

SPECKLES. WHAT THEY ARE

S. S. ULYANOV

Speckles are formed when laser radiation is diffused in random media. Reasons for the appearance of speckle-fields and their general properties are considered.

При рассеянии когерентного излучения в случайных средах образуются пятнистые дифракционные картины (спекл-поля). Причины появления таких полей и их основные свойства рассмотрены в статье.

ЧТО ТАКОЕ СПЕКЛЫ

С. С. УЛЬЯНОВ

Саратовский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ. КАК БЫЛИ ОБНАРУЖЕНЫ СПЕКЛЫ

В середине XX века начала формироваться новая область науки — лазерная физика, величайшим достижением которой явилось создание лазеров. Свет лазера отличается от остального оптического излучения высокой степенью монохроматичности и пространственной когерентности. Сразу же после появления лазеров многие исследователи одновременно обнаружили новый эффект: если лазерное излучение рассеивается на шероховатой поверхности, то дифракционная картина приобретает пятнистый характер. До изобретения лазеров подобное явление не наблюдалось, поскольку естественных аналогов лазерного излучения в природе нет. Обнаруженные пятнистые световые поля стали называть спекл-структурами (от англ. *speckle* — пятнышко, крапинка).

Почему образуются световые пятна? Лазерное излучение, попадая на шероховатый объект или проходя через неоднородную среду, претерпевает случайную модуляцию. Затем эта модуляция проявляется в структуре рассеянного излучения, делая его пространственно неоднородным. Поскольку рассеивающий объект был случайным, то образующиеся световые пятна будут расположены случайным образом в плоскости наблюдения, имея при этом случайную форму и размеры.

Следует заметить, что большинство природных сред являются в той или иной степени случайными. Поверхности, как правило, шероховаты, объемные среды содержат случайные вкрапления или являются мутными с точки зрения оптики. Поэтому спеклы появляются практически во всех случаях, когда мы имеем дело с лазерным излучением.

Вскоре после создания лазеров появилась новая отрасль оптики, а именно оптика спеклов [1]. Предметом изучения оптики спеклов являются закономерности формирования спекл-полей и исследование их статистических характеристик. Но задолго до появления оптики спеклов большие успехи были достигнуты в статистической радиофизике [2]. Статистическая радиофизика изучает рассеяние электромагнитных волн в случайных средах. Очевидно, что между оптикой спеклов и статистической радиофизикой нет Великой Китайской стены. Более того, результаты, полученные радиофизиками, широко используются при изучении лазерных спеклов. Интересно отметить, что первые работы по исследованию случайных полей, рассеянных шероховатыми поверхностями, относятся еще ко временам Рэлея. Однако при чтении статей по оптике спеклов может

сложиться неверное впечатление, что сами спеклы, обнаруженные только после появления лазеров, являются совершенно новым физическим объектом. На самом деле это не соответствует действительности. Случайные пятна могут образовываться при рассеянии радиоизлучения и при дифракции акустических полей. Однако в отличие от световых волн эти пятна не видны глазом.

Почему исследователи проявляют интерес к лазерным спеклам в течение уже более 30 лет? Если в качестве источника света используется лазер, то изображение объекта будет испещрено спеклами. Иными словами, спеклы ухудшают качество когерентных изображений. Но спеклы могут приносить и пользу. Спекл-поля несут информацию о свойствах объекта, на котором рассеялся свет лазера. Так, например, если объектом исследования является шероховатая поверхность, то о параметрах ее неоднородностей можно судить по характеристикам образующихся спеклов.

В настоящее время спеклы нашли широчайшее метрологическое применение в самых различных областях – от машиностроения и технической диагностики до лазерной медицины. В статье рассмотрены основные классы спекл-полей и отмечены их важнейшие свойства.

РАЗВИТЫЕ СПЕКЛ-ПОЛЯ

Этот тип спеклов наблюдается при дифракции широких лазерных пучков на сильношероховатой поверхности или сильнорассеивающем случайном транспаранте. Рассмотрим процесс формирования таких спеклов в дальней зоне дифракции. Фрагмент поверхности, освещенной пучком, может быть представлен набором нескольких участков, которые являются независимыми источниками вторичных световых волн. В соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля [3] выражение для амплитуды рассеянного поля может быть записано в виде суммы [4]

$$U^s = \sum_{n=1}^N E_n, \quad (1)$$

где N – число независимых областей на освещенном участке поверхности, E_n – вклад в дифрагированное поле от n -го рассеивающего участка.

Несмотря на предельную простоту, выражение (1) позволяет проанализировать основные свойства развитых спеклов. В статистике доказана центральная предельная теорема. Она утверждает, что при довольно общих условиях распределение суммарной случайной величины E_n стремится к распределению, описываемому кривой Гаусса, если $N \rightarrow \infty$. Упомянутое распределение называется *нормальным* или *гауссовым*. Иначе говоря, это означает, что если число неоднородностей освещенного участка поверхности достаточно велико, то комплексная амплитуда рассеянного поля подчиняется гауссовому

распределению. При этом уже не играет роли, какова была исходная статистика отдельных компонентов E_n , участвовавших в формировании результирующего поля U^s .

На рис. 1 представлена диаграмма, отражающая процесс формирования развитого спекл-поля. По оси абсцисс отложены действительные части амплитуд рассеянного поля, по оси ординат – мнимые. Каждая точка на этой диаграмме соответствует смене реализации рассеивающего объекта. Если комплексная амплитуда поля подчиняется гауссовой статистике, то в этом случае точки должны быть равномерно разбросаны по всей диаграмме.

Важной характеристикой пятнистых структур является контраст спеклов:

$$C = \frac{\sigma_1}{\langle I \rangle}, \quad (2)$$

где σ_1 – среднеквадратическое отклонение флуктуаций интенсивности, вычисленное при смене реализаций рассеивающего объекта, $\langle I \rangle$ – усредненная интенсивность. Контраст спеклов характеризует глубину пространственной модуляции рассеянного поля. Он является аналогом видности интерференционных полос, которые наблюдаются при интерференции гладких полей. Контраст развитых спеклов всегда равен единице.

На рис. 2 представлен фрагмент фотографии спекл-поля, образующегося при освещении шероховатой поверхности пучком лазера. Видно, что глубина пространственной модуляции интенсивности рассеянного поля велика, а световые пятна отделены друг от друга областями с нулевой интенсивностью. Однако этого недостаточно для того, чтобы отнести рассматриваемое спекл-поле к классу развитых. Чтобы сделать заключение о том, что мы имеем дело с развитыми спеклами, необходимо еще убедиться в выполнении следующих условий:

- статистика поля является гауссовой,
- контраст спеклов равен единице,
- все статистические характеристики, вычисленные по одной реализации спеклов, и характеристики,

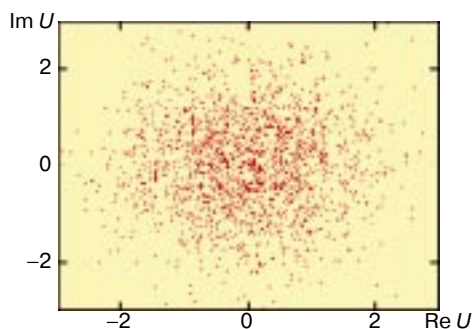


Рис. 1. Иллюстрация процесса формирования развитого спекл-поля



Рис. 2. Фотография фрагмента реализации развитого спекл-поля

полученные усреднением по множеству реализаций спекл-поля, идентичны (это свойство случайного поля называется эргодичностью).

Интересно отметить, что средний размер спеклов в дальней зоне дифракции в общем случае не зависит от статистических свойств рассеивающего объекта. Средний размер спеклов d полностью определяется геометрией рассеяния и может быть найден по формуле

$$d \approx \frac{z\lambda}{a}, \quad (3)$$

где a – размер освещенного пятна на рассеивающей поверхности, λ – длина волны лазерного излучения, z – расстояние от плоскости рассеяния до плоскости наблюдения. Важно подчеркнуть, что отношение λ/a характеризует дифракционную угловую расходимость лазерного пучка в дальнем поле, а произведение этого угла расходимости на пройденное расстояние z равно поперечному размеру пучка. Таким образом, видно, что диаметр невозмущенного лазерного пучка (a именно эта величина стоит в правой части выражения (3)) и средний размер спеклов примерно равны между собой в плоскости наблюдения.

ЧАСТИЧНО-РАЗВИТЫЕ СПЕКЛЫ

Спеклы этого типа формируются, как правило, при дифракции широких лазерных пучков на слабошероховатых поверхностях, слаборассеивающих пропускающих транспарантах или в случайной среде, характеризующейся малой кратностью рассеяния. Формирование частично развитых спеклов может быть рассмотрено с использованием соотношения

$$U^S = E_0 + \sum_{n=1}^N E_n. \quad (4)$$

В выражении (4) E_0 соответствует амплитуде нерассеянной волны, которая значительно превосходит по абсолютной величине все остальные члены суммы. Диаграмма (отражающая разброс амплитуд поля в дифракционной картине), полученная при смене реализаций частично-развитого поля, представлена на рис. 3. Видно, что вектор, соответствующий нерассеянному компоненту, как бы окружен небольшим шумовым облаком [4].

Следует отметить, что частично-развитое спекл-поле отличается от развитого наличием зеркального компонента (нерассеянной волны) в дифракционной картине. Поэтому контраст частично развитых спеклов много меньше единицы. При увеличении степени неоднородности рассеивающего объекта амплитуда зеркального компонента уменьшается и частично развитое спекл-поле переходит в развитое.

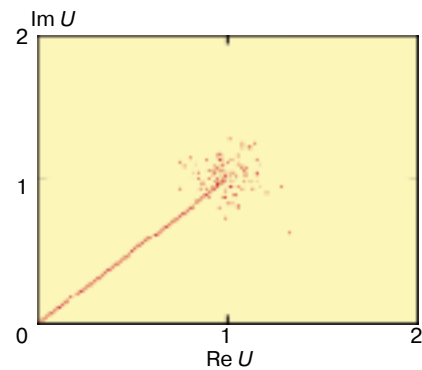


Рис. 3. Иллюстрация процесса формирования частично-развитого спекл-поля

ДИНАМИКА СПЕКЛОВ

Если рассеяние лазерного пучка происходит на неподвижных поверхностях, то спеклы также неподвижны в плоскости наблюдения. Что произойдет с реализацией спекл-поля, если рассеивающую поверхность сместить относительно лазерного пучка в поперечном направлении? В этом случае образуется новая реализация. Если смещение невелико по сравнению с диаметром пучка, то две рассматриваемые реализации спекл-поля будут похожи друг на друга (поскольку они сформировались в схожих условиях). Но даже при небольшом смещении пучка часть рассеивателей ушла из области освещения с одного края, а в зону освещения вошли новые рассеиватели с другого края. Рассеиватели в центральной части освещенного участка поверхности остались неизменными, но они немного сдвинулись относительно пучка. Таким образом, в результате смещения шероховатой поверхности расположение рассеивателей под пучком и сами рассеиватели несколько изменились. Это приведет к некоторым

отличиям второй реализации спекл-поля от предыдущей (говорят, что происходит частичная декорреляция спеклов).

Очевидно, что одна реализация спеклов полностью сменит другую, когда все прежние рассеиватели уйдут из области освещения, а на их смену придут новые. Это произойдет при смещении пучка на расстояние, превышающее его диаметр. При непрерывном движении пучка относительно шероховатой поверхности очертания световых пятен видоизменяются, а реализации спекл-поля постоянно меняют одна другую. Это называется динамикой спеклов. Наблюдателю кажется, что спеклы как бы следуют за шероховатой поверхностью в ближней зоне, а в дальней зоне происходит кипение (boiling) спеклов.

Действительно, в дальней зоне спеклы не могут двигаться вслед за рассеивающим объектом. Дело в том, что в этой области размеры спеклов значительно больше, чем размеры освещенного элемента поверхности. Не успеют спеклы немного сместиться вслед за поверхностью, как под пучком уже оказывается совершенно новый участок рассеивающей поверхности. При этом все прежние спеклы исчезают, а формируются новые. В дальней зоне одни спеклы как бы переливаются в другие. Поэтому наблюдатель не может заметить какого-либо направленного движения спеклов, а видит только непрерывное мерцание пятнистых структур.

Однако как в ближней, так и в дальней зонах быстрота смены реализаций спекл-поля определяется скоростью движения рассеивающего объекта. Динамика спеклов широко используется в лазерной метрологии при измерениях скорости движения шероховатых поверхностей и случайных потоков.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СПЕКЛОВ

Как уже отмечалось, любая реализация спекл-поля представляет собой результат интерференции большого числа волн, пришедших от различных рассеивателей. Математически этот факт отражается выражениями (1) и (4). Таким образом, интерференция всегда проявляется при образовании пятнистых структур. Именно поэтому раздел статистической оптики, занимающийся изучением свойств спеклов применительно к задачам метрологии, часто называют спекл-интерферометрией.

Однако особый случай представляет собой интерференция двух независимых реализаций спекл-поля (рис. 4). В результате такой интерференции статистические характеристики суммарного поля изменяются. В интерференционном поле уменьшается средний размер спеклов (по сравнению с размерами спеклов в исходных реализациях, ср. рис. 4, *а* и *б*). Дело в том, что любое спекл-поле характеризуется не только случайным распределением интенсивности, но также и хаотическим распределением фазы. При интерференции начинает проявляться фазовая структура спекл-полей, что ведет к умень-

шению размеров световых пятен в результирующем поле. Но это происходит только в случае, когда интерферируют спекл-поля, согласованные по фазовым распределениям. Такая ситуация возникает, например, когда в интерферометре Майкельсона в оба плеча установлены шероховатые поверхности, а длины плеч равны между собой. Если спекл-поля не согласованы (длины плеч в интерферометре различны), то в интерференционном поле появляются полосы. Средняя ширина полос определяется значением средней разности фаз в интерферирующих спеклах. Интересно отметить, что полосы существуют только в пределах отдельных спеклов результирующего поля. При этом интерференционные полосы скачкообразно смещаются при переходе от одного спекла к другому. Иногда внутри отдельных спеклов наблюдаются ветвления интерференционных полос или их изгиб.

При этом комплексная амплитуда в интерференционном поле по-прежнему подчиняется гауссовой

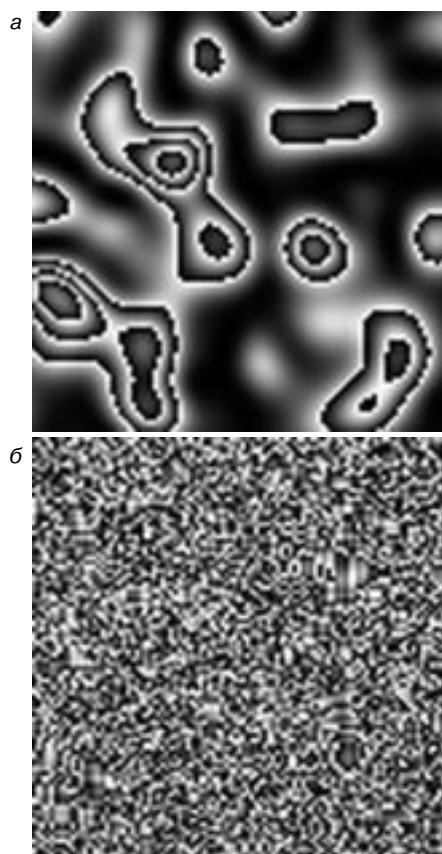


Рис. 4. Демонстрация явления интерференции спеклов (компьютерное моделирование): *а* – одна из реализаций спекл-поля при отсутствии интерференции; *б* – результат наложения двух независимых реализаций развитого спекл-поля друг на друга

статистике. Это также является следствием из центральной предельной теоремы.

СПЕКЛ-ПОЛЯ С НЕГАУССОВОЙ СТАТИСТИКОЙ

Если центральная предельная теорема не выполняется, то статистика комплексной амплитуды рассеянного поля может отличаться от гауссовой. Это происходит, например, при дифракции сильно сфокусированных пучков в случайной среде. В этом случае наблюдаются спеклы при малом числе рассеивателей.

Если при случайной дифракции волн с широким фронтом наблюдаются тысячи спеклов, то при рассеянии сфокусированных лазерных пучков дифракционная картина состоит всего из нескольких пятен (рис. 5). Спекл-поля, формирующиеся при малом числе рассеивателей, являются статистически неоднородными. Это означает, что все статистические характеристики таких полей зависят от координаты точки наблюдения. Кроме этого, динамика спеклов при малом числе рассеивателей обладает редкими и необычными свойствами, которые мы сейчас обсудим.

Общеизвестно, что при дифракции излучения в движущихся случайных средах происходит изменение средней частоты рассеянного поля (это хорошо изученный эффект Доплера). Величина частотного сдвига определяется только скоростью движения рассеивателей и углом наблюдения дифрагированного излучения. Но в оптическом диапазоне длин волн подобный эффект может быть обнаружен только при интерференции рассеянного поля с дополнительной опорной волной. Иначе говоря, должно быть выполнено оптическое гетеродинамирование.

Как недавно было показано, при дифракции жестко сфокусированных когерентных пучков в слаборассеивающих потоках наблюдаются особенности, связанные с проявлением эффекта Доплера. В частности, было установлено, что:

– эффект Доплера может проявляться непосредственно, без интерференции рассеянного поля с дополнительной опорной волной. (В данном случае роль опорной волны играет зеркальный компонент. Из-за большой угловой расходимости он перекрывается и интерферирует с рассеянным компонентом в большой области пространства.);

– частотное положение доплеровского пика в спектре флюктуаций интенсивности определяется не только углом наблюдения, но и средним числом рассеивателей в освещенном объеме.

Дифракция при малом числе рассеивателей далеко не единственный случай, приводящий к появлению негауссовых спеклов. Спеклы, характеризующиеся негауссовой статистикой, могут формироваться при рассеянии широких лазерных пучков на некоторых специфических поверхностях (например, высоты шероховатостей которых подчиняются K -рас-



Рис. 5. Фотография спекл-поля, образующегося при малом числе рассеивателей

пределению). Как правило, негауссовыми являются спекл-модулированные спеклы (speckled speckles). Такие спеклы образуются при прохождении когерентного излучения через слоистую среду со случайно-неоднородными границами разделов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены лишь некоторые наиболее часто встречающиеся спекл-поля. К настоящему моменту их характеристики достаточно хорошо изучены. По мнению автора статьи, перспективы дальнейшего развития оптики спеклов связаны с изучением свойств биоспеклов (то есть спеклов, образующихся при рассеянии лазерного излучения в биотканях), спеклов, формирующихся при дифракции света на объектах с фрактальными свойствами, а также спеклов, образующихся внутри многократно рассеивающих сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Наука, 1980. 171 с.
2. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1978. Ч. 2. 463 с.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 718 с.
4. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1985. 527 с.

* * *

Сергей Сергеевич Ульянов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики Саратовского государственного университета и профессор кафедры статистики и математики Саратовской государственной экономической академии. Автор более 100 научных работ по статистике, оптике спеклов и биомедицинской оптике.