

## Увеличение шага гидроакустической параметрической передающей антенной решетки путем осевого чересстрочного сдвига линеек на полшага

*И.И. Турулин*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Параметрические гидроакустические антенные решетки, как и классические, обычно имеют шаг, равный половине длины волны. В статье рассмотрены решетки, у которых элементы столбцов запараллелены. Из-за увеличения шага решетки возникают выбросы на характеристике направленности. При сдвиге четных или нечетных строк на полшага решетки эти выбросы уменьшаются. Для решетки с шагом, равным длине волны, сдвигом строк и направлением лучей не более 25 градусов в обе стороны относительно нормали к плоскости антенны относительный уровень выбросов (относительно главного максимума) благодаря сдвигу обычно уменьшается более чем вдвое. В результате увеличения шага решетки сокращается число элементов решетки и усилителей мощности. Приводятся зависимости относительного уровня выбросов от направления луча и размера элементов.

**Ключевые слова:** гидроакустическая параметрическая антенная решетка, узкий сектор обзора, параметрический, антенна, нелинейный, линейка, антенная решетка, шаг решетки, характеристика направленности, выброс, уровень выбросов, увеличение шага решетки.

В современной гидроакустической технике применяются параметрические антенны [1, 2], в том числе антенные решетки [3], работающие благодаря нелинейности водной среды, что позволяет уменьшить габариты антенных систем, обеспечивая ширину характеристики направленности, недостижимую для классических антенн таких же размеров. Обычные антенные решетки позволяют управлять характеристиками направленности (ХН) [4, 5] в режимах излучения и приёма акустических или электромагнитных волн, гидроакустические параметрические – только в режиме излучения [3]. Гидролокаторы используются для отображения обстановки в водной среде, в медицинской диагностике и других приложениях. Следовательно, данное исследование актуально.

Очевидно, что в случае увеличения шага решетки (при постоянном размере антенны) будет меньше антенных элементов, а значит, меньше электрических передающих каналов, т.е. сокращаются аппаратные затраты.

---

Верхняя граница шага решетки выбирается, исходя из некоррелированности сигналов на ее соседних элементах [4]. Это условие выполняется для полуволновой решетки ( $d = 0,5\lambda$ , где  $d$  – шаг решетки,  $\lambda$  – длина волны). Поэтому применяются решетки как правило с таким шагом. Его увеличение приводит к появлению выбросов ХН. Эти выбросы для классических антенн можно снизить с помощью осевого чересстрочного сдвига линеек на полшага [6].

В данной статье приведены результаты аналогичного исследования для гидроакустической параметрической антенной решетки.

Если надо получить веер ХН, т.е. набор лучей в одной плоскости, элементы антенны обычно соединяют параллельно по одной координате (рис. 1, *а*) [6]. При чересстрочном смещении линеек с запараллеленными элементами на полшага решетки (рис. 1, *б*) набег фазы по оси  $x$  (при изменении  $n$ ) сглаживается, что ведет к снижению выбросов ХН [6].

В [6] выполнены расчеты ХН в режиме приема для геометрии антенн рис. 1, *а, б*. Рассматривалась приемная решетка без фокусирования, что соответствует плоскому фронту волны в пределах антенны. В [6] ХН была рассчитана суммированием сигналов на элементах антенны методом собственных функций (см., например, [7]). В [8] таким методом получена ХН интерполяционного формирователя луча (интерполяция применялась для получения значений между отсчетами цифровых сигналов). Для рис. 1, *а* [6]

$$R_a(\Theta, \varphi) = \left| \frac{1}{M N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp \left( -j \frac{2\pi}{\lambda} n d_x (\sin \Theta - \sin \Theta_0) + m d_y (\sin \varphi - \sin \varphi_0) \right)^2 \right|, \quad (1)$$

где  $\Theta$  и  $\varphi$  – углы в плоскостях  $zOx$  и  $zOy$  соответственно (см. рис. 1 и подрисуночную надпись),  $(\Theta_0, \varphi_0)$  – направления излучаемого луча,  $M$  и  $N$  – количество элементов решетки по вертикали и горизонтали соответственно:  $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , (рис. 1, *а, б*);  $\lambda$  – длина волны;  $d_x$  и

$d_y$  – расстояния между элементами (шаги) решетки соответственно по осям  $x$  и  $y$  (рис. 1, *а*, *б*), расположение которых показано на рис. 1, *а*, *б* внизу слева.

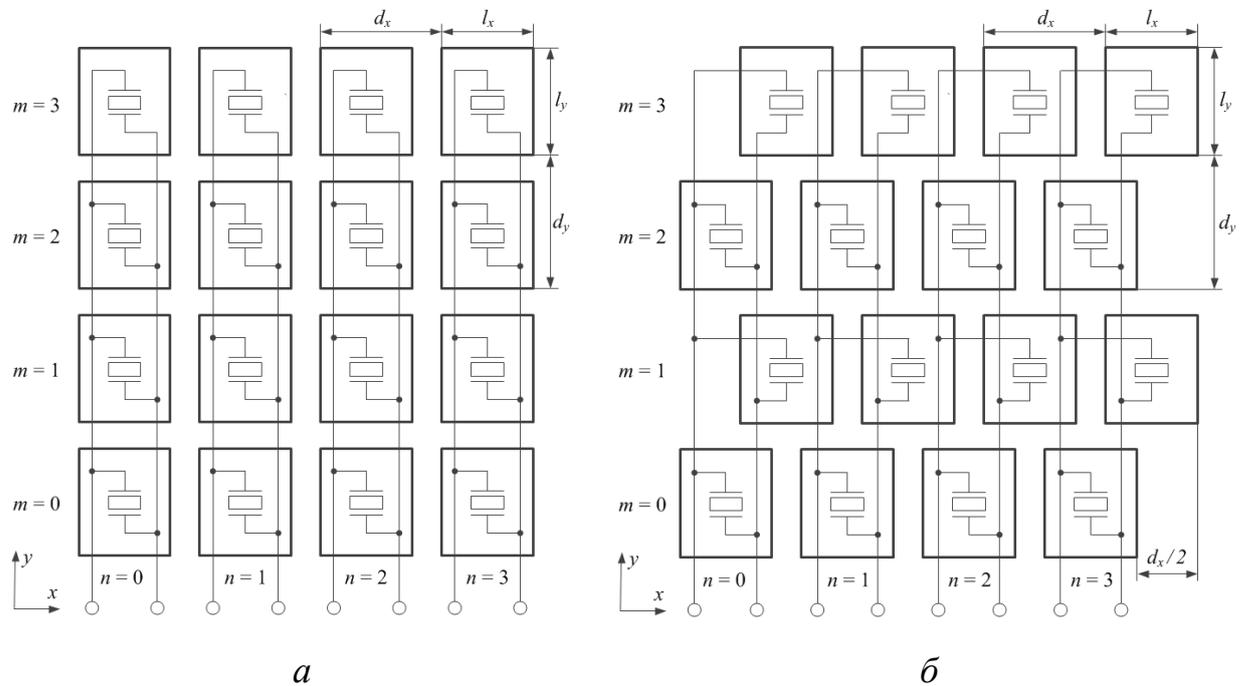


Рис. 1. Антенные решетки размером  $4 \times 4$  с обычным расположением элементов (*а*) и чересстрочным сдвигом линеек на полшага (*б*); вид со стороны излучающей поверхности; оси  $x$  и  $y$  показаны слева внизу каждого рисунка; ось  $z$  не показана; оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$  образуют правую тройку векторов

Для решетки с чересстрочным сдвигом элементов (рис. 1, *б*) [6]

$$R_{\sigma}(\Theta, \varphi) = \left| \frac{1}{M N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp \left( -j \frac{2\pi}{\lambda} \left[ n d_x - \frac{d_x}{2} (m \bmod 2) \right] (\sin \Theta - \sin \Theta_0) + m d_y (\sin \varphi - \sin \varphi_0)^2 \right) \right|, \quad (2)$$

где  $\bmod$  – операция вычисления остатка от деления нацело первого операнда на второй.

Согласно теореме о перемножении ХН, учет ХН элементов решетки производился умножением формул (1), (2) на ХН прямоугольного элемента антенны в бесконечном бесконечно твердом экране [9, 10]:

$$R_e(\Theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{\pi l_x}{\lambda} \sin \Theta\right) \sin\left(\frac{\pi l_y}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{\pi l_x}{\lambda} \sin \Theta \frac{\pi l_y}{\lambda} \sin \varphi}. \quad (3)$$

ХН линейной (классической) антенны будет одна и та же как для режима приема, так и для режима передачи. Для параметрической антенны ХН будут разными из-за того, что свойства среды зависят от звукового давления, которое будет разным в режимах излучения и приема.

В предположении, что ХН передающей параметрической антенны – квадрат ХН классической антенны, получим ХН параметрических антенн (формулы (3) и (4) для рис. 1, *a* и *б* соответственно):

$$R_{pa}(\Theta, \varphi) = R_a^2(\Theta, \varphi) R_e^2(\Theta, \varphi), \quad (4)$$

$$R_{pb}(\Theta, \varphi) = R_b^2(\Theta, \varphi) R_e^2(\Theta, \varphi). \quad (5)$$

На рис. 2 представлена ХН 16×16-элементной антенны с шагом  $d_x = d_y = \lambda$  без сдвига элементов (рис. 1, *a*), формула (4);  $M = N = 16$ ,  $\Theta_0 = 20^\circ$ , 10%-е межэлементные промежутки, т.е.  $d_x - l_x = d_y - l_y = 0,1d_x = 0,1d_y$ . На рис. 3 изображена ХН антенны с чересстрочным сдвигом элементов на  $d_x/2$  (рис. 1, *б*), формула (5), остальные параметры такие же, как для рис. 2.

Положение выбросов ХН (рис. 2, 3) зависит от  $\Theta_0$ . Высота выбросов (и наибольший угол луча при допустимом уровне выброса) определяются величиной  $\Theta_0$  (не отношением  $\Theta_0$  к ширине ХН). На рис. 2, 3 рост уровня ХН вблизи  $\varphi = \pm 90^\circ$  в направлении  $\Theta_0$  является следствием межэлементных промежутков. На рис. 2 заметен аналогичный (вблизи  $\varphi = \pm 90^\circ$ ), но меньший рост уровня ХН в направлении выброса (по  $\Theta$ ).

При смене знака направления луча  $\Theta_0$  графики (рис. 2, 3) развернутся на  $180^\circ$  вокруг своей вертикальной оси, выходящей из точки  $\Theta_0\varphi$  вверх перпендикулярно плоскости рисунков.

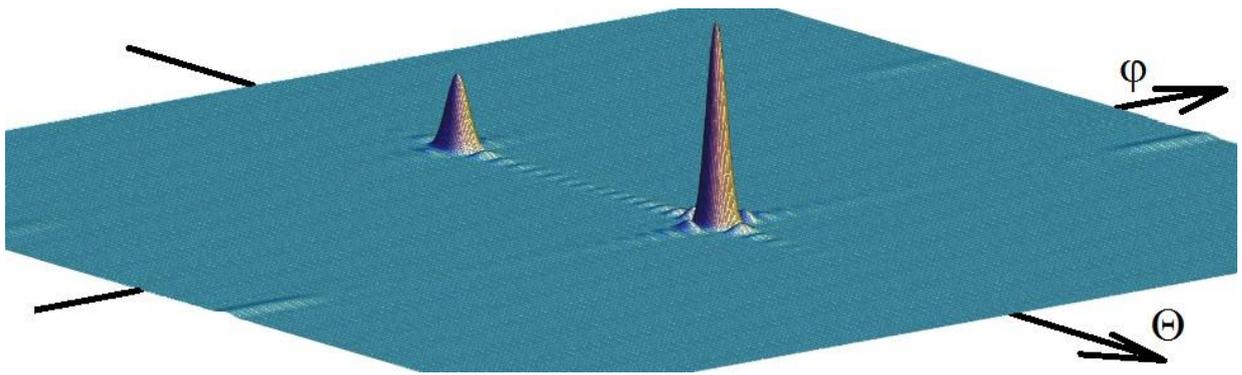


Рис. 2. ХН антенны  $R_{pa}(\Theta, \varphi)$  (рис. 1, *a* – без сдвига линеек) для  $\Theta_0 = 20^\circ$ ,  
 $M = N = 16$ ,  $d_x = d_y = \lambda$ ,  $d_x - l_x = d_y - l_y = 0,1d_x = 0,1d_y$

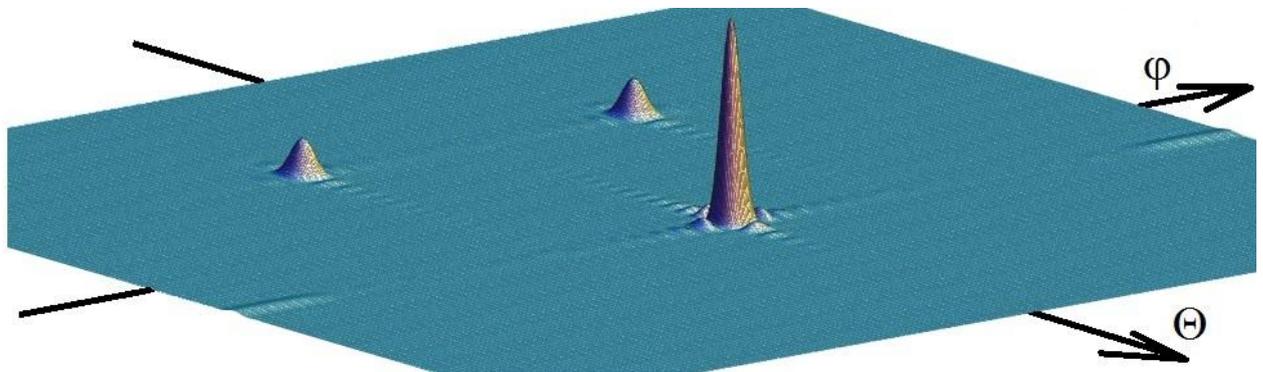


Рис. 3. ХН антенны  $R_{pb}(\Theta, \varphi)$  (рис. 1, *b* – со сдвигом линеек) для  $\Theta_0 = 20^\circ$ ,  
 $M = N = 16$ ,  $d_x = d_y = \lambda$ ,  $d_x - l_x = d_y - l_y = 0,1d_x = 0,1d_y$

На рис. 4, *a, б* приведены зависимости относительного выброса  $\Delta_{отн}$  (относительно главного максимума ХН) от  $\Theta_0$  для  $d/\lambda = 1$  (*a*) и от относительного размера элемента  $d_x/\lambda = d_y/\lambda$  для  $\Theta_0 = 10^\circ$  (*б*),  $M = N = 16$ .

Ненулевой уровень  $\Delta_{отн}$  в левой части графиков (рис. 4, *a*) – следствие межэлементных промежутков. Подробные объяснения по этому поводу для классической линейной (непараметрической) решетки для  $d_x/\lambda = d_y/\lambda = 1$  даны в [6]; для рассматриваемой модели параметрической антенны при прочих равных условиях  $\Delta_{отн}$  равны квадрату  $\Delta_{отн}$  для классической антенны. На рис. 4, *б* аргумент графика ограничен слева значением  $d_x/\lambda = d_y/\lambda = 0,85$

включительно, поскольку при меньших значениях  $d_x/\lambda = d_y/\lambda$  выброс на рис. 2, 3 уходит за плоскость  $\Theta = -90^\circ$  (подробно см. [6]).

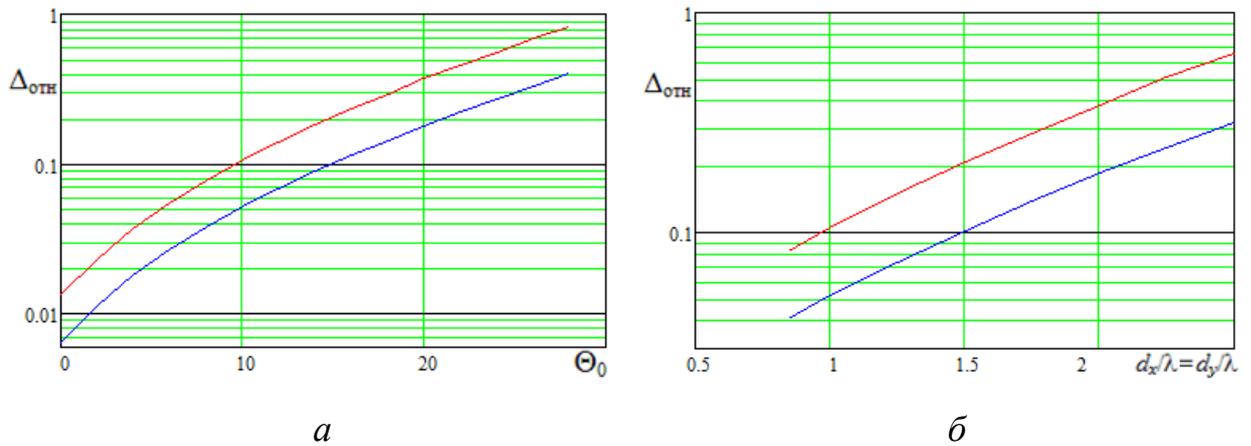


Рис. 4. Зависимость относительного выброса  $\Delta_{\text{отн}}$  (относительного главного максимума ХН), вызванного ростом шага решетки, от направления луча  $\Theta_0$  в градусах для  $d_x/\lambda = d_y/\lambda = 1$  (а) и от относительного размера элемента  $d_x/\lambda = d_y/\lambda$  для  $\Theta_0 = 10^\circ$  (б).  $M = N = 16$ .  $(d_x - l_x)/d_x = (d_y - l_y)/d_y = 0,1$ . Красный цвет – обычное расположение элементов антенны (рис. 1, а), синий – с чересстрочным сдвигом линеек на полшага решетки (рис. 1, б)

В [6] говорится, как для антенны (рис. 1) можно уменьшить боковые лепестки (осцилляции) ХН путем введения амплитудных распределений в электрические каналы по оси  $x$  и уменьшением площади элемента антенны по оси  $y$  (рис. 1). В математической модели параметрической антенны, приводимой в данной статье, характеристики направленности классических антенн, а значит их осцилляции, возводятся в квадрат: при отсутствии межэлементных промежутков максимальный боковой лепесток ХН непараметрической антенны составляет 22%, а его квадрат – чуть более 4,8%, и уменьшать осцилляции обычно не требуется. Выбросы (не лепестки) здесь и в [6] имеют другую природу (следствие увеличения  $d_x/\lambda = d_y/\lambda$ ) и их практически нельзя уменьшить с помощью амплитудного распределения.

Расчеты для  $M = N = 8$  и  $M = N = 16$ ,  $\Theta_0 = 5-18^\circ$ ,  $d_x = d_y = \lambda$  показали, что коэффициент снижения благодаря чересстрочному сдвигу линеек почти не зависит (отличия менее 10%) от  $\Theta_0$ ,  $M$ ,  $N$  и составляет примерно 2,4 для случая отсутствия межэлементных промежутков и примерно 2 – для 10%-х промежутков; относительное значение выброса – не более 0,1.

Таким образом, чересстрочный сдвиг линеек позволяет снизить выбросы ХН, возникающие в результате увеличения шага решетки. Натурные испытания гидроакустической параметрической антенной решетки подтвердили это.

Благодаря увеличению шага решетки (при заданной ширине ХН) сокращается число элементов антенны, а значит, число передающих каналов, в том числе усилителей мощности, т.е. снижаются аппаратные затраты.

Относительно приемлемый уровень выбросов для ряда задач может обеспечиваться при секторе обзора от  $-25^\circ$  до  $25^\circ$  (область изменения направлений оси луча относительно нормали к плоскости решетки).

В приводимой математической модели использовалась формула ХН элемента антенной решетки в бесконечном бесконечно жестком экране. При разработке аппаратуры рекомендуется для повышения точности результатов учитывать конечную жесткость антенны вокруг элемента решетки [9, 10], либо применять программы, в которых этот эффект учтен.

### Литература

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов–на–Дону: Ростиздат, 2004. 416 с.
2. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990. 256 с.

3. Кириченко И.А. Излучающая антенная решетка профилографа // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5318.

4. Самойлов Л.К. Электронное управление характеристиками направленности антенн. Л.: Судостроение, 1987. 280 с.

5. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays. SciTech Publishing. 2011. 686 p.

6. Турулин И.И. О возможности увеличения шага антенной решетки узкосекторных локаторов благодаря осевому сдвигу четных или нечетных линеек на полшага // Инженерный вестник Дона. 2020. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6502.

7. Hamming R.W. Digital Filters. Prentice-hall, Inc., 1977. 226 p.

8. Заковоротнов Е.А., Турулин И.И. Метод расчета интерполяционных формирователей ДН // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1989. №7. С. 81-82.

9. Орлов Л.В., Шабров А.А. Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.

10. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1972. 275 с.

### References

1. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy. [Parametric sonar system]. Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2004. 416 p.

2. Novikov B.K., Timoshenko V.I. Parametricheskie anteny v gidrolokacii. [Parametric sonar antennas]. L.: Sudost.roenie, 1990. 256 p.

3. Kirichenko I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5318.



4. Samojlov L.K. Jelektronnoe upravlenie harakteristikami napravlenosti antenn [Electronic control of antennas directivity characteristics]. L. Sudostroenie, 1987. 280 p.
5. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays. SciTech Publishing, 2011. 686 p.
6. Turulin I.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6502](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6502).
7. Hamming R.W. Digital Filters. Prentice-hall, Inc., 1977. 226 p.
8. Zakovorotnov E.A., Turulin I.I. Izvestija vuzov. Radioelektronika. 1989. №7. pp. 81-82.
9. Orlov L.V., Shabrov A.A. Gidroakusticheskaja apparatura rybopromyslovogo flota [Hydroacoustic equipment of the fishing fleet]. L. Sudostroyeniye, 1987. 224 p.
10. Smaryshev M.D. Napravlennost' gidroakusticheskikh antenn [Directivity of hydroacoustic antennas]. L. Sudostroenie, 1973. 275 p.