

Оптимизация характеристик приемной антенны профилографа

И.А. Кириченко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы оптимизации характеристик и обоснования направленных свойств приемной антенны параметрического профилографа. Особенностью таких систем является их исполнение в виде отдельного приемного канала, обеспечивающего высокую чувствительность, возможность согласования с приемно-усилительным трактом и наилучшее отношение сигнал-шум. Кроме того, приемная антенна должна обеспечить для заданных габаритных ограничений необходимое угловое разрешение во всем секторе обзора. При решении этих задач было выполнено моделирование направленных свойств антенной приемной антенны. Рассмотрены вопросы оптимизации компоновки антенной системы и применения в качестве элементов приемной антенны цилиндров на поперечном пьезоэффекте. Рассмотрен вопрос устранения влияния толщины заливки приемной антенны на коэффициент прозрачности, что позволяет обеспечить необходимую чувствительность приемной антенны.

Ключевые слова: параметрический профилограф, приемная антенна, характеристика направленности, цилиндрический элемент, чувствительность элемента, коэффициент прозрачности

Введение. Необходимость применения отдельного приемного канала в антенне параметрического профилографа связана с необратимостью нелинейных процессов, лежащих в основе ее принципа действия [1-3]. Как было показано в [4], для обеспечения заданного углового разрешения в поперечной плоскости, равного 3° , сектор обзора 30° в поперечной плоскости в параметрическом профилографе покрывается веером из пяти парциальных характеристик направленности шириной 6° . Ограничения размеров приемной антенны [1-3], не позволяют реализовать в диапазоне разностных частот направленный прием, обеспечивающий оптимальную пространственную фильтрацию. Поэтому приемная антенна в параметрическом профилографе имеет слабую направленность и главным требованием к ее конструкции является обеспечение достаточно высокой чувствительности и возможности согласования с приемно-усилительным трактом, обеспечивающим наилучшее отношение сигнал-шум.

Моделирование характеристик антенны. В качестве базовой апертуры приемной антенны профилографа может быть выбрана прямоугольная форма, где продольный и поперечный размеры определяют направленные свойства в диаметральной и траверзной плоскостях, соответственно. Характеристика направленности (ХН) такой антенны определяется по формуле (1) [5]:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{KL_d}{2} \sin\left(\frac{\pi}{180}\theta\right)\right)}{\frac{KL_d}{2} \sin\left(\frac{\pi}{180}\theta\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{KL_t}{2} \sin\left(\frac{\pi}{180}\varphi\right)\right)}{\frac{KL_t}{2} \sin\left(\frac{\pi}{180}\varphi\right)}. \quad (1)$$

В режиме излучения происходит сканирование ХН в траверзной плоскости в пределах сектора $\pm 15^\circ$ относительно вертикали.

При выборе значений ширины ХН в диаметральной плоскости будем исходить из того, что ширина основного лепестка ХН излучающей антенны в полосе частот равна 4° , а также что минимальная глубина отстояния профилографа от дна составляет $h_{\min}=5$ м. Область дна, озвучиваемая излучающей антенной, должна попадать в раствор основного лепестка ХН приемной антенны. Тогда получаем следующее условие для верхней грани множества значений ширины ХН приемной антенны (2) [5]:

$$h_{\min} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_d}{2}\right) > 2 \cdot h_{\min} \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_n}{2}\right) + \frac{L_n + L_d}{2} + \Delta, \quad (2)$$

где Δ - величина зазора между приемной и излучающей антеннами, θ_d, θ_n - ширина главного лепестка ХН приемной и излучающей антенн в диаметральной плоскости, соответственно.

Выбираем $L_d = 0,3$ м. Расчет по формуле (1) для этого значения L_d дает значение $\theta_d = 16^\circ$, что удовлетворяет условию (2).

С целью оптимизации компоновки антенной системы профилографа [6-10], в качестве элементов приемной антенны рассмотрены цилиндры на

поперечном пьезоэффекте, которые имеют наилучшие показатели чувствительности на радиальной моде колебаний [7].

Чувствительность одного элемента, работающего на частотах ниже резонанса без учета демпфирующего действия среды излучения и элементов конструкции антенны, можно определить по формуле (3) [5]:

$$\gamma = (d_{31}/\epsilon_{33}^T) \cdot a, \quad (3)$$

где d_{31} - пьезомодуль на поперечном пьезоэффекте, ϵ_{33}^T - диэлектрическая проницаемость свободного пьезоэлемента, a – средний радиус цилиндра.

При выборе активного материала преобразователя будем рассматривать составы с высоким значением параметра приема d_{31}/ϵ_{33}^T [5].

Одним из таких составов является ЦТС-19М. Расчет чувствительности для отдельного элемента приемной антенны, проведенный в [4] дает значение 85 мкВ/Па.

Использование полой конструкции приемной антенны требует оценки максимальных значений сжимающих механических напряжений, возникающих в пьезокерамических материалах под воздействием гидростатического давления. Оценить эту величину можно по формуле (4) [5]:

$$T = \frac{a}{2d} P, \quad (4)$$

где a – средний радиус цилиндра, d – толщина стенки цилиндра, P – гидростатическое давление на рабочей глубине.

В нашем случае $T \approx 4,4 \cdot 10^8$ Па, что значительно меньше предельных значений для пьезокерамических материалов $T_{max} = 10^9$ Па.

Вместе с тем риск разрушения полых цилиндров под действием гидростатического давления существует, и связано это, прежде всего с неоднородностью пьезокерамического материала антенны, неидеальностью

геометрической формы активных элементов. Значительно снизить риск разрушения пьезоцилиндров антенны можно, проводя входной контроль геометрических и электрофизических характеристик пьезоэлементов [6].

Результаты расчета ХН приемной антенны профилографом представлены на рис. 1.

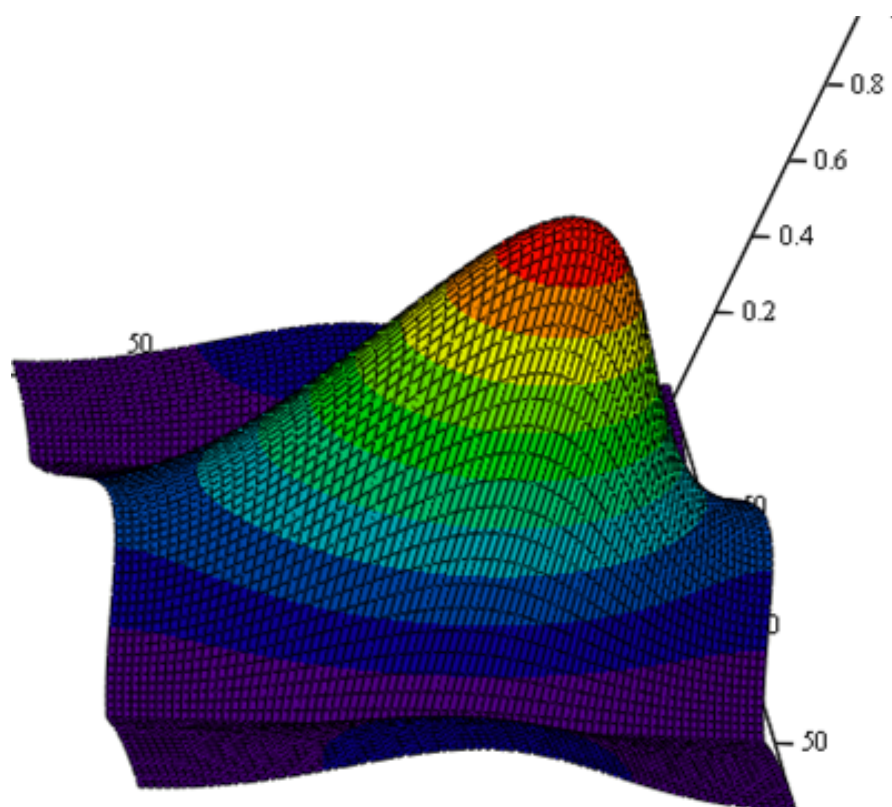


Рис. 1 – Характеристика направленности приемной антенны

Определение коэффициента прозрачности антенны. Из теории акустики известно [1, 7, 8], что в зоне длиной порядка длины волны излучения вблизи антенны находится волновая зона, в которой все частицы среды движутся вместе с колеблющимся материалом. Поэтому для устранения влияния заливки ее толщина не должна превышать половину длины волны. В данном случае при центральной частоте излучения 250 кГц:

$$h < \frac{\lambda}{2} = 0,003 \text{ м.}$$

То есть заливка антенны не окажет влияние на параметры излучения, если ее толщина не будет превышать 3 мм.

При увеличении толщины свыше длины волны, начинают действовать законы геометрической акустики, описывающие прохождение волн через границу двух сред. Это приведет не только к ухудшению характеристик излучения вследствие коэффициента прохождения меньше 1 и образования поперечной волны в твердом материале заливки антенны, но и к преломлению волн при сканировании. Если же заливка криволинейна и ее толщина больше длины волны, преломление акустических волн на такой границе приведет к расширению диаграммы направленности и ее сдвигу относительно направления излучения.

Поскольку граница раздела «заливка-вода» будет расположена в ближнем поле излучающей антенны, провести точный расчет не представляется возможным. Оптимальной же толщиной слоя заливки над излучающей керамикой является четверть длины волны, то есть 1,5 мм. Это обуславливается волновой зависимостью коэффициента прозрачности тонкого переходного слоя t_p . Для расчета воспользуемся выражением (5)[5]:

$$t_p = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{Z_2}{2Z_1}\right) \sin^2\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda}\right) + \cos^2\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda}\right)}} \quad (5)$$

где d – толщина слоя заливки, λ – длина волны звука в материале заливки.

На рис.2 приведена зависимость коэффициента прозрачности от волновой толщины слоя заливки – отношения d/λ .

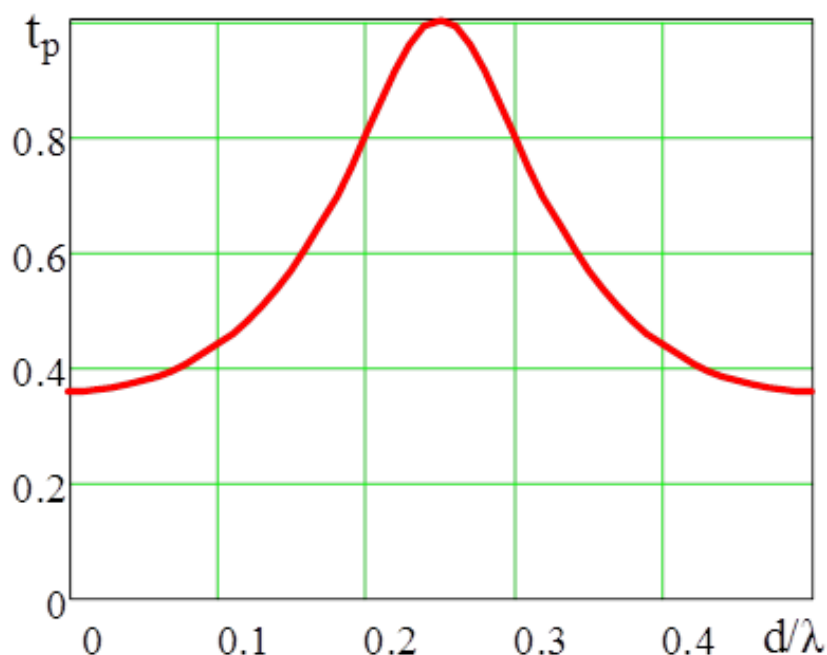


Рис.2 – Зависимость коэффициента прозрачности от толщины заливки

Выводы. Ширина основного лепестка ХН приемной антенны в траверсной плоскости не должна быть меньше заданной в рабочей полосе частот. В то же время, расширение основного лепестка ХН, как известно, приводит к увеличению уровня акустических помех. Выбор ширины основного лепестка в траверсной плоскости равной 32° , учитывает некоторое расширение характеристики направленности излучающей антенны при ее компенсации на углы $\pm 15^\circ$.

Зависимость коэффициента прозрачности от толщины заливки в длинах волн на рис. 2 показывает, что максимум коэффициента прозрачности приходится на четверть длины волны, минимум – на половину длины волны. При большей толщине данный параметр теряет смысл, поскольку переходной слой уже не является тонким. Исходя из этого, можно сделать вывод, что оптимальная толщина слоя заливки для частоты излучения 250 кГц составляет 1,5мм и не должна превышать 3мм.

Литература

1. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990. – 275 с.
 2. Kozaczka E., Grelowska G., Kozaczka S., Szymczak W. Processing data on sea bottom structure obtained by means of the parametric sounding // Polish maritime research 4(76) 2012 Vol 19; pp. 3-10.
 3. Schneider von Deimling J., Held Ph., Feldens P., Wilken D. Effects of using inclined parametric echosounding on sub-bottom acoustic imaging and advances in buried object detection // Geo-Mar Lett (2016) 36; pp.113–119.
 4. Кириченко И.А., Старченко И.Б., Слуцкий Д.С., Сахаров В.Л. Мониторинг ледовой обстановки с использованием приборов на основе нелинейной акустики // Инженерный вестник Дона, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3484
 5. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение. – 1973 - 275с.
 6. Рабинович А.Г., Рубанов Л.А. Технология производства гидроакустической аппаратуры. – Л.: Судостроение. – 1973. – 220с.
 7. Справочник по гидроакустике/ А.П. Евтютов, А.Е. Колесников, Е.А.Корепин и др. –Л.: Судостроение, 1988. –552 с.
 8. Тарасов С.П., Тимошенко В.И., Воронин В.А., Кириченко И.А., Пивнев П.П., Солдатов Г.В., Волощенко А.П., Эсси-Эзинг А.С., Обыденная В.А., Франчук Д.А. Измерение фазочастотной характеристики приемной антенны многолучевого эхолота в условиях гидроакустического бассейна // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227
 9. Кириченко И.А. Адаптивные гидроакустические средства мониторинга морских акваторий // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – №8 (193). – С.63 - 69
-

10. Кравчук Д.А., Пивнев П.П. Результаты экспериментальных исследований влияния электроакустических характеристик пьезоэлементов антенн на направленные свойства гидроакустических систем дистанционного зондирования шельфа океана // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Материалы XIII Международного научно-практического семинара. Таганрог: Изд-во ГТИЮФУ, 2012. - С. 101-105.

References

1. Novikov B.K., Timoshenko V.I. Parametricheskie anteny v gidrolokacii [Parametric antennas in sonar]. L.: Sudostroenie, 1990. 275p.
 2. Kozaczka E., Grelowska G., Kozaczka S., Szymczak W. Polish maritime research 4(76). 2012. Vol. 19. pp. 3-10.
 3. Schneider von Deimling J., Held Ph., Feldens P., Wilken D. Geo-Mar Lett (2016) 36:pp. 113-119.
 4. Kirichenko I.A., Starchenko I.B., Sluckij D.S., Saharov V.L. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3484
 5. Smaryshev M.D. Napravlenost' gidroakusticheskikh antenn [Directivity of hydroacoustic antennas]. L.: Sudostroenie. 1973. 275 p.
 6. Rabinovich A.G., Rubanov L.A. Tehnologija proizvodstva gidroakusticheskoy apparatury [Production technology of sonar equipment]. L.: Sudostroenie. 1973. 220 p.
 7. Evtjutov A.P., Kolesnikov A.E., Korepin E.A. idr. Spravochnik po gidroakustike [Handbook of hydroacoustics]. L.: Sudostroenie. 1988. 552 p.
 8. Tarasov S.P., Timoshenko V.I., Voronin V.A., Kirichenko I.A., Pivnev P.P., Soldatov G.V., Voloshhenko A.P., Jessi-Jezing A.S., Obydannaja V.A., Franchuk D.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227
-



9. Kirichenko I.A. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. Taganrog: Izd-voJuFU, 2017. №8 (193). pp.63-69.

10. Kravchuk D.A., Pivnev P.P. Materialy XIII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminar: Praktika i perspektivy razvitija partnerstva v sfere vysshej shkoly. Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2012. - pp. 101-105.