

В.М. Сазанович, С.М. Слободян, Б.Н. Чен

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ПРЯМОЙ И ЗЕРКАЛЬНО ОТРАЖЕННОЙ ВОЛН

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния корреляции полей прямого и отраженного пучков в локационной схеме распространения излучения через случайно-неоднородную среду на дисперсию случайных смещений изображения. Показана зависимость эффекта «самокомпенсации» при отражении излучения от 90-градусной призмы и эффекта усиления флуктуации при отражении от плоского зеркала от разнеса осей пучков.

В локационных схемах распространения световых пучков корреляция прямых и отраженных волн, проходящих одни и те же неоднородности среды, приводят к качественно новым явлениям и закономерностям, отсутствующим при прямом распространении [1, 2]. Однако вопрос об области проявления эффектов, связанных с корреляцией прямых и отраженных волн при разнесении оптических осей передатчика и приемника, остается открытым, хотя важность таких исследований обусловлена как широким применением дистанционных методов определения параметров среды, так и необходимостью проработки вопросов надежности и точности локационных лазерных систем [3] и возможностей модельных турбулентных установок [4].

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние пространственной корреляции прямой и отраженной волн на дисперсию смещений оптического изображения в условиях термической модельной конвективной турбулентности. Следуя [5], можно показать, что в случае распространения через турбулентную среду излучения источника плоской волны $\left(\Omega = \frac{ka^2}{z} \gg 1, a - \text{радиус излучающей апертуры источника; } k = 2\pi/\lambda - \text{волновое число; } z - \text{длина трассы}\right)$, когда на трассе реализуются условия слабых флуктуаций интенсивности $(\beta_0^2 = 0,31 C_\epsilon^2 k^{7/6} z^{11/6} \ll 1, C_\epsilon^2 - \text{структурная характеристика диэлектрической проницаемости среды})$, и отражения от плоского или углового зеркального отражателя больших размеров $\left(\Omega_r = \frac{ka_r^2}{z} \gg 1, a_r - \text{эффективный радиус отражателя}\right)$ дисперсия случайных смещений изображения равна

$$\sigma_t^2 = \sigma_{\text{пр}}^2 \mp \sigma_{\text{отр}}^2 \pm \sigma_k^2, \quad (1)$$

где

$$\sigma_{\text{пр}}^2 = \frac{1}{2} \sigma_{i_0}^2 \left\{ 1 + \operatorname{Re} \int_0^1 d\xi (1 + 2i\Omega_t^{-1} (2 - \xi))^{-1/6} \right\}$$

— дисперсия дрожания изображения на трассе „источник — отражатель”;

$$\sigma_{\text{отр}}^2 = \frac{1}{2} \sigma_{i_0}^2 \left\{ 1 + \operatorname{Re} \int_0^1 d\xi (1 + 2i\Omega_t^{-1} \xi)^{-1/6} \right\} -$$

— дисперсия дрожания изображения на трассе „отражатель — приемник”;

$$\sigma_k^2 = \sigma_{i_0}^2 \operatorname{Re} \left\{ (1 + 2i\Omega_t^{-1})^{-1/6} + \int_0^1 d\xi (1 + 2i\Omega_t^{-1} (1 - \xi))^{-1/6} \right\} -$$

— дисперсия дрожания изображения, обусловленная корреляцией волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях, а

$$\sigma_{i_0}^2 = \frac{\pi^2}{2} A_0 \Gamma(1/6) F_i^2 z C_i^2 (a_i^2/2)^{-1/6} -$$

— дисперсия дрожания изображения источника плоской волны на прямой трассе [6], $\Omega_i = \frac{ka_i^2}{z}$ — число Френеля приемной линзы с эффективным радиусом a_i (в (1) верхний знак (плюс) относится к случаю отражения от плоского зеркала, нижний знак (минус) — от уголкового отражателя). Из (1) при $\Omega_i \gg 1$ (прием на линзу больших размеров) следует [5, 7, 8]:

в случае плоского зеркала —

$$\sigma_i^2 = 2\sigma_{i,пл}^2(2z) = 4\sigma_{i_0}^2, \quad (2)$$

в случае уголка —

$$\sigma_i^2 \equiv 0. \quad (3)$$

Таким образом, корреляция прямых и отраженных волн приводит в случае отражения от плоского зеркала к учетверению дисперсии дрожания изображения по сравнению с прямой трассой, а в случае отражения от уголка — к полной компенсации случайных смещений оптического изображения. Эти результаты имеют ясную физическую интерпретацию. Известно [6], что случайные смещения изображения в плоскости резкого изображения приемной линзы обусловлены случайными поворотами фазового фронта волны. Если протяженный источник заменить интерферометром с соответствующей базой, то случайные повороты фазового фронта волны приведут к разности фаз в щелях интерферометра $\Delta\varphi$, а дисперсия случайных смещений σ_α^2 будет пропорциональна $(\Delta\varphi)^2$. Найдем разность фаз для точек 1 и 2 (рис. 1). В случае прямого распространения $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, где φ_1 и φ_2 — соответственно приращения фаз для точек 1 и 2 после однократного прохождения трассы. В случае двухкратного прохождения среды с отражением строго назад приращение фазы будет $2\varphi_1$ в точке 1 и $2\varphi_2$ в точке 2, когда отражение происходит от плоского зеркала, и $\varphi_1 + \varphi_2$ в точке 1 и $\varphi_2 + \varphi_1$ в точке 2, когда отражение происходит от уголка. Тогда разность фаз равна $2\varphi_1 - 2\varphi_2 = 2\Delta\varphi$, а дисперсия $\sigma_\alpha^2 \sim 4(\Delta\varphi)^2$ в случае плоского зеркала, и $(\varphi_1 + \varphi_2) - (\varphi_2 + \varphi_1) \equiv 0$, а дисперсия $\sigma_\alpha^2 \equiv 0$ в случае уголка.

Из выражения (1) следует, что декорреляция прямых и отраженных волн приводит к уменьшению при отражении от плоского зеркала и к увеличению при отражении от уголкового отражателя дисперсии дрожания изображения до величины, определяемой суммой дисперсий дрожания изображения на трассах «источник — отражатель» и «отражатель — приемник», т.е. до $\sigma_{пр}^2 + \sigma_{отр}^2$, при этом характер зеркального отражения (т.е. тип зеркального отражателя) оказывается несущественным.

Экспериментальное исследование влияния разноса осей прямого и отраженного пучков на их взаимную корреляцию проводилось в случайно-неоднородной среде с использованием установки [9], моделирующей условия развитой конвективной турбулентности. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 2. Коллимированный лазерный пучок ($\lambda = 0,63$ мкм) размером на уровне e^{-1} $a = 0,3$ см, дважды (до и после отражения) прошедший слой турбулентной среды $z = 2$ м, фокусировался объективом с фокусным расстоянием $F = 40$ см. Смещения центра тяжести оптического пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях x , y в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, измерялись с использованием поисково-следающего устройства, выполненного на основе передающей телевизионной трубки-диссектора. Фотокатод диссектора устанавливался в фокальной плоскости объектива. Принцип действия таких устройств подробно описан в [10]. Дисперсии смещения локационного изображения по координатам σ_x^2 и σ_y^2 оценивались одновременно двухканальным дисперсиометром с динамическим диапазоном не ниже 40 дБ. Время усреднения каждой реализации ~ 5 мин. Измерения проводились с двумя типами отражателей: плоским зеркалом и 90-градусной призмой. Призма осуществляет поворот на 180° поля волны в направлении, перпендикулярном главному ребру призмы. В направлении, параллельном главному ребру, призма как отражатель идентична плоскому зеркалу. Конструкция установки обеспечивала возможность менять высоту лазерного луча над нагретой поверхностью. Формирование плоской волны в пучке обеспечивалось выполнением условия $ka^2/z \gg 1$. Эксперимент проводился в условиях слабых флуктуаций интенсивности, когда случайные смещения центра тяжести изображения в основном были обусловлены угловыми блужданиями пучка как целого.

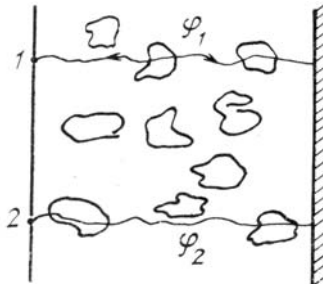


Рис. 1. Схема, поясняющая физический механизм эффекта взаимной корреляции прямой и отраженной волн

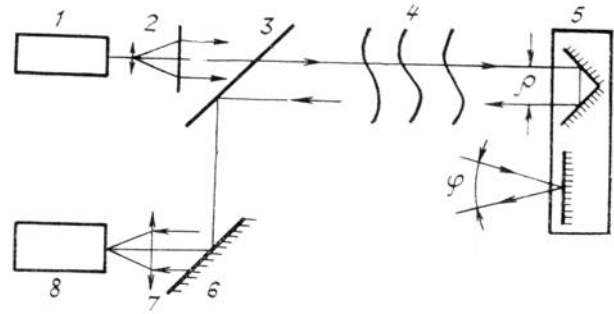


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — лазер ЛГ-38; 2 — коллиматор; 3 — светоделительная пластина; 4 — слой неоднородной среды; 5 — отражатели; 6 — зеркало; 7 — приемный объектив; 8 — следящее устройство

Уровень корреляции прямой и отраженной волны в случае отражения от плоского зеркала определяется отношением дисперсии флуктуаций изображения источника при разнесе осей пучков на угол φ к дисперсии при $\varphi = 0$, а в случае отражения от призмы — отношением дисперсии флуктуаций изображения по координате x в зависимости от разноса осей пучков в горизонтальной плоскости ρ к дисперсии флуктуаций по координате y при $\rho = 0$. Ребро призмы устанавливалось параллельно вертикальной оси y .

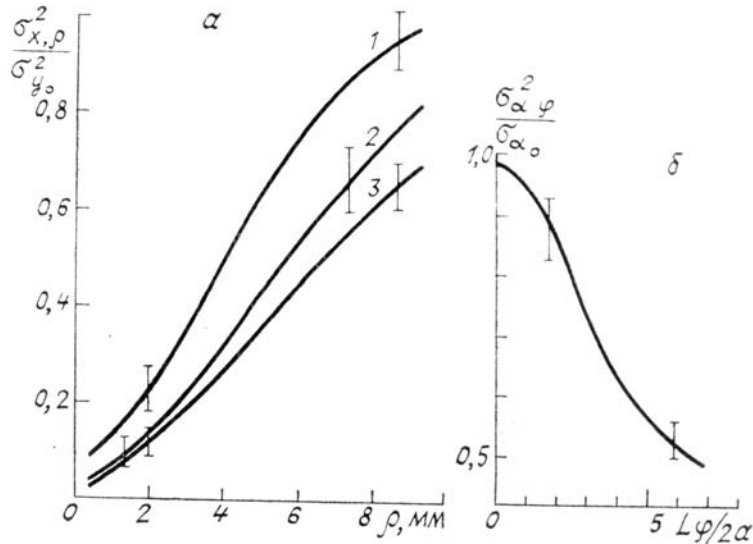


Рис. 3. Зависимость смещения локационного изображения источника от разноса осей при отражении от призмы (а), при отражении от плоского зеркала (б)

На рис. 3,а приведены результаты измерения пространственной корреляции случайных смещений локационного изображения при отражении от призмы. Измерения проводились над нагреваемой поверхностью на высоте 6 см (кривая 1), 14 см (кривая 2) и 22 см (кривая 3). При $\rho = 0$, когда оси прямого и отраженного пучков совпадают, происходит эффект самокомпенсации для горизонтальных смещений, дисперсия смещений σ_x^2 — минимальная. При разнесе осей ($\rho > 0$) корреляция волновых полей нарушается, с ростом разноса растет дисперсия горизонтальных смещений. Для каждой высоты дисперсия вертикальных смещений остается практически постоянной и равной $4\sigma_{y,пл}$ в пределах разноса пучков $\rho \leq 2a$. Из рисунка видно, что от высоты луча над нагреваемой поверхностью зависит остаточный уровень флуктуации при $\rho = \text{const}$ и скорость разрушения корреляции волновых полей при увеличении ρ . Эти моменты можно объяснить влиянием турбулентных характеристик среды, т.к. известно [6, 11], что в конвективном потоке значение структурной постоянной показателя преломления C_n^2 уменьшается пропорционально $h^{-4/3}$, а внешний масштаб турбулентности L_0 пропорционален высоте. Известно [5], что дисперсия случайных смещений локационного изображения зависит от L_0 . Анализ зависимости $\sigma_t^2 \sim f(L_0)$ при больших значениях внешнего масштаба турбулентности ($L_0^2 / a_t^2 > 1$) показывает, что в случае уголка $\sigma_t^2 \sim (L_0^2 / a_t^2)^{-13/6}$. Этим и объясняется более высокий остаточный уровень флуктуаций при $\rho = \text{const}$ на высоте 6 см по сравнению с другими высотами (14

и 22 см). При одинаковом сдвиге осей наиболее быстро эффект ослабления флуктуаций пропадает для пучков на высоте 6 см. На линейном участке кривых ($\rho < 2a$) значения отношения $\frac{\sigma_{x,p}^2}{\sigma_{y_0}^2}$ пропорциональны h^{172} с точностью 10%, что указывает на зависимость уровня корреляции от величины внешнего масштаба L_0 .

При вертикальном разnose пучков (ребро призмы параллельно горизонтальной оси) в пределах погрешности измерений не было отмечено зависимости уровня корреляции случайных смещений локационного изображения от высоты распространения пучков.

На рис. 3, б приведены результаты измерений отношения $\frac{\sigma_\phi^2}{\sigma_0^2}$ при отражении пучка от плоского зеркала. Измерения проведены на высоте 14 см. При отражении строго назад ($\phi = 0$) происходит эффект учетверения случайных смещений ($\sigma_{\alpha_0}^2 = 4\sigma_{\alpha,пл}^2$), который пропадает при увеличении угла ϕ , в нашем эксперименте при $\phi \sim 10\frac{a}{z}$ дисперсия флуктуаций центра тяжести локационного изображения была равна значению дисперсии на удвоенной трассе.

Приведенные в статье экспериментальные результаты показывают что даже при $\beta_0^2 \ll 1$ и $\Omega \gg 1$ эффект усиления (ослабления) флуктуаций смещения изображений источника при отражении от плоского зеркала (призменного отражателя) уменьшается при разnose осей падающего и отраженного пучков и полностью пропадает при горизонтальном разnose ρ , равном размеру пучков $2a$, и при угловом разnose $\phi \geq 10\frac{a}{z}$.

1. Виноградов А.Г., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. //Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 7. С. 1064–1070.
2. Кравцов Ю.А., Саичев А.И. //УФН. 1982. Т. 137. Вып. 3. С. 501–527.
3. Адаптация в информационных оптических системах /И.Н. Матвеев, А.Н. Сафронов, И.Н. Троицкий и др. /Под ред. Н.Д. Устинова. М.: Радио и связь, 1984. 344 с.
4. Majumdar A.K., Gamo H. //Appl. Opt. 1982. V. 21. № 12. P. 2229–2235.
5. Аксенов В.П., Банах В.А., Чен Б.Н. //Оптика и спектроскопия. 1984. Т. 56. Вып. 5. С. 864–868.
6. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 278 с.
7. Миронов В.Л., Носов В.В. //Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 10. С. 1530–1533.
8. Лукин В.П., Сазанович В.М., Слободян С.М. //Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 6. С. 721–729.
9. Лукин В.П., Сазанович В.М. //Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. XIV. № 11. С. 1212–1215.
10. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. М.: Радио и связь, 1984. 136 с.
11. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 639 с.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
27 января 1989 г.

V.M. Sazanovich, S.M. Slobodyan, B.N. Chen. The Experimental Investigation of the Correlation between the Direct and Specular Reflected Waves.

The paper presents the results of the experimental investigation of the influence of the correlation between the direct and reflected beam fields in the location scheme of radiation propagation through the random inhomogeneous media on the variance of image jitter. The «self-cancellation» effect in the case of radiation reflection from a 90° prism and fluctuation amplification effect in the case of radiation reflection from a plane mirror are shown to be dependent on the spacing between the beams axes.