

## О возможности увеличения шага антенной решетки узкосекторных локаторов благодаря осевому сдвигу четных или нечетных линеек на полшага

*И.И. Турулин*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Классические гидроакустические или радиочастотные антенные решетки обычно имеют шаг, равный половине длины волны. В статье рассмотрены решетки, у которых столбцах элементы столбцов запараллелены. Увеличение шага решетки при сохранении приемлемого значения выбросов характеристики направленности возможно благодаря сдвигу четных или нечетных строк на полшага решетки. Для решетки с шагом, равным длине волны, сдвигом строк и направлением лучей не более 15 градусов в обе стороны относительно нормали к плоскости антенны относительный уровень выбросов характеристики направленности (относительно главного максимума) благодаря сдвигу уменьшается примерно в 1,5 раза. В результате увеличения шага решетки сокращается число элементов решетки, приемных каналов и усилителей мощности. Приводятся зависимости относительного уровня выбросов от направления луча и размера элементов.

**Ключевые слова:** антенна, линейка, решетка, шаг решетки, шаг линейки, характеристика направленности, уровень боковых лепестков, узкий сектор обзора, увеличение шага решетки.

В различной аппаратуре применяются антенные решетки [1-3], позволяющие программно управлять характеристиками направленности (ХН) в режиме излучения и приёма акустических [1, 2, 4] или электромагнитных [3] волн. Это гидро- и радиолокаторы (пассивные и активные), предназначенные, в частности, для отображения обстановки в толще воды, воздушном пространстве, для медицинской диагностики и др. Из сказанного следует актуальность исследования.

Очевидно, что чем больше шаг решетки при заданных размерах апертуры (раскрыва), тем в общем случае меньше необходимое число электрических приемных и передающих каналов, т.е. сокращаются аппаратные и вычислительные затраты. Однако при увеличении шага решетки на ХН появляются дополнительные выбросы.

Цель исследования, результаты которого приводятся в данной статье – доказать возможность увеличения шага антенной решетки благодаря осевому

---

сдвигу четных или нечетных линеек на полшага, позволяющему снизить выбросы ХН.

В статье рассматривается гидроакустическая антенна решетка, но результаты могут быть применены и для радиочастотных решеток.

Как известно [5], шаг антенной решетки выбирается исходя из условия некоррелированности сигналов на ее соседних элементах. Это будет выполняться для полуволновой решетки ( $d/\lambda = 0,5$ , где  $d$  – шаг решетки,  $\lambda$  – длина волны). Обычно используются решетки именно с таким шагом. Его можно уменьшить, но это ведет к увеличению аппаратных и программных затрат. Увеличение шага ведёт к появлению дополнительных выбросов ХН.

Рассмотрим случай, когда элементы антенной решетки запараллелены по одной координате, а по другой – нет (рис. 1, *a*). Такая ситуация характерна для веера ХН, т.е. совокупности лучей в одной плоскости. Если четные или нечетные группы запараллеленных элементов сместить на половину шага решетки (рис. 1, *b*), фазовый набег по оси  $x$  (при изменении  $n$ ) должен стать более плавным, а уровень выбросов ХН – снизиться.

Для проверки этого предположения были проведены соответствующие расчеты. Фронт волны, падающей на антенну (или излучаемый антенной), считался плоским (антенная решетка без фокусирования). Расчет ХН дискретной антенны производился путем суммирования сигналов от элементов антенны согласно методу собственных функций, приводимому, в частности, в [6]; реализация этого метода для интерполяционных формирователей ХН (для получения промежуточных значений дискретных сигналов используется интерполяция) изложена в [7–9]. Согласно методу, на каждом элементе антенны задавалась собственная функция вида  $e^{j\omega t}$ , где  $j$  – мнимая единица,  $\omega$  – круговая частота,  $t$  – время. Далее сигналы суммировались синфазно для заданного направления луча  $(\Theta_0, \varphi_0)$ . Для решетки с запараллеленными элементами столбцов  $\varphi_0 = 0$ . После

---

суммирования принимаемых сигналов в формирователе ХН получалась также собственная функция с коэффициентом, зависящим от  $\Theta, \varphi$ . Модуль этого коэффициента есть ХН антенны  $R(\Theta, \varphi)$ .

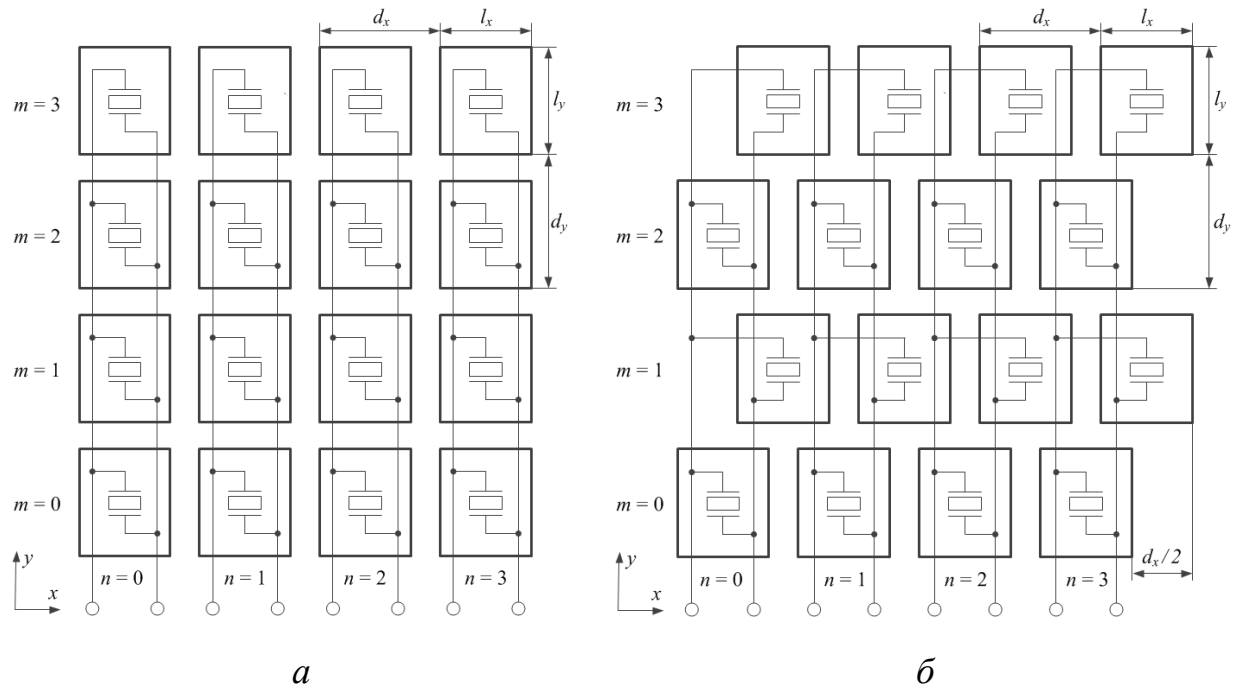


Рис. 1. 16-элементная антенная решетка с традиционным расположением элементов (а) и со сдвигом соседних линеек на полшага (б)

Для антенной решетки без сдвига соседних линеек (рис. 1, а)

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

где  $M$  и  $N$  – число элементов антенны 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  $d_y$  – шаг решетки по оси  $x$  и  $y$  соответственно (рис. 1, а, б). Расположение осей  $x$  и  $y$  показано на рис. 1, а, б слева внизу.

Для антенной решетки со сдвигом соседних линеек (рис. 1, б)

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

где  $\text{mod}$  – операция вычисления остатка от деления нацело ( $a \bmod b$  – остаток от деления нацело  $a$  на  $b$ ).

Для учета направленности элементов антенны согласно теореме о перемножении формулы (1), (2) умножалась на ХН прямоугольного элемента антенны в бесконечном бесконечно твердом экране [10, 11]:

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

Расчёты подтвердили возможность снижения уровня выбросов ХН благодаря осевому сдвигу четных или нечетных линеек на полшага. На рис. 2 приведена ХН 16x16-элементной антенной решетки с шагом  $\lambda$  ( $d_x/\lambda = d_y/\lambda = 1$ ) без сдвига элементов (рис. 1, а);  $M = N = 16$ ,  $\Theta_0 = 10^\circ$ , межэлементные промежутки составляют 10% от шага решетки, т.е.  $(d_x - l_x)/d_x = (d_y - l_y)/d_y = 0,1$ . На рис. 3 приведена ХН решетки со сдвигом  $d_x/2$  (рис. 1, б), остальные параметрами такие же, как для рис. 2.

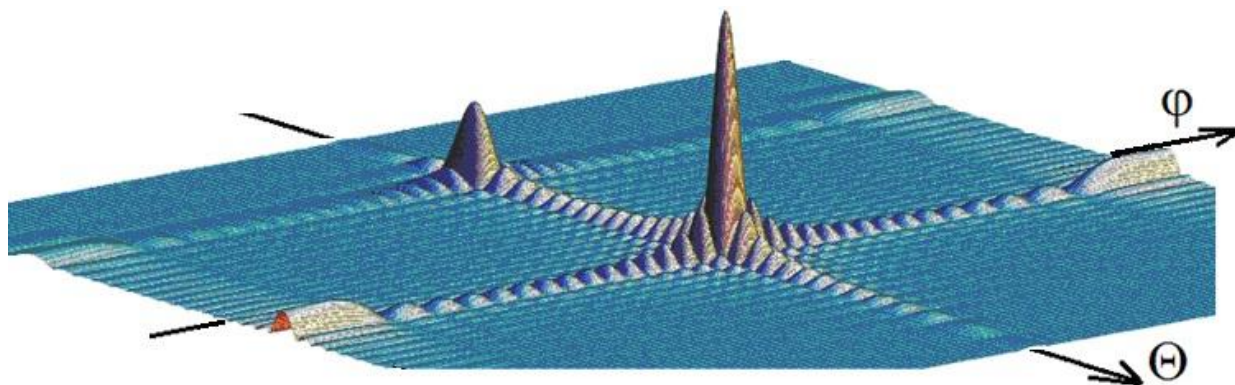


Рис. 2. ХН антенны  $R(\Theta, \varphi)$  (рис. 1, а – без сдвига линеек) для  $M = N = 16$ ,

$$d_x/\lambda = d_y/\lambda = 1, (d_x - l_x)/d_x = (d_y - l_y)/d_y = 0,1$$

Положение выбросов на рис. 2, 3 зависит от  $\Theta_0$ . Расчеты для  $M = N = 8$  и  $M = N = 16$ ,  $\Theta_0 = 5-18^\circ$ ,  $d_x = d_y = \lambda$  показали, что коэффициент уменьшения выбросов благодаря сдвигу линеек решетки практически не зависит (отличия менее 5%) от  $\Theta_0$ ,  $M$  и  $N$  и составляет 1,58 без межэлементных промежутков и

1,43 для 10%-х промежутков. Уровень выбросов, а также максимальный угол луча при приемлемом уровне выброса, определяются абсолютным значением  $\Theta_0$ , а не отношением  $\Theta_0$  к ширине ХН.

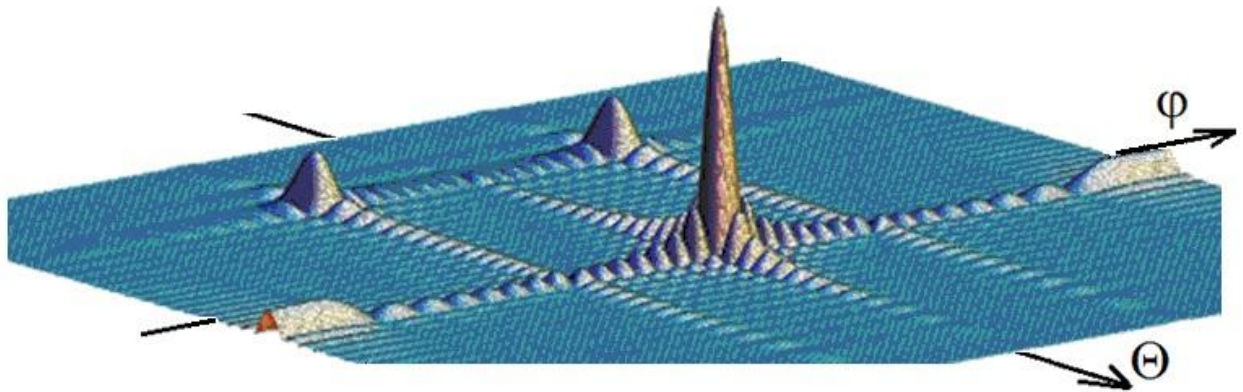


Рис. 3. ХН антенны  $R(\Theta, \varphi)$  (рис. 1, б – со сдвигом линеек) для  $M = N = 16$ ,  
 $d_x / \lambda = 1, (d_x - l_x) / d_x = (d_y - l_y) / d_y = 0,1$

При направлении луча  $\Theta_0 = -10^\circ$  поверхности (рис. 2, 3) развернутся на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси (эта ось выходит из точки  $\Theta_0\varphi$  вверх перпендикулярно плоскости графиков).

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

Сравнительно высокий уровень выброса (рис. 4, а) при малых углах луча – следствие межэлементных промежутков; в модели без межэлементных промежутков собственно выброс при  $\Theta_0 = 0^\circ$  исчезнет, и оба графика при  $\Theta_0 = 0^\circ$  окажутся в окрестности нуля: будут только затухающие осцилляции ХН синфазного раскрыва. Например, при отсутствии сдвига линеек уровень этих осцилляций (амплитуда лепестков, ближайших к  $\Theta = \pm 90^\circ$ ) составляет 0,021. Заметим, что на рис. 2, 3 выбросы такой же природы (вследствие межэлементных промежутков) наблюдаются при  $\varphi = \pm 90^\circ$ .

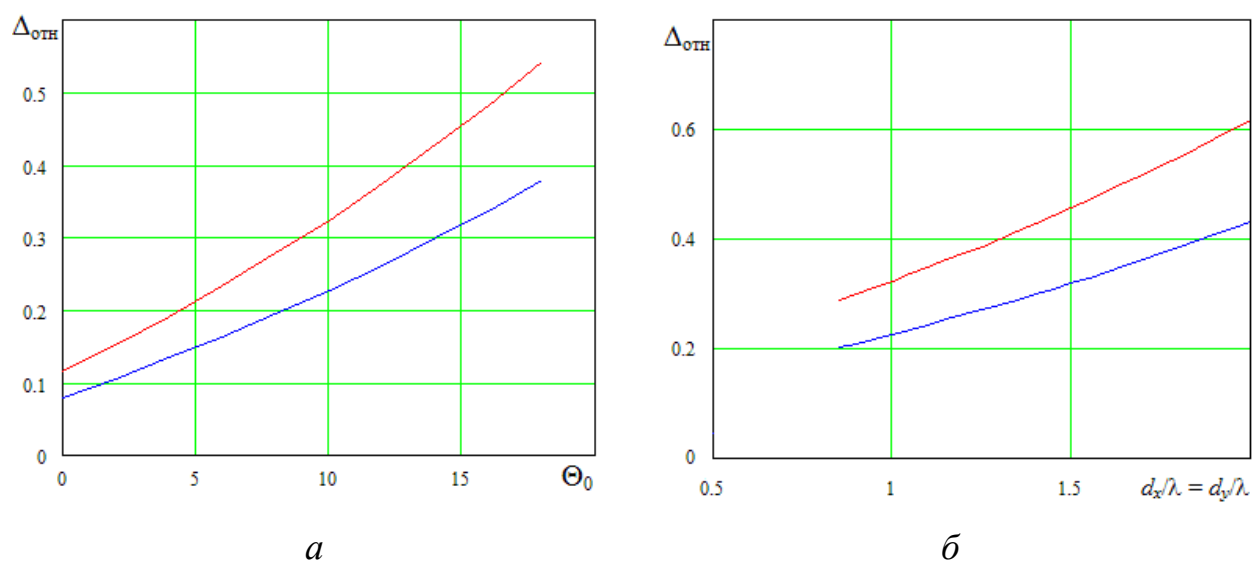


Рис. 4. Зависимость выброса  $\Delta_{отн}$  (относительно главного максимума ХН) вызванного увеличением шага решетки, от направления луча  $\Theta_0$  в градусах для  $d_x/\lambda=d_y/\lambda=1$  (а) и от относительного размера элемента  $d_x/\lambda = d_y/\lambda$  для  $\Theta_0 = 10^\circ$  (б).  $M = N = 16$ . Красный цвет соответствует антенной решетке с традиционным расположением элементов (рис. 1, а), синий – решетке со сдвигом соседних линеек на половину шага решетки (рис. 1, б)

На рис. 4, б при  $d_x/\lambda = d_y/\lambda < 0,85$  выброс начинает как бы уходить за задний край (плоскость  $\Theta = -90^\circ$ ) графиков ХН (рис. 2, 3), поэтому аргумент рис. 4, б ограничен слева значением 0,85 включительно. Уровень ХН в тех местах (рис. 2, рис. 3), где при других значениях аргумента был выброс, резко падает, но понятие выброса теряет смысл, поэтому графики и ограничены слева.

Как известно, ХН прямоугольного синфазного раскрытия [10, 11] есть произведение функций вида  $f(\alpha) = \sin \alpha / \alpha$  (с разными аргументами) в плоскостях  $zOx$  (угол  $\Theta$ ) и  $zOy$  (угол  $\varphi$ ). Осцилляции этих функций (боковые лепестки ХН) могут быть уменьшены введением амплитудного распределения, плавно спадающего к краям [10, 11]. Заметим, что



вышеупомянутые боковые лепестки не связаны с выбросами ХН, вызванными увеличением шага решетки, но накладываются друг на друга.

Для случая одинаковых запараллеленных элементов вдоль оси  $y$  (рис. 1) боковые лепестки могут быть уменьшены только в плоскости  $zOx$  (угол  $\Theta$ ). Однако амплитудное распределение по оси  $y$  может быть реализовано путем применения элементов одинаковой геометрии с разным коэффициентом преобразования (электрической энергии в акустическую или наоборот), или элементов с одинаковым коэффициентом преобразования, но разной площади либо геометрии. В последнем случае неизбежен рост выбросов ХН из-за появления межэлементных промежутков. В формулах (1) и (2) амплитудное распределение ( $a_m$ ,  $a_n$  или  $a_{m,n}$ ) может быть учтено умножением на него экспонент. Заметим, что введение амплитудного распределения практически не влияет на уровень  $\Delta_{отн}$  выбросов ХН, вызванных увеличением шага решетки относительно классического ( $\lambda/2$ ) (при распределении в виде окна Хэмминга для рис. 1, а, б  $\Delta_{отн}$  растут на 1%).

Допустимый уровень выбросов зависит от задачи, решаемой системой, а также от сигнальной обстановки. Например, если заранее известно, что в области направлений, где наблюдаются выбросы, отсутствуют рассеиватели с большим коэффициентом отражения, для увеличения шага решетки допустимый уровень выбросов может быть увеличен.

Была изготовлена соответствующая гидроакустическая антенная решетка и проведены ее натурные испытания, которые подтвердили снижение уровня выбросов ХН, возникающих вследствие увеличения шага решетки.

Таким образом, цель исследования, приводимого в данной статье, достигнута: расчеты ХН и натурные испытания показали, что благодаря сдвигу соседних элементов уменьшается уровень выбросов ХН, вызванных увеличением шага решетки.

---

Увеличение шага решетки позволяет сократить число приемных и передающих каналов и таким образом снизить аппаратные затраты и вычислительную сложность.

Наиболее эффективно увеличение шага антенной решетки при относительно небольшом (от  $-15^\circ$  до  $15^\circ$ ) размере сектора обзора (диапазон изменения оси лучей относительно нормали к плоскости антенны).

Полученные графики зависимостей выбросов ХН от шага решетки и направления луча позволят разработчику выбрать наиболее подходящий предварительный вариант.

В приводимой модели использовалась формула ХН элемента решетки в бесконечном бесконечно жестком экране. При разработке реальной аппаратуры рекомендуется для повышения точности результатов учитывать конечную жесткость поверхности антенны вокруг элемента антенной решетки [10, 11], либо применяя пакеты программ, учитывающие это.

В статье рассмотрена гидроакустическая антенна решетка, но результаты могут быть применены и для радиочастотных антенных решеток.

### Литература

1. Кириченко И.А. Излучающая антенная решетка профилографа // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5318](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5318).

2. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Контроль электроакустических пьезопреобразователей акустических антенных решеток по электрическим измерениям // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4295](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4295).

3. Колесников С.В., Зайцева Т.В., Рогожкина А.Ю., Ушаков С.А., Комиссаров А.В. Влияние пространственной структуры активной антенной решетки на угловые спектры мощности интермодуляционных помех и





эффективность пространственного фильтра Винера с учетом межэлементного взаимодействия // Инженерный вестник Дона. 2012. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1468](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1468).

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

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

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

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

8. Турулин И.И. Фильтр цифровой пространственный интерполяционный // Гидроакустическая энциклопедия. Под общей ред. Тимошенко В.И. Таганрог: Изд. ТРТУ, 1999. С. 660.

9. Заковоротнов Е.А., Турулин И.И. Программа оценки интерполяционных формирователей характеристик направленности // Информационный листок о научно-техническом достижении № 87-121: М.: ВИМИ, 1987.

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

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

### References

1. Kirichenko I.A. Inzenernyj vestnik Dona. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5318](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5318).

2. Zemljakov V.L., Kljuchnikov S.N. Inzenernyj vestnik Dona. 2017. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4295](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4295).

3. Kolesnikov S.V., Zajceva T.V., Rogozhkina A.Ju., Ushakov S.A., Komissarov A.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2012. №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1468](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1468).

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

5. Samojlov L.K. Jelektronnoe upravlenie harakteristikami napravlenosti antenn [Electronic control of antennas directivity characteristics]. L. Sudostroenie, 1987. 280 p.

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

7. Zakovorotnov E.A., Turulin I.I. Izvestija vuzov. Radiojelektronika. 1989. №7. pp.81-82.

8. Turulin I.I. Fil'tr cifrovoj prostranstvennyj interpoljacionnyj [Digital spatial interpolation filter]. Gidroakusticheskaja jenciklopedija. Pod obshej redakciej Timoshenko V.I. Taganrog: Izdatel'stvo TRTU, 1999. p. 660.

9. Zakovorotnov E.A., Turulin I.I. Informacionnyj listok o nauchno-tehnicheskom dostizhenii № 87-121. M. VIMI, 1987.

10. Orlov L.V., Shabrov A.A. Gidroakusticheskaja apparatura rybopromyslovogo flota [Hydroacoustic equipment of the fishing fleet]. L. Sudostroyeniye, 1987. 224 p.

11. Smaryshev M.D. Napravlennost' gidroakusticheskikh antenn [Directivity of hydroacoustic antennas]. L. Sudostroenie, 1973. 275 p.