

Разработка и исследование схмотехнических решений при проектировании осветительной ветви динамического интерферометра для контроля качества оптических поверхностей

Д. А. Машошин, Д. Г. Денисов, А. Б. Морозов, В. Е. Патрикеев

Разработано и экспериментально проверено схмотехническое решение, а именно модернизированная осветительная ветвь динамического интерферометра, позволяющее увеличить точность измерения параметров качества оптических поверхностей путём минимизации контраста спекл-структуры за счёт введения в схему осветительной ветви вращающегося диффузора.

Ключевые слова: осветительная ветвь, статистические параметры качества, интерференционная картина, контраст спекл-структуры, временное усреднение, вращающийся диффузор.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-308-316

Введение

В настоящее время существуют задачи производства высокотехнологичных деталей, которые имеют оптические поверхности прецизионного уровня качества. Прежде всего это относится к задачам изготовления крупногабаритной оптики, в частности астрономических зеркал, а также активных элементов перспективных лазерных сред. Но создание высокоточных поверхностей, шероховатость которых достигает уровня десятых, а иногда и сотых долей нанометра, невозможно без при-

менения комплекса оптико-электронной аппаратуры диагностики статистических параметров качества этих поверхностей.

Интерферометрические методы контроля оптических поверхностей широко используются на всех технологических стадиях их изготовления: начиная с этапов грубого шлифования и завершая этапами высокоточной доводки. В применяемых приборах реализованы различные схемы интерферометрических измерений, но требования к профилю оптических поверхностей высокоточных оптических и оптико-электронных систем всё больше ужесточаются. Поэтому для создания оптических поверхностей, удовлетворяющих современным требованиям к их качеству, необходимо принципиально пересмотреть методику контроля их формы и качества, обосновать требования и разработать интерферометрическую аппаратуру, обеспечивающую необходимое качество измерений в условиях действующего производства.

Постановка научно-технической задачи

Прежде чем предлагать схмотехническое решение для повышения точности измерений, нужно обосновать его актуальность и необходимость.

Машошин Денис Андреевич¹, студент.

E-mail: den_m01@mail.ru

Денисов Дмитрий Геннадьевич¹, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov_dg@mail.ru

Морозов Алексей Борисович², начальник КТБ-3 НПК-95.

E-mail: morozov@lzos.ru

Патрикеев Владимир Евгеньевич², зам. начальника НПК-95.

E-mail: patrikeev.ve@mail.ru

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

² АО «ЛЗОС».

Россия, 140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1.

Статья поступила в редакцию 31 мая 2022 г.

© Машошин Д. А., Денисов Д. Г., Морозов А. Б., Патрикеев В. Е., 2022

В общем случае, функцию, описывающую структуру локальных отклонений профиля оптической детали, можно представить в виде набора гармоник соответствующих пространственных частот, определяющих такие его технологические параметры, как непрямолинейность и волнистость [1, 2]. Эти локальные отклонения обусловлены свойствами обрабатывающих инструментов с погрешностью метода обработки оптических изделий. Помимо указанных параметров формы профиля высокочастотные гармоники, характеризуют степень шероховатости, которая образуется при съёме материала в процессе формообразования детали полирующими суспензиями. Для описания неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле оптических элементов можно использовать международный классификатор качества изготовления активных лазерных сред технологического комплекса NIF (National Ignition Facility, США) [1, 3], представленный в виде набора характеристик для четырёх пространственно-частотных диапазонов (табл. 1).

Диапазоны I–III характеризуют искажения параметров волнового фронта лазерного пучка, обусловленные ошибками формы исследуемых оптических деталей, а четвёртый диапа-

зон характеризует шероховатость профилей их поверхностей. Указанные в таблице величины искажений волнового фронта оцениваются в диапазоне I статистическими показателями PV (peak to valley – максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины искажений), RMS_{grad} (root mean square gradient – СКО градиента искажений), а в диапазонах II и III параметром RMS, характеризующим отклонения формы волнового фронта в высокочастотной области. Для оценки шероховатости в IV диапазоне используют параметр Rq , который определяет СКО точек профиля поверхности оптической детали в пределах заданной области исследования (базовой площади). Аналитическое описание параметра Rq имеет то же вид, что и величина RMS, но определяется на малой базовой площади.

Был проведён некоторый обзор современной аппаратуры интерферометрического контроля с использованием данного классификатора [4]. На рисунке 1 отображена пространственно-частотная ось с нанесёнными на неё частотными диапазонами I..IV. Всего было рассмотрено 4 прибора и их диапазоны измерений также нанесены на ось.

Таблица 1

Технологические требования к оптическим деталям при пространственно-частотном анализе неоднородностей оптической поверхности

Диапазон	I		II	III	IV
Пространственный период гармоник в разложении ряда Фурье профиля оптической поверхности, мм	450–33		33–2,5	2,5–0,12	0,12–0,01
Пространственная частота неоднородностей, мм ⁻¹	$2,5 \times 10^{-3}$ – $3,0 \times 10^{-2}$		$3,0 \times 10^{-2}$ –0,4	0,4–8,3	8,3–100
Контролируемый параметр неоднородности	$\frac{PV}{\lambda}$	$\frac{RMS}{d}$, нм/см	RMS, нм	RMS, нм	RMS, нм
Допустимое значение контролируемого параметра	0,33	7,00	1,80	1,10	0,40

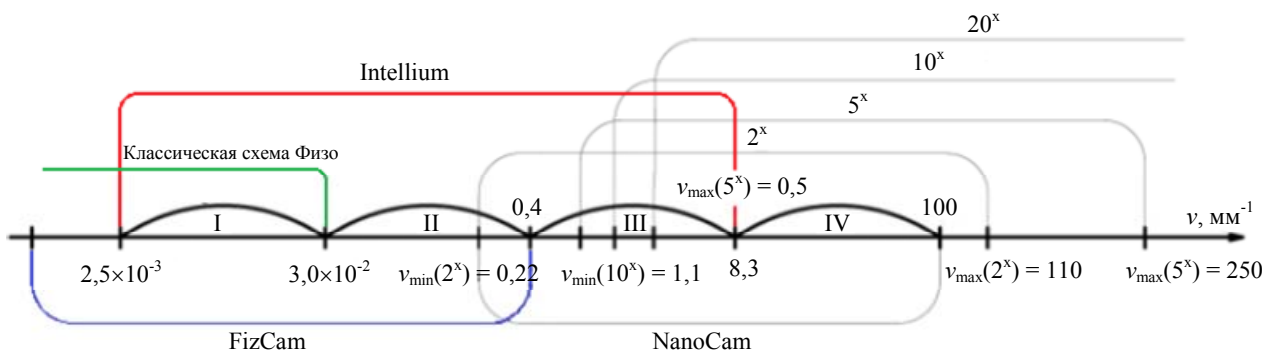


Рис. 1. Обзор современной аппаратуры

Как можно увидеть, классическая схема Физо с автоколлимационным расширением пучка работает лишь в первом диапазоне, интерферометр FizCam – в первых двух, InteliumH2000 – в I–III диапазонах, а NanoCam – в III–IV диапазонах, т.е. в области высокоточных измерений работают только 2 последних прибора. В частности, и Intelium, и NanoCam – динамические интерферометры, причём вибронезависимость в них достигается разными путями. В случае NanoCam в оптическую схему добавляются дополнительные поляризационные элементы, а концептуальным элементом является фазовая пиксельная маска – матрица микрополяризаторов, попиксельно нанесённая на приёмную ПЗС-матрицу, что позволяет за одно измерение получать сразу несколько интерференционных картин, хоть и меньшего разрешения, нежели разрешение ПЗС-матрицы. В интерферометре InteliumH2000 пошли иным путём. В измерительном канале данного прибора присутствует сразу несколько приёмников излучения, что также позволяет добиться получения нескольких интерферограмм в результате одного измерения.

Из описанного выше, в настоящее время существует аппаратура, которая способна работать в области высокоточных измерений. Но как оказалось, погрешности измерений при этом могут достигать настолько больших значений, что они порой даже превышают абсолютную величину измеренного параметра. Это происходит из-за флуктуаций волнового фронта внутри интерферометра, которые вызваны неоднородностями оптических материалов, в частности микронеровностями оптических поверхностей. В общем случае такие флуктуации приводят к образованию спекл-структуры – паразитной интерференционной картине, которая накладывается на интерферограмму и снижает точность расшифровки. В связи с этим, существует достаточно серьёзная задача по минимизации негативного влияния спекл-структуры, решение которой разработано, экспериментально подтверждено и предложено вам далее в статье.

Спекл-структура

Для решения поставленной задачи требуется более подробно рассмотреть само явление

спеклов – их природу, способы математического описания и, самое главное, способы минимизации их негативного влияния.

Если оптически шероховатую поверхность осветить высококогерентным излучением, то изображение данной поверхности будет в виде светлых и тёмных пятен, расположенных хаотично (рисунок 2). Как раз такую картину и называют спекл-структурой.



Рис. 2. Спекл-структура

Наиболее просто рассмотреть механизм формирования спеклов, если представить оптическую поверхность в виде множества участков, зеркально отражающих падающее на них излучение. Тогда волна, отражённая от поверхности, имеет сложный волновой фронт, состоящий из «вкладов» от достаточно большого количества малых участков поверхности, причём все эти отражающие площадки являются независимыми, то есть каждый «вклад» имеет собственную фазу. Но самым главным является то, что излучение всё ещё остаётся когерентным. В итоге, распространение такой волны приводит к появлению в области регистрации изображения интерференционной картины, получившейся в результате интерференции дефазированных «вкладов» от микронеровностей поверхности.

Иными словами, спеклы – это интерференционная картина нерегулярных волновых фронтов, образующаяся при падении когерентного излучения на оптически шероховатую поверхность.

Детальная микроскопическая структура поверхности, а тем более структура сложного волнового фронта, покидающего объект, доподлинно неизвестны, поэтому приходится подходить статистически к вопросу количественной оценки спекл-структуры. В теории спеклов рассматривается статистическое распределение для ансамбля объектов с одинаковыми макроскопическими свойствами, но раз-

личающихся в микроскопических деталях [5]. Такая задача может рассматриваться как классическая задача о «случайном блуждании в комплексной области».

В соответствии с вышесказанным, наиболее важной характеристикой спеклов является плотность распределения интенсивности I , наблюдаемая в некоторой точке изображения. Если фазы «вкладов» от микронеровностей имеют примерно однородное распределение в диапазоне от $-\pi$ до π , то поле, связанное с отдельной линейной компонентой поляризации изображения, должно быть круговой комплексной гауссовой случайной переменной. В таком случае её интенсивность должна подчиняться распределению Релея [5]:

$$P(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad (1)$$

где I – интенсивность рассеянного излучения; $P(I)$ – плотность вероятности распределения интенсивности; $\langle I \rangle$ – средняя или ожидаемая интенсивность.

По выражению (1) видно, что флуктуации интенсивности относительно среднего значения оказываются довольно заметными. Тогда, если определять контраст C спеклов как отношение СКО интенсивности к её среднему значению, то получим:

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}. \quad (2)$$

В частности, стоит отметить, что для полностью поляризованного света контраст спекл-структуры равен единице.

Если говорить о способах минимизации контраста спеклов, то всего в данной области можно выделить два идейных направления:

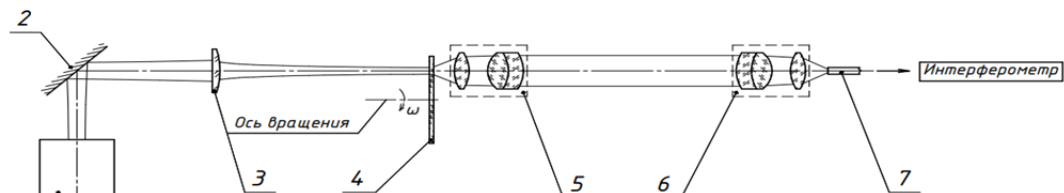
1) цифровая обработка – в рамках методов этого направления интерференционная картина подвергается цифровой обработке, где спеклы устраняются как шум.

2) аппаратные методы – спеклы можно усреднить, используя интегрирование изображения во времени и одновременно осуществляя движение рассеивателей; используя для подсветки одновременно несколько разных длин волн, изменяя размер апертуры в плоскости регистрации и т. п. Все способы данного направления снижают разрешение изображения ниже дифракционного предела, а также во всех случаях используется некогерентное сложение изображений.

Нами предложено решение из второго направления, а именно: использовать вращающийся диффузор в осветительной ветви динамического интерферометра для временного усреднения спеклов, тем самым аппаратно уменьшив контраст спекл-структуры.

Схема осветительной ветви

Была разработана следующая функциональная схема осветительной ветви (рис. 3): лазерный пучок, формируемый лазером 1, при помощи поворотного зеркала 2 попадает на фокусирующую линзу 3. В плоскость перетяжки преобразованного пучка ставится диффузор 4, причём гладкая сторона направлена от падающего на пластину излучения. Рассеянное излучение собирается микрообъективом 5, который ставится на расстоянии рабочего отрезка от диффузора. Затем «псевдоколлимированный» пучок при помощи микрообъектива 6 попадает на вход волокна 7.



Вход / Выход	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
1		Лазер	1	
2		Зеркало	1	
3		Линза	1	
4		Диффузор	1	
5		Микрообъектив	1	
6		Микрообъектив	1	
7		Вход волокна	1	

Рис. 3. Функциональная схема осветительной ветви

Схема построена на идее фокусирования лазерного излучения на вращающемся диффузоре (для получения как можно меньшего пятна) и последующем выводе рассеянного излучения, которое уже будет иметь меньшую длину когерентности за счёт усреднения по времени, в интерферометр [6, 7]. В результате, контраст спекл-структуры на интерференционной картине должен понизиться, и сама суть работы заключается в достоверности этого суждения, а также в поиске оптимальной скорости вращения ротатора.

Для сборки экспериментального стенда необходимо знать присоединительные размеры, а именно расстояния между оптическими элементами. Поэтому был проведен расчёт в параксиальной области, но с учётом особенностей поведения гауссова пучка лазера. Исходными данными являются оптические и габаритные параметры используемых оптических элементов и их креплений. Расчёт производился по основным формулам лазерной оптики [8]. Расчёт самого резонатора лазера производился методом эквивалентного конфокального резонатора по формулам (3)–(5):

$$2h_{\Pi} = 2\sqrt{\frac{\lambda z_k}{\pi}} \quad (3)$$

$$z_k = \frac{\lambda}{\pi} \frac{4}{(2\theta)^2} \quad (4)$$

$$2\theta = 2\sqrt{\frac{\lambda}{\pi z_k}} = \frac{2h_{\Pi}}{z_k} \quad (5)$$

Ход гауссового пучка рассчитывался по формулам (6), описывающим преобразование пучка при прохождении оптических элементов.

$$\begin{aligned} \alpha_{\Gamma} &= \frac{f'^2}{z_{\Pi}^2 + z_k^2} \\ 2h'_{\Pi} &= 2h_{\Pi} \sqrt{\alpha_{\Gamma}} \\ 2\theta' &= \frac{2\theta}{\sqrt{\alpha_{\Gamma}}} \\ z'_k &= z_k \alpha_{\Gamma} \\ z'_{\Pi} &= -z_{\Pi} \alpha_{\Gamma}. \end{aligned} \quad (6)$$

На рисунок 4 и в таблицу 2 вынесены результаты расчёта, а именно: положения перетяжек и их пространственные характеристики после каждого оптического элемента, расстояния между компонентами, выбранные из конструктивных соображений.

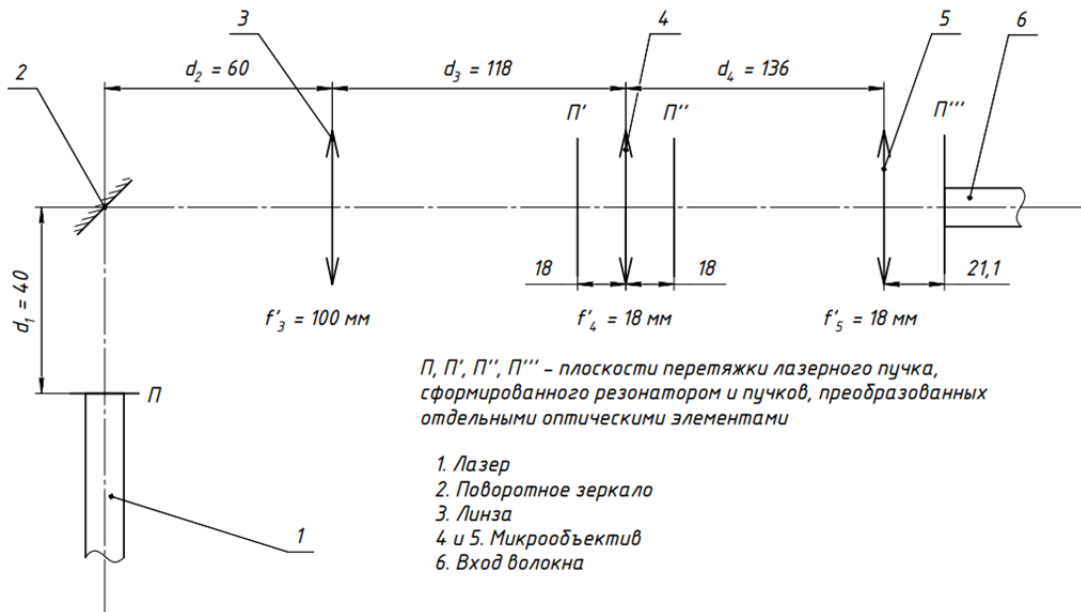


Рис. 4. Оптическая схема осветительной ветви

Таблица 2

Результаты расчёта хода лазерного пучка

	1	3	5	6
z_{Π}	–	0 мм	0 мм	-100 мм
α_{Γ}	–	0,032	1,005	0,031
$2h'_{\Pi}$	0,8 мм	0,144 мм	0,144 мм	0,026 мм
$2\theta'$	1,2 мрад	6,68 мрад	6,67 мрад	37,64 мрад
z'_k	0,557 м	0,018 м	0,018 м	0,00057 м
z'_{Π}	0 мм	0 мм	0 мм	3,1 мм

На основании расчёта был собран экспериментальный стенд (рис. 5).

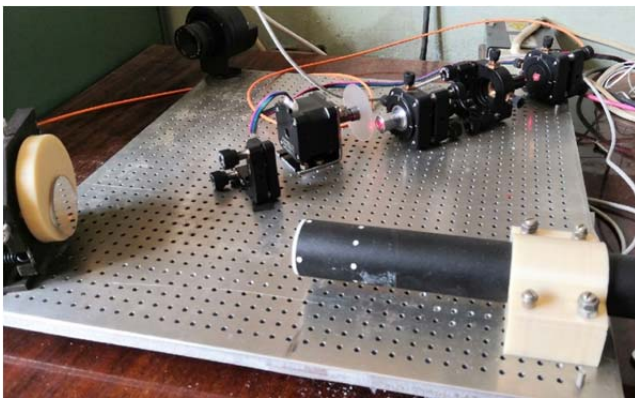


Рис. 5. Экспериментальный стенд

Обработка результатов эксперимента

В ходе эксперимента выход волокна проецировал изображение на видеокамеру и рассматривалось распределение яркости по пикселям матрицы. Всего было выбрано 9 режимов работы диффузора со скоростями вращения от 0 до 200 об/мин с шагом 25 об/мин. Для каждого режима работы было сделано 10 снимков для набора статистики. Типичный снимок представлен на рисунке 6. Видно, что он имеет зернистый вид, что получается из-за влияния спеклов. Также можно видеть белую вертикальную полосу, которая появилась из-за дефекта видеокамеры.

На каждом снимке было сделано 3 сечения (рисунок 7), вдоль каждого из которых анализировалось распределение яркости по пикселям (рисунок 8). Как мы говорили в пункте 3, контраст спеклов можно посчитать по формуле (2), согласно которой требуется определить СКО яркости и среднее значение яркости по сечению.

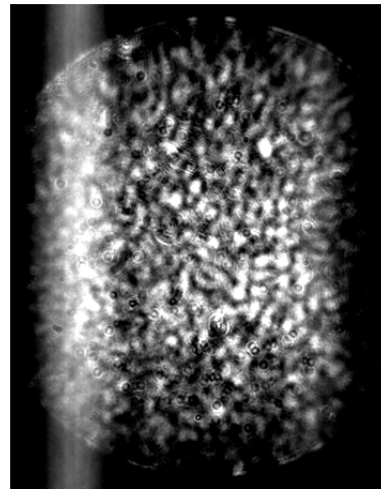


Рис. 6. Снимок

Таким образом, для каждого режима работы было сделано 10 снимков, на каждом из которых выбрано по 3 сечения. Результаты обработки данных сведены в таблицы 3 и 4. Для каждого снимка также рассчитывался контраст изображения, ведь введение диффузора должно повлиять на него. Как раз соотношение между скоростью падения контраста спеклов и скоростью падения контраста всего изображения является одним из критериев поиска оптимального режима работы.

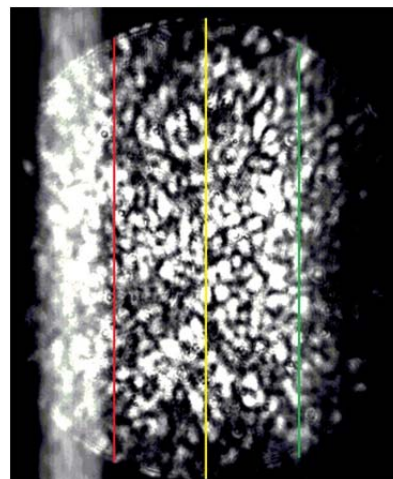


Рис. 7. Сечения снимка

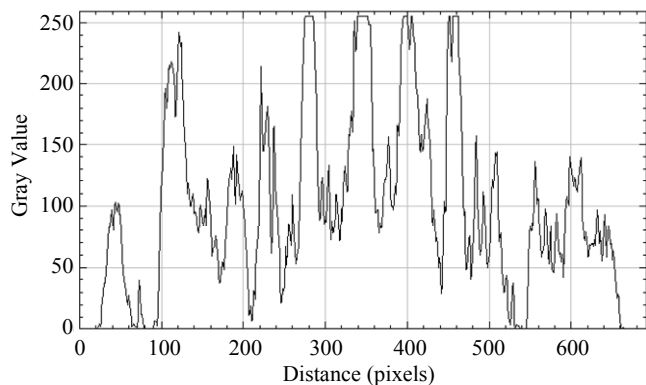


Рис. 8. Распределение яркости по пикселям в сечении

В результате эксперимента выяснилось, что контраст спеклов снижается намного быстрее контраста изображения, и наибольшая скорость падения контраста спеклов наблюдается при скоростях до 100 об/мин. Графические зависимости для каждого сечения можно увидеть на рисунках 9–11. Под сечением 1 понимается сечения центральное, под сечением 2 – левое, под сечением 3 – правое.

Таблица 3

Контраст спеклов

v , об/мин	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3
0	1,213	0,938	0,911
25	0,804	0,529	0,821
50	0,660	0,389	0,708
75	0,545	0,327	0,598
100	0,527	0,306	0,554
125	0,506	0,282	0,504
150	0,485	0,286	0,495
175	0,446	0,281	0,467
200	0,432	0,269	0,454

Таблица 4

Контраст изображения

v , об/мин	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3
0	1	1	1
25	1	0,954	1
50	1	0,796	1
75	1	0,709	1
100	1	0,651	1
125	0,998	0,589	0,977
150	0,995	0,594	0,972
175	0,954	0,599	0,952
200	0,978	0,595	0,992

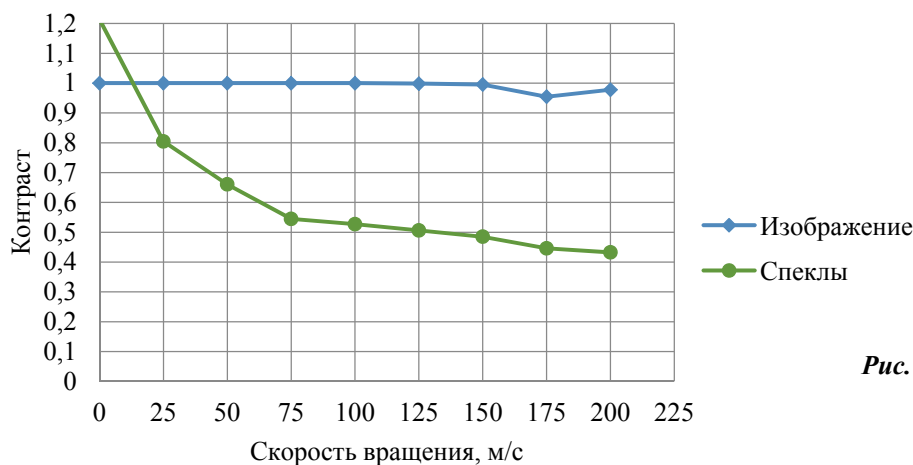


Рис. 9. Сечение 1

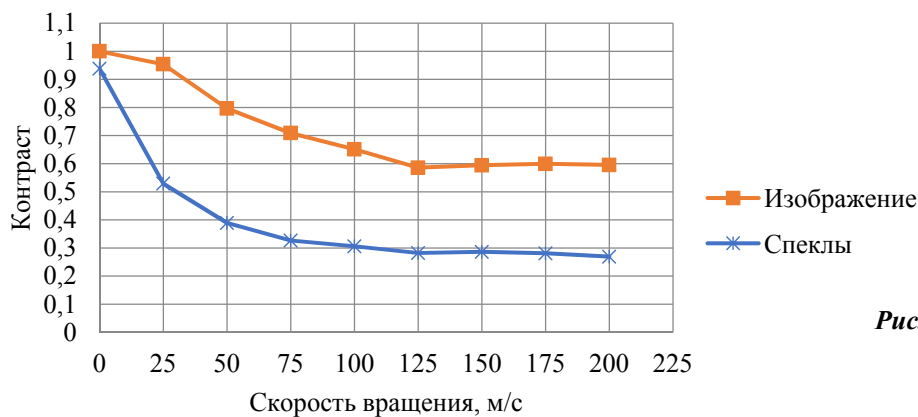


Рис. 10. Сечение 2

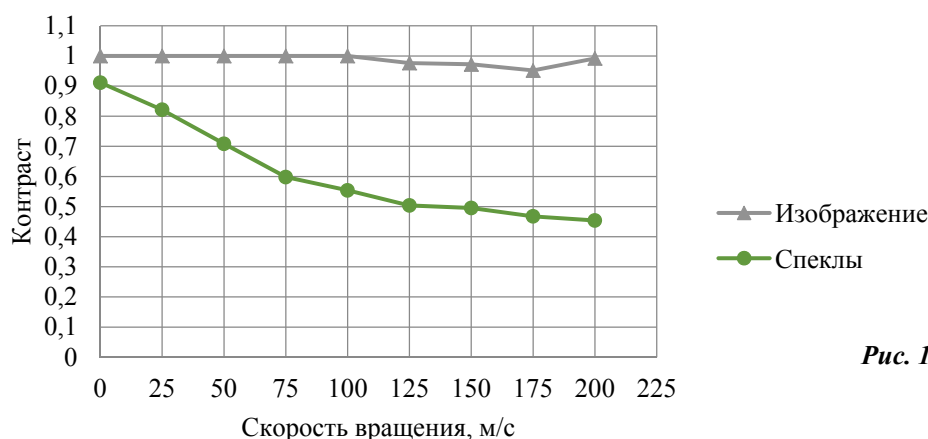


Рис. 11. Сечение 3

Заключение

Таким образом, было разработано и экспериментально проверено схемотехническое решение для минимизации контраста спекл-структуры. Даже несмотря на малое падение контраста изображения, контраст спеклов снижался намного быстрее. Оптимальным режимом работы, пожалуй, являются скорости около 75 об/мин, поскольку контраст спеклов уже начинает убывать незначительно. Данное решение ещё подлежит дальнейшему анализу, поскольку непонятно какое влияние параметры самого диффузора – его толщина, материал, шероховатость. Также интересным вектором является установка датчика Шака-Гартмана вместо камеры и уже исследование непосредственно отклонений волнового фронта. В дальнейшем планируется ввести данную модернизированную осветительную ветвь в современный интерферометр Intellium H2000

и уже анализ работы прибора в целом на конкретной задаче.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов Д. Г., Устюгова М. Н., Фролова В. Е., Машошин Д. А., Гафаров И. И. // Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 71.
2. ISO 10110. Оптика и оптические приборы – Правила оформления чертежей оптических элементов и систем.
3. URL: <https://lasers.llnl.gov/about/nif/about.php>
4. Барышников Н. В., Гладышева Я. В., Денисов Д. Г., Животовский И. В., Патрикеев В. Е., Судариков И. Н. // Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана. 2012. № 9 (9). С. 1.
5. Goodman J. W. // Journal of the Optical Society of America. 1976. Vol. 66. № 11. P. 1145.
6. Redding B., Choma M. A., Cao H. // Nat. Photonics. 2012. № 6. P. 355.
7. Tim Stangner, Hanqing Zhang, Tobias Dahlberg, Krister Wiklund, Magnus Andersson // Applied optics. 2017. Vol. 56. № 19. P. 5427.
8. Пахомов И. И., Рожков О. В., Рождествен В. Н. Опτικο-электронные квантовые приборы. – М.: «Радио и связь», 1982.

Development and study of circuit solutions in the design of the lighting branch of a dynamic interferometer for quality control of optical surfaces

D. A. Mashoshin¹, D. G. Denisov¹, A. B. Morozov², and V. E. Patrikeev²

¹ Bauman Moscow State Technical University
5 bld. 1, 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia
E-mail: den_m01@mail.ru

² JSC "LZOS"
1 Parkovaya st., Lytkarino, 140080, Russia

Received May 31, 2022

A circuit solution has been developed and experimentally tested, namely, a modernized lighting branch of a dynamic interferometer, which makes it possible to increase the accuracy of measuring the quality parameters of optical surfaces by minimizing the speckle structure contrast by introducing a rotating diffuser into the lighting branch.

Keywords: lighting branch, statistical quality parameters, interference pattern, speckle contrast, time averaging, rotating diffuser.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-308-316

REFERENCES

1. D. G. Denisov, M. N. Ustyugova, V. E. Frolova, D. A. Mashoshin, and I. I. Gafarov, *Usp. Prikl. Fiz.* 10 (1), 71 (2022).
2. ISO 10110. Optics and photonics — Preparation of drawings for optical elements and systems.
3. URL: <https://lasers.llnl.gov/about/nif/about.php>
4. N. V. Baryshnikov, Ya. V. Gladysheva, D. G. Denisov, I. V. ZHivotovskij, V. E. Patrikeev, and I. N. Sudarikov, *Vestnik MGTU im N. E. Baumana*, No. 9 (9), 1 (2012).
5. J. W. Goodman, *Journal of the Optical Society of America* 66 (11), 1145 (1976).
6. B. Redding, M. A. Choma, and H. Cao, *Nat. Photonics*, No. 6, 355 (2012).
7. Tim Stangner, Hanqing Zhang, Tobias Dahlberg, and Krister Wiklund, *Applied optics* 56 (19), 5427 (2017).
8. I. I. Pahomov, O. V. Rozhkov, and V. N. Rozhdestvin, *Optiko-Elektronnyye Kvantovyye Pribory* (Radio i svyaz', Moscow, 1982).