

А. Н. Малахов, А. В. Половинкин, А. И. Саичев. Частичное обращение волнового фронта в случайно-неоднородной среде. При обратном рассеянии или отражении волн в неоднородной среде могут возникать многочисленные каналы когерентности, где в противоположных направлениях распространяются различные компоненты волны. Их взаимная когерентность приводит к специфическим эффектам, отсутствующим для волн, распространяющихся и рассеиваемых преимущественно в одном направлении. Наиболее явно эти эффекты проявляются для отраженных волн, дважды проходящих через одни и те же неоднородности среды, например для оптических волн, отраженных в турбулентной атмосфере. К подобным эффектам относится и эффект частичного обращения, состоящий в том, что поле отраженной волны содержит компоненту, волновой фронт которой в среднем частично обращен по отношению к волновому фронту падающей волны.

Поясним механизм частичного обращения на простейшем примере волны, излучаемой в неоднородной среде двумя взаимно когерентными точечными излучателями, расположенными в точках \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 , и отраженной от точечного отражателя в точке \mathbf{R}_0 (рис. 1). При этом комплексная амплитуда поля отраженной волны в произвольной точке \mathbf{R} равна

$$v(\mathbf{R}) = fg(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) [u_1g(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_0) + u_2g(\mathbf{R}_2, \mathbf{R})];$$

здесь u_1 , u_2 — комплексные амплитуды излученных волн, f — коэффициент отражения, $g(\mathbf{R}', \mathbf{R}'')$ — функция Грина волны. Наличие изображенного на рис. 1 канала когерентности приводит к тому, что поле отраженной волны в окрестности каждого излучателя содержит взаимно когерентные компоненты

$$v_0(\mathbf{R}_1) = fu_2g(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_0) g(\mathbf{R}_2, \mathbf{R}_0),$$

$$v_0(\mathbf{R}_2) = fu_1g(\mathbf{R}_2, \mathbf{R}_0) g(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_0),$$

фазы которых обращены по отношению к начальным фазам излученных волн. Действительно, пусть начальные фазы равны S_1 и S_2 . При распространении волны в противоположных направлениях по одному и тому же каналу когерентности волны приобретают, в силу свойства взаимности, одинаковый фазовый набег S_{12} . Таким образом,

$$v_0(\mathbf{R}_1) \sim \exp[j(S_2 + S_{12})], v_0(\mathbf{R}_2) \sim \exp[j(S_1 + S_{12})].$$

Поскольку $S_2 + S_{12} = -S_1 + S$, $S_1 + S_{12} = -S_2 + S$, то, с точностью до общей фазы $S = S_1 + S_2 + S_{12}$, фазы взаимно когерентных компонент отраженной волны в точках \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 равны соответственно $-S_1$ и $-S_2$, т. е. обращены по отношению к начальным фазам излученных волн.

При наличии в среде большого числа каналов когерентности многочленные компоненты поля с обращенными фазами образуют в поле отраженной волны обращенную компоненту. Пусть, например, в плоскости $x = 0$ турбулентной среды излучается коллимированный пучок радиусом a с комплексной амплитудой $u(\rho)$, а на расстоянии L от него расположен точечный

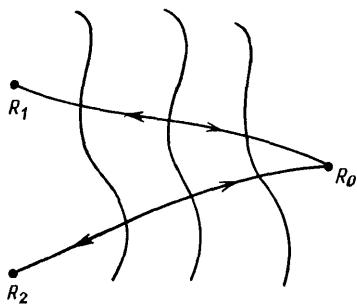


Рис. 1

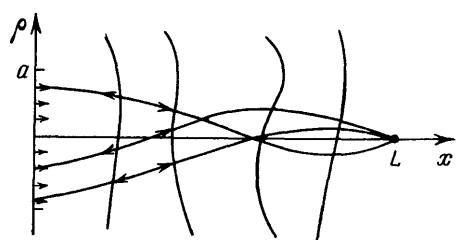


Рис. 2

отражатель (рис. 2), находящийся в области многолучевого распространения излученной волны, где $N = \sigma/\rho_k \gg 1$; здесь ρ_k — радиус когерентности излученной волны в окрестности отражателя, $\sigma = L/k\rho_k$ — характерное поперечное отклонение луча от его траектории в однородной среде. Если $a > \rho_k$, то в поле отраженной волны в окрестности излучателя образуется обращенная компонента, комплексная амплитуда которой при $a < \sigma$ в среднем примерно равна $v_0(\rho) \approx (\rho_k/a)^2 u^*(\rho)$. Если же $a \leq \rho_k$, то обращенная компонента фокусируется, приводя к эффекту усиления средней интенсивности отраженной волны в области излучателя. Эффект усиления средней интенсивности можно наблюдать и при $a > \rho_k$ в фокальной плоскости, совмещенной с излучателем линзы, эффективно фокусирующей малую, но обладающую высокой пространственной когерентностью обращенную компоненту отраженной волны. Подчеркнем, что при $N \gg 1$ обращенная по отношению к излученной компоненте отраженной волны присутствует во всем пространстве между излучателем и отражателем, только вдали от излучателя ее пространственная когерентность, как и когерентность падающей волны, мала. Заметим еще, что многоканальные когерентные эффекты, аналогичные эффекту частичного обращения, должны наблюдаться и в регулярно-неоднородных средах, и при отражении в однородной среде от отражателей сложной формы.

Свойство взаимности волн, следствием которого является эффект частичного обращения, определяет и особенности поведения волн, отраженных от систем фазового сопряжения, например от зеркал, обращающих волновой фронт (зеркал ОВФ). Укажем некоторые из этих особенностей на примере волны от точечного источника (блика), отраженной в турбулентной среде от зеркала ОВФ радиуса a , находящегося на расстоянии L от источника. Если $a > \sigma$, то ширина диаграммы направленности зеркала ОВФ $\sim 1/ka$ меньше угла когерентности ρ_k/L , и происходит практически полная компенсация зеркалом турбулентных искажений отраженной волны. Отраженная волна при этом фокусируется в плоскости излучателя в пятне радиусом L/ka . Если же $a < \sigma$, то полной компенсации влияния неоднородностей среды не происходит. При этом в случае $N \gg 1$ средняя интенсивность отраженной волны в плоскости излучателя состоит из широкого, шириной $\sim \sigma$, пьедестала и узкого пика интенсивности обращенной компоненты отраженной волны. При этом радиус пика $\sim \rho_k < L/ka$. Указанное сужение пика интенсивности, можно трактовать как следствие размытия в турбулентной среде эффективных размеров зеркала ОВФ до радиуса $\sim \sigma$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Саичев А. И./Изв. вузов. Сер. «Радиофизика». 1978. Т. 21. С. 966; Радиотехн. и электрон. 1982. Т. 27. С. 1961.
- Половинкин А. В., Саичев А. И./Изв. вузов. Сер. «Радиофизика». 1981. Т. 24. С. 433; Радиотехн. и электрон. 1984. Т. 29. С. 193.
- Крупник А. Б., Саичев А. И./Изв. вузов. Сер. «Радиофизика». 1981. Т. 24. С. 1234.
- Кравцов Ю. А., Саичев А. И./УФН. 1982. Т. 137. С. 501; ЖЭТФ. 1982. Т. 83. С. 532; Эффекты двукратного прохождения волн в случайно-неоднородных средах: Препринт ИРЭ АН СССР № 20 (198).— Москва, 1984.
- Малахов А. Н., Половинкин А. В., Саичев А. И./Изв. вузов. Сер. «Радиофизика», 1983. Т. 26. С. 579.
- Ахулов Х. С., Кравцов Ю. А./Ibidem. С. 635.
- Крупник А. Б./Радиотехн. и электрон. 1985. Т. 30. С. 625.

[621.378.325 + 551.461(048)]

Л. А. Апресян, Д. В. Власов. Сильные проявления эффектов двукратного прохождения в задачах лазерного зондирования верхнего слоя океана. Широкие возможности применения авиалидерных систем для измерения характеристик верхнего слоя океана (ВСО) связаны с наличием хорошо регистрируемых реперных сигналов молекулярного рассеяния в водной толще (в частности, спонтанного комбинационного рассеяния (СКР)), которое исследовано в лабораторных условиях. Реперные сигналы позволяют независимо от типа и носителя лидара проводить измерения примесей «в пересчете на молекулу воды», и, таким образом, количественно сопоставлять результаты, полученные различными системами. В натурных экспериментах по лазерному зондированию ВСО, выполненных по программе АОЛ¹ (США) на авиалидаре «Чайка»² (ИОФАН) и в ряде других программ, были зарегистрированы аномальные результаты, ставящие под сомнение некоторые важные методики измерений и необъяснимые в рамках широко используемых моделей расчета параметров эхо-сигнала. Анализ этих результатов приводит к выводу о наличии сильных флюктуаций эхо-сигналов, связанных с фокусировками и дефокусировками излучения при двукратном прохождении взволнованной границы раздела вода — воздух.

Так, в рамках обычных моделей времененная развертка реперного сигнала СКР должна монотонно спадать от поверхностных слоев к глубинным. Вместе с тем в экспериментах^{1,2} зарегистрированы немонотонные искажения и гигантские всплески в сигнале СКР. В¹ была обнаружена сильная корреляция флюктуации эхо-сигналов с локальными возмущениями ВСО. В² при записи флюктуации эхо-сигналов с двух глубин в некоторых реализациях наблюдалась устойчивая антикорреляция отсчетов (рис. 1). Эти, а также некоторые другие аномальные экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости учета влияния поверхностного волнения при интерпретации экспериментов по лазерному зондированию ВСО. В общем случае для мощности $P_s(z_s)$ эхо-сигнала, отраженного от изотропных рассеивателей в плоскости z_s , справедливо соотношение $P_s(z_s) \propto \int I_L I_s d^2 \rho_s$, где коэффициент пропорциональности опущен, I_L и I_s — интенсивности излучения в точке рассеяния (z_s , ρ_s) для источника единичной мощности и приемника, работающего как такой источник. Принимаемая мощность $P_s(z_s)$ за счет наличия здесь интеграла по ρ_s при каждом отсчете оказывается частично усредненной по мелкомасштабным флюктуациям интенсивностей $I_{L,s}$, масштабы корреляции которых много меньше характерных размеров области пересечения освещенного и наблюдаемого пятен. При этом $P_s(z_s)$ остается сильно флюктуирующей величиной за счет наличия крупномасштабных флюктуаций, приводящих к изменению поперечного сечения пучка.

При некоторых упрощающих предположениях взволнованную границу раздела можно приближенно заменить плоским фазовым экраном, описывая