

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ И ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА МОЩНОСТИ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2016 г. Н. И. Белова*, Г. Н. Кузнецов*, А. Н. Степанов**

*Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН
119991 Москва, ул. Вавилова 38

**Самарский государственный университет, 443011 Самара, ул. Академика Павлова 1
E-mail: skbmortex@mail.ru

Поступила в редакцию 15.08.2015 г.

В мелком море исследуется интерференционная структура низкочастотных тональных и широкополосных сигналов, принятых четырехкомпонентными векторно-скалярными модулями. Выполнен анализ пространственных амплитудных и фазовых характеристик скалярного поля, а также трех составляющих вектора колебательной скорости и вектора потока мощности. Установлена связь зон интерференционных максимумов и минимумов с градиентами фазы в горизонтальной и вертикальной плоскости, изменением направления вертикальной и горизонтальной составляющих вектора колебательной скорости и изменением угла возвышения вектора потока мощности в вертикальной плоскости.

Ключевые слова: векторно-скалярные приемники, низкие частоты, интерференционные максимумы и минимумы, дислокации, седла, векторные составляющие потока мощности, вариация углов возвышения.

DOI: 10.7868/S0320791916030047

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В последние годы существенно возрастает интерес к использованию векторно-скалярных (иначе – векторно-фазовых или комбинированных) приемников для анализа трех- или четырехмерных характеристик звукового поля в океане. В монографиях [1–3] выполнено представительное обобщение результатов экспериментальных и теоретических исследований. Важные для практического применения векторно-скалярных приемников (ВСП) вопросы обсуждаются в [4–8].

Особое место среди публикаций занимают работы [9–12], посвященные теоретическому исследованию потоков энергии в окрестности особых точек, в которых звуковое давление равно нулю. На основе анализа характеристик линий тока энергии выявлены точки с сингулярностью фазы, в которых в зоне интерференционного минимума (в пределе – нуля амплитуды поля) образуются “дислокации”, а в зоне равенства нулю градиента фазы или скачка разности фаз между звуковым давлением и вектором колебательной скорости (ВКС), кратном $\pi/2$, образуются “седловые” точки фазового фронта. В работах [9–12] также показано, что вокруг каждой дислокации должна существовать область, в которой поток энергии циркулирует по замкнутым траекториям, т.е. образуется

“завихренность”. Даются рекомендации, по которым могут быть определены зоны существования таких особых точек, т.е. указываются их “признаки”.

Следует также выделить работу [13], в которой, по нашему мнению, впервые изучается динамика дислокаций под воздействием приливно-отливных явлений.

В работах [14, 15] экспериментально исследуются пространственные характеристики интерференционной структуры поля звукового давления P и вертикальной составляющей ВКС и разности фаз между ними. В частности, в этих представляющих несомненный интерес работах анализируется вопрос о связи “скачков” разности фаз с изменением направления приема вертикальных составляющих ВКС и возможностью обнаружения по этому признаку исследованной в [9, 10] вихревой компоненты вектора интенсивности. Достоинством этих работ является попытка анализа структуры поля и поиска зон “завихренности” по суммарному полю, образованному в реальных условиях в результате сложения группы нормальных волн, а не путем теоретического анализа выделенных пар мод [11, 12]. Авторы [14, 15] остро и целесообразно с практической точки зрения ставят эти вопросы, но, по нашему мнению, из-за отсутствия результатов измерений одновременно вертикальной и горизонтальной со-

ставляющих потока мощности подробно исследовать “завихренности” не имели возможности.

Ниже в развитие ранее выполненных работ приводятся экспериментальные данные, полученные в мелком море также с использованием четырехкомпонентных ВСП. Но в отличие от работ [14, 15], в которых анализируются сигналы от проходящих, выполняющих свободное маневрирование судов, нами используются сигналы от буксируемых по заданным прямолинейным траекториям малогабаритных тональных или импульсных широкополосных излучателей. Амплитудные и фазовые характеристики направленности таких излучателей (в отличие от звуковых полей проходящих судов с неопределенными амплитудными и фазовыми характеристиками) были предварительно измерены [16] и контролировались с использованием совместно буксируемых опорных гидрофонов. Это позволило не учитывать при буксировке излучателя изменяющийся при движении “аспект” излучения поля источником и жестко привязать все характеристики поля только к расстояниям от приемных элементов до буксируемого излучателя.

Геометрия антенны, полученная после морской постановки, дополнительно уточнялась по акустическим сигналам [17]. Ориентация в пространстве векторных приемников после их морской постановки на дно измерялась экспериментально по акустическим сигналам [18]. Это позволило выполнить в контролируемых условиях совместный анализ пространственных интерференционных зависимостей не только звукового давления и вертикальных составляющих ВКС, но и двух ортогональных горизонтальных составляющих вектора колебательной скорости. Как следствие, оказалось возможным получить оценки и исследовать характеристики угла “возвышения” фронта волны в вертикальной плоскости, но не для выделенных пар мод, как в [11, 12], а для суммарного многомодового поля, сформированного в реальном волноводе.

Профиль скорости звука рассчитывался по данным прямых измерений температуры и статического давления. Соленость воды для района работ была известной. В результате измерений установлено, что во время экспериментов (март) в районе работ скорость звука практически не зависела от глубины и равнялась в среднем 1473 м/с [19].

В процессе экспериментов с использованием эхолотов измерялась глубина волновода в зоне буксировки излучателя и вдоль трасс распространения сигналов. Это позволило оценить однородность (или неоднородность) волновода в районе выполнения экспериментов.

Излучение и прием сигналов производились в системе единого времени. Координаты излучателя относительно приемных элементов измеря-

лись с использованием спутниковой навигационной системы.

Экспериментальные данные получены в 2002 и 2004 гг. в специально выбранном удаленном от берегов и проходящих судов районе мелкого моря с плоскостной моделью дна. Глубины моря в зоне постановки приемной системы на расстояниях до 2.5–3 км от антенны были почти постоянными и составляли по данным эхолотных замеров 52–53 м.

Ниже приводятся результаты исследований интерференционной структуры полей звукового давления (ЗД), трех составляющих ВКС и вектора потока мощности (ВПМ) по сигналам, излученным тональными или импульсным широкополосным источниками. Выясняется связь интерференционных минимумов и максимумов с фазовыми соотношениями между ЗД и проекциями ВКС, в том числе в зонах интерференционных минимумов. Анализируются зависимости от расстояния амплитудных и фазовых характеристик проекций ВКС и ВПМ.

Прием сигналов осуществлялся на четыре разнонесенные в пространстве низкочастотные ВСП, включающих по одному скалярному приемнику (СП) и по три ортогональных векторных приемника (ВП) инерциального типа. Все приемники в ВСП имели единый фазовый центр и крепились на эластичных растяжках внутри рамы. Рамы размещались в звукопрозрачных обтекателях и ориентировались с использованием плавучестей в положении оси z , близком к вертикальному (рис. 1).

Отметим, что ВП инерциального типа регистрируют проекции вектора колебательного ускорения $W_{x,y,z}$, которые пересчитываются в проекции вектора колебательной скорости $V_{x,y,z}$ по формулам, справедливым для плоской волны: $V_{x,y,z} = -i(\rho c/\omega)W_{x,y,z}$. Такая запись учитывает частотную зависимость $W_{x,y,z}$ и выравнивает размерности ЗД и ВКС.

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. По результатам акустической калибровки придонные ВСП были расположены почти в линию, но центральный (третий) приемник отклонялся от линии, соединяющей второй и четвертый приемники, на несколько метров [17]. Схема взаимного расположения приемных модулей и научного судна, на которое в цифровом виде по кабелю передавались принятые сигналы, приведена на рис. 2. Приемное судно стояло на двух якорях на расстоянии около 400 м от ближайшего приемного модуля.

Далее основное внимание уделяется характеристикам сигналов в зонах интерференционных максимумов и минимумов.

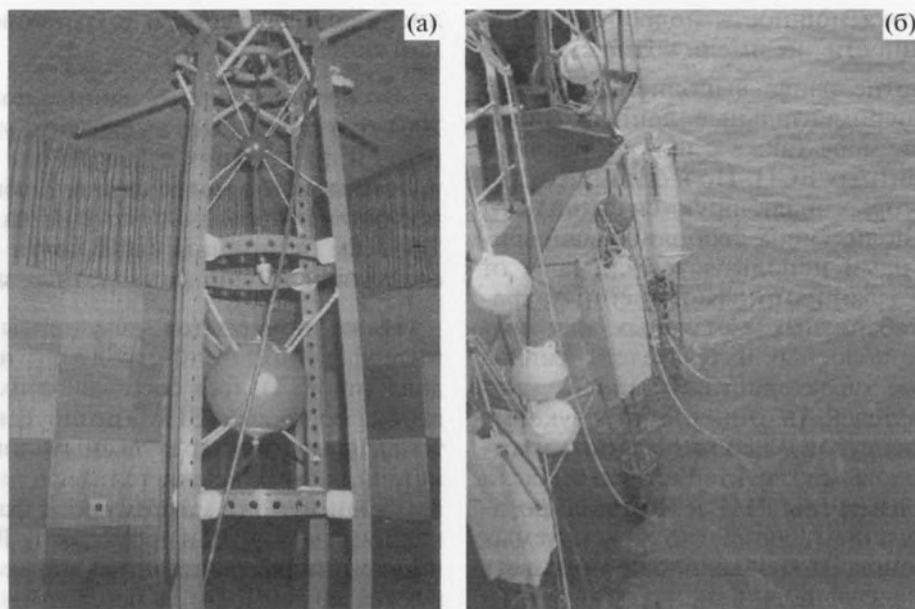


Рис. 1. (а) Рама с размещенными низкочастотным ВСП (10–1200 Гц) и высокочастотным ВСП (1–10 кГц); (б) рамы с ВСП у борта судна, подготовленные к морской постановке.

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СТРУКТУРА УЗКОПОЛОСНЫХ ПОЛЕЙ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И ВЕКТОРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ И ПОТОКА МОЩНОСТИ

Эксперименты проводились на сравнительно небольших расстояниях между излучателем и приемниками (до 2.5 км) при одновременной буксировке на едином каркасе четырех излучателей: трех тональных электромагнитных (частоты 117, 320 и 650 Гц) и одного малогабаритного пьезокерамического широкополосного импульсного излучателя (“пингера”), предназначенного для уточнения координат каждого ВСП относительно буксируемого излучающего модуля. С использованием датчиков зарегистрированы: глубина погружения излучателей 24 м, скорость буксировки 1.67 м/с. Излучающее судно выполняло радиальные прямолинейные галсы на сближение и удаление относительно приемной системы. Трасса буксировки пересекала приемную систему между третьим и четвертым ВСП.

В качестве примера на рис. 3а, б для приподнятого над дном приемника I представлены интерференционные зависимости от расстояния амплитуд и разностей фаз, измеренные на частотах 117 и 320 Гц. Представлены графики для звукового давления P , z -компоненты ВКС ($\Delta\Phi_{PV_z}$), интегральный набег разности фаз между ЗД и вертикальной составляющей ВКС ($\Delta\Phi_{PV_z}$) (набег фазы с компенсацией скачков на 2π), угол возвышения

(скольжения) эквивалентной плоской волны в вертикальной плоскости. Этот угол рассчитывался с использованием формулы $\theta = \arctg(\langle P^*V_z \rangle / [\langle P^*V_x \rangle^2 + \langle P^*V_y \rangle^2]^{1/2})$, где звездочка – знак комплексного сопряжения.

Результаты анализа интерференции горизонтальных составляющих ВКС (V_x и V_y) здесь не при-

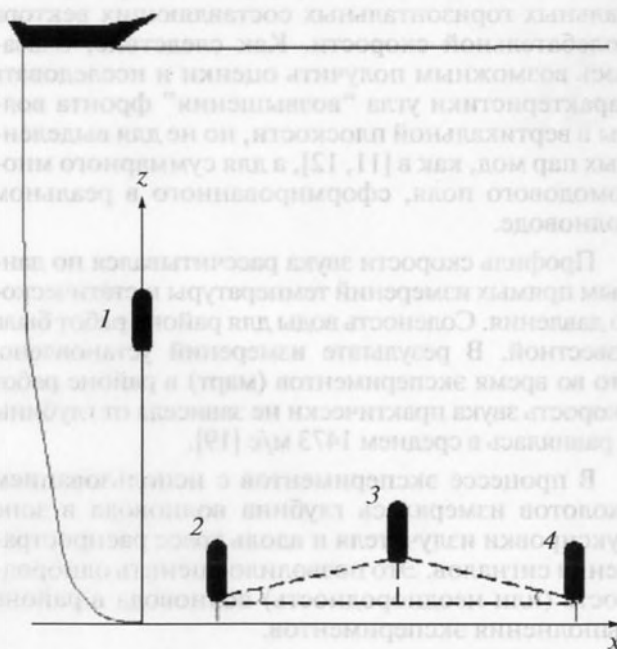


Рис. 2. Схема взаимного расположения элементов приемной системы и научного судна.

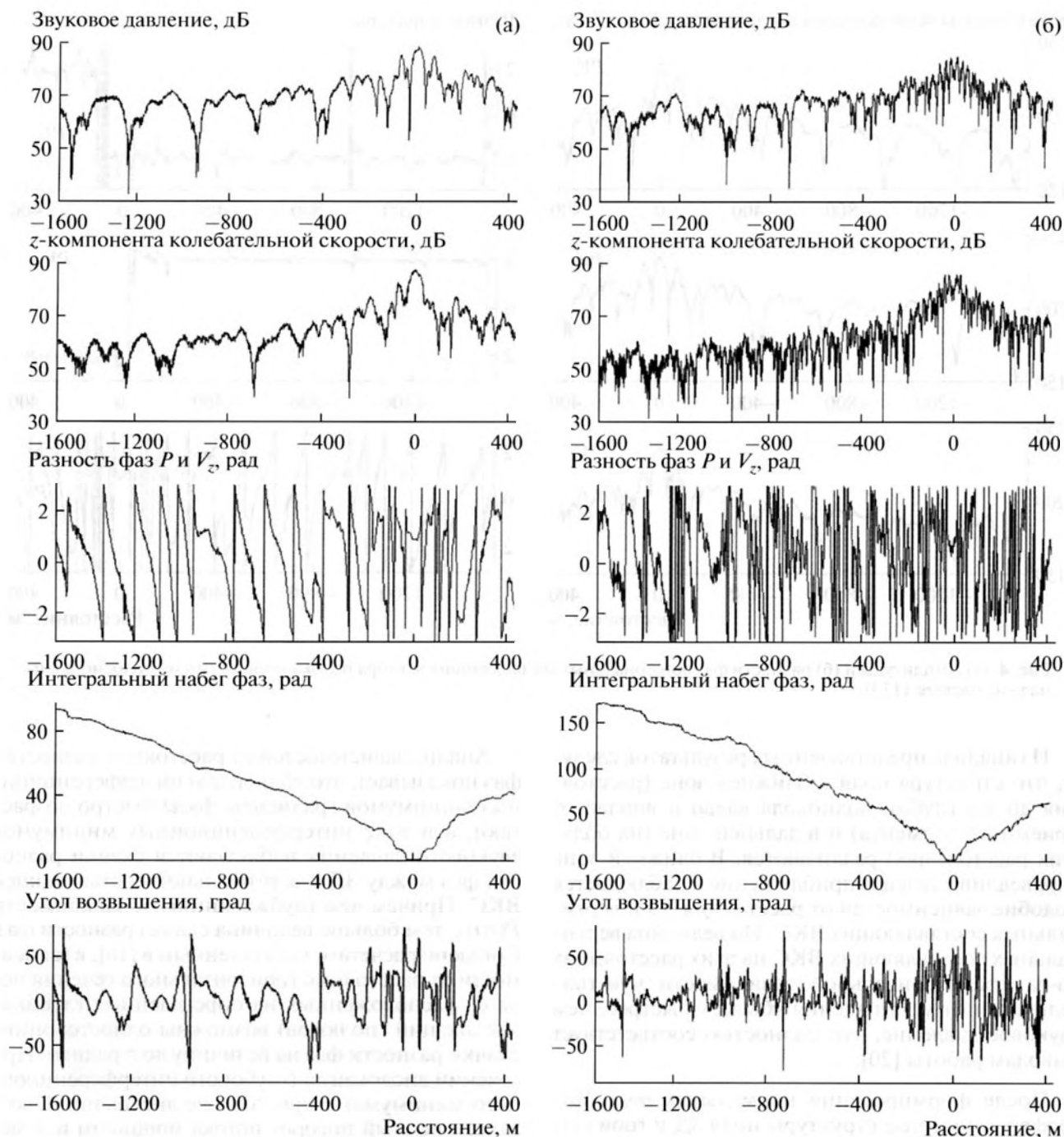


Рис. 3. Зависимости от расстояния звукового давления, z -компоненты колебательной скорости, разности фаз между звуковым давлением и z -компонентой, угла возвышения вектора колебательной скорости в вертикальной плоскости. Частота (а) 117 Гц и (б) 320 Гц.

водятся, поскольку, как показано в [19] и далее (рис. 4), они практически до деталей совпадают (“подобны”) с зависимостями от расстояния ЗД.

Симметричность зависимостей от расстояния амплитуд ЗД и z -компонент колебательной скорости, приведенных на рис. 3, и симметричность зависимостей разности фаз компонент ВПМ,

изображенных на рис. 4, позволяют сделать вывод, что пространственная ориентация z -компоненты ВСП в период проведения экспериментов была близка к вертикальной. Это важно отметить, так как в районе работ наблюдались течения, которые могли привести к отклонению z -компоненты ВКС от вертикали.

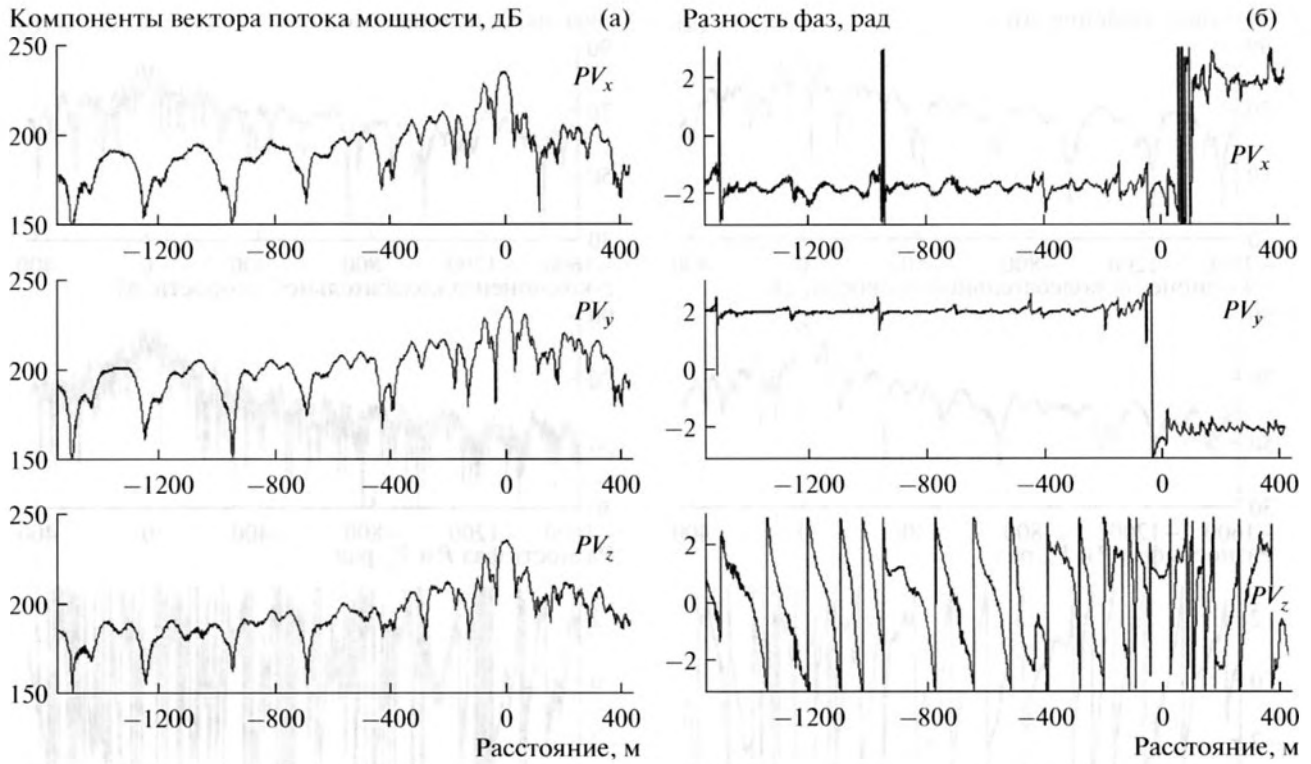


Рис. 4. (а) Амплитуды и (б) разности фаз ортогональных составляющих вектора потока мощности узкополосного сигнала на частоте 117 Гц.

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) различаются. В ближней зоне справедливо лучевое приближение и наблюдается подобие зависимостей от расстояния 3Д и вертикальных составляющих ВКС. Но величина вертикальных составляющих ВКС на этих расстояниях из-за косинусоидальной зависимости чувствительности от угла падения убывает быстрее, чем звуковое давление, что полностью соответствует выводам работы [20].

После формирования нормальных волн интерференционные структуры поля 3Д и горизонтальных составляющих ВКС по сравнению с зависимостями для вертикальных составляющих ВКС становятся различными, поскольку вертикальный векторный приемник подавляет моды первых номеров и подчеркивает моды высоких номеров. Поэтому амплитудная многомодовая интерференция вертикальных составляющих ВКС сглаживается. Экстремальные зоны максимумов и минимумов поля 3Д и горизонтальных составляющих ВКС из-за различия модового состава смещаются по расстоянию относительно аналогичных зависимостей вертикальных составляющих ВКС, т.е. они не «подобны».

Анализ зависимостей от расстояния разностей фаз показывает, что вблизи зон интерференционных минимумов градиенты фазы быстро возрастают, а в зоне интерференционных минимумов звукового давления наблюдаются скачки разности фаз между 3Д и вертикальной составляющей ВКС. Причем чем глубже минимум зависимости $P(r(t))$, тем больше величина скачка разности фаз. Согласно расчетам, выполненным в [10], 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 дислокации (глубокого интерференционного минимума) и при «обходе дислокации» возможен полный поворот потока мощности и изменение фазы на 2π . Одновременно формируются и отклонения от линейной зависимости интегральной фазы — при обходе особой точки (дислокации) фаза изменяется на величину $+2\pi$ или -2π (в зависимости от «знака дислокации»). Отметим, что при распространении плоской волны в свободном пространстве и движении вдоль линии потока энергии фаза поля должна монотонно расти или убывать. В волноводах фазовая структура из-за интерференции мод существенно усложняется. Сформулированные выводы практически подтверждаются — в зонах глубоких интерференционных минимумов, в которых не только звуковое

давление $P \rightarrow \min$, но и горизонтальные и вертикальная проекции колебательной скорости $|V_x|$, $|V_y|$, $|V_z| \rightarrow \min$, наблюдаются скачки фазы в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Скачки разности фаз в зонах интерференционных минимумов имеют различные градиенты и различные знаки. В отдельных зонах градиент фазы непрерывен и при смене знака фазы проходит через нуль. В этих точках, по-видимому, образуются “седла” [9, 10]. В других зонах наблюдаются скачкообразные изменения величины фазы, градиент фазы характеризуется разрывом непрерывности и стремится к бесконечности (см. рис. 3 и 4).

Отметим, что в зонах интерференционных минимумов сигналов, полученных в реальных морских условиях, скачки фаз могут зависеть не только от фазовой структуры суммарного сигнала (для суммы нормальных волн), но и от случайных фаз помех, если они в зонах интерференционных минимумов соизмеримы или превышают величину сигнала. Но в обсуждаемых экспериментах величина ЗД и в зоне интерференционных минимумов превышает помеху на величину не менее 15 дБ. Поэтому данное предположение не реализуется.

Согласно результатам [9, 10], вблизи точек дислокации должны наблюдаться завихренности. Их проявлением может быть изменение знака — направления потока мощности вблизи особых точек относительно направления основного сигнала, распространяющегося в волноводе. Расчеты усредненных за период сигнала величин компонент ВПМ $J_{x,y,z}$ выполнены по формуле $\langle J_{x,y,z} \rangle = (1/2) \operatorname{Re}(PV_{x,y,z}^*)$, звездочкой обозначается комплексно-сопряженная величина трех проекций ВКС. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что в зонах глубоких минимумов ЗД формируются условия для образования дислокаций и, соответственно, завихренностей. Подтверждением этому является смена знака фазы между P и V_r в зоне вблизи интерференционных минимумов (рис. 3 и 4).

Из рис. 3 и 4 также следует, что при увеличении расстояния в зонах минимумов и, соответственно, скачков фазы изменяются знаки разности фаз не только в горизонтальном направлении, но и в направлении прихода вертикальной составляющей ВКС. Это приводит к повороту градиентов фазы и в вертикальном направлении. Как следствие, изменяются и становятся знакопеременными “углы возвышения” вектора колебательной скорости [21]. Иными словами, максимальные значения кинетической энергии волны принимаются приемником под различными углами θ — не только с горизонтальных направлений, но и с верхней или нижней полуплоскости. Отметим, что самые большие и знакопеременные скачки величины θ наблюдаются в зонах глубоких интерференционных минимумов ЗД, в пределе — с нулевыми величинами.

Как следует из рис. 3 и 4, кроме зон с глубокими интерференционными минимумами, в которых должны формироваться дислокации и седла, наблюдаются зоны с относительно небольшими минимумами поля ЗД. В этих зонах не наблюдаются резкие и кратковременные (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 вертикальных составляющих 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.

На рис. 3б 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 интерференционных максимумов асимптотически стремится к нулю, что соответствует модели эквивалентной плоской (квазибегущей) волны [21]. Отметим также, что на малых расстояниях — в зоне траверса — пространственный масштаб зон интерференционных максимумов $P(r(t))$ и $V_z(r(t))$ заметно меньше, чем в дальней зоне. Как следствие, в районе траверса скачки фаз, изменения направления вертикальной составляющей ВКС и угла прихода происходят чаще. Из-за частых чередований зон максимумов и минимумов и изменения знаков вертикальной составляющей 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. По этой причине угол возвышения изменяется не только из-за изменения величины V_z . При увеличении расстояния до источника происходит ослабление (“вымирание”) мод высоких номеров, уменьшается вариация V_z и углы прихода в среднем локализуются вблизи малых, близких к нулю углов.

Интерференция вертикальных составляющих ВКС также влияет на градиенты фазы и изменения генеральной зависимости интегральной фазы от расстояния. В частности, в зонах интерференционных минимумов вертикальных составляющих ВКС, как и в зоне минимумов ЗД, формируются скачки разности фаз.

На рис. 4а в качестве примера приведены интерференционные зависимости от расстояния амплитуд горизонтальных x - и y -составляющих и вертикальной z -составляющей ВПМ. Расчет ком-

понент потока мощности и разностей фаз производился по стандартным (известным) формулам [1–4]. На рис. 4б приведены разности фаз между 3Д и x -, y - и z -составляющими колебательной скорости. Обработка выполнена для тонального сигнала, принятого придонным ВСП № 4, на частоте 117 Гц.

Видно, что зависимости от расстояния всех трех составляющих ВПМ в ближней зоне подобны, что подтверждает вертикальную ориентацию z -компоненты. Но горизонтальные составляющие имеют индивидуальные зоны минимумов в момент прохода излучателем направлений, по которым чувствительность x - или y -компоненты из-за косинусоидальной зависимости чувствительности минимальна (соответственно, для x -компоненты это расстояние порядка +120 м, для y -компоненты –20 м). При проходе этих участков, как и следовало ожидать [1–3], происходят скачки разности фаз между x - или y -компонентами ВКС относительно друг друга (относительно 3Д на $\pm 90^\circ$).

На рис. 4 также видно, что в дальней зоне две горизонтальные x - и y -составляющие ВПМ практически повторяют друг друга (до деталей). Структура вертикальной составляющей ВКС при увеличении расстояния вследствие более интенсивного затухания мод высоких номеров также становится более похожей на зависимости от расстояния горизонтальных компонент ВКС. Но зоны минимумов, как и на рис. 3, в основном, смещены.

Отметим дополнительно, что в зонах интерференционных минимумов горизонтальных составляющих потока мощности (или минимумов 3Д) наблюдаются знакопеременные скачки разности фаз различной величины и различного знака. Это означает, что в окрестности зон интерференционных минимумов — в зонах вблизи дислокаций — изменяются знаки потока мощности. Согласно [9, 10], в этих зонах должна наблюдаться смена направления прямого потока энергии на обратный и формироваться “завихренность”.

Вертикальные составляющие ВПМ на рис. 4 в связи с изменением направления прихода вертикальных составляющих ВКС также изменяют знак, подобно данным на рис. 3. Изменяются на различных участках и градиенты фазы: наклон интегральной фазы отклоняется от линейной зависимости под разными углами и с разными знаками — имеются зоны с нулевым градиентом фазы (зоны вблизи “седел”) и зоны с обратным градиентом фазы (зоны вблизи дислокаций).

По этой причине максимальная величина ВКС приходит в точку приема под разными углами возвышения. Величина скачка разности фаз существенно зависит от глубины интерференционного минимума — при больших “провалах” скачок разности фаз стремится к значениям от $+180^\circ$ до -180° . Это также свидетельствует о по-

вороте направления потока мощности в этих зонах (поворот на 360°). Отметим также, что величина скачка разности фаз зависит от близости сечения поля буксируемым источником — при удалении этого сечения от глубины расположения особых точек глубины интерференционных минимумов уменьшаются (тем более, что источник движется и происходит усреднение измеряемых величин). Как следствие, уменьшается вариация углов возвышения.

Из рис. 3 и 4 также следует, что из-за различия модового состава расстояния, на которых наблюдаются зоны минимумов P и V_z , существенно различаются. Но наблюдается общая закономерность — при увеличении расстояния из-за быстрого затухания мод высоких номеров количество зон, в которых происходят изменения направления V_z и скачки фазы между P и V_z , а также скачки углов возвышения, уменьшается.

АНАЛИЗ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ И ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТОКА МОЩНОСТИ ПО ШИРОКОПОЛОСНЫМ СИГНАЛАМ

Необходимость исследования характеристик потока мощности, сформированного широкополосными источниками, определяется тем, что целый ряд практически важных задач, например, измерение или обнаружение маломощных источников, решается с использованием модели широкополосного шумового сигнала [22]. В связи с важными практическими приложениями представляет также интерес обработка сигналов с полосой анализа $1/3$ октавы [23].

Рассмотрим результаты анализа характеристик потока мощности при использовании в качестве широкополосного излучателя буксируемого по прямолинейным галсам низкочастотного пневмоисточника.

Пневмоисточник буксировался на глубине 15 м. Излучающее судно выполняло галсы, сначала приближаясь к приемной системе с расстояния 12 км под острым углом, затем удаляясь под тупым углом, не пересекая ось x . Минимальное расстояние между пневмоисточником и приемной системой составляло около 1 км. Схема маневрирования судна-буксировщика относительно стационарно установленной векторно-скалярной антенны приведена на рис. 5.

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные при движении пневмоисточника из точки 2 в точку 3. Эти эксперименты выполнены в том же районе и с теми же приемными модулями, которые использовались при регистрации сигналов от буксируемых тональных источников.

Временная зависимость импульса и спектр сигнала пневмоисточника в точке излучения, за-

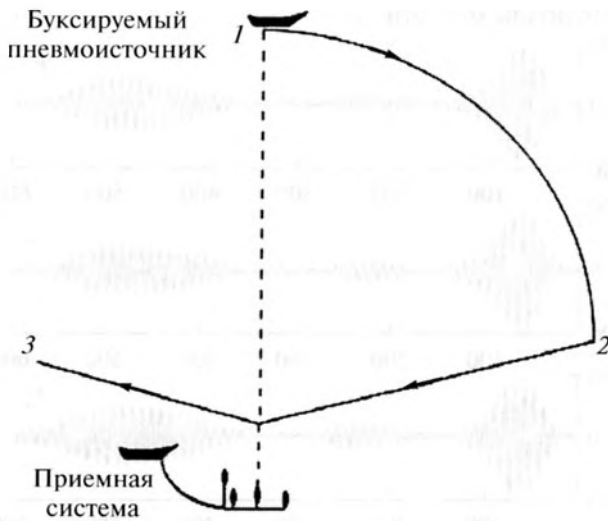


Рис. 5. Схема буксировки пневмоисточника.

регистрированные на расстоянии 2 м опорным гидрофоном, представлены на рис. 6. Излучение импульсов на радиальных галсах осуществлялось с периодом 30 с.

Для предварительного анализа условий распространения звука и характеристик сигнала выполнялась узкополосная фильтрация принятых импульсов. Центральные частоты фильтров выбирались в максимумах спектра сигнала пневмоисточника, зарегистрированного опорным гидрофоном. Эти максимумы соответствуют частотам 25, 50, 75 Гц и т.д. Ширина полосы фильтра составляла 15% от центральной частоты. В результате обработки установлено, что в сигналах в зависимости от рабочей частоты выделяются от одной до трех мод. Первую моду можно выделить на частоте 50 Гц, соответствующей второму максимуму в спектре излучаемого сигнала, вторую

моду — начиная с частот 60–75 Гц, третью — начиная с частоты 90 Гц. На более высоких частотах хорошо видны три первые моды, особенно в начале траектории буксировки излучателя. Моды более высоких номеров при распространении достаточно быстро затухают.

На рис. 7 приводятся результаты узкополосной фильтрации сигналов и выделения мод на частоте 99 Гц. Импульс излучен в начале траектории движения с расстояния 11 км. По оси абсцисс отложено время, отсчитываемое от момента прихода фронта импульса. На рис. 7а для сигналов, принятых приемниками каждого придонного модуля, видны приходы всех трех мод как на скалярном, так и на векторных каналах. Для приподнятого ВСП (рис. 7б) скалярный и векторный с горизонтальной ориентацией приемники выделяют первую и третью моды. В вертикальной составляющей колебательной скорости выделяется только вторая мода. Эти характеристики мод полностью согласуются с результатами работы [19].

Для сигналов, принятых ВСП (№ 4), построены зависимости амплитуды и фазы составляющих ВПМ в полосе 1/3 октавы с центральной частотой 200 Гц. На рис. 8 приведены данные, полученные при буксировке пневмоисточника радиальными галсами. Зоны глобальных минимумов горизонтальных составляющих ВПМ соответствуют зонам минимумов чувствительности горизонтальных составляющих приемников колебательной скорости. Выделяется также и дальняя зона, для которой характерно монотонное спадание амплитуды потока мощности с увеличением расстояния. Можно отметить более быстрое спадание z-компоненты вектора потока мощности по сравнению с горизонтальными составляющими, что согласуется с [24]. При проходе зоны минимума чувствительности векторного x-канала наблюдается естественный скачок фазы на 180°. Аналогичный результат можно отметить и для y-компоненты. Но

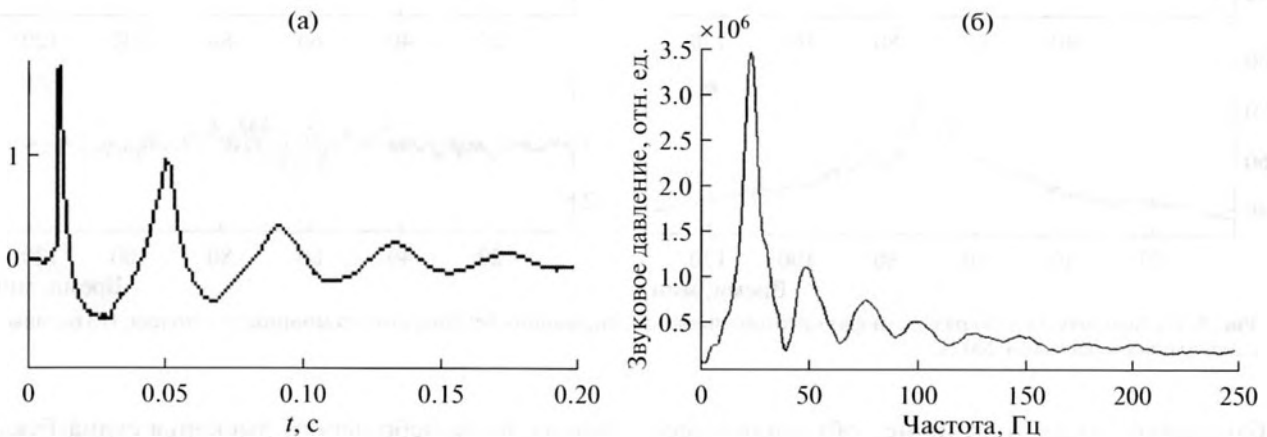


Рис. 6. (а) Временная зависимость импульса и (б) спектр сигнала, излучаемого пневмоисточником (величины приведены в относительных единицах).

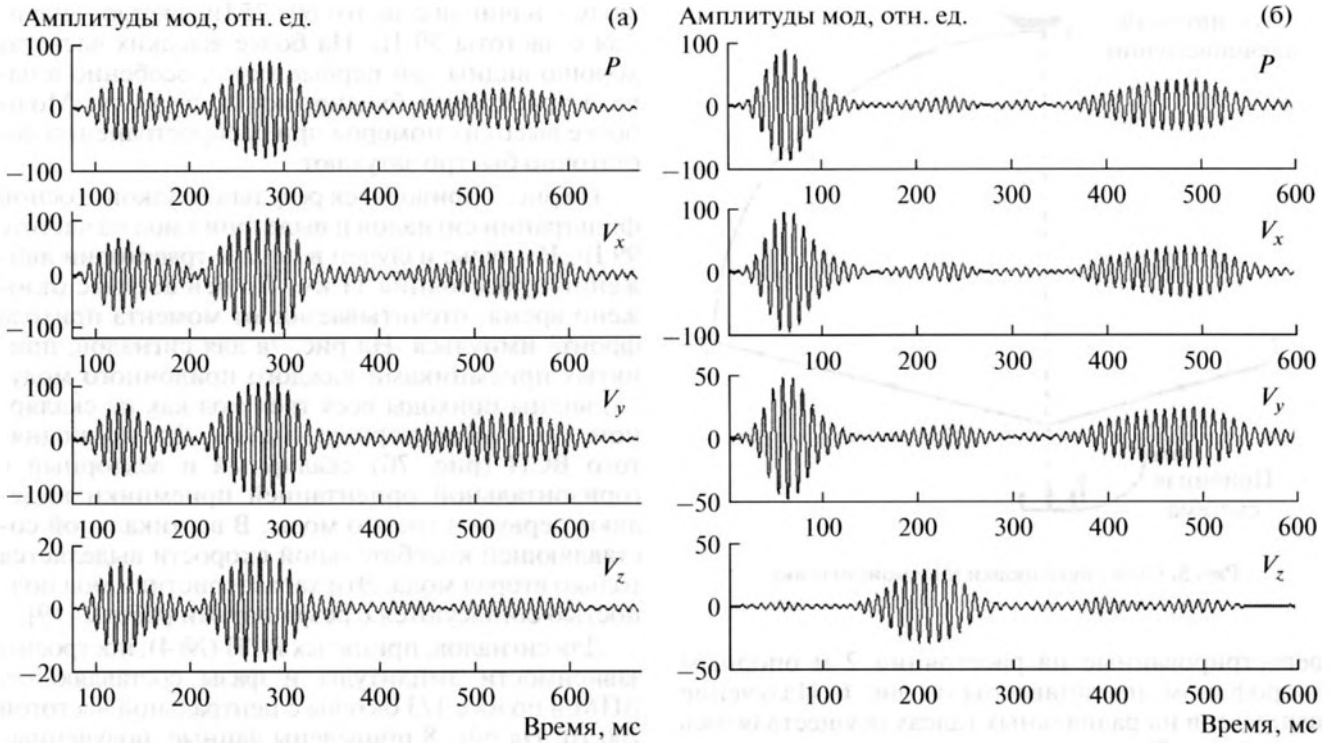


Рис. 7. Моды, выделенные при узкополосной фильтрации импульсов, принятых (а) придонным ВСП и (б) приподнятым ВСП. Частота 99 Гц.

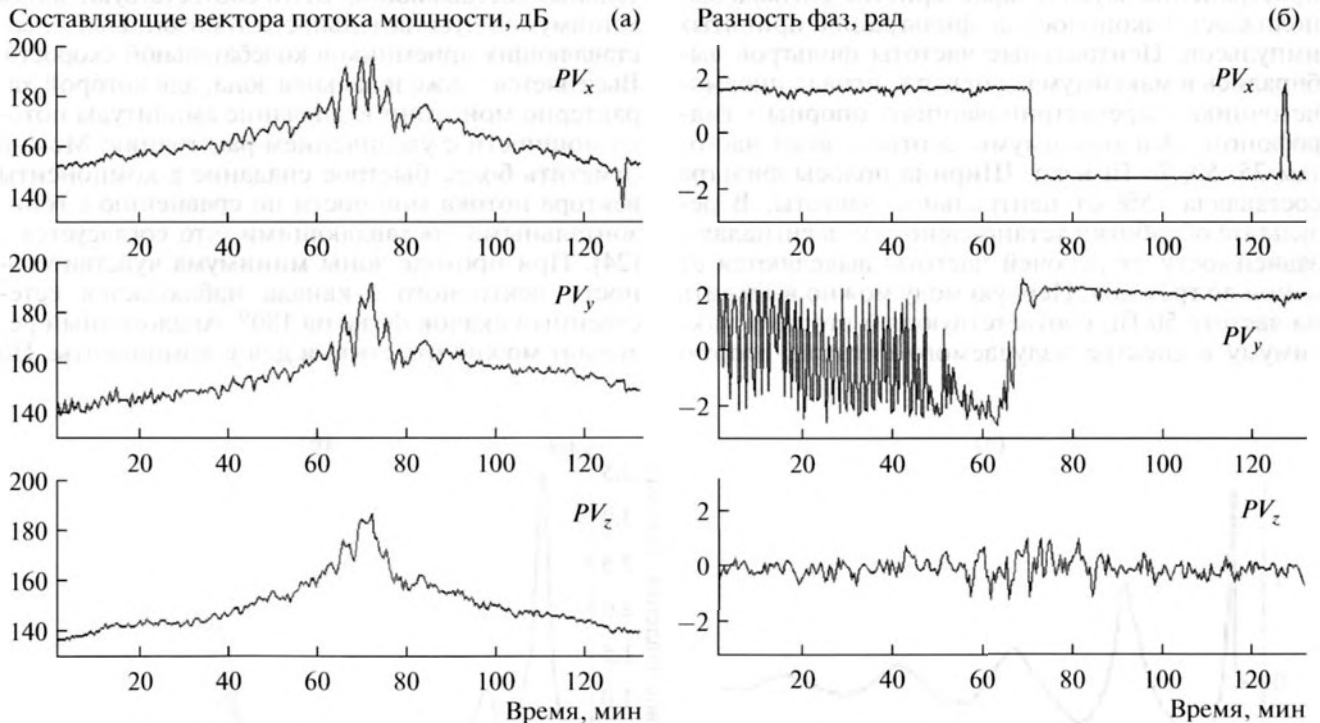


Рис. 8. (а) Амплитуды и (б) разности фаз ортогональных составляющих вектора потока мощности в полосе 1/3 октавы с центральной частотой 200 Гц.

наблюдается также и отличие, объясняющееся движением излучателя вблизи линии, соответствующей минимуму чувствительности y -компо-

ненты: из-за небольшого рысканья судна-буксировщика по курсу или, возможно, из-за малых перемещений ВСП во времени под действием

придонных течений ВСП может периодически ориентироваться на источник разными зонами, соответствующими различным участкам косинусоидальной характеристики направленности. Как следствие, возникают многократные скачки фаз на π радиан, наблюдаемые на рис. 8б.

Разность фаз между звуковым давлением и z -компонентой для сигнала с полосой анализа $1/3$ октавы также изменяет знак, что свидетельствует об изменении направления прихода вертикальной составляющей ВКС и приходе фронта суммарной волны в точку приема с различными углами возвышения. Но на зависимостях от расстояния горизонтальных составляющих, в отличие от рис. 4, при широкополосной обработке зоны интерференционных минимумов “смазываются” из-за различия на разных частотах мест расположения дислокаций ($\Delta\omega/\omega \sim \Delta r/r$) [9, 10]. Соответственно, “замываются” и скачки фаз. Таким образом, уже в случае приема сигналов в полосе $1/3$ октавы минимумы выражены слабо и скачки фаз практически не проявляются. При более широкополосной обработке интерференция, как известно, проявляется слабо, и обнаруживаются только зоны с интерференционными максимумами.

Можно также отметить, что скачки разности фаз между P и V_z , так же как для тональных сигналов, уменьшаются при увеличении расстояния, что объясняется затуханием мод высоких номеров. По этой же причине и величина V_z с увеличением расстояния убывает быстрее, чем V_x и V_y .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим особенности структуры звукового поля в зонах интерференционных максимумов.

В этих зонах градиенты фазы ЗД и горизонтальных составляющих ВКС слабо зависят от координат и частоты звука, что является экспериментальным подтверждением гипотезы об эквивалентных плоских волнах [21]. Это позволяет в этих зонах — при использовании протяженных горизонтальных линейных или планарных, например, донных антенн — когерентно суммировать сигналы, принятые пространственно разнесенными приемниками различных типов. Отметим, что на низких частотах зоны интерференционных максимумов достаточно протяженные, и для решения практических задач целесообразно использовать многоэлементные антенны больших волновых размеров. Применение антенн с размерами, превышающими размеры зон интерференционных максимумов, как правило, нецелесообразно, так как помехоустойчивость незначительно повышается [25]. Очевидно, что для обеспечения однонаправленности приема и разделения сигналов, принятых с противоположных направлений, например,

“спереди” или “сзади”, целесообразно использовать протяженные векторно-скалярные антенны или векторно-скалярные модули [8].

В зонах интерференционных максимумов угол прихода звуковой энергии изменяется в малых пределах, и при увеличении расстояния сигналы приходят с направлений, близких к горизонтальному.

В зонах интерференционных максимумов разность фаз между звуковым давлением и горизонтальной составляющей ВКС невелика и на больших расстояниях стремится к нулю. Как следствие, в этих зонах имеется возможность эффективного накопления энергии как скалярных, так и векторно-скалярных сигналов. Поскольку в этих зонах на каждом одиночном приемном (скалярном или векторном) канале увеличивается отношение сигнал/помеха на 4–8 дБ и более, то становится очевидным, что обнаружение и измерение характеристик слабых сигналов с использованием протяженных антенн необходимо производить именно в зонах интерференционных максимумов.

Следует также отметить устойчивость характеристик поля в этих зонах 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 [26].

Зоны интерференционных минимумов характеризуются следующими особенностями.

Скачки разностей фаз, оценка их величин и знаков в зонах интерференционных минимумов звукового давления и потока мощности представляют несомненный интерес с общезначимой точки зрения. Это явление связано с характеристиками особых — сингулярных точек: дислокаций в зонах с нулевыми значениями звукового давления и седел фазового фронта, где обращается в нуль градиент фазы поля [10]. Эти характеристики поля потенциально могут проявиться в зонах интерференционных минимумов, но их регистрация возможна только при высоком отношении сигнал/помеха. Кроме того, согласно [9, 12, 13], зоны с интерференционными минимумами наиболее чувствительны к изменению характеристик передаточной функции волновода, зависящих от акустико-гидрологических условий распространения звука, что, с одной стороны, позволяет их рекомендовать, например, при акустической калибровке волновода сигналами большой амплитуды. Но, с другой стороны, это затрудняет обработку и анализ сигналов из-за малого отношения сигнал/помеха и неустойчивости передаточной функции. Согласованная с передаточной функцией волновода обработка сигналов в этих зонах тем более невозможна.

Отметим, что на участках траектории движения источника, примыкающих к зонам интерференционных минимумов, быстро изменяются градиенты фазы, что из-за неопределенности их величин не позволяет в этих зонах эффективно использовать протяженные многоэлементные антенны. При обнаружении или исследовании широкополосных сигналов зоны дислокаций и седел “замываются”, так как на разных частотах их координаты изменяются по закону $\Delta r/r \sim \Delta \omega/\omega$.

Поэтому для решения различных практических задач (обнаружение, пеленгование и т.д.) целесообразно использовать характеристики поля в зонах интерференционных максимумов, для которых, во-первых, на каждом приемнике увеличивается отношение сигнал/помеха. Во-вторых (и для антенной обработки это более важно), в зонах интерференционных максимумов наблюдаются гладкие (почти линейные) градиенты фазы [21, 25], что позволяет когерентно суммировать сигналы от разнесенных в пространстве приемников, формировать характеристики направленности, пеленговать и обнаруживать источники сигналов. Существенно также, что в дальней зоне величины вертикальных составляющих ВКС, как правило, меньше, чем горизонтальные составляющие [24], что уменьшает вероятность их выделения и обнаружения на фоне помех.

Выше уже отмечалось, что разности фаз между ЗД и горизонтальными составляющими ВКС в зонах интерференционных максимумов уменьшаются с увеличением расстояния и частоты. Это позволяет выполнять длительное накопление во времени и по пространству сигналов, принятых ВСП, в частности, по потоку мощности.

Градиенты фазы и направления прихода вертикальных составляющих ВКС при изменении расстояния изменяют знак не только для гармонических сигналов, но и для узкополосного шума. Как следствие, фронт волн в зависимости от расстояния приходит в вертикальной плоскости в некотором диапазоне углов возвышения. Однако для широкополосных сигналов вариация углов возвышения существенно меньше, чем для тональных сигналов. В дальней зоне эта вариация еще уменьшается и приближается к известным в литературе величинам, на основании которых задачи обнаружения сигналов в волноводе рекомендуется решать в диапазоне углов возвышения $\pm(8^\circ \dots 10^\circ)$ [22].

В этих условиях для приема сигналов в волноводе без потери прямого луча, т.е. без его выхода за пределы вертикальной характеристики направленности антенны, необходимо обеспечивать широкоугольный прием сигналов. Для повышения помехоустойчивости и подавления распределенных помех рекомендуется использовать узконаправленные в вертикальной плоскости характеристики направленности, принимая и анализируя одновременно сигналы “перчаткой” характеристик

направленности, смещенных друг относительно друга по углу возвышения на $2^\circ - 3^\circ$ относительно горизонтали. Общий диапазон изменения углов возвышения может быть в пределах порядка $\pm(10^\circ \dots 15^\circ)$. При понижении частоты, особенно для узкополосных сигналов, угол возвышения изменяется в более широких пределах, что требует усложнения конструкции приемных антенн и более сложных алгоритмов обработки. В частности, необходим прием сигналов в более широком диапазоне углов возвышения.

Целесообразность использования векторной (вихревой) модели потока мощности для анализа представленных и аналогичных результатов в настоящее время представляется неочевидной. Это тем более верно, так как в работах [10, 11] показано, что величина звуковой энергии, захваченной вихрем, невелика. Кроме того, при обнаружении широкополосных сигналов следует учитывать, что зоны интерференционных минимумов (дислокаций) на различных частотах имеют различные координаты. Следовательно, энергия, сосредоточенная в завихренностях, размазана по пространству, что затрудняет обнаружение и использование этих зон. Следует также отметить, что в волноводе существует большие зоны, где дислокации и, соответственно, зоны завихренности вообще отсутствуют – не выполняется условие их существования [10–12].

Перечисленные обстоятельства позволяют для решения практических задач дать рекомендацию сосредоточить дальнейшие исследования на анализе характеристик поля в зонах интерференционных максимумов.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить коллег В.М. Кузькина, В.Г. Петникова и А.А. Лунькова за полезное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шуров В.А.* Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.
2. *Гордиенко В.А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
3. *Дзюба В.П.* Скалярно-векторные методы теоретической акустики. Владивосток: Дальнаука, 2006. 195 с.
4. *Смарышев М.Д.* О помехоустойчивости гидроакустического комбинированного приемника // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 3. С. 357–358.
5. *Баскин В.В., Смарышев М.Д.* Помехоустойчивость плоской антенны, состоящей из комбинированных приемников // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 4. С. 629–626.
6. *Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Селезнев И.А.* Анализ характеристик обнаружения сигнала векторно-скалярной приемной системой // Науч.-техн. сб. “Гидроакустика”. 2014. № 19(1). С. 68–79.

7. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н. О помехоустойчивости приемника, регистрирующего поток акустической мощности // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 5. С. 774–785.
8. Аверьянов А.В., Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н. Экспериментальное исследование характеристик направленности векторно-скалярной антенной // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 5. С. 681–694.
9. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А., Петников В.Г., Попов В.А., Шмелев А.Ю. Дислокационная томография океана: новый метод акустической диагностики // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 4. С. 764–765.
10. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потoki энергии в окрестности дислокаций фазового поля волнового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104. № 5(11). С. 3769–3783.
11. Chien C.F., Waterhouse R.V. Singular points of intensity streamlines in two-dimensional sound fields // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101(2). P. 705–712.
12. Елисеевни В.А., Тужилкин Ю.И. Поток акустической мощности в волноводе // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 781–788.
13. Кузькин В.М., Огурцов А.В., Петников В.Г. Влияние гидродинамической изменчивости на частотные смещения интерференционной структуры звукового поля в мелком море // Акуст. журн. 1988. Т. 44. № 1. С. 94–100.
14. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–843.
15. Щуров В.А., Черкасов А.В., Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные особенности структуры поля вектора интенсивности в акустических волноводах // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2(12). С. 4–17.
16. Белов А.И., Боголюбов Б.Н., Кузнецов Г.Н. Калибровка низкочастотного излучающего комплекса в условиях мелкого моря / Труды VI международной научн.-техн. конф. “Современные методы и средства океанологических исследований”. М.: Институт океанологии РАН, 2000. С. 139–147.
17. Белова Н.И., Кузнецов Г.Н. О позиционировании векторно-скалярных модулей и пеленговании широкополосных источников в мелком море / Труды XII Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 453–455.
18. Белова Н.И., Боровской П.А., Кузнецов Г.Н. Пеленгование буксируемого источника с использованием низкочастотного многокомпонентного векторно-скалярного приемника / Сб. трудов научной конференции “Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества”. Саратов, 2011. Т. 2. С. 305–309.
19. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Исследование интерференционной и модовой структуры скалярных и векторных полей в мелком море / Труды XVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2005. Т. 4. С. 192–195.
20. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Интерференционная структура поля инфразвуковых направленных источников в мелком море // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 1. С. 36–47.
21. 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.
22. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
23. Красовский П., Цыганков С., Теверовский Г. Проблемы измерения гидроакустических характеристик морских объектов // Военно-морской салон. СПб., 2011. С. 20–24.
24. Кузнецов Г.Н. Проблемы оценки приведенной шумности движущихся объектов в мелком море / Материалы Всеросс. научно-техн. конф. “Метрология гидроакустических измерений”. Менделеево: ФГУП “ВНИИФТРИ”, 2013. Т. 1. С. 57–73.
25. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. Пеленгование низкочастотных источников в волноводе гидроакустическими станциями с протяженными буксируемыми или бортовыми антеннами // Науч.-техн. сб. “Гидроакустика”. 2013. № 17(1).
26. Каришнев Н.С., Кузнецов Г.Н., Луньков А.А. Обнаружение и оценка координат шумового источника в мелком море с использованием скалярной или векторно-скалярной антенн и согласованной фильтрации // Научно-техн. сб. “Гидроакустика”. 2014. № 20. С. 74–80.