

## ОТ ГОЛОГРАФИИ СФОКУСИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ К ОПТИКЕ СПЕКЛОВ

## FROM FOCUSED IMAGE HOLOGRAPHY TO SPECKLE OPTICS

*Статья содержит обзор цикла работ автора в области голографии сфокусированных изображений, оптики спеклов и их многочисленных приложений. С единой точки зрения анализируются и интерпретируются явления, возникающие при суперпозиции спекл-модулированных полей как в интерференционных экспериментах, так и при реализации разнообразных прикладных возможностей.*

*The article contains the revue of author's works on focused image holography, speckle optics and its numerous applications. The phenomena appearing in the case of speckle-modulated fields superposition are analyzing and interpreting from common point of view as in interference experiments, as well as in the realization of various applications.*

**Ключевые слова:** голограмма, спекл-поле, сфокусированное изображение, интерференция.

**Keywords:** hologram, speckle-field, focused image, interference.

### Введение

Открытый Д. Габором (D. Gabor) в 1947 году принцип голографии [1] вплоть до начала 60-х годов прошлого века был известен лишь узкому кругу специалистов. Только в 1962 году Ю.Н. Денисюк, по сути, обобщил принцип голографии как явление отображения оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения [2]. Демонстрация Э. Лейтом (E. Leith) и Дж. Упатниексом (J. Upatnieks) в 1963 году истинно объемных изображений, воспроизводимых лазерными голограммами с внеосевой опорной волной [3], произвела яркое впечатление на научное сообщество.

Вскоре уже несколько исследовательских групп в разных странах приступили к систематическим исследованиям в области лазерной голографии. Следует отметить, что даже классическая схема голографии Габора, в которой функцию опорной волны выполняет нерассеянная составляющая освещающего пучка, при использовании лазерного излучения [4] позволяет почувствовать замечательный эффект

реконструкции исходного изображения из, казалось бы, совершенно хаотичной дифракционной структуры, зафиксированной квадратичным приемником.

Целенаправленные исследования в области голографии в нашей стране начались уже в 1964 году и сразу же, наряду с физическими исследованиями явления, получили развитие прикладные направления голографии. Действительно, новые возможности наметились в целом ряде научно-технических областей. Так, в первых работах по голографии, опубликованных в 1965–1967 годах, рассматривались такие направления ее применения, как хранение, обработка и передача информации [5–9]. Вскоре были проведены первые исследования по применению голографии в задачах метрологии и дефектоскопии [10–13], распознавания образов [19] и акустической голографии [20].

### Голография сфокусированных изображений

В ходе этих исследований был обнаружен эффект восстановления в белом (полихроматическом) свете голографических интерферограмм прозрачных объектов [10]. Осмысление этого эффекта позволило выдвинуть гипотезу относи-

<sup>1</sup> Доктор физико-математических наук, профессор АНО ВО «Российский новый университет».

тельно возможных свойств голограмм, регистрируемых в плоскости изображения оптической системы. Это был несколько неожиданный поворот в развитии голографии, которая изначально рассматривалась исключительно как безлинзовый принцип формирования изображений. Тем самым зародилось направление исследований, оформившееся в дальнейшем как голография сфокусированных изображений. Обзор работ, выполненных на начальном этапе этих исследований [30], был опубликован нами в журнале «Успехи физических наук» в 1973 году. В этом обзоре было обобщено, в частности, содержание серии наших оригинальных статей [14–18, 22–29], опубликованных в ведущих физических журналах в период с 1969 по 1972 год. В одной из этих работ [16] нами был обнаружен эффект формирования голограммами сфокусированных изображений, полученными с наклонным опорным пучком в диффузно рассеянном излучении, осевых изображений, обладавших рядом любопытных свойств. Природа таких изображений затем была подробно исследована и объяснена в работах [31; 32; 34; 36].

Выяснилось, что свойства таких голограмм обусловлены наличием в их структуре результата интерференции множества компонентов диффузно рассеянного когерентного излучения, известного к этому времени как источник неустранимого шума в восстановленных изображениях и получившего название спекл-шума (от английского speckle – зерно; пятно).

Проблема подавления спекл-шума исследовалась всесторонне, и результат этих исследований был однозначным: спекл-шум не проявляется исключительно в некогерентном излучении. Однако, как выяснилось, хаотичная внешне структура спекл-поля способна нести существенную информацию об исследуемых объектах, их разнообразных смещениях и деформациях. Именно зарегистрированный приемником результат интерференции спекл-полей представляет собой пространственную структуру (несущую), необходимую для формирования изображений, обнаруженных в [16; 31] и составляющих физический механизм спекл-интерферометрии.

Методы голографии сфокусированных изображений получили распространение благодаря возможности реализации процессов регистрации и воспроизведения оптической информации при выполнении существенно менее жестких требований к условиям протекания этих процессов. Принципиальное изменение схемы регистрации голограмм, с одной стороны, привело к ограничению глубины восстанавливаемого изо-

бражения, но с другой – позволило значительно ослабить традиционные требования к когерентности источников излучения, механической стабильности установки, режимам регистрации и воспроизведения изображений. Речь идет о значительном расширении спектра пространственных и временных частот излучения, а именно о возможности использования полихроматических восстанавливающих источников [14–17], диффузно рассеянных протяженных опорных источников [18; 22; 24; 32; 34], а также многомодового лазерного излучения на обоих этапах голографического процесса [23; 26; 40, 41; 45].

Важным следствием применимости опорных волн произвольной формы, в том числе диффузно рассеянных [35; 37; 39] и, в частности, сформированных из рассеянного объектом излучения, оказалась возможность своеобразного вырождения опорной волны, т.е. регистрация в диффузно рассеянном когерентном излучении сфокусированных изображений без специально формируемого опорного пучка. Возникающая при этом спекл-структура обладает любопытным свойством сохранять фазовую информацию, позволяющую воспроизводить вместе с изображением объекта его пространственный спектр.

Именно это свойство спеклограммы сфокусированного изображения лежит в основе получивших в дальнейшем широкое распространение методов спекл-интерферометрии.

По мере выявления и всестороннего изучения свойств голограмм сфокусированных изображений исследования в этой области перешли в прикладную область. Обобщая основные практические достоинства голографии сфокусированных изображений, открывших ряд новых возможностей, недоступных для традиционной голографии, сформулируем их в виде следующих положений.

Для источников излучения (лазеров), используемых на этапе регистрации голографической информации, допускается:

- генерация произвольного набора поперечных мод, когда различные участки волнового фронта пространственно некогерентны;
- незначительная длина временной когерентности, обусловленная генерацией произвольного набора продольных мод.

В результате обеспечивается заметный (в 3–5 раз для непрерывных газовых лазеров и на порядок для импульсных) энергетический выигрыш; становится возможным использование для получения голограмм практически любого лазера, а процесс регистрации оказывается нечувствительным к изменению режима генерации.

Для регистрирующей среды (материала) допускается:

- произвольный режим экспозиции и последующей обработки, не ограниченный требованием линейной регистрации, в частности – переэкспонирование и быстрая обработка снимка.

В результате обеспечивается значительное (в среднем на порядок) сокращение времени экспозиции, достигается максимальная дифракционная эффективность и одновременно устраняются основные нелинейные искажения.

Для условий регистрации допускается:

- запись голограмм при наличии вибраций и смещений, характерных для обычной фотографии, т.е. на два порядка превышающих допустимые для обычной голографии;

- использование в качестве источника опорной волны произвольного объекта или произвольной части исследуемого объекта без необходимости какой-либо компенсации их протяженности;

- регистрация голограмм с увеличением или уменьшением, в том числе удаленных, крупногабаритных и слабо рассеивающих объектов.

В результате значительно облегчается голографическая установка (допускается применение обычных лабораторных стенов), существенно расширяется класс доступных для исследования объектов, достигается возможность управления чувствительностью и разрешением при выполнении интерференционных измерений.

Для источников излучения, используемых для восстановления изображений, допускается:

- произвольный спектральный состав, чтобы обеспечить практически полное отсутствие когерентности излучения;

- произвольные размеры и форма источника излучения.

В результате оказалось возможным отказаться от использования лазерного излучения на этапе восстановления и, следовательно, обеспечить простоту и удобство анализа голографических изображений и интерферограмм, высокое их качество в связи с подавлением спекл-шума, биологическую безопасность наблюдателя (оператора), наконец – существенный энергетический и экономический выигрыш.

Следует, однако, иметь в виду, что методам голографии сфокусированных изображений присущи вполне очевидные ограничения, по сути, вытекающие из указанных достоинств. Поэтому выбор таких методов в качестве основы той или иной исследовательской программы зависит от специфики тех задач, которые планируется решать в рамках конкретной программы.

### Феномен спекл-поля

Практическое использование лазерного излучения сопровождается образованием световых полей, обладающих сложной пространственной структурой случайного характера. Такие поля, получившие название спекл-полей, естественным образом возникают при рассеянии когерентного лазерного излучения любыми шероховатыми или существенно неровными поверхностями, а также объектами с нерегулярным амплитудным или фазовым профилем. Другими словами, только зеркальное отражение и пропускание лазерного излучения сквозь однородно прозрачные для него объекты не сопровождается образованием спекл-полей.

Случайная пространственная модуляция амплитуды и фазы спекл-полей есть результат когерентного сложения независимых вкладов от различных локальных участков (точек) рассеивающей поверхности или объема, освещенных частично когерентным излучением. При этом для объектов любой формы эти вклады имеют случайные значения фазы, различные для разных точек объема спекл-поля.

Спекл-поля неизбежным образом возникают при решении практических задач когерентной, нелинейной и атмосферной оптики, голографии и обращения волнового фронта, голографической и спекл-интерферометрии, применения многомодовых волоконно-оптических систем. При этом они порождают характерную зернистую структуру, которая, накладываясь на получаемые изображения, становится источником нежелательного шумового фона, именуемого спекл-шумом. Проблема подавления спекл-шума составляет одну из практических проблем когерентной оптики.

Однако, с другой стороны, в спекл-интерферометрии, ставшей широко распространенным и весьма эффективным методом оптических измерений, спекл-поле целенаправленно используется в качестве носителя информации о смещении и/или формоизменении исследуемого объекта.

Интерес к исследованию природы спекл-полей обусловлен двумя обстоятельствами. С одной стороны, потребностями практики, поскольку интерференция спекл-полей представляет собой физический механизм голографической и спекл-интерферометрии. К тому же, во многих практических задачах современной оптики буквально на каждом шагу имеет место суперпозиция спекл-поля либо с гладким полем, либо с другим спекл-полем. С другой стороны, своеобразии корреляционных свойств спекл-полей

обуславливает проявление при их суперпозиции многих специфических интерференционных эффектов, что приводит к целесообразности рассмотрения интерференции спекл-полей в качестве полноценного самостоятельного раздела теории частичной когерентности.

После появления первых работ в области прикладной спекл-интерферометрии основное внимание исследователей и инженеров оказалось направленным в область разнообразных практических применений метода, во многом благодаря простоте и удобству его реализации, особо отмеченным в нашей монографии [70].

Наши исследования, напротив, были сконцентрированы на выявлении и систематическом изучении физической природы явлений, связанных с интерференцией спекл-полей [42–54, 58]. При этом был обнаружен ряд новых эффектов [61–67; 69; 73; 76–78; 91], в частности обусловленных спецификой распределения фазы в таких полях.

Спекл-поле представляет собой сложное объемное распределение мелкоструктурных неоднородностей – так называемых спеклов, в пределах каждого из которых фаза имеет постоянное значение и меняется случайным образом при переходе от одного спекла к другому. Поскольку комплексная амплитуда в каждом спекле является суммой множества малых независимых вкладов от разных точек рассеивающего объекта, то к результирующему спекл-полю применима центральная предельная теорема теории вероятностей. Согласно этой теореме комплексная амплитуда результирующего спекл-поля подчиняется гауссовой статистике.

Отсюда, глубина случайной пространственной модуляции амплитуды спекл-поля может достигать нуля, а флуктуации интенсивности имеют тот же порядок, что и среднее значение интенсивности. Это означает, что контраст зарегистрированной спекл-структуры, определяемый как отношение стандартного отклонения интенсивности к ее среднему значению, равен единице.

Характерные размеры пространственных неоднородностей спекл-поля или, как их принято называть, характерные размеры спеклов, определяются нерегулярной расходимостью рассеянного пучка или шириной его углового спектра  $\Delta\theta$ . Поперечный размер спеклов обычно определяют соотношением  $\sigma_{\perp} \approx \lambda/\Delta\theta$ , продольный – соотношением  $\sigma_{\parallel} \approx \lambda/\Delta\theta^2$  ( $\lambda$  – длина волны). Таким образом, при объемном рассмотрении спекл-поле представляет собой совокупность вытянутых вдоль продольной оси неоднородностей, в пре-

делах которых фазу можно считать постоянной. Это означает, что характерный размер неоднородностей спекл-поля можно рассматривать как область его пространственной корреляции [42; 70].

Спекл-поля, возникающие при рассеянии когерентного лазерного излучения, сами также обладают высокой степенью временной и пространственной когерентности. В этом можно убедиться, рассматривая область суперпозиции двух спекл-полей (двух реализаций спекл-поля от одного лазерного источника), имеющих детерминированный (например, линейный) относительный фазовый сдвиг. Для этого, в частности, спекл-поля могут быть направлены в область суперпозиции под углом друг к другу. Пусть пространственная скорость изменения фазы достаточно велика, чтобы в пределах одного спекла укладывалось несколько периодов регулярной фазовой модуляции. Тогда суперпозиционное спекл-поле будет модулировано высококонтрастной интерференционной картиной во всех случаях, когда оптическая разность хода между спекл-полями не превышает длины когерентности лазерного источника. При этом контраст (видность) регулярной интерференционной картины не будет зависеть от смены реализаций спекл-поля. В частности, он не меняется при суперпозиции различных участков одного и того же спекл-поля, обеспечиваемой его делением по волновому фронту (например, по схеме интерферометра Юнга).

Существенным в таком интерференционном эксперименте является то, что фаза регулярной интерференционной картины, будучи постоянной в пределах каждого спекла, испытывает случайный скачок при переходе от одного спекла к другому – как в поперечных, так и в продольных сечениях суперпозиционного спекл-поля. Нетрудно убедиться, что аналогичный результат будет наблюдаться также при суперпозиции спекл-поля с гладким полем, когда случайное распределение фазы в спекл-поле обуславливает случайные скачки фазы интерференционной картины.

Очевидно, что при сравнительно медленном изменении относительно фазового сдвига двух неидентичных спекл-полей [58; 70] или спекл-поля и гладкого поля, когда период регулярной фазовой модуляции превышает характерный размер спеклов, случайные скачки фазы между фрагментами интерференционной картины с неизбежностью приводят к ее «разрушению».

Иными словами, в результате такой интерференции происходит лишь перераспределение

интенсивности в спекл-поле, но регулярной интерференционной картины не наблюдается.

Особая ситуация имеет место в единственном случае, когда обеспечивается суперпозиция двух спекл-полей, являющихся одной и той же реализацией спекл-поля (идентичных спекл-полей). При этом они должны быть совмещены таким образом, чтобы в некоторой пространственной области идентичные спеклы перекрывались. Речь, таким образом, идет о суперпозиции идентичных спекл-полей, взаимное смещение которых как в поперечном, так и в продольном направлениях не превышает соответствующих размеров автокорреляционной функции этой реализации спекл-поля.

О редкости, почти уникальности, такой ситуации свидетельствует тот факт, что при взаимном смещении, превышающем объем области автокорреляции, идентичные спекл-поля теряют взаимную корреляцию и ведут себя при интерференции совершенно так же, как различные реализации спекл-полей.

Однако именно эта редкая ситуация имеет большое практическое значение, ибо на ее реализации базируется вся совокупность методов голографической и спекл-интерферометрии.

Принципиальная особенность интерференции идентичных спекл-полей, как уже отмечалось, состоит в том, что фаза регулярной интерференционной картины остается постоянной в любом сечении суперпозиционного спекл-поля в пределах области наложения идентичных спеклов. Очевидно, что при этом возможность наблюдения регулярной интерференционной картины не зависит от соотношения характерного размера спеклов и периода регулярной модуляции.

Поэтому именно в этом, и только в этом случае может наблюдаться «низкочастотная» интерферограмма с периодом, большим, чем характерный поперечный размер спеклов. Получение такой интерферограммы и является задачей голографической и спекл-интерферометрии.

Итак, существуют три основные разновидности интерференции с участием спекл-полей:

- 1) спекл-поле с гладким полем;
- 2) некоррелированные (неидентичные) спекл-поля;
- 3) коррелированные (идентичные) спекл-поля.

Все эти ситуации достаточно часто реализуются на практике. Так, интерференция спекл-поля с гладким полем типична для регистрации голограмм диффузно рассеивающих или диффузно подсвечиваемых объектов [56; 59–60]. Ин-

терференция некоррелированных спекл-полей имеет место при голографической регистрации объектов с использованием пространственно модулированных опорных волн [18; 24; 81; 92]. Наконец, явление интерференции коррелированных (идентичных) спекл-полей составляет физическую основу голографической и спекл-интерферометрии.

### **Интерференция спекл-полей и тонкая структура спеклов**

Со временем физическая общность голографической и спекл-интерферометрии, на которую мы указывали в работах [56; 60; 62; 80], стала очевидной. Они представляют собой два родственные средства обеспечения интерференции идентичных спекл-полей. В обоих случаях сигналом измерительной информации является модулированная спеклами низкочастотная интерферограмма, формируемая в области суперпозиции, как правило, двух идентичных спекл-полей в условиях, когда период этой интерферограммы превышает характерный размер спеклов.

Здесь необходимо подчеркнуть, что при получении и интерпретации таких интерферограмм важную роль играет учет закономерностей локализации интерференционных полос. Эффект локализации полос непосредственно связан с величиной объема когерентности и состоит в образовании в зоне суперпозиции ограниченной области, в которой видимость интерференционных полос имеет максимальную величину. Это явление хорошо известно в классической интерферометрии с протяженными тепловыми источниками, дающими излучение с существенно ограниченной пространственной когерентностью.

При использовании лазерного излучения в случае суперпозиции гладких пучков область локализации полос, как правило, занимает всю зону суперпозиции и ограничивается только длиной когерентности источника. Что же касается методов голографической и спекл-интерферометрии, в которых обеспечивается суперпозиция идентичных спекл-полей, имеющих ограниченную область пространственной корреляции, то для них явление локализации полос столь же типично, как и для интерферометрии с протяженными тепловыми источниками. Однако следует отметить, что при исследовании явления локализации полос в случае интерференции спекл-полей характерный для классической интерферометрии подход, основанный на геометрической теории локализации, не дает достаточно полного и физически адекватного описания распределения видности интерференционных полос.

Поэтому в наших работах существенное внимание уделялось новому подходу к объяснению закономерностей локализации и распределения видности интерференционных полос при суперпозиции спекл-полей, основанному на выявлении роли спеклов как областей корреляции полей – их размеров, формы и тонкой структуры.

В рамках выполнения нашей исследовательской программы был обнаружен ряд ранее неизвестных эффектов, обусловленных тонкой структурой спекл-полей, которая не проявляется при непосредственном наблюдении. Практическое использование этих эффектов позволило не только разработать оригинальные методы оптических измерений [79–80; 84–85], но и развить новое направление оптической обработки информации – вычитание изображений [55; 62; 66; 75]. Приоритет новых прикладных направлений применения голографии сфокусированных изображений и методов оптики спеклов отражен серией изобретений [22; 33; 44; 49; 51; 53; 57; 63; 65; 68; 71; 74; 82–83; 86; 88–90; 94; 97; 102].

В первом приближении спекл-поле можно считать сложной интерференционной структурой с нерегулярным распределением амплитуды и фазы, обусловленным случайно изменяющейся разностью фаз между когерентно взаимодействующими составляющими поля. При этом элементы спекл-структуры выглядят как пятна с однородным распределением амплитуды, в пределах каждого из которых фаза имеет детерминированное значение. Между тем, дифракционное изображение точечного когерентного источника обладает, как известно, тонкой структурой, обусловленной наличием вторичных максимумов амплитуды и изменением знака фазы при переходе от одного такого максимума к другому.

В экспериментах, направленных на обнаружение тонкой поперечной структуры спеклов [61; 64; 67; 73], использовались наблюдательные системы с входными зрачками различной формы и размера. Как и ожидалось, увеличение относительного размера апертуры приводило к уменьшению области, в которой контраст голографических и спекл-интерферограмм вращательного сдвига был близок к единице. Однако кроме того вполне отчетливо наблюдались осцилляции видности интерференционных полос по мере удаления от центра вращения. Естественно, при использовании круглой апертуры видность во вторичных максимумах была существенно меньше, чем в главном. При этом наблюдался поперечный сдвиг полос на половину периода при переходе от одного максимума к соседнему, что соответствует изменению знака фазы.

Отметим, что на наличие таких осцилляций видности обращали внимание некоторые авторы. Однако природа явления оставалась невыясненной. Дело в том, что при использовании круглой апертуры не удастся обнаружить более одного вторичного максимума функции Бесселя первого рода первого порядка в силу существенного падения видности в последующих вторичных максимумах осциллирующей интерферограммы.

Между тем, гипотезу относительно природы этого эффекта удалось убедительно подтвердить, используя апертуры более сложной формы, формирующие существенно более интенсивные вторичные максимумы. В частности, в работах [61; 64; 67; 104] мы использовали кольцевые и двухщелевые апертуры, что позволило не только продемонстрировать многочисленные вторичные максимумы, но и с высокой точностью измерить распределение видности в них. Результаты измерений показали хорошее согласие с теоретическими и расчетными данными.

Детальное исследование явлений осцилляции видности и локализации интерференционных полос в суперпозиционных спекл-полях, в том числе при использовании протяженного восстанавливающего источника, было выполнено нами в работах [67; 76; 78; 109–113]. Было показано, что для наблюдения интерферограммы необходимо, чтобы величина взаимного смещения спеклов при их регистрации не разрешалась наблюдательной оптической системой и не превышала объема пространственной когерентности излучения, используемого для получения как голографических, так и спекл-интерферограмм. Оказалось, что область локализации полос, как правило, находится вне плоскости спеклограммы.

Интереснейшим следствием существования тонкой структуры спеклов стало обнаружение эффекта ветвления интерференционных полос в области их локализации [69; 76; 91; 111–113]. При этом удалось установить связь между точками ветвления и нулями амплитуды комплексной функции видности, позволяющую определять пространственное расположение таких точек и степень их локализации. Следует отметить, что эффект ветвления интерференционных полос наблюдается как в поперечном, так и в продольном сечениях суперпозиционных спекл-полей. Ветвящиеся интерференционные полосы можно наблюдать при различных видах взаимного смещения идентичных спекл-полей, обеспечиваемого средствами голографической и спекл-интерферометрии, а также при суперпозиции неидентичных спекл-полей [81; 93; 99; 112].

Как выяснилось [81; 92; 109], при использовании пространственно модулированных опорных волн в голографической интерферометрии наличие в спекл-полях точек с нулевой интенсивностью (так называемых дислокаций спекл-поля) обуславливает искажение микроструктуры восстановленного спекл-поля даже при использовании восстанавливающей волны, идентичной опорной. В результате имеет место декорреляция интерферирующих спекл-полей, вызывающая падение видности интерферограмм.

К не менее интересным результатам привело исследование продольной тонкой структуры спеклов. Оказалось [77; 87], что при регистрации спеклограмм в фурье-плоскости продольное поступательное смещение объекта приводит только к радиальному смещению спеклов, что обеспечивает выполнение условия идентичности регистрируемых спекл-полей. В результате в поле, рассеянном такой спеклограммой, имеет место суперпозиция идентичных вторичных спеклов, и получаемые спекл-интерферограммы имеют в продольном сечении форму параболоидов вращения, обладая при этом высоким контрастом [77].

Однако наибольший интерес в этой части исследований представляет подтверждение гипотезы о наличии у спекл-полей продольной тонкой структуры. Впервые проявление такой структуры было целенаправленно обнаружено в работе [101] и исследовано в [104]. Действительно, продольная автокорреляционная функция спекл-поля характеризуется наличием вторичных максимумов, относительная величина которых определяется параметрами апертуры, формирующей структуру спекл-поля.

Продольное смещение диффузно рассеивающего объекта приводит к дополнительному радиально-симметричному поперечному смещению спеклов, или, что то же самое, к смещению максимума кросс-корреляционной функции, а также к изменению ее характерного вида по отношению к виду автокорреляционной функции. Величина этого смещения линейно нарастает к периферии спеклограммы, что и определяет указанное изменение. Поэтому по мере увеличения продольного взаимного смещения спекл-полей функция кросс-корреляции вначале ожидаемо уменьшается, но затем следует ее существенный рост, поскольку себя проявляют вторичные максимумы продольно сдвинутого спекл-поля.

Эксперименты по получению спекл-интерферограмм продольного смещения с объемной регистрацией спекл-полей [87] полностью подтвердили характер пространственной ориентации спеклов в объеме спекл-поля.

Обстоятельное исследование продольной тонкой структуры спеклов [104] подтвердило, что при интерференции продольно идентичных смещенных спекл-полей наблюдаются периодические изменения положения и величины максимумов кросс-корреляционной функции, обусловленные наличием вторичных максимумов продольной функции автокорреляции. В результате закономерным образом, в зависимости от величины взаимного смещения спекл-полей, изменяется видность спекл-интерферограмм, причем при определенных значениях величины этого смещения, вследствие пространственного наложения различных максимумов тонкой структуры идентичных спеклов, наблюдаются характерные сдвиги фазы видности интерференционных полос.

Следует отметить, что исследование фазовых характеристик спекл-полей имеет весьма важное значение, поскольку, оставаясь скрытыми при непосредственном наблюдении как самих спекл-полей, так и результатов их интерференции, они самым существенным образом влияют на результат наблюдения. Вопреки принятому в свое время представлению о том, что фаза развитого спекл-поля есть случайная величина, равномерно распределенная в интервале своих значений по пространству такого поля, нами было показано [110; 114–115], что для симметричных источников спекл-полей разность фаз в соседних спеклах имеет отчетливо неравномерную плотность вероятности.

В целом цикл работ по исследованию тонкой структуры спекл-полей способствовал формированию физической базы спекл-интерферометрии, о чем свидетельствуют, в частности, неоднократные ссылки современных авторов на нашу монографию [70] 1985 года.

В заключение подчеркнем, что в силу широкого применения лазеров в самых разнообразных областях науки, техники и технологий широкий круг специалистов будет неизменно сталкиваться с проявлением спекл-эффекта. Поэтому можно полагать, что результаты цикла исследований, краткий обзор которых представлен выше, будет сохранять свою актуальность и в современных условиях.

### Литература

1. Gabor, D. Microscopy by reconstructed wavefronts // Proc. Roy. Soc. – 1949. – V. A197. – P. 454.
2. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // ДАН СССР. – 1962. – Т. 144. – С. 1275.

3. Leith, E.N., Upatnieks, J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects // Opt. Soc. Am. – 1964. – V. 54. – P. 1295.

4. Клименко И.С., Рукман Г.И. Габоровское восстановление волнового фронта с помощью лазера // Оптика и спектроскопия. – 1966. – Т. 21. – Вып. 6. – С. 751–752.

5. Клименко И.С., Рукман Г.И. Получение голографических изображений с помощью лазера и телевизионной системы // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 8. – С. 182–183.

6. Клименко И.С., Рукман Г.И. Физические предпосылки использования ОКГ в системах хранения и выборки информации, основанных на принципах лазерной голографии // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 10. – С. 95–102.

7. Клименко И.С., Рукман Г.И. О надежности хранения информации в оптической памяти на основе лазерной голографии // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1966. – Вып. 12. – С. 93–97.

8. Клименко И.С., Рукман Г.И. К вопросу о восстановлении волнового фронта с помощью голограмм, переданных по телевизионному тракту // ЖТФ. – 1967. – Т. 37. – Вып. 8. – С. 1532–1534.

9. Клименко И.С., Рукман Г.И. К вопросу об интерференционной обработке информации, хранящейся в голографической памяти // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1968. – Вып. 3. – С. 112–120.

10. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Рукман Г.И. О восстановлении в белом свете изображений интерферограмм, формируемых голограммами двойной экспозиции // Письма ЖЭТФ. – 1967. – Т. 6. – Вып. 3. – С. 535–536.

11. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Физические предпосылки применения методов голографии в задачах неразрушающего контроля // Физико-технические методы неразрушающего контроля приборов электронной техники. – М. : Сов. радио, 1969. – С. 36–41.

12. Клименко И.С., Скряцкий Г.В. Голография. Физические принципы и перспективы практического применения // Голография. – М. : МДНТП, 1969. – С. 4–11.

13. Клименко И.С., Власов Н.Г., Телешевский В.И. Применение голографической интерферометрии для контроля качества и геометрических параметров объектов // Голография. – М. : МДНТП, 1969. – С. 24–30.

14. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Налимов И.П. Голографическая регистрация сфоку-

сированных изображений и их восстановление в белом свете // Оптика и спектроскопия. – 1969. – Т. 26. – Вып. 6. – С. 1019–1026.

15. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Восстановление в белом свете интерферограмм диффузно отражающих объектов с помощью голограмм сфокусированных изображений // Оптика и спектроскопия. – 1969. – Т. 27. – Вып. 2. – С. 367–368.

16. Клименко И.С., Матинян Е.Г. О некоторых особенностях голограмм сфокусированных изображений // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 556–560.

17. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Рукман Г.И. Голографическая интерферометрия методом двойной экспозиции с восстановлением в белом свете // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. 29. – Вып. 1. – С. 160–166.

18. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Об использовании опорной волны произвольной формы при голографировании сфокусированных изображений // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. 29. – Вып. 6. – С. 1132–1137.

19. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Параллельная согласованная фильтрация с помощью оптически совмещенных голограмм Фурье // ЖТФ. – 1970. – Т. 40. – Вып. 8. – С. 1753–1755.

20. Клименко И.С., Телешевский В.И. О голографическом методе исследования дифракции света на ультразвуке // Акустический журнал. – 1970. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 613–615.

21. Клименко И.С. Голограммы сфокусированных изображений : материалы I Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1971. – С. 429–435.

22. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Устройство для получения голографических изображений. – Авт. свид. СССР № 364254 от 15.10.1972.

23. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Получение голограмм сфокусированных изображений в многомодовом излучении лазера // Оптика и спектроскопия. – 1971. – Т. 31. – Вып. 3. – С. 471–473.

24. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Голографическая регистрация сфокусированных изображений с использованием в качестве опорной волны части рассеянного объектом излучения // Оптика и спектроскопия. – 1971. – Т. 31. – Вып. 5. – С. 776–778.

25. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Голографическая интерферометрия сфокусированных изображений в реальном масштабе времени // Оптика и спектроскопия. – 1972. – Т. 32. – Вып. 3. – С. 620–622.

26. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Скряцкий Г.В. Голографическая регистрация сфокусированных изображений в многомодовом



излучении лазера // Оптика и спектроскопия. – 1972. – Т. 33. – Вып. 6. – С. 1139–1144.

27. Клименко И.С., Кучерявенко Е.И., Матинян Е.Г. О чувствительности и разрешении в голографической интерферометрии сфокусированных изображений // Оптика и спектроскопия. – 1973. – Т. 34. – Вып. 2. – С. 360–364.

28. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Скроцкий Г.В. Особенности нелинейной регистрации голограмм сфокусированных изображений // Оптика и спектроскопия. – 1973. – Т. 34. – Вып. 4. – С. 819–821.

29. Клименко И.С., Скроцкий Г.В. Голография сфокусированных изображений // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 109. – Вып. 2. – С. 269–292.

30. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Скроцкий Г.В. О природе квазиосевых реконструкций, формируемых «безопорными» голограммами сфокусированных изображений // Доклады Академии наук СССР. – 1973. – Т. 211. – Вып. 3. – С. 571–573.

31. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Голографическая регистрация сфокусированных изображений с использованием опорных волн произвольной формы : материалы IV Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1974. – С. 215–228.

32. Клименко И.С., Кучерявенко Е.И., Скроцкий Г.В. О глубине сцены, воспроизводимой голограммами сфокусированных изображений // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – Вып. 5. – С. 1222–1225.

33. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Способ получения голографических изображений. – Авт. свид. СССР № 433869 от 28.02.1974.

34. Клименко И.С., Матинян Е.Г. Получение голографических интерферограмм сфокусированных изображений с локальным опорным пучком // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – Вып. 9. – С. 2094–2096.

35. Клименко И.С., Матинян Е.Г. О нелинейной регистрации голограмм сфокусированных изображений // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – Вып. 9. – С. 2096–2098.

36. Клименко И.С., Скроцкий Г.В. Сфокусированные голограммы интенсивности без опорного пучка : материалы VI Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1974. – С. 355–368.

37. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Дубицкий Л.Г. Применение метода голографии сфокусированных изображений для неразрушающего контроля изделий электронной техники // Дефектоскопия. – 1974. – Вып. 6. – С. 86–91.

38. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Дубицкий Л.Г. Применение голографических мето-

дов для контроля интегральных микросхем // Электронная техника. Серия 8. Управление качеством и стандартизация. – 1974. – Вып. 12 (30). – С. 115–117.

39. Аристов В.В., Иванова Г.А., Клименко И.С., Матинян Е.Г. Голографическая регистрация без опорного пучка предметов, смещающихся во время экспозиции // Квантовая электроника. – 1976. – Т. 3. – Вып. 2. – С. 436–438.

40. Клименко И.С. Голография в многомодовом излучении лазера : материалы VIII Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1976. – С. 247–259.

41. Клименко И.С., Матинян Е.Г., Скроцкий Г.В. О дифракционной эффективности голограмм сфокусированных изображений, получаемых в многомодовом излучении лазера // Квантовая электроника. – 1977. – Т. 4. – Вып. 1. – С. 162–163.

42. Клименко И.С. Принципы спекл-интерферометрии : материалы IX Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1977. – С. 241–255.

43. Волков И.В., Клименко И.С. О некоторых особенностях получения и интерпретации спекл-интерферограмм деформируемых объектов // ЖТФ. – 1980. – Т. 50. – Вып. 6. – С. 1038–1043.

44. Клименко И.С., Шихалев Э.Г. Способ записи и воспроизведения информации в виде печатных документов. – Авт. свид. СССР № 812059 от 06.11.1980.

45. Клименко И.С. Об особенностях регистрации спекл-голограмм в многомодовом излучении лазера // Оптика и спектроскопия. – 1981. – Т. 50. – Вып. 5. – С. 934–940.

46. Клименко И.С., Кварацхелия Т.Г., Волков И.В., Голикова Н.А. К интерпретации спекл-интерферограмм смещаемых и деформируемых объектов // ЖТФ. – 1981. – Т. 51. – Вып. 10. – С. 2080–2085.

47. Клименко И.С., Шушлебина Н.И., Шихалев Э.Г. Запись и особенности восстановления картографической информации со сфокусированных спекл-голограмм : материалы XIII Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1981. – С. 156–161.

48. Клименко И.С., Малов С.Н. К проблеме подавления спекл-шума в голографических изображениях // Оптика и спектроскопия. – 1982. – Т. 52. – Вып. 4. – С. 745–746.

49. Волков И.В., Клименко И.С. Устройство для интерферометрического измерения деформаций объектов. – Авт. свид. СССР № 934215 от 09.02.1982.

50. Клименко И.С., Рябухо В.П. Об особенностях получения и интерпретации спекл-интерферограмм смещаемых объектов // ЖТФ. – 1982. – Т. 52. – Вып. 5. – С. 896–900.
51. Клименко И.С., Рассоха А.А., Капустин А.А., Мажура С.О., Каледин В.О. Способ измерения перемещений и деформаций объектов. – Авт. свид. СССР № 938003 от 23.02.1982.
52. Клименко И.С., Шушлебина Н.И., Шихалев Э.Г. Об изображающих свойствах сфокусированных спекл-голограмм // Оптика и спектроскопия. – 1983. – Т. 54. – Вып. 2. – С. 324–327.
53. Клименко И.С., Шушлебина Н.И., Шихалев Э.Г. Способ записи и воспроизведения информации в виде печатных документов. – Авт. свид. № 961471 от 21.05.1982.
54. Клименко И.С., Малов С.Н. О возможности реализации одноступенчатого метода записи информации на основе регистрации сфокусированных спекл-голограмм // Оптика и спектроскопия. – 1983. – Т. 54. – Вып. 4. – С. 711–717.
55. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В., Лохова Н.В. Голографический метод вычитания изображений с помощью пространственной фильтрации // ЖТФ. – 1983. – Т. 53. – Вып. 5. – С. 888–891.
56. Клименко И.С., Рябухо В.П. Пространственная фильтрация в голографической интерферометрии // Вопросы прикладной голографии : материалы XIV Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1983. – С. 62–80.
57. Клименко И.С., Рябухо В.П., Малов С.Н. Голографический метод вычитания изображений. – Авт. свид. СССР № 1056127 от 22.07.1983. Оpubл. : БИ. – № 43, 1983.
58. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М. : Московский физико-технический институт, 1982.
59. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. О разделении информации относительно различных видов перемещения в голографической интерферометрии на основе пространственной фильтрации // Оптика и спектроскопия. – 1983. – Т. 55. – Вып. 1. – С. 140–147.
60. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В., Лохова Н.В. Об особенностях голографических и спекл-интерферограмм, получаемых при регистрации объектного светового поля в фурье-плоскости // Оптика и спектроскопия. – 1983. – Т. 55. – Вып. 3. – С. 483–489.
61. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. Проявление тонкой структуры спекл-полей при их когерентном сложении // Письма ЖТФ. – 1983. – Т. 9. – Вып. 2. – С. 1381–1385.
62. Клименко И.С., Малов С.Н., Рябухо В.П. Голографическое вычитание изображений на основе регистрации в фурье-плоскости и пространственной фильтрации узким пучком // Доклады Академии наук СССР. – 1983. – Т. 272. – Вып. 2. – С. 365–369.
63. Клименко И.С., Малов С.Н., Рябухо В.П. Способ голографического вычитания изображений. – Авт. свид. № 1087953 от 22.12.1983.
64. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. Проявление тонкой структуры спекл-полей при их интерференции // Методы и устройства оптической голографии : материалы XV Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1984. – С. 70–103.
65. Клименко И.С., Малов С.Н., Рябухо В.П., Лосевский Н.Н. Голографический способ вычитания изображений. – Авт. свид. СССР № 1116863 от 01.06.1985.
66. Клименко И.С., Малов С.Н., Рябухо В.П. Голографическое вычитание изображений с регистрацией и пространственной фильтрацией в фурье-плоскости // Физические основы и прикладные вопросы голографии : материалы XVI Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1985. – С. 74–101.
67. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. Роль тонкой структуры спеклов в локализации интерференционных полос, возникающих при суперпозиции спекл-полей // ЖТФ. – 1985. – Т. 55. – Вып. 2. – С. 417–419.
68. Клименко И.С., Малов С.Н. Голографический способ вычитания изображений. – Авт. свид. СССР № 1200229 от 22.08.1985. Оpubл. : БИ. – № 47, 1985.
69. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. Эффект «ветвления» интерференционных полос при суперпозиции идентичных спекл-полей // ЖТФ. – 1985. – Т. 55. – Вып. 5. – С. 980–982.
70. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия : монография. – М. : Наука, 1985. – 224 с.
71. Клименко И.С., Рябухо В.П., Григорян О.Г. Способ изготовления элементов гильберт-оптики. – Авт. свид. СССР № 1217132 от 08.11.1985.
72. Клименко И.С., Рябухо В.П. Применение голографического вычитания изображений на основе пространственной фильтрации для выявления нарушений микрорельефа поверхности // Оптика и спектроскопия. – 1985. – Т. 59. – Вып. 2. – С. 398–401.
73. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. Проявление тонкой амплитудно-фазовой структуры спекл-полей при их когерентной су-

перпозиции // ЖТФ. – 1985. – Т. 55. – Вып. 7. – С. 1338–1342.

74. Клименко И.С., Малов С.Н. Голографический способ сравнения изображений. – Авт. свид. СССР № 1223755 от 08.12.1985.

75. Клименко И.С., Малов С.Н. Голографическое вычитание изображений на основе регистрации и пространственной фильтрации в фурье-плоскости // ЖТФ. – 1985. – Т. 55. – Вып. 7. – С. 1329–1337.

76. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. Локализация интерференционных полос и эффект осцилляции видности в спекл-интерферометрии // ЖТФ. – 1985. – Т. 55. – Вып. 10. – С. 2045–2048.

77. Клименко И.С., Кузнецова Т.В., Малов А.Н. Получение высококонтрастных спекл-интерферограмм продольного смещения при регистрации спекл-поля в фурье-плоскости // ЖТФ. – 1986. – Т. 56. – Вып. 9. – С. 1744–1748.

78. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. Осцилляции видности и локализация интерференционных полос в спекл-интерферометрии // ЖТФ. – 1986. – Т. 56. – Вып. 9. – С. 1749–1756.

79. Клименко И.С., Рябухо В.П., Якунин А.Н. Исследование тепловых смещений электродов электронной пушки методами голографической и спекл-интерферометрии // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 2 (386). – С. 48–52.

80. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. К сравнению чувствительности и точности методов голографической и спекл-интерферометрии при регистрации в фурье-плоскости // Оптика и спектроскопия. – 1986. – Т. 61. – Вып. 5. – С. 1118–1121.

81. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П. О некоторых особенностях интерференции неидентичных спекл-полей // Оптика и спектроскопия. – 1987. – Т. 62. – Вып. 6. – С. 1367–1372.

82. Клименко И.С., Рябухо В.П. Способ изготовления элементов гильберт-оптики. – Авт. свид. СССР № 1362306 от 28.05.1987.

83. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. Интерферометр для измерения пространственной когерентности оптического излучения. – Авт. свид. СССР № 1450551 от 08.09.1988.

84. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рабкин Б.В., Рябухо В.П., Сурменко Л.А. Применение лазерной интерферометрии для контроля технологии изделий электронной техники // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. – 1987. – Вып. 5 (1278). – 56 с.

85. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Серова О.В., Сурменко Л.А. Лазерный спекл-интерферометр для измерения температурных изменений межэлектродных расстояний приборов СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 7 (401). – С. 53–55.

86. Клименко И.С., Кривко Т.В., Рябухо В.П. Способ интерференционного измерения смещений. – Авт. свид. СССР № 1450535 от 10.03.1988.

87. Клименко И.С., Кривко Т.В., Малов А.Н., Рябухо В.П. Спекл-интерферометрия продольного смещения с объемной регистрацией спекл-структур // ЖТФ. – 1988. – Т. 58. – Вып. 1. – С. 182–186.

88. Клименко И.С., Малов С.Н. Голографический способ вычитания изображений объектов. – Авт. свид. СССР № 1374957 от 15.10.1987.

89. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Сурменко Л.А. Интерференционный способ измерения относительных перемещений диффузно отражающих поверхностей и устройство для его осуществления. – Авт. свид. СССР № 1374042 от 15.02.1988. Оpubл. : БИ. – № 6, 1988.

90. Аджалов В.И., Дмитриев С.А., Клименко И.С., Ламекин В.Ф., Сисакян И.Н. Оптический датчик для измерения смещений. – Авт. свид. СССР № 1492216 от 08.03.1989.

91. Клименко И.С., Сатаев И.Р., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. Нули видности и ветвление интерференционных полос при суперпозиции идентичных спекл-полей // ЖТФ. – 1988. – Т. 58. – Вып. 10. – С. 1955–1965.

92. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П. О природе декорреляции спекл-полей в голографической интерферометрии с пространственно-модулированной опорной волной // Оптика и спектроскопия. – 1988. – Т. 65. – Вып. 3. – С. 666–671.

93. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. Локализация и видность полос в голографической и спекл-интерферометрии с протяженным восстанавливающим источником // ЖТФ. – 1988. – Т. 58. – Вып. 10. – С. 1941–1947.

94. Аджалов В.И., Клименко И.С., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соيفер В.А. Способ передачи информации по световодам. – Авт. свид. СССР № 1510688 от 22.05.1987.

95. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Сатаев И.Р., Федулеев Б.В. Эффект ветвления интерференционных полос при суперпозиции идентичных спекл-полей // Голография: теоретические и прикладные вопросы :

материалы XIX Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1988. – С. 42–49.

96. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. Локализация и видность полос в голографической интерферометрии с протяженными опорным и восстанавливающим источниками // Голография: теоретические и прикладные вопросы : материалы XIX Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1988. – С. 80–98.

97. Клименко И.С., Малов С.Н. Голографический способ измерения величины поперечного смещения. – Авт. свид. СССР № 1485869 от 08.02.1989.

98. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П., Сурменко Л.А. Спекл-интерферометр для автоматизированного измерения относительных смещений шероховатых поверхностей // Диагностические применения лазеров и волоконной оптики. – Изд. СГУ, 1989. – С. 8–11.

99. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П. Особенности формирования полос в голографической и спекл-интерферометрии при освещении объекта спекл-модулированным источником // Лазерная интерферометрия. – М. : МФТИ, 1989. – С. 38–45.

100. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В. Локализация интерференционных полос в спекл-интерферометрии // Применение методов и средств голографии : материалы XX Всесоюзной школы по голографии. – Л. : ЛИЯФ, 1989. – С. 75–102.

101. Клименко И.С., Кривко Т.В. Проявление продольной тонкой структуры спекл-поля в интерференционном эксперименте // ЖТФ. – 1990. – Т. 60. – Вып. 9. – С. 162–166.

102. Аджалов В.И., Клименко И.С., Рубцов А.А., Спихальский А.А. Способ преобразования мод излучения в волоконном световоде. – Авт. свид. СССР № 1570632 от 08.02.1990.

103. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П. Статистические свойства пространственного распределения фазы развитого спекл-поля // Письма в ЖТФ. – 1991. – Т. 18. – Вып. 2. – С. 26–28.

104. Клименко И.С., Кривко Т.В., Рябухо В.П. Продольная тонкая структура спеклов и ее роль в интерференции идентичных спекл-полей // ЖТФ. – 1991. – Т. 61. – Вып. 9. – С. 73–81.

105. Ryabukho, V.P., Klimenko, I.S. Comparison of the sensitivity and accuracy of holography and speckle-interferometry with Fourier-plane recording // Selected Papers on “Speckle metrology”. – SPIE Milestone Series. – 1991. – V. MS35. – P. 425–430.

106. Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулев Б.В., Перепелицина О.Л. Спекл-интерферометры на многомодовых оптических волокнах и жгутах с совмещенными идентичными спекл-полями // Лазерная интерферометрия. – М. : МФТИ, 1992. – С. 38–41.

107. Ryabukho, V.P., Klimenko, I.S. Localisation and visibility of interference fringes in speckle-photography // Proc. SPIE: Laser interferometry IV – “Computer Aided Interferometry”. – 1992. – V. 1553. – P. 690–701.

108. Локшин Г.Р., Козел С.М., Клименко И.С., Белонучкин В.Е. Методы модуляции в голографической интерферометрии // Оптика и спектроскопия. – 1992. – Т. 72. – Вып. 6. – С. 1444–1450.

109. Gorbatenko, B.B., Klimenko, I.S., Ryabukho, V.P. Speckle field decorrelation nature in holographic interferometry with spatially modulated reference wave // Proc. SPIE: Selected Papers on “Coherent measurements and data processing methods and devices”. – 1993. – V. 1978. – P. 88–96.

110. Ryabukho, V.P., Klimenko, I.S. Statistical properties of spatial phase distribution in developed speckle field // Proc. SPIE “Interferometry: Techniques and Analysis”. – 1993. – V. 1755. – P. 279–285.

111. Klimenko, I.S., Sataev, I.R., Ryabukho, V.P., Feduleev, B.V. Nulls of visibility and branching of interference fringes at superposition of identical speckle-fields // Proc. SPIE: Selected Papers on “Coherent measurements and data processing methods and devices”. – 1993. – V. 1978. – P. 97–111.

112. Klimenko, I.S., Gorbatenko, B.B., Ryabukho, V.P., Feduleev, B.V. Localization and visibility of fringes in holographic and speckle-interferometry with extended reconstruction source // Proc. SPIE: Selected Papers on “Coherent measurements and data processing methods and devices”. – 1993. – V. 1978. – P. 213–223.

113. Ryabukho, V.P., Klimenko, I.S., Golubentseva, L.I. Interference of laser speckle fields // Proc. SPIE : “New Techniques and Analysis in Optics”. – 1994. – V. 2340. – P. 513–522.

114. Горбатенко Б.Б., Клименко И.С., Рябухо В.П. О некоторых статистических свойствах разности фаз в развитом спекл-модулированном поле // Оптика и спектроскопия. – 1995. – Т. 78. – Вып. 2. – С. 316–319.

115. Клименко И.С., Рябухо В.П. Проявление aberrаций оптической системы при регистрации фурье-спеклограммы поперечного сдвига // Письма ЖТФ. – 1996. – Т. 22. – Вып. 1. – С. 22–27.