РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ ПРИЕМНИКОВ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Коренбаум В.И.*, Горовой С.В., Тагильцев А.А., Бородин А.Е.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН E-mail:*v-kor@poi.dvo.ru

Аннотация

Проанализированы проблемы создания приемников градиента давления различных типов для использования в низкочастотном диапазоне, определяемые необходимостью достижения достаточной чувствительности к звуковому давлению в плоской волне, коэффициента деления дипольной характеристики направленности не хуже 26 дБ, динамического диапазона не менее 80–100 дБ. Теоретически оценены пределы применимости ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов по волновым размерам. Разработаны высокоэффективные ПГД инерционного и силового типов. Предложено комбинирование ПГД инерционного/силового и 2-гидрофонного типов в линейной антенне.

Ключевые слова: приемник градиента давления, технические решения, характеристика направленности, частотный диапазон, динамический диапазон.

DEVELOPMENT OF SMALL-SIZE LOW-FREQUENCY PRESSURE GRADIENT SENSORS

Korenbaum V.I. *, Gorovoy S.V., Tagilcev A.A., Borodin A.E.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences E-mail:*v-kor@poi.dvo.ru

Abstract

The problems of development of pressure gradient sensors of various types for usage in low-frequency range are analyzed, which are connected to a necessity to provide acceptable sensitivity to sound pressure in a flat wave, minima of the dipole directivity pattern being nor less 26 dB, dynamic range being nor less 80–100 dB. The wavelength limits of acceptability of 2-hydrophone (differential) pressure gradient sensors are theoretically predicted. High effective pressure gradient sensors of inertial and force types are designed. It is suggested to combine a pressure gradient sensor of inertial or force type with the pressure gradient sensor of 2-hydrophone type in linear array.

Key words: pressure gradient sensor, technical solutions, directivity pattern, frequency range, dynamic range.

Введение

Приемники градиента давления (ПГД) сами по себе и в составе комбинированных приемников (КП), содержащих ПГД и приемники звукового давления (ПД), открывают определенные перспективы повышения направленности, помехоустойчивости и обеспечения возможности пассивного пеленгования источника сигнала в антенных системах с малыми волновыми размерами.

Развитие ПГД и КП претерпело несколько этапов. Сейчас отчетливо наблюдается новая волна исследований и разработок, преимущественно связанная с использованием этих приемников на малогабаритных подводных носителях, т.е. там, где развитые антенные системы неприменимы.

Фирмой Wilcoxon Research Inc. (США) анонсировано семейство 4-канальных (трехкомпонентный акселерометр и гидрофон) КП инерционного типа VS-101, VS-206, VS-301, отрывочная информация о которых, включая использование, представлена в некоторых публикациях [4]. Отмечается, что создан новый пьезоэлектрический материал Pb(Mb1/3Nb2/3) O3-PbBaTiO3 (известный как PMN-PT кристаллы), с пьезоэлектрическими параметрами, превосходящими обычный цирконат титанат свинца (PZT) в 7–10 раз. Это позволяет значительно уменьшить габариты подводных ПГД и КП. Известна и альтернативная схема ПГД, построенная на адаптированной к подводным условиям воздушной технологии термоанемометрии Microflown Technologies (Arnhem, Netherlands), названная позднее Hydroflown. Заявляется, что эти ПГД обеспечивают частотный диапазон 5–2000 Гц. Встречаются и исследования, связанные с разработкой волоконно-оптических ПГД [4].

Постановка проблемы

Однако далеко не все проблемы разработки малогабаритных ПГД для низкочастотного диапазона решены. Подобные ПГД при малых размерах должны иметь высокую чувствительность к полезному сигналу в виде плоской звуковой волны, глубокие провалы дипольной характеристики направленности, существенно расширенный по сравнению с ПД динамический диапазон.

Целью работы является анализ проблем построения малогабаритных ПГД низкочастотного диапазона и возможных путей их решения.

Основные результаты

По схеме построения известны 4 типа ПГД: 2-гидрофонные, разностные, силовые и инерционные [1, 2, 10].

Казалось бы, наибольшей простотой и доступностью обладают 2-гидрофонная и/или разностная схемы, позволяющие при противофазном (разностном) электрическом включении использовать конструкции стандартных гидроакустических датчиков: для первой в виде пары сферических или двусторонних биморфных гидрофонов, для второй – цилиндрических гидрофонов с разрезанными пополам электродами. Однако обе схемы построения имеют принципиальное ограничение по рабочему диапазону частот, не получившее достаточного освещения. Для иллюстрации этого ограничения рассмотрим амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ПГД этих типов (рис. 1).

АЧХ чувствительности ПГД 2-гидрофонного или разностного типа по звуковому давлению в направлении максимума дипольной направленности (1) имеет наклон 6 дБ/октава в низкочастотную область. Если предположить, что гидрофоны точечные, то максимум чувствительности такого ПГД достигается при расстоянии между гидрофонами d = $\lambda/2$ и равен сумме (за счет вычитания в противофазе) чувствительностей отдельных гидрофонов $v_{p1} + v_{p2}$. Однако в районе $\lambda/2$ обычно имеет место нелинейность АЧХ, поэтому рабочий диапазон устанавливается с примерно вдвое более низкой частоты, т.е. с $\lambda/4$, где чувствительность ПГД составляет примерно ($v_{p1} + v_{p2}$)/2. Далее в низкочастотную область чувствительность ПГД спадает строго



Рис. 1. АЧХ чувствительности ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов по звуковому давлению:

1 – чувствительность на максимуме (max) дипольной направленности ПГД, 2 – чувствительность на минимуме (min) дипольной направленности ПГД, 3 – остаточная чувствительность за счет разброса отдельных гидрофонов.

линейно и на в 10 раз более низкой частоте, соответствующей $\lambda/40$, составит $0.1(v_{p1} + v_{p2})/2$.

Штриховая линия (2) характеризует чувствительность ПГД по минимуму (провалу) дипольной характеристики направленности, которая должна быть меньше чувствительности на максимуме (1), не менее чем на 20 дБ. Эта чувствительность ПГД по минимуму (2) соответственно падает с понижением рабочей частоты точно так же, как чувствительность по максимуму (1).

Горизонтальная линия (3) характеризует остаточную чувствительность ПГД как «паразитного» ПД, возникающую за счет разброса параметров отдельных гидрофонов ($v_{p1} - v_{p2}$)/2, которая, в отличие от графиков (1, 2), не зависит от частоты. В настоящее время выровнять чувствительности двух гидрофонов ПГД вряд ли можно с погрешностью лучше 1% (ограничением здесь выступают не только электроакустические параметры гидрофонов, но и конструктивнотехнологическая асимметрия ПГД). Таким образом, остаточная чувствительность ПГД, в лучшем случае составит 0,01($v_{p1} + v_{p2}$)/2. Очевидно (рис. 1), что линии (2) и (3) должны пересечься около значения частоты, характеризуемого длиной волны $\lambda/40$. Это означает, что с обеспечением глубины провалов (коэффициента деления) дипольной характеристики направленности 20 дБ рассматриваемый ПГД работоспособен в диапазоне длин волн между $\lambda/40$ и $\lambda/4$, т.е. в пределах всего одной декады по частоте. При дальнейшем снижении рабочей частоты дипольная направленность ПГД деградирует, что делает его использование невозможным.

Однако даже декада по частотному диапазону обычно недостижима. Из соображений повышения точности пеленгования или улучшения качества формирования кардиоидоподобной направленности глубину провалов дипольной характеристики направленности ПГД стремятся довести до 26 дБ и даже 30 дБ. Очевидно (рис. 1), что при смещении в соответствии с этими значениями коэффициентов деления линия (2) достигнет линии (1) существенно раньше – около $\lambda/20$ и $\lambda/13$ соответственно. Таким образом, реальные ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов могут проектироваться лишь на достаточно узкий, по меркам других типов ПГД, частотный диапазон $d/\lambda = 1/4 - 1/20$ (1/13), т.е. примерно 1,5-2 октавы. Это и является главным ограничением ПГД 2-гидрофонной и разностной схем. Так, при характерном размере 100 мм, ПГД рассматриваемого типа работоспособен в диапазоне частотот 3750 (d/ λ = 1/4) Гц до 750 (d/ λ = 1/20) – 1150 (d/ λ = 1/13) Гц, что для целей шумопеленгования в низкочастотном диапазоне явно нелостаточно.

ПГД силового и инерционного типов обладают значительно большей широкополосностью при формировании дипольной характеристики направленности с высоким коэффициентом деления, достигающей 5 декад по частоте [2]. Однако проблемы повышения чувствительности и динамического диапазона остаются актуальными и для этих схем.

Инерционная схема ПГД подразумевает размещение в соколеблющемся вместе с жидкостью в плоской звуковой волне корпусе с «нейтральной» плавучестью датчиков колебательного движения (акселерометров, велосиметров или датчиков колебательного смещения). В настоящее время, исходя из необходимости обеспечения достаточного динамического диапазона, в качестве датчиков движения преимущественно применяются акселерометры. Как известно, датчики этого типа в ПГД реализуют АЧХ со спадом 6 дБ/октава вниз по частоте, что приводит к компрессии динамического диапазона принимаемых низкочастотных сигналов. Однако и в этом случае ПГД инерционного типа, с одной стороны, должны неискаженно (для дальнейшей обработки) воспринимать гидродинамические и вибрационные помехи, достигающие на частоте 50 Гц ускорения порядка $10^{-3} - 10^{-2}$ $mc^{-2}/\Gamma \mu^{0.5}$ [3], а с другой стороны – обеспечивать прием слабых шумов моря с пороговым звуковым давлением на частоте 50 Гц порядка р₀ = 2 мПа/Гц^{0,5}. В предположении плоской звуковой волны пороговое звуковое давление может быть пересчитано через акустическое сопротивление среды ρc в пороговое колебательное ускорение $a_0 = (p_0/(\rho c))/\omega$, что для частоты $f = \omega/2\pi = 50$ Гц дает $a_0 = 0,425 \ 10^{-7} \text{ мc}^{-2}/\Gamma \mu^{0.5}$. Таким образом, требуемый динамический диапазон колебательных ускорений, измеряемых ПГД, составит 86–106 дБ. Эта величина ныне является достижимой, однако требует продуманных технических решений. Заметим, что при использовании в качестве датчиков колебательного движения ПГД инерционного типа широкополосных велосиметров, АЧХ которых не имеет компрессирующего спада 6 дБ октава в низкочастотную область, требуемый динамический диапазон, например, для частотного диапазона 1000-10 Гц, увеличится еще на 40 дБ и тем самым станет запредельным для возможностей современной элементной базы.

Что касается чувствительности акселерометров к ускорению, в настоящее время стали доступны ICP-акселерометры со встроенными повторителями, например, PCB Piezotronics 393B05, реализующие при массе всего 50 г чувствительность по ускорению 1,0 В/мс⁻² с динамическим диапазоном не менее 80 дБ.

На основе данных акселерометров разработан и изготовлен 3-компонентный ПГД инерционного типа Ø80 мм (рис. 2), реализующий чувствительность по звуковому давлению около 500 мкВ/Па на частоте 100 Гц [5]. Достигнутые параметры позволяют обеспечить работоспособность этого малогабаритного ПГД в диапазоне частот от 5–10 Гц до 1,5–2 кГц.



Рис. 2. 3-компонентный ПГД инерционного типа с акселерометрами PCB Piezotronics 393B05 в обтекателе Ø100 мм, предназначенный для горизонтального развертывания

Для ПГД силового типа, в которых градиент давления формируется не за счет разностного электрического включения, а в результате разностного приложения силы давления, существуют аналогичные проблемы. Известные ПГД силового типа [2, 10] содержат пластинчатые изгибные преобразователи, установленные по краям тяжелого сердечника, что делает малым набег звуковой волны между двумя сторонами пластинчатого преобразователя, который собственно и формирует градиент давления. Необходимы конструктивные мероприятия, обеспечивающие увеличения набега волны, вместе с повышением





 цилиндрический корпус из звукоотражающего материала; 2, 3 – круглые чувствительные датчики вертикальной и горизонтальной ориентации соответственно; 4 – вертикальные каналы в корпусе чувствительности пластинчатых датчиков, при обеспечении малого поперечного размера.

Для решения этих задач разработана конструкция ПГД (рис. 3), в которой круглые пластинчатые датчики установлены ортогонально, друг за другом, на оси цилиндрического корпуса из звукоотражающего материала и соединены с его поверхностью полыми каналами, выполненными в теле корпуса, причем сечение каналов плавно меняется от круглого у чувствительного элемента к прямоугольному у поверхности корпуса, без уменьшения поперечной площади сечения, а оси каналов изогнуты во встречном направлении, так что выходы каналов на поверхность цилиндра лежат в ортогональных плоскостях с обеспечением единого фазового центра [8]. Как показано [6], в предложенном решении набег волны, при том же внешнем диаметре, увеличивается, не менее чем в 4 раза, по сравнению с известными ранее конструкциями [2, 10].

В качестве круглых чувствительных элементов могут быть использованы как изгибные пластинчатые биморфные пьезопреобразователи, так и любые другие датчики разности давления, например, электрохимические.

Совместно с ПАО «Дальприбор» изготовлен ПГД предложенного типа (рис. 4) с цилиндрическим корпусом (1) размером 168 х Ø100 мм из нержавеющей стали, состоящий из 8 собираемых на штифтах одинаковых секций [7]. Круглые чувствительные элементы (2) собраны из двусторонних биморфных преобразователей, состоящих из бронзовой подложки Ø70 мм, склеенной с двумя тонкими (толщина 0,3 мм) круглыми пьезодисками Ø30 мм. Бронзовая подложка по контуру Ø65 мм оперта между двумя кольцевыми обоймами,



Рис. 4. Внешний вид ПГД силового типа Ø100 мм

имеющими внешний диаметр Ø80 мм. Каждый собранный чувствительный элемент (2) залит звукопрозрачным уретановым компаундом в форме цилиндрической таблетки. На частоте 100 Гц измеренная чувствительность ПГД достигает 130 мкВ/Па (без предусилителя). Экспериментально измеренный коэффициент деления дипольной характеристики направленности ПГД составил не менее 24 дБ в диапазоне частот 100–200 Гц.

Одним из перспективных вариантов является применение ПГД в составе линейных антенн с малым поперечным сечением. Такие антенны создают возможность комбинированного использования ПГД инерционного/силового типов для обеспечения направленности по поперечному габариту и ПГД 2-гидрофонного типа – для обеспечения направленности вдоль продольного размера [9].

Так, при обеспечении разнесения между гидрофонами 400 мм частотный диапазон функционирования ПГД 2-гидрофонного типа может составить от 190 ($d/\lambda = 1/20$) – 290 ($d/\lambda = 1/13$) Гц до 940 ($d/\lambda = 1/4$) Гц, что уже пригодно для некоторых применений. Тогда как поперечный габарит такой антенны может быть уменьшен до 30–40 мм с обеспечением 2-компонентным ПГД инерционного типа, например, на базе акселерометров PCB333B52 (Piezotronics) [5], сопоставимых чувствительности и коэффициента деления дипольной характеристики направленности с рассмотренным ПГД 2-х гидрофонного типа в этом же диапазоне частот.

Заключение

Проанализированы проблемы разработки ПГД различных типов для использования в низкочастотном диапазоне, определяемые необходимостью достижения: достаточной чувствительности к звуковому давлению в плоской волне, коэффициента деления дипольной характеристики направленности не хуже 26 дБ, динамического диапазона не менее 80–100 дБ. Теоретически оценены пределы применимости ПГД 2-гидрофонного (разностного) типов, составившие диапазон 1/4–1/20 длин волны. Создана конструкция 3-компонентного ПГД инерционного типа, при чувствительности около 500 мкВ/Па на частоте 100 Гц, характеризуемая динамическим диапазоном не менее 80 дБ. Разработана конструкция ПГД силового типа, обеспечивающая 4-кратное повышение длины набега волны и соответственно чувствительности по сравнению с известными ранее решениями (схемами). Обоснованы технические предложения по комбинированию ПГД инерционного/ силового и ПГД 2-гидрофонного типов в составе линейной антенны.

Благодарность. Исследование поддержано Программой фундаментальных исследований Российской академии наук (№ гос. регистрации проекта АААА-А20-120031890011-8).

Литература

- 1. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения. М.: Мир. 1974. 360 с.
- Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. С. 23.
- Коренбаум, В.И. Защита акустических устройств от ближних полей помех: дис. докт. техн. наук: 01.04.06 / В.И. Коренбаум. Владивосток. 1999. 356 с.
- Коренбаум В.И., Тагильцев А.А. Разработка векторных ГПБА: Состояние вопроса // Тр. 12 Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПБ. 2014. С. 177–178.
- 5. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Костив А.Е., Ширяев А.Д. Низкочастотные приемники градиента давления инерционного типа для океанологических исследований // ПТЭ. 2017. № 4. С. 142–146.
- Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Костив А.Е., Ширяев А.Д., Фершалов Ю.Я., Марютин В.С. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа для океанологических исследований // ПТЭ. 2017. № 5. С. 120–124.
- Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Дегтярев И.В., Серветников М.И. Низкочастотный приемник градиента давления силового типа // Тр. 7-й всерос. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» Владивосток. 2017. С. 193–196.
- Патент РФ 2568411 / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Горовой С.В., Фершалов Ю.Я. Заявл.: 16.10.2014; Опубл.: 16.10.2015. бюл. № 32.
- 9. Патент РФ 2687301 / Коренбаум В.И. Заявлено: 07.05.2018; Опубликовано: 13.05.2019. бюл. № 14.
- Скребнев Г.К. Комбинированные гидроакустические приемники. СПБ. Изд-во «Элмор». 1997. 200 с.

References

- 1. Bobber R. Dz. Gidroakusticheskiyeizmereniya. M.: Mir. 1974. 360 c.
- 2. Gordiyenko V.A. Vektorno-fazovyyemetody v akustike. M.: FIZMATLIT. 2007. P. 23.
- Korenbaum, V.I. Zashchita akusticheskikh ustroystv ot blizhnikh poley pomekh: dis. dokt. tekhn. nauk: 01.04.06 / V.I. Korenbaum. Vladivostok. 1999. 356 c.

- Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A. Razrabotka vektornykh GPBA: Sostoyaniye voprosa // Tr. 12 vseros. konf. «Prikladnyye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki». SPB. 2014. P. 177–178.
- Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Gorovoi S.V., Kostiv A.E., Shiryaev A.D. Lowfrequency inertial-type pressure-gradient receivers for oceanological investigations // Instruments and Experimental Techniques. 2017. V. 60. No. 4. P. 600–604.
- Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Gorovoi S.V., Kostiv A.E., Shiryaev A.D., FershalovYu.Ya., Maryutin V.S. A Low-frequency power-type pressure-gradient receiver for oceanological investigations // Instruments and Experimental Techniques. 2017. V. 60. No. 4. P. 728–732.
- Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A., Gorovoy S.V., Degtyarev I.V., Servetnikov M.I. Nizkochastotnyy priyemnik gradiyenta davleniya silovogo tipa // Tr. 7-y vseros. konf. «Tekhnicheskiye problem osvoyeniya mirovogo okeana» Vladivostok. 2017. P. 193– 196.
- 8. Patent RF 2568411 / Korenbaum V.I., Tagil'tsev A.A., Gorovoy S.V., Fershalov YU.YA. Zayavl.: 16.10.2014; Opubl.: 16.10.2015. byul. № 32.
- 9. Patent RF 2687301 / Korenbaum V.I. Zayavleno: 07.05.2018; Opublikovano: 13.05.2019. byul. № 14.
- Skrebnev G.K. Kombinirovannyye gidroakusticheskiye priyemniki. SPB. Izd-vo «Elmor». 1997. 200 s.