

П.А. Коняев, В.П. Лукин, С.Ю. Табакаев

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

На основе методов численного моделирования исследуется распространение волн в турбулентной атмосфере с отражением от зеркального объекта конечных размеров. Рассматриваются флуктуационные характеристики фазы гауссовского пучка. Основное внимание при этом уделяется эффекту усиления фазовых флуктуаций.

Актуальность исследования амплитудно-фазовых характеристик отраженных волн обусловлена как необходимостью решения прикладных задач, таких как задачи адаптивной оптики, так и изучением физики процессов взаимодействия распространяющегося излучения с неоднородной средой.

Адаптивные системы, использующие принцип обратимости, реализуют оптическую обратную связь, принимая отраженные от объекта или специального отражателя волны. В частности, системы фазового сопряжения осуществляют управление излучателем, используя результаты измерений фазы отраженной волны. Таким образом, изучение фазовых характеристик волн, прошедших одну и ту же атмосферную трассу дважды — в прямом и обратном направлениях, является необходимым при создании систем адаптивной атмосферной оптики.

Среди теоретических методов исследования подобных задач наряду с аналитическими существенную роль начинают играть методы численного моделирования на ЭВМ процессов распространения волн в неоднородных средах. При наличии достаточно мощного компьютера такой подход позволяет проводить исследования в труднодоступных для аналитических расчетов областях изменения параметров турбулентности, а также учитывать конечные физические размеры отражателей, варьировать в широких пределах функцию освещения объекта, его отражательные свойства и т. д.

В опубликованных ранее работах, посвященных изучению фазовых характеристик отраженных волн, теоретический анализ проводился в рамках методов плавных возмущений и Гюйгенса — Кирхгофа [1–2]. В настоящей статье приводятся результаты численного моделирования распространения волн в турбулентной атмосфере с отражением от объекта типа зеркального отражателя конечных размеров.

Уравнение квазиоптики для скалярной монохроматической волны,

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} + k^2 n \right] U,$$

где n — флуктуации поля показателя преломления, решалось модифицированным методом расщепления с применением алгоритма БПФ по смешанному основанию. Поле отраженной волны находилось из решения этого же уравнения с обратным знаком у z , с граничными условиями, учитывающими функцию отражения. Флуктуации показателя преломления среды генерировались на ЭВМ в виде последовательности δ -коррелированных по z двумерных фазовых экранов со спектральной плотностью степенного типа.

Амплитудно-фазовые характеристики прямой и отраженной волн и, в частности, поперечное распределение средней интенсивности, дисперсии флуктуаций интенсивности и структурной функции фазы исследовались методом статистических испытаний путем усреднения по реализациям решений динамической части задачи. Число реализаций варьировалось от 30 до 120 в зависимости от интенсивности флуктуаций.

Основной целью проведенных вычислений является изучение флуктуационных характеристик фазы гауссовского пучка, и в первую очередь — эффекта усиления фазовых флуктуаций на трассе с отражением. Расчетной характеристикой является структурная функция фазы, вычисленная как в плоскости отражателя, так и в плоскости приемника, совпадающей с плоскостью излучателя. Характеризует эффект усиления фазовых флуктуаций отношение этих функций.

Расчеты проводились для круглого зеркального отражателя, радиус которого был равен 1 и 2 зонам Френеля, при различных значениях турбулентности. Эти коэффициенты усиления фазовых флуктуаций даны на рис. 1 и 2.

Анализируя полученные здесь результаты, следует отметить следующее:

- поведение коэффициента усиления фазовых флуктуаций зависит как от величины разности точек наблюдения, так и от интенсивности турбулентности и от величины отражателя;
- для точек наблюдения $r > 2a_0$ имеет место насыщение кривых усиления фазовых флуктуаций;
- кривая усиления имеет два характерных участка поведения: степенной рост и участок насыщения;
- в области насыщения коэффициент усиления характеризует отношение соответствующих дисперсий флуктуаций фазы;

– в области сильных флуктуаций интенсивности (см. рис. 1 и рис. 2, кривые 3 и 4) усиления фазовых флуктуаций на трассе с отражением нет ($D_{SR} \cong 2D_{SF}$);

– в области слабых флуктуаций интенсивности (кривые 1 на рис. 1 и 2) усиление флуктуаций фазы (для $\gamma > a_0$), выше для меньшего отражателя, для малых разносов ($\gamma < 0,5a_0$) нарастание усиления также происходит быстрее для отражателя меньшего размера;

– в области промежуточных флуктуаций ($\beta_0^2 = 0,6-0,7$, кривая 2) поведение кривой усиления в целом то же, что и в, области слабых флуктуаций.

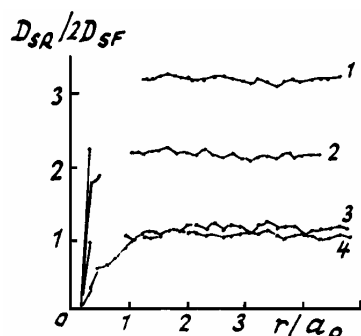


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления фазовых флуктуаций от разноса точек наблюдения. Размер отражателя равен одной зоне Френеля

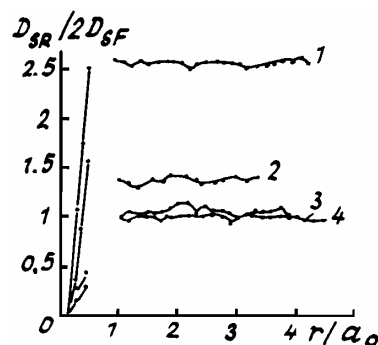


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления фазовых флуктуаций от разноса точек наблюдения. Размер отражателя равен двум зонам Френеля

В таблице приведены соответствия номера кривых на рисунках, интенсивности турбулентности β_0^2 и отношения радиуса Фрида r_0 , и начального размера пучка a_0 .

| Номер кривой | r_0/a_0 | β_0^2 |
|--------------|-----------|-------------|
| 1 | 1,11 | 0,11 |
| 2 | 0,39 | 0,62 |
| 3 | 0,18 | 2,31 |
| 4 | 0,16 | 3,20 |
| 1 | 0,81 | 0,18 |
| 2 | 0,37 | 0,69 |
| 3 | 0,27 | 1,24 |
| 4 | 0,18 | 2,88 |

Можно ли корректно сопоставить эти результаты с теми, что получились ранее? Сделать это достаточно сложно, поскольку, например, в [1] рассматривались отражения оптических волн от бесконечного отражателя при использовании приближенного метода плавных возмущений. Поэтому корректно можно сопоставить с [1] только кривые 1 рис. 1 и 2. Из сопоставления этих кривых 1 видно, что с ростом размера отражателя усиление уменьшается. На наш взгляд, при бесконечном отражателе усиление (в области слабых флуктуаций) будет равно 2. При уменьшении отражателя (в пределе — отражающая точка) будет иметь место усиление порядка $10/3$ раз.

Однако для более серьезных выводов требуется более корректное сопоставление аналитических расчетов, что предполагается в дальнейшем.

1. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика /Новосибирск: Наука, 1986. 286 с.
2. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 270 с.
3. Коняев П. А. //Прикладное мат. обеспечение. Новосибирск: Наука, 1984.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
г. Томск

Поступила в редакцию
27 сентября 1991 г.

P. A. Konyayev, V. P. Lukin, S. Yu. Tabakaev. **Numerical Simulation of the Phase Properties of Waves Reflected from the Atmosphere.**

Using numerical simulation methods the propagation of waves through the turbulent atmosphere, including those specularly reflected from finite objects, is studied. The fluctuation characteristics of a Gaussian beam phase are analyzed. Mainly the attention is paid to the effect of the phase fluctuation amplification.