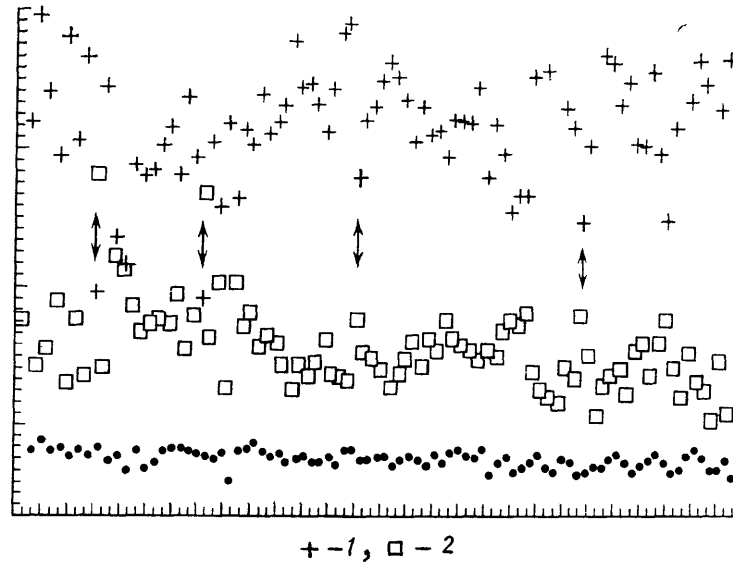


Л. А. Апресян, Д. В. Власов. Сильные проявления эффектов двукратного прохождения в задачах лазерного зондирования верхнего слоя океана. Широкие возможности применения авиалидарных систем для измерения характеристик верхнего слоя океана (ВСО) связаны с наличием хорошо регистрируемых реперных сигналов 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 флуктуации эхо-сигналов, связанных с фокусировками и дефокусировками излучения при двукратном прохождении взволнованной границы раздела вода — воздух.

Так, в рамках обычных моделей временная 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 флуктуации эхо-сигналов с локальными возмущениями ВСО. В² при записи флуктуации 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 флуктуациям 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 флуктуирующей величиной за счет наличия крупномасштабных флуктуации, приводящих к изменению поперечного сечения пучка.

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

излучение в малоугловом приближении волновой теории. Тогда для различных моделей неровной границы раздела можно получить оценки важного для описания экспериментов фактора усиления $\Gamma(z_s)$, равного мощности



Тис. 1. Экспериментальные отсчеты мощности эхо-сигнала с двух глубин² вдоль трассы полета. 1 — P (22 м), 2 — P (11 м).

Стрелками указаны пары точек с наиболее явно выраженной антикорреляцией

$P_s(z_s)$, нормированной на мощность сигнала $P_0(z_s)$, которая отвечает идеализированному случаю плоской границе раздела, а также оценки статистических моментов $\Gamma(z_s)$. В модели, которую можно назвать «однолинзовым приближением», крупномасштабная по сравнению с размером пучка неоднородность приближенно заменяется тонкой линзой, или иначе, квадратичным фазовым корректором.

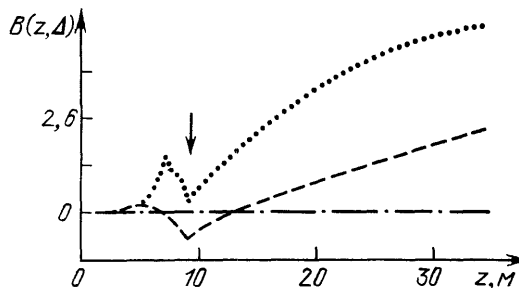


Рис. 2. Расчетная структура корреляционной функции $B(z, \Delta)$ для модели синусоидального поверхностного волнения².

Минимальная глубина фокусирования (~ 9 м) указана стрелкой. Штриховая линия — $\Delta = 8$ м, точки — $\Delta = 2$ м.

При этом в случае гауссовских пучков для фактора усиления $\Gamma(z_s)$ получается явное выражение, зная которое, можно найти также требуемые статистические моменты $\langle \Gamma^n(z_s) \rangle$.

Чтобы разделить влияние мелко- и крупномасштабных флуктуаций, фактор усиления $\Gamma(z_s)$ удобно представить в виде произведения фактора фокусировки $\gamma_f(z_s) = P_{sp}/P_{so}$ на фактор усиления обратного рассеяния

$\gamma_m(z_s) = P_s/P_{sp}$, где γ_f описывает случай разнесенного приема и отвечает независимому усреднению I_L и I_s по мелко- и крупномасштабным флуктуациям. Для совмещенного приема и одинаковых характеристик приемника и излучателя фактор фокусировки по порядку величины равен $\Sigma_0(z_s)/\Sigma(z_s)$ где $\Sigma_0(z_s)$ и $\Sigma(z_s)$ — поперечные сечения пучка без учета и с учетом фокусировки соответственно, и может быть как больше, так и меньше единицы. Фактор $\gamma_m(z_s)$ для совмещенного приема оказывается не меньше единицы и описывает эффект усиления обратного рассеяния на мелко- и крупномасштабных флуктуациях интенсивностей.

На рис. 2 приведены примеры расчетов нормированной корреляционной функции фактора усиления $\Gamma(z_s)$ для двух глубин

$$B(z, \Delta) = \frac{\langle \Gamma(z + \Delta) \Gamma(z) \rangle}{\langle \Gamma(z + \Delta) \rangle \langle \Gamma(z) \rangle}$$

для модели синусоидального поверхностного волнения со случайной фазой (здесь угловые скобки соответствуют статистическому усреднению по крупномасштабным флуктуациям). Существенным является наличие области отрицательных B , что можно использовать для объяснения экспериментальных результатов² с антикорреляцией отсчетов с двух глубин (рис. 1). Действительно, такая антикорреляция связана с наличием между этими глубинами области фокусировок, обусловленной поверхностным волнением, при переходе через которую фокусировка сменяется дефокусировкой.

Указанный подход позволяет получить довольно полное представление о влиянии прохождения границ раздела на характеристики эхо-сигналов и дает качественное объяснение описанным выше экспериментальным результатам. Более строгое количественное описание должно основываться на совместных измерениях характеристик эхо-сигналов и взволнованной поверхности ВСО.

Резюмируя сказанное, заключаем, что учет влияния двукратного прохождения взволнованной границы ВСО необходим для адекватного описания экспериментов по лазерному зондированию. Этот вывод сохраняется и для других аналогичных экспериментальных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H o g e F. E., S w i f t R. N.//Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 3778.
2. В л а с о в Д. В.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. С. 724.