ДОПОЛНЕНИЕ

УДК: 534.231

DOI: 10.29006/978-5-9901449-5-8-58

С.П. Аксенов, Г.Н. Кузнецов

ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ В ГЛУБОКОМ ОКЕАНЕ

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

Приведены результаты численного анализа фазовой структуры в зонах интерференционных максимумов и минимумов. Показано, что в зонах максимумов формируется инвариантная, не изменяющаяся с частотой, глубиной приема и излучения зависимость эффективной фазовой скорости (ЭФС) от расстояния до источника. ЭФС заметно превышает скорость звука в воде на малых расстояниях и уменьшается при увеличении расстояния. В зонах минимумов наблюдаются непредсказуемые скачки градиентов фазы и, соответственно, неопределенность значений ЭФС. Даются практические рекомендации по применению полученных результатов при обнаружении и пеленговании сигналов в глубоком океане.

Ключевые слова: глубоководный волновод, градиенты фазы в зонах интерференционных максимумов и минимумов, эффективная фазовая скорость, инвариантная зависимость ЭФС от расстояния

В зоне тени (ЗТ) после выхода источника из ближней зоны освещенности (БЗО) сигналы ослабевают на 25–35 дБ. Как следствие существенно снижается эффективность выделения слабых сигналов, и для увеличения вероятности правильного их обнаружения в ЗТ необходимо использовать протяженные многоэлементные антенны с высоким значением коэффициента осевой концентрации. Но для антенной обработки и накопления мощности слабых сигналов, принятых пространственно-разнесенными гидрофонами, необходимо прогнозировать

распределение амплитуд и фаз сигналов вдоль апертуры антенны. При отсутствии информации о передаточной функции волновода рекомендуется применять приближенные методы, например, использовать интерференционные инварианты [1] или усредненные фазовые характеристики [2, 3], измеренные в зонах интерференционных максимумов (ИМА). Последнее связано с тем, что в БЗО, ЗТ и в дальней зоне освещенности (ДЗО) наблюдается интерференция звукового давления (ЗД), обусловленная взаимодействием однотипных мод. В зонах ИМА, как и в мелком море, наблюдаются гладкие градиенты фазы [2–4], позволяющие в этих зонах использовать приближенную модель «эквивалентной плоской волны» с «эффективной фазовой скоростью», рассчитанной с использованием модовой структуры или измеренной путем аппроксимации градиентов фазы. Использование ЭФС вместо средней скорости звука в воде (c_0) обеспечивает высокоточное пеленгование протяженными антеннами даже при косых углах падения фронта волны. В зонах интерференционных минимумов (ИМИ), особенно вблизи дислокаций [5], происходят знакопеременные скачки фаз и непредсказуемые вариации ЭФС. Обнаружение сигналов в этих зонах маловероятно.

Для анализа структуры поля в глубоком море использованы оригинальные алгоритм и программа, разработанные в модовом ВКБ-приближении, позволяющем после модификации достаточно точно рассчитать интерференционные характеристики амплитуд и фаз ЗД – как суммарного поля, так и однотипных мод. Это позволило выявить вклад каждой группы мод в суммарный уровень и фазу ЗД.

Рис. 1. а – ВРСЗ в августе (1) и феврале (2); б – зависимости ЗД (1) и отдельных типов мод от r , $f = 330$ Гц, $z_s = 10$ м, $z_r = 133$ м, $r = 0.1$ –60 км, август; 1 – все моды, 2 – водные моды, 3 – вытекающие моды, 4 – захваченные моды, 5 – цилиндрическое спадание.

На рис. 1а показано вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) для выбранного в качестве примера участка Норвежского моря с глубиной 3 км в условиях летней и зимней гидрологии (август, февраль,

глубоководный звуковой канал с осью на глубине около 900 м). Параметры грунта: скорость звука $c_1 = 1700$ м/с, плотность 2 г/см³, потери $\text{Im}(c_1)/\text{Re}(c_1) = 0.009$. На рис. 1б представлены зависимости от расстояния амплитуды ЗД и трех групп однотипных мод. Видно, что законы спадающие вытекающих, захваченных и водных мод существенно различаются. Водные моды не обладают дисперсией и вносят основной вклад в БЗО и ДЗО. В ЗТ с превышением на 20–30 дБ над водными модами доминируют вытекающие или захваченные моды. Вытекающие моды при увеличении расстояния убывают, но в первой ЗТ на расстояниях до 12–15 км они определяют величину и фазу полного ЗД (два первых максимума сформированы вытекающими модами). Водные и захваченные моды из-за потерь в дне спадают по цилиндрическому закону, но с дополнительным затуханием.

Рис. 2. Зависимости ЭФС (а – кривые 1–3, б – символы $\circ$, $\times$, $\bullet$) и амплитуды ЗД (кривые 4–6) от расстояния на частотах 50, 190 и 330 Гц, $z_s = 10$ м, $z_r = 133$ м. (а) – август, $r = 3$ –20 км; (б) – февраль, $r = 0.1$ –60 км. Учитываются все моды.

На рис. 2а приведены зависимости от расстояния амплитуды и фазы ЗД, рассчитанные для трех частот. Расчеты ЭФС выполнены, как и в мелком море, через горизонтальную составляющую градиента фазы $\partial\phi/\partial r$ по формуле: $c^* = 2\pi f / (\partial\phi/\partial r)$. Но для мод одного типа можно использовать и аналитические зависимости:

$$k^* = \sum_l p_l^2 k_l / \sum_l p_l^2$$

$$\text{или } c^* = \sum_l p_l^2 c_l / \sum_l p_l^2,$$

где k^* – средневзвешенное волновое число, k_l – горизонтальная проекция волнового вектора, p_l – амплитуда l -й нормальной волны, c^* – средневзвешенная фазовая скорость нормальных волн и c_l – фазовая скорость

l -й нормальной волны [2, 3]. Видно, что в зонах ИМИ, из-за скачков градиента фазы, наблюдаются значительные случайные выбросы значений ЭФС – как в сторону увеличения, так и уменьшения. В зонах ИМА для всех частот ЭФС имеет вид гладкой кривой, близкой к гиперболе, которая описывается построенной по вытекающим модам формулой:

$$c_{\varphi}^*(r, h) = c_0 / \cos \theta = c_0 \sqrt{1 + (2h - z_s - z_r)^2 / r^2} \approx c_0 \sqrt{1 + (2h / r)^2},$$

$z_s + z_r < 2h/10$, где c_0 – средняя скорость звука в воде, $\theta(r)$ – угол скольжения луча, вышедшего из источника, отразившегося от дна и попавшего на приемник, r – расстояние между источником и приемником. На рис. 2б приведены результаты для зимних условий, которые отличаются от летних: зимой, кроме водных мод, распространяющихся в подводном звуковом канале, формируются водные моды в приповерхностном канале, и значимость вытекающих мод в ЗТ «выражена не ярко», а увеличение сигналов в ДЗО маскируется водными приповерхностными модами.

Если задать горизонт излучения 112 м (рис. 3а), то и в этом случае при увеличении глубины приема от 10 до 250 м значения ЭФС в доминирующих максимумах ЗД попадают на ту же самую кривую, показанную в верхней части рис. 2. Но на малых расстояниях превалирует вклад водных мод и значения ЭФС, смещаясь с гладкой кривой вниз, стремятся к c_0 при $r < 2.7$ км ($z_r = 10$ м), $r < 4.5$ км ($z_r = 133$ м) и $r < 6.8$ км ($z_r = 250$ м). Значения ЭФС стремятся к c_0 и в ДЗО, где доминируют водные моды ($r \sim 48$ км) и их дисперсия практически отсутствует (см. рис. 3б).

Рис. 3. Зависимости ЭФС (символы $\circ, \star, \times$) и амплитуды ЗД (кривые 1–3) от расстояния при $z_r = 10, 133$ и 250 м, $f = 330$ Гц, $z_s = 112$ м, $r = 0.1$ –20 – а; и 40–59 км – б.

Все приведенные графики построены для ненаправленного источника – монополя. На рис. 4 приведены аналогичные зависимости для

Рис. 4. Источник – вертикальный диполь. Август. Слева – $f = 330$ Гц, $r = 0.1$ –60 км. а – амплитуды ЗД и составляющих (1 – все моды, 2 – водные моды, 3 – вытекающие моды, 4 – захваченные моды), 5 – цилиндрическое спадание. Справа – $z_s = 10$ м, $z_r = 133$ м; б – амплитуды ЗД (1, 2) и значения ЭФС (○, ×), $z_s = z_r = 133$ м и $z_s = 10$ м, $z_r = 133$ м. Все моды.

вертикального диполя. Видно, что вертикальный диполь с характеристикой направленности в виде вертикальной «восьмерки» слабо возбуждает водные моды по сравнению с монополем, но хорошо возбуждает вытекающие моды. Свойства ЭФС для вертикального диполя аналогичны таковым для монополя и горизонтального диполя: на участке, где велик вклад вытекающих мод ($r = 3$ –20 км), значения ЭФС в зонах ИМА попадают на аппроксимирующую инвариантную зависимость (рис. 4б).

Таким образом, в БЗО и в ДЗО структура поля ЗД определяется водными модами, которые не обладают дисперсией, и фазовые скорости которых близки к c_0 . В зоне тени значения ЭФС, рассчитанные в зонах ИМА для вытекающих мод и суммарного поля, быстро уменьшаются при увеличении расстояния, но отличаются устойчивостью и предсказуемостью: зависимости от расстояния градиентов фазы и величин ЭФС не зависят ни от глубины источников и приемников, ни от частоты звука, ни от направленности излучателя, ни от времени года.

ЭФС в ИМА зоны тени, особенно при глубинах источника и приемника меньше 300–400 м, отличается стабильностью и универсальностью, так как «крутые» моды или лучи являются «устойчивыми структурами». Аппроксимация ЭФС является инвариантной – определяется углом скольжения луча, вышедшего из источника, однократно отразившегося от дна и попавшего на приемник. По этой причине зависимости ЭФС, рассчитанные для вытекающих мод при летних и зимних условиях, близки. Захваченные моды также характеризуются ярко выраженной интерференцией, и в зонах ИМА, как и в мелком море, наблю-

даются гладкие градиенты фазы, позволяющие в этих зонах применять для пеленгования ЭФС и получать несмещенные оценки пеленга, в том числе – при косых углах падения фронта волны. Таким образом, в зоне тени, как и в БЗО и ДЗО, также возможно обнаружение и пеленгование слабых сигналов при любых углах падения волны в случае применения антенн с большим коэффициентом осевой концентрации и использованием в зонах ИМА вероятных значений ЭФС, заметно превышающих.

Из изложенного следует, что использование ЭФС вместо c_0 рекомендуется для получения в ЗТ несмещенных оценок пеленга, даже при косых углах падения. Значения ЭФС в ЗТ измеряются или рассчитываются с использованием закономерностей, свойственных вытекающим модам. В БЗО и ДЗО пеленгование рекомендуется проводить с использованием c_0 .

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. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982.
2. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н. О средней скорости изменения фазы акустического поля вдоль плоского волновода // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 2. С. 266–268.
3. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 628–638.
4. Shaffer J.D., Fitzgerald R.M., Guthrie A.N. Coherence of low-frequency acoustic signals in the deep ocean // JASA. 1974. Vol. 56. No. 4. P. 1122.

S.P. Aksenov, G.N. Kuznetsov

INVARIANCE OF THE EFFECTIVE PHASE VELOCITY OF ACOUSTIC FIELD IN THE DEEP OCEAN

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38, Vavilov st., Moscow, Russia, 117036,
Tel.: (495) 126-98-35, E-mail: skbmortex@mail.ru*

The distribution of sound pressure and phase gradients in the deep sea along the signal propagation paths in the near and far illumination zones (NIZ

and FIZ), as well as in the zone of shadow (ZS), is studied. It is shown that the characteristics of the field formed by the leaking, captured, and water modes differ significantly. It is established that the gradients of phase and dependences of the “effective phase velocity” (EPV) on the distance in ZS are stable and are determined by a single invariant regularity. An analytical description of this dependence is proposed. It is also found that the value of EPV in zones with dominant water modes is close to the average sound velocity in the water column.

Keywords: deep ocean; leaking, captured, and water modes; gradients of phase; invariant values of the effective phase velocity

Acknowledgment: This work was financially 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. Chuprov S.D. Interference structure of a sound field in a layered ocean. Ocean Acoustics, Current State, edited by L.M. Brekhovskikh and I. B. Andreeva, Moscow: Nauka, 1982, pp. 71–91.
2. Grachev G.A. and Kuznetsov G.N. On the average velocity of acoustic field phase variations in a waveguide with constant depth. Acoust. Phys., 1985, Vol. 31, No. 2, pp. 266–268.
3. Kuznetsov G.N. and Lebedev O.V. On the possibility of equivalent plane wave model usage for rising accuracy of bearing low-frequency signals in the shallow sea. Acoust. Phys., 2012, Vol. 58, No. 5, pp. 628–638.
4. Shaffer J.D., Fitzgerald R.M., and Guthrie A.N. Coherence of low-frequency acoustic signals in the deep ocean. J. Acoust. Soc. Am., 1974, Vol. 56, No. 4, P. 1122–1125.