

УДК 623. 983

А.С. Смирнов, А.Г. Голубев

ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор»»

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИДРОФОНОВ

Одним из существенных параметров гидроакустической антенны является ее динамический диапазон, определяемый, в частности, амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) чувствительности гидрофонов. При использовании традиционных пьезокерамических гидрофонов оптимальной является АЧХ чувствительности, обеспечивающая выбеливание спектра шума моря на выходе системы пространственной фильтрации. Особенностью задачи оптимизации АЧХ чувствительности волоконно-оптических гидрофонов является устранение перегрузки тракта в области верхних значений частоты, при этом чем выше частота сигнала, тем при меньшем его уровне возникает перегрузка. Настоящая статья посвящена решению этой проблемы и выработке соответствующих рекомендаций.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИДРОФОН, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОФОНА, ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН.

Введение

В течение двух последних десятилетий в качестве перспективного направления проектирования компонентов гидроакустических антенн рассматриваются волоконно-оптические интерферометрические гидрофоны (ВОИГ) [1–3]. Принцип действия ВОИГ основан на том, что падающие на них акустические сигналы изменяют фазу света, распространяющегося в волоконном световоде, который размещен в чувствительном элементе. Флуктуации фазы, порожденные акустическим сигналом, преобразуются в интерферометрической схеме в фазомодулированные (ФМ) колебания интенсивности; последние регистрируются фотодетектором и обрабатываются. Конечной целью является получение сигнала, пропорционального принимаемому акустическому [4].

Как отмечено в статье [5], при использовании таких технологий необходимо пе-

ресмотреть и заново проанализировать систему взаимосвязи параметров элементов конструкции, обрабатываемых сигналов и характеристик гидроакустической антенны. В указанной работе приведена методика расчетов оптимальной (предельно допустимой) чувствительности ВОИГ. Эта методика относилась к версии равномерной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) указанной чувствительности.

В настоящей работе решается задача оптимизации АЧХ ВОИГ. Эта оптимизация нацелена на получение максимального динамического диапазона (ДД) тракта приема сигналов с ВОИГ.

Факторы, определяющие динамический диапазон тракта

Пределы динамического диапазона тракта приема сигналов с ВОИГ задаются возможными уровнями принимаемого сигнала: минимальным и максимальным.

При некотором высоком уровне сигнала наступает перегрузка тракта; она ограничивает сверху рассматриваемый диапазон и определяет значение максимального уровня принимаемых сигналов. Эффект перегрузки в тракте с ВОИГ обусловлен расширением спектра фазомодулированного сигнала при увеличении индекса модуляции. При прочих равных условиях эффект наблюдается тем раньше, чем больше чувствительность гидрофонов. С учетом этого фактора чувствительность необходимо минимизировать.

Снизу динамический диапазон тракта ограничен требованием существенного преобладания минимального уровня принимаемого акустического сигнала над уровнем внутренних шумов, приведенных к его входу. С учетом этого фактора чувствительность необходимо максимизировать.

При работе в условиях неравномерного спектра принимаемого сигнала, а точнее — спада уровня этого спектра с ростом частоты, указанное требование преобладания должно выполняться, прежде всего, на верхних частотах (они наиболее проблемны в этом отношении). Если же учитывать, что спектр внутренних шумов тракта является, как правило, равномерным, то в классической схеме с пьезокерамическими гидрофонами следует считать оптимальной АЧХ чувствительности этих гидрофонов, нарастающую с ростом частоты. При этом скорость нарастания должна обеспечивать выравнивание спектра принимаемого сигнала в точке тракта обработки, соответствующей результату пространственной фильтрации.

Особенность рассматриваемой системы состоит в том, что перегрузка в гидрофоне при прочих равных условиях наступает тем быстрее (т. е. при более низких значениях уровня сигнала), чем выше его частота [5]. Далее мы излагаем решение задачи определения оптимальной АЧХ ВОИГ с учетом указанного обстоятельства.

Постановка задачи

После анализа факторов, определяющих пределы динамического диапазона тракта приема сигналов с ВОИГ, кратко сформулируем постановку задачи. Имеются отсчеты спектра (здесь и далее под спектром

подразумевается величина корня квадратного из спектральной плотности мощности) принимаемого акустического сигнала при его минимальном уровне $P_{\text{ак. мин}}(f_i)$. Рассматриваются две модели АЧХ чувствительности ВОИГ:

$$\gamma(f; \tilde{\gamma}, \nu, f_0) = \begin{cases} \tilde{\gamma} \cdot f^\nu & \text{при } \nu \leq 1 \rightarrow \text{модель 1;} \\ \tilde{\gamma} \exp\{-\nu(f - f_0)^2 10^{-8}\} & \text{при } \nu > 0 \rightarrow \text{модель 2.} \end{cases}$$

Положительным свойством модели 1 является зависимость формы АЧХ (с точностью до частотно-независимого масштаба $\tilde{\gamma}$) всего от одного параметра ν . Ее недостатком следует считать ограничение величины этого параметра сверху в силу требования конечности энергии акустического шума после умножения его спектра на обсуждаемую АЧХ. Указанное ограничение мы задаем условием $\nu \leq 1$.

Такое ограничение снимается в случае использования АЧХ резонансного типа, примером которой является модель 2. К недостаткам же этой модели относятся, во-первых, необходимость оптимизации двух параметров — ν и f_0 , которые определяют форму АЧХ (также с точностью до масштаба $\tilde{\gamma}$), а во-вторых, зависимость результатов решения задачи оптимизации от произвола в выборе аппроксимирующей функции.

Подход к решению задачи оптимизации АЧХ чувствительности ВОИГ

Решение задачи оптимизации применительно к модели 2 (с квазиганссовой аппроксимирующей функцией), приведенное в настоящей работе, лишь иллюстрирует методику оптимизации. Использование такой методики позволяет решить задачу оптимизации АЧХ с помощью произвольной аппроксимирующей функции, в том числе заданной таблично в произвольных точках на оси частот.

Решение представленной задачи состоит в определении наилучшего сочетания параметров этой модели ν , f_0 и $\tilde{\gamma}$, которое бы обеспечивало максимальную верхнюю границу ДД тракта с ВОИГ при фиксированном уровне внутренних шумов тракта,

приведенных к его входу (т. е. при фиксированной нижней границе этого ДД). Выбор критерия оптимальности АЧХ, связанного со своего рода «защитой» нижней границы ДД при обеспечении максимально возможной его верхней границы (как альтернативы критерия минимизации нижней границы ДД при его фиксированной верхней границе) оправдан, в частности, в том случае, если в гидроакустическом комплексе приоритет отдается режиму шумопеленгования малошумных морских объектов.

Методика расчета оптимальной АЧХ чувствительности ВОИГ

В основе решения поставленной задачи лежит аппарат анализа предельной чувствительности ВОИГ, изложенный в работе [5]. Такой анализ проводится путем расчета совокупности зависимостей

$$K(\gamma_i) = Y(\gamma_i) / \gamma_i,$$

где γ_i – значение чувствительности ВОИГ на частоте f_i , $Y(\gamma_i)$ – уровень (действующее значение) отклика тракта предварительной обработки на сигнал $S_{\text{ак}}(t)$, представляющий собой суперпозицию I тональных компонент сигнала при массиве значений $\gamma(f_i; \tilde{\gamma}, \nu, f_0)$ (т. е. отсчетов АЧХ) чувствительности ВОИГ:

$$S_{\text{ак}}(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^I \gamma(f_i; \tilde{\gamma}, \nu, f_0) \times \sqrt{\Delta f_i} \cdot \delta \cdot \frac{P_{\text{ак min}}(f_i)}{P(f_i)} \cdot \sin(2\pi f_i t), \quad (1)$$

где f_i , Гц – частоты спектральных отсчетов, составляющие геометрическую прогрессию со знаменателем ν ; Δf_i , Гц – ширина полосы частот спектральной компоненты, определяемая таким образом, чтобы среднее геометрическое крайних частот этой полосы равнялось f_i ; а именно определяемая как

$$\Delta f_i = f_i(\sqrt{\nu} - 1 / \sqrt{\nu});$$

$P(f_i)$ – отсчет спектра при уровне сигнала, превышающем по напряжению минимальный в δ раз. Другими словами, δ – отношение уровня принимаемого акустического сигнала к его минимально возможному уровню.

Выбор входного воздействия (1) при анализе предельной чувствительности гидрофона по широкополосному сигналу продиктован следующими соображениями. Сигнал (1) характеризуется дискретным спектром с некратными частотами; это позволяет проанализировать амплитудную характеристику тракта (она определяет степень его линейности) на разных частотах. При этом гармоники одних частот не мешают анализу амплитудной характеристики тракта на других частотах. Используемые веса тональных составляющих сигнала (1) обеспечивают имитацию реального входного акустического сигнала, причем как в части формы его спектра, так и в части его интегрального уровня. Далее при проведении расчетов принимаем следующие значения входящих в (1) параметров: $\nu = 1,3$; $I = 22$; $f_1 = 259$ Гц. Массив спектральных отсчетов уровня акустического сигнала $P_{\text{ак min}}(f_i)$ принят в соответствии с данными работы [6] для ситуации, когда волнение моря составляет 1 балл. Указанные значения параметров модели достаточны для «представления» сигнала в типичной полосе тракта 0,1 – 8,0 кГц примерно с десятикратным запасом.

Если изменять величину относительного масштаба уровня сигнала δ в модели (1) и вычислять на сетке выбранных частот массив соответствующих ему значений отклика $Y(\gamma_i, \delta)$, то можно установить предельное значение этого масштаба δ_{max} ; при его превышении наступает перегрузка тракта по отношению к спектральной компоненте на частоте f_i . Представляется оправданным предположение о том, что при появлении перегрузки тракта по указанной причине этот тракт едва ли останется линейным по отношению к спектральным компонентам на иных частотах, даже при сохранении на этих частотах линейности зависимостей $K(\gamma_i, \delta)$. Однако даже если это предположение и окажется неверным, то нарушение линейности тракта хотя бы по одной его спектральной компоненте становится достаточным для признания факта, что тракт не является линейным по всему широкополосному сигналу. Следует заметить, что величина динамического диапазона антенны

(приемного тракта) равна $20\lg(\delta_{\max})$.

Фиксация нижней границы ДД осуществляется следующим образом. Условие малости уровня его внутреннего шума, приведенного ко входу тракта, по сравнению с минимально возможным уровнем акустического сигнала при всех частотах f , в пределах рабочего диапазона имеет вид

$$\eta \cdot \sigma_{\text{внш}}(f) / \gamma(f; \tilde{\gamma}, \nu, f_0) \leq P_{\text{ак min}}(f) \cdot \xi^{-1}(f) \cdot M, \quad (2)$$

где $\eta = 3 - 10$; $\sigma_{\text{внш}}(f)$ – уровень внутреннего шума тракта; $\xi(f)$, разы – выигрыш в отношении сигнал/шум по напряжению, имеющий место при пространственной фильтрации на частоте f ; M – количество гидрофонов в рабочем пятне антенны.

Следует добавить, что уровень $\sigma_{\text{внш}}(f)$ от частоты не зависит; здесь и далее аргумент частоты f при уровнях компонент внутреннего шума приведен лишь для указания на то, что речь идет о спектрах. Что касается произведения $\xi^{-1}(f) \cdot M$, то оно учитывает соотношение коэффициентов передачи по амплитуде системы пространственной фильтрации для акустического шума и внутреннего шума тракта на частоте f . Далее для простоты полагаем это произведение равным единице, что оправдано, например, при приеме на единичный гидрофон. В общем случае антенны оптимизация АЧХ чувствительности гидрофонов осуществляется по разработанной нами методике и учитывает конкретный тип и параметры антенны.

При $\xi^{-1}(f) \cdot M = 1$ из неравенства (2) следует:

$$\gamma(f; \tilde{\gamma}, \nu, f_0) \geq \eta \cdot \sigma_{\text{внш}}(f) / P_{\text{ак min}}(f). \quad (3)$$

При этом величина уровня внутреннего шума $\sigma_{\text{внш}}(f)$ может быть определена с помощью известной методики, а именно [7]:

$$\sigma_{\text{внш}}(f) = \sqrt{U_{\text{оп}}^2(f) + U_{\text{кв}}^2(f)}, \quad (4)$$

где $U_{\text{оп}}(f)$, $U_{\text{кв}}(f)$ – соответственно уровни шумов оптической и цифровой компонент тракта (последняя компонента – шум квантования), определяемые как

$$U_{\text{оп}}(f_i) = (0,5 \cdot f_{\text{опр}})^{-0,5} \cdot q_{\text{фп}}^{-1}, \quad (5)$$

$$U_{\text{кв}}(f_i) = 0,3 \cdot 2^{1,5 - n_k} \cdot (0,5 \cdot f_{\text{опр}} \cdot \zeta)^{-0,5}, \quad (5)$$

где $f_{\text{опр}}$ – частота опроса ВОИГ; $q_{\text{фп}}$ – отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника оптической части тракта; n_k – количество корректных разрядов используемого АЦП; ζ – количество выборок, выполняемых АЦП на интервале длительности импульса опроса сигнала от одного ВОИГ при их (этих выборок) последующем осреднении.

В итоге оптимальное сочетание параметров ν , f_0 и $\tilde{\gamma}$, определяющих АЧХ чувствительности ВОИГ, находится по указанной методике при следующем критерии оптимальности: предельно допустимое значение δ_{\max} максимально при значении чувствительности $\gamma(f; \tilde{\gamma}, \nu, f_0)$, которое удовлетворяет соотношению (3) и учитывает соотношения (4) и (5).

Процедура и результаты расчетов параметров оптимальной АЧХ чувствительности ВОИГ

Для двух моделей, приведенных выше, необходимо определить форму АЧХ, которая бы обеспечивала максимальный динамический диапазон при заданной нижней границе чувствительности.

При проведении расчетов использовались следующие исходные данные: $\sigma_{\text{внш}} = 15$ мкрад·(Гц)^{-1/2}, $\eta = 3$, уровень шумов моря принимался при его волнении в 1 балл [6].

Пример графического представления

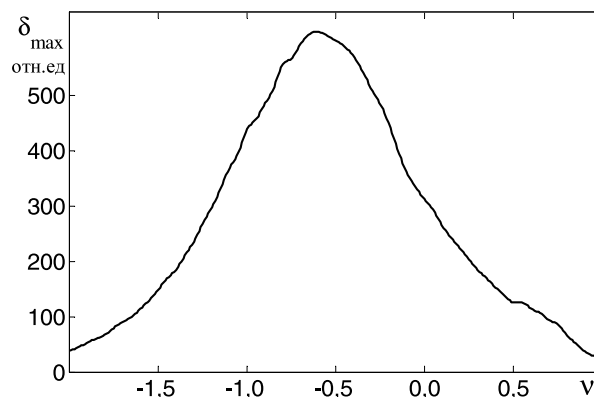


Рис. 1. Зависимость максимального значения δ_{\max} от параметра ν ; расчет по модели 1

нижней границы чувствительности можно видеть на рис. 2 (приведенные на рис. 2 результаты обсуждаются далее) в виде прямой линии, ограничивающей снизу АЧХ в полосе рабочих частот.

Расчет параметров, определяющих оптимальную форму АЧХ чувствительности, был проведен в два этапа. Первоначально из условия (3) определялся масштабирующий множитель АЧХ $\tilde{\gamma}(v)$ (либо $\tilde{\gamma}(v, f_0)$). Затем вычислялась зависимость $\delta_{\max}(v)$ (либо $\delta_{\max}(v, f_0)$ для модели 2), глобальный максимум которой и определяет оптимальную форму АЧХ.

Как отмечалось выше, определение динамического диапазона $20\lg(\delta_{\max})$ основано на прямом вычислении уровня сигнала на выходе фазового детектора и сопоставления его уровня с уровнем исходного модулирующего сигнала. При расчетах уровня сигнала на выходе фазового детектора мы использовали алгоритм детектирования фазы и параметры приемного тракта, аналогичные принятым в работе [5].

Результаты расчета по модели 1 зависимости $\delta_{\max}(v)$ формы АЧХ приведены на рис. 1.

В приведенном на рис. 1 примере результатов расчета по модели 1 оптимальные значения параметров формы АЧХ, соответствующие максимальному динамическому

диапазону размером в 56 дБ, оказались следующими: $v_{opt} = -0,6$; $\tilde{\gamma}_{opt} = 147$ рад/Па. В этой ситуации переход от рассмотренной в работе [5] модели АЧХ, соответствующей значению параметра $v = 0$, к оптимальной АЧХ применительно к ее модели 1 приводит к увеличению динамического диапазона на 6 дБ.

График оптимальной АЧХ чувствительности, рассчитанной по модели 1, приведен на рис. 2 (кривая 1).

Результаты расчета зависимости $\delta_{\max}(v, f_0)$ по модели 2 приведены на рис. 3. Получено, что оптимальные значения параметров модели АЧХ, соответствующие максимальному динамическому диапазону в 65 дБ, следующие: $v_{opt} = 4,8$; $f_{0\ opt} = 7$ кГц, $\tilde{\gamma}_{opt} = 0,7$ рад/Па. Таким образом, в расчетном примере применение модели 2 позволило расширить границы динамического диапазона на 9 дБ, по сравнению с аналогичными результатами, полученными по модели 1.

Заключение

Проанализированы факторы, определяющие пределы динамического диапазона. На этой основе сформулирована постановка задачи для нахождения оптимальной чувствительности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) гидрофонов с учетом всех обстоятельств.

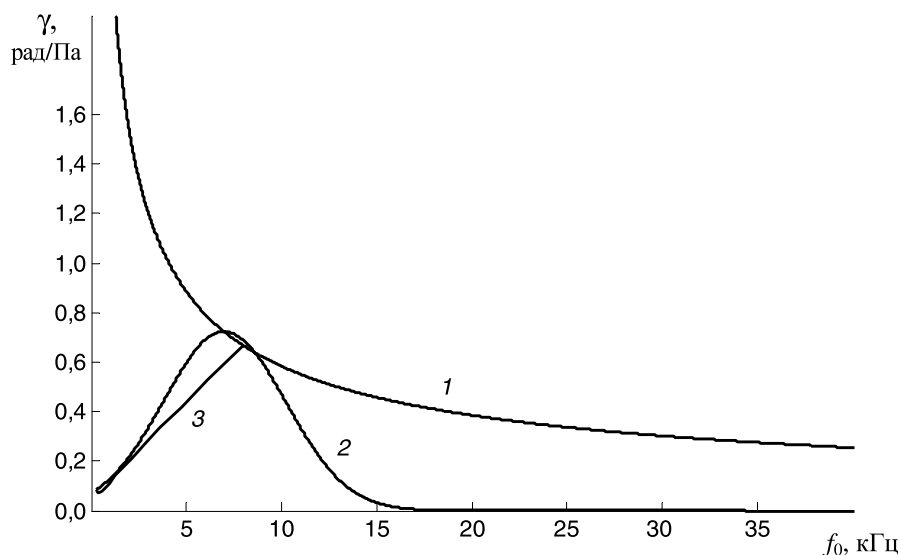


Рис. 2. Результаты расчетов оптимальной АЧХ по моделям 1 (кривая 1) и 2 (кривая 2). Нижняя граница чувствительности показана прямой линией 3

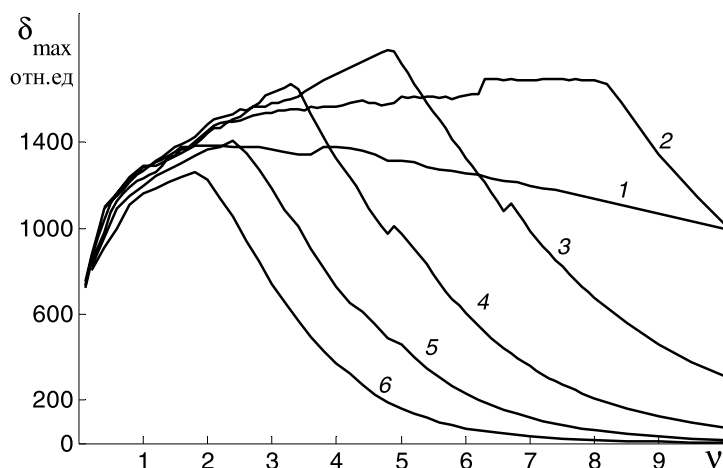


Рис. 3. Расчетные (по модели 2) зависимости максимального уровня принимаемого акустического сигнала δ_{\max} от параметра ν для различных значений частоты f_0 , кГц: 5 (1), 6 (2), 7 (3), 8 (4), 9 (5), 10 (6)

В связи с решением поставленной задачи рассмотрены две модели АЧХ-чувствительности ВОИГ. С использованием обеих моделей рассчитаны зависимости максимального относительного уровня принимаемого акустического сигнала от параметров формы АЧХ.

Сравнение полученных результатов показало, что применение модели 2 позволяет расширить границы динамического диапа-

зона относительно аналогичных данных, полученных по модели 1.

В итоге предложена методика расчета оптимального параметра АЧХ ВОИГ, позволяющая при прочих равных условиях получить максимальный динамический диапазон приемного тракта гидроакустического комплекса.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 14-08-01006-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера. 2008, 520 с.
2. Shizhuo Y., Ruffin P.B., Yu Francis T.S. Fiber optic sensor. Talor & Francis Group, 2008. 479 p.
3. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fiber-optic sensing. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. Vol. 37, pp. R197-R216.
4. Люкумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. 68 с.
5. Голубев А.Г., Смирнов А.С. О расчете

- верхней границы чувствительности интерференционных волоконно-оптических гидрофонов приемной гидроакустической антенны // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. Вып. 6 (162). С. 73 – 80.
6. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
7. Голубев А.Г., Смирнов А.С. Расчет допустимого уровня шумов приемного тракта в гидроакустическом комплексе, содержащем антенну с волоконно-оптическими гидрофонами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014. № 1(189). С. 144–149.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СМИРНОВ Алексей Сергеевич – ведущий инженер ОАО «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”». 197046, Россия, г. Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., 30
hydroacoustics@mail.ru

ГОЛУБЕВ Анатолий Геннадиевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”».

197082, Россия, г. Санкт-Петербург, , Малая Посадская ул., 30

agg300@mail.ru

Smirnov A.S., Golubev A.G. THE OPTIMIZATION OF SENSITIVITY OF FREQUENCY RESPONSE OF INTERFEROMETRIC FIBER-OPTIC HYDROPHONES.

One of the most important parameters of sonar array is its dynamic range determining, in particular, by the frequency response of the hydrophone sensitivity. When using piezoelectric hydrophones the response sensitivity is optimal, providing that the sea noise spectrum at the output of the spatial filtration unit is suppressed. The salient feature of sonar arrays with interferometric fiber-optic hydrophones is a tract overload that occurs at the lower signal level the higher its frequency is. In this paper we have analyzed the factors determining the limits of the dynamic range. The formulation of the problem for finding the optimal frequency response sensitivity of hydrophones was stated. Examples of optimal parameters calculations using two models (monotonically decreasing and resonant ones) for frequency response shape sensitivity were given. When the results obtained were compared it was apparent that taking into account the shape of the frequency response sensitivity allows expanding the dynamic range of sonar array with interferometric fiber-optic hydrophones (in the case being considered the range was 9 db wider).

INTERFEROMETRIC FIBER-OPTIC HYDROPHONE, HYDROPHONE SENSITIVITY, DYNAMIC RANGE.

REFERENCES

1. *Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyj kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. Pod red. E. Udda. Moscow, Tekhnosfera, 2008, 520 p. (rus)
2. **Shizhuo Y., Ruffin P.B., Yu Francis T.S.** *Fiber Optic Sensor*. Talor & Francis Group, 2008, 479 p.
3. **Kirkendall C.K., Dandridge A.** Overview of high performance fiber-optic sensing. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, Vol. 37, pp. R197-R216.
4. **Liokumovich L.B.** *Volokonno-opticheskie interferometricheskie izmereniya. Ch. 2. Volokonnyj interferometricheskij chuvstvitel'nyj element*. St. Petersburg, Izd-vo Politekhnikheskogo Un-ta, 2007. 68 p. (rus)
5. **Golubev A.G., Smirnov A.S.** Calculation of upper limit of sensitivity for interference fiber-optic hydrophone array. *The St. Petersburg Polytechnical University Journal: Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2012, Iss. 6 (162), pp. 73-80. (rus)
6. **Urik R. Dzh.** *Osnovy gidroakustiki*. Leningrad, Sudostroenie, 1978, 445 p. (rus)
7. **Golubev A.G., Smirnov A.S.** The calculation of a tolerable noise level for the receiving section in the underwater acoustic unit containing an antenna with fiber-optic hydrophones. *The St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2014, No. 1(189), pp. 144-149. (rus)

THE AUTHORS

SMIRNOV Alexei S.

Concern CSRI Elektroprigor, JSC

30, Malaya Posadskaya St., St. Petersburg, Russia, 197046.

hydroacoustics@mail.ru

GOLUBEV Anatoly G.

Concern CSRI Elektroprigor, JSC

30, Malaya Posadskaya St., St. Petersburg, Russia, 197046.

agg300@mail.ru