Интерференционная амплитудно-фазовая структура узкополосных векторно-скалярных сигналов в мелком море

Н.И. Белова,* Г.Н. Кузнецов[†]

Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38. (Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

В мелком море выполнен сравнительный анализ амплитуд и фаз узкополосных низкочастотных векторно-скалярных сигналов в зонах интерференционных максимумов и минимумов (ИМА и ИМИ). Установлено существенное отличие интерференционной структуры звукового давления (ЗД) и горизонтальных проекций вектора колебательного ускорения (скорости — ВКС) от характеристик вертикальных проекций. Показана устойчивость градиентов фазы в зонах ИМА и быстрое изменение фазы в зонах ИМИ, предположительно связанных с зонами дислокаций.

РАСS: 43.30.+m УДК: 534.23; 542.34

Ключевые слова: мелкое море, векторно-скалярное поле, зоны интерференционных максимумов и минимумов, градиенты фазы, дислокации, поток мощности.

ВВЕДЕНИЕ. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При распространении плоской волны в свободном пространстве и движении вдоль линии потока энергии фаза поля должна монотонно — линейно расти или убывать. В волноводах фазовая структура из-за дисперсионных характеристик и интерференции мод существенно усложняется. Рассмотрим пространственную амплитудно-фазовую структуру векторноскалярного поля (ВСП) тональных сигналов. Прием сигналов выполним на четыре разнесенных в пространстве низкочастотных четырехкомпонентных векторноскалярных модуля (ВСМ 1-4), включающих по одному скалярному приемнику и по три ортогональных векторных приемника. В экспериментах применялись векторные приемники инерциального типа, которые регистрируют проекции вектора колебательного ускорения $W_{X,Y,Z}$. Их пересчет в проекции коле-бательной скорости $V_{X,Y,Z}$ производится по формуле $V_{X,Y,Z} = -i(\rho c/\omega)W_{X,Y,Z}$. Такая запись учитывает ча-стотную зависимость $W_{X,Y,Z}$ и выравнивает размерности ЗД и ВКС [1]. 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. Приемное судно стояло на двух якорях на расстоянии около 400 м от ближайшего приемного модуля. Геометрия антенны и ориентация в пространстве векторных приемников, полученные после морской постановки, дополнительно уточнялись по акустическим сигналам [2]. Это позволило выполнить в контролируемых условиях совместный анализ пространственных интерференционных зависимостей ЗД, вертикальной и двух ортогональных горизонтальных проекций ВКС. Излучение и прием сигналов производились в системе единого времени. Глубины моря в зоне постановки приемной системы и буксировки излучателей на расстояниях до 2.5–3 км от антенны были почти постоянными и составляли по данным эхолотных замеров ~ 53 м. Более подробно условия проведения экспериментов и характеристики излучателей и приемных ВСМ изложены в [2].

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СТРУКТУРА СКАЛЯРНЫХ И ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ

На рис. 1 для приподнятого над дном BCM-1 представлены интерференционные зависимости от расстояния амплитуд и разностей фаз, измеренные на частотах 117 и 320 Гц. Представлены графики для звукового давления P, Z-компоненты BKC, разности фаз между ЗД и Z-компонентой ($\Delta \varphi_{PV_z}$), интегральный набег разности фаз между ЗД и вертикальной проекцией BKC ($\Delta \Phi_{PV_z}$) (набег фазы с компенсацией скачков на 2π), угол возвышения эквивалентной плоской волны в вертикальной плоскости. Этот угол рассчитывался с использованием формулы:

$$\theta = \arctan\left(\langle P^*V_z\rangle / \left[\langle P^*V_x\rangle^2 + \langle P^*V_y\rangle^2\right]^{1/2}\right),$$

где звездочка — знак комплексного сопряжения. Из анализа представленных результатов следует, что структура поля в ближней зоне (расстояния до 1.5 глубин волновода влево и вправо от приемного элемента) и в дальней зоне — на больших расстояниях — различается. В ближней — согласно лучевому приближению наблюдается подобие зависимостей от расстояния ЗД и вертикальных проекций ВКС (ВП ВКС). Но величина ВП ВКС на этих расстояниях из-за косинусоидальной зависимости от угла падения чувствительности V_z убывает быстрее, чем ЗД — *Р*. Интерференционные структуры поля ЗД и горизонтальных проекций (ГП) ВКС после формирования нормальных волн становятся идентичными, но существенно отличаются от структу-

^{*}E-mail: ni-bel@mail.ru

[†]E-mail: skbmortex@mail.ru



Рис. 1: Зависимости от расстояния ЗД, *Z*-компоненты колебательной скорости, разности фаз между звуковым давлением и *Z*-компонентой, угла возвышения вектора колебательной скорости в вертикальной плоскости. Частоты *a* – 117 и *б* – 320 Гц

ры ВП ВКС, поскольку вертикальный векторный приемник подавляет моды первых номеров и подчеркивает моды высоких номеров.

В зоне 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 [3]. При непосредственном сечении дислокации (глубокого ИМИ) и при «проходе дислокации» возможен полный поворот потока мощности и изменение фазы на 2*π*. Одновременно проявляются и отклонения от линейной зависимости интегральной фазы $\Delta \Phi_{PV_z}$ — при обходе особой точки (дислокации) фаза изменяется на величину $+2\pi$ или -2π (в зависимости от «знака дислокации») [3].

Как следует из литературы, вблизи дислокаций должны наблюдаться «завихренности». Их проявление характеризуется изменением знака — направления потока мощности вблизи особых точек относительно направления основного сигнала, распространяющегося в волноводе. Расчеты усредненных за период сигнала проекций ВПМ $J_{x,y,z}$ выполнены по формуле $\langle J_{x,y,z} \rangle = (1/2) \operatorname{Re} \left(PV_{x,y,z}^* \right)$, звездочкой обозначается комплексно-сопряженная величина трех проекций ВКС.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что в зонах глубоких минимумов ЗД завихренности действительно формируются. Подтверждением этому является смена знака фазы между P и V_z в зоне вблизи ИМИ. Видно, что при увеличении расстояния в зонах ИМИ и, соответственно, скачков фазы ЗД изменяются знаки разности фаз не только в горизонтальном направлении, но и знак ВП ВКС, что приводит к вариации угла возвышения θ . Это приводит к повороту градиентов фазы в вертикальном направлении и изменению знаков «углов возвышения» ВКС.

УЗФФ 2017

Самые большие и знакопеременные скачки величины θ наблюдаются в зонах глубоких ИМИ ЗД.

Отметим, что кроме зон с глубокими ИМИ, вблизи которых должны формироваться дислокации и седла, наблюдаются зоны с относительно небольшими минимумами поля ЗД и - самое главное - зоны ИМА. В этих зонах отсутствуют резкие — на коротких интервалах расстояний — скачки разности фаз и быстрые изменения угла возвышения, а 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, что позволяет ее эффективно накапливать для увеличения отношения сигнал/помеха (ОСП). На рис. 1,6 также видно, что с увеличением частоты звука (например, для частоты 320 Гц) интервалы расстояний, в пределах которых угол возвышения суммарной волны близок к горизонтальному, расширяются. Разность фаз между звуковым давлением и колебательной скоростью в зонах ИМА асимптотически стремится к нулю, что соответствует модели эквивалентной плоской (квазибегущей) волны [4]. Отметим также, что на малых расстояниях - в зоне траверза пространственный масштаб зон ИМА P(r(t)) и $V_z(r(t))$ заметно меньше, чем в дальней зоне. Как следствие, в районе траверза скачки фаз, изменения направления вертикальной составляющей ВКС и угла прихода происходят чаще. Из-за частых чередований зон максимумов и минимумов и изменения знаков ВП ВКС величина угла возвышения приобретает квазислучайный характер и изменяется в отдельных точках от $+90^{\circ}$ до -90°. Отметим, что изменение величины и знака угла возвышения зависит не только от амплитудных значений P, V_x, V_y, V_z, но и знака их фаз. При увеличении расстояния до источника происходит ослабление («вымирание») мод высоких номеров, уменьшается вариация Vz и углы прихода, в среднем, локализуются вблизи малых углов, близких к нулю. На рис. 2,а приведены интерференционные зависимости от расстояния амплитуд горизонтальных Х- и У-составляющих и вертикальной Z-составляющей ВПМ. Расчет компонент потока мощности $\langle J_{x,y,z} \rangle$ и разностей фаз $\Delta \varphi_{PV_x}$, $\Delta \varphi_{PV_u}, \ \Delta \varphi_{PV_z}$ производился по стандартным формулам, приведенным в [1]. На рис. 2,6 приведены разности фаз между ЗД и Х-, Ү- и Z-составляющими колебательной скорости. Горизонтальные составляющие имеют индивидуальные зоны минимумов, поскольку в момент прохода излучателем направлений, по которым чувствительности V_x и V_y из-за косинусоидальной зависимости минимальны. При проходе этих участков, как и следовало ожидать [1], происходят скачки разности фаз между P, V_x и V_y относительно друг друга (относительно ЗД на $\pm 90^{\circ}$). На рис. 2 также видно, что в дальней зоне зависимости Х- и У- компонент ВПМ практически повторяют друг друга (до деталей). Именно поэтому оценка пеленга, вычисленная по отношению проекций V_y и V_x , является устойчивым — «динамическим инвариантом» [4]. Вертикальные составляющие ВПМ на рис. 2 — в связи с изменением направления прихода ВП ВКС также изменяют знак подобно данным на рис. 1. Изменяются на различных участках и градиенты фазы — наклон градиента фазы $\Delta \varphi_{PV_z}$ отклоняется от линейной зависимости под разными углами и с разными знаками — имеются зоны с нулевым градиентом фазы (зоны вблизи «седел») и зоны с обратным знаком градиента фазы (зоны вблизи зи дислокаций). Как следствие, ВПМ приходит в точку приема под разными углами возвышения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зонах глубоких ИМИ, в которых не только звуковое давление $P \to \min$, но и горизонтальные и вертикальная проекции колебательной скорости $|V_x|$, $|V_y|$, $|V_z| \to \min$, наблюдаются скачки фазы в горизонтальной и вертикальной плоскости. Скачки разности фаз в зонах ИМИ имеют различные градиенты и знаки. В отдельных зонах градиент фазы непрерывен и при смене знака фазы проходит через нуль. В этих точках, по-видимому, образуются «седла». В зонах минимумов ЗД образуются полюса и наблюдаются скачкообразные изменения величины фазы; градиент фазы характеризуется разрывом непрерывности и стремится к бесконечности [3].

Разность фаз в зонах ИМА между ЗД и ГП ВКС невелика и на больших расстояниях стремится к нулю. Как следствие, в этих зонах имеется возможность эффективного накопления энергии и обнаружения как скалярных, так и векторно-скалярных сигналов. В зонах ИМА на 4-6 дБ и более увеличивается отношение сигнал/помеха, а градиенты фазы ЗД и ГП ВКС слабо зависят от расстояния и частоты звука, что позволяет в этих зонах - при использовании протяженных горизонтальных антенн когерентно суммировать сигналы, принятые пространственно-разнесенными приемниками [4]. В зонах ИМА проявляется устойчивость характеристик поля к изменению гидрофизических условий распространения звука в морской среде или к вариации глубин расположения источников и приемников. Это позволяет их использовать при различных способах согласованной фильтрации с целью обнаружения и оценки координат источников звука в волноводе в пассивном режиме. Очевидно, что для обеспечения однонаправленности приема и разделения сигналов, принятых с противоположных направлений — «слева и справа» или «спереди и сзади», целесообразно использовать протяженные векторно-скалярные антенны или ВСМ.

Отметим, что на участках траектории движения источника, примыкающих к зонам ИМИ, быстро изменяются градиенты фазы и из-за неопределенности их величин в этих зонах невозможно эффективно использовать протяженные антенны. Кроме того, зоны дислока-



Рис. 2: *а* — Амплитуды и *б* — разности фаз ортогональных составляющих вектора потока мощности узкополосного сигнала на частоте 117 Гц

ций и седел «замываются», так как на разных частотах их координаты смещаются по закону $\Delta r/r \sim \Delta \omega/\omega$. Как следствие, использовать «завихренности»» для об-

наружения широкополосных сигналов от малошумных целей невозможно.

- [1] Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007.
- [2] Белова Н.И., Кузнецов Г.Н. Гидроакустика. 2015. 22, № 2. С. 32.
- [3] Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. ЖЭТФ. 1993. **104**, № 5(11). С. 3769.
- [4] Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. Акуст. журн. 2012. 58, № 5. С. 628.

Interference amplitude-phase structure of the narrow-band vector-scalar signals in shallow sea

N.I. Belova^{*a*}, G.N. Kuznetsov^{*b*}

Wave Research Center at General Physics Institute. Moscow 119991, Russia E-mail: ^ani-bel@mail.ru, ^bskbmortex@mail.ru

In shallow water is made the comparative analysis of amplitude and phase of low-frequency narrowband vector-scalar signals in areas of interference maxima and minima (IMA and IMI). The essential difference between the interference structure of sound pressure and the horizontal projections of the vector of the vibrational acceleration (speed) from the characteristics of vertical projections are installed. The stability gradients of the phase in the bands of IMA and the rapid phase change in the bands of IMI, presumably related to the dislocation zones are shows.

PACS: 43.30.+m

Keywords: shallow sea, vector-scalar field, band interference maxima and minima, phase gradients, dislocation, power flow. *Received 26 July 2017*.

Сведения об авторах

- 1. Белова Нина Ивановна науч. сотрудник; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: ni-bel@mail.ru.
- 2. Кузнецов Геннадий Николаевич канд. физ.-мат. наук, начальник СКБ «Морские технологии», профессор; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.