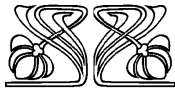
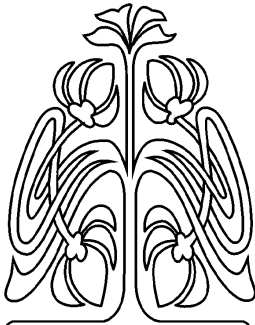




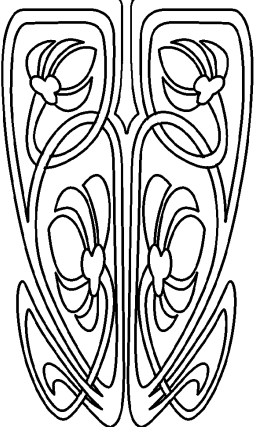
ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 194–206
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 194–206
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-3-194-206>

Научная статья
УДК 535.417:575.113.12:578.54



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Статистические свойства GB спекл-полей: влияние глубины модуляции фазы синтезируемыми GB апертурами

Д. А. Зимняков^{1,2✉}, М. В. Алонова¹, В. А. Федорова³, Ан. В. Скрипаль⁴

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук, Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24

³Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове, 410028, Россия, г. Саратов, ул. 53-й Стрелковой дивизии, д. 6

⁴Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ¹заведующий кафедрой «Физика»; ²главный научный сотрудник лаборатории проблем лазерной диагностики технических и живых систем, zimnykov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

Алонова Марина Васильевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>

Федорова Валентина Анатольевна, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, feodorovav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3827-407X>

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Аннотация. Представлены результаты теоретических исследований статистических свойств GB спекл-полей, отображающих цифровую версию генетической структуры биологического объекта, в зависимости от глубины модуляции фазы коллимированного когерентного пучка, считывающего информацию с синтезированных GB фазовых экранов. В качестве исходных данных для синтеза модельного GB экрана использована последовательность нуклеотидов таргетного гена B602L возбудителя африканской чумы свиней (АЧС) модельного штамма NuB20. Полученные теоретические данные сопоставлены с аналогичными результатами для модельных фазовых экранов с гауссовым и равномерным распределениями локальных фазовых сдвигов. Установлено, что синтезированное GB спекл-поле, в отличие от моделируемых спекл-полей для гауссового и равномерного распределений фазовых сдвигов в порождающих спеклы фазовых экранах, характеризуется значительными осцилляциями когерентной составляющей спекл-поля при возрастании глубины модуляции фазы считывающего пучка фазовым экраном. Это обусловлено особенностями статистики кодонов в отображаемой нуклеотидной последовательности таргетного гена АЧС. Приведены оригинальные модельные данные о чувствительности синтезируемых GB полей к обусловленным мутациями замещениям кодонов в исходной последовательности для таргетного гена штамма NuB20.

Ключевые слова: нуклеотиды, кодоны, таргетный ген, спекл-поле, GB-спеклы

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-21-00194).



Для цитирования: Зимняков Д. А., Алонова М. В., Федорова В. А., Скрипаль Ан. В. Статистические свойства GB спекл-полей: влияние глубины модуляции фазы синтезируемыми GB апертурами // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 194–206. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-3-194-206>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Statistical properties of GB speckle patterns: Influence of the phase modulation depth of the synthesized GB apertures

D. A. Zimnyakov^{1,2}✉, M. V. Alonova¹, V. A. Feodorova³, An. V. Skripal⁴

¹Yury Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

²Institute for Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia

³Saratov Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, 53 Strelkovaya Divisiya St., Building 6, Saratov 410028, Russia

⁴Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Dmitry A. Zimnyakov^{1,2}, zimnykov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

Marina V. Alonova¹, alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>

Valentina A. Feodorova³, feodorovav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3827-407X>

Anatoly V. Skripal⁴, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Abstract. Background and Objectives: Results of theoretical studies of the statistical properties of gene-based speckle patterns are presented. These gene-based (GB) speckle patterns visualize digital versions of genetic structures of biological objects under investigation. The reported study was focused on influence of the depth of phase modulation of a collimated coherent beam used to read information from a synthesized GB phase screen. **Materials and Methods:** In the modeling, the nucleotide sequence of the target gene B602L of the causative agent of African swine fever (the HuB20 strain) was used to synthesize a model GB phase screen. The procedure was based on establishing a correspondence between the unique number of each codon (triplet) in the sequence, which is in the range between 0 and 63, and the depth of phase modulation of the readout beam by the related pixel in the synthesized GB-aperture. After that, the random spatial distribution of the speckle intensity in the Fraunhofer diffraction zone was calculated. The obtained model data were compared to similar data for phase screens with Gaussian and uniform distributions of local phase shifts. **Results:** It has been found that the synthesized GB speckle pattern, in contrast to the simulated speckle patterns for Gaussian and uniform distributions of local phase shifts in speckle-generating phase screens, is characterized by significant oscillations of the coherent component of the speckle field with the increasing phase modulation depth. This is caused by featured statistical properties of the codon ensemble in the processed nucleotide sequence of the target gene of the HuB20 strain. The original model data on the sensitivity of the synthesized GB fields to mutation-driven codon substitutions in the original sequence for the target gene of the HuB20 strain are presented. **Conclusion:** As the result, the original model data on the sensitivity of synthesized GB speckle patterns to mutation-induced codon substitutions in the initial sequence for the target gene of the HuB20 strain have been presented.

Keywords: nucleotides, codons, target gene, speckle field, GB-speckles

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-21-00194).

For citation: Zimnyakov D. A., Alonova M. V., Feodorova V. A., Skripal An. V. Statistical properties of GB speckle patterns: Influence of the phase modulation depth of the synthesized GB apertures. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 194–206 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-3-194-206>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Спекл-модуляция лазерного излучения, взаимодействующего со случайно-неоднородными объектами, обусловлена стохастической интерференцией парциальных световых полей, формируемых в результате рассеяния лазерного пучка на различных элементах структуры зондируемого объекта. На качественном уровне эффект спекл-модуляции может быть описан с использованием классического принципа Гюйгенса – Френеля с использованием допущения о статистической независимости интерферирующих парциальных волн. Следует отметить, что случайная пространственная модуляция рассеянного лазерного излучения представляет собой

достаточно универсальное явление, наблюдаемое в различных условиях (в результате распространения лазерного света в многомодовых оптических волокнах, при его рассеянии на шероховатых поверхностях или в объемных случайно-неоднородных средах). Необходимыми условиями наблюдения стационарных высококонтрастных спекл-структур в рассеянном лазерном излучении являются существенно большее значение длины когерентности лазерного излучения по сравнению со средней разностью хода интерферирующих парциальных волн и существенно большее значение времени корреляции флуктуаций интенсивности спеклов по сравнению с временем наблюдения или регистрации спекл-картины.



Всплеск исследовательского интереса к свойствам лазерных спеклов пришелся на промежуток от середины семидесятых до конца девяностых годов прошлого века; в это время были получены основные фундаментальные результаты спекл-оптики как одного из ключевых разделов статистической оптики и разработаны основные принципы и методы спекл-метрологии как прикладной науки [1–10]. Отметим также, что различные модификации метода квазиупругого рассеяния света, включая спектроскопию оптического смещения [11, 12] и диффузионно-волновую спектроскопию нестационарных многократно рассеивающих сред [13–16], основаны на корреляционном или спектральном анализе случайных биений интенсивности в локальных зонах динамических спекл-полей, порождаемых рассеянием лазерного излучения изменяющимися во времени диагностируемыми объектами.

Формируемое при взаимодействии с конкретным случайно-неоднородным объектом спекл-поле обладает уникальной пространственной структурой, присущей только данному объекту для используемых условий освещения. Именно это свойство дает возможность голографической записи информации и позволяет в определенных случаях осуществлять когерентно-оптическое распознавание объектов с использованием синтезируемых под конкретный объект фильтра Вандер Люгта [17]. Одним из возможных применений существования подобной уникальной взаимосвязи между сложной структурой объекта и сгенерированного для этого объекта спекл-полем является когерентно-оптическое отображение нуклеотидных последовательностей целевых генов патогенов бактериальной и вирусной природы как основы разработки новых высокоточных методов молекулярной диагностики инфекционных болезней животных и человека [18]. Сравнительный анализ последовательностей нуклеотидов является одной из важнейших составляющих исследований геномов различных биологических объектов, позволяющий установить устойчивые взаимосвязи между изменениями структуры ДНК и функциональными свойствами объекта. В настоящее время подобный анализ производится в основном путем поэлементного численного сравнения структуры исходного и модифицированного генома. Применение когерентно-оптиче-

ских методов визуализации и анализа структуры последовательностей нуклеотидов позволит, с одной стороны, сделать процедуру сравнения более наглядной и, с другой стороны, при определенных условиях, повысить ее объективность.

Концепция когерентно-оптического кодирования генетической информации в форме синтезируемых GB (gene-based) спекл-полей, впервые предложенная в [19, 20], основана на идее отображения информации, содержащейся в уникальной нуклеотидной последовательности гена в форме квази-случайного фазового экрана, генерирующего виртуальные GB спекл-поля, специфичные именно для данного конкретного участка ДНК того или иного микроорганизма. На первом шаге синтеза каждому нуклеотиду ставится в соответствие целое число от 1 до 4, далее получившаяся последовательность разбивается на кодоны, каждому из которых присваивается целое значение от 0 до 63. Из последовательности кодонов генерируется квази-случайный фазовый экран размером $(N + 1) \times (N + 1)$ элементов, где N – четное число; каждому элементу экрана, соответствующему конкретному кодону в отображаемой генной структуре, приписывается определенный фазовый сдвиг считывающей когерентной световой волны в результате моделирования ее прохождения через экран. Правило кодирования величины фазового сдвига для произвольно выбранного элемента GB фазового экрана записывается следующим образом:

$$\Delta\varphi_{k,m} = \tilde{K}_\varphi D_{k,m}, \quad (1)$$

где \tilde{K}_φ – масштабирующий коэффициент, определяющий глубину модуляции фазы в генерируемом фазовом экране (в работах [19, 20] предложено использовать значение $\tilde{K}_\varphi = \pi/31.5$); $D_{k,m}$ – целочисленное значение в интервале от 0 до 63, соответствующее (k, m) кодону в отображаемой генной структуре (в процессе генерации фазового экрана линейная последовательность из $(N + 1) \times (N + 1)$ кодонов преобразуется в $(N + 1) \times (N + 1)$ матрицу). На завершающем шаге синтеза GB спекл-поля вычисляется квадрат модуля фурье-образа функции пропускания генерируемого фазового экрана в соответствии со следующим выражением:

$$I_{j,t} = \left| \frac{1}{(N + 1)^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \exp \left[-i \left\{ \frac{2\pi}{(N + 1)} \{jk + tm\} - \Delta\varphi_{km} \right\} \right] \right|^2. \quad (2)$$



Здесь $I_{j,t}$ – нормированные значения интенсивности синтезированных GB спеклов в частотной плоскости (j,t) ; выражение под знаком модуля в правой части формулы (2) представляет собой дискретное преобразование Фурье матрицы $\Delta\varphi_{k,m}$, описывающей фазовую функцию пропускания генерируемого экрана. Следует

отметить, что индексы j и t для исключения эффекта подмены частот должны изменяться в интервалах от $-N/2$ до $N/2$; данное ограничение является следствием теоремы отсчетов [21]. Распределение фазы в синтезированном GB спекл-поле может быть получено как:

$$\varphi_{j,t}^{GB} = \arg \left[\frac{1}{(N+1)^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \exp \left[-i \left\{ \frac{2\pi}{(N+1)} \{jk+tm\} - \Delta\varphi_{km} \right\} \right] \right], \quad (3)$$

где $\arg()$ – аргумент комплексного числа.

Отметим соответствие распределения $I_{j,t}$ пространственному распределению интенсивности когерентного светового поля, формируемого в результате дифракции Фраунгофера на синтезированном GB фазовом экране; в натурном эксперименте подобное распределение формируется в задней фокальной плоскости собирающей линзы при расположении GB фазового экрана в передней фокальной плоскости и его освещении широким коллимированным световым пучком с равномерным распределением амплитуды и фазы по сечению. При этом значение $I_{0,0}$ соответствует интенсивности нерассеянной («когерентной») составляющей прошедшего через GB экран излучения. Вклад этой составляющей в синтезированное GB спекл-поле определяется используемой глубиной модуляции фазы \tilde{K}_φ и близок к 0 при среднеквадратичных значениях флуктуаций фазы прошедшего пучка, существенно превышающих π .

Фундаментальной особенностью дифракции когерентных световых пучков на случайных фазовых экранах, состоящих из большого числа статистически независимых фазовых неоднородностей ($N \gg 1$) и характеризующихся значительной глубиной модуляции фазы ($K_\varphi \gg \pi$), является формирование так называемых полностью развитых спекл-полей (fully developed speckles). Подобные спекл-структуры характеризуются экспоненциальной функцией плотности вероятности интенсивности $\rho^{FD}(I) = (1/\langle I \rangle) \exp(-I/\langle I \rangle)$ и равномерным распределением главных значений фазы в произвольно выбранных точках спекл-поля вне зависимости от конкретной формы пространственного распределения фазы в случайном фазовом экране. Возрастание глубины модуляции фазы проходящего когерентного пучка случайным фазовым экраном от 0 до значений, существенно превышающих π , сопровождается постепенным разрушением (стохастизацией)

регулярной дифракционной структуры дифрагировавшего на экране светового пучка. При этом особенности перехода от регулярной структуры дифрагировавшего пучка к стохастической структуре полностью развитого спекл-поля (в рассматриваемом здесь случае – синтезированного GB спекл-поля) определяются особенностями статистики фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{k,m}$ и, соответственно, глубиной фазовой модуляции K_φ и структурой генерируемой матрицы кодонов $\{D_{k,m}\}$.

Как отмечено выше, в [19, 20] в ходе верификации концепции GB спекл-полей численные эксперименты по синтезу GB спеклов проводились с использованием единичного фиксированного значения $\tilde{K}_\varphi = \pi/31.5$; при этом было установлено, что плотность распределения значений интенсивности синтезированных спекл-полей близка к характерному для развитых спеклов отрицательному экспоненциальному распределению, в то время как функция плотности вероятности главных значений фазы существенно отличается от равномерного распределения. Вместе с тем, открытым остается вопрос о влиянии глубины фазовой модуляции на свойства синтезируемых GB спеклов (в частности, характер затухания когерентной составляющей прошедшего через синтезированную апертуру считывающего излучения и чувствительность спеклов к малым изменениям структуры, порождающей GB фазовый экран).

Данная работа посвящена рассмотрению этих вопросов; в части анализа влияния глубины фазовой модуляции на затухание когерентной (нерассеянной) составляющей прошедшего через экран излучения результаты моделирования для экрана, соответствующего конкретной генной последовательности, сопоставлялись с результатами моделирования для экранов с гауссовым и равномерным распределениями плотности вероятности локальных фазовых сдвигов.



1. Особенности затухания когерентной составляющей моделируемых спекл-полей в зависимости от статистики локальных фазовых сдвигов в синтезированных фазовых экранах

На рис. 1 приведены модельные зависимости нормированной интенсивности нерассеянной (когерентной) составляющей $I_{0,0}$ от параметра модуляции фазы K_φ для синтезированных фазовых экранов с различными распределениями вероятности и нулевыми фазовыми значениями локальных фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{k,m}$. Во всех случаях генерировались выборки из 625 непрерывных (ξ) или дискретных (D) величин с единичным среднеквадратичным и нулевым средним значением, которые затем преобразовывались в квадратную матрицу размером 25×25 и масштабировались

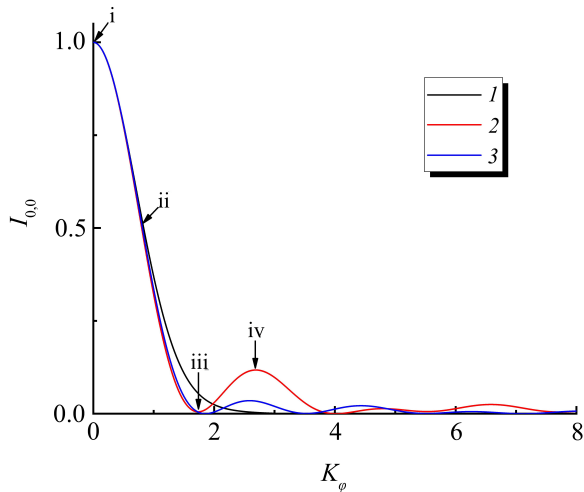


Рис. 1. Модельные зависимости нормированной интенсивности когерентной составляющей излучения, прошедшего через синтезированный фазовый экран, от параметра глубины модуляции фазы для разных форм распределения величин фазы: 1 – гауссово распределение, 2 – распределение величины D , 3 – равномерное распределение. Точки i, ii, iii, iv на кривой 2 соответствуют сформированным спеклам на рис. 3 (цвет online)

Fig. 1. Model dependences of the normalized intensity of the coherent component of radiation passed through the synthesized phase screen on the phase modulation depth parameter: 1 – Gaussian distribution; 2 – D distribution; 3 – uniform distribution. Points i, ii, iii, iv on curve 2 correspond to the formed speckles in Fig. 3 (color online)

коэффициентом K_φ для достижения требуемой глубины модуляции фазы проходящего через экран модельного когерентного излучения. Зависимости 1 и 3 на рис. 1 соответствуют фазовым экранам, синтезированным на основе выборочных значений непрерывных случайных величин с нормальным (1) и равномерным (3) законами распределения, в то время как зависимость 2 соответствует набору дискретных фазовых сдвигов для последовательности из 625 кодонов, характерной для таргетного гена B602L вируса АЧС штамма HuB20 [21,22]. В последнем случае последовательность нуклеотидов (табл. 1) разделялась на триады (кодны) $a_3a_2a_1$, каждый из которых преобразовывался в уникальный код триады в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\tilde{D} = 16a_3 + 4a_2 + a_1 21, \quad (4)$$

где $a_{1,2,3} = 1, 2, 3, 4$ – коды нуклеотидов, формирующих триады. Таким образом, возможные значения \tilde{D} находятся в интервале от 0 до 63.

Предварительный частотный анализ последовательности кодонов для штамма HuB20 (рис. 2) позволяет сделать вывод о квазислучай-

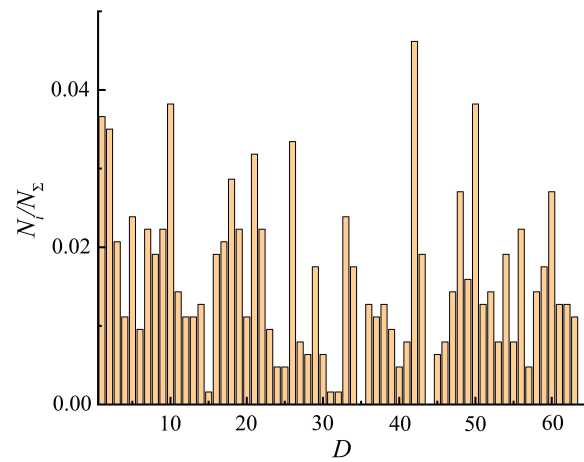


Рис. 2. Гистограмма относительной частоты распределения кодов триад для гена B602L вируса АЧС штамма HuB20

Fig. 2. Histogram of the triplet codes for the B602L gene of the ASF virus strain HuB20

Таблица 1 / Table 1

Фрагмент последовательности нуклеотидов и соответственного значения величины \tilde{D} для штамма HuB20
Nucleotide sequence fragment and the corresponding value of \tilde{D} for the strain HuB20

Nucleotide	134	421	321	441	441	423	333	343	233	133	423	...
\tilde{D}	11	52	36	60	60	54	42	46	26	10	54	...

Примечание. 1 – аденин, 2 – цитозин, 3 – тимин, 4 – гуанин.

Note. 1 – adenine, 2 – cytosine, 3 – thymine, 4 – guanine.



ном характере распределения триад (кодонов) в последовательности. При синтезе соответствующего GB фазового экрана производились масштабирование и сдвиг значений \tilde{D} в соответствии со следующим правилом:

$$D = (\tilde{D} - \tilde{D}_m) / \tilde{D}_{st}, \quad (5)$$

где \tilde{D}_m и \tilde{D}_{st} – среднее значение и стандартное отклонение величины \tilde{D} . Таким образом, обеспечивается критерий нулевого математического ожидания и единичного среднего отклонения квазислучайной величины D .

Необходимо отметить выраженный осциллирующий характер модельных зависимостей $I_{0,0}(K_\phi)$ для синтезированных фазовых экранов с равномерным распределением вероятностей локальных фазовых сдвигов (3) и распределением,

соответствующим последовательности кодонов в штамме NuB20. На рис. 3 приведены примеры сформированных GB спеклов для гена B602L соответствующего модельного штамма при значениях параметра модуляции фазы K_ϕ , соответствующих различным особенностям зависимости $I_{0,0}(K_\phi)$: i – $K_\phi = 0$ (отсутствие фазовой модуляции); ii – $K_\phi \approx 0.9$; iii – $K_\phi \approx 1.7$ (приблизительно соответствует локальному минимуму зависимости $I_{0,0}(K_\phi)$); iv – $K_\phi \approx 2.6$ (приблизительно соответствует локальному максимуму зависимости $I_{0,0}(K_\phi)$). В процессе синтеза GB спеклов производилось дополнительное масштабирование распределений $I(j, t)$ в частотной плоскости (j, t) в соответствии со следующим выражением:

$$I_{j,t} = \left| \frac{1}{(N+1)^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \exp \left[-i \cdot scale \cdot \left\{ \frac{2\pi}{(N+1)} \{jk + tm\} - \Delta\phi_{km} \right\} \right] \right|^2. \quad (6)$$

Параметр *scale* при масштабировании должен выбираться в интервале

$$0 < scale \leq N / (j_{\max}),$$

где j_{\max} – отображаемое число точек в частотной плоскости; форма отображаемой области предполагается квадратной. Соответственно, убывание значения *scale* при постоянных j_{\max}, t_{\max} приводит к увеличению масштаба изображения. GB спеклы, представленные на рис. 3, получены при *scale* = 0.1. Отметим также отсутствие выраженных

осцилляций зависимости $I_{0,0}(K_\phi)$ для GB спекл-поля в случае гауссовой статистики локальных фазовых сдвигов (см. зависимость 1 на рис. 1). Особенность, обусловленная наличием или отсутствием осцилляций «когерентной» составляющей синтезированного спекл-поля, может быть интерпретирована с использованием следующих соображений.

В соответствии с выражением (2) нормированная интенсивность «когерентной» составляющей может быть представлена как:

$$I_{0,0} = \left| \frac{1}{(N+1)^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \exp(i\Delta\phi_{km}) \right|^2 = \frac{1}{(N+1)^4} \left| \sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \{ \cos(\Delta\phi_{km}) + i \sin(\Delta\phi_{km}) \} \right|^2 = \frac{1}{(N+1)^4} \left[\left[\sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \cos(\Delta\phi_{km}) \right]^2 + \left[\sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \sin(\Delta\phi_{km}) \right]^2 \right]. \quad (7)$$

Слагаемые

$$\left[\sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \cos(\Delta\phi_{km}) \right]^2$$

и

$$\left[\sum_{k=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \sin(\Delta\phi_{km}) \right]^2$$

в правой части уравнения (7) представляют собой суммы $(N+1)^2$ квадратичных членов $\cos^2(\Delta\phi_{km})$ и $\sin^2(\Delta\phi_{km})$ и $\{(N+1)^4 - (N+1)^2\}$ «перекрестных» членов вида $\cos(\Delta\phi_{km})\cos(\Delta\phi_{k'm'})$ и $\sin(\Delta\phi_{km})\sin(\Delta\phi_{k'm'})$. В результате группировки слагаемых в правой части (7) приходим к следующему выражению:

$$I_{0,0} = \frac{1}{(N+1)^4} \left[(N+1)^2 + \sum_k \sum_{k' \neq k} \sum_m \sum_{m' \neq m} \{ \cos(\Delta\phi_{km}) \cos(\Delta\phi_{k'm'}) + \sin(\Delta\phi_{km}) \sin(\Delta\phi_{k'm'}) \} \right]. \quad (8)$$

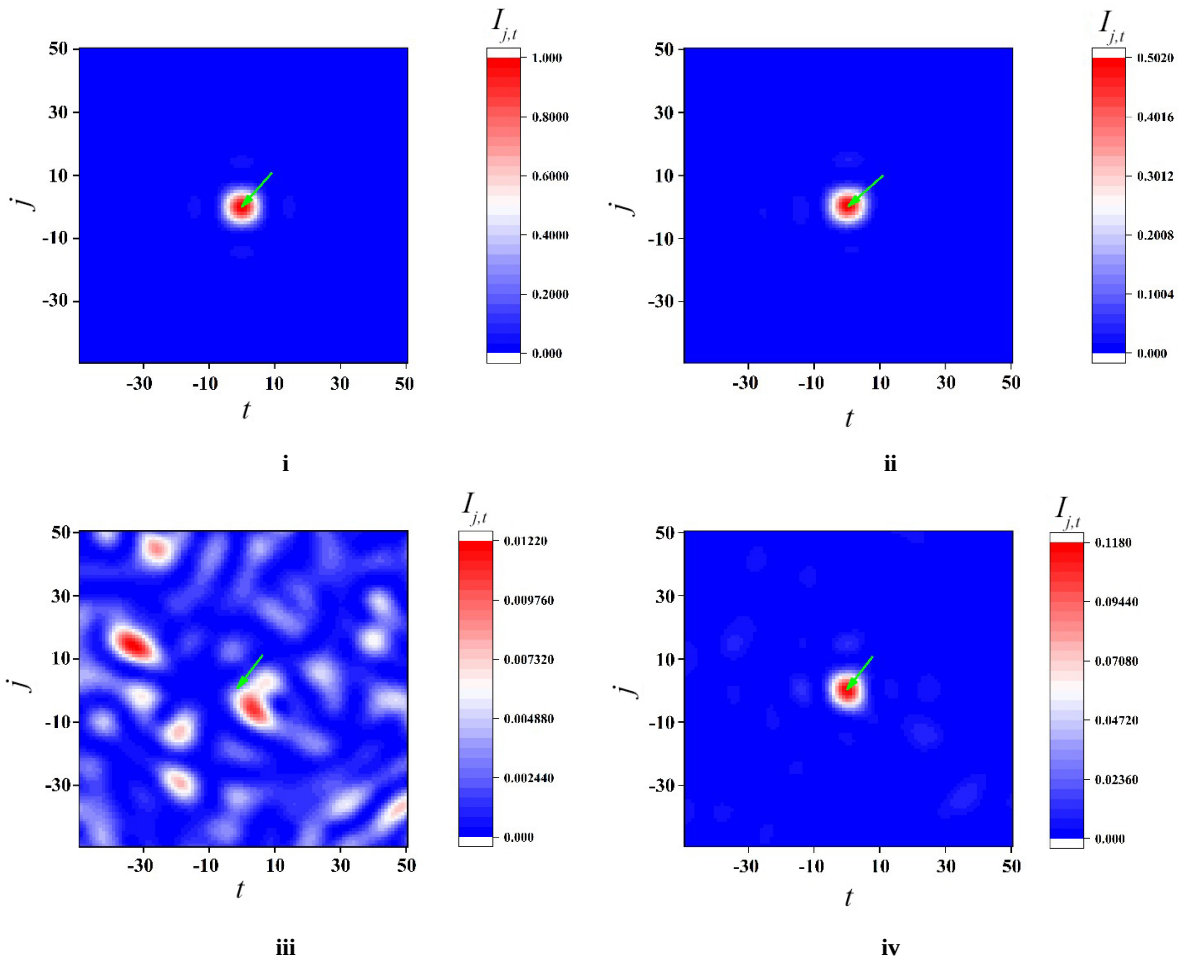


Рис. 3. Фрагменты пространственных распределений нормированной интенсивности синтезированных GB спекл-структур для гена B602L штамма HuB20, иллюстрирующие осциллирующий характер зависимости интенсивности когерентной составляющей от параметра глубины модуляции фазы. Нумерация изображений соответствует маркерам на рис. 1. Зеленые стрелки отмечают положение точки (0,0) на частотной плоскости (цвет online)

Fig. 3. Fragments of the spatial distributions of the normalized intensity for the synthesized GB speckle structures in the case of the B602L gene of the HuB20 strain. These patterns illustrate the oscillatory nature of the dependence of the coherent component intensity on the phase modulation depth. The numbering of the images corresponds to the markers in Fig. 1. Green arrows mark the position of the zero point in the frequency plane (color online)

Принимая во внимание статистическую независимость величин $\Delta\varphi_{km}$ и $\Delta\varphi_{k'm'}$, преобразуем выражение (8) к следующей форме:

$$I_{0,0} = \frac{1}{(N+1)^4} [(N+1)^2 + \{(N+1)^4 - (N+1)^2\} \langle \cos(\Delta\varphi_{km} - \Delta\varphi_{k'm'}) \rangle], \quad (9)$$

где $\langle \cos(\Delta\varphi_{km} - \Delta\varphi_{k'm'}) \rangle$ – значение косинуса разности случайных фазовых сдвигов, усредненное по ансамблю их возможных значений для данного фазового экрана. Очевидно, что $I_{0,0} \rightarrow 1$ при убывании глубины фазовой модуляции, когда $\langle |\Delta\varphi_{km} - \Delta\varphi_{k'm'}| \rangle \rightarrow 0$, и асимптотически стремится к 0 при возрастании глубины фазовой модуляции.

Усредненное по ансамблю разностей случайных фазовых сдвигов значение косинуса может

быть представлено как

$$\langle \cos \{ \Delta(\Delta\varphi) \} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \cos \{ \Delta(\Delta\varphi) \} \rho \{ \Delta(\Delta\varphi) \} d \{ \Delta(\Delta\varphi) \}, \quad (10)$$

где $\rho \{ \Delta(\Delta\varphi) \}$ – функция плотности вероятности значений фазовых сдвигов для данного случайного фазового экрана. Поскольку значения $\Delta\varphi$ являются статистически независимыми, то функция плотности вероятности их разностей может



быть получена как автокорреляционная функция плотности вероятности значений $\Delta\varphi$ (см., например, [21, 22]):

$$\rho\{\Delta(\Delta\varphi)\} = K \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\Delta\varphi) \rho\{\Delta\varphi + \Delta(\Delta\varphi)\} d(\Delta\varphi), \quad (11)$$

где K – нормировочная постоянная, определяемая из условия $\int_{-\infty}^{\infty} \rho\{\Delta(\Delta\varphi)\} d\{\Delta(\Delta\varphi)\} = 1$.

$$\rho^G\{\Delta(\Delta\varphi)\} = (1/2\sqrt{\pi}\sigma_{\Delta\varphi}) \exp\left[-\{\Delta(\Delta\varphi)\}^2 / 2(\sqrt{2}\sigma_{\Delta\varphi})^2\right], \quad (12)$$

$$\rho^U\{\Delta(\Delta\varphi)\} = \begin{cases} (1/\sqrt{32}\sigma_{\Delta\varphi}) \{1 - |\Delta(\Delta\varphi)|/\sqrt{32}\sigma_{\Delta\varphi}\}, & |\Delta(\Delta\varphi)| \leq \sqrt{32}\sigma_{\Delta\varphi}; \\ 0, & |\Delta(\Delta\varphi)| > \sqrt{32}\sigma_{\Delta\varphi}, \end{cases} \quad (13)$$

где индексы G и U соответствуют нормальному и равномерному распределениям локальных фазовых сдвигов. При использовании подходе к синтезу фазовых экранов (использование выборок случайных величин с нулевым средним и единичным среднеквадратичным значением) очевидно, что $\sigma_{\Delta\varphi} = K_{\varphi}$. Проведенный анализ позволяет интерпретировать существование значительных осцилляций зависимости $I_{0,0}(K_{\varphi})$ в случае распределения разностей фазовых набегов, описываемого $\rho^U\{\Delta(\Delta\varphi)\}$ (треугольная форма функции плотности вероятности) и их практическое отсутствие для фазового экрана с гауссовой функцией плотности вероятности разностей фазовых сдвигов ($\rho^G\{\Delta(\Delta\varphi)\}$). Выражение (8) может быть интерпретировано как косинус-преобразование Фурье функции плотности вероятности разностей локальных фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{k,m}$. Известно, что гауссова функция инвариантна по отношению к преобразованию Фурье, соответственно, фазовые экраны с нормальными распределениями локальных фазовых сдвигов должны характеризоваться монотонным убыванием $I_{0,0}$ с ростом K_{φ} , описываемым гауссовой функцией. С другой стороны, фурье-преобразование треугольного распределения с точностью до постоянного множителя в аргументе описывается функцией вида $\{\sin(K_{\varphi})/K_{\varphi}\}^2$, что и является причиной осциллирующего характера зависимости $I_{0,0}(K_{\varphi})$.

Отметим, что данный анализ должен быть уточнен в случае глубокой фазовой модуляции. Выражения (10) и (11) описывают плотности вероятности значений разностей локальных фазовых сдвигов в интервале от $-\infty$ до ∞ , т. е. рассматриваются *полные* значения $\Delta(\Delta\varphi)$,

В частности, можно показать, что для рассмотренных модельных распределений локальных фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{k,m}$, генерируемых на основе случайных величин с равномерным и нормальным законами распределения, можно показать, что соответствующие функции плотности вероятности разностей сдвигов имеют следующий вид:

а не *главные* значения, находящиеся в интервале от $-\pi$ до π . Соответственно, при глубокой фазовой модуляции, когда возможный размах значений $\Delta(\Delta\varphi)$ значительно превышает π , существенное влияние на зависимость $I_{0,0}(K_{\varphi})$ будет оказывать эффект «подмены», обусловленный идентичностью значений $\cos\{\Delta(\Delta\varphi)\}$ для $\Delta(\Delta\varphi)$, различающихся на величины, кратные 2π . При возрастании K_{φ} форма функций плотности вероятности главных значений разностей фазовых сдвигов будет постепенно изменяться, асимптотически приближаясь к равномерному распределению в интервале от $-\pi$ до π .

Подобная эволюция форм распределений главных значений разностей фазовых сдвигов с ростом глубины модуляции фазы приводит к появлению осцилляций даже для фазового экрана с гауссовой статистикой локальных фазовых набегов и неэквидистантному характеру осцилляций для всех фазовых экранов (рис. 4, на котором зависимости $I_{0,0}(K_{\varphi})$ для рассматриваемых случаев представлены в полулогарифмических координатах). Пунктирная горизонтальная линия на рис. 4 соответствует нормированной средней интенсивности спеклов в плоскости (j, t) . Очевидно, что в случае фазового экрана с гауссовой статистикой локальных фазовых сдвигов эффект осцилляций когерентной составляющей, обусловленный отмеченными выше метаморфозами функции плотности вероятности $\rho\{\Delta(\Delta\varphi)\}$, подавлен существенно более высокоамплитудными случайными флуктуациями интенсивности спеклов в окрестностях точки $(0, 0)$.

В то же время синтезированное GB поле для штамма NiB20 характеризуется достаточно высокоамплитудными осцилляциями когерент-



ной составляющей, существенно превышающими среднюю интенсивность спеклов.

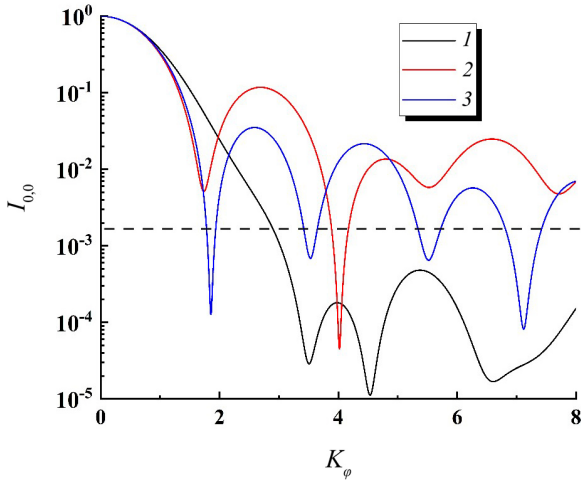


Рис. 4. Зависимости $I_{0,0}(K_{\phi})$ в полулогарифмических координатах. Обозначения зависимостей см. на рис. 1 (цвет online)

Fig. 4. Dependences $I_{0,0}(K_{\phi})$ in semi-logarithmic coordinates. The markers correspond to those in Fig. 1 (color online)

2. Чувствительность GB спекл-полей к локальным изменениям в порождающей последовательности кодонов

Локальные изменения в уникальных последовательностях нуклеотидов, обусловленные естественными или искусственными мутациями, должны очевидным образом приводить к случайным замещениям определенного числа элементов матрицы фазовых сдвигов $\Delta\varphi_{km}$ и, следовательно, к локальным изменениям синтезируемого спекл-поля $I_{j,t}$ (выражение (6)). Соответственно, имеет место декорреляция пространственных флуктуаций GB спекл-поля, соответствующего нуклеотидной последовательности того же гена другого штамма, отличающегося выраженным полиморфизмом относительно исходного спекл-поля (синтезированного для исходной оригинальной последовательности нуклеотидов без дополнительных мутаций), увеличивающаяся по мере

возрастания числа замещенных триад. Следует отметить, что проблема идентификации локальных изменений случайных ансамблей рассеивающих центров является ключевой проблемой спекл-коррелометрической диагностики случайно-неоднородных сред со сложной структурой и динамикой. Исходя из общих соображений очевидно, что порождаемое измененной структурой спекл-поле может считаться статистически независимым по отношению к спекл-полю, соответствующему объекту до изменений, когда среднее квадратичное значение разностей фазовых сдвигов $\sigma_{\Delta(\Delta\varphi)}$ интерферирующих парциальных волн достигает π и более.

Вместе с тем, естественно предположить, что увеличение параметра глубины модуляции K_{ϕ} должно приводить к росту декорреляции исходного и измененного GB спекл-полей. С целью оценки влияния данного параметра на чувствительность флуктуаций нормированной интенсивности $I_{j,t}$ синтезированного GB спекл-поля для целевого гена штамма NuB20 к случайным замещениям кодонов в их исходной последовательности проводились следующие операции. Позиции замещаемых кодонов в последовательности и соответствующие им случайные значения D выбирались случайным образом с равной вероятностью в интервалах изменений этих параметров (от 1 до 625 для позиции кодона и от 0 до 63 для соответствующего значения D). Поскольку замещение кодонов влияет на интенсивность синтезируемого спекл-поля во всех его точках (выражение (2)), то в качестве критерия отстройки измененного пространственного распределения интенсивности $I'_{j,t}$ от исходного распределения $I_{j,t}$ в зависимости от числа замещенных кодонов N_C и параметра глубины фазовой модуляции использовано среднее квадратичное значение $\sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C)$ случайной величины $\Delta I_{j,t} = I_{j,t}(K_{\phi}, N_C) - I_{j,t}(K_{\phi})$. Необходимо отметить, что величина $\sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C)$ непосредственно связана со структурной функцией флуктуаций интенсивности, вводимой следующим образом:

$$SF_I(K_{\phi}, N_C) = \langle \{I'_{j,t}(K_{\phi}, N_C) - I_{j,t}(K_{\phi})\}^2 \rangle = \langle \{I'_{j,t}(K_{\phi}, N_C)\}^2 \rangle - 2 \langle I'_{j,t}(K_{\phi}, N_C) I_{j,t}(K_{\phi}) \rangle + \langle \{I_{j,t}(K_{\phi})\}^2 \rangle \approx \approx 2 \langle \{I_{j,t}(K_{\phi})\}^2 \rangle - 2 \langle I'_{j,t}(K_{\phi}, N_C) I_{j,t}(K_{\phi}) \rangle. \quad (14)$$

Очевидно, что $\sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) = \sqrt{SF_I(K_{\phi}, N_C)}$; таким образом, величина $\sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C)$ характеризу-

ет декорреляцию спекл-полей $I'_{j,t}$ и $I_{j,t}$, выражаемую через значение $\langle I'_{j,t}(K_{\phi}, N_C) I_{j,t}(K_{\phi}) \rangle$.



На рис. 5 приведены зависимости величины $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle / \langle I_{j,t} \rangle$ от параметра K_{ϕ} при различных значениях числа измененных кодонов в исходной последовательности для штамма HuB20. Символ $\langle \rangle$ обозначает усреднение данных по набору из 100 значений σ_{Δ} и $I_{j,t}$, получаемых в результате случайного выбора позиций замещаемых кодонов и соответствующих им величин D .

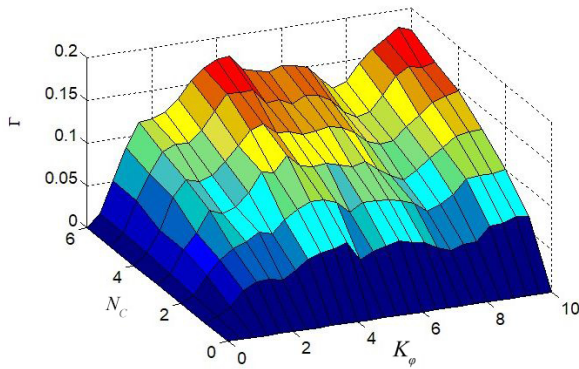


Рис. 5. Зависимости $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle / \langle I_{j,t} \rangle$ для моделируемых GB спекл-полей при использовании в качестве исходной структуры последовательности кодонов для гена B602L штамма HuB20 (цвет online)

Fig. 5. $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle / \langle I_{j,t} \rangle$ dependences for the simulated GB speckle patterns for the B602L gene codon sequence (the HuB20 strain) as the initial structure (color online)

Модельная зависимость $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle / \langle I_{j,t} \rangle$ демонстрирует осциллирующий характер с ростом параметра глубины модуляции фазы K_{ϕ} ; исходя из достаточно большого объема выборок, используемых при усреднении, очевидно, что эти осцилляции имеют систематический характер, а не обусловлены стохастикой получаемых при моделировании наборов данных.

Можно предположить, что предельное значение, к которому стремится данный параметр при возрастании $K_{\phi} \rightarrow \infty$ и числа замещаемых кодонов, стремящемуся к полному числу кодонов в анализируемом наборе, равно $\approx \sqrt{2}$. Данный вывод обусловлен следующими соображениями: при больших значениях K_{ϕ} и N_C распределения $I'_{j,t}(K_{\phi}, N_C)$ и $I_{j,t}(K_{\phi})$ соответствуют статистически независимым развитым спекл-структурам, для которых среднеквадратичные значения флуктуаций интенсивности равны значениям средней интенсивности. Исходя из статистических свойств сумм и разностей случайных величин и равенства средних значений интенсивностей спекл-полей для исходной GB апертуры и апертуры, соответствующей замещаемой последовательности кодонов, приходим к данному соотношению для предельного значения $\langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle$. Для используемых условий моделирования (синтезируемая GB апертура размером 25×25 элементов, соответствующих кодоном в отображаемой последовательности, и единичная амплитуда коллимированного считывающего пучка) предельное значение $\langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle$ приблизительно равно $2.26 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 6 приведена зависимость параметра $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, 1) \rangle / \langle I_{j,t} \rangle$, характеризующего вариабельность GB спекл-поля при замещении единичного кодона в исходной последовательности, от параметра глубины модуляции фазы.

Флуктуации параметра Γ на рис. 6 обусловлены конечностью объемов выборок, несмотря на их достаточно большие значения. В то же время необходимо отметить общую тенденцию, характерную для модельных данных, характери-

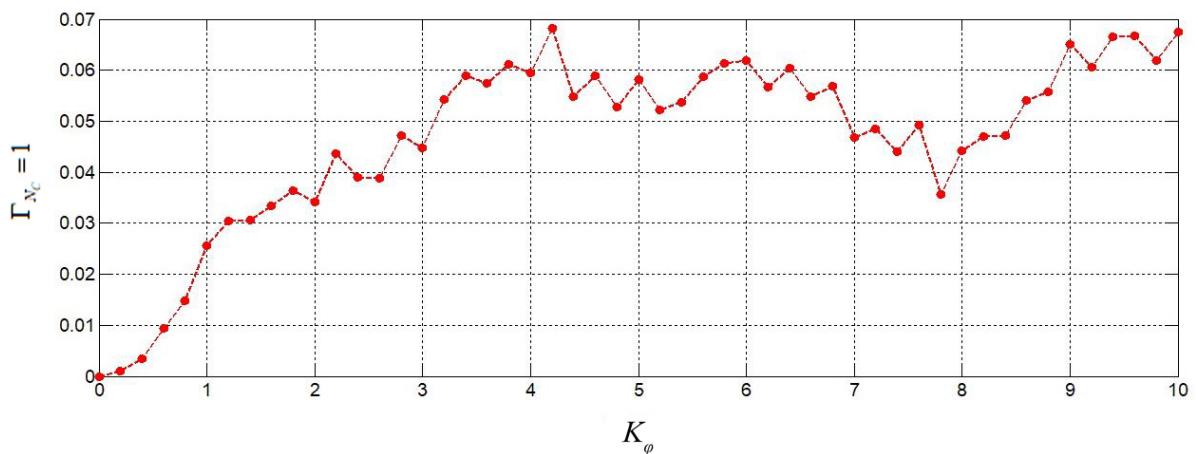


Рис. 6. Зависимость $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, 1) \rangle / \langle I_{j,t} \rangle$ от K_{ϕ} для гена B602L штамма HuB20

Fig. 6. Dependence of $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, 1) \rangle / \langle I_{j,t} \rangle$ on K_{ϕ} for the B602L gene (the HuB20 strain)



зующих чувствительность GB спеклов к изменениям кодонов в исходной последовательности. Эта общая тенденция заключается в существовании определенной корреляции между параметром чувствительности синтезируемого GB спекл-поля $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle / \langle I_{j,i} \rangle$ к изменениям кодонов в исходной последовательности и осцилляциями когерентной составляющей GB спекл-поля при изменении параметра глубины модуляции: минимальные значения $I_{0,0}$ соответствуют локальным максимумам $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle / \langle I_{j,i} \rangle$ и наоборот. Достаточно показательное поведение зависимостей $\Gamma = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, N_C) \rangle / \langle I_{j,i} \rangle$ и $I_{0,0}$ от K_{ϕ} вблизи точки $K_{\phi} = 4$ (см. рис. 4–6). Несмотря на осциллирующий характер зависимости $\Upsilon = \langle \sigma_{\Delta}(K_{\phi}, 1) \rangle / \langle I_{j,i} \rangle$, очевидно, что рост K_{ϕ} соответствует положительному тренду чувствительности GB спеклов к вариациям последовательности кодонов. Данные результаты могут быть обобщены на случаи GB спекл-полей, порождаемых другими последовательностями кодонов.

Заключение

В результате проведенного теоретического анализа установлены некоторые неизвестные ранее специфические свойства GB спеклов, к которым, в частности, относится осциллирующее поведение нерассеянной (когерентной) составляющей GB спекл-поля при возрастании глубины модуляции локальных фазовых сдвигов при генерации соответствующего GB фазового экрана. В частности, для используемой в работе последовательности кодонов гена B602L вируса АЧС штамма NuB20 имеет место выраженный вторичный максимум когерентной составляющей спекл-поля с интенсивностью порядка 0.1 от интенсивности считывающего пучка при глубине модуляции фазовых сдвигов порядка 2.6–2.7 радиан. В то же время для фазовых экранов с «классическим» гауссовым распределением локальных фазовых сдвигов интенсивность когерентной составляющей сопоставима со средней интенсивностью спеклов, что не позволяет ее идентифицировать в синтезируемом спекл-поле. Эти осцилляции обусловлены особенностями распределения кодонов в соответствующей последовательности и могут быть применены для анализа статистики комбинаций нуклеотидов в целевом гене различных штаммов вируса, указывая на перспективу использования данного

подхода для разработки высокоточных молекулярных методов дискриминации патогенов нового поколения.

Теоретический анализ чувствительности синтезируемых GB спеклов к случайным замещениям кодонов в анализируемых последовательностях на примере гена B602L модельного штамма NuB20 позволил определить необходимость увеличения параметра глубины модуляции фазы при генерации GB фазовых экранов до значений, существенно превышающих 2π .

Возможным подходом к дополнительному увеличению чувствительности синтезируемых GB спеклов к локальным изменениям в анализируемых последовательностях кодонов является каскадирование генерируемых фазовых экранов (развитию данного подхода будут посвящены дальнейшие исследования). Также представляет интерес развитие рассмотренного подхода в части применения считывающего когерентного светового поля в форме лазерных пучков с более сложной амплитудно-фазовой структурой, чем рассмотренный в рамках работы коллимированный пучок с однородным распределением амплитуды и фазы (например, спекл-модулированное считывающее поле).

Список литературы

1. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М. : Мир, 1988. 528 с.
2. Франсон М. Оптика спеклов. М. : Мир, 1980. 171 с.
3. Jacquot P., Rastogi P. K. Speckle Motions Induced by Rigid-Body Movements in Free Space Geometry : An Explicit Investigation and Extension to New Cases // Appl. Opt. 1979. Vol. 18. P. 2022–2032.
4. Ennos A. E. Speckle Interferometry // Progress in Optics. 1978. Vol. 16. P. 235–286.
5. Leendertz J. A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect // Journal of Physics E : Scientific Instruments. 1970. Vol. 3, № 3. P. 214.
6. Stetson K. A. Speckle Metrology // Optical Metrology. 1987. Vol. 131. P. 499–512.
7. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. Cambridge University Press, 1989. 368 p.
8. Stetson K. A. Analysis of double-exposure speckle photography with two-beam illumination // JOSA. 1974. Vol. 64, № 6. P. 857–861.
9. Speckle metrology / ed. R. Erf. Elsevier, 2012. 331 p.
10. Stetson K. A. Problem of defocusing in speckle photography, its connection to hologram interferometry, and its solutions // JOSA. 1976. Vol. 66, № 11. P. 1267–1271.



11. Спектроскопия оптического смещения и корреляция фотонов / под ред. Г. Камминс, Э. Пайк. М. : Мир, 1978. 584 с.
12. Schmitz K. S. An introduction to dynamic light scattering by macromolecules. New York : Academic Press, 1990. 470 p.
13. Maret G., Wolf P. E. Multiple light scattering from disordered media. The effect of Brownian motion of scatterers // *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. 1987. Bd. 65, № 4. S. 409–413.
14. Pine D. J., Weitz D. A., Chaikin P. M., Herbolzheimer E. Diffusing wave spectroscopy // *Phys. Rev. Lett.* 1988. Vol. 60, № 12. P. 1134.
15. Brunel L., Brun A., Snabre P., Cipelletti L. Adaptive Speckle Imaging Interferometry : A new technique for the analysis of micro-structure dynamics, drying processes and coating formation // *Opt. Exp.* 2007. Vol. 15, № 23. P. 15250–15259.
16. Zakharov P., Cardinaux F., Scheffold F. Multispeckle diffusing-wave spectroscopy with a single-mode detection scheme // *Phys. Rev. E*. 2006. Vol. 73, № 1. P. 011413.
17. Кейсесент Д. Оптическая обработка информации. М. : Мир, 1980. 350 с.
18. Салтыков Ю. В., Ульянов С. С., Колосова А. А., Филонова Н. Н., Федорова В. А. Анализ нуклеотидных последовательностей гена GPCR представителей рода сарпирох-вирус с помощью спекл-интерферометрии GB-спеклов и вычитания их изображений // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2020. № 2. С. 1–23.
19. Ulyanov S. S., Zaytsev S. S., Ulianova O. V., Saltykov Y. V., Feodorova V. A. Using of methods of speckle optics for Chlamydia trachomatis typing // Saratov Fall Meeting 2016 : Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVIII. 2017. Vol. 10336. P. 103360D.
20. Ulyanov S. S., Ulianova O. V., Zaytsev S. S., Saltykov Y. V., Feodorova V. A. Statistics on gene-based laser speckles with a small number of scatterers : Implications for the detection of polymorphism in the Chlamydia trachomatis omp1 gene // *Las. Phys. Lett.* 2018. Vol. 15, № 4. P. 045601.
21. Zimnyakov D. A., Oh J. T., Sinichkin Y. P., Trifonov V. A., Gurianov E. V. Polarization-sensitive speckle spectroscopy of scattering media beyond the diffusion limit // *JOSA A*. 2004. Vol. 21, № 1. P. 59–70.
22. Венцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М. : КНОРУС, 2018. 448 с.
- Explicit Investigation and Extension to New Cases. *Appl. Opt.*, 1979, vol. 18, pp. 2022–2032.
4. Ennos A. E. Speckle Interferometry. *Progr. in Opt.*, 1978, vol. 16, pp. 235–286.
5. Leendertz J. A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect. *J. of Phys. E : Scientific Inst.*, 1970, vol. 3, no. 3, pp. 214.
6. Stetson K. A. Speckle Metrology. *Opt. Metrol.*, 1987, vol. 131, pp. 499–512.
7. Jones R., Wykes C. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press, 1989. 368 p.
8. Stetson K. A. Analysis of double-exposure speckle photography with two-beam illumination. *JOSA*, 1974, vol. 64, no. 6, pp. 857–861.
9. Erf R. (ed.). *Speckle Metrology*. Elsevier, 2012. 331 p.
10. Stetson K. A. Problem of defocusing in speckle photography, its connection to hologram interferometry, and its solutions. *JOSA*, 1976, vol. 66, no. 11, pp. 1267–1271.
11. Kammins G., Paik E. (eds.). *Spektroskopiia opticheskogo smesheniia i korreliatsiia fotonov* [Optical Mixing Spectroscopy and Photon Correlation]. Moscow, Mir Publ., 1978. 584 p. (in Russian).
12. Schmitz K. S. *An introduction to dynamic light scattering by macromolecules*. New York, Academic Press, 1990. 470 p.
13. Maret G., Wolf P. E. Multiple light scattering from disordered media. The effect of Brownian motion of scatterers. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 1987, Bd. 65, no. 4, S. 409–413.
14. Pine D. J., Weitz D. A., Chaikin P. M., Herbolzheimer E. Diffusing wave spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, vol. 60, no. 12, pp. 1134.
15. Brunel L., Brun A., Snabre P., Cipelletti L. Adaptive Speckle Imaging Interferometry : A new technique for the analysis of micro-structure dynamics, drying processes and coating formation. *Opt. Exp.*, 2007, vol. 15, no. 23, pp. 15250–15259.
16. Zakharov P., Cardinaux F., Scheffold F. Multispeckle diffusing-wave spectroscopy with a single-mode detection scheme. *Phys. Rev. E*, 2006, vol. 73, no. 1, pp. 011413.
17. Keisesent D. *Opticheskaiia obrabotka informatsii* [Optical Information Processing]. Moscow, Mir Publ., 1980. 350 p. (in Russian).
18. Saltykov Y. V., Ulyanov S. S., Kolosova A. A., Filonova N. N., Fedorova V. A. Analysis of nucleotide sequences of the gene GPCR of the genus capripoxvirus representatives using speckle interferometry of GB speckles and subtracting their images. *Matematicheskoe modelirovanie, komp'uternyi i naturnyi eksperiment v estestvennykh naukakh* [Mathematical Modeling, Computer and Field Experiments in the Natural Sciences], 2020, no. 2, pp. 1–23 (in Russian).
19. Ulyanov S. S., Zaytsev S. S., Ulianova O. V., Saltykov Y. V., Feodorova V. A. Using of methods of speckle optics for Chlamydia trachomatis typing. *Saratov Fall Meeting 2016 : Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVIII*, 2017, vol. 10336, pp. 103360D.
20. Ulyanov S. S., Ulianova O. V., Zaytsev S. S., Saltykov Y. V., Feodorova V. A. Statistics on gene-

References

1. Goodman J. W. *Statistical Optics*. John Wiley & Sons, 2015. 528 p.
2. Franson M. *Optika speklov* [Speckle Optics]. Moscow, Mir Publ., 1980. 171 p. (in Russian).
3. Jacquot P., Rastogi P. K. Speckle Motions Induced by Rigid-Body Movements in Free Space Geometry : An



based laser speckles with a small number of scatterers : Implications for the detection of polymorphism in the Chlamydia trachomatis omp1 gene. *Las. Phys. Lett.*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 045601.

21. Zimnyakov D. A., Oh J. T., Sinichkin Y. P., Trifonov V. A., Gurianov E. V. Polarization-sensitive

speckle spectroscopy of scattering media beyond the diffusion limit. *JOSA A*, 2004, vol. 21, no. 1, pp. 59–70.

22. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A. *Teoriia sluchainykh protsessov i eja inzhenernye prilozheniia* [Random Process Theory and its Engineering Applications]. Moscow, KNORUS Publ., 2018. 448 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 21.04.2022; одобрена после рецензирования 26.05.2022; принята к публикации 30.05.2022
The article was submitted 21.04.2022; approved after reviewing 26.05.2022; accepted for publication 30.05.2022