Краткие сообщения по физике № 7-1988 г.

УДК 551.46.07

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

П.В. Григорьев, М.В. Солнцев

Рассматривается возможность определения дисперсии уклонов, средней кривизны морской поверхности, а также непосредственного определения спектра возвышений методом дистанционного лазерного зондирования.

Дистанционное измерение спектра возвышений морской поверхности в широком диапазоне волновых чисел или частот является актуальным для решения различных задач в области физики моря. Дистанционная лазерная диагностика, основанная на зондировании поверхности узким лазерным пучком, дает хорошие возможности для решения этой проблемы. В работе /1/ была предложена методика восстановления параметров модельного спектра морской поверхности. В данной работе обсуждаются возможности определения дисперсии уклонов и средней кривизны поверхности, а также непосредственного определения спектра возвышений без его предварительного моделирования.

Пусть лазерный пучок, распределение интенсивности внутри которого описывается функцией $I(r, \Theta)$ (r – расстояние от оси пучка, Θ – азимутальный угол), падает нормально на морскую поверхность. В горизонтальной плоскости на высоте H над поверхностью расположена диафрагма приемного устройства диаметром D. Расстояние между осями пучка и диафрагмы равно l. Характерный размер зондирующего пучка равен d.

При расчете статистических характеристик мощности эхо-сигнала примем во внимание следующие условия: $m_{20}, m_{02} \ll 1$ – условие малости уклонов, которое обычно выполняется на поверхности моря; $m_{00}^{1/2} \ll H$ – условие дистанционности зондирования; $d/H \ll m_{20}, m_{02}$ – условие однородности формирования сигнала внутри пятна зондирования; $l/H \ll m_{20}, m_{02}$ – условие квазисоосности приемной и передающей оптических систем; $nS \ll 1$ – условие узости пятна зондирования (n – плотность зеркальных точек поверхности, S – площадь пятна зондирования); $DR/H \ll n^{-1/2}$ – условие "дальней" зоны (R – характерное значение модуля радиуса кривизны поверхности). Здесь m_{ij} – моменты пространственного энергетического спектра возвышений поверхности, вычисленные в системе координат, совпадающей с главными осями пространственного спектра.

В этом случае можно показать, что сигнал отражения от поверхности возникает при попадании отдельных зеркальных точек в пятно зондирования.

Мощность эхо-сигнала от зеркальной точки определяется выражением

$$P_S = r_0 I(r, \Theta)\pi D^2/16|\Omega|H^2.$$

Здесь $r_0 = 0{,}02$ – коэффициент отражения поверхности при нормальном падении пучка, Ω – полная кривизна поверхности в этой точке.

Введем также понятие нормированного эхо-сигнала:

$$P_S^0 = \begin{cases} 1, & \text{зеркальная точка внутри пятна зондирования} \\ 0, & \text{зеркальная точка вне пятна зондирования.} \end{cases}$$

В предположении, что морская поверхность является случайным гауссовым полем, нетрудно получить выражение для следующих статистических характеристик P_S и P_S^0.

1. Средняя мощность $\overline{P}_S = a/2\pi(\Delta_2)^{1/2}$.

2. Среднеквадратичное значение мощности $\overline{P}^2_S = (a^2/p_0^2)(|\overline{\Omega^{-1}}|/2\pi(\Delta_2)^{1/2}) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} rI^2(r,\Theta)d\Theta dr$.

3. Среднее значение нормированного сигнала $\overline{P}^0_S = |\overline{\Omega}|S/2\pi(\Delta_2)^{1/2}$.

Здесь $a = r_0\pi D^2 p_0/16H^2$, p_0 – мощность зондирующего излучения, $\Delta_2 = m_{20}m_{02}$ – инвариант поверхности, характеризующий крутизну морских волн и неодномерность их распространения.

Измерение величин $\overline{P}_S$, $\overline{P}^2_S$, $\overline{P}^0_S$ позволяет определить дифференциальное сечение рассеяния поверхности σ^0, значение инварианта $(\Delta_2)^{1/2}$ и средних значений модулей кривизны Ω и обратной кривизны Ω^{-1}:

$$\sigma^0 = (\overline{P}_S/p_0)(\pi D^2/4H^2)^{-1}, \quad (\Delta_2)^{1/2} = a/2\pi\overline{P}_S,$$

$$|\overline{\Omega}| = a\overline{P}^0_S/S\overline{P}_S, \quad |\overline{\Omega^{-1}}| = \overline{P}^2_S p_0^2/a\overline{P}_S \int_0^\infty \int_0^{2\pi} rI^2(r;\ \Theta)d\Theta dr.$$

Непосредственные измерения возвышений морской поверхности можно проводить с помощью фазового лазерного дальномера. Для этого зондирующий пучок модулируется по амплитуде на некоторой частоте f_0. В этом случае задача об определении спектра возвышений сводится к восстановлению статистических характеристик исходного случайного процесса по статистическим характеристикам случайной дискретной выборки, обусловленной появлением зеркальных точек в пятне зондирования.

Пусть $\xi(t)$ – стационарный случайный процесс, описывающий функцию возвышения поверхности во времени (или в пространстве). Дискретизация процесса $\xi(t)$ осуществляется случайной импульсной последовательностью $y(t_i)$, в результате чего образуется случайный процесс $\eta(t) = \xi(t_i)$ при $t_i \leqslant t < t_{i+1}$. Если $y(t_i)$ – пуассоновский процесс со средним периодом следования импульсов τ_0, то спектр преобразованного процесса выражается через спектр исходного процесса $S_\xi(\omega)$ следующим образом /2/:

$$S_\eta(\omega) = \frac{1}{1+\omega^2\tau_0^2}\left(S_\xi(\omega) + \frac{2\tau_0^3}{\pi}\int_0^\infty \frac{\omega'^2 S_\xi(\omega')}{1+\omega'^2\tau_0^2}d\omega'\right).$$

Это выражение показывает, что дискретизация случайного процесса импульсной пуассоновской последовательностью эквивалентна введению в схему измерения спектра фильтра верхних частот с частотой среза $\omega_0 = 1/\tau_0$ и включенного параллельно с источником сигнала генератора "белого" шума со спектральной плотностью

$$S_0 = (2\tau_0^3/\pi)\int_0^\infty \omega'^2 S_\xi(\omega')(1+\omega'^2\tau_0^2)^{-1}d\omega'.$$

Для процессов с ограниченным спектром ($S_\xi(\omega) = 0$ при $\omega > \omega_m$), каким является морское волнение, процедура восстановления следующая:

1. На частоте $\omega_1 > \omega_m$ определяется значение $S_\eta(\omega_1)$.
2. Определяется спектральная плотность "белого" шума $S_0 = S_\eta(\omega_1)(1+\omega_1^2\tau_0^2)$.
3. Восстанавливается спектр исходного процесса $S_\xi(\omega) = S_\eta(\omega)(1+\omega^2\tau_0^2) - S_0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев М. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 4, 22 (1986).
2. Boyer L., Searby G. J. Appl. Phys., 60, 2699 (1986).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 23 марта 1988 г.