

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВИЖУЩЕЙСЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ЛОКАТОРОМ

П.В. Григорьев, Т.Б. Шевченко, И.В. Шуган

Развивается методика расчета статистических характеристик последовательности лазерных бликов с учетом движения морской поверхности. Представлены результаты экспериментов по наклонному зондированию поверхности.

Изучение статистики лазерных бликов при движении узкого лазерного луча по морской поверхности открывает возможность дистанционного измерения характеристик мелкомасштабного волнения и определения пространственного энергетического спектра морского волнения /1/. В выполненных ранее теоретических работах при расчете статистических характеристик случайной последовательности лазерных бликов морская поверхность считалась замороженной, что оправдано при высоких скоростях движения носителя $v_c \gg c$, где c — характерная скорость движения поверхностных волн.

В реальной ситуации, в частности, в экспериментах, описанных в /1,2/, скорость самолета с лазерным измерителем $v_e \cong 100$ м/с, так что скорость крупномасштабных волн ($c \cong 10$ м/с) может составлять заметную величину от скорости носителя.

В настоящей работе развивается методика расчета статистических характеристик последовательности лазерных бликов с учетом движения поверхностных волн и проанализированы результаты экспериментов по наклонному зондированию морской поверхности с учетом рассчитанных поправок.

В работе /3/ показано, что в случае наклонного кругового зондирования морской поверхности узким лазерным лучом для гауссовой статистически однородной поверхности азимутальная зависимость средней плотности бликов на единице длины траектории светового пятна представляет собой гантелеобразную кривую, вытянутую в направлении распространения волн (симметричную относительно главных осей пространственного спектра). Плотность бликов в главных осях дается выражением:

$$N_3 = 4D \exp \left[- \frac{\xi_x^2 m_{02} + \xi_y^2 m_{20}}{2m_{02} m_{20}} \right], \quad (1)$$

где D — средняя плотность точек заданного уклона на единицу площади поверхности $\xi = \xi(x, y)$; ξ_x, ξ_y — компоненты зеркальных точек поверхности; m_{ij} — моменты пространственного энергетического спектра поверхности.

Примеры экспериментальных азимутальных зависимостей для наклонного зондирования приведены на рис. 1 (кривые а). Эксперименты проводились над акваторией Черного моря в районе с координатами 42° с.ш., 40° в.д. в мае 1984 года. Траектория полетов представляла собой "звезду" из 12 прямых галсов длиной 10 км, средняя скорость самолета $v_c = 83$ м/с, тонгаж составлял 4° . Как видно из рис. 1 А центр симметрии экспериментальной кривой (а) смещен в направлении, противоположном направлению ветра.

Эксперименты проводились также над акваторией Тихого океана в районе с координатами 53° с.ш., 158° в.д. в октябре 1985 года для двух различных кренов самолета — 10° и 5° . Экспериментальная азимутальная зависимость, полученная для крена 10° , представлена на рис. 1 Б (кривая а). Ось x системы координат на рисунке совпадает с направлением ветра. Видно, что оси симметрии x', y' полученной экспериментальной кривой развернуты относительно осей координат на угол φ ; заметно также смещение центра симметрии в направлении оси x' .

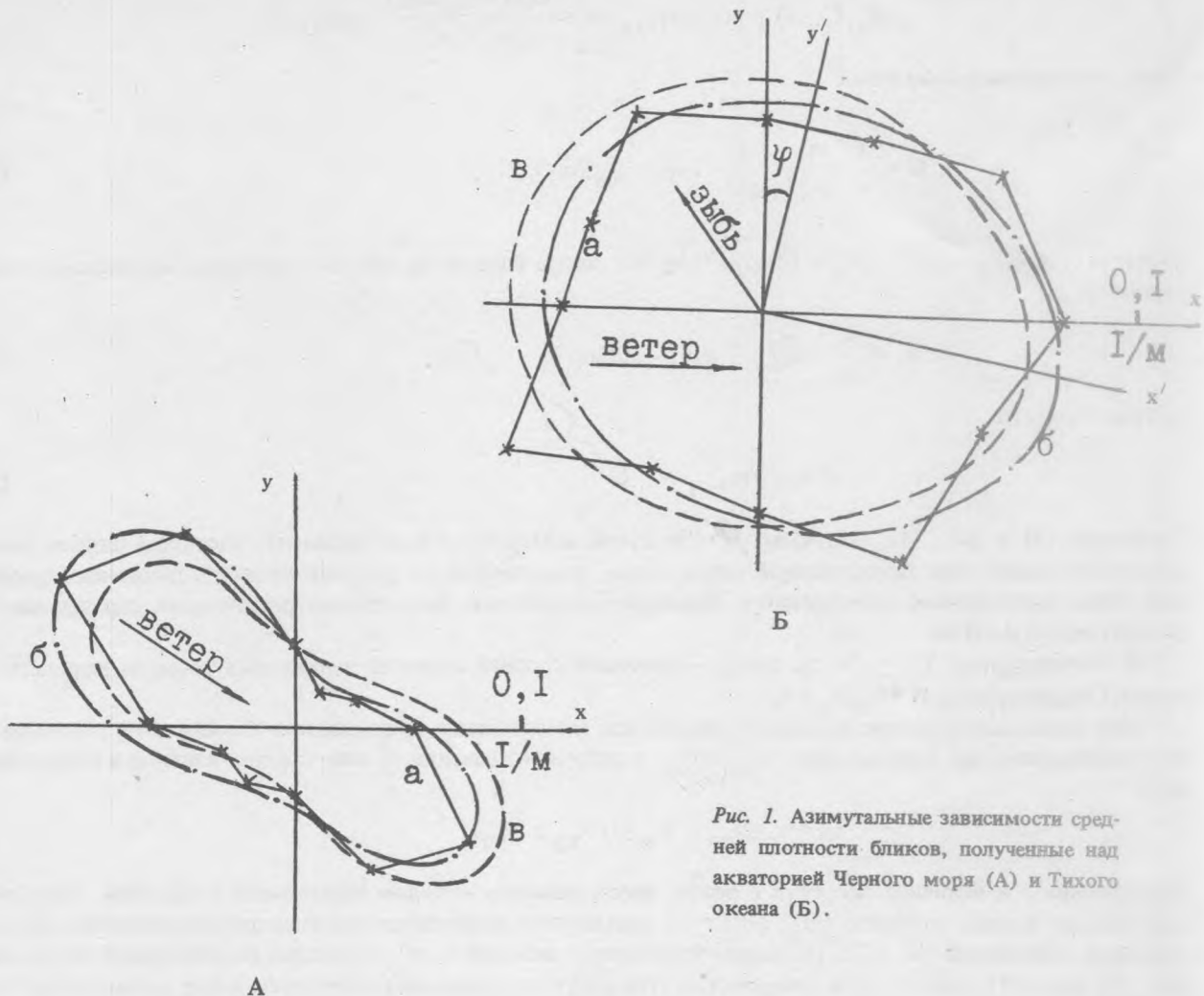


Рис. 1. Азимутальные зависимости средней плотности бликов, полученные над акваторией Черного моря (А) и Тихого океана (Б).

Отметим, что в приближении "замороженности" поверхности кривая $N_3 = N(\theta)$ должна иметь центр и оси симметрии, совпадающие с главными осями случайной поверхности. Учет движения случайной поверхности позволяет объяснить полученные в эксперименте кривые $N(\theta)$.

Оценим влияние движения поверхности на измеряемые в эксперименте величины. Для простоты рассмотрим одномерный случай. Измеряемое в эксперименте среднее число зеркальных точек на единице длины представляет собой поток этих бликов в единицу времени, который может быть записан в виде:

$$W = \iint_{-\infty}^{\infty} v p(\xi_x, \xi_{xx}, v) |\xi_{xx}| d\xi_{xx} dv, \quad (2)$$

где v — скорость движения зеркальной точки поверхности, которая определяется следующими соотношениями [4]:

$$0 = d\xi_x = \xi_{xx} dx + \xi_x t dt; \quad v = \frac{dx}{dt} = - \frac{\xi_x t}{\xi_{xx}}$$

$p(\xi_x, \xi_{xx}, v)$ — совместная плотность вероятности величин ξ_x, ξ_{xx}, v . Для гауссовой поверхности

$$p(\xi_x, \xi_{xx}, v) = p(\xi_x) p(\xi_{xx}, v) = \frac{\exp(-\xi_x^2/2m_2)}{(2\pi)^{1/2} m_2^{1/2}} p(\xi_{xx}, v).$$

После интегрирования имеем:

$$W = \frac{1}{\pi} \frac{m'_3}{m_4^{1/2}} \frac{1}{m_2^{1/2}} \exp(-\xi_x^2/2m_2). \quad (3)$$

Здесь $m_{2p} = (\partial^p \xi / \partial x^p)^2$; $m'_q = (\partial^q \xi / \partial x^q) \partial \xi / \partial t$. Число бликов на единице длины для замороженной поверхности /4/

$$N_3 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{m_4}{m_2} \right)^{1/2} \exp(-\xi_x^2/2m_2), \quad (4)$$

средняя скорость

$$\bar{v} = m'_3/m_4. \quad (5)$$

Сравнивая (3) и (4), (5), получаем $W = N_3 \bar{v}$, т.е. измеряемая в эксперименте плотность бликов равна плотности бликов для замороженной поверхности, умноженной на среднюю скорость движения зеркальных точек относительно неподвижного приемного устройства. Аналогичные рассуждения справедливы и для двумерного случая.

В экспериментах $\bar{v} = v_c + c_\theta$, где c_θ — проекция средней скорости зеркальных точек на направление полета. Следовательно, $N = N_3 (v_c + c_\theta)$.

Для определения скорости волны s сравниваем измеренные в эксперименте значения N в диаметрально противоположных направлениях $N_{\text{по}}$ и $N_{\text{пр}}$ и получаем значения c_θ^3 для каждого азимута в следующем виде:

$$c_\theta^3 = v_c (N_{\text{пр}} - N_{\text{по}}) / (N_{\text{пр}} + N_{\text{по}}).$$

Направление φ и величина скорости s волны рассчитывалась методом наименьших квадратов. Далее рассчитывались вторые моменты (m_{ij} , $i + j = 2$) двумерного энергетического спектра поверхности с использованием выражений (1), (2). На основе полученных значений s , m_{ij} строились аппроксимационные кривые (б) для $N(\theta)$ (рис. 1). Для сравнения на этих рисунках приведены соответствующие расчетные кривые (в) по модели "замороженной" поверхности.

В результате расчета с использованием экспериментальных данных, приведенных на рис. 1А, получена величина средней скорости зеркальных бликов $s = 10,6$ м/с. Это качественно соответствует чисто ветровому волнению, наблюдавшемуся визуально. Величину средней скорости s можно связать с фазовой скоростью энергонесущей компоненты спектра морских волн.

На рис. 1Б приведены экспериментальные данные и соответствующие теоретические кривые для более сложной океанографической ситуации: наряду с ветровым волнением наблюдалась штормовая зыбь, направленная под углом к направлению ветра. Вектор средней скорости в данном случае расположен между направлением ветра и направлением зыби. Рассчитанная для экспериментов с креном 10° величина средней скорости движения зеркальных точек поверхности $s = 8,7$ м/с, направление $\varphi = 14^\circ$; для экспериментов с креном 5° $s = 9,2$ м/с, $\varphi = 11^\circ$; величины моментов $m_{02} = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $m_{20} = 1,8 \cdot 10^{-2}$. Показатель угловой направленности волнения $\gamma^{-1} = (m_{20}/m_{02})^{1/2} \sim 1,1$ близок к единице, что свидетельствует о достаточно изотропном волнении. Дисперсия уклона поверхности $\sigma = \sqrt{m_{20} + m_{02}} \cong 0,2$, следовательно, система поверхностных волн является развитой и близкой к образованию обрушений.

Заметим, что рассчитываемые величины являются характеристиками поверхности и не должны зависеть от крена самолета. Полученные результаты показывают, что различие рассчитанных значений средней скорости движения зеркальных точек поверхности и моментов энергетического спектра поверхности для кренов самолета 10 и 5° не превышает 5%, что говорит о корректности применяемого метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бункин Ф. В. и др. Докл. АН СССР, 281, 1441 (1985).
2. Бункин Ф. В. и др. В кн. Дистанционное зондирование океана. Труды ИОФАН, т. 1. М., Наука, 1986, с. 3.
3. Солнцев М. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 4, 22 (1986).
4. Lonquet-Higgins M. S. Philos. Trans. Roy. Soc., London, ser. A, 249, 321 (1957).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 4 февраля 1987 г.