_0 > K_{ом}$  подставляется в фор-

мулу (10) для вычисления соответствующего уточненного значения дальности  $D$ , и т. д. до обеспечения сходимости результатов. При этом обычно бывает достаточно 2–3 итераций.

Очевидными недостатками активно-импульсного режима являются демаскировка АИЧНУТ и практическая невозможность поиска объектов, так как этот поиск приходится осуществлять не только по полю, но и узким стробом на глубине [11]. Поэтому обнаружение объектов АИЧНУТ обычно осуществляется в пассивном режиме (без подсветки).

При работе данной системы в пассивном режиме приходится учитывать снижение видимого контраста объекта за счет излучения атмосферы, поэтому значение  $K_a$  здесь составляет [4]:

$$K_a = \left[ 1 + \frac{2w}{r_{об} + r} \left( \frac{1}{\tau_a} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (11)$$

где  $w$  – коэффициент оптической погоды, примерные значения которого для различных уровней естественной ночной освещенности (ЕНО)  $E$  даны ниже [12]:

$$E, \text{ лк} \quad 10^{-4} \quad 10^{-3} \quad 10^{-2} \quad 10^{-1}$$

$$w \quad 0,5 \quad 0,6 \quad 1 \quad 2;$$

$\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне  $\Delta\lambda$ .

Для объекта на фоне пригоризонтного неба  $r = w$  и, значит,  $K_a \cong \tau_a$ .

При этом значения  $r_{об}$  и  $r$ , входящие в формулу (2), здесь определяются выражениями

$$r_{об} = \frac{\int_0^\infty E(\lambda) r_{об}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E(\lambda) S(\lambda) d\lambda},$$

$$r = \frac{\int_0^\infty E(\lambda) r(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E(\lambda) S(\lambda) d\lambda},$$

где  $E(\lambda)$  – относительная спектральная плотность ЕНО,  $r_{об}(\lambda)$ ,  $r(\lambda)$  – спектральные коэффициенты яркости объекта и фона.

Яркость изображения  $L'$  в данном случае может быть оценена по формуле [4]

$$L' = 0,25 E \varepsilon^2 r \tau_{об} \tau_{пер} \tau_\phi \eta \gamma, \quad (12)$$

где  $\tau_{об}$ ,  $\tau_{пер}$ ,  $\tau_\phi$  – средние значения коэффициентов пропускания объектива, оптики переноса и фильтра в диапазоне  $\Delta\lambda$ ;

$$\gamma = \frac{\int_0^\infty E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \int_0^\infty M_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E(\lambda) V(\lambda) d\lambda \int_0^\infty M_A(\lambda) S(\lambda) d\lambda}$$

– коэффициент пересчета значения  $\eta$  от источника типа А к ЕНО;  $E$  – ЕНО.

Дальнейшие действия по расчету дальности действия  $D$  практически аналогичны описанным выше с той лишь разницей, что на каждом шаге итеративной процедуры необходимо уточнять значения не  $K_0$ , а  $K_a$ .

Значения  $\tau_a$  при этом можно оценить по формуле (9) для значения  $\lambda_0$ , отвечающего середине окна прозрачности спектрального рабочего диапазона  $\Delta\lambda$ .

Для получения оперативной приближенной оценки  $D$  учтем, что зависимость  $K_a = f(D)$  можно аппроксимировать формулой

$$K_a = \exp(-\beta_3 D), \quad (13)$$

где  $\beta_3$  – параметр аппроксимации, имеющий смысл эффективного значения показателя ослабления кон-

траста в атмосфере.

Тогда, приравнявая (11) и (13), находим значение  $\beta_3$ :

$$\beta_3 = \frac{\ln \left[ 1 + \frac{2w}{r_{об} + r} (\exp(\beta D^*) - 1) \right]}{D^*},$$

где  $D^*$  – ожидаемое значение дальности действия АИНСУТ.

Как видно, величина  $\beta_3$  слабо зависит от значения  $D^*$  и, значит, не критична к его выбору.

Тогда, решая уравнение (4а) относительно  $D$ , с учетом (5) и (13) находим:

$$D = \frac{\sqrt{\left( \frac{2,15N\delta}{h} + \beta_3 \right)^2 + 3,8 \left( \frac{N\delta}{h} \right)^2 \ln \left( \frac{10K_m}{K_0} \right) - \left( \frac{2,15N\delta}{h} + \beta_3 \right)}{1,9(N\delta/h)^2},$$

где значение  $K_0$  определяется по (5) с учетом (12).

Достоинством описанной методики является то, что для ее использования не требуется знания экспериментально получаемых зависимостей разрешающей способности системы от освещенности фотокатода ЭОП и контраста миры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архуттик С.Т. и др. Модернизация приборов ночного видения // Спец. техника. 2005. № 3. С. 7.
2. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Несканирующие тепловизионные приборы. Казань: Изд. Каз. унта, 2004. 228 с.
3. Дунаев А.С., Шлычков В.И. Расчет дальности наблюдения для активно-импульсной телевизионной системы // Оптический журнал. 2005. № 4. С. 48–51.
4. Овсянников В.А., Филиппов В.Л. К развитию методик оценки эффективности видовой оптико-электронной аппаратуры // НПО “Государственный институт прикладной оптики”. Казань: Дом печати, 1997. С. 646–661.
5. Holst G. Electro-optical imaging system performance. SPIE press, US, 2003. 442 p.
6. Волков В.В. и др. Эргономика зрительной деятельности человека. Л.: Машиностроение, 1989. 136 с.
7. Рыфтин Я.А. Телевизионная система. М.: Сов. радио, 1967. 270 с.
8. O'Connor J. et al. Fifty-percent probability of identification comparison for target in the visual and IR spectral band // Opt. Eng. 2003. V. 42. № 10. P. 2706.
9. Vollmerhausen R. et al. Modeling the target acquisition performance of laser-range-gated imagers // Proc. SPIE. 2003. V. 5076. P. 101.
10. Бельский А.Б., Сенник Б.Н., Сухачев А.Б. Способы адаптации телевизионных систем к условиям изменения освещенности на местности // Оптический журнал. 2005. № 4. С. 38–43.
11. Шаронов В.В. Таблицы для расчета природной освещенности. М.: АН СССР, 1945.

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ АКТИВНО-ПАССИВНАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ЯРКОСТНО-ДАЛЬНОСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ РФ-ЛЛК

© 2007 г. Г. Н. Кадерова; В. Г. Каплан; В. В. Липатов; И. А. Непогодин, доктор физ.-мат. наук;  
В. А. Семин, канд. физ.-мат. наук; В. А. Степанов; В. С. Яцык, канд. техн. наук  
НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Оптико-электронная активно-пассивная система РФ-ЛЛК предназначена для получения и формирования пассивных яркостных инфракрасных (ИК) (диапазон длин волн 8–14 мкм) и лазерных яркостных и дальностных (рабочая длина волны 1,54 мкм) изображений фоноцелевой обстановки. Проведенные летные испытания показали высокую информативность совместных изображений пассивного ИК и лазерных (яркостного и дальнометрического) каналов.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 20.12.2005.

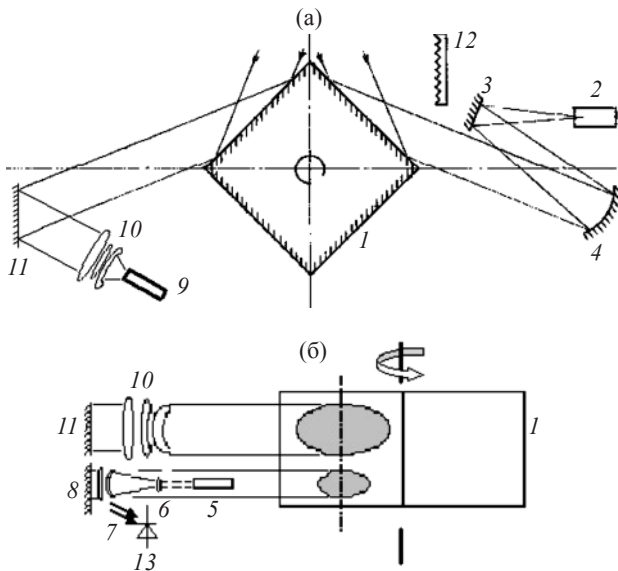
Возросшие в настоящее время требования к достоверности, полноте и своевременности информации, получаемой оптико-электронными системами, определяют необходимость совершенствования самих средств регистрации и построения комплексов, сочетающих в себе различные методы зондирования окружающей фоноцелевой обстановки (ФЦО) с использованием изображений, получаемых одновременно в нескольких спектральных диапазонах. К одному из таких комплексов можно отнести активно-пассивную систему РФ-ЛЛК, разработанную специалистами НПО ГИПО. Принцип действия системы основан на последовательном строчно-кадровом сканировании элементов местности с помощью активных лазерных и пассивного инфракрасного (ИК) каналов. Сканирующее устройство является общим для всех каналов, что позволяет осуществить пространственно-временное совмещение получаемых изображений. При этом при работе активных каналов происходит сплошное заполнение этого пространства лазерными импульсами и реализуются условия однопозиционной локации. Данные активных каналов, получаемые в виде лазерно-локационных яркостных и дальностных изображений ФЦО, определяются энергетическими показателями для заданных условий локации и напрямую зависят от оптических характеристик покрытий объектов и фонов (коэффициентов отражения и диаграмм коэффициентов яркости покрытия), а также формы их макроповерхности.

Система РФ-ЛЛК имеет следующие характеристики:

Количество одновременно работающих каналов	3
Область спектра, мкм:	
1-й канал (пассивный)	8,0–13,3
2-й канал (активный, яркостный)	1,54

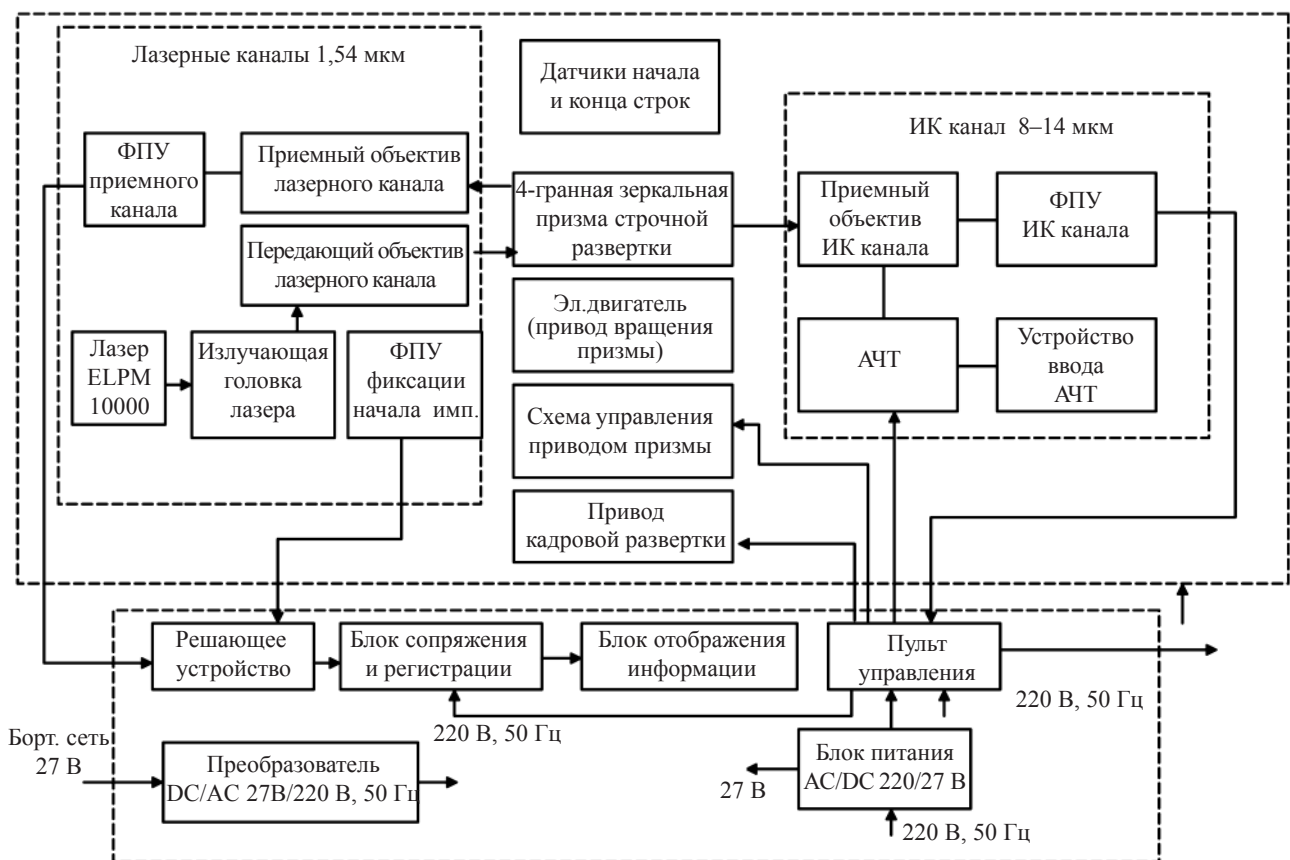
3-й канал (активный, дальнометрический)	1,54
Мгновенное поле зрения, на уровне	
0,5 $\delta_{\max}$ , мрад	
1-й канал	1,5
2-й канал	0,53
3-й канал	0,53
Поле обзора (длина строки), град	45
Частота строк, строк/с	37
Число элементов в строке, пиксел	512
Отображение информации	в реальном времени
Регистрация информации	цифровая, на жестком диске
Пороговая чувствительность 1-го канала к перепаду температур при $T = 293$ К, К	0,15
Пороговая чувствительность фотоприемного тракта активных каналов, нВт	72
Погрешность измерения дальности, м	0,5
Масса оптико-механического блока (ОМБ), кг	60
Масса оборудования вместе со стойками, кг	110
Потребляемая энергия от сети	
220 В, 50 Гц, ВА	400

В системе РФ-ЛЛК в качестве основы использована оптическая схема сканирующего устройства радиометра РФ-4М [1], реализующего 4-гранной зеркальной призмой строчно-кадровую развертку с полем обзора по строке  $45^\circ$ . Лазерные каналы построены по базовой схеме с апертурой приемного и передающего объективов 60 и 30 мм соответственно. В качестве источника излучения в активных каналах использован волоконный эрбиевый лазер ELPM-10000 (разработки “ИРЭ–Полус”), работающий в импульсно-периодическом режиме. Оптическая схема системы РФ-ЛЛК приведена на рис. 1. Излучение лазера, сформированное передающей оптической системой 6, 7, направля-



**Рис. 1.** Оптическая схема системы РФ-ЛЛК. а – вид сверху, б – вид снизу. 1 – четырехгранная призма, 2 – ФПУ ИК канала, 3, 8, 11 – ломающие зеркала; 4 – параболическое зеркало, 5 – лазер, 6, 7 – передающий объектив; 9 – ФПУ активных каналов, 10 – приемный объектив, 12 – опорная модель АЧТ, 13 – фотодатчик.

ется ломающим зеркалом 8 на четырехгранную призму 1, состоящую из плоских зеркал. Одновременно происходит фиксация момента послышки импульса фотодатчиком 13, установленным так, чтобы улавливать рассеянное зеркалом 8 излучение лазера. Гранью вращающейся призмы оно последовательно направляется на сканируемые участки местности. Отраженное элементами местности импульсное излучение вновь попадает на призму и ломающим зеркалом 11 направляется в приемный объектив 10, фокусируясь на чувствительной площадке фотоприемного устройства (ФПУ) 9. На рис. 1б показаны относительное размещение передающих и приемных оптических элементов активных каналов и их рабочие зоны на грани призмы. Фактическое совмещение полей зрения передающего и приемного объективов в силу разнесения их оптических осей происходит на конкретной дальности. В ИК канале радиационное излучение от участка местности, просматриваемого при сканировании, призмой направляется на объектив, представляющий собой параболическое зеркало 4 размером  $50 \times 120$  мм, далее ломающим зеркалом 3 направляется на ФПУ кана-



**Рис. 2.** Структурная схема системы РФ-ЛЛК.

ла 2. Оптические оси объективов активных и пассивного каналов установлены симметрично с двух сторон от призмы и расположены под углом  $22,5^\circ$ . Частота опроса по строке сканирования выбрана с учетом углового разрешения пассивного канала и составляет 512 пикселей. Сканирование осуществляется последовательно – смежными гранями призмы так, что начало строки сканирования в одном канале соответствует концу строки в другом. Оптические фотодатчики формируют сигналы о начале и конце строки в каждом канале, которые затем используются системой обработки информации. Опорная модель АЧТ 12 используется для калибровки ИК канала [1].

Структурная схема РФ-ЛЛК приведена на рис. 2. ФПУ пассивного канала представляет собой охлаждаемый жидким азотом фотоприемник КРТ (кадмий, ртуть, теллур) с площадкой  $0,3 \times 0,3$  мм и преусилителем. АЧТ с контролируемой температурой вводится электромеханическим устройством в поле зрения по команде с пульта управления (ПУ) при калибровке. Видеосигнал с ФПУ пассивного канала подается по кабелю в ПУ, где происходит усиление сигнала, регулируемого ступенчатым переключателем диапазона усиления.

Источник излучения активных каналов – лазер с длиной волны 1,54 мкм – создает периодическую последовательность импульсов с длительностью 5 нс, частотой посылок 75 кГц, мощностью излучения в импульсе 12,8 кВт. В качестве ФПУ активных каналов использован фотоприемный модуль на основе InGaAs-рпн-фотодиода “Кредо” (разработки НПО “Орион”). Дальнометрический активный канал организован решающим устройством при измерении временного промежутка между моментом фиксации посылки лазерного импульса и моментом фиксации на ФПУ отраженного излучения этого же импульса от элементов ФЦО. Яркий канал формируется этим же устройством при регистрации амплитуды отраженного импульса. С решающего устройства оцифрованные значения временного интервала и амплитуды сигнала подаются в блок сопряжения и регистрации сигналов. В данном блоке размещена многоканальная плата сбора L-783 (разработки фирмы L-Card), на которую, кроме сигналов активных каналов, вводится для оцифровки аналоговый видеосигнал пассивного канала. Полученные видеосигналы отображаются одновременно в реальном времени в виде дальностного, яркостного и тепловизионного изображений на блоке отображения информации и фиксируются на жестком диске блока регистрации.

Кадровая развертка строк может осуществляться двумя способами. В варианте, когда РФ-ЛЛК размещается в вертолете над люком грузовой подвески,

с полем зрения, направленным в “надир”, кадровая развертка осуществляется при полете вертолета с определенной скоростью  $V$ . Соотношение между скоростью  $V$  и высотой полета  $H$  зависит от разрешения на местности и частоты лазерных посылок. При частоте лазерных посылок 75 кГц и угловом разрешении 1,5 мрад скорость и высота полета связаны соотношением

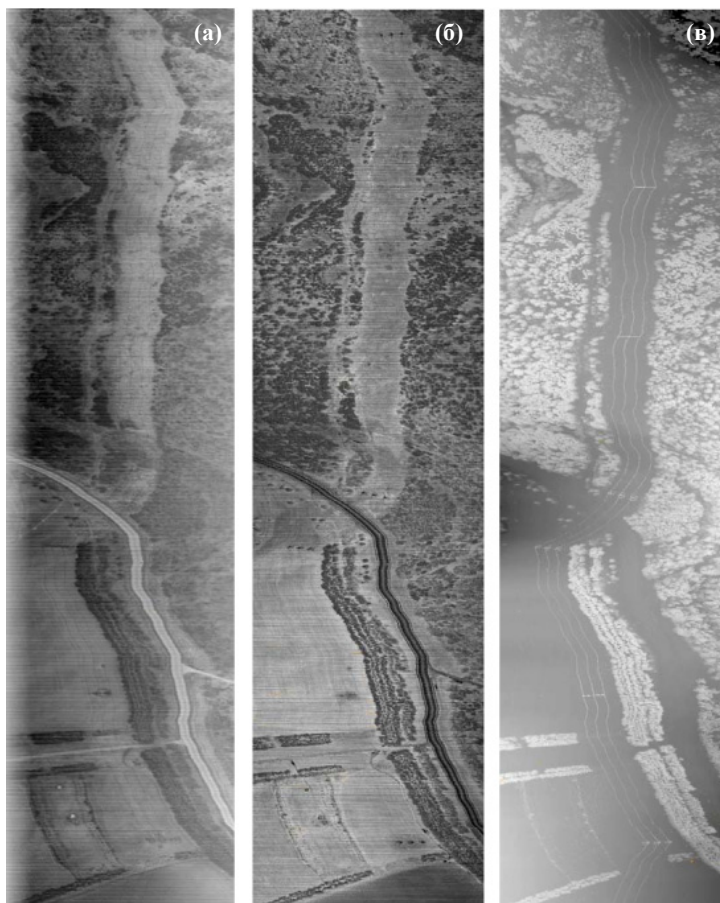
$$V = 198H.$$

В варианте, когда обзор ФЦО осуществляется с неподвижной платформы, кадровая развертка реализуется поворотом всего блока сканирования вокруг осей неподвижных опор, расположенных на станине сканера, с заданной скоростью с помощью привода кадровой развертки.

При эксплуатации на борту вертолета для электропитания используется преобразователь напряжения DC/AC, обеспечивающий преобразование напряжения бортовой сети вертолета 27 В в переменное напряжение 220 В, 50 Гц.

В ходе проведенных лабораторно-стендовых и летных испытаний (при размещении системы на борту вертолета МИ8-МТ) были подтверждены указанные выше основные параметры системы РФ-ЛЛК, а также получен большой объем совместных ИК, лазерных яркостных и дальностных изображений различных объектов на подстилающих и водных поверхностях.

Летные испытания аппаратуры РФ-ЛЛК проводились в период лето–осень 2004 года с территории летного полигона ОАО “Казанское авиапредприятие” в различное время суток. Высота полетов составляла 100–1000 м при соответствующем изменении скорости полета вертолета 60–200 км/ч. Трасса полетов включала объекты промышленной и гражданской инфраструктуры города Казани и ее пригорода, различные естественные образования. Полученные изображения показали высокую информативность сочетания ИК и лазерных каналов. Так, на рис. 3 представлены фрагменты изображений в трех каналах при пролете над ЛЭП с высоты 400 м. Если в пассивном и в активном яркостном изображениях достаточно подробно передаются элементы с высокой излучательной и отражательной способностями, то объекты с близкими оптическими характеристиками, как, например, протяженный провод на фоне земли, выделяются с трудом. В активном дальностном изображении за счет перепада высот такие объекты (провода ЛЭП, опорные стояки) уже четко выражены и при этом известны их геометрические размеры. Строя синтезированное изображение на основе трех каналов, можно перейти к трехмерному представлению



**Рис. 3.** Фрагменты изображений при пролете над ЛЭП. Высота 400 м. Время 12:30. а – пассивный ИК (8–14 мкм) канал, б – активный (1,54 мкм) яркостный канал, в – активный (1,54 мкм) дальнометрический канал.



**Рис. 4.** Совмещенное синтезированное изображение с трех каналов системы РФ-ЛЛК (по фрагментам рис. 3).

обозреваемой сцены (рис. 4), резко повышающей удобство восприятия.

Разработанная система может быть применена для решения задач воздушной разведки с малых и больших высот с использованием как пилотируемых, так и беспилотных летательных аппаратов, например, при поиске полезных ископаемых, мониторинге природных и антропогенных объектов,

а также может использоваться для решения поисково-спасательных задач в интересах служб МЧС.

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Степанов В.А., Яцык В.С. Четырехканальный сканирующий радиометр РФ-4М // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 10. С. 84–87.

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

© 2007 г. А. М. Берман; М. В. Дорофеева, канд. техн. наук, Н. Ю. Клочко; А. С. Митякин;  
Б. П. Муравьев; Р. Ш. Хисамов, канд. техн. наук; В. С. Яцык, канд. техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: postmaster@gipo.kazan.ru

Разработан комплекс оборудования, состоящий из устройств, обеспечивающих имитацию эволюций носителя (самолета, вертолета) и источников излучения, предназначенных для проверки двухцветных систем обнаружения и наведения. Источники имитируют излучение самолета, ракеты, ложных тепловых целей и Солнца в области спектра 3,0–5,0 мкм.

Коды OCIS: 120.0120, 120.4800.

Поступила в редакцию 17.04.2006.

Особенностью применения авиационных оптико-электронных систем обнаружения является необходимость выполнения заданных функций в условиях эволюций носителя (самолета, вертолета). Их размах и угловые скорости могут достигать весьма значительных величин, что накладывает на системы обнаружения дополнительные требования, связанные с учетом угловых перемещений цели в пределах зоны обзора.

Для проведения испытаний подобных систем (в том числе и так называемых двухцветных систем обнаружения) в условиях воздействия угловых колебаний в ГИПО был разработан испытательный комплекс, основными составляющими которого являются:

- имитатор эволюций носителя,
- малогабаритный имитатор эволюций носителя,
- двухзональные (двухцветные) источники излучения,
- многофункциональный коллиматор.

Рассмотрим кратко особенности этих элементов комплекса.

*Имитатор эволюций носителя (ИЭН)* представляет собой электромеханическое устройство, создающее колебания установленного на нем прибора относительно горизонтальной и вертикальной осей. Кинематическая схема станда представляет собой “шарнирно-рычажный механизм с изменяющимися размерами” [1], который позволяет варьировать величины размаха и угловой скорости колебаний в широких пределах (от  $\pm 10^\circ$  до  $\pm 60^\circ$  и от 5°/с до 150°/с соответственно). Развороты осей измеряются датчиками углов, максимальная погрешность которых не превышает 30". Угловые скорости вычисляются по отсчетам датчиков углов и временных интервалов, общая погрешность расчета угловых скоростей оценивается в 2% от величины угловой скорости.

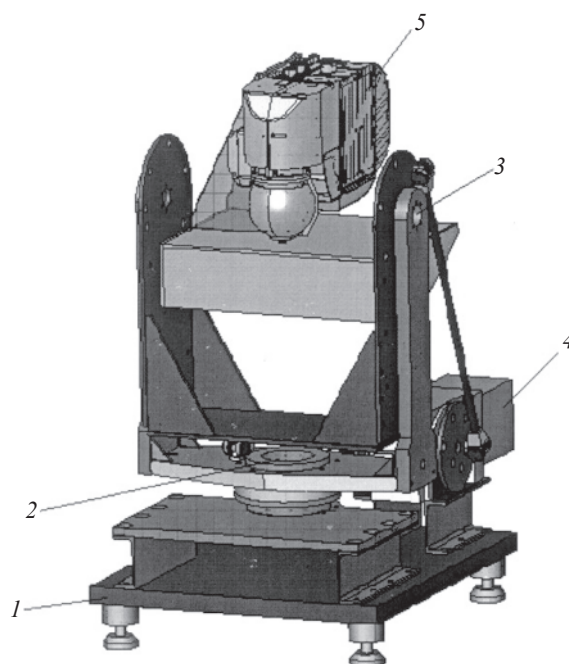
Сигналы датчиков обрабатываются компьютером, который контролирует параметры колебаний,

а также осуществляет преобразование этих сигналов к виду пилотажно-навигационной информации носителя, которая затем может быть введена в исследуемый прибор для повышения точности отслеживания цели.

Станд допускает установку на нем приборов с массой до 50 кг. Габаритные размеры станда 1040 × 700 × 1100 мм.

Внешний вид станда ИЭН приведен на рис. 1.

*Малогабаритный имитатор эволюций носителя (МИЭН)* является компактной установкой, предназначенной в основном для испытаний в термобарокамере. Станд создает колебания относительно вертикальной оси с размахом  $\pm 90^\circ$  и угловой скоростью до 90°/с.



**Рис. 1.** Внешний вид станда ИЭН. 1 – основание, 2 – вертикальная ось, 3 – горизонтальная ось, 4 – привод, 5 – испытываемый прибор.

Тип датчика угла такой же, как и в ИЭН, аналогичным образом проводится и обработка его сигналов. Габаритные размеры МИЭН  $800 \times 700 \times 800$  мм, стенд допускает размещение на нем приборов с массой до 40 кг.

Внешний вид МИЭН приведен на рис. 2.

Конструктивное исполнение МИЭН в сочетании с коллимированными источниками излучения 4 позволяет контролировать зону обзора установленного на нем изделия в пределах полусферы.

Двухзональные источники излучения предназначены для испытания систем обнаружения, в которых реализован способ двухцветной спектральной селекции [2]. Источники имитируют излучение воздушных целей (самолета, вертолета, ракеты) и помех (ложных тепловых целей, Солнца) в области спектра  $3,0\text{--}5,0$  мкм, которая в свою очередь разделена на два поддиапазона ( $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$ ). Источники построены по двухканальной схеме. Выходной поток в них формируется как сумма двух потоков: один – в диапазоне  $\Delta\lambda_1$ , другой – в диапазоне  $\Delta\lambda_2$ .

Схема источника, имитирующего воздушные и ложные тепловые цели, приведена на рис. 3. Источником излучения в нем служит лампа накаливания ТРШ 1500-2300. Тело накала лампы – вольфрамовая спираль размером  $2,5 \times 2,5$  мм, выходное окно из сапфира, рабочий ток до 1,5 А при потребляемой мощности до 15 Вт. Уровни излучения в каждом из каналов определяются током накала. Диафрагмы 2 служат для снижения интенсивности паразитных засветок. Общая погрешность сформированного таким образом потока излучения может достигать 5% от его величины.

Основными параметрами рассмотренного источника излучения являются энергетическая освещенность  $E_{\Delta\lambda}$  в диапазонах  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$ , создаваемая на определенном расстоянии от источника, и его угловой размер на этом расстоянии.

Величина  $E_{\Delta\lambda}$  должна соответствовать энергетической освещенности, создаваемой объектом обнаружения, находящимся на расстоянии  $L$  от системы обнаружения, и определяемой по формуле

$$E_{\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} \frac{J_{\lambda} \tau_{a\lambda}}{L^2} d\lambda,$$

где  $J_{\lambda}$  – спектральная плотность силы излучения цели,  $\tau_{a\lambda}$  – спектральное пропускание атмосферы.

Угловой размер объекта обнаружения определяется исходя из его линейных размеров, ракурса наблюдения и расстояния до системы обнаружения.

Величины  $J_{\lambda}$  и  $\tau_{a\lambda}$  задаются созданными в ГИПО оптическими моделями излучения воздушных целей. Модели (самолет, вертолет, ракета и др.) учитывают собственное излучение корпуса, струи дви-

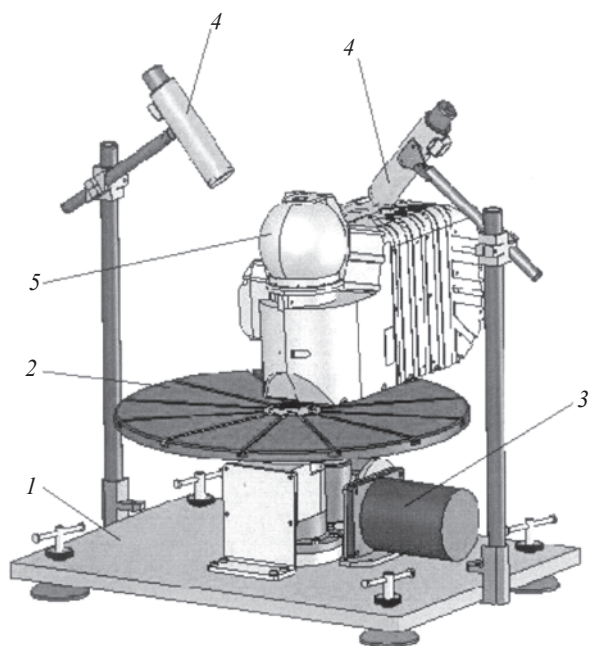


Рис. 2. Внешний вид МИЭН. 1 – основание, 2 – подвижная платформа, 3 – привод, 4 – источник излучения, 5 – испытываемый прибор.

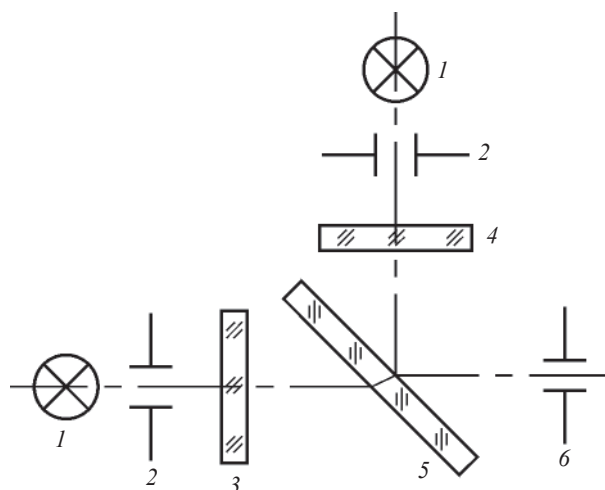


Рис. 3. Схема источника. 1 – излучатель, 2 – диафрагма, 3 – светофильтр  $\Delta\lambda_1$ , 4 – светофильтр  $\Delta\lambda_2$ , 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – выходная диафрагма.

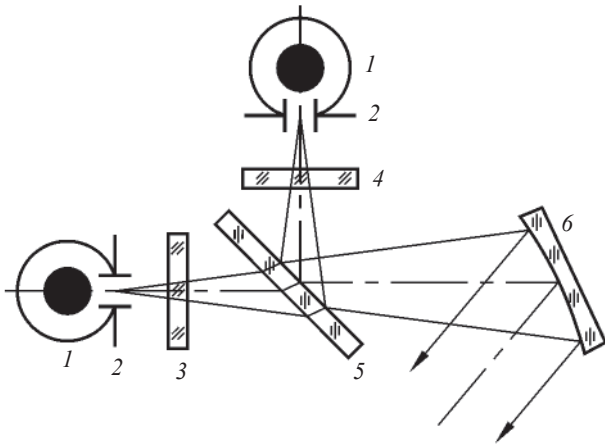
гателя, а также отраженное излучение фона и подстилающей поверхности.

Калибровка источников проводилась методом сличения с моделью черного тела с температурой  $300$  °С. Целью калибровки было получение зависимости

$$E_{\Delta\lambda} = f(I_n),$$

где  $I_n$  – ток накала лампы.

Диапазон освещенностей, создаваемых источниками-имитаторами воздушных целей (на расстоянии



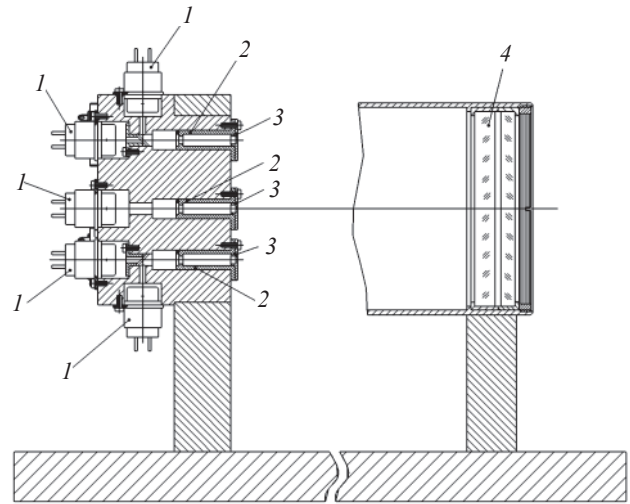
**Рис. 4.** Схема источника “Солнце”. 1 – излучатель, 2 – диафрагма, 3 – светофильтр  $\Delta\lambda_1$ , 4 – светофильтр  $\Delta\lambda_2$ , 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – сферическое зеркало.

до 10 м), находится в пределах от  $8,0 \times 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup> до (с использованием нейтральных ослабителей)  $1,0 \times 10^{-12}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Источники могут быть использованы с различными оптическими коллимирующими системами.

Схема источника-имитатора “Солнце” приведена на рис. 4. Излучателем здесь служит глобар с диаметром стержня 4 мм и температурой 1600 К, заключенный в кожух с водяным охлаждением. Формирование спектральных диапазонов и их сложение осуществляются так же, как и в рассмотренном выше источнике. Угловой размер Солнца (32') задается диафрагмами 2 и сферическим зеркалом 6 с фокусным расстоянием  $f' = 250$  мм и диаметром 60 мм.

Модель излучения Солнца базируется на модели Солнца разработки ГОИ (1979). Энергетическая освещенность, создаваемая имитатором “Солнце”, примерно в 8 раз ниже освещенности, создаваемой непосредственно Солнцем, однако при этом имитатор позволяет решать ряд задач, возникающих при создании систем обнаружения. Следует заметить, что



**Рис. 5.** Схема многофункционального коллиматора. 1 – источники излучения, 2 – конденсорные линзы, 3 – диафрагмы, 4 – объектив.

вследствие обгорания глобаров потоки излучения от имитатора “Солнце” медленно изменяются (“плывут”) во времени, но это изменение укладывается в общую погрешность 5% от величины потока.

*Многофункциональный коллиматор* обеспечивает формирование на равномерном фоне нескольких (до 5 штук) источников, имитирующих излучение воздушных целей, характеристики излучения которых и способ формирования выходного потока аналогичны рассмотренному выше источнику. Схема показана на рис. 5 и состоит из источников излучения 1, конденсорных линз 2, диафрагм 3 и объектива 4. Параметры коллиматора: фокусное расстояние 1 м, угловое поле 4°, диаметр выходного зрачка 100 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике. М.: Наука, 1971. 1008 с.
2. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 472 с.

## ПОЛУЧЕНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

© 2007 г. В. Г. Кукс, канд. техн. наук; А. Г. Хуснутдинов

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Статья посвящена методам и средствам изготовления и контроля асферических деталей, разработанным в НПО ГИПО, в том числе в последние годы. Эти методы нашли широкое применение в единичном и среднесерийном изготовлении нескольких сот видов асферических деталей, внедрены на ряде предприятий отрасли и отвечают современным требованиям в производстве точных асферических линз и зеркал самого разного назначения – от конденсоров до астрооптики.

Коды OCIS: 220.1250.

*Поступила в редакцию 15.06.2006.*

Оптическим элементам с преломляющими и отражающими асферическими поверхностями (АП) принадлежит особая роль в области оптико-механического, оптико-электронного и тепловизионного приборостроения, что обусловлено особыми свойствами таких поверхностей. В зависимости от требуемых выходных характеристик оптической системы расчетом можно предусмотреть как число АП, так и изменение кривизны во всех точках каждой из них по заданному закону. Поэтому фокусирующие и корректирующие возможности АП много шире, чем у сферических. Это позволяет не только улучшить характеристики оптических систем в части повышения качества изображения, относительного отверстия, снижения габаритов и веса, но и создавать принципиально новые приборы. При этом может быть достигнуто одновременное улучшение нескольких из перечисленных характеристик. В оптических системах, действующих в инфракрасной области спектра, АП практически незаменимы, поскольку их применение в значительной степени компенсирует крайнюю ограниченность в выборе оптических материалов, прозрачных в данном спектральном диапазоне. Наиболее показательным и эффективно применение АП в зеркальных оптических системах, поскольку в ряде случаев только введение таких поверхностей является единственно возможным решением.

Несмотря на очевидные достоинства АП, их практическое использование значительно уступает потенциальным возможностям, что в первую очередь объясняется сложностью получения АП с точки зрения возможностей производственного и контрольного оборудования. Это обусловлено принципиальной особенностью любой АП по сравнению со сферической поверхностью – отсутствием единого для всех точек поверхности центра кривизны и практической невозможностью в связи с этим эффективно использовать станки, применяемые для получения сферических или плоских поверхностей.

При этом требуются АП в широком диапазоне параметров: уравнение второго и высших порядков, диаметр от нескольких миллиметров до нескольких метров, крутизна до  $60^\circ$ – $80^\circ$ , асферичность (отступление от ближайшей сферы) от долей микрометра до десятков миллиметров, градиент асферичности от сотых долей микрометра до сотен микрометров на 1 мм зоны, точность до сотых долей длины световой волны. Поэтому на сегодняшний день не существует как универсального метода получения (и соответствующего станочного оборудования), так и универсального метода точного контроля любых АП. Каждая поверхность, как правило, формируется индивидуально ввиду невозможности (за очень редким исключением) блочной обработки нескольких деталей. Возможности контроля также зависят от перечисленных выше параметров. Известно множество методов формирования АП и их контроля, но промышленное применение нашли только некоторые из них в силу неизбежного негативного влияния многочисленных технологических и других (например, экономических) факторов, которые выявляются в процессе реализации любого метода и тем самым ограничивают область его практического использования.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что технология получения АП развивается в основном посредством решения каждым заинтересованным предприятием (фирмой)-изготовителем асферических деталей возникающей перед ним локальной задачи, связанной с выпуском конкретного изделия, когда его конкурентоспособность, основанная на высоком качестве, не может быть обеспечена без применения АП. Например, к таким локальным задачам можно отнести разработку технологии асферизации линз сверхсветосильных высокократных фотообъективов, объективов тепловизионной аппаратуры, конденсоров, зеркал телескопических систем и т. д. Показательным является тот факт, что наиболее продвинутые технологии фирмами-

разработчиками не разглашаются, поскольку относятся к области высоких технологий.

До начала 60-х годов прошлого столетия в СССР оптические детали с АП вращения получали ручной ретушью или вакуумным напылением при асферичности порядка 5–30 мкм либо “ножевым” методом в случае поверхностей 2-го порядка при большей асферичности и невысокой точности – до 2' по отклонению нормалей от расчетных направлений. Методы и средства точного контроля также были крайне ограничены. Особенно это касалось АП высших порядков со значительной асферичностью.

В 1960-х годах в ГИПО был предложен и в дальнейшем детально разработан принципиально новый метод асферизации – упруго деформируемым инструментом [1] (рис. 1) – выпуклых и вогнутых поверхностей вращения 2-го и высших порядков (без точек перегиба) диаметром от 20 до 500–600 мм, крутизной до 30°–40°, асферичностью в сотни и градиентом асферичности в десятки микрометров (ограничение определяется только пределом упругости материала инструмента) на различных оптических материалах (стекла, ситаллы, кварц, кремний, германий, оптокерамика, флюорит и т. д.). Асферизация выполняется посредством снятия “лишнего” материала. Работа ведется свободным абразивом. Инструмент позволяет обрабатывать одновременно всю асферизируемую поверхность, обеспечивая автоматическое формирование требуемой АП независимо от формы исходной заготовки за счет выравнивания рабочих удельных нагрузок на деталь в момент формирования требуемой поверхности после снятия неравномерного припуска. Последующая обработка сопровождается снятием равнотолщинного в осевом направлении слоя материала без искажения полученной асферической формы. Такой эффект достигается, во-первых, благодаря оригинальной конструкции корпуса инструмента. В исходном ненагруженном состоянии его рабочая поверхность имеет сферическую или плоскую форму.

Корпус разделен радиальными прорезями на ряд лепестков переменной толщины, рассчитанной на ЭВМ. Под воздействием приложенных к нему нагрузок корпус упруго деформируется, придавая рабочей поверхности требуемую форму после снятия неравномерного припуска. Во-вторых, такая (полноразмерная) конструкция обеспечивает практическое равенство времени обработки во всех точках поверхности. В-третьих, рабочая скорость движения инструмента относительно детали во всех точках обрабатываемой поверхности выравнивается с точностью до нескольких процентов благодаря оригинальной кинематике движения. В совокупности это позволяет обеспечивать высокую точность формообразования (шлифование с точностью 1–3 мкм, полирование с точностью до 5" по отклонению нормалей). Еще одним важным достоинством метода является минимальное отклонение формируемой АП от поверхности вращения по сравнению с другими методами асферизации. Происходит это благодаря тому, что инструмент, имеющий 5 степеней свободы, автоматически самоустанавливается на обрабатываемой поверхности. Данный метод дает высокую воспроизводимость результатов, что имеет первостепенное значение в серийном производстве. Проблема износостойкости инструмента успешно решена посредством нанесения на его рабочую поверхность воспроизводимого алмазоносного покрытия, в котором алмазные зерна играют роль упрочняющих элементов, для чего была предложена и разработана оригинальная методика закрепления алмазных зерен, ориентированных плоскими гранями в сторону асферизируемой поверхности. Шлифование и полирование производится с применением традиционных для оптического производства материалов: абразивов, смол и т. д.

Для промышленной реализации данного метода были необходимы совершенно новые специализированные станки. Принцип работы и кинематическая схема таких станков были предложены, разра-

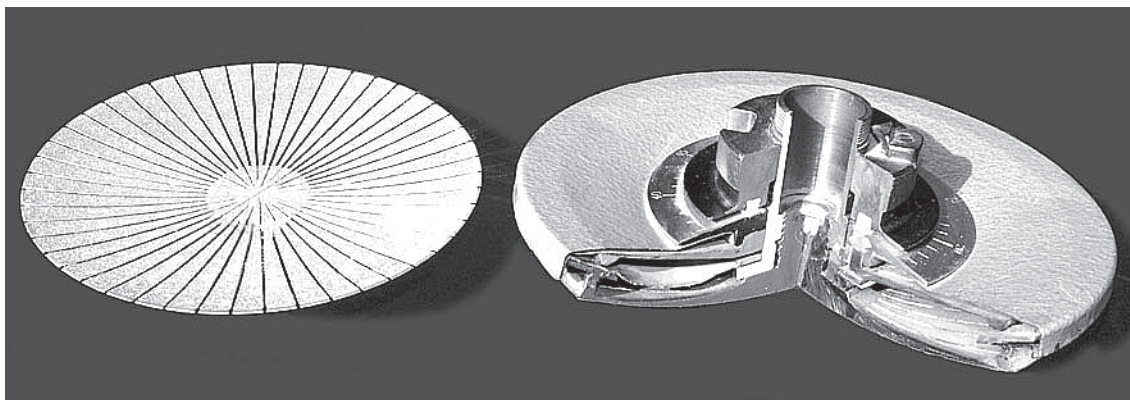
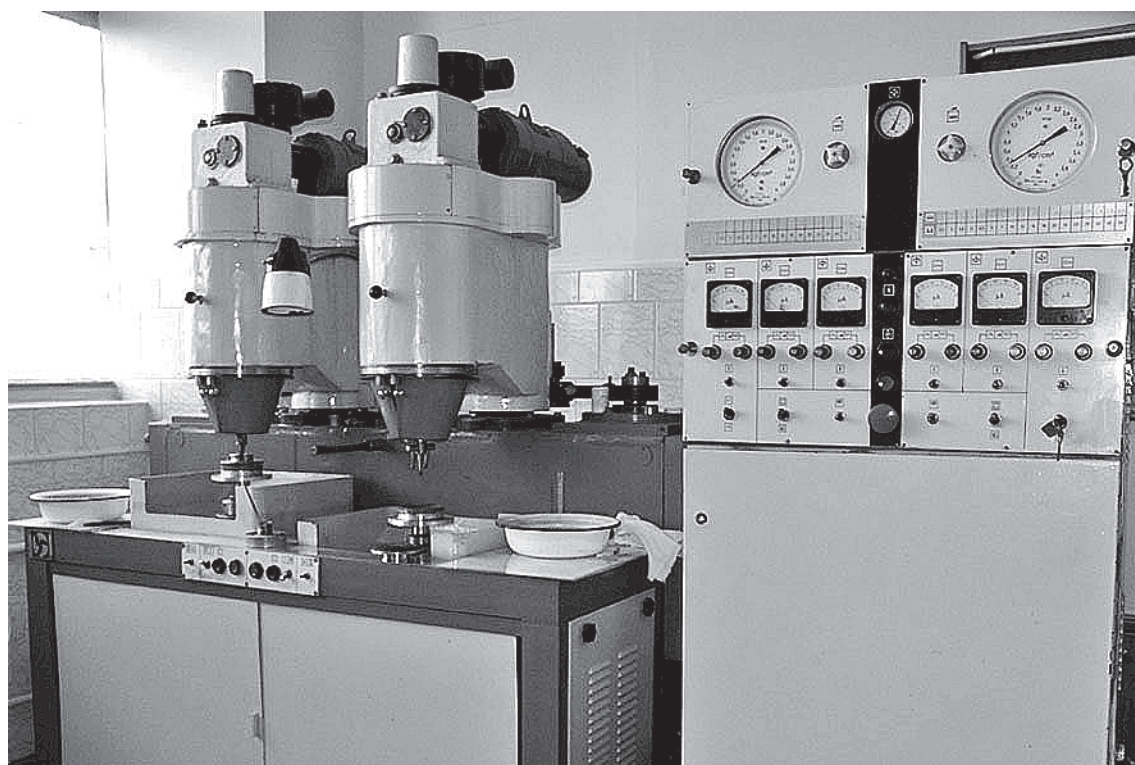


Рис. 1. Упругодеформируемые инструменты для асферизации выпуклой (слева) и вогнутой (справа) поверхностей.

ботаны и опробованы в ГИПО на макетах, после чего было разработано техническое задание на несколько моделей станков. На Минском механическом заводе в 1968 г. спроектировали и изготовили первый станок “Планета”, названный так в силу планетарной схемы движения упругодеформируемого инструмента относительно детали. Примененная кинематика позволяет при смещении инструмента относительно детали всего на несколько миллиметров (до 6–10 мм для разных моделей станка) обеспечить высокие и практически равные во всех точках обрабатываемой поверхности рабочие скорости [2]. В совокупности с безынерционностью рабочей нагрузки на инструмент, создаваемой сжатым воздухом, это радикально решило вопрос высокой производительности и точности асферизации полноразмерным инструментом с перспективой развития и совершенствования такой технологии. С 1971 по 1988 г. выпущены 4 модели станков этой серии общим количеством около 100 штук. Ими оснащены предприятия отрасли, где изготавливали асферические детали диаметром от 20 до 500 мм. Они успешно работают, например, в НПО ГИПО по сей день, обеспечивая высокую производительность и точность. На рис. 2 представлен станок “Планета-100/250”.

Параллельно с созданием методов асферизации и производственного оборудования разрабатыва-

лись и новые методы технологического и аттестационного контроля. В 1960-х годах был разработан метод и создано необходимое математическое обеспечение для контроля любых шлифованных АП диаметром до 600 мм на приборах типа шарикового сферометра ИЗС-7 и ИЗС-8 либо на 3-координатной измерительной машине [3, 4] с точностью 1,0–1,5 мкм по осевой координате. Этот метод несколько десятков лет успешно применяется в НПО ГИПО и на ряде предприятий, куда он был внедрен вместе с технологией получения АП упругодеформируемым инструментом. На конечной стадии асферизации – полировании – необходим также оперативный метод контроля, без чего практически невозможно серийное производство. В ГИПО был предложен и разработан принципиально новый метод контроля АП – асферическими пробными стеклами [5]. Он позволяет быстро, не снимая детали со шпинделя станка, проводить технологический и аттестационный контроль АП диаметром до 250 мм с достаточно высокой точностью – до 5" по отклонению нормалей; при этом гарантируется 100%-ная взаимозаменяемость асферических деталей. Это особенно важно в серийном производстве, где применение асферических пробных стекол наиболее эффективно и оправдано. Так, например, на предприятии КОМЗ в течение 18 лет серийно изготавливались 4 вида зеркал с АП высоких порядков с



**Рис. 2.** Шлифовально-полировальный станок “Планета-100/250” для асферизации деталей диаметром от 100 до 250 мм упругодеформируемыми инструментами.

применением станков “Планета-100/250”, упругодеформируемых инструментов и асферических пробных стекол.

С конца 70-х годов в ГИПО началось практическое освоение нового метода контроля АП – с применением синтезированных голограмм [6] в схеме интерферометра. Этот метод в силу своей большей универсальности значительно расширил возможности эффективного использования разработанной в ГИПО технологии асферизации, особенно применительно к АП высоких порядков, наиболее востребованных в последнее время. Значительно упростилось изготовление асферических пробных стекол при одновременном повышении их точности.

Методом упругодеформируемого инструмента на станках “Планета” в общей сложности изготовлено в штучном и серийном производстве на предприятиях отрасли несколько сот видов асферических деталей, общее количество которых исчисляется тысячами штук.

С 1977 года в ГИПО велись интенсивные работы по автоматизации технологических процессов в пределах указанного выше диапазона технологических параметров АП, результатом чего стала разработка метода асферизации малым, по сравнению с размером детали, инструментом с применением свободного абразива. Управление процессом снятия переменного припуска выполняется с помощью управляющего вычислительного комплекса на базе ранее разработанного в ГИПО станка “Старт-500” посредством регламентации времени пребывания инструмента в обрабатываемой зоне в зависимости от величины подлежащего съему зонального припуска. Это достигается за счет расчетной переменной скорости перемещения инструмента в диаметральной (или близком к нему) сечении АП. Асферизация малым инструментом наиболее целесообразна на операции шлифования (точность обработки 1–2 мкм) или для полной обработки АП пластин Шмидта. Полирование этим методом малоэффективно из-за невысокой производительности, поэтому наиболее перспективным оказалось его применение как части комплексной технологии: шлифование АП выполняется малым инструментом с управлением от ЭВМ с последующим высокопроизводительным полированием полноразмерным упругодеформируемым инструментом. Такая технология широко применялась в ГИПО и была внедрена на НПЗ (г. Новосибирск), ее эффективность и актуальность не потеряна и в настоящее время.

С начала 1990-х годов на базе станков “Планета” в НПО ГИПО велись работы по совершенствованию технологии асферизации, в том числе в направлении получения актуальных прецизионных АП с точностью не хуже  $0,1\lambda$  ( $\lambda = 0,63$  мкм) по откло-

нению от расчетного профиля. Аналогичные результаты достигаются либо малопроизводительной ручной ретушью силами отдельных оптиков-умельцев самой высокой квалификации, либо на очень дорогом импортном оборудовании с компьютерным управлением, практически предназначенном для штучного производства или только для операции шлифования. В НПО ГИПО разработан и успешно эксплуатируется метод прецизионной асферизации на станках “Планета” полноразмерным инструментом посредством полирования от ближайшей сферы при асферичности до 20 и более микрометров. Рабочая полирующая поверхность нового инструмента рассчитывается на компьютере и ограничена определенным образом расположенными отрезками окружностей. Разработана математическая модель обработки и соответствующее программное обеспечение для персонального компьютера. Достоинством нового метода является повышение точности асферизации за счет недопущения высокочастотных погрешностей благодаря исключению необходимости зональной “подрезки” полирующего слоя. Инструмент дешев, прост в изготовлении и эксплуатации. Благодаря удачному инженерному решению самые высокие результаты может получать любой оптик средней квалификации, имеющий опыт полирования оптических деталей. Не менее успешно применение нового инструмента для прецизионного полирования предварительно шлифованных АП. Этот техпроцесс асферизации отлично себя зарекомендовал при обработке деталей диаметром до 600 мм. На рис. 3 в качестве примера показано, как последовательно происходит съем припуска при формировании предложенным методом поверхности  $Z^2 + Y^2 = 2587,89x$  со световой зоной 320/80 мм. На рис. 4 приведены интерферограммы контроля

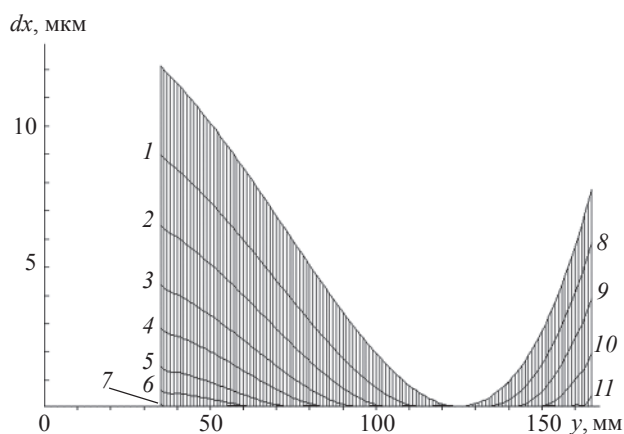
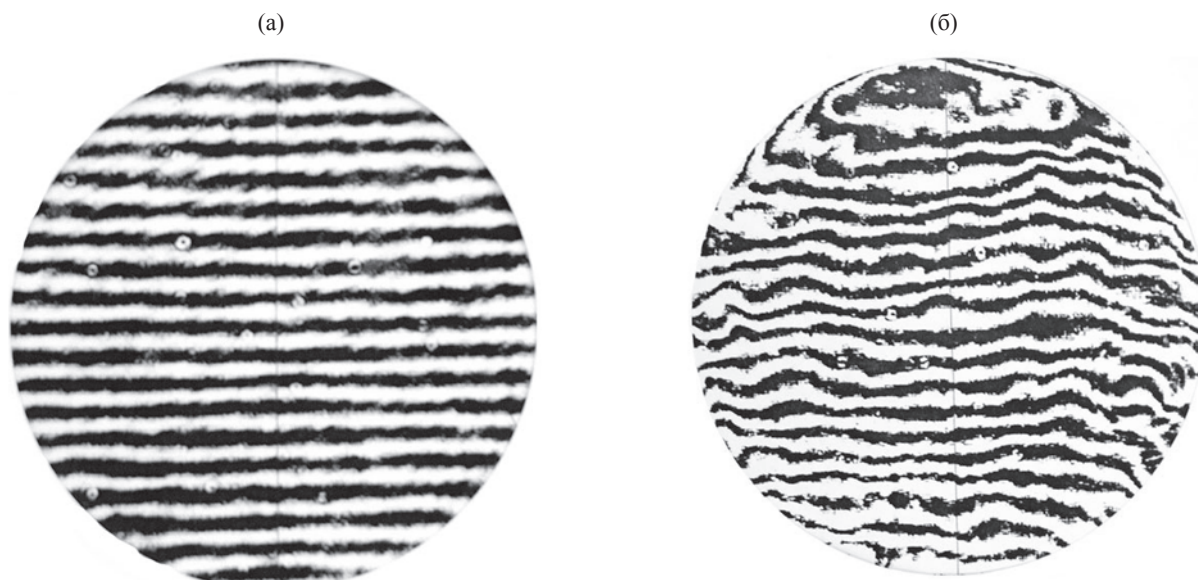


Рис. 3. Прецизионное полирование полноразмерным инструментом. Кривые 1–11 – значения остаточного припуска  $dx$  после соответствующих сеансов обработки,  $y$  – координата радиальной зоны АП.



**Рис. 4.** Интерферограммы внеосевого элемента  $\varnothing 120$  мм параболической вогнутой поверхности с фокусом 647 мм, асферизованной прецизионным полированием полноразмерным инструментом на станке “Планета-100/250” (а) и малым инструментом на импортном станке с компьютерным управлением (б).

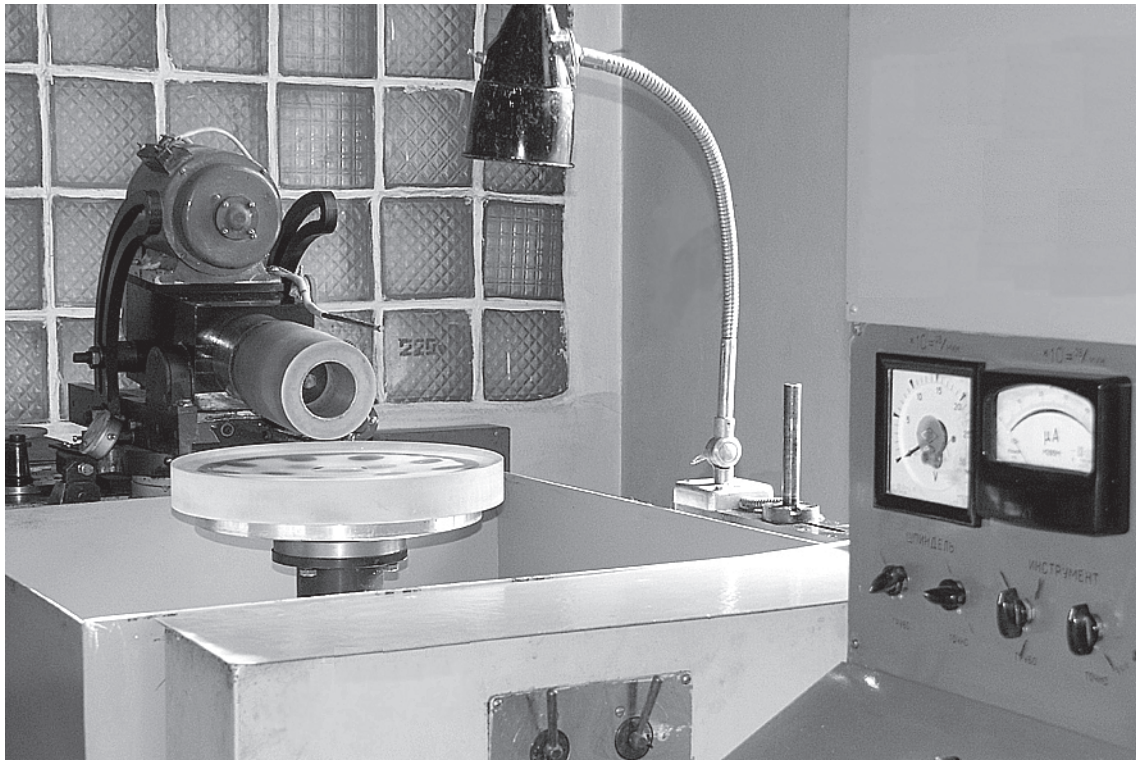
рабочего внеосевого элемента такой поверхности: а – асферизация выполнена в НПО ГИПО, б – асферизация на импортном оборудовании одного из предприятий Москвы.

В последние несколько лет в НПО ГИПО на базе станков “Планета” ведутся работы по применению полноразмерного жесткого инструмента (далее – асферического инструмента) с асферической рабочей поверхностью, обратной по знаку требуемой АП детали. Такие попытки делались и ранее, но без ощутимых успехов. Как показал опыт, даже при погрешности изготовления асферического инструмента, измеряемой долями микрометра, погрешность асферизации многократно превышает ее. Дело в том, что при смещении оси инструмента относительно оси детали (что необходимо для нормальной работы свободным абразивом) происходит неуправляемое перераспределение съема материала по зонам в зависимости от технологических параметров АП, смещения инструмента, размера абразивных зерен, износа инструмента и других факторов, влияющих на работу диспергирования. Определение закона образования пятен контакта инструмента и детали, их размера, местоположения и перемещения по обрабатываемой поверхности и в конечном счете определение закона съема припуска с учетом всех влияющих факторов представляется чрезвычайно сложной задачей, особенно для АП с большой величиной асферичности и градиента асферичности. Ее решение сводится к определению такого уравнения рабочей поверхности инструмента, которое позволит при конкретных

параметрах и режимах обработки сформировать с заданной точностью требуемую АП на детали. Первые положительные результаты разработки и применения асферического инструмента получены при серийном изготовлении двух видов асферических линз из кремния диаметром 35 мм с асферичностью до 14 мкм. Для конкретных режимов обработки были рассчитаны уравнения рабочих поверхностей асферических инструментов из латуни и алюминиевого сплава с учетом их износа, что позволило обеспечить стабильные результаты шлифования с точностью 1–2 мкм. Дальнейшие результаты в этом направлении будут зависеть от успешности математического решения упомянутой выше задачи, математического моделирования и технологического воплощения для более широкого диапазона АП.

В НПО ГИПО проводилась также разработка методов формообразования сверхсветосильной асферической оптики.

Известно, что АП сверхсветосильной асферической оптики, до  $60^\circ$ , могут быть шлифованы методами траекторного копирования с помощью алмазных инструментов [7–10]. Однако при этом ограничены возможности повышения производительности обработки, так как пятно контакта (касания) инструмента с обрабатываемой поверхностью составляет в среднем лишь одну сотую длину ее образующей. Кроме того, использование станков со сложной кинематической схемой для асферизации методом траекторного копирования в значительной степени усложняет процесс формообразования и



**Рис. 5.** Внешний вид станка “Старт-200”, модернизированного для алмазного шлифования асферической оптики профильными инструментами.

требует высокой квалификации специалистов, обслуживающих эти станки, что приводит к увеличению трудоемкости процесса асферизации.

Для повышения производительности алмазного шлифования и упрощения процесса формообразования предложено вести обработку одновременно по всей длине образующей с относительным рабочим перемещением вращающегося инструмента и обрабатываемой детали в направлении, перпендикулярном образующей ближайшего к обрабатываемой поверхности конуса, и проводить обработку инструментом, выполненным с переменным радиусом кривизны образующей в соответствии с изменением радиуса кривизны образующей обрабатываемой поверхности [11].

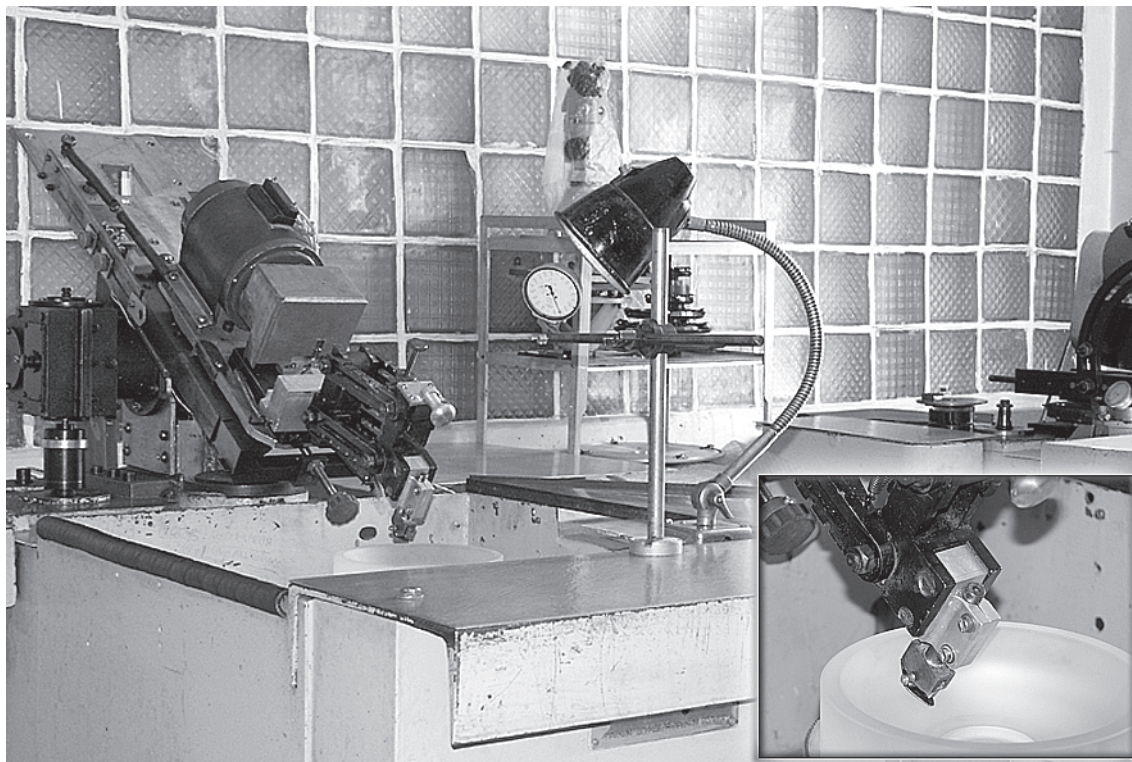
Алмазное шлифование при этом производится на универсальных круглошлифовальных станках типа 3У10В, 3Е12, 3К12 и на модернизированных станках типа 3М227, “Старт-200” (рис. 5) последовательно инструментами, на рабочую поверхность которых нанесен алмазоносный слой из алмазных порошков зернистости АСВ 250/200, АСВ 100/80 и АСМ 28/20 на следующих режимах: частота вращения инструмента 3000–5000 об/мин, скорость подачи инструмента для съема припуска на обработку выбирают в зависимости от стадии шлифования в пределах 0,01–1,5 мм/мин. При этом количество переходов и зернистости соответствующих инструментов выбирают исходя из припуска на обработку

и с учетом съема слоя стекла на глубину, не превышающую величину применяемого на данном переходе алмазного зерна более чем в 2–3 раза.

Этим методом были асферизованы на стадии шлифования более 50 видов различных поверхностей со следующими параметрами:

- диаметр от 7 до 350 мм,
- крутизна до 90°,
- крутизна деталей с отверстиями от 25° до 115°,
- асферичность до 10 000 мкм,
- градиент асферичности по нормали до 600 мкм/мм,
- точность алмазного шлифования в пределах  $\pm 3$  мкм.

Применение алмазного шлифования профильными инструментами позволяет осуществить высокопроизводительную асферизацию оптических деталей в широком диапазоне по их крутизне и асферичности. Однако это не обеспечивает необходимую точность шлифования, что связано непосредственно с погрешностью проточки рабочей поверхности инструмента на станке с программным управлением, поэтому для повышения точности асферической поверхности на стадии шлифования предлагается ввести операцию доводочного шлифования методом распределения работы по зонам на модернизированном станке типа “Старт-200” (рис. 6) последовательно микропорошками зернистости М20 и М10 с помощью инструмента, длина которого меньше дли-



**Рис. 6.** Внешний вид станка “Старт-200”, модернизированного для доводочного шлифования малыми инструментами.

ны образующей обрабатываемой поверхности. Для этого необходимо сообщить:

- вращательное движение обрабатываемой детали с частотой 15–30 об/мин;
- возвратно-поступательное движение инструменту вдоль образующей обрабатываемой поверхности как с постоянной, так и с переменной (с управлением от компьютера) скоростью в пределах от 1 до 10 мм/мин;
- осциллирующее движение инструменту вдоль образующей обрабатываемой поверхности в пределах 50–100 дв. ход/мин при двойном ходе инструмента от 1,0 до 3,0 мм.

Как показал многолетний опыт работы, применение доводочного шлифования после алмазного позволяет не только уменьшить погрешность шлифования с  $\pm 0,003$  до  $\pm 0,001$  мм, но и улучшить шероховатость и класс чистоты, что обеспечивает повышение производительности и точности на стадии полирования.

Полирование асферической поверхности осуществляется на модернизированных станках “Старт-200”, ЗБ12, ЗПД320 (рис. 7) [12]. В качестве полировальника при этом применяется многослойный, в виде гибкого (упругого) лепестка инструмент [13], который выполнен с переменными шириной и толщиной и переменным радиусом кривизны по образующей таким образом, что он обеспечивает съём постоянного слоя стекла при равномерном удель-

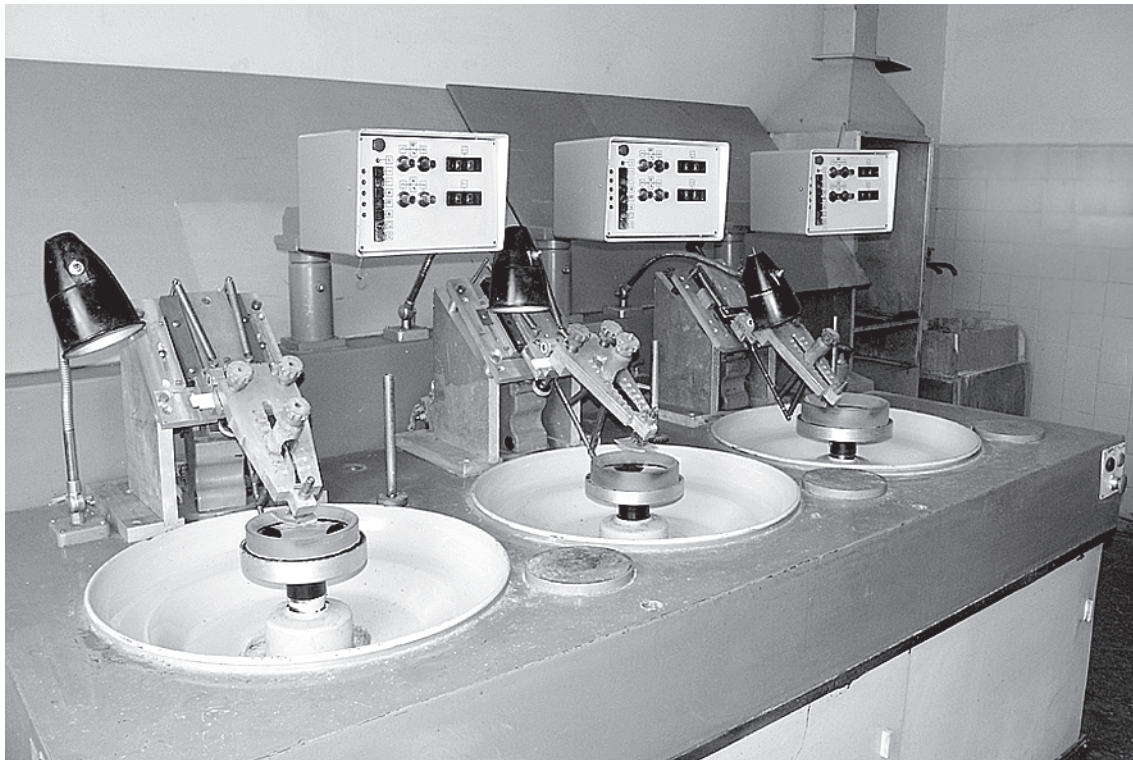
ном давлении в зоне обработки в момент формирования заданной асферической поверхности на расчётном режиме, а также позволяет уменьшить деформацию и тем самым исключить возникновение остаточной деформации при расширении диапазона обрабатываемых поверхностей по асферичности (до 10 000 мкм и более).

При полировании наиболее предпочтительны следующие режимы обработки:

- частота вращения обрабатываемой заготовки, об/мин – 20–60,
- осциллирующее движение инструмента вдоль образующей обрабатываемой поверхности, число дв. ход/мин – 40–100.

Верхние пределы упомянутых выше скоростей применяются, как правило, в начальной стадии полирования, а нижние – на стадии доводки. При этом осуществляется также корректировка рабочей поверхности полировальника по результатам контроля и продолжается до достижения максимально допустимого значения отклонения нормалей от расчётных направлений в пределах 10”–20” при градиенте асферичности до 200 мкм/мм.

Разработанные в ГИПО технологические процессы асферизации оптических деталей с большой кривизной и асферичностью были внедрены на предприятиях страны, в частности, на КОМЗе, АОМЗе, ИПЗ (г. Изюм) и на заводе “Фотоприбор” (г. Черкассы).



**Рис. 7.** Внешний вид станка 3ПД320, модернизированного для полирования асферической оптики инструментом в виде гибкого (упругого) лепестка.

По заказу ГОИ была разработана и передана техническая документация для организации серийного производства асферических зеркал для фурье-спектрофотометра, а также были изготовлены и переданы опытные образцы зеркал для этого прибора.

Кроме того, в ГИПО были изготовлены и переданы опытные образцы асферических зеркал для изделий ИКС-10, СП-143, “СИСАМ”, СА-10МП (КОМЗ), “Эталон”, “ИК-Вертикаль” (ЦКБ “Геофизика”).

Изготовленные в НПО ГИПО асферические зеркала использованы в десятках новых разработок, в том числе в фотометрических приборах для оснащения межпланетных космических станций, в метрологических комплексах МК-100, а для комплектации асферическими деталями тепловизионных прицелов 1ПН79, 1ПН79М организовано их серийное производство.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карлин О.Г., Кукс В.Г. Получение оптических деталей с асферическими поверхностями посредством упругого инструмента // ОМП. 1996. № 12. С. 57–61.
2. Кукс В.Г. Определение оптимальных режимов асферизации на станках типа “Планета” // ОМП. 1980. № 2. С. 24–27.
3. Липовецкий Л.Е., Кукс В.Г. Контроль асферических поверхностей на сферометрах, длиномерах и других приборах с шаровыми или тропическими измерительными элементами // ОМП. 1963. № 9. С. 39–41.
4. Карлин О.Г., Липовецкий Л.Е., Сюткин В.А. Измерение деталей с асферическими поверхностями на сферометре ИЗС-7 // ОМП. 1972. № 4. С. 39–41.
5. Карлин О.Г., Сюткин В.А. Применение сферических и асферических пробных стекол для контроля асферических поверхностей // ОМП. 1972. № 3. С. 37–39.
6. Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Контроль профиля асферических поверхностей с помощью одномерных искусственных голограмм // ОМП. 1973. № 6. С. 67–68.
7. Takemaro Sakurai, Koro Shishido. Study on the Fabrication of Aspherical Surfaces // Appl. Opt. 1963. V. 2. № 11. P. 1181–1190.
8. Marioge J.-P. Étude d’une machine pour la réalisation de surfaces asphériques échappan à la condition de Petzval // Revue d’Optique. 1965. V. 44. № 2. P. 57–87.
9. Heynacher E. Fertigung asphärischer Flächen durch formgebende Bearbeitung und durch Abgießen // Optik. 1976. V. 45. № 3. P. 249–267.
10. Хуснутдинов А.Г. Изготовление оптических деталей с асферическими поверхностями на универсально-круглошлифовальных станках 3Б12 // ОМП. 1980. № 12. С. 26–28.
11. Хуснутдинов А.Г. Способ обработки оптических деталей с асферическими поверхностями. А. с. № 650789 // Бюл. изобр. 1979. № 9. С. 65.
12. Хуснутдинов А.Г. Устройство для обработки асферических поверхностей. А. с. № 463535 // Бюл. изобр. 1975. № 10. С. 28.
13. Хуснутдинов А.Г. Инструмент для обработки оптических деталей. А. с. № 745654 // Бюл. изобр. 1980. № 25. С. 62.

## ДЕЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА МАЯТНИКОВОГО ТИПА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАРЕЗНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ СТРУКТУР

© 2007 г. А. Н. Мельников, канд. техн. наук; С. О. Мирумянц, доктор физ.-мат. наук;  
А. В. Лукин, доктор техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Предлагаются новые принципы построения делительных машин на основе использования динамических свойств физического маятника и опор с трением упругости. Приводится разработанная математическая модель процесса формообразования штриха нарезной периодической рельефно-фазовой структуры в зависимости от динамики резцовой каретки и других внешних воздействующих факторов. Дается описание макета делительной машины маятникового типа. Обсуждаются результаты численного моделирования и натуральных исследований макета.

Коды OCIS: 220.0220, 220.4000.

Поступила в редакцию 10.01.2006.

Перспективы развития оптического приборостроения и нанотехнологии в полупроводниковой технике для изготовления микрочипов непосредственно связаны, в том числе, с возможностью создания нарезных периодических рельефно-фазовых наноструктур (нарезных дифракционных решеток, тест-объектов для электронных и силовых микроскопов, решеток-поляризаторов, линейных и радиальных растров и подобных им изделий).

Для их изготовления используются высокоточные делительные машины, в которых для формирования штрихов в тонкой металлической пленке либо непосредственно в стекле или металле применяются специальные алмазные резцы. Для того чтобы делительная машина работала с максимальной для нее точностью, необходимо обеспечить ее размещение в специальном технологическом помещении, приспособленном под требуемые задачи изготовления наноструктур, и строго соблюдать внешние условия, связанные с термостатированием, пылезащитенностью и виброизоляцией. Номинальная температура в технологическом помещении 3-го класса чистоты должна поддерживаться в диапазоне  $\pm(0,005-0,01)$  °С, влажность – не более 65%, виброизоляция помещения должна обеспечивать амплитуду колебания фундамента в горизонтальном и вертикальном направлениях не более 0,2 мкм в диапазоне частот от 1 до 30 Гц.

Однако даже обеспечив указанные выше требования к внешним условиям, делительная машина как реальный механизм будет обладать точностью, зависящей от многих факторов. Все функционирующие делительные машины в России, США, Франции и Германии построены по кинематической схеме Роуланда и уже достигли своего технического и технологического пределов в силу заложенных в них принципов построения. Предельная пространственная частота нарезных наноструктур, изготов-

ливаемых на делительных машинах с кинематической схемой Роуланда, равна  $3600 \text{ мм}^{-1}$  и, как правило, сопровождается рядом случайных погрешностей, обусловленных:

- непостоянством силы трения скольжения,
- наличием износа и зазоров в кинематической схеме машины, что влечет за собой появление упругого мертвого хода;
- наличием толстых масляных пленок в механизме направляющих линейного перемещения резцовой каретки (масляная пленка при малонагруженном контакте имеет среднюю толщину 1–2 мкм, которая случайным образом меняет свое значение при движении резцовой каретки);
- наличием пыли, оседающей на рабочие поверхности направляющих линейного перемещения (размеры частичек пыли от 0,3 до 5 мкм сравнимы с погрешностями деления);
- достаточно медленным процессом изготовления штриха (цикл нарезки одного штриха от 3 до 12 с; например, время изготовления дифракционной решетки длиной 200 мм и частотой  $3600 \text{ мм}^{-1}$  может занять более 40 суток, что затрудняет формообразование наноструктур с высокими требованиями к их качеству).

Для повышения производительности и точности изготовления нарезных наноструктур и обеспечения прогресса в нарезной технологии необходимо искать пути перехода на новые принципы построения делительных машин, свободные от указанных выше проблем, присущих классическим делительным машинам с кинематической схемой Роуланда.

Проведенный нами информационно-патентный поиск и анализ более 100 отечественных и зарубежных источников за период с 1950 по 2002 г., включая СССР, Россию, Великобританию, США, Францию, Германию, Японию, Австралию, показал, что основная часть публикаций [1–12] касалась разно-

го рода усовершенствований классических делительных машин с кинематической схемой Роуланда, не изменяющих принципа их построения. Эти новшества можно разделить на три группы:

- модернизация приводов делительной каретки,
- модернизация алмазных резовых головок и оптимизация режимов нагружения алмазных резцов в процессе профилирования штриха,
- модернизация механизмов резовых и делительных кареток для изготовления различных типов дифракционных решеток и наноструктур.

Из всего многообразия рассмотренных публикаций только в работе [13] описывается новый способ изготовления нарезных дифракционных решеток на модернизированной делительной машине, построенной по классическому принципу пантографа, что позволяет переносить точное расположение штрихов с эталонной голограммной дифракционной решетки на изготавливаемую алмазным резцом нарезную решетку. В качестве чувствительного элемента для сканирования голограммной дифракционной решетки предложен растровый туннельный микроскоп. В устройстве имеется следящая система с обратной связью для коррекции положения головки туннельного микроскопа относительно эталонного штриха в трех взаимно ортогональных направлениях. Соответственно будет корректироваться положение алмазного резца по отношению к траектории штриха. В патенте отмечается, что вместо алмазного резца в качестве формирующего инструмента может быть использован сфокусированный лазерный луч или электронный пучок. При формировании штрихов подложка решетки и резец перемещаются относительно друг друга в ортогональных направлениях. Изготовленная таким способом дифракционная решетка будет обладать достоинствами нарезной и голограммной решеток. Патентованное устройство [13] достаточно сложно реализовать в производстве на современном этапе, и оно будет отличаться более медленным режимом работы по сравнению с классическими делительными машинами с кинематической схемой Роуланда. Поэтому до настоящего времени в доступной литературе сведений о применении на практике данного устройства не имеется.

В работе [14] предложено новое техническое решение, которое можно назвать принципиально новым подходом в построении делительных машин. Речь идет о делительных машинах маятникового типа. В доступных нам публикациях отечественных и зарубежных авторов о делительных машинах подобного типа сведений не приводится.

Хотя делительные машины маятникового типа по сути продолжают традиции классической нарезной технологии, так как нанесение штрихов также

происходит с помощью алмазного резца последовательно, от штриха к штриху, предлагаемый тип машин имеет ряд особенностей, обусловленных новыми принципами их построения, а именно:

- резовая каретка построена на основе реализации динамических свойств физического маятника или “обращенного” упругого пружинного параллелограмма с жесткими накладками,
- направляющие резовых кареток представляют собой упругие пружинные подвесы (опоры с трением упругости),
- привод резовых кареток выполнен в виде спускового регулятора в режиме автоколебаний или двигателя “с нитью” для обеспечения квазипериодического (“старт-стопного”) перемещения резовых кареток,
- делительная каретка – в виде упругого пружинного параллелограмма с жесткими накладками, с прямой или “обращенной” схемой.

Случайные погрешности, возникающие при работе классических делительных машин под действием переменных факторов, в делительной машине маятникового типа будут существенно снижены или скомпенсированы за счет:

- постоянства сил трения упругости,
- исключения износа в сопряженных парах и исключения влияния “толстой” масляной пленки в механизмах машины, поскольку опоры с трением упругости не требуют смазки;
- снижения изнашиваемости алмазного резца,
- минимизации общего времени изготовления наноструктуры в 5–10 раз.

В конструкции машин предложенного типа дополнительно необходимо предусмотреть применение специальных сплавов с низким температурным коэффициентом линейного расширения, а также использование известного технического решения [11] о раздельности приводов для резовых и делительных кареток, что уменьшает вибрации и паразитные перекрестные связи.

Для реализации совокупности перечисленных преимуществ нами проведено теоретическое моделирование и разработана математическая модель формирования штриха нарезной периодической рельефно-фазовой структуры (в том числе наноструктуры) в зависимости от динамики и конструктивных параметров резовых кареток, кориолисовых сил инерции, вызванных вращением Земли, географической ориентации установки станины машины и вибраций фундамента. Разработан и изготовлен действующий макет делительной машины маятникового типа, внешний вид которого приведен на рис. 1.

Ниже приводятся результаты этих исследований.

При разработке математической модели формирования штриха рельефно-фазовой структу-



Рис. 1. Внешний вид макета делительной машины маятникового типа.

ры приняты следующие основные допущения [15]: 1) механическая модель выбрана в виде системы двух твердых тел – каркаса резцовой каретки и рез-

цедержателя, соединенных между собой и со станиной упруговязкими связями; 2) движение резцовой каретки подчинено голономным, удерживающим, стационарным связям; 3) станина и делительная каретка жестко связаны между собой и фундаментом, который совершает заданное движение по отношению к Земле; 4) во время рабочего хода резцовой каретки стол делительной каретки горизонтален и неподвижен, 5) резец имеет форму полусферы, 6) реакция металлического слоя, нанесенного на подложку, представлена в виде силы резания.

Для математического описания пространственного движения резцовой каретки с семью степенями свободы приняты следующие дополнительные допущения: 1) учитывая то, что жесткость связей по обобщенным координатам  $x_2, y_2, z_2, \theta_2, \psi_2$  на несколько порядков выше жесткости по другим обобщенным координатам, будем полагать, что обобщенные координаты  $x_2 = y_2 = z_2 = \theta_2 = \psi_2 \equiv 0$ , а остальные обобщенные координаты и обобщенные скорости малы; 2) установочные углы  $\alpha_1 = \beta_1 = \alpha_2 = \beta_2 = 0$ ; 3) плоскости  $O_1y_1z_1$  и  $O_2y_2z_2$  каркаса резцовой каретки и узла резцедержателя являются плоскостями материальной симметрии, следовательно, моменты инерции  $J_{x_1y_1} = J_{x_1z_1} = J_{x_2y_2} = J_{x_2z_2} = 0$ , координаты центров масс  $x_{C_1} = x_{C_2} = x_{O_2} = 0$ ; 4) “характерная” точка алмазного резца находится в плоскости  $O_2y_2z_2$ , следовательно,  $x_{O_3} = 0$ .

Математическая модель формообразования штриха нарезной рельефно-фазовой структуры представляет собой систему дифференциальных уравнений 14-го порядка и может быть записана в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned}
 A\ddot{\mathbf{x}} + B\dot{\mathbf{x}} + C\mathbf{x} &= -A_1(\tilde{\mathbf{g}} + \tilde{\mathbf{a}}) - L(t)\mathbf{x} + 2\Omega S\dot{\mathbf{x}} - F_\tau \left( D\dot{\mathbf{x}} \sqrt{\dot{\mathbf{x}}^T D\dot{\mathbf{x}}} \right), \\
 \text{где } F_\tau &= \begin{cases} 0, & \text{если } h \leq 0, \\ c_\tau R^{0,5} h^{1,5} \sigma_\tau, & \text{если } h > 0, \end{cases} \\
 h &= N(x - x^*) - \Delta, \\
 \mathbf{y} &= H\mathbf{x} + \mathbf{y}_0.
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}$  – координатный вектор, вектор скоростей и вектор ускорений соответственно;  $A, B, C$  – матрицы инерционных характеристик, демпфирования и жесткости рассматриваемой механической системы соответственно;  $A_1, L(t)$  – матрицы, которые определяют составляющие обобщенных сил, вызванных действием сил тяжести и вибрацией

фундамента;  $\tilde{\mathbf{g}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{a}} = \begin{pmatrix} \ddot{X}_O \\ \ddot{Y}_O \\ \ddot{Z}_O \end{pmatrix}$ ,  $g$  – ускорение сво-

бодного падения на географической широте местоположения делительной машины маятникового типа,  $X_O = X_O(t), Y_O = Y_O(t), Z_O = Z_O(t)$  – уравнения вибрации фундамента;  $\Omega$  – угловая скорость Земли;  $S$  – матрица, которая характеризует составляющие обобщенных сил, вызванные действием кориолисовых сил инерции;  $F_\tau$  – модуль проекции силы резания на направление касательной к траектории движения нижней точки полусферы алмазного резца (его “характерной” точки  $O_3$ );  $D$  – матрица для вычисления составляющих обобщенных сил, вызванных действи-

ем сил резания;  $h$  – глубина штриха нарезной рельефно-фазовой структуры в металлическом слое,  $R$  – радиус полусферы алмазного резца,  $\sigma_T$  – предел текучести материала металлической пленки, в которой формируется штрих;  $c_t$  – коэффициент пропорциональности,  $x^*$  – положение статического равновесия системы,  $\Delta$  – величина технологического зазора, равного минимальному расстоянию между поверхностью подложки структуры и “характерной” точкой алмазного резца при нерабочем ходе;  $\mathbf{N}$  – вектор-строка, учитывающая конструктивные параметры резцовой каретки при вычислении глубины штриха  $h$ ;  $\mathbf{y}$  – вектор-столбец, содержащий величины поперечной ( $X_{o_3}$ ) и продольной ( $J_{o_3}$ ) координат траектории штриха;  $H$ ,  $\mathbf{y}_0$  – соответственно матрица и вектор-строка, учитывающие конструктивные параметры резцовой каретки при вычислении  $y$ .

Составленная модель (1), в основе которой лежит описание динамики резцовой каретки, реализующей свойства физического маятника на опорах с трением упругости, позволяет аналитически описать процесс формирования штриха с учетом влияния внешних воздействий и конструктивных параметров резцового механизма на параметры штриха, включая влияние силы резания, географической ориентации установки станины, вибраций фундамента и кориолисовых сил инерции, вызванных вращением Земли. Модель дает возможность оценить влияние конструктивных и динамических параметров резцовой каретки и внешних воздействий на выходные параметры формируемого штриха (его глубину, ширину и длину, погрешность периода структуры), а также на производительность (время рабочего хода резцовой каретки). Полученная математическая модель позволяет проводить анализ и оптимизацию конструктивных (геометрических) и динамических параметров разрабатываемой резцовой каретки и технологических параметров процесса нарезки штриховой структуры исходя из условий обеспечения требуемого допуска на период структуры и минимизации времени цикла ее нарезки. Предлагается к использованию в рамках численного моделирования критерий качества  $K_i$  изготовления штриха нарезной структуры.  $K_i$  равен отношению модуля размаха амплитуды колебаний ортогональной к направлению нанесения штриха координаты “характерной” точки алмазного резца в системе координат, связанной со станиной делительной машины маятникового типа, к заданной величине допуска на амплитуду вибрационных дефектов штриха (например, 10% от периода структуры). В процессе численного моделирования необходимо добиваться достижения условия  $K_i \leq 1$ .

Численное моделирование процесса формирования штриха нарезной рельефно-фазовой структуры

на базе математической модели (1) выполнено с использованием пакета прикладных программ Mathcad. Численное интегрирование по времени проводилось методом Рунге–Кутты четвертого порядка с фиксированной величиной шага интегрирования. Варьируя различными вариантами сочетаний конструктивных и динамических параметров резцовой каретки, получен период колебаний резцовой каретки в диапазоне от 0,5 до 1,2 с при достижении  $K_i$  от 1 до  $10^{-5}$ . На рис. 2 показано характерное изменение параметров штриха при вибрации фундамента по трем взаимно ортогональным направлениям (амплитуда скорости вибрации  $3,15 \times 10^{-5}$  м/с и частота 1 Гц) с учетом кориолисовых сил инерции, вызванных вращением Земли, при следующих значениях параметров упругого пружинного подвеса, радиуса полусферы резца и положении центра масс резцедержателя соответственно:  $c_{\phi_1} = 120$  Нм,  $c_{\phi_2} = 8$  Нм,  $b_{x_1} = 511$  Нс/м,  $b_{y_1} = 511$  Нс/м,  $b_{z_1} = 511$  Нс/м,  $b_{\theta_1} = 21,2$  Нмс,  $b_{\psi_1} = 1,03$  Нмс,  $R = 1 \times 10^{-6}$  м,  $y_{c_2} = -2,0217 \times 10^{-2}$  м. Как видно из рис. 2, штрих ровный, без вибрационных дефектов, в этом случае  $K_i \approx 4 \times 10^{-2}$ .

В результате численного моделирования получено:

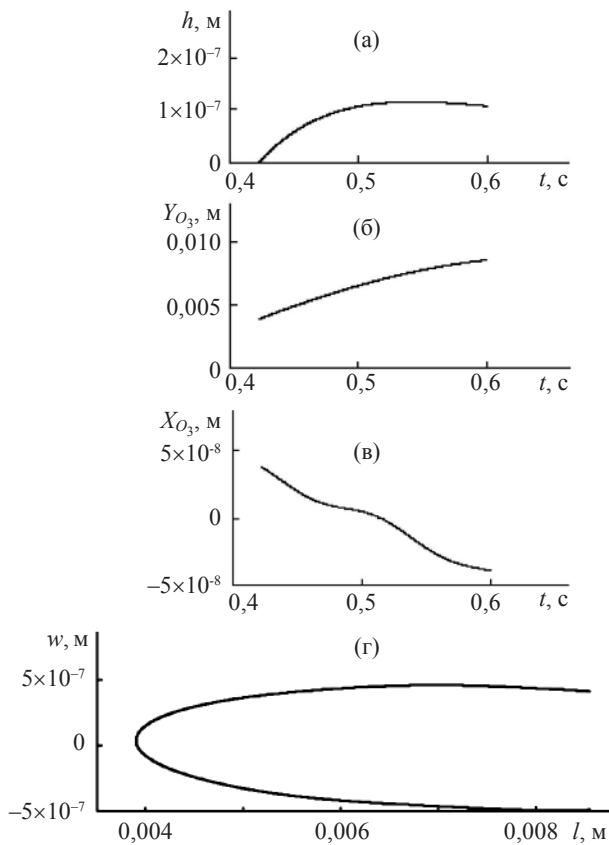
1) на длину штриха значительно влияют смещение “характерной” точки резца по оси  $O_2y_2$ , положение центра масс резцедержателя, технологический зазор (минимальное расстояние между поверхностью подложки рельефно-фазовой структуры и “характерной” точкой резца при нерабочем ходе резцовой каретки);

2) вращение Земли вызывает незначительное искривление траектории штриха, на заданной географической широте ее максимальное отклонение от прямой во время рабочего хода резцовой каретки составляет  $3,013 \times 10^{-9}$  м и не зависит от ориентации оси вращения резцовой каретки;

3) на размеры штриха оказывают влияние вибрации в направлении оси вращения резцовой каретки, под действием этих вибраций происходит искривление траектории штриха;

4) на достижение требуемого значения критерия качества  $K_i$  изготовления штриха нарезной структуры существенно влияет спектральный состав вибрационных колебаний фундамента, действующих в горизонтальном направлении.

Изготовленный действующий макет делительной машины маятникового типа располагается на глубине 12 м относительно уровня земли в специальной виброизолированной, термостатированной кабине. Резцовая каретка макета построена в виде физического маятника на опорах с трением упругости. Привод резцовой каретки выполнен в двух вариантах: 1) в виде электронно-механического



**Рис. 2.** Характерное изменение параметров штриха: а – зависимость глубины штриха  $h$  от времени  $t$ , б – зависимость продольной координаты траектории штриха  $Y_{O_3}$  от времени  $t$ , в – зависимость поперечной координаты траектории штриха  $X_{O_3}$  от времени  $t$ , г – проекция траектории штриха на поверхности рельефно-фазовой структуры (зависимость ширины штриха  $w$  от его длины  $l$ ).

спускового регулятора с магнитоэлектрическим приводом, угловой амплитудой до  $1^\circ$  и периодом автоколебаний порядка 1 с; 2) в виде привода “с нитью” на основе электромагнита.

Методики экспериментального исследования макета предложенной машины основаны на проведении оценки динамики резцовой каретки с контролем с помощью коллимированного лазерного луча и по интерференционной картине в схеме Физо с целью оценки перемещения резцовой каретки по ее нефункциональным координатам и идентификации геометрических и динамических параметров резцовой каретки.

С помощью макета делительной машины маятникового типа изготовлено несколько экспериментальных образцов периодических рельефно-фазовых структур на подложках с алюминиевыми и золотыми слоями толщиной от 0,05 до 0,5 мкм. Размеры подложек от  $\varnothing 12$  до  $\varnothing 40$  мм. В экспериментах применялся алмазный резец симметричной билиндрической формы с радиусами закругления 2,8 мм и углами рабочих граней  $\alpha = \beta = 45^\circ$ .

Фрагмент первой экспериментальной нарезной периодической рельефно-фазовой структуры, полученной на макете делительной машины маятникового типа, приведен на рис. 3.

В ходе численных и натурных исследований были подтверждены основные преимущества делительной машины маятникового типа:

- возможность достижения любого заданного периода автоколебаний резцовой каретки, значение которого можно довести до долей секунды, что в несколько раз меньше, чем время цикла нарезки у аналогов,

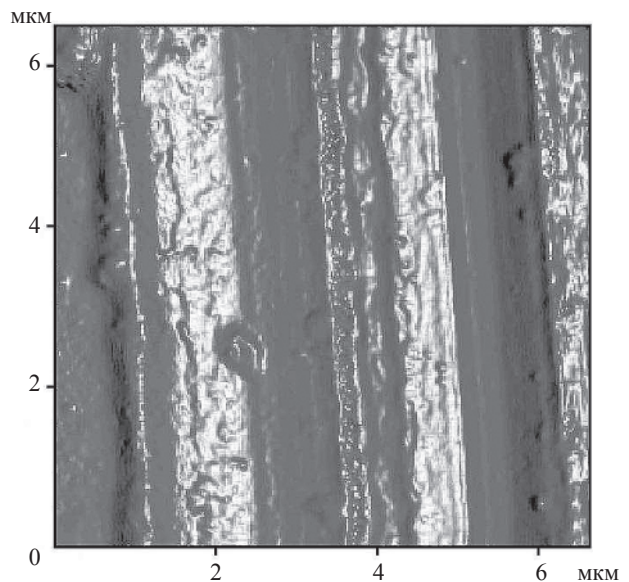
- в 5–10 раз более высокая производительность формообразования нарезных периодических рельефно-фазовых структур,

- повышенная точность изготовления штрихов за счет увеличения стабильности и воспроизводимости пространственного движения резцовой каретки,

- многократно уменьшенная изнашиваемость алмазного резца,

- большая экономичность по энергозатратам за счет использования режима автоколебаний резцовой каретки.

Таким образом, классические делительные машины, построенные по схеме Роуланда, многократно уступают делительным машинам маятникового типа по трем основным параметрам (см. таблицу).



**Рис. 3.** Фрагмент первой экспериментальной нарезной периодической рельефно-фазовой структуры, изготовленной на действующем макете делительной машины маятникового типа (пространственная частота штрихов  $400 \text{ мм}^{-1}$ , двумерное изображение получено с помощью сканирующего зондового микроскопа модели SOLVER P47-SPM-MDT, увеличение  $10\,000\times$ ).

Сравнительные данные по основным параметрам классических делительных машин, построенных по схеме Роуланда, и делительных машин маятникового типа

Параметр делительной машины	Принцип построения	
	по схеме Роуланда	маятникового типа
Постоянство периода штрихов, %	от 10 до 1	от 1 до 0,1
Время цикла нарезки одного штриха, с	от 3 до 8	от 0,3 до 1
Потребляемая мощность, Вт, не более	100	5

Результаты дальнейших исследований и разработка уточненной математической модели формообразования штриха нарезной периодической рельефно-фазовой структуры будут представлены в другой нашей работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов Ф.М. Современные дифракционные решетки. Ч. I. Методы изготовления. (Обзор) // ОМП. 1965. № 10. С. 33–49.
2. Федотов А.И. Автоматизация делительных работ. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1969. 320 с.
3. Куинджи В.В., Стрежнев С.А., Фетисова Н.А. Магнитострикционный метод коррекции остаточных ошибок деления дифракционных решеток // ОМП. 1970. № 6. С. 43–45.
4. Федотов А.И. Технология автоматизированного нанесения штрихов и знаков. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1977. 304 с.
5. Куинджи В.В., Абдрахманов Р.Х. Применение магнитострикционного метода коррекции остаточных ошибок деления при изготовлении дифракционных решеток с большими постоянными // ОМП. 1978. № 5. С. 51–55.
6. Герасимов Ф.М., Яковлев Э.А. Дифракционные решетки // Современные тенденции в технике спектроскопии. Новосибирск: Наука, 1982. С. 24–94.
7. Алексеев Г.А. Теоретические основы, методы и средства обеспечения качества образования прецизионного регулярного микрорельефа // Автореф. докт. дис. Л.: Изд. ЛПИ, 1987. 48 с.
8. Цодиков С.Ф., Раховский В.И. Магнитострикционные силовые приводы для суперпрецизионного позиционирования // Измерит. техн. 1997. № 5. С. 56–62.
9. Абдрахманов Р.Х., Балясников Н.М., Лукашевич Я.К., Лукин А.В., Ньюшкин А.А., Чугунов Ю.П. Получение дифракционных оптических элементов с дискретно-переменным периодом штрихов на делительной машине, управляемой компьютером // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 6. С. 113–115.
10. Лукашевич Я.К. Технология изготовления поляризаторов электромагнитного излучения из линейных проводников на основе нарезных дифракционных решеток // Автореф. канд. дис. Казань: Изд. “Экоцентр”, 2002. 17 с.
11. Bartlett I.R., Wildy P.C. Diffraction grating ruling engine with piezoelectric drive // Appl. Opt. 1975. V. 14. № 1. P. 1–3.
12. Hutley M.C. Diffraction gratings. London. New York. Paris: Academic Press, 1982. 336 p.
13. Leviton D.B. Control system for ruling blazed, aberration corrected diffraction gratings // Патент США № 5058281. 1991.
14. Лукин А.В., Мельников А.Н. Делительная машина для изготовления периодических штриховых структур, преимущественно дифракционных решеток (варианты) // Патент России № 2130374. 1999.
15. Бородин В.М., Карпов А.И., Кренин В.А., Лукин А.В., Мельников А.Н. Исследование динамики резцовой каретки делительной машины маятникового типа // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2003. № 3. С. 11–16.