

УДК 623 983

А.Г. Голубев¹, А.С. Смирнов²

¹ ОАО «Камчатский гидрофизический институт»

² ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ШУМОВ ПРИЕМНОГО ТРАКТА В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ, СОДЕРЖАЩЕМ АНТЕННУ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ГИДРОФОНАМИ

Динамический диапазон тракта предварительной обработки (ТПО) сигналов в гидроакустическом комплексе определяется чувствительностью гидрофонов приемной антенны и уровнем внутренних шумов компонентов, входящих в состав этого тракта. При использовании в указанном комплексе приемной антенны с интерференционными волоконно-оптическими гидрофонами в состав ТПО входят оптическая и цифровая компоненты. Статья посвящена методике расчета максимально допустимых внутренних шумов ТПО, приведенных к его входу.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИДРОФОН, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОФОНА, ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН, ВНУТРЕННИЙ ШУМ, АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ; ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА.

Введение

Качество функционирования приемного тракта гидроакустического комплекса (ГАК) (и в первую очередь – его динамический диапазон) в значительной степени определяется корректностью выбора совокупности параметров чувствительных элементов антенны (гидрофонов) и аппаратных средств предварительной обработки сигналов. Далее для краткости совокупность последовательно соединенных гидрофонов и указанных аппаратных средств мы называем трактом предварительной обработки (ТПО).

Выбор указанных параметров делается на основе предельно допустимых внутренних шумов ТПО; уровень последних определяют, учитывая ограничение чувствительности гидрофонов, которое обусловлено требуемой верхней границей динамического диапазона.

Решение задачи расчета предельно допустимого уровня внутренних шумов для тракта, содержащего классическую антенну с пьезокерамическими гидрофонами, проработано достаточно глубоко. Вместе с тем, в течение двух последних десятилетий в качестве перспективного направления проектирования компонентов ги-

дроакустических антенн рассматриваются волоконно-оптические интерферометрические гидрофоны (ВОИГ) [1 – 3].

Актуальность данного направления проектирования определяется несомненными полезными свойствами волоконно-оптических интерферометрических технологий для построения гидроакустических антенн. К преимуществам такого рода относятся низкая отражательная способность антенны, ее малый вес, отсутствие электронной аппаратуры в забортном пространстве корабля-носителя комплекса и, как следствие этого, высокая ремонтпригодность, а также дешевизна (в перспективе).

Принцип действия ВОИГ основан на том, что падающие на них акустические сигналы изменяют фазу светового излучения, распространяющегося по волоконному световоду, который размещен в чувствительном элементе. Порожденные акустическим сигналом флуктуации фазы в интерферометрической схеме преобразуются в фазомодулированные (ФМ) колебания интенсивности, которые регистрируются фотодетектором. Эту часть ТПО мы далее именуем оптической.

После аналого-цифрового преобразования процессор формирует сигнал, повторяющий по форме акустический, принятый

гидрофоном [4]. Эту часть ТПО мы далее именуем цифровой.

Цель настоящей работы – разработка методики расчета параметров ТПО, совокупность которых должна обеспечить его требуемый динамический диапазон.

Считаем, что этот диапазон задан нижней и верхней (соответственно $U_n(f_a)$ и $U_b(f_a)$) [Па·(Гц)^{-1/2}] границами уровня акустического сигнала, относящимися к оговоренной частоте анализа (как правило, эта частота равна либо 1 кГц, либо верхнему значению частоты рабочего диапазона). Здесь и далее под уровнем сигнала подразумевается корень квадратный из спектральной плотности его мощности.

Для обеспечения работы приемного тракта ГАК при заданных требованиях к минимальному уровню принимаемого акустического сигнала U_n и его динамическому диапазону

$$D = 20 \lg(U_b(f_a) / U_n(f_a)) \text{ (дБ)}$$

необходимо определить оптимальное сочетание таких параметров, как чувствительность гидрофона γ (рад/Па), которую будем считать частотно-независимой, и максимально допустимые уровни шумов оптической и цифровой частей ТПО, приведенные ко входу гидрофона.

Решению первой из указанных задач, а именно задачи расчета оптимальной (предельной) чувствительности гидрофонов, посвящена работа [5].

Настоящая статья посвящена разработке методики расчета допустимых уровней шумов оптической и цифровой частей ТПО при оптимальной чувствительности этого гидрофона и заданных границах динамического диапазона тракта $U_n(f_a)$ и $U_b(f_a)$.

Постановка задачи расчета оптимальных параметров ТПО сигналов

Приемная гидроакустическая антенна может содержать до нескольких тысяч гидрофонов. В связи с этим разработчик антенны вынужден разделять всю совокупность гидрофонов на группы, содержащие по μ гидрофонов, и обеспечить размещение каждой группы на одном оптоволокне, т. е. их мультиплексирование. Для ВОИГ наи-

более востребованной является технология временного мультиплексирования. Она подразумевает, что информация от каждого гидрофона группы позиционируется в специально выделенном интервале времени внутри периода опроса гидрофонов [1–3, 6]. При этом после демупльтиплексирования формируются временные отсчеты, несущие информацию (в законе фазовой модуляции) о выборках акустических сигналов, принимаемых каждым из группы гидрофонов. При этом частота дискретизации сигнала в каждом гидрофоне равна частоте опроса группы гидрофонов $f_{\text{опр}}$.

Подробное описание объекта исследования приведено также в работе [5], которая посвящена методике расчета предельного значения чувствительности гидрофона γ_0 (рад/Па) (оно же оптимальное). Эта методика позволяет определить величину γ_0 в применении к ожидаемой форме спектра принимаемого сигнала и фиксированной частоте опроса гидрофонов $f_{\text{опр}}$ при заданных параметрах: его минимальном приведенном уровне $U_n(f_a)$ и динамическом диапазоне D . Следует отметить, что величина $f_{\text{опр}}$ не есть требование, которое предъявляется потребителем к ТПО (как это имеет место с границами динамического диапазона); она является таким же параметром ТПО, как и прочие, подлежащие оптимизации. При этом в части выбора параметра $f_{\text{опр}}$ имеют место ограничения, связанные, в частности, с величиной μ и различиями во времени распространения оптического сигнала по оптоволокну от начала этого волокна в первом гидрофоне из группы до его конца в последнем. В связи с этим в рамках настоящей статьи задача определения оптимальной величины $f_{\text{опр}}$ не рассматривается, а сам этот параметр задается как одно из требований к ТПО.

Таким образом, в качестве исходной известна зависимость условно оптимальной (т. е. при условии фиксации величины $f_{\text{опр}}$) чувствительности гидрофона $\gamma_0(U_n(f_a), D, f_{\text{опр}})$, оговорена величина $f_{\text{опр}}$ (она может рассматриваться как варьируемый параметр) и заданы требования к величине динамического диапазона D . Требуется определить допустимый суммарный уровень шумов

оптической и цифровой частей ТПО.

О норме на величину уровня внутренних шумов ТПО

Расчетные соотношения для определения максимально допустимого уровня внутренних шумов ТПО, полученные в настоящем разделе статьи, по сути универсальны. Они имеют отношение к ТПО с приемной антенной с произвольными гидрофонами и, в частности, с ВОИГ.

Считаем, что уровень внутреннего шума ТПО аддитивно добавляется к акустическому шуму моря. Тогда при допустимых технических потерях (ТП) на частоте f_a – ТП(f_a) (дБ), обусловленных внутренними шумами ТПО, необходимо выполнение условия

$$\text{ТП}(f_a) = 10 \cdot \lg\{[P_{\text{ш ак}}(f_a) + \zeta(f_a) \times U_{\text{ш вн вх}}^2(f_a)] \cdot P_{\text{ш ак}}^{-1}(f_a)\} \leq \text{ТП}_{\text{доп}}(f_a), \quad (1)$$

где все величины даны при работе на частоте анализа; $P_{\text{ш ак}}(f_a)$ – отсчет энергетического спектра акустического шума при его заданном минимальном уровне; $U_{\text{ш вн вх}}^2(f_a)$ – отсчет энергетического спектра внутреннего шума ТПО, приведенного ко входу этого ТПО; $\zeta(f_a)$ – отношение выигрыша по акустическому шуму к таковому по внутреннему шуму ТПО (имеется в виду выигрыш от группы задач пространственной обработки, реализуемой после ТПО); $\text{ТП}_{\text{доп}}(f_a)$, дБ – допустимая величина технических потерь ТПО.

Из условия (1) следует соотношение

$$U_{\text{ш вн вх}}^2(f_a) \leq \zeta^{-1}(f_a) \cdot [10^{0,1 \cdot \text{ТП}_{\text{доп}}(f_a)} \times P_{\text{ш ак}}(f_a) - P_{\text{ш ак}}(f_a)]. \quad (2)$$

Актуальность учета параметра $\zeta(f_a)$ при решении рассматриваемой задачи иллюстрируется следующим расчетным примером.

Пример расчета. Рассмотрим плоскую антенну размером

$$5\lambda_a \times 5\lambda_a,$$

где λ_a – длина волны на частоте анализа.

Пусть эта антенна содержит $N_r = 11 \times 11 = 121$ гидрофонов, расположенных по горизонтали и вертикали, с шагом $0,5\lambda_a$. Относительная величина площади рабочего

пятна такой антенны составляет $s = 25\lambda_a^2$. При этом ее коэффициент концентрации, характеризующий величину выигрыша в отношении сигнал/шум (в раз) по мощности акустической помехи (выигрыш за счет пространственной фильтрации) на частоте анализа f_a (Гц), при $\lambda_a = 1500/f_a$ (м) определяется как $K = 2\pi s / \lambda_a^2 \approx 157$ [6]. Выигрыш же в отношении сигнал/шум по мощности внутренних шумов ТПО при этом составляет всего $N_r = 121$ раз. Это соотношение выигрышей приводит к перераспределению уровней акустического и внутреннего шумов в результате пространственной фильтрации в «пользу» этого внутреннего шума, причем коэффициент перераспределения составляет 1,3 раза. Если же антенна лежит на экране, который снижает уровень шума моря в два раза и не влияет на уровень внутреннего шума ТПО, то коэффициент указанного перераспределения составляет уже 2,6 раза. Если же шаг между смежными гидрофонами превышает величину $0,5\lambda_a$, например в $\sqrt{2}$ раз (это вполне допустимо на практике для верхних частот рабочего диапазона, особенно в части шага по вертикали), то такое превышение приводит к дополнительному перераспределению уровней в «пользу» внутреннего шума еще в два раза. Наконец, если учитывать, что при работе в реальных условиях, когда шум моря анизотропен по вертикали, то перераспределение уровней в «пользу» внутреннего шума, как правило, составляет еще два раза.

В итоге уровень внутреннего шума в рассмотренном примере, за счет всех перечисленных выше факторов, благодаря реализации процедуры пространственной фильтрации (после предварительной обработки), будет «подчеркнут» относительно уровня акустического шума на величину порядка 10. Это и есть величина $\zeta(f_a)$, прогнозируемая в данной ситуации.

Таким образом, для расчета допустимого уровня внутренних шумов ТПО $U_{\text{ш вн вх}}^2(f_a)$ при выбранной частоте анализа (f_a), допустимых технических потерях ТП(f_a), а также прогнозируемой величине $\zeta(f_a)$ и заданном уровне шумов моря $P_{\text{ш ак}}(f_a)$ необходимо решить неравенство (2) отно-

сительно искомой величины $U_{ш\ вн\ вх}(f_a)$.

Решение данной задачи целесообразно проводить на верхней частоте рабочего диапазона f_b , которая относится к наиболее проблемной в плане обеспечения требуемого уровня внутренних шумов ТПО, либо на его среднегеометрической частоте.

Для допустимого уровня внутренних шумов имеем следующее выражение (здесь и далее аргумент частоты f_b опущен):

$$U_{ш\ вн\ вх} = \sqrt{U_{оп\ вх}^2 + U_{кв\ вх}^2} \text{ [Па} \cdot (\text{Гц})^{-1/2}], \quad (3)$$

где $U_{оп\ вх}$, $U_{кв\ вх}$ – уровни оптической и цифровой частей ТПО, причем шум цифровой части – шум квантования в АЦП.

Методики расчетов (соответствующие расчетные соотношения) величин $U_{оп\ вх}$ и $U_{кв\ вх}$ представлены ниже.

Анализ уровня внутренних шумов оптической части тракта

Ошибки фазового детектирования являются следствием конечности отношения сигнал/шум $q_{фп}$ на выходе фотоприемника (т. е. на выходе линейной части оптического тракта). Эти ошибки формируются в цифровой части ТПО в ходе выполнения операции фазового детектирования, однако по признаку местонахождения источников шумов, порождающих эти ошибки, мы их относим к внутренним шумам оптической части этого ТПО. Известно [8], что стандарт флуктуаций (или ошибки измерения) фазы при отношении сигнал / шум по напряжению на выходе линейной части тракта $q_{фп} \gg 1$, определяется как $\sigma_\phi \sim q_{фп}^{-1}$ (рад). Указанное отношение сигнал/шум $q_{фп}$ обусловлено уровнем сигнала, излучаемого оптическим источником, коэффициентом ослабления сигнала при его распространении в оптической части ТПО, а также уровнями шумов оптического источника и фотоприемника. Условие большого отношения сигнал/шум, т. е. $q_{фп} \gg 1$, на практике выполняется, поскольку уровень оптического сигнала, принимаемого фотоприемником, много больше уровней шумов как этого фотоприемника, так и оптического источника (при правильном проектировании).

Следует отметить, что отношение $q_{фп}$ определяется исключительно качествами оптического источника и фотоприемника и не зависит от уровня принимаемого акустического сигнала. Данное обстоятельство связано с тем, что фаза оптического сигнала, определяемая принимаемым акустическим сигналом, является неэнергетическим параметром. Уровни шумов (отношения сигнал/шум) оптического источника и фотоприемника определяются качествами этих компонент ТПО, и выполнение требований к этим уровням достигается путем подбора оптического источника (лазера) и фотоприемника надлежащего качества.

В связи с тем, что искомый сигнал (результат фазовой демодуляции) формируется с частотой $0,5f_{опр}$, далее полагаем, что уровни шумов лазера и фотоприемника также определены с «приведением» к величине полосы частот $(0 - 0,5f_{опр})$ и в этой полосе от частоты не зависят. При этом уровень внутренних шумов оптической части тракта, приведенный ко входу гидрофона, определяется следующим образом (аргумент частоты опущен):

$$U_{оп\ вх} = \gamma_0^{-1} \cdot (0,5 \cdot f_{опр})^{-0,5} \times q_{фп}^{-1} \text{ [Па} \cdot (\text{Гц})^{-1/2}]. \quad (4)$$

Анализ уровня внутренних шумов цифровой части ТПО

Считаем, что уровень внутренних шумов цифровой части ТПО, приведенных ко входу гидрофона, определяется только эффектом амплитудного квантования. При этом возможный шум усилителя в составе АЦП учитывается путем расчета уровня шума квантования при разрядности АЦП, соответствующей количеству его корректных разрядов. Такой подход к решению рассматриваемой задачи оправдан тем, что при указании количества корректных разрядов АЦП его разработчик учитывает также уровень внутренних шумов усилителя, входящего в состав АЦП.

Считаем, что АЦП содержит n_k корректных разрядов при напряжении питания $U_{АЦП}$. В этом случае «цена» младшего разряда определяется как $\Delta = U_{АЦП} / 2^{n_k}$.

Стандарт шума квантования (как практически равномерно распределенной случайной величины) следует выражению

$$\sigma_{\text{кв}} = \Delta \cdot (12\zeta)^{-1/2} \approx 0,3\Delta \cdot (\zeta)^{-1/2},$$

где ζ — количество выборок, выполняемых АЦП на интервале длительности импульса опроса сигнала от одного ВОИГ при их последующем усреднении.

Следует отметить, что параметр ζ ограничен сверху величиной отношения длительности импульса опроса гидрофона к интервалу корреляции шумов фотоприемника.

При этом уровень шумов квантования (приведенный ко входу гидрофона) определяется как

$$U_{\text{кв вх}} \approx \gamma_0^{-1} \cdot 0,3 \cdot U_{\text{ашп}} \cdot 2^{-n_k} \times (0,5 \cdot f_{\text{опр}} \cdot \zeta)^{-0,5} [\text{Па} \cdot (\text{Гц})^{-1/2}]. \quad (5)$$

Суммарный же уровень внутренних шумов ТПО $U_{\text{ш вн вх}}$ определяется согласно выражению (3).

Заключение

В работе приведены расчетные соотношения, позволяющие сформулировать требования к оптической и цифровой компонентам тракта предварительной обработки сигналов, включающего волоконно-оптические интерферометрические гидрофоны. При этом требования относятся к уровню их внутренних шумов. Выполнение этих требований должно гарантировать необходимое (контролируемое) качество тракта в отношении технических потерь помехоустойчивости.

Предложенный анализ можно применять, например, при разработке сейсмозведочных гибких буксируемых протяженных гидроакустических антенн, которые используются для поиска полезных ископаемых.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 11--08-01097-а и 12-08-00511-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. P. 479.
3. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fiber-optic sensing // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. Vol. 37. P. R197-R216.
4. Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент. СПб.: Изд-во Политехн. 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. № 6 (162). С. 73–80.
6. Cranch G.A., Nash P.J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensor using TDM and DWDM // J. Lightwave Technology. 2001. Vol. 19. No. 5. pp. 687-699.
7. Смартышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение. 1984. 300 с.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд. М.: Радио и связь, 1989. 654 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛУБЕВ Анатолий Геннадиевич — доктор технических наук, заместитель генерального директора ОАО «Камчатский гидрофизический институт» по научной работе.

197081, Россия, г. Санкт-Петербург, Липовая аллея, 9
agg300@mail.ru

СМИРНОВ Алексей Сергеевич — ведущий инженер ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»».

197046, Россия, г. Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., 30
hydroacoustics@mail.ru

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 FIBRE-OPTIC HYDROPHONES.



The dynamic range of the section for signals pre-processing in the underwater acoustic unit is conditioned by hydrophones sensitivity of the receiving antenna and by the internal noise level of operative assemblies composing the section. When we use a receiving antenna with interferometric fiber-optic hydrophones in that complement, optical and digital components are parts of the section. Our paper focuses on the calculation technique to get tolerable internal noise level reduced to the hydrophone input value. The technique is concerned with the underwater-acoustic unit containing receiving antenna with interferometric fiber-optic hydrophones.

INTERFEROMETRIC FIBER-OPTIC HYDROPHONE, HYDROPHONE SENSITIVITY, DYNAMIC RANGE, INTERNAL NOISE, ANALOGUE-DIGITAL CONVERTER, SPATIAL PROCESSING.

REFERENCES

1. Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyy 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. P. 479.
3. Kirkendall C.K., Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, Vol. 37, pp. R197-R216.
4. Liokumovich L.B. Volokonno-opticheskie interferometricheskie izmereniya. Ch. 2. Volokonnyy interferometricheskiy chuvstvitel'nyy element. St. Petersburg, Polytechnical University Press, 2007. 68 p. (rus)
5. Golubev A.G., Smirnov A.S. O raschete verkhney granitsy chuvstvitel'nosti interferentsionnykh volokonno-opticheskikh gidrofonov priemnoy gidroakusticheskoy antennoy. *St Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2012, No. 6 (162), pp. 73-80. (rus)
6. Cranch G.A., Nash P.J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensor using TDM and DWDM. *J. Lightwave Technology*, 2001, Vol. 19, No. 5, pp. 687-699.
7. Smaryshev M.D., Dobrovolskiy Yu.Yu. Gidroakusticheskie antennoy. Leningrad, Sudostroenie, 1984, 300 p. (rus)
8. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. 3-e izd. Moscow, Radio i svyaz', 1989. 654 p. (rus)

THE AUTHORS

GOLUBEV Anatoly G.

Kamchatka Hydrophysical Institute JSC
9 Lipovaya Ave., St. Petersburg, 197081, Russia
agg300@mail.ru.

SMIRNOV Alexey S.

State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC
30, Malaya Posadskaya St., St. Petersburg, 197046, Russia
hydroacoustics@mail.ru