

УДК .621.373

ДОЛЯ Г. Н., д-р техн. наук, проф., ХНУ им. В.Н.Каразина, Харьков;
МАЗАНОВ В. Г., канд. техн. наук, доц. АВВ МВД Украины, Харьков;
НАДЬ О. А., студентка ХНУ им. В.Н.Каразина

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАССЕЯННОГО НА СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩЕМ ПОКРЫТИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ОБЪЕКТА

В статье рассмотрена возможность применения лазерных систем и светоотражающих покрытий для бесконтактного измерения скорости объекта. Исследованы особенности пространственной структуры излучения, а также динамика ее изменения при движении объекта.

Ключевые слова: лазеры, движение, объект, скорость, светоотражение.

Введение. Лазерные системы используются для решения широкого круга прикладных задач, в том числе для измерения скорости движения объектов [1-3]. Например, для автомобильного транспорта информация о скорости вращения распределительного вала двигателя и скорости вращения коленчатого вала позволяет определить наиболее оптимальный режим работы, включающий в себя показатели мощности, экономичности и ресурса.

Анализ последних достижений и публикаций. Статистические характеристики рассеянного лазерного излучения существенно зависят от характера (зеркальная либо диффузная) поверхности объекта [4-6]. Диффузная поверхность позволяет измерять параметры движения объектов в широком диапазоне изменения условий зондирования. Однако мощность принимаемого сигнала мала из-за широкого угла, в пределах которого рассеивается излучение, что ограничивает возможности проведения измерения для удаленных объектов. Мощность излучения отраженного от зеркального объекта обычно очень велика в плоскости приема, однако вероятность приема такого сигнала обычно крайне невелика.

В последнее время для практического использования разработаны световозвращающие покрытия (СВП), существенно увеличивающие мощность принимаемого сигнала, что характерно для зеркальных объектов, при этом практически нет ограничений на условия зондирования объектов, что характерно для диффузных объектов. Такие поверхности состоят либо из регулярной совокупности световозвращающих элементов типа ретрорефлектор (углового отражателя, катафота), образующих решетку, либо из совокупности микростеклошариков, случайным образом расположенных на поверхности [7]. Последние, в частности, широко используются при изготовлении дорожных знаков, ввиду их относительной дешевизны.

Цель и постановка задачи. Целью данной работы являлся теоретический анализ закономерностей создания пространственной структуры лазерного излучения при его рассеянии и дифракции на неподвижном и движущемся СВП, а также физическое и компьютерное моделирование этих процессов.

© Г. Н. Доля, В. Г. Мазанов, О. А. Надь, 2012

Математическая модель и алгоритм решения задачи Характер распространения лучей в одном элементе световозвращающего покрытия, сформированного из микростеклошариков, показан на рис.1.

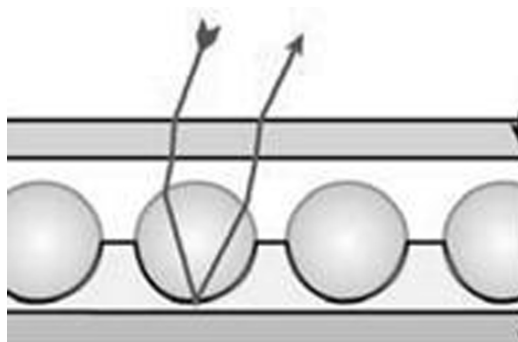


Рисунок 1 – Характер распространения лучей в одном элементе световозвращающего покрытия, сформированного из микростеклошариков

На рис. 2 представлена фотография, иллюстрирующая закономерности их расположения на покрытии, изготовленного компанией ORAFOL. Как видно, на реальных покрытиях элементы расположены хаотически и имеют форму окружности со случайным значением диаметра (ок.30-50мкм), значительно большим длины волны светового излучения видимого диапазона (доли микрона).

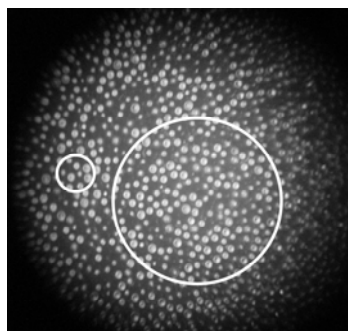


Рисунок 2 – Фотография световозвращающего покрытия компании ORAFOL (увеличение в 50 раз)

С точки зрения основных закономерностей описания рассеяния (дифракции) света на таких поверхностях [4,5] можно полагать, что зондируемый объект содержит конечное число m блестящих точек, число которых зависит от размера освещаемой поверхности.

В зависимости от условий зондирования движущегося объекта (дальность до объекта зондирования, размер пятна фокусировки, длина волны излучения и т.д.) с точки зрения оптической локации возможны две существенно различные ситуации. Первая ситуация соответствует случаю, когда число засвечиваемых элементарных световозвращателей m велико ($m \gg 1$) и вторая - когда $m \approx 6 \dots 10$.

Известно [5], что статистические характеристики рассеянного поля в этих случаях сильно отличаются. В случае, когда $m \gg 1$, отражающую поверхность описывают закономерностями, соответствующими шероховатой поверхности с большим числом микронеровностей [5]. Рассмотрим их несколько более подробно.

Если ввести функцию корреляции поля в плоскости приема с координатой ρ для точечного источника, помещенного на поверхности объекта в точке $\vec{r}=0$, и обозначить эту функцию корреляции через $B(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2)$, то выражение для корреляционной функции поля можно записать в виде

$$\langle E(\vec{\rho}_1)E^*(\vec{\rho}_2) \rangle = B(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2) \int_{\sigma} I_i(\vec{r}) \exp\left[-ik \frac{\vec{r}(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2)}{L}\right] d\sigma, \quad (1)$$

где L – расстояние до объекта, а $I_i(\vec{r})$ – нормированное распределение интенсивности на поверхности объекта, равное

$$I_n(\vec{r}) = I(\vec{r}) / I_0$$

Выражение (1) показывает, что увеличение размеров объекта приводит (при условии неизменности длины волны и дальности) к уменьшению области когерентности поля на приемной апертуре. Поскольку точечный источник создает на апертуре пространственно когерентное поле, уменьшение когерентности в случае протяженного источника определяется модулем интеграла в правой части (1). Функция

$$F(\Delta\vec{\rho}) = \left| \int_{\sigma} I(\vec{r}) \exp\left(-ik \frac{\vec{r}\Delta\vec{\rho}}{L}\right) d\sigma \right| \quad (2)$$

определяет размер области когерентности d_k . Например, если объект представляет собой равномерно освещенный круг радиуса r_0 , то, как легко показать, функция $F(\Delta\vec{\rho})$ обращается в нуль первый раз при

$$\Delta\vec{\rho} = 1,22L\lambda / 2r_0. \quad (3)$$

Поэтому в качестве оценки размера области когерентности можно принять величину

$$d_{\epsilon} = L\lambda / r_0. \quad (4)$$

Из полученных соотношений следует, что в случае монохроматического лазерного сигнала случайное распределение интенсивности в плоскости приемной апертуры (спекл-картина) имеет очень высокий контраст, среднеквадратическое значение флуктуации интенсивности равно средней интенсивности.

Проанализируем теперь пространственную структуру поля создаваемого на приемной апертуре совокупностью относительно небольшого числа зеркальных областей имеющих на поверхности объекта. В [5] получено следующее выражение для функции корреляции поля, отраженного от объекта с зеркальными областями, не разрешаемыми апертурой:

$$\langle E(\vec{\rho}_1)E^*(\vec{\rho}_2) \rangle = B(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2) H\left(\frac{k}{L}R|\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2|\right) \left(\frac{k}{L}R|\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2|\right)^{-1}, \quad (5)$$

где $H(x) = \int_0^x J_0(y) dy$, а J_0 - функция Бесселя нулевого порядка.

Анализируя вид этой функции можно заметить, что, в отличие от функции $F(\Delta\vec{\rho})$, данная зависимость никогда не достигает нуля, а первый минимум составляет величину $\approx 10\%$ от максимального значения. Это обстоятельство позволяет утверждать, что контраст наблюдаемой интерференционной (дифракционной) картины в случае ограниченного числа точек зеркального отражения будет хуже, чем в случае большого их числа.

Рассмотрим теперь как рассмотренные выше особенности формирования пространственной структуры рассеянного излучения влияют на закономерности измерения трансверсальной (поперечной к лучу) составляющей скорости движения объекта. Принцип измерения скорости изображен на рис.3, где цифрами обозначены: 1- лазер, 2- коллиматор, обеспечивающий возможность изменения диаметра светового пятна на поверхности объекта 3 со световозвращающим покрытием, 4- диафрагма диаметром D , 5- фотоприемник.

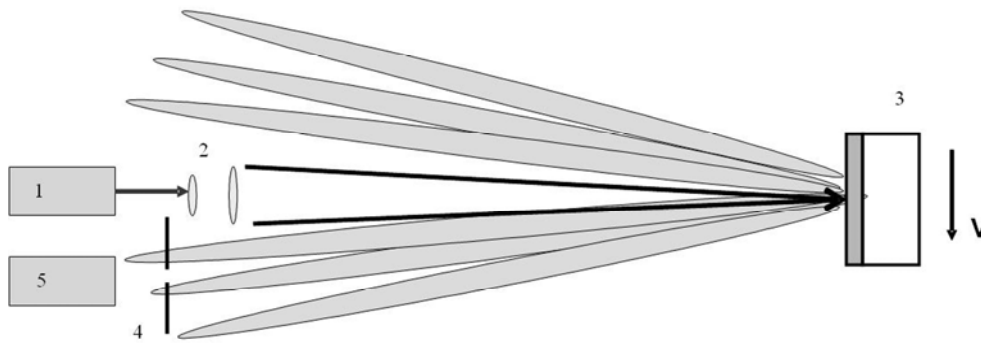


Рисунок 3 – Установка по измерению скорости

На рис. 4,5 представлены фотографии распределения интенсивности лазерного излучения на неподвижной поверхности, полученные при различном диаметре светового пучка и соответственно при различном значении m . Характерный пространственный размер пятна (спекла) в этом распределении тем больше, чем меньше засвечиваемая область (см. соотн. 4).

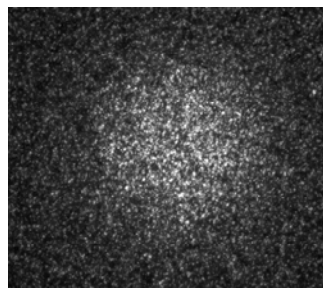


Рисунок 4 – Распределения интенсивности лазерного излучения на неподвижной поверхности при большом диаметре светового пучка и $m=200$

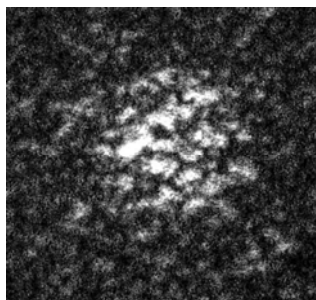


Рисунок 5 – Распределения интенсивности лазерного излучения на неподвижной поверхности при малом диаметре светового пучка и $m=10$

При движении объекта характер изменения структуры распределений представленных на рис. 4,5 также различен. Так, если число блестящих точек m , велико, то распределение интенсивности «бежит» по плоскости приема как единое целое. В некоторых ситуациях за счет эффекта накопления светового потока на кадре можно зарегистрировать треки движения локальных максимумов, вытянутые вдоль направления движения (рис.6).

Такая ситуация аналогична закономерностям изменения пространственной структуры луча, отраженного от диффузно отражающего объекта [4]. При перемещении такого распределения по диафрагме возникает переменная составляющая фототока на выходе фотоприемника, параметры которой, в частности ширина спектра сигнала, определяются величиной скорости движения объекта.

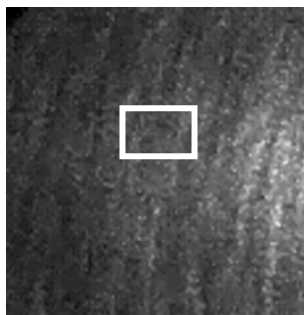


Рисунок 6 – Треки движения локальных максимумов, вытянутые вдоль направления движения

Отметим, что в данном методе отсутствует необходимость использования дифференциальных схем, содержащих два зондирующих луча (база на передачу либо две приемных апертуры (база на прием) при одном зондирующем луче.

Иная ситуация наблюдается при облучении движущегося объекта, в случае, когда число блестящих точек невелико, т.е. когда диаметр светового пучка на объекте одного порядка с диаметром элемента поверхности. Распределение интенсивности (рис.5) в этом случае не смещается как единое целое, а перестраивается полностью по мере того, как в освещенную часть поверхности попадают все новые фрагменты СВП. Напомним, что их расположение хаотично, а размеры случайны, поэтому новой поверхности соответствует новая картина рассеяния. При усреднении такой картины фиксируется равномерный фон и никакие треки естественно не наблюдаются. Однако, как и в предыдущем случае, фотоприемник регистрирует переменную составляющую, параметры которой адекватны параметрам движения объекта. Отметим, что данное

рассмотрение носит качественный характер, для получения количественных закономерностей необходимо проведение дополнительных исследований.

Для анализа особенностей описанного выше метода измерения скорости объекта целесообразным является создание имитационной модели. Расчет распределения интенсивности лазерного излучения в плоскости наблюдения можно произвести с использованием известного приближения Фраунгофера:

$$U_{набл}(x_0, y_0) = \iint_{\infty} U_{отр}(x_1, y_1) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_1 + y_0 y_1)\right] dx_1 dy_1,$$

$$U_{отр}^*(x_1, y_1) = U_{пад}(x_1, y_1) \times T_{СВП}(x_1, y_1),$$

где λ - длина волны, $U_{набл}(x_0, y_0)$ - амплитудно-фазовое распределение (комплексная амплитуда поля) в плоскости наблюдения в точке с координатами (x_0, y_0) , $U_{отр}^*(x_1, y_1)$ - комплексная амплитуда поля, отраженного от СВП, z - расстояние от плоскости СВП до плоскости наблюдения.

Комплексную амплитуду падающего на СВП поля (в фокальной перетяжке) определим как гауссоиду, которая определяется формулой

$$U_{дра}(x_1, y_1) = U_0 \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2w^2}\right),$$

где w - радиус гауссоиды, при этом фазу в пределах сечения пучка будем считать постоянной.

Коэффициент отражения СВП $T_{СВП}(x_1, y_1) = T(x_1, y_1) \exp^{i\varphi}$ будем моделировать двумя множителями. Первый множитель задается значениями коэффициента отражения, равномерно-случайно распределенными в пределах от 0,7 до 1. Множитель $\exp^{i\varphi}$ определяет набег фазы в каждом элементе СВП и является случайной величиной, распределенной по нормальному закону со средним значением, равным нулю и величиной дисперсии σ .

Таким образом, при заданном амплитудно-фазовом распределении поля в области СВП можно найти комплексную амплитуду поля $U_{ираэ}(x_0, y_0)$ и соответственно распределение интенсивности излучения $I(x_0, y_0) = |U_{ираэ}(x_0, y_0)|^2$ в плоскости наблюдения. Для вычисления значений интенсивности в плоскости наблюдения использовался известный алгоритм двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В ходе моделирования имелась возможность вычислять значение мощности светового излучения (пропорциональной величине фототока на выходе фотодетектора) путем попиксельного суммирования интенсивности падающего на приемную апертуру излучения при линейном пошаговом смещении картины распределения микростеклошариков относительно падающего луча (имитация движения объекта)

происходило адекватное изменение отсчетов фототока. Временной спектр такого сигнала (рис.7) является случайным, как уже отмечалось выше, где по горизонтальной оси отложено значение частоты, а по вертикальной оси – амплитуды спектральных составляющих.



Рисунок 7 – Временной спектр сигнала движущегося объекта

При имитации движения объекта величина фототока содержит две составляющие: постоянную и переменную, при этом только переменная составляющая является информативной для оценки скорости движения объекта. Соотношение между переменной и постоянной составляющими определяется двумя факторами. Первым из них является контраст спекл-картины, который в свою очередь имеет максимальное значение в случае, когда число блестящих точек велико и уменьшается при уменьшении числа засвечиваемых блестящих точек, т.е. при уменьшении диаметра светового пучка на СВП, например, за счет фокусирования луча. С другой стороны, соотношение между постоянной и переменной составляющими зависит от соотношения размера приемной апертуры D и среднего диаметра спекла d_k , при этом из очевидных соображений следует ожидать уменьшения этого соотношения при уменьшении величины d_k/D .

Результаты имитационного моделирования, иллюстрирующие данную особенность метода, представлены на рис.8, где по оси абсцисс отложены значения натурального логарифма величины d_k/D , а по оси ординат – нормированное значение относительной величины переменной составляющей фототока. Приведенная кривая подтверждает высказанное ранее предположение о характере поведения данной зависимости

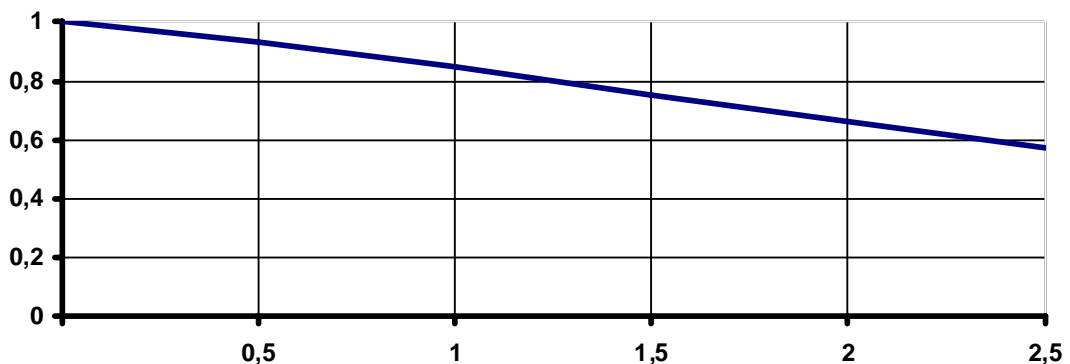


Рисунок 8 – Зависимость нормированное значение относительной величины переменной составляющей фототока от логарифма величины d_k/D

Выводы

Проведен анализ пространственной структуры лазерного излучения рассеянного на световозвращающем покрытии, состоящем из хаотически расположенных микростеклошариков случайного размера. Теоретически и экспериментально показано, что статистические характеристики распределения существенно зависят от числа блестящих точек, т.е., числа освещенных элементов. Качественно рассмотрен однолучевой (не дифференциальный) метод измерения трансверсальной (поперечной) скорости движения объекта со световозвращающей поверхностью. Отмечено, что характер освещения поверхности влияет на закономерности изменения картины рассеяния света при движении объекта, однако в любом случае закономерности зарегистрированной переменной составляющей фототока могут быть однозначно связаны с параметрами движения объекта. Результаты проведенного имитационного моделирования свидетельствуют о возрастании относительной величины полезной переменной составляющей фототока на выходе фотодетектора при увеличении размера спекла по отношению к размеру приемной апертуры.

Список литературы: 1. Лазерные измерительные системы [Текст] : научное издание / А. С. Батраков [и др.] ; ред. Д. П. Лукьянов. - М. : Радио и связь, 1981. - 456 с. 2. Лазерные измерения и диагностика в технике и экологическом контроле [Текст] : приборы, предприятия, специалисты, лит.: Кат.- справ. по странам СНГ / Лазер. ассоциация, 2000. - 120 с. 3. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков / Под ред. В.А.Фабриканта – М.:Изд-во МЭИ. 1990. -288 с. 4. Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Троицкий И.Н., Устинов И.Д. Лазерная локация. разное. Москва, Издательство "Машиностроение", 1984 год - 272 с. 5. Методы обработки оптических полей в лазерной локализации [Текст] / Н.Д. Устинов, И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов ; под общ. ред. Н.Д. Устинова. - М. : Наука, 1983. - 272 с. 6. Статистическая теория голографии [Текст] / И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов. - М. : Радио и связь, 1981. - 327 с. 7. John Lloyd. A brief history of retroreflective sign face sheet materials. The principles of retroreflection. <http://www.rema.org.uk/pdf/history-retroreflective-materials.pdf>. 8. http://www.izmerimvse.com.ua/Tahometr_EP5_1_Dzyga.aspx.

Поступила в редколлегию 25.11.2012

УДК .621.373

Анализ структуры лазерного излучения рассеянного на световозвращающем покрытии для измерения скорости объекта // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2012. – № 60 (966). – С. 59–66. – Бібліогр.: 8 назв.

У статті розглянута можливість застосування лазерних систем і світлоповертаючих покриттів для безконтактного виміру швидкості об'єкта. Досліджено особливості просторової структури випромінювання, а також динаміка її зміни при русі об'єкта.

Ключові слова: лазери, рух, об'єкт, швидкість, світло повертання

In this article the possibilities of laser systems using retro reflective sheets for non-contact velocity object measurement are considered. It has been investigated the features of the radiation spatial structure and the dynamics of its transformation due to the object motion.

Key words; lasers, motion, speed, light reflection.