

В. А. Гартаковский, Н. Н. Майер

ДИСЛОКАЦИИ ФАЗЫ И ФОКАЛЬНЫЕ ПЯТНА

Дислокации фазы и связанные с ними нули модуля волновой функции, по всей видимости, являются следствием использования комплексной модели волны в виде аналитического сигнала Д. Габора. Но наблюдаемые [1] вокруг возможных нулевых точек азимутальные колебания и сопутствующий им перенос энергии, а также дихотомия интерференционных полос свидетельствуют о появлении качественно новых и более сложных свойств волнового процесса безотносительно к какому-либо способу определения его фазы и огибающей. В данной работе изучается еще одно объективное проявление этого усложнения – фокальные пятна, образуемые волной с дислокациями после прохождения Фурье-линзы.

Дислокации фазы световой волны изучались при ее распространении в случайно-неоднородной среде в квазимонохроматическом и параболическом приближении. Применялась известная численная модель [2] для решения волнового уравнения методом расщепления с использованием быстрого преобразования Фурье по алгоритму Синглтона. Гауссов пучок и его спектр пространственных частот аппроксимировались периодическими функциями в виде двумерных матриц отсчетов. Порядок матриц был равен 90, что гарантировало взаимно однозначное соответствие дискретного представления исследуемому непрерывному процессу.

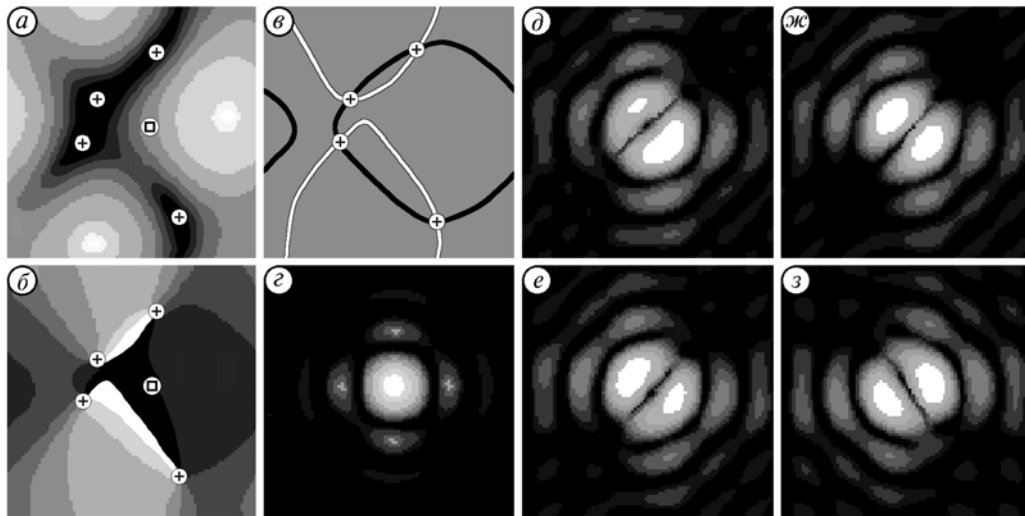


Рис. 1. Дислокации фазы первого порядка и формируемые ими фокальные пятна. Символы (+) обозначают нули интенсивности и точки зарождения дислокаций. Белый цвет – ↑, черный цвет – ↓, фокальные пятна – в логарифмическом масштабе. *a* – интенсивность волны, *b* – фаза волны, *c* – нулевые линии действительной части (черные) и мнимой части (белые) волновой функции, *d* – фокальное пятно от субапертуры, обозначенной символом (□) на *a* и *b*, без дислокаций в ней. Фокальные пятна, когда точки дислокаций находятся в следующих субапертурах (+): *d* – верхняя левая, *e* – нижняя левая, *ж* – верхняя правая, *з* – нижняя правая

Случайно-неоднородная среда моделировалась с помощью спектральной плотности поля показателя преломления степенного типа, соответствующего атмосферной турбулентности, при этом использовались два фазовых экрана. Закон сохранения энергии выполнялся в модели с машинной точностью. Спектральная плотность фазовых флуктуаций F_s светового пучка и другие параметры модели были следующие:

$$F_s(\chi) = 0,489 r_0^{-5/3} (\chi^2 + \chi_0^2)^{-11/6}, \quad \chi_0 = 2\pi/L_0, \quad L_0 = 1 \text{ м}, \quad L = 3 \text{ км},$$

$$r_0 = \left\{ 0,423 k^2 \int_L C_n^2(l) dl \right\}^{-3/5} = 0,05 \text{ м}, k = 2\pi/\lambda, \lambda = 0,6328 \text{ мкм}.$$

Здесь r_0 – радиус когерентности Фрида; L_0 – внешний масштаб турбулентности; L – длина трассы; k – пространственная частота; λ – длина волны; k – волновое число; C_n^2 – структурная постоянная показателя преломления.

Наличие дислокации определялось путем подсчета градиента фазы между соседними точками на замкнутом контуре вокруг анализируемой точки функции фазы. Дислокация считалась найденной, если градиент фазы был $\geq 2\pi$ или $\leq -2\pi$.

Как видно из рис. 1,а, дислокации фазы появляются в точках, где интенсивность достигает минимума. Эти точки соответствуют нулям волновой функции, в их окрестности фаза изменяется спирально. По всей длине границ между черным и белым на рис. 1,б, между двумя точками зарождения дислокаций, фазовая поверхность терпит разрыв на величину 2π . Разрыв неустраим за счет поступательных перемещений фрагментов поверхности.

Эти дислокации имеют первый порядок. Фокальные пятна от них (рис. 1,д – з) существенно отличаются от фокального пятна, образованного волной без дислокаций (рис. 1,с). Пятна от волны с дислокациями имеют больший размер и образуют дублет. Ранее уже был обнаружен [3] двухмодовый характер распределения интенсивности в фокусе субапертуры датчика Гартмана при появлении дислокации в опорном пучке. Линия минимумов между двумя частями дублета направлена по касательной к линии нулей мнимой части волновой функции (рис. 1,в).

Если волновую функцию возвести в квадрат, то дислокации также повысят свой порядок. Такое преобразование было применено к той же самой волновой функции с дислокациями первого порядка. Результат показан на рис. 2. Оказалось, что дислокации фазы второго порядка обладают следующими свойствами:

- фокальные пятна от субапертур с такими дислокациями образуют триплеты (рис. 2,д – з);
- линии нулей действительной и мнимой частей волны пересекаются в точках возникновения дислокаций дважды (рис. 2,в,г);
- набег фазы при обходе точки возникновения дислокации составляет $\pm 4\pi$ (рис. 2,б).

Был проведен эксперимент для обнаружения естественных дислокаций фазы второго порядка для волны, распространяющейся в линейной случайно-неоднородной среде. Условия распространения и модель среды оставались прежними. Дислокации фазы второго порядка обнаруживались по перечисленным выше признакам. Они возникают, когда волна имеет достаточно широкий спектр пространственных частот, что проявляется в сближении и соединении линий нулей.

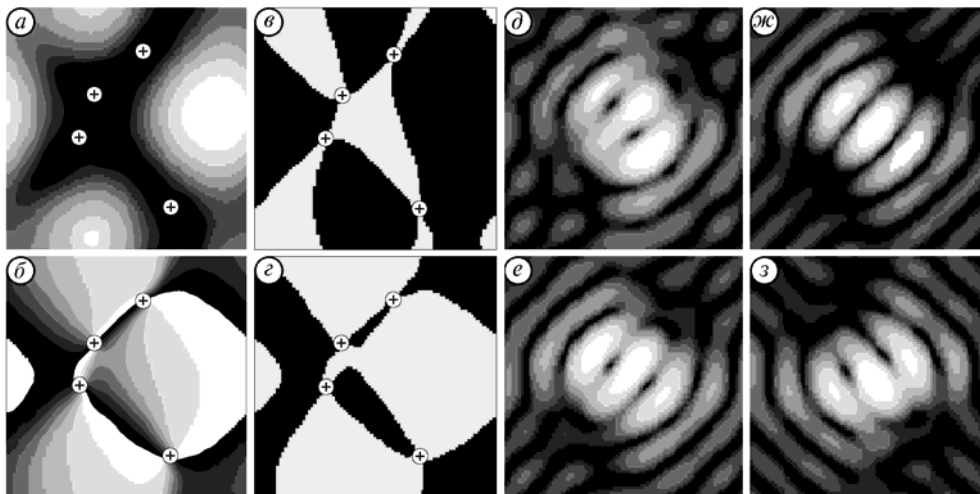


Рис. 2. Дислокации фазы второго порядка и формируемые ими фокальные пятна. Символы (+) обозначают нули интенсивности и точки зарождения дислокаций. Белый цвет – \uparrow , черный цвет – \downarrow , фокальные пятна – в логарифмическом масштабе. а – интенсивность волны, б – фаза волны, в – мнимая часть волновой функции, г – действительная часть волновой функции. Фокальные пятна, когда точки дислокаций находятся в следующих субапертурах (+): д – верхняя левая, е – нижняя левая, ж – верхняя правая, з – нижняя правая

Интересно, что дислокация второго порядка образовалась без пары того же порядка, но в окружении дислокаций первого порядка (рис. 3). Из этого факта следует, что дислокация второго порядка может рассматриваться как объединившаяся пара дислокаций первого порядка.

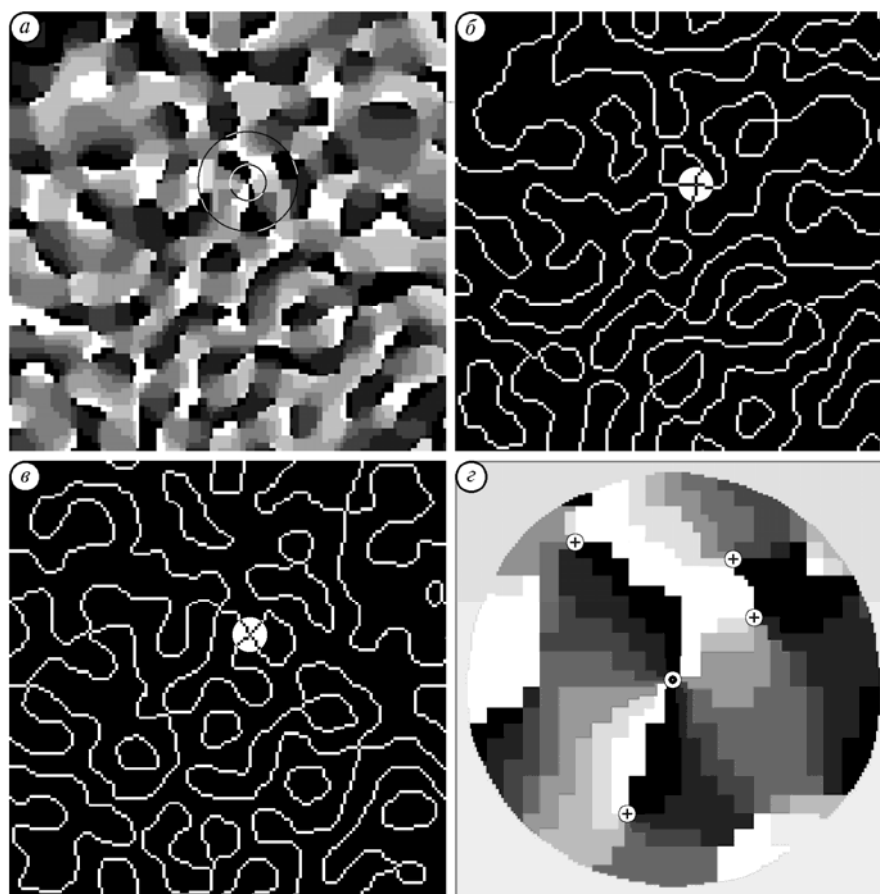


Рис. 3. Дислокации фазы второго порядка в неоднородной среде. *a* – случайная фаза волновой функции, *б* – нулевые линии действительной части волновой функции и мнимой части волновой функции – *в*. Большой круг на *a* увеличен на *г*. Точка фазовой дислокации второго порядка находится в кружках с обратным контрастом (*б, в*) и в центре (*г*). Символами (+) отмечены точки зарождения дислокаций фазы первого порядка

Наличие явных дублетов или триплетов в пространственных спектрах поля с дислокациями фазы позволяет предложить двухволновую или, соответственно, трехволновую модель для представления такого поля.

Оценивалась ширина фокальных пятен в зависимости от интенсивности турбулентности, когда дислокации фазы присутствовали в субапертуре, когда они отсутствовали, и совместно в обоих упомянутых случаях.

Оценки вычислялись как среднее значение, число экспериментов изменялось от двадцати до трехсот в зависимости от наличия точек дислокаций в субапертуре при проведении численного эксперимента.

Результаты приведены на рис. 4, *a, б*. Там наблюдается монотонный рост ширины фокальных пятен или ширины спектра пространственных частот волны с дислокациями во всем диапазоне изменения радиуса Фрида (от слабых до сильных флуктуаций интенсивности). Это подтверждает достаточность используемого числа отсчетов для представления волны.

Тенденция к насыщению ширины фокальных пятен от субапертуры без дислокаций говорит о большой вероятности появления дислокаций после достижения пространственным спектром волны определенной ширины.

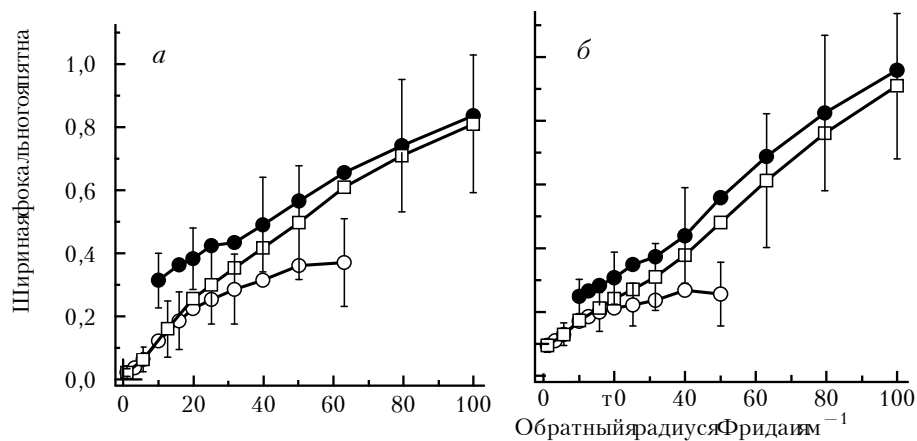


Рис. 4. Оценки размера фокальных пятен в зависимости от интенсивности турбулентности. Ширина пятна нормирована на диаметр субапертуры. Отношения размера субапертуры к порядку матрицы: 0,05 для *a*, 0,1 для *б*. ● — оцениваются только субапертуры с дислокациями, □ — оцениваются все субапертуры, ○ — оцениваются только субапертуры без дислокаций. В качестве доверительных интервалов указаны стандартные отклонения. Число экспериментов изменялось от 20 до 300

1. Майер Н. Н., Тартаковский В. А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 3. С. 448–454.
2. Коняев П. А., Лукин В. П. // Известия вузов. Физика. 1983. № 2. С. 79–89.
3. Лукин В. П., Фортес Б. В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 9. С. 435–447.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
10 июля 1996 г.

Tartakovskii V. A., Mayer N. N. **Focal Spot in the Presence of Phase Dislocations.**

Phase dislocations and the corresponding zeros of the wave function modulus are most likely due to the use of the wave complex model in the form of D. Gabor analytical signal. However, the azimuth oscillations observable about possible zero points [1] and the concomitant energy transfer as well as the dichotomy of interference fringes demonstrate the appearance of new and more complicated properties of the wave process irrespectively the way of its phase and envelope determination. One more objective manifestation of that complication appearance are the focal spots formed by a wave with dislocations passed through the Fourier lens, which is studied in the paper.