

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЕ С ТЕПЛОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

А.Н. Стародумов, И.М. Узунов

Найдена область параметрического усиления амплитудных флуктуаций поля при распространении короткого импульса излучения в турбулентной среде с тепловой нелинейностью.

Распространение мощного излучения в случайно-неоднородной среде сопровождается совместным проявлением тепловых и турбулентных искажений поля /1/. В /2, 3/ показано, что плоская волна в условиях нестационарного теплового самовоздействия теряет устойчивость относительно начальных возмущений при больших значениях самонаведенного набега фазы. В настоящей работе впервые рассмотрено развитие искажений короткого импульса (с длительностью $t_u \ll \rho_0/v$, где ρ_0 — наименьший размер неоднородностей поля, v — скорость звука) в турбулентной среде с тепловой нелинейностью. Найдена область параметрического усиления и получено аналитическое выражение для дисперсии амплитудных флуктуаций поля.

В малоугловом приближении анализируется пространственно-временное развитие искажений первоначально когерентного пучка с амплитудой E_0 в турбулентной среде. Пространственно-однородные и изотропные флуктуации диэлектрической проницаемости $\epsilon(\vec{r})$ распределены по нормальному закону со спектральной плотностью /4/:

$$\Phi(q) = 0,033C_\epsilon^2 q^{-11/3} \exp[-(q/q_m)^2],$$

где C_ϵ^2 — структурная постоянная, $q_m = 5,92/l_0$, l_0 — внутренний масштаб турбулентности ($l_0 \gg \lambda$). Нелинейная добавка к диэлектрической проницаемости среды при нестационарном тепловом самовоздействии короткого импульса определяется соотношением /3/:

$$\delta\epsilon = a \int_0^t dt_1 \int_0^{t_1} (t_1 - t_0) \Delta_\perp |E|^2 dt_0,$$

где a — множитель, пропорциональный коэффициенту поглощения излучения. Рассматриваются широкие пучки, такие, что дифракционным и нелинейным расплыванием пучка можно пренебречь: $z \ll ka^2$, $\beta = k^2 a |E_0|^2 t_u^3 \ll 1$, где a — ширина пучка, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Влияние поперечных размеров пучка на развитие искажений не учитывается. Предполагается, что флуктуации $\epsilon(\vec{r})$ и вызываемые ими флуктуации амплитуды поля малы.

В рамках метода плавных возмущений /4/ изменение флуктуаций Φ_1 комплексной фазы $\Phi = \chi + i\eta$ поля $E = E_0 e^{\Phi}$ описывается линеаризованным уравнением:

$$2ik \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} + \Delta_\perp \Phi_1 + 2k^2 a |E_0|^2 \int_0^t dt_1 \int_0^{t_1} (t_1 - t_0) \Delta_\perp (\Phi_1 + \Phi_1^*) dt_0 = k^2 \epsilon(\vec{r}).$$

Анализируется угловой спектр флуктуаций уровня $F(\vec{q}) = \langle \tilde{\chi}(\vec{q}) \tilde{\chi}(\vec{q}) \rangle$ и относительная дисперсия флуктуаций уровня $\sigma_\chi^2 = \langle \chi(\vec{r}) \chi(\vec{r}) \rangle$, где $\tilde{\chi}(\vec{q})$ — фурье-образ функции $\chi(\vec{r})$ по поперечным координатам. Продольный радиус корреляции поля (вдоль направления распространения) считается много больше продольного радиуса корреляции флуктуаций $\epsilon(\vec{r})$, что позволяет использовать марковское приближение для описания флуктуаций $\epsilon(\vec{r})$ /4/.

Развитие искажений плоской волны в турбулентной нелинейной среде обусловлено двумя факторами. Во-первых, нарастают амплитудные и фазовые искажения за счет линейных процессов многократного рассеяния. Во-вторых, возможно параметрическое усиление или ослабление возмущений в поле мощной волны E_0 . На начальном этапе распространения флуктуации излучения обусловлены в первую очередь рассеянием на турбулентных неоднородностях диэлектрической проницаемости. Влияние нелинейности сводит

ся к несущественному уменьшению дисперсии флуктуаций уровня по сравнению с линейной средой:

$$\sigma_{\chi}^2 = \sigma_L^2 [1 - O(\beta)] = 0,033C_{\epsilon}^2 k^{7/6} z^{11/6} [1 - O(\beta)].$$

С увеличением расстояния при $z > z_H = k/q_m^2 \beta$ происходит параметрическое усиление высоких пространственных частот в спектре возмущений. В спектре $F(q)$ наблюдаются две характерные области пространственных частот. В области частот $q < q_{\Phi} \beta^{-1/2}$, где $q_{\Phi} = (k/z)^{1/2}$ влияние нелинейности не сказывается на развитии спектральных амплитуд возмущений. В области $q_{\Phi} \beta^{-1/2} < q < q_m$ спектральные амплитуды возмущений нарастают $\propto \exp [3,2 (q^2 \beta / q_m^2)^{1/4}]$. Нижняя граница области неустойчивых частот $q_H = q_{\Phi} \beta^{-1/2}$ убывает с ростом z пропорционально $z^{-1/2}$.

Следует отметить, что в линейной турбулентной среде основной вклад в флуктуации уровня вносит область пространственных частот вблизи q_{Φ} . Развитие неустойчивости при $\beta \ll 1$ происходит в области более высоких пространственных частот $q > q_{\Phi} \beta^{-1/2}$, что приводит к дополнительному уширению пучка по сравнению с турбулентной средой. В спектре $F(q)$ области пространственных частот, существенные для многократного рассеяния и параметрического усиления возмущений, разделяются. Дисперсия флуктуаций

уровня $\sigma_{\chi}^2 \propto \int_0^{q_m} F(q) dq$ определяется суммой дисперсий флуктуаций вследствие рассеяния на турбулентных неоднородностях и усиления искажений в поле мощной волны:

$$\sigma_{\chi}^2 = \sigma_L^2 + 0,3C_{\epsilon}^2 k^{7/6} z^{11/6} \beta^{5/6} \exp [3,2 (z/z_H)^{1/4}].$$

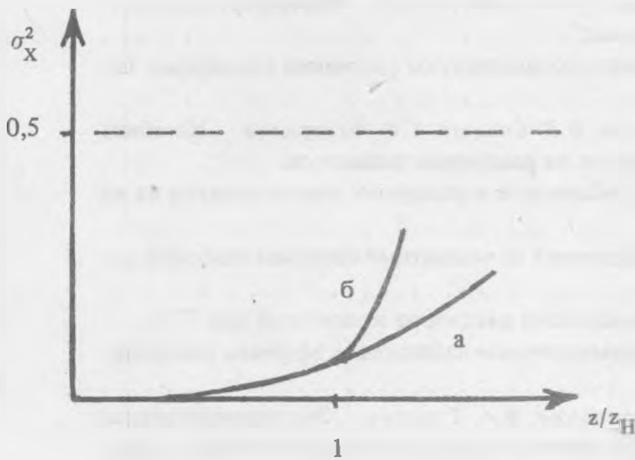


Рис. 1. Зависимость относительной дисперсии флуктуаций уровня от расстояния для линейной среды (а) и среды с тепловой нелинейностью (б).

На рис. 1 представлена зависимость относительной дисперсии флуктуаций от пройденного расстояния в турбулентной среде. При $z < z_H$ сохраняется линейный режим развития искажений. С увеличением расстояния $z > z_H$ основную роль играет процесс усиления турбулентных искажений в поле мощной волны, что приводит к образованию мелкомасштабной структуры в поперечном профиле интенсивности и аномальному уширению пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере, М., Радио и связь, 1981.
2. Гочелашвили К.С., Чашей И.В., Шишов В.И. Квантовая электроника, 7, 2077 (1980).
3. Гочелашвили К.С. и др. Квантовая электроника, 13, 48 (1986).
4. Рытов С.М., Крацов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику, ч. 2, Случайные поля, М., Наука, 1976.