Г.Н. Кузнецов

ЗВУКОВЫЕ ПОЛЯ В МЕЛКОМ МОРЕ В ЗОНАХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МИНИМУМОВ И МАКСИМУМОВ

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 117036, Москва, ул. Вавилова, д. 38,
Тел.: (495) 941-0193, E-mail: skbmortex@mail.ru*

Исследуется интерференционная структура пространственных низкочастотных амплитудных и фазовых характеристик скалярного поля, трех проекций вектора колебательной скорости и вектора потока мощности в зонах интерференционных максимумов и минимумов.

Ключевые слова: векторно-скалярные модули, градиенты фазы, полюса, седловины, составляющие потока мощности, углы возвышения

Применение векторно-скалярных приемников и антенн (ВСП и ВСА) позволяет исследовать трехмерную амплитудно-фазовую структуру звукового поля, в частности, потоки энергии в окрестности особых точек, в которых звуковое давление равно нулю. На основе анализа пространственно-частотных характеристик линий тока энергии можно выявить точки с сингулярностью фазы, в которых в зоне интерференционного минимума (в пределе – нуля амплитуды поля) образуются «дислокации» и «завихренности», а в зоне равенства нулю градиента фазы или скачка разности фаз между звуковым давлением (ЗД) и вектором колебательной скорости (ВКС), кратном $\pi/2$, можно обнаружить и исследовать «седловые» точки фазового фронта. Некоторые результаты их анализа представлены в [1–4].

Ниже изучается пространственная амплитудно-фазовая структура векторно-скалярного поля сигналов от тональных излучателей, буксируемых в мелком море. Прием сигналов осуществлялся на четыре разнесенных в пространстве низкочастотных четырехкомпонентных векторно-скалярных модуля (ВСМ1-4), включающих один скалярный и три ортогональных векторных приемника инерциального типа (рис. 1а, позиция А). Рамы размещались в образующих застойную зону звукопрозрачных обтекателей (рис. 1б, позиция Б) и ориентировались с использованием плавучестей в положении оси Z, близком к вертикальному (рис. 1б, позиция В). Модуль 1 был приподнят над дном на 20–22 м,

остальные (2, 3 и 4) – разнесены по горизонтали на 50 м и располагались на глубине около 1 м от дна. Отметим, что приемники в пространстве практически не перемещались, и их ориентация после морской постановки была стабильной и уточнялась по акустическим сигналам. Эксперименты проводились при радиальной буксировке на глубине 24 м со скоростью 1.67 м/с трех тональных излучателей – частоты 117, 320 и 650 Гц (рис. 1в). Излучение и прием сигналов производились в системе единого времени. Была выполнена акустическая калибровка района работ и разработана модель передаточной функции волновода, которая далее используется при сравнении экспериментальных и расчетных зависимостей.

Рис. 1. *а* – Рама с низкочастотным (10–1200 Гц) и высокочастотным ВСМ (1–10 кГц); *б* – рамы с ВСМ у борта судна, подготовленные к морской постановке. А–приемник, Б–обтекатель, В–плаучести; *в* – буксируемый излучающий комплекс с излучателями и комплектом аппаратуры.

На рис. 2 для частот 117 и 320 Гц представлены интерференционные зависимости от расстояния звукового давления P , Z -компоненты ВКС, разности фаз между ЗД и Z -компонентой ($\Delta\phi_{PV_z}$), интегральный набег разности фаз между ЗД и вертикальной составляющей ВКС ($\Delta\Phi_{PV_z}$), угол возвышения эквивалентной плоской волны в вертикальной плоскости. Этот угол рассчитывался с использованием формулы: $\theta = \arctan((P^*V_z)/[(P^*V_x)^2 + (P^*V_y)^2]^{1/2})$, где звездочка – знак комплексного сопряжения. Результаты анализа интерференции горизонтальных проекций ВКС (ГП ВКС) (V_x и V_y) здесь не приводятся, поскольку они практически – до деталей – совпадают с зависимостями от расстояния ЗД. В ближней зоне, на расстояниях до двух глубин, согласно лучевому приближению, наблюдается подобие зависимостей от расстояния ЗД и вертикальных проекций ВКС (ВП ВКС).

Рис. 2. Наверху – зависимости от расстояния звукового давления, Z-компоненты колебательной скорости, разности фаз между звуковым давлением и Z-компонентой, угла возвышения вектора колебательной скорости в вертикальной плоскости. Частоты 117 Гц (слева) и 320 Гц (справа). Внизу: амплитуды – а и разности фаз – б, ортогональных составляющих вектора потока мощности, сигнал на частоте 117 Гц.

После формирования нормальных волн интерференционные структуры поля ЗД и ГП ВКС, по сравнению с зависимостями для ВП ВКС, становятся различными, поскольку вертикальный векторный приемник подавляет моды первых номеров и подчеркивает моды высоких номеров. ГП ВКС – наоборот. В зоне интерференционных минимумов (ИМИ) звукового давления наблюдаются скачки разности фаз между ЗД и ВП ВКС. Анализ зависимостей от расстояния разностей фаз показывает, что вблизи зон ИМИ градиенты фазы быстро возрастают и становятся неопределенными. Причем, чем глубже минимум зависимости $P(r(t))$, тем больше величина скачка разности фаз. Видно, что в зависимости от расстояния горизонтального сечения поля от расположенных на определенных глубинах дислокаций (полюсов) возможны односторонние скачки разности фаз на величину до π радиан. При сечении зоны дислокации (глубокого минимума), то есть непосредственно при «проходе дислокации», возможен полный поворот потока мощности и изменение фазы на 2π . Одновременно проявляются и отклонения от линейной зависимости интегральной фазы $\Delta\Phi_{PV}$ – при обходе особой точки (дислокации) фаза и меняется на величину $\pm 2\pi$ или -2π .

Видно также, что в зонах глубоких ИМИ, в которых $P, |V_x|, |V_y|, |V_z| \rightarrow \min$, наблюдаются одновременные скачки фазы в горизонтальной и вертикальной плоскости, которые могут иметь различные градиенты и знаки. Это зоны полюсов. В отдельных зонах градиент фазы непрерывен и при смене знака фазы проходит через нуль. В этих точках образуются «седла».

Отметим, что кроме зон с глубокими интерференционными минимумами, наблюдаются зоны интерференционных максимумов (ИМА). В этих зонах формируются более важные для решения практических задач – протяженные зоны с медленным изменением направления прихода ВП ВКС и, соответственно, медленным изменением угла возвышения. Поэтому в этих зонах длительное время звуковая энергия приходит в точку приема под постоянным углом возвышения, что позволяет ее эффективно накапливать для увеличения отношения сигнал/помеха.

На рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования векторно-скалярных характеристик поля для волновода с моделью, полученной в результате акустической калибровки грунта. Расчеты выполнены для волновода Пекериса с эквивалентными параметрами. Обозначено: а) – амплитуда звукового давления P [дБ]; б) – интегральная разность фаз $\arg(PV_z)$ между P и V_z [рад.]; в) – интегральная разность фаз $\arg(PV_x)$ между P и V_x [рад.]; г) – интегральная разность фаз $\arg(PV_y)$ между P и V_y [рад.]; д) – $1 - \varphi_r'$ горизонтальная и $2 - \varphi_z'$ вертикальная проекции градиента фазы ЗД; е) – 3 – эффективная фазовая скорость (ЭФС), ж) – угол возвышения относительно горизонтальной плоскости [°]; з) – пеленг на движущийся источник [°].

Из сравнения рис. 2 и 3 следует: расчетные и экспериментальные зависимости P и V_z хорошо согласуются между собой – как по наибольшему периоду, так и по среднему закону спадания величин ЗД и ВП ВКС. Набеги интегральной фазы $\Delta\Phi_{PV_z}(r(t))$ (рис. 2) и расстояния, при которых фиксируются моменты пересечения зон с минимумом чувствительностей V_x и V_y (оси диполей), практически совпадают. Наблюдается согласие моментов прохода траверзного расстояния, на котором разность фаз $\Delta\Phi_{PV_z}$ минимальна, $\arg|PV_z| \rightarrow \min$. Расчетные зоны смены знака пеленга на источник, скачков фазы при проходе зон с минимальной чувствительностью V_x и V_y и экспериментальные значения этих характеристик также достаточно близки.

Видно также, что средний градиент фазы в вертикальной плоскости φ_z' близок к нулю, что может использоваться вертикальными приемными или излучающими антеннами при формировании пространственных откликов. Градиент фазы в горизонтальной плоскости φ_r' определяет

средние и локальные значения ЭФС, которые должны использоваться при формировании характеристик направленности в горизонтальной плоскости.

Рис. 3. Слева – результаты расчетов для частоты 117 Гц; эквивалентная толщина волновода $h = 59$ м; скорость звука в грунте $c_r = 1957$ м/с, $m = 0.753$; плотность грунта – 1.5 т/м³. Справа – результаты расчетов для частоты 320 Гц; эквивалентная толщина волновода $h = 57$ м; скорость звука в грунте $c_r = 1858$ м/с, $m = 0.793$; плотность грунта – 1.5 т/м³.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Акустика мелкого моря, нелинейная акустическая диагностика, нелинейная динамика волн» (номер государственной регистрации АААА-А18-118021390174-1) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00941).

Литература

1. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового поля волнового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104. Вып. 5(11). С. 3769–3783.
2. Елисеев В.А., Тужилкин Ю.И. Поток акустической мощности в волноводе // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 781–788.
3. Белова Н.И., Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Экспериментальное исследование интерференционной и фазовой структуры потока мощности от локальных источников в мелком море // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 3. С. 318–329.
4. Кузнецов Г.Н. Проблемы оценки приведенной шумности движущихся объектов в мелком море // Труды Всерос. научно-техн. конф. Метрология гидроакустических измерений. Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ. 2013. Т. 1. С. 57–73.

G.N. Kuznetsov

SOUND FIELDS IN A SHALLOW SEA IN ZONES OF INTERFERENCE MINIMUM AND MAXIMUM

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38, Vavilov st., Moscow, Russia, 117036,
Россия, 117036, Москва, ул. Вавилова, 38,
Tel.: (495) 126-9835, E-mail: skbmortex@mail.ru*

The interference structure of spatial low-frequency amplitude and phase characteristics of the scalar field, three projections of the vibrational velocity vector and the power flux vector in the zones of interference maxima and minima is investigated.

Keywords: vector-scalar modules, phase gradients, poles, saddles, power flow components, elevation angles

Acknowledgment: This work was supported by the program “Acoustics of the Shallow Sea, Nonlinear Acoustic Diagnostics, Nonlinear Wave Dynamics” (state registration number AAAA-A18-118021390174-1) and the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-08-00941).

References

1. Zhuravlev V.A., Kobozev I.K., and Kravtsov Yu.A. Potoki energii v okrestnosti dislokatsiy fazovogo polya volnovogo fronta. ZhETF, 1993, Vol. 104, No. 5(11), pp. 3769–3783.
2. Eliseevnin V.A. and Tuzhilkin Yu.I. Potok akusticheskoy moshchnosti v volnovode. Akust. Zhurn, 2001, Vol. 47, No. 6, pp. 781–788.
3. Belova N.I., Kuznetsov G.N., and Stepanov A.N. Experimental study of the interference and phase structure of the power flux from local sources in a shallow sea. Akust. Zhurnal, 2016, Vol. 62, No. 3, pp. 318–329.
4. Kuznetsov G.N. Problemy otsenki privedennoy shumnosti dvizhushchikhsya ob'ektov v melkom more. Materialy Vseross. nauchno-tekhn. konf. Metrologiya gidroakusticheskikh izmereniy, Mendeleevo: FGUP VNIIFTRI, 2013, Vol. 1, pp. 57–73.