

СТРУКТУРА ВЕКТОРА АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ТОНАЛЬНОГО СИГНАЛА В ВОЛНОВОДЕ МЕЛКОГО МОРЯ

Щуров В.А., Ткаченко Е.С., Ляшков А.С., Щеглов С.Г.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
shchurov@poi.dvo.ru*

Вихри акустической интенсивности (далее – вихри) в дальнем поле источника обнаружены в 2008 г. в заливе Петра Великого Японского моря. После выяснения технических условий эксперимента, при которых наиболее вероятно обнаружение вихрей, были рассмотрены электронные записи (аналоговые и цифровые) предыдущих экспедиций разных лет и координат: Северо-Западная часть Тихого океана (НИС «Каллисто» 1978 – 79 гг.), шельф Японского моря (1980 – 2008 гг.). На всех ранних записях в условиях волновода мелкого моря обнаружены вихревые структуры. В условиях глубокого открытого океана при исследовании зеркала Ллойда вихри не обнаружены, несмотря на то, что интерференционные провалы акустического давления в этом случае могут достигать ~20 дБ. В мелком море вихри могут возникать при интерференционных минимумах акустического давления ~3 дБ.

Исследование поля акустической энергии основано на вычислении вектора плотности потока энергии (вектора Умова). Осредненный вектор Умова есть величина векторная, которую мы определяем как «вектор интенсивности». «Скалярная интенсивность», как известно, определяется из акустического давления.

Рассматривается следующий эксперимент. Приповерхностный источник движется со скоростью 1.5 м/с с расстояния ~ 900 м. Частота излучения (88 ± 1) Гц. Оси декартовой системы координат комбинированного приемника Ox и Oy расположены в горизонтальной плоскости; $+Oz$ – направлена вертикально к дну волновода. Глубина волновода постоянна ~30 м. Скорость звука не зависит от глубины. Состояние поверхности моря – штиль. Комбинированный приемник находится на глубине ~15 м. Направления движения судна и оси $+Ox$ совпадают. Исследуется движение акустической энергии в вертикальной плоскости xOz . Временной интервал реализации в данном случае составляет ~350 с, что соответствует длине волновода ~550 м. Переменные: расстояние r и время t

равносильны. Набор функций $S_{p^2}(t)$, $\text{Re}\Gamma_i(t)$, $\text{Im}\Gamma_i(t)$, $\Delta\varphi_{pV_i}(t)$, $\Delta\varphi_{V_j}(t)$, где $(i, j = x, z)$, полностью описывает акустическое поле вектора интенсивности [1].

Экспериментально установлено, что минимумы уровня спектральной плотности мощности акустического давления $S_{p^2}(t)$ и скачки разности фаз $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$ на величину $\pm 2\pi \times n$ (где n – целое число) происходят одновременно (рис. 1). Скачки фазы указывают на местоположение дислокаций фазового фронта (вихрей) по всей длине реализации. Расстояния между приемником и источником изменяются в пределах: при $t = 950$ с ~ 900 м, при $t = 1300$ с ~ 350 м. Итак, на дистанции 550 м волновода наблюдаются десять фазовых дислокаций (вихрей), т.е. интервал между ними составляет ~ 55 м. Образование вихревых структур происходит также и на соседних глубинах волновода, что сокращает расстояние между вихрями [2]. Отсюда, акустический волновод мелкого моря «плотно упакован» вихревой составляющей вектора интенсивности или дислокациями фазы. Теоретические оценки [3] плотности числа вихрей вдоль оси волновода в дальнем поле источника при $r \gg \lambda$ определяются периодом модовых биений, что совпадает с нашим экспериментом (рис. 1).

Во временных (t) и пространственных интервалах (r) между сдвигами $\Delta\varphi_{pV_x}(t, r) = 0$, поскольку сдвиг на $\pm 2\pi \times n$ оставляет величину продольной корреляции без изменений [1-3]. Сопоставляя рис. 1 и рис. 2 (на

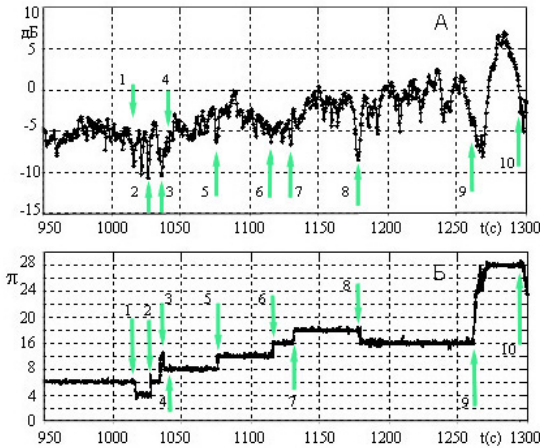


Рис. 1. Зависимость от времени: А – уровня спектральной плотности мощности акустического давления $S_{p^2}(t)$; Б – разности фаз $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$. Частота 88 Гц. Уровень децибел выбран произвольно

рис. 2 стрелки соответствуют скачкам $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$) мы видим, что x -компоненты нормированной функции временной когерентности $\text{Re}\Gamma_x(t)$ и $\text{Im}\Gamma_x(t)$ в области скачков имеют существенные отклонения от своих средних значений. В области постоянной разности фаз при $\Delta\varphi_{pV_x}(t) = 0^\circ$ $\text{Re}\Gamma_x(t) = +1.0$, но в области скачков $\text{Re}\Gamma_x(t)$ принимает значения стремящиеся к нулю или к -1.0 . При $\text{Re}\Gamma_x(t) \rightarrow -1.0$ вектор плотности потока энергии направлен на источник звука. $\text{Im}\Gamma_x(t)$ испытывает значительные флуктуации в области скачка, до $\sim \pm 0.4$. Разности фаз $\Delta\varphi_{pV_z}(t)$ и

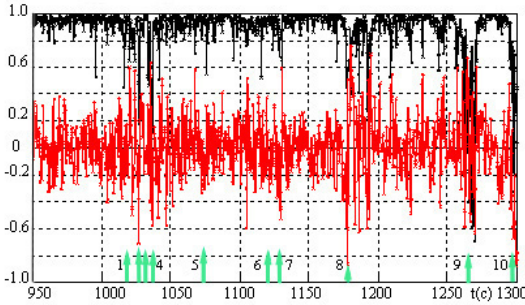


Рис. 2. Зависимость от времени: $\text{Re}\Gamma_x(t)$ – x -компонента активной нормированной функции временной когерентности (черный цвет); $\text{Im}\Gamma_x(t)$ – реактивная x -компонента (красный цвет)

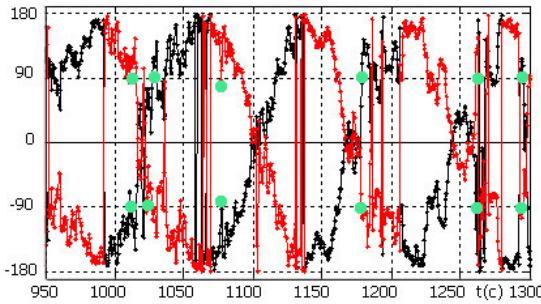


Рис. 3. Зависимость от времени: разность фаз – цвет черный; $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$ – цвет красный. Время усреднения – 1.0 с

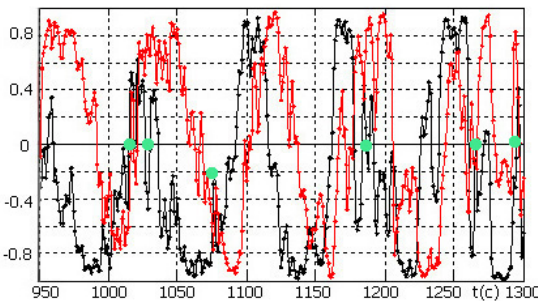


Рис. 4. Зависимость от времени: $\text{Re}\Gamma_z(t)$ – z -компонента активной нормированной функции временной когерентности (черный цвет); $\text{Im}\Gamma_z(t)$ – реактивная z -компонента (красный цвет)

$\Delta\varphi_{V_z V_x}(t)$ определяют движение энергии в вертикальном направлении в плоскости xOz (рис. 3). Изменение фаз во времени происходит в противофазе. При скачке $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$ они принимают противофазные значения $\pm\pi/2$. При этом z -компонента нормированной временной когерентности $\text{Re}\Gamma_z(t)$ проходит через нуль с изменением знака, что является необходимым условием существования вихря [2]. На рис. 3 и рис. 4 значения функций при скачке $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$ обозначены зелеными точками. Из рис. 4 следует, по всей длине волновода устанавливается почти-периодическая структура $\text{Re}\Gamma_z(t)$ и $\text{Im}\Gamma_z(t)$.

В итоге. На примере регулярного волновода мелкого моря показано, что в дальнем поле тонального сигнала формируются почти-периодические дислокационные структуры волнового фронта, которые в поле вектора интенсивности порождают вихри. Эксперимент и теоретические оценки плотности вихревых образований совпадают. В вихревых структурах движение энергии связано с обращением волнового фронта. Важную роль в механизме функционирования вихрей составляет реактивная компонента вектора интенсивности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (19-55-15005, 20-05-00162) и гранта МД-148.2020.5

Литература

1. Щуров В.А. Движение акустической энергии в океане. Владивосток. ТИГ ДВО РАН. 2019. 205 с. (Shchurov V.A., Movement of Acoustic Energy in the Ocean. Springer 2022. 188 p. ISBN 978-981-19-1299-3, ISBN 978-981-19-1300-6 (<https://doi.org/10.1007/978-981-19-1300-6>)).
2. Журавлев В.А. Кобзев Н.К., Кравцов Ю.А. Дислокации фазового фронта в океаническом волноводе и их проявление в акустических измерениях // Акуст журн. 1989. Т. 36. № 2. С. 260-265.
3. Бородин В.В., Журавлев В.А., Кобозев И.К. Кравцов Ю.А. Усредненные характеристики акустических полей в океанических волноводах // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 2. С. 1789-1797.