Г.Н. Кузнецов¹, А.Н. Степанов^{1,2}

ВАРИАЦИИ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И ФАЗОВЫХ СКОРОСТЕЙ В МЕЛКОМ МОРЕ

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38,

Тел.: +7 (499) 503-8734, 8(495) 126-9835 E-mail: skbmortex@mail.ru

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королева, Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, д. 34

Тел.: 8(846)267-48-678, E-mail: pr@ssau.ru

Выполнено аналитическое, численное и экспериментальное исследование интерференционной структуры амплитуд звукового давления, продольных проекций градиентов фазы и рассчитанных различными способами фазовых скоростей в плоскопараллельном волноводе. Показано, что на частотах, для которых антенна расположена в зонах интерференционных максимумов, использование модели эквивалентной плоской волне и ЭФС вместо скорости звука в воде уменьшает погрешность оценки пеленга.

Ключевые слова: продольные проекции градиентов фазы, эффективная фазовая скорость, интерференционные максимумы

Эффективность работы протяженных многоэлементных антенн, установленных стационарно или буксируемых в мелком море, определяется отношением сигнал/помеха на каждом приемнике и когерентностью поля вдоль апертуры. Значения отношения сигнал/помеха рассчитываются с учетом реальных зависимостей «аномалии распространения» и коэффициента концентрации антенны. При пеленговании следует учитывать дисперсионные свойства волновода, заметно искажающие распределение вдоль апертуры антенны поля амплитуды и – главное – фазы по сравнению со свободным пространством.

Рассмотрим возможность получения в мелком море не смещенных оценок пеленга при учете средних – устойчивых к вариации – характеристик среды градиентов фазы на апертуре низкочастотных многоэлементных антенн. С этой целью рассмотрим работу горизонтальной протяженной антенны, которая имеет длину $L = 400$ м и состоит из 64 элементов. В связи с большим различием характеристик грунта в различных акваториях Мирового океана, расчеты выполним для двух типичных мо-

делей дна морей, примыкающих к берегам России. Первая модель соответствует жесткому грунту, вторая – мягкому. Для них соответственно: продольная скорость звука в грунте $c_l = 2000$ м/с и $c_l = 1650$ м/с, относительная плотность $\rho = 1.8$ и $\rho = 1.4$, $\alpha = 0.02$. Изучим структуру поля на апертуре антенны при расстоянии центра антенны от источника – $r = 5$ км, пеленге на источник – $\alpha_0 = 45^\circ$, глубине волновода – $h = 100$ м, глубине источника – $z_0 = 50$ м. Анализ выполним для приемных горизонтальных антенн, буксируемых в слое воды ($z = 50$ м) и стационарных донных антенн ($z = 100$ м). На рис. 1 для приведенных выше моделей грунта и $z = 50$ м представлены распределения вдоль аперттуры антенны амплитуды поля звукового давления (ЗД) (а) и ЭФС [1, 2], характеризующей градиенты фазы (б), для сигнала с частотой $f_0 = 52$ Гц, для которой антенна находится в зоне интерференционного максимума (ИМА) (кривые 1), и сигнала на частоте $f_0 = 54.5$ Гц, для которой центр антенны находится в зоне глубокого минимума ЗД (кривые 2). Штрихпунктирной линией (прямая 3) отмечено значение скорости звука в воде c_0 . Из рис. 1 следует, что поле на апертуре антенны неоднородное – небольшие изменения частоты и условий приема заметно изменяют распределения амплитуд и фаз сигнала на апертуре. Видно, что в зонах ИМА величина ЭФС превышает значение c_0 и достаточно стабильна. И, напротив, в зонах интерференционных минимумов фазовая скорость изменяется непредсказуемым образом.

Рис. 1. Распределения на апертуре антенны амплитуды звукового давления (а) и ЭФС (б). Прием в середине волновода. Кривые 1 – частота $f_0 = 52$ Гц (вторая модель дна), кривые 2 – $f_0 = 54.5$ Гц (первая модель дна), прямая 3 – значение скорости звука в воде.

На рис. 2 изображены ХН антенны для частоты 52 Гц, обозначенные $D(\alpha_0)$, где α_0 – пеленг на источник. Излучение производится в середине волновода. Распределения амплитуд ЗД и фазовых скоростей представлены на рис. 1 (кривые 1). Сплошной линией на рис. 2 изображена ХН в свободном пространстве с $c_0 = 1450$ м/с, пунктирной – в волно-

Рис. 2. ХН антенны,
 $f_0 = 52$ Гц.

Рис. 3. ХН антенны,
 $f_0 = 54.5$ Гц.

воде, когда распределение амплитуд и фаз сигнала на апертуре антенны рассчитано с использованием известной передаточной функции волновода, а для фазирования антенны используется значение c_0 . Видно, что из-за несоответствия градиентов фазы, на апертуре возникает смещение основного максимума. Штрихпунктирной линией изображена ХН антенны в волноводе, когда исходное распределение амплитуд и фаз было таким же, а для фазирования антенны использовано среднее в зоне ИМА значение ЭФС, равное 1570 м/с. При этом практически удается устранить смещение пеленга α_0 на источник и уменьшить боковое поле. На рис. 3 для тех же условий распространения изображены аналогичные ХН, но для частоты $f_0 = 54.5$ Гц. Видно, что для данной частоты, по сравнению с ХН в свободном пространстве (сплошная линия), наблюдается расщепление основного максимума ХН антенны (пунктирная кривая), что не позволяет выполнять однозначное пеленгование источников. По существу, антенна разделилась на две части, выполняющие пеленгование независимо – каждая со своими градиентами фазы и своим фазовым центром. Как показали расчеты, для «мягких» грунтов смещения пеленгов умеренные – до $7-10^\circ$. Для «жестких» – смещение может достигать до $12-15^\circ$, что недопустимо.

Для оценки значений ЭФС, необходимых для точного пеленгования, можно использовать аналитические выражения или выполнять прямой расчет соответствующих проекций градиентов фазы. При определении зависимостей горизонтальных проекций градиентов фазы сигналов можно использовать [1] выражение для средневзвешенных значений горизонтальных проекций волновых чисел. В [2] для зон ИМА используется понятие «эффективной фазовой скорости», как средневзвешенной фазовых скоростей нормальных волн, $c^* = \sum p_i^2 c_i / \sum p_i^2$, где c_i — фазовая скорость i -й нормальной волны. По определению, фазовую скорость ЗД можно получить путем расчетной или экспериментальной оценки горизонтальной проекции градиента фазы $c_1^* = \omega / (\partial \varphi / \partial r)$, где φ — фаза

ЗД. Установлено, что в зонах ИМА эффективные фазовые скорости c^* или c^{k**} и фазовые скорости c_1^* , вычисленные по приведенным соотношениям или по горизонтальным проекциям градиентов фазы, близки. Но в зонах интерференционных минимумов, из-за различия проекций градиентов фазы, всегда будут наблюдаться существенные отличия c_1^* от c^* , c^{k*} и c_0 . Средние значения ЭФС достаточно устойчивы, поскольку определяются не волновыми числами, а их разностью. Тем не менее, из-за различающегося группирования и суммирования мод разных номеров в различных зонах ИМА, значения ЭФС варьируются в заметных пределах.

Рис. 4. Зависимости c^* (1) и фазовой скорости c_1^* (2) от частоты и отклонения в процентах этих скоростей от скорости звука в воде (3).

Рис. 5. Зависимости c^* и фазовой скорости c_1^* от расстояния для двух моделей грунта, рассчитанные через градиент фазы (1) и по аналитически (2).

На рис. 4 приведены зависимости ЭФС, вычисленные в зонах ИМА на различных частотах. Но на низких частотах при малом числе нормальных волн наблюдаются резкие «скачки», соответствующие частотам, вблизи которых в волноводе при увеличении частоты формируются «новые» моды, но при росте частоты и увеличении числа мод зависимости от частоты сглаживаются и стремятся к постоянному значению. Асимптотические значения ЭФС на высоких частотах заметно превышают величину c_0 . Аналогичное приближение к постоянной величине наблюдается и при увеличении расстояния до источника. На рис. 5а для донной антенны ($z = 100$ м) и жесткого грунта представлены зависимости ЭФС от расстояния для частоты 50 Гц и величины c_0 , равной 1450 м/с. На рис. 5б представлены зависимости ЭФС от расстояния для частоты 50 Гц, но для глубины приема $z = 50$ м и второй модели грунта. Из сравнения рис. 4 и 5 следует, что в зонах ИМА аналитические оценки ЭФС удовлетворительно согласуются с результатами прямых расчетов фазовой скорости

через градиент фазы. Жесткому дну соответствуют большие величины ЭФС, поскольку увеличиваются фазовые скорости отдельных мод. Но для всех волноводов – с мягким или жестким грунтом – при увеличении расстояния между приемником и источником наблюдается медленное уменьшение ЭФС, так как при увеличении расстояния моды высоких номеров затухают интенсивнее, чем моды первых номеров. Для сравнения рассчитанных фазовых скоростей и ЭФС с экспериментальными значениями выполнена в морских условиях буксировка по радиальному галсу излучающего комплекса, включающего 3 электродинамических тональных излучателя с частотами 117, 320 и 640 Гц. Одновременно для оценки расстояния между приемными элементами и буксируемым излучателем на едином каркасе с низкочастотными излучателями буксировался широкополосный импульсный пьезокерамический излучатель. Сигналы принимались в системе единого времени одновременно на приемные каналы векторно-скалярных модулей и на контрольный

Рис. 6. Зависимости ЭФС от частоты и расстояния: 1 – расстояние 1540 м; 2 – 50 м; 3 – 770 м. Диапазон частот от 10 до 640 Гц. Точки – эксперимент.

гидрофон, установленный вблизи излучателей. Это позволило измерить геометрию антенны после морской постановки и траекторию буксировки излучателей относительно приемников. С учетом непрерывно измеряемых расстояний до источника и оценок разностей фаз на опорном гидрофоне в точке излучения, горизонтальные проекции градиента фазы вычислялись в точках приема и

оценивались значения фазовых скоростей. Для аналитической оценки ЭФС использовались амплитуды и фазовые скорости мод, вычисленные с учетом экспериментально определенных параметров грунта, вычисленных по данным акустической калибровки района работ. Экспериментально найденные значения фазовых скоростей и рассчитанные на указанных частотах ЭФС оказываются близкими. При увеличении частоты и формировании дополнительных мод обнаруживаются скачки ЭФС. При увеличении частоты влияние отдельных мод уменьшается и ЭФС стремится к асимптотическому значению, которое стабилизируется вблизи значений, превышающих c_0 на 5–8%.

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

Литература

1. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н., Розенберг А.В. Инвариантная скорость распространения импульсных сигналов в многомодовых океанических волноводах // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302. № 5. С. 1225–1228.
2. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 628–638.

G.N. Kuznetsov¹, A.N. Stepanov^{1,2}

VARIATIONS IN SOUND PRESSURE AND PHASE VELOCITY IN THE SHALLOW SEA

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

38, Vavilov st., Moscow, Russia, 117036,

Tel.: +7 (499) 503-8734 E-mail: skbmortex@mail.ru

²Samara National Research University imeni academica S.P. Koroleva,

34, Moscow highway, Samara, Russia, 443086,

Tel.: 8(846)267-48-678, E-mail: pr@ssau.ru

An analytical, numerical and experimental study of the interference structure of sound pressure amplitudes, longitudinal projections of phase gradients and phase velocities calculated by various methods in a plane-parallel waveguide have been carried out. It is shown that at frequencies for which the antenna is located in the zones of interference maxima, the use of the model of an equivalent plane wave and EFS instead of the speed of sound in water reduces the error in the bearing estimate.

Keywords: longitudinal projections of phase gradients, effective phase velocity, interference maxima

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

References

1. Grachev G.A., Kuznetsov G.N., and Rosenberg A.V. Invariant velocity of propagation of pulsed signals in multimode oceanic waveguides. Dokl. Academy of Sciences of the USSR, 1988, Vol. 302, No. 5, pp. 1225–1228.
2. Kuznetsov G.N. and Lebedev O.V. On the possibility of using a model with an equivalent plane wave to improve the accuracy of direction finding of low-frequency signals in a shallow sea. Akust. zhurn., 2012, Vol. 58, No. 5, pp. 628–638.