

УДК 534.29.71.8

Д.С. Толкачёв, В.С. Жирнов

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ
ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК С ЦИФРОВЫМ
ФОРМИРОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ В БЛИЖНЕЙ
ЗОНЕ**

Изложены принципы цифрового формирования характеристик направленности фазированных антенных решёток, показана зависимость геометрических размеров фокального пятна от нормированного расстояния в ближней зоне. Приведены положения, на основании которых разработана модель формирования акустического поля фазированных антенных решёток в ближней зоне. Показан общий вид и распределения поля вдоль оси и в зависимости от угла на расстоянии акустического и оптического фокуса для разработанной модели.

Фазированная антенная решётка; фокусирование луча; ближняя зона; формирование характеристики направленности.

D.S. Tolkachev, V.S. Zhirnov

**SPACE-TIME SIGNAL PROCESSING OF DIGITAL BEAM-FORMING
PHASED ARRAYS IN NEAR-FIELD**

In the present article the basic concepts of digital beam-forming of phased arrays are stated. The focal spot size dependence on normalized distance in near field is discussed. Principles of phased arrays acoustic field shaping in near-field, used in the developed model are presented. General arrangement of the system and field pattern distribution along the axis versus the angle at the distance of acoustic and optical focus are stated.

Phased array; beam focusing; near field; beam pattern forming.

Применение в системах неразрушающего ультразвукового контроля фазированных антенных решеток (ФАР) дает ряд преимуществ по сравнению с традиционными (без использования ФАР) методами. Внесение задержек в сигналы, излучаемые каждым элементом ФАР, позволяет осуществлять линейное или угловое перемещение луча, а также его фокусировку. Линейное перемещение луча применяется при исследовании сечений объектов без необходимости перемещения антенны, что позволяет сократить время исследования. Перемещение луча по углу позволяет обнаружить и локализовать дефекты, расположенные под различными углами.

Фокусирование луча позволяет сконцентрировать энергию поля в определенной области – фокальном пятне. Фокусировка в излучении производится внесением задержек в импульсы, излучаемые каждым элементом антенны. Аналогичные задержки используются для фокусировки в приеме.

На рис. 1 показаны геометрические размеры ФАР. Приняты следующие обозначения: e – ширина элемента антенны, W – его длина, также называемая пассивной апертурой, g – расстояние между ближними границами элементов, $p = e + g$ – расстояние между центрами элементов, $A = Ne + (N - 1)g = Np - g \approx Np$ – апертура антенны, N – число элементов антенны.

Из основных положений теории фокусировки [1,2] следует, что фокусирование луча имеет смысл только при работе в ближней зоне. Расстояние ближней зоны находится как [1]

$$N_0 = \frac{A_{\text{эфф}}^2 - \lambda^2}{4\lambda}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, $A_{\text{эфф}} = A \cos \alpha = pN \cos \alpha$ – эффективная апертура антенны (α – угол фокусировки). На практике [1] фокусировка применяется на расстояниях меньших $0,6N_0$.

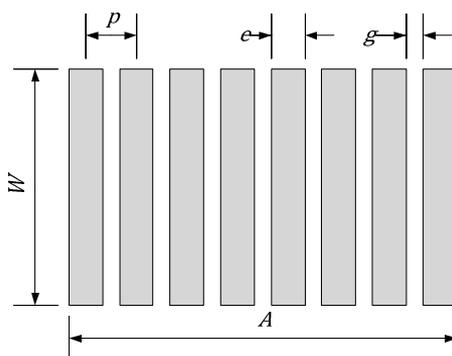


Рис. 1. ФАР и ее геометрические размеры

В акустических фокусирующих системах наблюдается заметное смещение акустического фокуса $F_{\text{ак}}$ от оптического (геометрического) фокуса $F_{\text{опт}}$ [2. С. 92].

Фокусировка производится в некоторой области – в окрестности точки акустического фокуса $F_{\text{ак}}$, где образуется фокальное пятно [3. С. 96]. Нормированные к расстоянию ближнего поля N_0 зависимости акустического фокуса $F_{\text{ак}}$, ближней $z_{\text{н}}$ и дальней $z_{\text{в}}$ границы пятна для различных углов и различного числа элементов ФАР будут иметь сходный вид, показанный на рис. 2

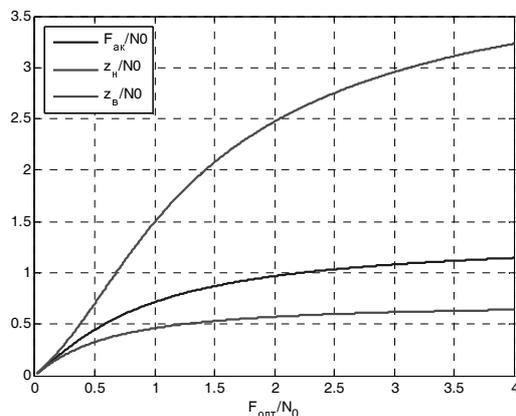


Рис. 2. Нормированные к N_0 зависимости $F_{\text{ак}}$, $z_{\text{н}}$ и $z_{\text{в}}$ от $F_{\text{опт}}$

Диаграмма направленности элемента ФАР определяется его геометрическими размерами [3]:

$$\Phi(\theta) = \frac{\sin(ak \sin \theta)}{ak \sin \theta}, \quad (2)$$

где a – половина ширины элемента, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Каждый элемент антенны излучает цилиндрическую волну, так как его ширина меньше половины длины волны, а длина существенно больше ширины. Амплитуда поля цилиндрической волны убывает пропорционально корню расстояния [4]. Такую волну можно описать комплексной функцией

$$S_i(r_i, \theta_i) = \frac{\Phi(\theta_i)}{\sqrt{r_i}} \exp[j2\pi f_0(-r_i/c - \tau_i)], \quad (3)$$

где i – номер элемента ФАР, r_i и θ_i – расстояние и угол от i -го элемента до интересующей точки пространства, f_0 – частота излучаемого сигнала, c – скорость звука в среде, τ_i – задержка излучаемого сигнала на i -м элементе.

Необходимые для фокусировки задержки вычисляются на основе расстояний от i -го элемента до точки оптического фокуса $F_{\text{опт}}$ с координатами R и α . Задержки τ_i находятся как

$$\tau_i = \max(R_i/c) - R_i/c. \quad (4)$$

Расстояния R_i от исследуемой точки до i -го элемента ФАР можно найти следующим образом:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + y_0^2}, \quad (5)$$

где $x_0 = R \sin \alpha$, $y_0 = R \cos \alpha$ – прямоугольные координаты оптического фокуса, $x_i = \left(i - \frac{N+1}{2}\right)l$ – координаты центров элементов ФАР (центр системы координат совпадает с центром ФАР).

Поле всей антенны находится на основании принципа суперпозиции как сумма полей от всех элементов:

$$S = \sum_{i=1}^N S_i. \quad (6)$$

Также учитывается то, что поле излучения-приема приближенно равно квадрату поля излучения.

При моделировании использовались следующие исходные данные:

- ◆ расстояние между центрами элементов ФАР: $p = 0,6$ мм;
- ◆ ширина элемента ФАР: $e = 0,45$ мм;
- ◆ число элементов ФАР: $N = 32$;
- ◆ частота излучаемых колебаний: $f_0 = 5$ МГц;
- ◆ скорость продольной волны: $c = 5890$ м/с.

Расстояние ближней зоны N_0 , рассчитанное по формуле (1), для 32-элементной антенны составляет 77,9 мм (при фокусировке перпендикулярно плоскости антенны).

Диаграмма направленности (рис. 3) отдельного элемента, рассчитанная по формуле (2), позволяет утверждать, что его направленность выражена слабо.

На рис. 4 приведены зависимости задержек на излучающих элементах ФАР при фокусировке на различную глубину, рассчитанные по формуле (5). При увеличении глубины сканирования, максимальное значение задержек уменьшается пропорционально.

На рис. 5 приведены рассчитанные по формуле (6) изображения полей и отмеченные на них границы пятна фокусировки по уровню -6 дБ. Через точки $F_{\text{ак}}$ и $F_{\text{опт}}$ для наглядности проведена прямая, а через точку $F_{\text{ак}}$ – дуга.

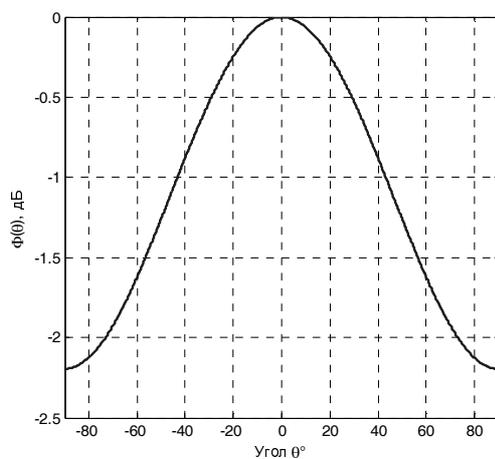


Рис. 3. Диаграмма направленности элемента ФАР

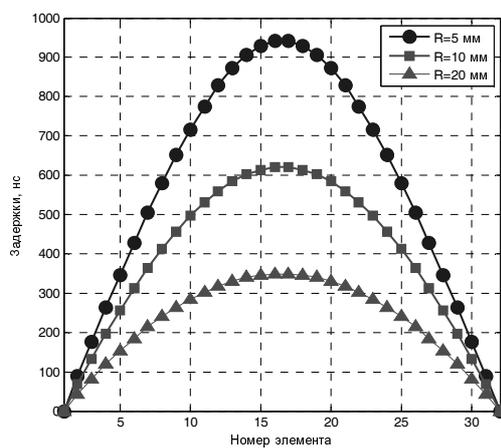


Рис. 4. Задержки на элементах ФАР при фокусировке на различную глубину

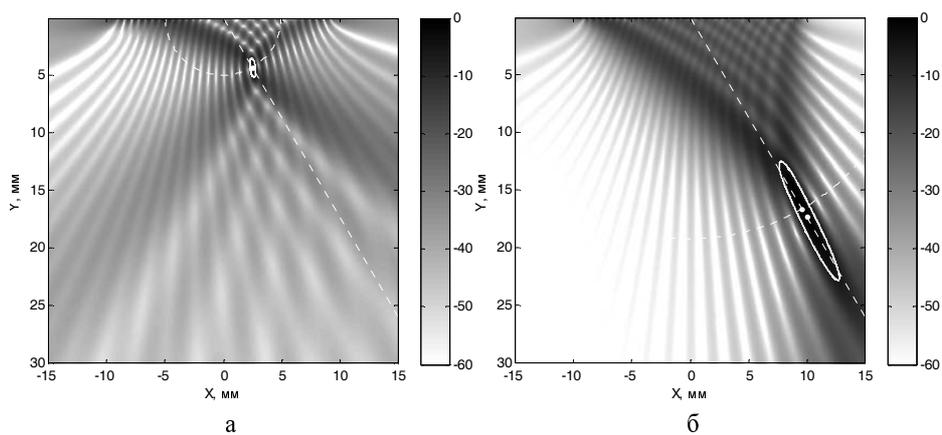


Рис. 5. Вид поля и границы пятна для 32-элементной антенны, фокусировка под углом 30° на расстоянии геометрического фокуса, равно: а – 5 мм, б – 20 мм

Распределение поля вдоль оси излучения для случая, показанного на рис. 5,б, изображено на рис. 6. Можно отметить такие явления, как осцилляции в ближней зоне перед точкой фокусировки, смещение акустического центра в сторону излучателя, практически равномерное спадание амплитуды поля в дальней зоне.

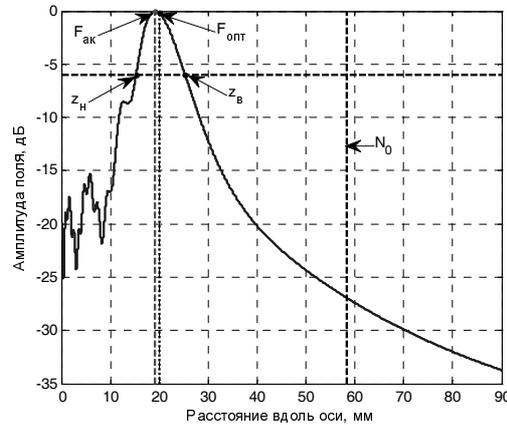


Рис. 6. Амплитуда распределения поля вдоль оси излучения
($N = 32$, $\alpha = 30^\circ$, $F_{ак} = 20$ мм)

Распределение поля в зависимости от угла на расстоянии акустического фокуса $F_{ак}$ и оптического фокуса $F_{опт}$ для того же случая приведено на рис. 7. На расстоянии акустического фокуса основной лепесток шире, чем на расстоянии оптического фокуса. Это тем ярче выражено, чем меньше апертура антенны.

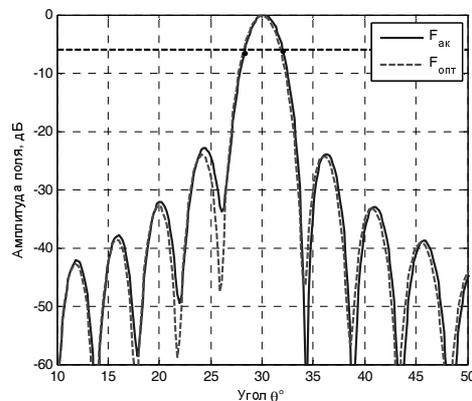


Рис. 7. Амплитуда распределения поля в зависимости от угла на расстоянии $F_{ак}$ и $F_{опт}$ ($N = 32$, $\alpha = 30^\circ$, $F_{ак} = 20$ мм)

В настоящее время в НКБ цифровой обработки сигналов ЮФУ разрабатывается система неразрушающего контроля (СНК) на основе ФАР. Разработанная модель позволяет оптимально подбирать фокальные законы СНК, оценивать перекрытие фокальных пятен, группировать фокальные законы для осуществления динамической фокусировки по дальности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications – Olympus NDT, 2004.

2. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
4. *Лепендин Л.Ф.* Акустика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 448 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Р. Ильчук.

Толкачев Данил Сергеевич

Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет».

E-mail: dandur.oak@gmail.com.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634312350.

Конструктор.

Жирнов Вячеслав Сергеевич

E-mail: zh-dsp@tsure.ru.

Начальник лаборатории.

Tolkachev Danil Sergeevich

SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational of Higher Vocational Education «Southern Federal University».

E-mail: dandur.oak@gmail.com.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634312350.

Designer.

Zhirnov Vyacheslav Sergeevich

E-mail: zh-dsp@tsure.ru.

Head of Laboratory.