

# Способы уменьшения контраста спекл-структуры лазерного изображения

Ю. Н. Рыбочкин, П. Ю. Солодкий\*, А. И. Волошин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

\*PaulVDV@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены предложения по исследованию помехоустойчивости оптических систем передачи информации с параметрической адаптацией работы оптического приемника.

**Ключевые слова:** *спекл, спекл-структура, эффективность, возможность*

## I. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что свет, падающий на шероховатую поверхность, отражается не только в зеркальном, но и в других направлениях. Следовательно, поле в точке наблюдения формируется волнами, отраженными от различных участков поверхности. Если при этом излучение, падающее на объект, когерентно как во времени, так и в пространстве, то отраженное поле будет представлять собой случайную пятнистую структуру, возникающую в результате сложения волн, отраженных от этих участков. Фазы отраженных волн случайны и определяются размерами шероховатостей. Из-за стохастического характера детальной микроструктуры поверхности, от которой отражается свет, свойства спекл-структур необходимо рассматривать на основе методов статистического анализа.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим простейшую статистическую модель спеклов, соответствующую случаю поляризованного пространственно когерентного монохроматического излучения. Поле в точке наблюдения с координатами  $x, y, z$  запишем в виде

$$u(x, y, z, t) = A(x, y, z) \exp(i2\pi\nu t), \quad (1)$$

где  $\nu$  – частота светового излучения;  $(x, y, z)$  – комплексная амплитуда поля.

$$A(x, y, z) = |A(x, y, z)| \exp[i\theta(x, y, z)], \quad (2)$$

Интенсивность поля

$$I(x, y, z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |u(x, y, z, t)|^2 dt = |A(x, y, z)|^2, \quad (3)$$

Вследствие аддитивности комплексную амплитуду поля в произвольной точке с координатами  $x, y, z$  можно представить в виде суммы.  $N$  независимых вкладов от многих участков шероховатостей (рис. 1)

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N |a_k| \exp(i\varphi_k), \quad (4)$$

где  $a_k$  и  $\varphi_k$  – соответственно амплитуда и фаза  $K$ -го вклада;  $N$  – общее число таких вкладов.

Сделаем два основных допущения:

а) амплитуда  $a_k$  и фаза  $\varphi_k$   $K$ -го и других вкладов статистически независимы;

б) будем считать, что фаза  $K$ -го вклада равномерно распределена в интервале  $\pm\sqrt{3}\sigma_\varphi$ , причем дисперсия фазы  $\sigma_\varphi^2 \gg 1$ .

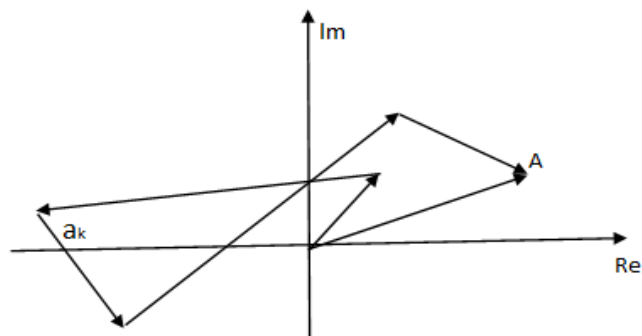


Рис. 1. Метод статистического анализа

Полагая число  $N$  элементарных вкладов большим, можно показать, что действительная и мнимая части комплексной амплитуды поля в точке  $x, y, z$  статистически независимые гауссовские величины с нулевым средним значением и одинаковыми дисперсиями, а функция распределения интенсивности поля является отрицательно экспоненциальной:

$$P(I) = \begin{cases} \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) & \text{при } I \geq 0, \\ 0 & \text{при } I < 0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\langle I \rangle$  среднее значение интенсивности.

При отрицательно-экспоненциальном законе распределения случайной величины ее математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение равны между собой. Следовательно, контраст поляризованной спекл-картины, определяемый

$$c = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}, \quad (6)$$

будет всегда единичным.

В большинстве случаев объекты имеют поверхности, которые в оптическом диапазоне длин волн следует рассматривать как шероховатые. Следовательно, при получении лазерных изображений таких объектов и их лазерной локации на приемной стороне будут наблюдаться флуктуации интенсивности. Естественно, что они нежелательны в обоих случаях, так как наличие спеклов в изображении ухудшает способность наблюдателя различать мелкие детали. Наличие спеклов в детектированном сигнале оптической локационной системы может уменьшить вероятность обнаружения цели.

Рассмотрим возможности уменьшения флуктуаций интенсивности лазерного излучения, отраженного от объекта с шероховатой поверхностью. Известно, что сумма  $N$  независимых случайных переменных с одинаковым законом распределения имеет среднее значение и среднеквадратичное отклонение соответственно в  $N$  и  $\sqrt{N}$  раз большее, чем у одной случайной переменной. Следовательно, контраст результирующей спекл-картины уменьшится в  $\sqrt{N}$  раз.

Независимые спекл-картины данного объекта можно получить путем поляризационной, частотной, временной и пространственной декорреляции принимаемых полей.

Лазерное излучение, отраженное от диффузной поверхности, деполаризуется. Для такой поверхности спекл-картина, наблюдаемая через поляризатор-анализатор, изменится при повороте анализатора на  $90^\circ$ . Интенсивность в спекл-картине является результатом суммирования интенсивностей от двух ортогональных линейно поляризованных компонент. Следовательно, при наличии полной деполаризации отраженной волны контраст суммарной спекл-картины уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз.

Если отражающая поверхность освещается несколькими лазерами под разными углами и углы падения настолько различны, что спекл-картины от каждого лазера некоррелированы, то контраст результирующей спекл-картины уменьшается в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  – число источников когерентного излучения. Этот пример подтверждает известный факт, что при освещении объекта достаточно протяженным некогерентным источником, контраст спекл-структуры уменьшается.

Одним из способов изменения оптических путей, проходимых отраженной волной, является изменение оптической длины волны света, падающего на отраженную поверхность (т. е. нарушение временной когерентности), таким образом, если поверхность освещается  $N$  лазерами, то при различии их частот между собой, достаточном для формирования независимых спекл-картин, результирующий контраст

уменьшится в  $\sqrt{N}$  раз. Если угол падения и отражения близки к нормальным, то разность частот  $\Delta\nu$ , необходимая для создания некоррелированных спекл-картин [2] составит

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\sigma_z}, \quad (7)$$

где  $c$  – скорость света, а  $\sigma_z$  – среднеквадратичное отклонение флуктуаций высот шероховатостей отражающей поверхности. Этот пример подтверждает более общий факт, что при уменьшении временной когерентности сигнала спекл-картина отраженного излучения сглаживается.

Разнесение во времени можно объяснить следующим образом. Между объектом и плоскостью изображения помещается диффузор. Перемещение диффузора вызывает непрерывное изменение спекл-картины в плоскости изображения. Делая несколько экспозиций, получаем независимые спекл-картины.

Кроме изложенных способов сглаживания существует способ фильтрации спекл-поля с помощью оптической системы [3]. Обозначая через  $G_0(u)$  и  $G(u)$  пространственный спектр мощности спекл-поля соответственно во входной и выходной плоскости оптической системы, имеем:

$$H(u) = \begin{cases} 1 & \text{при } |u| \leq \frac{\kappa D_0}{z} \\ 0 & \text{при } |u| > \frac{\kappa D_0}{z} \end{cases}, \quad (8)$$

здесь  $D_0$  – размер зрачка оптической системы;  $z$  – расстояние от входной плоскости до объектива приемной системы.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результат фильтрации зависит от многих факторов, главными из которых являются фокусировка оптической системы и размер ее зрачка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Майоров Е.Е. и др. Оптимизация динамических параметров оптического шума триггерного типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики 2012, Т. 78 №2, с.13-16.
- [2] Франсон М. Оптика спеклов / пер. с франц. Под ред. проф. Ю.И. Островского. М.: Мир, 1990. 171 с.
- [3] Локшин Г.Р. Фурье - оптика спеклов. В кн.: Методы и устройства оптической голографии: Сб. трудов. Физ.-техн. ин-т АН СССР. Л., 1983.