УДК 534.867

А.Л. Бреховских[1], Е.Р. Вольтер[2], А.С. Зверев[3], М.С. Клюев[1], И.Я. Ракитин[1], А.Э. Сажнева[1], А.А. Шрейдер[1]

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ ПАЛЕОСТРУКТУР МОРСКОГО ДНА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997, г.Москва, Нахимовский пр., д.36
Тел.+7(495) 380-41-50, mklyuev@mail.ru
[2]Институт экологии Академии Наук Абхазии
Республика Абхазия, г. Сухум, ул. Красномаяцкая, д. 67
Тел.+7 (940) 921-22-65, ervolter@mail.ru
[3]Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д.19
Тел. +7(499) 137-14-84, sparker1@yandex.ru

Рассматриваются некоторые особенности сейсмоакустического обнаружения и изучения палеоструктур морского дна в прибрежной зоне.

Палеоструктуры прибрежной морской зоны являются уникальными объектами морской геологии, которые возникают при затоплении дельт и русел рек вследствие повышении уровня моря или опускания прибрежной суши и дальнейшей их эволюции в морских условиях.

Как показали натурные исследования [1], для обнаружения и изучения донных палеоструктур в прибрежной зоне эффективно совместное использование сейсмоакустических средств широкого частотного диапазона f (200 кГц - 300 Гц) с комбинированными диаграммами направленности θ (узкой от 4° и широкой до 180°), а также применение высокоточной GPS навигации. В качестве их применяются:

- высокочастотный узколучевой эхолот (f ~ сотен килогерц, θ ~ порядка единиц градусов), определяющий профиль морского дна;
- высокочастотный узколучевой профилограф (f ~ десятка кГц, θ ~ единиц градусов), определяющий тип и структура верхнего осадочного слоя;
- среднечастотный сейсмоакустический профилограф с электромеханическим излучателем типа «бумер» (f ~ единиц килогерц, θ ~ десятков градусов), определяющий более глубокую донную структуру;
- низкочастотный сейсмоакустический профилограф с электроискровым излучателем типа «спаркер» (f ~ сотен герц, θ ~ десятков градусов), определяющий еще более глубокие донные структуры.

Применение высокоточной GPS навигации позволяет определять детальное пространственное строение палеоструктур и выполнять их

подробное картографирование, что повышает достоверность их идентификации и точность определения их параметров.

Ключевым вопросом в обнаружении палеоструктур являются критерии и классификационные признаки их наличия. В результате натурных исследований и аналитической проработки были определены основные критерии и классификационные признаки их наличия:

1. Наличие «коробчатого» профиля на батиметрии морского дна и его плавное трансляционное повторение в пространстве.

2. Наличие «коробчатого» профиля, заполненного осадками, на сейсмоакустической структуре морского дна и его плавное трансляционное повторение в пространстве.

3. Наличие изрезанной и расчлененной геоморфологии, не подвергавшейся воздействию водного потока, говорит об отсутствии палеорусла в данном месте.

4. Соответствие положения палеорусла современным речным структурам суши – руслу, берегам, долине, каньону, дельте.

5. Возможное наличие палеопритоков и палеодельт, распознаваемых согласно тем же критериям палеорусла.

6. Наличие газовых факелов, во многих случаях сопутствующих палеоруслу.

Под «коробчатым» профилем здесь понимается профиль в виде чаши с выраженными береговыми склонами и уплощенным дном. Он должен плавно трансляционно повторяться в пространстве, очерчивая канал палеорусла. Эта чаша, как правило, заполнена слабо консолидированными донными осадками с ровной поверхностью, поскольку она является локальным глубинным максимумом и в него сваливается весь осадочный материал. Наличие изрезанной и расчлененной геоморфологии (скальных осадочных пород, мергелевых гребней и т.п.), не подвергавшейся воздействию водного потока, говорит об отсутствии палеорусла в данном месте. Как правило, палеорусло является продолжением современного сухопутного речного русла или ее дельты. В палеорусло могут впадать палеопритоки, образуя места их слияния, а также оно может разделяться на разветления в виде палеодельты. Палеруслу зачастую сопутствуют газовые факелы, поскольку оно может быть приурочено к геологическим разломам, а заполняющие его осадки менее консолидированы и более прозрачны для выхода донных газов.

Таким образом, принципы обнаружения палеоструктур в прибрежной зоне заключаются в следующем:

1. Использование широкополосного сейсмоакустического зондирования морского дна при комбинированных диаграммах направленности.

2. Обеспечение высокоточной морской GPS навигации.

3. Применение критериев и классификационных признаков наличия палеоструктур.

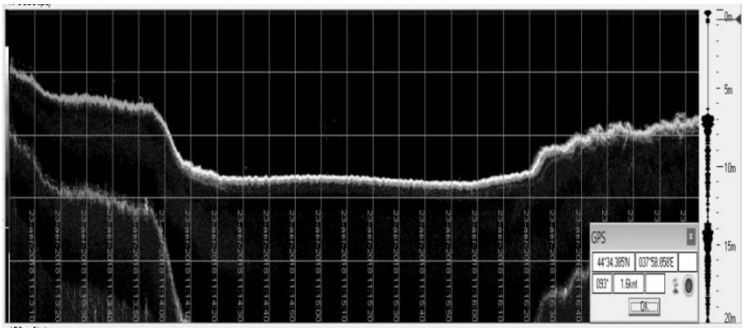


Рис.1 Поперечный профиль палеорусла реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик (эхолот f= 200 кГц, θ=4°).

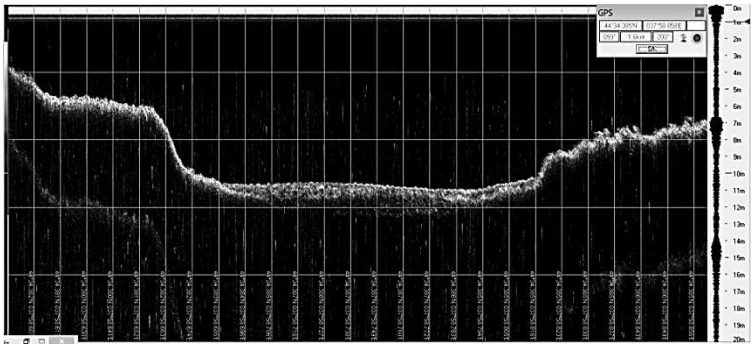


Рис.2 Поперечный профиль палеорусла реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г. Геленджик (параметрический профилограф f=20 кГц, θ=4.5°).

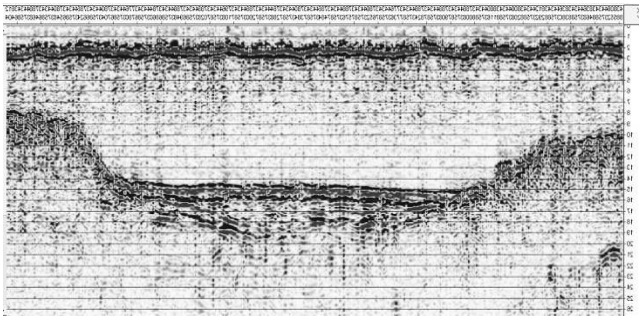


Рис.3 Среднечастотный широконаправленный профилограф 1-2 кГц с излучателем типа «бумер»

В качестве иллюстрации этих принципов рассмотрим результаты изучения палеоструктур реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик [1]. В этих исследованиях использовались комплекс гидроакустического профилирования донной поверхности и верхнего слоя осадков разработки

ИО РАН и сейсмоакустический комплекс «Геонт-шельф» производства ООО «Спектр-геофизика» [1].

На Рис.1 представлен поперечный профиль палеорусла реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик по данным эхолота (частота 200 кГц, диаграмма направленности 4°). Из рисунка видно, что поперечное сечение палеорусла имеет «коробчатую» форму шириной около 120 метров с крутыми береговыми склонами высотой до 6 метров и ровным, по-видимому, осадочным заполнением на глубине около 11 метров. Можно предположить, что палеорусло представляет собой канал, вырезанный древними потоками в скальном осадочном основании, который частично заполнен современными осадками до практически ровной поверхности.

На Рис.2 представлен поперечный профиль палеорусла реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик по данным высокочастотного параметрического профилографа (частота 20 кГц, диаграмма направленности 4.5°) в той же точке, что и Рис.1. Из рисунка видно, что зондирующий импульс практически не проникает в береговые склоны палеорусла, что говорит об их возможном скальном осадочном составе, и проникает на глубину около 1 метра вглубь грунта, заполняющего чашу палеорусла, что говорит о его возможном неуплотненном осадочном составе. Из рисунка следует, что скальные берега уходят под неуплотненные осадки, заполняющие чашу палеорусла.

На Рис.3 представлен поперечный профиль палеорусла реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик по данным среднечастотного профилографа с излучателем типа «бумер» (частота 1-2 кГц, широконаправленный) в той же точке, что и Рис.1. Из рисунка видно, что зондирующий импульс по-прежнему практически не проникает в береговые склоны палеорусла, что дополнительно подтверждает их возможный скальный осадочный состав, и проникает на глубину около 4 метров вглубь заполняющего чашу палеорусла грунта, что подтверждает его возможный неуплотненный осадочный состав. На рисунке отчетливо видна форма дна палеорусла с максимальной глубиной около 4 метров относительно поверхности заполняющих его осадков, которое, по-видимому, слагается скальным осадочным грунтом.

Данная работа выполнена в рамках темы Государственного задания № 0149-2019-0005 ИО РАН и гранта РФФИ № А 20-05-00089.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Клюев М.С., Шрейдер А.А., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Зверев А.С., Вольтер Е.Р., Ольховский С.В., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Сажнева А.Э. Палеодолина реки Ашамба в геоморфологии дна Голубой бухты вблизи г.Геленджик по данным параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Пятая международная школа молодых ученых, Москва: Материалы конференции. – М.: ИПМех РАН, 2019. С. 81-83.

О проблемах создания многочастотных резонансных подводных излучателей малых волновых размеров

П. Н. Кравчун (МГУ)

Преобразователь на основе пьезоактивных дискретных структур – неоднородная активная структура из N электромеханических 6-полюсников, соединенных механическими сторонами в цепочку.

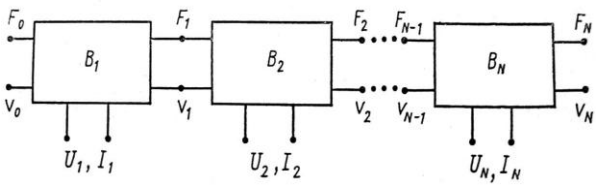


Рис. 1. Общая схема структуры

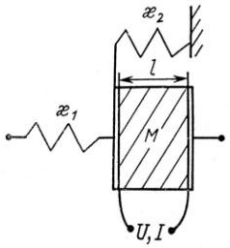


Рис. 2. Элементарное звено преобразователя

Электрические стороны 6-полюсников могут быть использованы для подвода или отбора энергии. Характеристическая матрица [B], связывающая динамические переменные на сторонах 6-полюсника:

$$F_j=b_{11}F_{j-1}+b_{12}v_{j-1}+b_{13}U_j, \quad v_j=b_{21}F_{j-1}+b_{22}v_{j-1}+b_{23}U_j, \quad I_j=b_{31}F_{j-1}+b_{32}v_{j-1}+b_{33}U_j.$$

Для динамических переменных, описывающих волновой процесс в j-м соединении структуры и на электрической стороне j-го 6-полюсника:

$$\begin{pmatrix} F_j \\ v_j \end{pmatrix} = \left[\prod_{q=j}^{1}(B_q)\right]\cdot\begin{pmatrix} F_0 \\ v_0 \end{pmatrix} + \sum_{n=1}^{j}\left\{\left[\prod_{q=j}^{n+1}(B_q)\right]\cdot\begin{pmatrix} b_{13}^{(n)} \\ b_{23}^{(n)} \end{pmatrix}\cdot U_n\right\}, \qquad (1)$$

$$I_j = \begin{pmatrix} b_{31}^{(j)} & b_{32}^{(j)} \end{pmatrix}\cdot\left\{\left[\prod_{q=j-1}^{1}(B_q)\right]\cdot\begin{pmatrix} F_0 \\ v_0 \end{pmatrix} + \sum_{n=1}^{j-1}\left[\prod_{q=j-1}^{n+1}(B_q)\right]\cdot\begin{pmatrix} b_{13}^{(n)} \\ b_{23}^{(n)} \end{pmatrix}\cdot U_n\right\} + b_{33}^{(j)}U_j, \qquad (2)$$

где (B_q) – матрица (2×2), полученная из [B_q] вычеркиванием третьих строки и столбца, b_{qj}^{n} – элементы [B_n]. В случае пассивной структуры соотношение (1) переходит в классическое решение для цепочки 4-полюсников [2].

Формулы (1)-(2) – основа для исследования волновых процессов в активных дискретных структурах рассматриваемого типа. В данной работе дана лишь краткая сводка основных соотношений для режима излучения.

Будем считать, что на электрические клеммы структуры подаются напряжения U_j (j=1, 2, … N), а механические выходы (j=0 и j=N) нагружены на механические импедансы $Z_0=F_0/v_0$ и $Z_S=F_N/v_N$, где Z_S – импеданс излучения.

Мощность акустического излучения преобразователя:

$$W_S = \frac{1}{2}\cdot\mathrm{Re}\left[\frac{1}{Z_S}\right]\cdot\left|\frac{\sum_{j=1}^{N}(a_j - c_j Z_S)U_j}{Z_S\left(\frac{\beta_{21}^{(N)}Z_0+\beta_{22}^{(N)}}{\beta_{11}^{(N)}Z_0+\beta_{21}^{(N)}}\right)-1} + \sum_{j=1}^{N} a_j U_j\right|^2, \qquad (3)$$

где $a_j = \begin{pmatrix}1 & 0\end{pmatrix}\cdot\left[\prod_{q=N}^{j+1}(B_q)\right]\begin{pmatrix} b_{13}^{j} \\ b_{23}^{j}\end{pmatrix}$, $c_j = \begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}\cdot\left[\prod_{q=N}^{j+1}(B_q)\right]\begin{pmatrix} b_{13}^{j} \\ b_{23}^{j}\end{pmatrix}$,

$\beta_{jq}^{(n)}$ – элементы матрицы $\left(\beta^{(n)}\right) = \prod_{j=n}^{1}(B_j)$.

Особенностью структуры является «интерференционное» взаимодействие звеньев структуры (не обязательно соседних), описываемое членами вида $\varepsilon_{ij}U_jU_q^*$ (* - знак комплексного сопряжения) и приводящее к возможности как увеличения, так и уменьшения излучаемой мощности за счет взаимодействия звеньев. Это позволяет управлять входными электрическими импедансами звеньев путем выбора напряжений на других («согласующих») звеньях.

Оптимальные фазовые сдвиги между электрическими напряжениями на звеньях структуры, обеспечивающие максимум излучаемой мощности, определяются из условия максимума выражения

$$\sum_{q=2}^{N}\sum_{j=1(j<q)}^{N-1}\xi_q\xi_j\cos(\Delta\theta_{qj}-\Delta\varphi_{qj}), \text{ где } \xi_j = \left|\frac{a_j - c_j Z_S}{Z_S\left(\frac{\beta_{21}^{(N)}Z_0+\beta_{22}^{(N)}}{\beta_{11}^{(N)}Z_0+\beta_{21}^{(N)}}\right)-1} + a_j\right|, \qquad (4)$$

$\Delta\theta_{qj} = \arg\xi_q - \arg\xi_j$; $\Delta\varphi_{qj} = \arg U_q - \arg U_j$. Практический вывод: оптимальная фазировка звеньев определяется лишь внутренними параметрами преобразователя и его акустической нагрузкой и не зависит от амплитуд напряжений на звеньях.

Конкретизируем вид элементарного звена. Для преобразователей малых волновых размеров интерес представляют структуры с пьезоактивными инерционными и пассивными упругими элементами, размеры которых существенно меньше длины волны (рис. 2). У таких систем снижение резонансной частоты достигается простым уменьшением сосредоточенной упругости (пружины) и не связано с увеличением габаритов и веса, как в традиционных распределенных системах.

Другой возможностью является использование структур, в которых пьезоэлемент играет роль упругости, а пассивная накладка на его излучающем торце – роль массы (рис. 3). Снижение резонансной частоты такого излучателя может быть достигнуто либо уменьшением сечения пьезоэлемента (что снижает мощность излучения), либо удлинением пьезоэлемента и увеличением пассивной накладки (что вступает в противоречие с требованием уменьшения габаритов). Однако эффективность электромеханического преобразования во втором случае выше, чем в первом. Действительно, из выражений для матрицы импедансов, осуществляющей преобразование

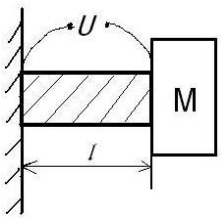


Рис. 3. Излучатель с пьезоактивной упругостью

$$U=z_{11}I+z_{12}v,$$
$$F=z_{21}I+z_{22}v,$$

получаем для второго типа звена

$$z_{12}=-h/(i\omega)$$

(h – пьезоконстанта, i – мнимая единица, ω – циклическая частота), а для первого типа

$$z_{12}=h[1-\cos(kl)]/(i\omega),$$

где $k=\omega/c$, c – скорость звука в материале пьезоэлектрика, l – длина пьезоэлемента. Учитывая, что при малых волновых размерах преобразователя $kl<<1$, получаем, что абсолютная величина элемента матрицы z_{12}, характеризующего электромеханическое взаимодействие, для первого типа звена в $1/(kl)^2$ раз меньше, чем для второго. Однако, это компенсируется тем, что пределы механической и электрической прочности для первого типа звена, в отличие от второго, достигаются почти одновременно.

Натурные испытания одно- и трехчастотных излучателей рассматриваемого типа были проведены в природных водоемах (Черное море, Ладожское озеро). В излучателях использованы пьезокерамики ЦТС-19 и ЦТБС-3. Резонансные частоты излучателей лежали в диапазоне 140 Гц – 2 кГц при их максимальных линейных размерах от 10 до 38 см, чувствительность – до 2,5 Па·м/В, к.п.д. – до 70%.

Частотные характеристики чувствительности в режиме излучения для двух однозвенных излучателей представлены на рис. 4, для одного из трехзвенных – на рис. 5.

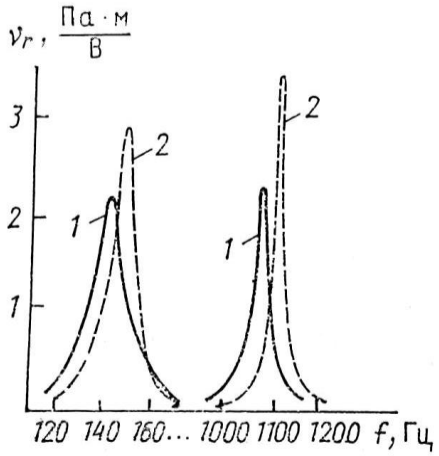


Рис. 4. Чувствительность однозвенных излучателей: эксперимент (1) и расчет (2)

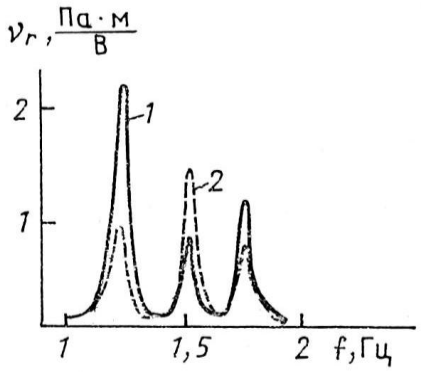


Рис. 5. Чувствительность трехзвенного излучателя: синфазное возбуждение звеньев (1) и возбуждение 3-го звена в противофазе с другими (2)

Левые кривые на рис. 4 относятся к излучателю, наибольший из линейных размеров которого (38 см) в 41 раз меньше половины длины волны в пьезоматериале на частоте резонанса (140 Гц), правые кривые – к излучателю, наибольший размер которого (10 см) в 15 раз меньше половины длины волны на резонансе (1100 Гц). Ширина полосы - соответственно 7% и 5%, к.п.д. составил 0,7±0,2.

Характеристики одного из трехчастотных излучателей представлены на рис. 5, его максимальный линейный размер (14 см) в 11 раз меньше половины длины волны в пьезоматериале на нижней резонансной частоте (1220 Гц). Изменение фазировки позволяет изменять относительную чувствительность излучателя на различных резонансах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишин Г.М. Многочастотная радиолокация. М.: Воениздат, 1973. 92 с.
2. Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. – М.: Иностранная литература, 1959. 457 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА В ОДНОМЕРНОМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

С.В. Леньков, В.А. Широков

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Актуальность работы

Задача организации эффективной работы автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) напрямую связана с разработкой системы подводного видения в смысле построения 3-D воксельного акустического описания сцены – акватории, зоны предполагаемого действия АНПА или самоорганизующегося роя из нескольких АНПА.

Преобразование акустического сигнала в электрическую форму и обратно, дающее возможность последующего многомерного компьютерного анализа сцены, производится преимущественно пьезоэлектрическими преобразователями. Поэтому задача определения акустоэлектрических параметров преобразователей в лабораторных условиях является актуальной.

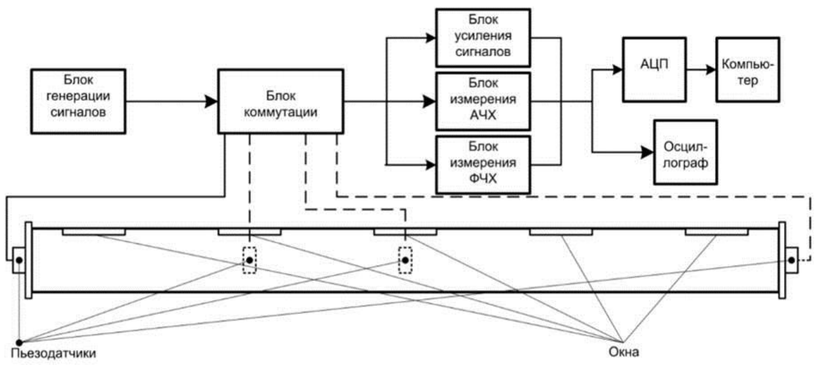
В докладе приводится краткое описание компактного лабораторного экспериментально-измерительного комплекса с линейной аквасредой в виде протяженного цилиндрического резервуара (гидроволновода) с системой генерации испытательных электрических сигналов, электроакустических и акустоэлектрических преобразователей, системой усиления и оцифровки принимаемых сигналов.

Приведено краткое изложение некоторых экспериментальных результатов, иллюстрирующих поведение гидроакустических сигналов, резонансные особенности электроакустических преобразователей, отражение акустических сигналов от объектов в гидроволноводе. Это позволяет оценить степень адекватности получаемых результатов в смысле сравнения с результатами аналогичных экспериментов в опытовом бассейне существенно больших размеров.

Состав комплекса

Электронный тракт комплекса включает многоканальные схемы генерации сигналов заданной конфигурации и усиления/ фильтрации/ преобразования/ оцифровки сигналов датчиков.

Для визуализации и анализа особенностей генерации и распространения волновых гидроакустических пакетов использовалась цифровая регистрация и обработка сигналов в ПО «WinПОС» и «MatLab».



Параметры комплекса

- Диапазон частот сигналов - от 1КГц до 1 МГц
- Задающий генератор JDS6600
- АЦП (LCard E20-10) – 14 бит, частота оцифровки до 10 МГц.
- Длина горизонтального гидроволновода - 3 метра, внутренний диаметр 100 мм.
- Длина вертикального гидроволновода - 1 метр, внутренний диаметр 100 мм.
- Расположение датчиков – в торцах и/или в наблюдательных окнах (5 окон равномерно по длине трубы).
- Динамический диапазон комплекса 110 дБ в полосе частот от 1КГц до 1МГц и может быть увеличен частотной или согласованной фильтрацией сигнала.

Комплекс позволяет производить:

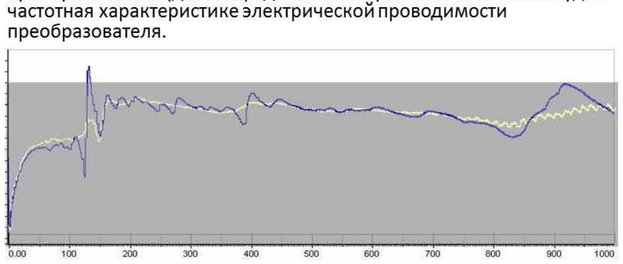
- измерение и регистрацию гидроакустических сигналов, передаваемых от излучателя к приемнику (включая сигналы многократных переотражений от торцевых заглушек и помещенных в волновод объектов),
- определение частотных характеристик системы излучатель-волновод-приемник,
- определение частотных характеристик электрического сопротивления датчика.

Измеряемые параметры и характеристики:

- частотная характеристика проводимости датчика (выполняется в погруженном и/или непогруженном состоянии датчика)
- чувствительность датчика на частотах обнаруженных резонансов
- амплитудно-частотная характеристика датчика
- импульсная характеристика датчика
- скорость звука в исследуемой жидкости
- акустические характеристики отражения звуковых волн от тест-объектов

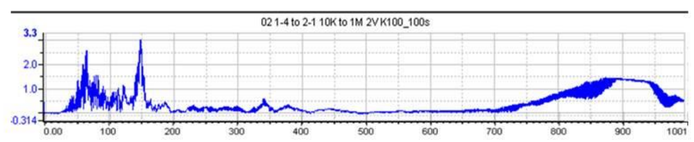
АЧХ электрической проводимости датчика

Частоты резонанса и антирезонанса пьезоакустического преобразователя (датчика) однозначно проявляются в амплитудно-частотная характеристике электрической проводимости преобразователя.

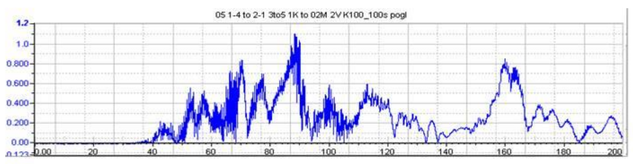


Преобразователь US1000-21A , диапазон измерения от 10 до 1000 кГц (ось X). Синий график – преобразователь размещен в воздухе, желтый график – в воде. Нагрузка на жидкую среду значительно уменьшает добротность резонансов.

АЧХ системы из двух датчиков, закрепленных в торцах горизонтального гидроволновода



АЧХ датчиков US1000-21A от 1 до 1000 кГц с инкрементом 250 Гц

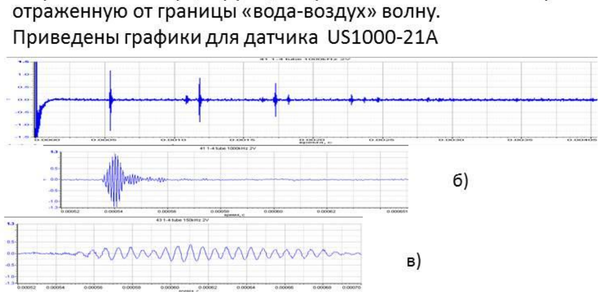


АЧХ датчиков US1000-21A от 1 до 200 кГц с инкрементом 50 Гц

Оценка чувствительности датчиков

Оценка чувствительности датчиков на частотах резонанса производится в вертикальном варианте гидроволновода. Датчик закрепляется в торце трубы, излучает волновой пакет и принимает отраженную от границы «вода-воздух» волну.

Приведены графики для датчика US1000-21A



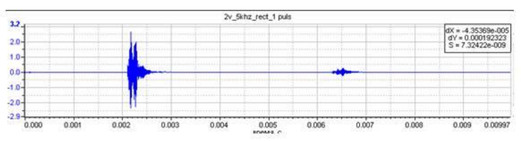
Принимаемые волновые пакеты:

а) весь сигнал

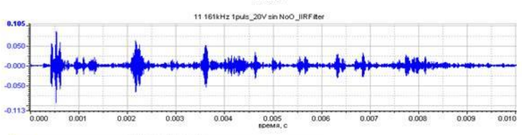
б) Первое отражение 1000кГц, чувствительность - 34 дБ

в) Первое отражение 150 кГц, чувствительность - 46 дБ

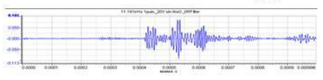
Сравнение реверберации сигнала в трубе и бассейне



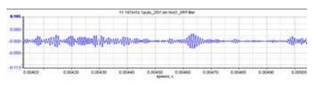
Реализация сигнала в трубе, 10 мс



Реализация сигнала в бассейне, 10 мс



Первая миллисекунда, увеличено

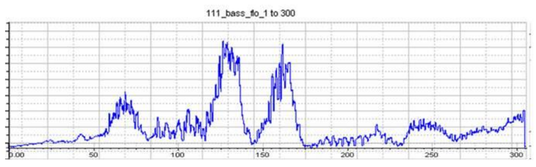


Пятая миллисекунда, увеличено

Картина реверберации акустического пакета в циллиндрическом гидроволноводе гораздо лаконичнее, чем в прямоугольном бассейне, и поэтому более удобна для анализа формы и параметров сигнала.

Сравнение результатов измерений АЧХ в трубе и в бассейне

труба

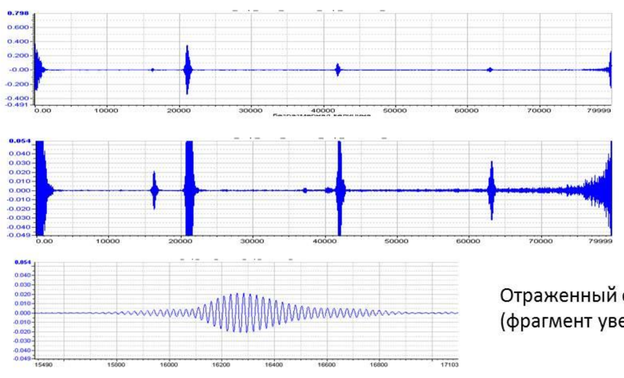


бассейн

Датчики US1000-21A

Режим сонара

Объект наблюдения – медный цилиндр 2 мм диаметром, помещённый в воду в окне горизонтального гидроволновода



Отраженный сигнал (фрагмент увеличен)

Выводы

Комплекс предназначен для предварительных экспресс-исследований акустических свойств датчиков, жидкостей и тест-объектов расположенных в гидроволноводном канале

Комплекс показал результаты измерений параметров датчиков, близкие к измеренным в прямоугольном опытовом бассейне (3,0 х 1,5 х 0,7 м3). Это подтверждает возможность применения комплекса для предварительного исследования и выбора эффективных гидроакустических датчиков.

Предложенная адаптивная имитационная модель позволят проводить моделирование волновых полей и условий распространения сигналов в элементах реальных гидроакустических каналов с неоднородностями

Волноводная имитационная модель

Для исследования возможностей и разработки методов и средств акустического наблюдения неоднородностей в жидкой среде необходимо развитие физических и численных моделей, описывающих особенности возбуждения, распространения и рассеяния гидроакустических полей.

Простейшим методом исследования этих процессов, является использование волноводной имитационной модели акустического наблюдения , а простейшими волноводами являются прямоугольный и цилиндрический волновод.

Достоинством цилиндрического волновода является гладкая геометрия и то, что описать распространение волн в нем можно описать системой двух собственных чисел. Спектральная компонента потенциала скорости смещения акустического поля Ф в цилиндрическом волноводе удовлетворяет волновому уравнению.

$$\Delta\Phi + k^2\Phi = F(r, z, \omega)$$

где F – силовое влияние неоднородности.

Граничные условия описываются краевыми условиями третьего рода со свободными коэффициентами. Анализ задачи наблюдения, основывался на использовании функции Грина среды. Используя данный подход было рассчитано волновое поле в цилиндрическом канале с квазижесткими стенками без неоднородности и с тестовой неоднородностью (шар) при различных конфигурациях расположения датчиков и тест-объекта в волноводе.

Новый метод определения акустических параметров геологического разреза

А.А. Фонин, С.Г. Сучков, С.И. Михеев, В.А. Николаевцев, Д.С. Сучков

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, Россия
E-mail: fonin.a@mail.ru

Введение

В настоящее время в сейсморазведке применяется множество методов и технологий, основанных на различных физических принципах. По мнению многих авторов, развитие сейсморазведки связано с внедрением новых достижений физики и коренным изменением методики исследований.

В настоящей работе предлагается новый метод определения акустических параметров геологического разреза по вертикали, заданной двумя приемниками. Этот метод может найти широкое применение в геофизических исследованиях и сейсморазведке. Его преимуществом является высокая точность прогноза глубины залегания слоев в разрезе, скорости и затухания в них энергии сейсмических волн, плотности пород в точке предполагаемого бурения скважины.

Описание метода

Метод основан на применении принципиально новой схемы, в которой двумя независимыми разнесенными по вертикали приемниками регистрируются две сейсмограммы. Сейсмоприемники могут располагаться на одной вертикали как в неглубокой скважине на суше, так и в водной среде.

Расстояние между приемниками определяется условием достаточного для корреляционной обработки временного разделения сигналов в приемниках и должно быть $H>V_{св}\cdot t_{имп}$, где $V_{св}$ – скорость продольной акустической волны в среде между приемниками, $t_{имп}$ – длительность сейсмического импульса. При использовании данного способа сейсморазведки на поверхности земли глубина размещения датчика в скважине может составлять 30-50 метров и более и должна превышать глубину подошвы зоны малых скоростей. В морской сейсморазведке необходима глубина размещения донного датчика не менее 15-30 м в зависимости от длительности сейсмоимпульса. На рис.1 представлены схемы реализации предлагаемого метода при морской (слева) и наземной (справа) сейсморазведке. Штрихпунктирными линиями показаны фронты распространения сейсмического сигнала от источника возбуждения. При отражении сейсмического сигнала от границ слоев происходит его рассеяние на неровностях поверхности, поэтому на рисунке штриховыми линиями показаны диаграммы направленности рассеяния акустического сигнала.

Для предлагаемого способа сейсморазведки в точке предполагаемого бурения требуется источник сейсмического импульса с длительностью не более 10 мсек, например, электродинамическая установка, взрыв, пневмопушка и т. п. Для приема отраженных сейсмических сигналов требуются высокочувствительные сейсмоприемники продольной акустической волны.

При локальном возбуждении на поверхности упругой многослойной среды импульсного сейсмосигнала возникает сферическая продольная объемная акустическая волна, распространяющаяся вглубь разреза. На границах слоев вследствие скачка акустического импеданса, происходит отражение (с рассеянием) и преломление акустических волн. При обработке предложенным методом происходит выделение только тех сигналов, которые распространяются из глубины по вертикали, заданной приемниками.

Приемники используются для измерения амплитуды и формы сейсмоимпульса, прошедшего геологическую структуру, и регистрации сейсмограммы, отраженных от границ раздела слоев импульсов.

Требуется проанализировать принятые приемниками отраженные сигналы и выделить из них только сигналы, пришедшие из глубины по вертикали, заданной приемниками. Приемники используются для измерения амплитуды и формы сейсмоимпульса, вошедшего в геологическую структуру, и снятия сейсмограммы отраженных от границ раздела слоев импульсов.

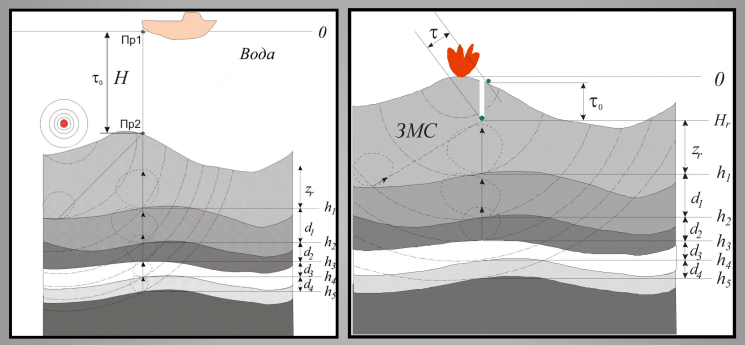
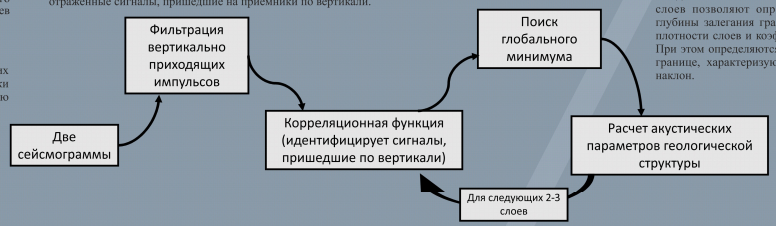


Рисунок 1. Схема реализация предлагаемого способа на примере морской (слева) и наземной (справа) сейсморазведки. Пр1 — приемник верхний, Пр2 — приемник нижний (донный), τ_0 - время распространения акустического сигнала между Пр1 и Пр2, τ- время распространения сигнала между Пр1 и Пр2 для невертикальных импульсов, H — расстояние между Пр1 и Пр2, z_r – расстояние от Пр2 до первой границы (зона малых скоростей), h_i – глубины залегания границ i-ых слоев, d_i – толщины i-ых слоев

Для выделения отраженных сигналов, приходящих на приемники по заданной ими вертикали, сравниваются сейсмограммы верхнего и нижнего приемников. Один и тот же сигнал, приходящий на приемники по вертикали, создает на сейсмограммах отклик, смещенный по времени на интервал времени прохождения сейсмосигнала между приемниками (τ_0). Время τ_0 измеряется с высокой точностью по временам прихода возбуждающего импульса на оба приемника с учетом взаимного расположения источника и приемников. Для любых принятых невертикальных сигналов разница времен между соответствующими откликами (локальными максимумами амплитуды) будет более τ_0.

Наглядно фильтрацию вертикально приходящих сигналов можно осуществить при совмещении сейсмограмм нижнего и верхнего приемников. При этом совпадающие локальные максимумы нужно сохранить, а несовпадающие - исключить. Полученный в результате этой операции дискретный сигнал описывает отраженные сигналы, пришедшие на приемники по вертикали.



Корреляционная функция идентифицирует сигналы, пришедшие по вертикали, и ее максимумы используются для построения метода расчета акустических параметров геологической структуры на основе поиска глобального минимума.
На основе расчетного временного отклика слоистой структуры и корреляционной функции строится целевая функция в виде суммы квадратов разностей измеренных значений максимумов амплитуд и расчетных значений, зависящих от всех указанных акустических характеристик слоистой геологической структуры, которая строится для двух-трех слоев для упрощения расчетов на вычислительных машинах.

Глобальный минимум целевой функции достигается при таком наборе значений параметров, при которых расчетная сейсмограмма наиболее близка к экспериментальной (корреляционной функции). После определения всех акустических параметров, глубин и толщин первых двух-трех слоев и, имея полную амплитудно-временную информацию об импульсе, прошедшем эти слои, задача повторяется для следующих в глубину двух слоев, пока не будет достигнута требуемая глубина.

Найденные значения варьируемых параметров для всех слоев позволяют определить все искомые параметры: глубины залегания границ слоев, скорости звука в слоях, плотности слоев и коэффициенты затухания звука в слоях. При этом определяются и параметры рассеяния на каждой границе, характеризующие как ее шероховатость, так и наклон.

В качестве базовой системы рассмотрим три слоя с тремя поверхностями раздела на упругом полупространстве, моделирующем более глубокие слои геологической структуры, рассматриваемые на следующих итерациях (рис. 2). Пусть на поверхности земли тем или иным способом происходит возбуждение сейсмоимпульса. Форма и амплитуда импульса измеряется вторым приемником Пр2, находящимся на некоторой глубине. Место расположения этого приемника считаем входом в моделируемую многослойную систему. Таким образом, на входе нужно задать форму и амплитуду сейсмоимпульса. Для примера выбрано аналитическое представление в виде (рис. 3):

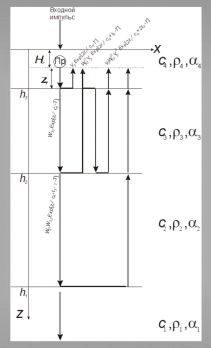


Рисунок 2. Схема построения алгоритма

$$F_{in}(t) = \frac{1 - e^{-\frac{t_w}{T_{imp}}}}{1 + e^{-\left(\frac{t-1}{T_{imp}}\right)}} \cdot \sin(2\pi F_{imp} t)$$

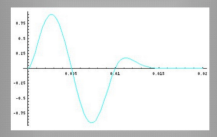


Рисунок 3. Типичная форма импульсного зондирующего сигнала

Для получения расчетной сейсмограммы построена аналитическая модель прохождения плоской продольной акустической волны по вертикали через слоистую структуру с наклонными и рассеивающими границами с вычислением отраженных от всех границ волнами, распространяющимися к приемникам по заданной ими вертикали.
Каждая волна, из бесконечного количества плоских волн, описывающих импульс, на границах слоев частично отражается и частично проходит в следующий слой. Коэффициент отражения от n-ой идеальной плоской границы определяется формулой:

$$R_n = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n}$$

где $Z_n = c_n$ – акустический импеданс n-го слоя. Но идеальных поверхностей в природе не существует и, кроме того, поверхность в точке отражения, как правило, не горизонтальна. Поэтому отраженный сигнал рассеивается с некоторой диаграммой направленности, зависящей от угла наклона границы раздела и ее шероховатости, как показано на рис. 1 штриховыми линиями в виде овалов. С учетом этого необходимо ввести коэффициент рассеяния n-ой границы $a_n<1$, который определяет амплитуду отраженного сигнала по вертикали.

Тогда эффективный коэффициент отражения:

$$V_n = a_n \cdot R_n,$$

а эффективный коэффициент прохождения

$$W_n = a_n \cdot (1 - R_n) = a_n - V_n$$

На основе расчетного временного отклика слоистой структуры и корреляционной функции (1) строится целевая функция в виде суммы квадратов разностей измеренных значений максимумов амплитуд и расчетных значений, зависящих от всех указанных акустических характеристик слоистой геологической структуры, которая строится для двух-трех слоев для упрощения расчетов на вычислительных машинах.

Заключение

В настоящей статье был рассмотрен принципиально новый метод определения глубин залегания слоев геологического разреза и распределения акустических параметров пород по вертикали в точке предполагаемого бурения. Метод отличается более высокой, чем известные методы, достоверностью прогноза залегания нефтегазонасыщенных пластов. Для реализации метода не требуется сложное оборудование и аппаратура. Вместе с тем, необходимо наличие быстродействующей многопроцессорной вычислительной системы. Предложенный метод может применяться для исследования характеристик пород как при наземной, так и в морской сейсморазведке, в том числе при разработке нефтяных и газовых месторождений.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Метод определения акустических параметров геологического разреза в вертикальной плоскости может найти широкое применение в геофизических исследованиях и сейсморазведке. Преимуществом данного метода является высокая точность прогноза глубины залегания, скорости и затухания звука в слоях, толщины слоёв и их плотности в точке предполагаемого бурения скважины.

НОВИЗНА

Новизна метода заключается в применении принципиально новой схемы, в которой двумя независимыми вертикальными приемниками регистрируются две сейсмограммы. Приемники сейсмосигнала могут располагаться на одной вертикали как в неглубокой скважине в твердой геологической структуре, так и в водной среде.

Россия 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
https://ipfran.ru тел.: +7-(831) 416-47-64; факс: +7-(831) 416-06-30
britenkov@ipfran.ru, vicfar@ipfran.ru, boris@ipfran

Институт прикладной физики Российской Академии Наук

СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

А.К. Бритенков, В.А. Фарфель, Б.Н. Боголюбов

Низкочастотные гидроакустические излучатели (НЧИ)

Под низкочастотным подразумевают излучатели, удовлетворяющие двум критериям: малый волновой размер НЧИ и частотный диапазон ниже 1,5 кГц.

Особую сложность для расчётов и изготовления имеют компактные и малогабаритные гидроакустические преобразователи размером менее 60 см [1]. КПД излучателя и его рабочая частота напрямую зависят от волнового размера НЧИ, что определяется как габаритами преобразователя, так и его конструкцией [2]. Совокупность механических и электрических цепей НЧИ, в которых происходит преобразование электрической энергии в механические колебания окружающей среды, приводит к различиям в характере электрического импеданса и других электроакустических характеристик [3]. Габаритные размеры накладывают ограничения на возможность совмещения резонансов активного элемента и механической колебательной системы [3]. Анализ особенностей НЧИ высокой удельной мощности разных типов позволяет оптимизировать конструктивные решения при разработке и изготовлении преобразователей.

НЧИ высокой удельной мощности

Ниже 100 Гц преобразователи с электромагнитными активными элементами [1] имеют ряд преимуществ относительно НЧИ, использующими другие принципы трансформации энергии.

Электромагнитные НЧИ

Совпадение собственных частот механической колебательной системы электромагнитных НЧИ и электромеханического преобразователя поднимает КПД излучателя до 90% и более, что является важнейшим параметром для автономных излучающих систем. Магниты на основе редкоземельных металлов и магнитомягких материалов при низкой себестоимости обеспечивают акустическую мощность излучения на уровне 250 Вт и более (рис. 1).

Рис. 1. Электромагнитный НЧИ, разработанный в ИПФ РАН для акустической термометрии океанского климата АТОС [4]. КПД достигает 95%, а ресурс - 10^8-10^9 циклов.

Зависимость электроакустических параметров электромагнитных НЧИ от стабильности зазора между подвижной системой (катушкой) и магнитами, большой вес и габариты электромагнитных НЧИ ограничивает глубоководное использование таких преобразователей.

НЧИ с активными элементами на основе пьезокерамики

Баланс между размерами преобразователя и его КПД, полосой излучаемых частот и акустической мощностью достигается использованием в НЧИ пьезокерамических активных элементов.

Для НЧИ размером около 1 м оптимальным решением является Бикон™ – разработанный монополь встречно-поршневого типа с излучающим корпусом (рис. 2).

Рис. 2. Разработанный в ИПФ РАН малогабаритный НЧИ Бикон™. встречно-поршневого типа с конусообразным излучающим корпусом.

Бикон™ имеет КПД до 70-80%, развивая акустическое давление 10 кПа×м при ресурсе до 10^{12} циклов. Бикон™ можно использовать без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 300-400 м.

Уменьшение размеров Бикон™ снижает чувствительность преобразователя по напряжению из-за уменьшения длины активного элемента и снижения амплитуды колебаний излучающей оболочки. Миниатюрный Бикон™ будет иметь невысокую удельную мощность.

Компактные гидроакустические преобразователи

Наибольшей эффективностью и технологичностью изготовления при ограниченных размерах обладают преобразователи продольно-изгибного типа (рис. 3).

Рис. 3. Компактный пьезоэлектрический НЧИ продольно-изгибного типа.

Параметры преобразователя такой конструкции существенно зависят от формы и герметизирующего покрытия излучающей оболочки [2, 5]. Проблемой является герметизация щелей, выполняемых для снижения рабочей частоты, определяемой жёсткостью корпуса.

Эффективный способ снижения поперечной жёсткости корпуса НЧИ – гофрирование оболочки. Такой НЧИ (рис. 4) устойчив к циклическим нагрузкам (ресурс более 10^{10} циклов) и проще в сборке.

Рис. 4. НЧИ продольно-изгибного типа с цельнометаллической излучающей оболочкой сложной формы из титана («3D НЧИ»).

Конструкция преобразователя инерционно-изгибного типа (рис. 5), использующая связанные колебательные системы, позволяет повысить КПД в НЧ диапазоне. Работа излучателя этого типа основана на передаче изгибных колебаний дисковых обойм с поперечно поляризованными пьезокерамическими кольцами на излучающие мембраны.

Рис. 5. НЧИ инерционно-изгибного типа с пьезоэлементом. В таком НЧИ гидростатическое давление не влияет на активный элемент.

Сравнение компактных пьезоэлектрических НЧИ

Для основного резонанса в диапазоне 1,2-2,2 кГц электромеханический резонанс НЧИ, за исключением преобразователя инерционно-изгибного типа, обусловлен собственными частотами механической колебательной системы и активного элемента излучателя и почти не связан с электрическим резонансом. Все излучатели предназначены для работы в одинаковом диапазоне глубин, при этом отрицательный градиент дрейфа частоты с глубиной имеет только Бикон™. У всех рассмотренных излучателей прослеживается прямая зависимость излучаемой акустической мощности от размеров активного элемента. КПД НЧИ существенно зависит от конструкции, т.е. от акустического оформления активного элемента. Механический трансформатор, используемый в малогабаритных НЧИ продольно-изгибного типа, увеличивает влияние присоединённой массы воды, повышая эффективность излучения. Но именно это и приводит к дрейфу частоты с глубиной.

Компактные НЧИ, не смотря на сходный частотный диапазон, существенно различаются по характеристикам: чувствительность – от 0,9 до 24 Па×м/В, ширина полосы от 11 до 30%, КПД от 25 до 70%, вес от 1 до 40 кг. Интегральное сравнение преобразователей показывает, что наибольшую удельную мощность имеют НЧИ встречно-поршневого и инерционно-изгибного типа – более 8 кВт/м^3, наивысшей стабильностью частоты по глубине обладает преобразователь инерционно-изгибного типа (менее 2 %), а наибольшую эффективность на единицу массы (более 28%/кг) демонстрирует НЧИ продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки «3D НЧИ». При конструировании НЧИ следует учитывать специфику конкретного приложения, для которого предназначается преобразователь.

1. Woolet R. Sonar Transducer Fundamentals. Newport – New London: Naval Underwater Systems Center, 1986.
2. Андреев М.Я., Боголюбов Б.Н., Клюшин В.В., Рубанов И.Л. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь // Датчики и системы. 2010(12).
3. Mosca F., Matte G., Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication // Journal of the Acoustical Society of America. 2013. V. 133(1).
4. Козубская Г.И., Кудряшов В.М., Сабинин К.Д. О возможности акустической галинометрии Арктического бассейна // Акустический журнал. 1999. Т. 45(2).
5. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Дерябин М.С., Фарфель В.А. Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы // Труды МАИ. 2019(105).
6. Бритенков А.К., Канаков О.И. Влияние первичных параметров соединительного кабеля на точность измерений электроакустических характеристик мощных низкочастотных гидроакустических излучателей // Учёные записки физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова . 2020(1).

Россия 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
https://ipfran.ru тел.: +7-(831) 416-47-64; факс: +7-(831) 416-06-30
britenkov@ipfran.ru, vicfar@ipfran.ru, boris@ipfran

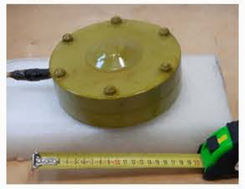
Институт прикладной физики Российской Академии Наук

СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

А.К. Бритенков, В.А. Фарфель, Б.Н. Боголюбов

Таб. 1. Сравнение компактных НЧИ с пьезоэлектрическими активными элементами.
Измерение электроакустических характеристик (ЭАХ) НЧИ проводилось на глубинах от 5 до 70 м, с глубиной места не менее 10-15 длин волн.

Тип НЧИ / Параметр	Встречно-поршневой «Бикон™»	Продольно-изгибный	Инерционно-изгибный	Продольно-изгибный «3D НЧИ»
Максимальные габариты (длина×диаметр), мм	450×380	139×52	170×80	118×86
Активный элемент (длина×диаметр), мм	400×100	114×36,5	14×100	76,6×36,5
Снаряжённая масса в воздухе, кг	40	1	3,3	0,98
Максимальная глубина, м	350	250	300	250
Частота основного резонанса в воздухе, кГц	1,6	3,5	4,5	4
Частота основного резонанса в воде, кГц	1,4	1,5	3,5	1,7
Ширина рабочей полосы частот, %	30	13	11	27
Дрейф частоты по глубине, Гц/м	- 0,28	0,35	менее 0,1	0,6
Чувствительность по напряжению на резонансе, Па×м/В	24	1,5	3,0	0,9
Рабочее напряжение, В	600	500	700	700
Развиваемая акустическая мощность, Вт	1700	5	30	3
КПД, %	70	25	50	28
Статическая ёмкость активного элемента, нФ	520	94,1	18,4	53,6
Реальная часть импеданса на резонансе, кОм	0,18	0,42	0,04	1,75



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ЕЁ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕАЛИСТИЧНЫХ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ ПОДВОДНЫХ ЗВУКОВЫХ КАНАЛАХ

А. И. Малеханов[a], А.В.Смирнов[b]

Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород

E-mail: [a]almal@appl.sci-nnov.ru, [b]lexsmial@ipfran.ru

В работе проведен анализ влияния положения элементов дискретной вертикальной приемной антенной решетки (АР), размещенной в случайно-неоднородном многомодовом подводном звуковом канале (ПЗК), на ее коэффициент усиления при разных методах обработки. Полезный сигнал на входе антенны формируется конечным набором частично коррелированных между собой мод дискретного спектра и принимается на фоне шумов океана.

Критическим фактором определения коэффициента усиления АР (кроме распределения спектров интенсивности мод на входе антенны полезного сигнала и шума) является взаимная ортогональность мод волновода на входе антенной решетки. При ожидаемом модовом спектре сигнала и шума это указывает на возможность: **(1)** специального выбора положения элементов по глубине волновода при некотором фиксированном амплитудно-фазовом распределении (АФР) на антенне, или **(2)** определение оптимального АФР при заданном положении элементов АР в канале.

Проведено численное моделирование с целью изучения влияния вида матрицы ортогональности мод на АР (определяемой положением элементов АР в канале) на коэффициент усиления на примере каналов мелкого (изоскоростной канал) и глубокого моря (канал Черного моря) в случае приема низкомодового полезного сигнала в отсутствии межмодовых корреляций (условие дальнего распространение), и высокомодового приповерхностного шума океана. Представлены сравнения полученных коэффициентов усиления при использовании предложенного линейного метода (поочередная настройка АФР на каждую моду волновода) с оптимальными линейным и квадратичным методами пространственной обработки (при заданных положениях АР) в зависимости от: типа канала, положения элементов АР в канале (относительного положения АР как целого в канале, длины АР, межэлементного расстояния).

Прикладные аспекты работы:

Оценка эффективности протяженных антенных систем и обработки сигналов в сложных (характерных для реального океана) условиях распространения.

Коэффициент усиления АР

$$G = \frac{\mathrm{SNR}_{\mathrm{AP}}}{\mathrm{SNR}_0}$$

Отношение сигнал-шум на выходе АР при линейной обработке:

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{AP}} = \frac{\mathbf{F}^+\mathbf{R}_S\mathbf{F}}{\mathbf{F}^+(\mathbf{I}+\alpha\mathbf{R}_N)\mathbf{F}}$$

$\mathbf{R}_S$ и $\mathbf{R}_N$ – матрица пространственной когерентности сигнала и шума;
$\mathbf{F}$ – весовой вектор АР (АФР);
$\mathbf{I}$ – матрица пространной когерентности собственного шума антенны;
α – отношение мощности шума океана к мощности шума в АР.
Отношение сигнал шум на выходе единичного приемника:

$$\mathrm{SNR}_0 = \frac{\langle I_S\rangle_{\mathrm{AP}}}{\langle I_N\rangle_{\mathrm{AP}}}$$

I_S и I_N – интенсивность сигнала и шума соответственно.

Коэффициент усиления АР зависит как от входных параметров – моделей шума и сигнала, так и от характеристик самой АР.

Рис.1. Модовое представление акустического поля в ПЗК

Сигнал на входе АР: $S(z)=\sum_{m=1}^{M} a_m u_m(z) \Leftrightarrow \underset{N\times 1}{\mathbf{S}} = \sum_{m=1}^{M} a_m \underset{N\times 1}{\mathbf{u}_m}$

- $u_m(z)$, $\mathbf{u}_m$ - профиль m-ой моды из общего числа распространяющихся мод M
- a_m- случайная амплитуда сигнала на входе АР

Статистические свойства принимаемого на антенну полезного сигнала описываются ФПК. Для i-го и j-го приемника АР ФПК (R_S):

$$R_S(z_i,z_j)=\langle S(z_i)S^*(z_j)\rangle=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{M}\langle a_m a_n^*\rangle u_m(z_i)u_n^*(z_j)$$

$$\Updownarrow$$

$$\underset{N\times N}{\mathbf{R}_S} = \langle \mathbf{S}\mathbf{S}^+\rangle = \underset{(N\times M)}{\mathbf{U}}\underset{(M\times M)}{\mathbf{M}_S}\underset{(M\times N)}{\mathbf{U}^+} \qquad \mathbf{M}_S=\langle \mathbf{a}\mathbf{a}^+\rangle$$

* – комплексное сопряжение, $^+$ – эрмитово сопряжение,
< > – статистическое усреднение по времени;

- $\mathbf{M}_S$ – матрица межмодовых корреляций (ММК);

Диагональные элементы ММК отвечают за интенсивность соответствующих сигнальных мод, остальные элементы описывают межмодовые корреляции (определяются характером распространения сигнала в случайно-неоднородном ПЗК);

- $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_m]$ – матрица модовой структуры поля.

В предельном случае, если источник сигнала находится бесконечно далеко и межмодовые корреляции отсутствуют, $\mathbf{M}_S$ имеет диагональный вид.

Весовой вектор: $F(z_n)=\sum_{m-1}^{M} f_m u_m(z_n) \Leftrightarrow \underset{N\times 1}{\mathbf{F}} = \sum_{m-1}^{M} f_m \underset{N\times 1}{\mathbf{u}_m} \Leftrightarrow \mathbf{F} = \underset{(N\times M)}{\mathbf{U}}\underset{(M\times 1)}{\mathbf{f}}$

f_m, $\mathbf{f}$ – модовый вектор (коэффициенты разложение АФР по модам)

Функция отклика АР (выходная мощность сигнала):

$$\mathbf{F}^+\mathbf{R}_S\mathbf{F}=\sum_{m-1}^{M} f_m \mathbf{u}_m^*(\mathbf{U}\mathbf{M}_S\mathbf{U}^+)\sum_{m-1}^{M} f_n\mathbf{u}_n \Leftrightarrow \mathbf{F}^+\mathbf{R}_S\mathbf{F}=\mathbf{f}^+\mathbf{U}^+\mathbf{U}\mathbf{M}_S\mathbf{U}^+\mathbf{U}\mathbf{f}$$

$$\mathbf{F}^+\mathbf{R}_S\mathbf{F}=\mathbf{f}^+\mathbf{Q}\mathbf{M}_S\mathbf{Q}\mathbf{f}$$

$$(1\times M)(M\times M)(M\times M)(M\times M)(M\times 1)$$

Ортогональные свойства АР

Матрица ортогональности мод на входе АР:

$$Q_{mn}=\mathbf{u}_m^*\mathbf{u}_n \Leftrightarrow \mathbf{Q}=\mathbf{U}^+\mathbf{U}$$

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{AP}}=\frac{\mathbf{f}^+\mathbf{Q}\mathbf{M}_S\mathbf{Q}\mathbf{f}}{\mathbf{f}^+(\mathbf{Q}\mathbf{M}_N\mathbf{Q}+\mathbf{Q})\mathbf{f}}$$

Выходное ОСШ **определяется 2 физически независимыми факторами:**
1)Матрица межмодовых корреляций $\mathbf{M}_S$
2)Матрица ортогональности мод Q

Оптимизация пространственной обработки

Как известно, определить оптимальное АФР в случае линейной пространственной обработки при заданном положении АР в канале и известных модовых спектрах интенсивности сигнала и шума можно из задачи по поиску собственных значений и векторов свертки матриц корреляций $\mathbf{M}_N^{-1}\mathbf{M}_S$, а в случае поиска оптимального модового вектора $\mathbf{f}_{opt}$:

$$\mu_m\mathbf{f}_m=(\mathbf{I}+\mathbf{M}_N\mathbf{Q})^{-1}\mathbf{M}_S\mathbf{Q}\mathbf{f}_m$$

μ_m – собственное значение свертки матриц.
μ_1 – max, отвечает оптимальному модовому вектору $\mathbf{f}_{opt}$.
Коэффициент усиления при оптимальной линейной обработке:

$$G_{\mathrm{lin}}=\frac{\mu_1\mathrm{Sp}\mathbf{R}_{\mathrm{Noise}}}{\mathrm{Sp}\mathbf{R}_S}$$

Коэффициент усиления при оптимальной квадратичной обработке:

$$G_{\mathrm{opt}}=\frac{\mathrm{Sp}^{1/2}\left(\left(\mathbf{R}_{\mathrm{Noise}}^{-1}\mathbf{R}_S\right)^2\right)\mathrm{Sp}\mathbf{R}_{\mathrm{Noise}}}{\mathrm{Sp}\mathbf{R}_S}$$

Малеханов А.И. и Таланов В.И. Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // Акуст. Журн. 1990. Т. 36, №5, с.891-897.

Параметры моделирования

Канал мелкого моря ~ изоскоростной волновод.

	Изоскоростной канал	Черное море
Глубина канала H, м	100	1000
Частота приема f, Гц	150	146
Число мод в волноводе M	20	11
Скорость звука c, м/с	1500	см. профиль
Длина волны λ, м	10	10
Глубина оси канала, м	-	75

Канал глубокого моря: канал Черного моря

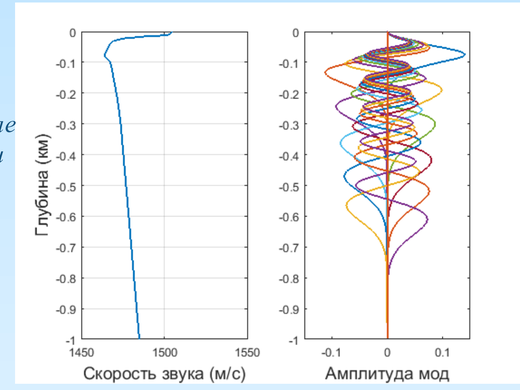


Рис.2. Профиль скорости звука в канале Черного моря (слева) и модовая структура поля (справа)

Матрица межмодовых корреляций сигнала усреднена по интерференционной структуре: $\mathbf{M}_S=\mathbf{I}$

Линейная обработка G_m**:** АФР настраивается поочередно на каждую моду канала: $\mathbf{f}=\mathbf{e}_m=\{0,0,0,\ldots,1,\ldots,0\}$ – единичный вектор.

Модель шума: шум в высоких модах, генерируемый у поверхности.

$$R_{ij}=\sum_{m=1}^{M}\frac{\left(u_m^{/}(0)\right)^2}{h_m\,\mathrm{Im}(h_m)H}u_m(z_i)u_m(z_j)$$

Kuperman W.A. and Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 67, №6, p.1988-1996

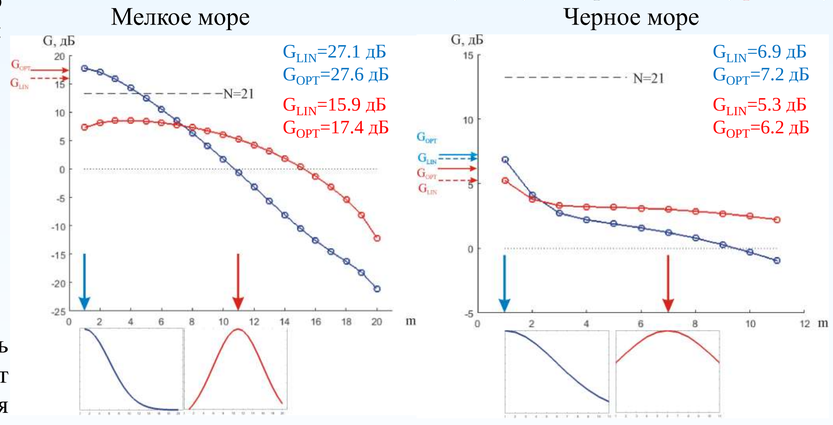
Усредненное по глубине SNR_0 = -20 дБ

Результаты моделирования выигрыша АР

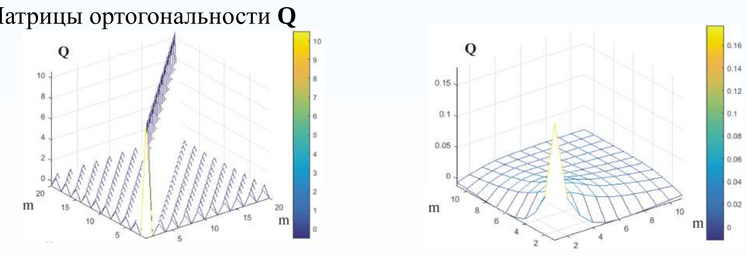
Изменение спектра интенсивности сигнала

Случай «полного» перекрытия канала частой АР. Число элементов N=21.
Межэлементное расстояние d=λ/2=5м.
Сигнал локализован в области низких (синий) или средних мод (красный).

Мелкое море — Черное море



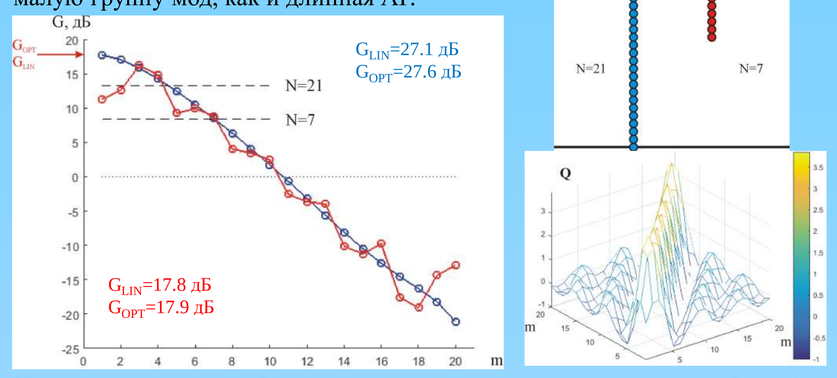
Матрицы ортогональности **Q**



Разделение модовых спектров сигнала и помехи приводит к выигрышу.
При **полном перекрытии** канала АР матрица **Q** становится **диагональной**.
В случае неполного перекрытия канала с линейным профилем скорости звука – **возможно выделение отдельных групп** мод, при полной ортогонализации последних с остальными. В этом случае целесообразно передавать сигнал в этой группе при наличие помех в других модах, или переместить АР так, чтобы «настроить» её на априорно известный модовый спектр сигнала.

Изменение числа элементов АР

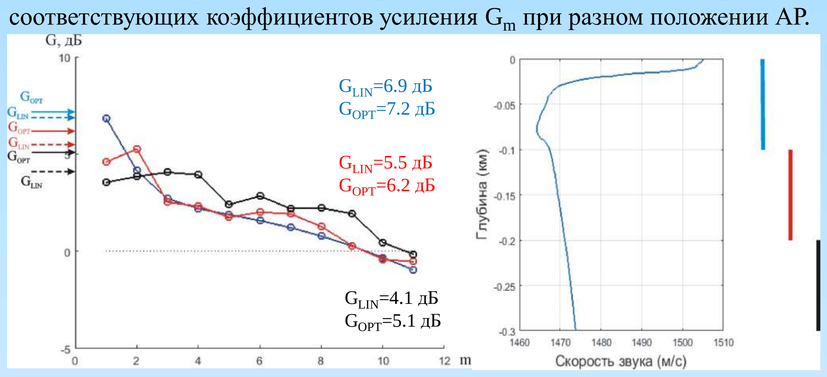
Показано сравнение коэффициентов усиления G_m при уменьшении количества элементов АР при том межэлементном расстоянии в случае низкомодового сигнала в канале мелкого моря. Канал Черного моря в такой постановке вопроса не интересен, т.к. короткая АР локализует ту же малую группу мод, как и длинная АР.



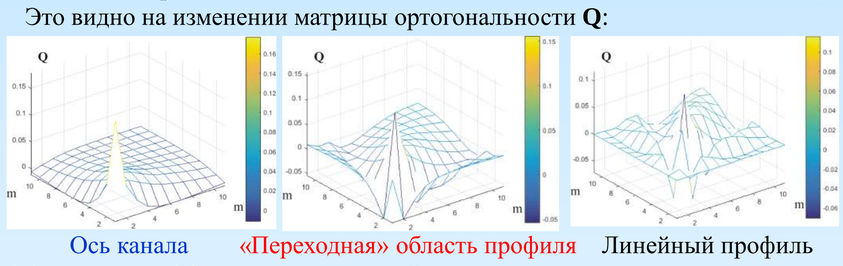
Не смотря на то, что АР короткая (N=7), она **наравне** с длинной АР (N=21) выделяет 3 и 4 моды, приближаясь к значения при оптимальной обработке (18 дБ). Моды хорошо ортогональны высоким шумовым модам и плохо ортогональны соседним сигнальным, хотя наиболее энергонесущие моды начинаются с первой. Для повышения значений коэффициента усиления необходимо «создавать» такую матрицу ортогонализации **Q**, чтобы в ней **группа сигнальных мод** была **между собой не ортогональна**, но **ортогональна группе помеховых мод**.

Изменение положения АР

Длинная антенна (N=21) перемещается как целое в канале Черного моря от поверхности в глубину (ось канала, «переходная» область профиля c(z), **линейный профиль**). Канал мелкого моря не рассматривался из-за небольшой глубины и практически незаметного различия соответствующих коэффициентов усиления G_m при разном положении АР.



По мере погружения антенны, АР **смещает** группу выделяемых ею мод от низких номеров к высоким (в соответствии с локализацией мод в канале). Это видно на изменении матрицы ортогональности **Q**:

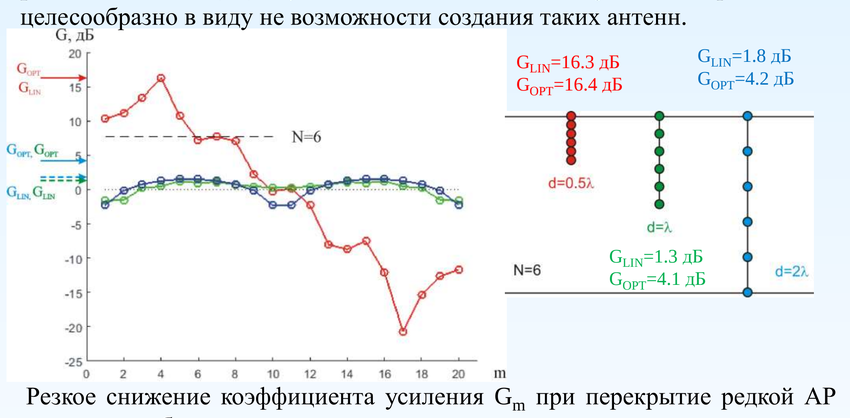


Ось канала — «Переходная» область профиля — Линейный профиль

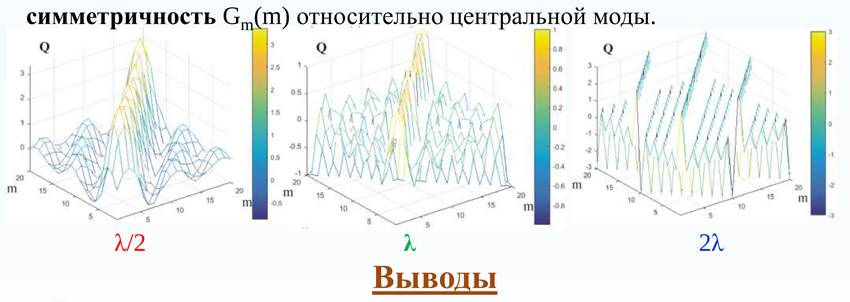
Максимум коэффициента усиления G_m **уменьшается** при удалении группы мод, выделяемых АР, от модового спектра сигнала. **Однако**, его значения **близки** к значению выигрыша при оптимальной линейной обработке.

Изменение межэлементного расстояния в АР

Показано **уменьшение** коэффициента усиления короткой АР (N=6) в канале мелкого моря при растягивании АР (**увеличения межэлементного расстояния** d=λ/2, λ, 2λ). Удлинять АР в канале глубокого моря было не целесообразно в виду не возможности создания таких антенн.



Резкое снижение коэффициента усиления G_m при перекрытие редкой АР половины и более канала, связано с **неортогональностью** сигнальных мод с группой помеховых и других мод. С этим как раз связано образование боковых диагоналей максимумов в матрице ортогональности **Q**, а также **симметричность** $G_m(m)$ относительно центральной моды.



λ/2 — λ — 2λ

Выводы

Показано принципиальное влияние геометрическое положения элементов антенны в канале на величину выигрыша вертикальной АР:

(1) способности антенны разрешить (в смысле ортогональных свойств) «сигнальные» моды на фоне «помеховых» мод. В канале с известной структурой мод этот фактор полностью зависит от числа и расположения приемников по глубине.

(2) при известном модовом составе шумов океана можно заранее оценить помехоустойчивость различных мод и подобрать такое расположение элементов АР, при котором можно добиться максимальных значений коэффициента усиления при выбранном способе пространственной обработки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-19-00383.