

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫХ ПРИЕМНИКОВ ДЛЯ ГИБКИХ ПРОТЯЖЕННЫХ БУКСИРУЕМЫХ АНТЕНН

В. И. КОРЕНБАУМ^{1,2}, А. А. ТАГИЛЬЦЕВ¹

¹*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток*

²*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

Рассмотрены вопросы разработки векторно-скалярных приемников для низкочастотных гибких буксирюемых протяженных антенн, связанные с оценкой резонанса подвеса, методами защиты от помех обтекания.

ВВЕДЕНИЕ

Применение векторных (ВП) и комбинированных приемников (КП) в гибких приемных буксирюемых антеннах (ГПБА) позволяет обеспечить пространственную избирательность не только в продольной, но и поперечной плоскостях. Это свойство векторных ГПБА представляет интерес для устранения неоднозначности пеленгования и определения угломестного направления на источник принятого сигнала. Внимание исследователей к разработке и исследованию векторных ГПБА в последние годы время вновь привлечено работами [1–5]. Основными проблемами использования векторно-скалярных приемников в низкочастотных гибких буксирюемых протяженных антеннах являются защита от помех обтекания и необходимость достижения высокой чувствительности при малых поперечных волновых размерах. Цель работы – исследование характеристик векторно-скалярных приемников, помещенных в тело ГПБА из звукопрозрачного компаунда.

1. РЕЗОНАНС ПОДВЕСА

Очевидно, что сочетание массы векторного приемника (ВП) и упругости подвеса приводит к тому, что на некоторой собственной частоте f_0 имеет место резонанс подвеса. Для рассматриваемого варианта ГПБА в роли упругого подвеса ВП выступает оболочка из упругого компаунда, выполняющей одновременно функции обтекателя и герметизирующего элемента конструкции.

В предположении малости ВП - 1 по сравнению с длиной падающей звуковой волны, без учета влияния вспомогательных элементов конструкции (их жесткость существенно ниже жесткости компаунда - 2) и при условии, что собственная частота акустических датчиков существенно выше собственной частоты подвеса, движение корпуса ВП (рис. 1) относительно окружающей среды в направлении 3 может быть описано дифференциальным уравнением [6] для системы с одной степенью свободы:

$$(M_d + M_s)\xi'' + K\xi - M_d\xi_0'' = F, \quad (1)$$

где M_d - масса ВП, M_s - присоединенная масса корпуса ВП (в данную величину входит масса оболочки), ξ'' - ускорение корпуса ВП относительно воды, ξ - смещение корпуса ВП относительно воды, ξ_0'' - колебательное ускорение для плоской акустической волны в

свободной среде, K - эффективная жесткость оболочки. Величина F характеризует внешнюю действующую силу, вызванную градиентом давления. Для дорезонансной области частот (датчик с оболочкой движутся как единое целое) согласно $F = F_1 = -\rho_0 V \xi_0''$, где ρ_0 - плотность воды V - объем датчика вместе с оболочкой. В области частот $f \gg f_0$ (датчик развязан от движения оболочки) для звукопрозрачного компаунда $F = F_2 = -\rho_0 V_d \xi_0''$, где V_d - объем датчика.

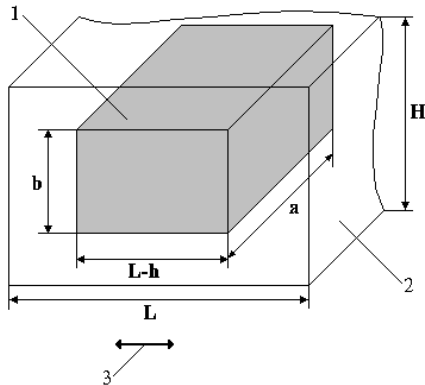


Рис. 1.

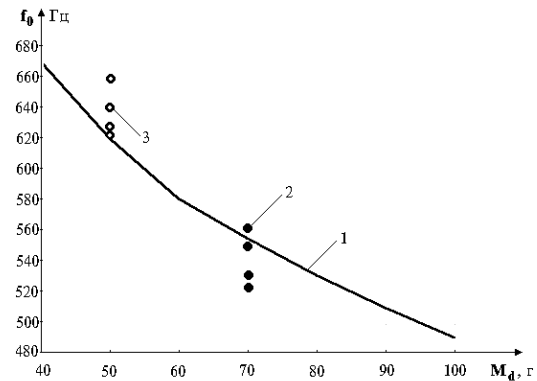


Рис. 2.

С точки зрения эффекта резонанса подвеса представляет интерес исследование движения ВП не столько относительно воды, сколько относительно оболочки. В предположении звукопрозрачности компаунда оно может быть описано аналогично (1) -

$$(M_d + M_s) \xi_k'' + K \xi_k = (M_d - M_k) \xi_0'', \quad (2)$$

где $M_k = \rho_k V_d$ - масса компаунда в объеме корпуса ВП, ρ_k - плотность компаунда, а ξ_k'' - ускорение, ξ_k - смещение корпуса ВП, но уже относительно компаунда. Заметим, что правая часть выражения (2) характеризует дополнительную (по отношению к оболочке) вынуждающую силу, действующую на корпус ВП. Переходя к представлению уравнения (2) в канонической форме [7], получим: $\xi_k'' + \omega_0 \xi_k = C \xi_0''$, где

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = [K / (M_d + M_s)]^{0.5} \quad (3)$$

- угловая собственная частота колебательной системы, а величину

$$C = (M_d - M_k) / (M_d + M_s) \quad (4)$$

можно назвать коэффициентом подвеса.

Эффективная жесткость оболочки K может определяться экспериментально, однако для некоторых простейших конфигураций возможны и теоретические оценки. В частности, для конфигурации в виде параллелограмма (рис. 1) общая жесткость системы может быть представлена [8] в виде совокупности элементов работающих на сжатие и на сдвиг $1/K \approx 1/K_1 + 1/K_2$, где K_1 - жесткость продольного элемента, K_2 - жесткость сдвигового элемента. Поскольку жесткий корпус ВП вместе с оболочкой движется в плоской волне под действием результирующего градиента давления (1), прилагаемого синфазно к противоположным боковым граням тела макета для приближенного

определения эффективной жесткости K_1 можно воспользоваться моделью резинового виброизолятора в виде прямоугольной призмы удвоенной (по сравнению с соответствующим сечением оболочки) толщины h_1 , имеющей площадь поперечного сечения $S_1=ab$ и работающей на сжатие. Тогда согласно $K_1 \approx \mu S G_z / h_1$, где μ - модуль сдвига компаунда, G_z - безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения размеров виброизолятора. Сдвиговая жесткость имеет вид $K_2 \approx \mu S_2 / h_2$, где S_2 - площадь боковой поверхности корпуса ВП, h_2 - толщина боковой поверхности оболочки.

Были изготовлены две группы макетов ВП, имеющих форму корпуса в виде параллелограмма. Корпуса ВП снабжены упругой оболочкой из материала ПДИ-3АК, имеющей форму параллелограмма (рис. 1). В качестве чувствительных элементов макетов использованы малогабаритные акселерометры, установленные внутри корпуса ВП. Масса ВП для макетов первой группы $M_d = 70$ г, второй группы - $M_d = 50$ г. Размеры макетов первой и второй групп: $a = 68$ мм, $b = 25$ мм, $L = 50$ мм, $H = 33$ мм, $h = 25$ мм.

С учетом параметров макетов, получаем: $G_z \approx 4,5$. Задаваясь значением $\mu \approx 5,5$ МПа, получим: $K_1 \approx 1,68 \cdot 10^6$ Н/м. Пренебрегая, в первом приближении, жесткостью торцевой части оболочки, вследствие малости площади торца, для сдвиговой жесткости получим $K_2 \approx 4,66 \cdot 10^6$ Н/м. Таким образом, $K \approx 1,24 \cdot 10^6$ Н/м. С другой стороны, масса компаунда в объеме корпуса ПГД составляет: $M_k = ab(L-h)\rho_k$, где $\rho_k \approx 850$ кг/м³. Таким образом, $M_k \approx 36,1$ г. Присоединенная масса может быть приближенно определена как $M_s \approx [8\rho_k (ab/\pi)^{0,5}] / 3 \approx 31,7$ г. Расчетная зависимость f_0 от массы ВП (при фиксированных размерах) приведена на рис. 2 (кривая 1).

В результате экспериментальной оценки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) макетов ВП в свободном поле методом сравнения с образцовым гидрофоном определены значения собственной частоты для двух групп макетов различной массы (рис. 2, точки 2,3). Полученные экспериментальные величины удовлетворительно согласуются с теоретическим прогнозом, несмотря на приближительность акустической модели и неизбежный технологический разброс параметров макетов.

Типичная АЧХ макета ВП ($M_d = 70$ г) показана на рис. 3. Из анализа приведенной АЧХ следует, что для диапазона частот $f < f_0$ АЧХ ВП имеет линейный участок с характерным наклоном 6 дБ/октава в область низких частот, определяемый внешней силой F_1 . В диапазоне частот от f_0 до примерно $2f_0$, АЧХ имеет нерегулярный, однако, сравнительно плоский участок за счет компенсации наклона 6 дБ/октава обратным спадом виброизоляционного участка передаточной характеристики системы подвеса. Для диапазона $f \geq 2f_0$, в полном соответствии с теорией виброизоляции [8], происходит "развязывание" колебаний корпуса ВП и компаунда и, вследствие звукопрозрачности последнего, АЧХ ВП вновь приобретает наклон 6 дБ/октава, определяемый теперь внешней силой F_2 и сохраняющийся вплоть до частот собственных резонансов акселерометров (6-8 кГц). Таким образом, резонанс системы подвеса ВП в оболочке из упругого звукопрозрачного компаунда в практически реализуемых ситуациях лежит достаточно высоко (500-600 Гц) и делит рабочий диапазон частот ВП на два линейных по АЧХ участка. Нижняя область частот более пригодна для использования векторных приемников инерционного типа, тогда как верхняя – для векторных приемников силового типа. Однако во многих применениях это создает очевидные неудобства. Обратим, однако, внимание на то, что в соответствии с формулами (2, 4) собственные колебания системы подвеса не должны возбуждаться вовсе при условии:

$$M_d - M_k = 0. \quad (5)$$

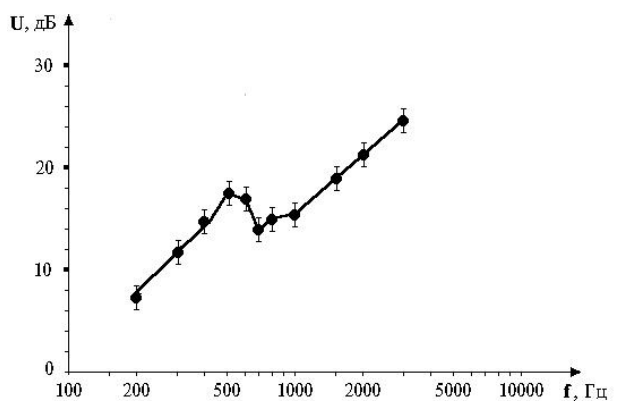


Рис. 3.

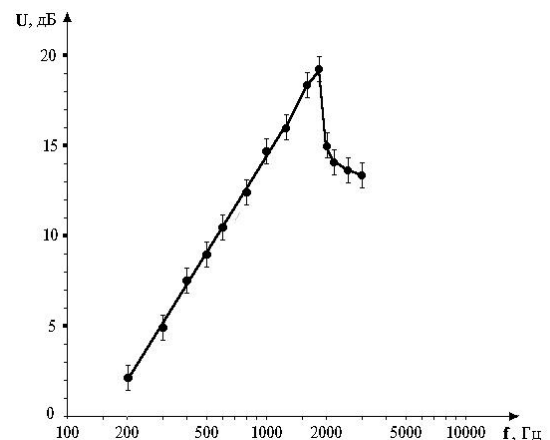


Рис. 4.

Действительно, экспериментальные исследования дополнительно изготовленных макетов ВП третьей группы, размеры которых аналогичны ВП первой группы, а масса согласно условию (5) $M_d \approx 36$ г, показывают (рис. 4), что, хотя вследствие паразитных эффектов резонанс подвеса все же присутствует, он может быть удален в значительно более высокочастотную область (около 2 кГц).

Полученные результаты позволяют не только прогнозировать влияние резонанса подвеса ВП в оболочке из упругого звукопрозрачного компаунда на их акустические характеристики, но и в некоторых пределах оптимизировать параметры ВП в зависимости от требуемого частотного диапазона, что и сделано выше для разрабатываемых ВП инерционного и силового типов.

2. ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ ОБТЕКАНИЯ

Высокий уровень шумов обтекания и вызванных ими вибраций тела ГПБА заставляет применять специальные методы обработки по защите ВП от этих собственных помех носителя. В качестве методов защиты от помех обтекания в разных диапазонах частот могут быть использованы варианты интенсивметрической обработки и виброкомпенсации.

При исследовании интенсивметрической (мультипликативной) обработки в [9] была выявлена возможность существенного подавления помех обтекания векторно-скалярных приемников (20-30 дБ в отношении векторного канала и 3-6 дБ – скалярного канала), что позволяет обеспечить нижнюю границу рабочего диапазона частот применения ВП в ГПБА около 30-40 Гц.

В части исследования принципов виброкомпенсационной защиты для макета 2-компонентного ВП силового типа показано, что для рабочих частот, лежащих выше резонанса подвеса приемника в теле ГПБА, наиболее существенный вклад в уровень помех обтекания может вносить вибрация элементов силовой структуры ГПБА (тросы), связанная с движением ГПБА в водной среде при буксировке. Предлагаемая схема виброкомпенсационной защиты от таких помех включает размещение внутри корпуса двух малогабаритных акселерометров, оси чувствительности которых совпадают с направлениями максимумов чувствительности каналов 2-компонентного приемника градиента давления. При этом сигналы акселерометров после соответствующего

усиления предлагается вычитать из сигналов ВП до обработки. Коэффициент усиления сигнала акселерометров (учитывающий разницу в размерах и конструкции с ВП, а также влияние на воспринимающий элемент ВП присоединенной массы внешней среды) предлагается определить экспериментально в условиях калибровки фрагмента ГПБА, находящегося в жидкости на подвешенном в перевернутом виде над бассейном с водой вибростоле. Проведены предварительные экспериментальные оценки, свидетельствующие о возможности подавления вибрационной помехи на 20-40 дБ.

Помимо решения задачи разделения сигналов, приходящих по левому и правому бортам, при использовании двухканальных ВП для векторной ГПБА принципиально достижимо определение угломестного направления на источник сигнала. Однако в условиях многолучевости непосредственное измерение этих углов прихода с помощью векторно-фазового приема невозможно из-за интерференции сигналов, приходящих под различными углами. Решение этой задачи возможно только путем разделения интерферирующих сигналов по времени или частотному диапазону. Для случая подсветки цели сложными акустическими сигналами предложен способ [10], при котором на выходе каждого из каналов ВП вычисляются свертка принятого и излученного сигналов. Для каждого прихода по соотношению амплитуд каналов ВП вычисляют угломестный угол (пеленг) фронта звуковой волны. Таким образом, удастся объединить разделение сигналов во времени по каждому из каналов ВП с «векторно-фазовой» обработкой огибающей свертки излученного и принятого сигналов. При проведении модельного эксперимента для сложного сигнала с несущей частотой около 500 Гц была показана возможность определения вертикальных углов приходов в условиях многолучевости со случайной среднеквадратической ошибкой около $\pm 2^\circ$. Следует отметить, что взаимно-корреляционная обработка (свертка), представляющая собой для данного вида сигналов согласованную фильтрацию, также значительно повышает защищенность ВП от некоррелированных с зондирующим сигналом помех обтекания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности создания векторно-скалярных приемных элементов с характеристиками, требуемыми для их применения в составе ГПБА.

Исследование поддержано грантом Дальневосточного отделения РАН 13-НТП П-08 и частично грантом МОН РФ 2012-1.1-12-000-1003-010 по ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг."

ЛИТЕРАТУРА

1. *D'Spain G. L., Luby J. C., Wilson G. R., Gramann R. A.* Vector sensors and vector sensor line arrays: Comments on optimal array gain and detection // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2006. – **120**. – P. 171–185.
2. *Preston J. R.* Using Triplet Arrays for Broadband Reverberation Analysis and Inversions // *IEEE J. Ocean. Eng.* – 2007. – **32**(4). – P. 879–896.
3. *Benjamin M. R., Battle D., Eickstedt D., Schmidt H., Balasuriya A.* Autonomous control of an autonomous underwater vehicle towing a vector sensor array // *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 10–14 April 2007*, P. 4562–4569.

4. *Thode A. Skinner J. Scott P., Roswell J.* Tracking sperm whales with a towed acoustic vector sensor // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2010. – **128**(5). – P. 2681-2694.
5. *Белова Н. И., Кузнецов Г. Н.* Сравнение однонаправленного приема сигналов в волноводе с использованием линейных векторно-скалярных и комбинированных антенн // *Акуст. журн.* – 2013. – **59**(2). – С. 255–267.
6. *McConnell J.A.* Analysis of a compliantly suspended acoustic velocity sensor // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2003. – **113**(3). – P.1395–1405.
7. *Соловьев С. Л.* История и перспективы развития морской сейсмологии. – М.: Наука, 1985. С.111–116.
8. *Ляпунов В. Т., Лавендел Э. Э., Шляпочников С. А.* Резиновые виброизоляторы. Справочник. – Л.: Судостроение, 1988. С.10–36.
9. *Korenbaum V. I., Tagiltsev A. A.* Flow noise of an underwater vector sensor embedded in a flexible towed array // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2012. – **131**(5). – P. 3755–3762.
10. *Патент РФ 2221261.* Способ акустического зондирования океана / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Моргунов Ю.В., Каменев С.И., Нужденко А.В., Дзюба В.П. Заявл. 09.07.2002. Опубл. 10.01.2004.