

УДК 621.396

## **Методика оценивания характеристик диаграммы направленности ультразвукового лоатора в режиме синтезирования апертуры антенны**

**Звонарев В.В.\***, **Мороз А.В.\*\***, **Шерстюк А.В\*\*\*<sup>3</sup>**

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского  
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

*\*e-mail: zvonarevvitalii@yandex.ru*

*\*\*e-mail: moroz-anatolij@yandex.ru*

*\*\*\*e-mail: av47b@yandex.ru*

***Статья поступила 19.04.2019***

### **Аннотация**

В статье рассмотрены вопросы моделирования параметров диаграммы направленности ультразвукового лоатора в режиме синтезирования апертуры антенны. Представлены результаты оценивания характеристик ДН ультразвукового приемопередающего устройства, полученные с помощью предложенного методического подхода. Проведена экспериментальная проверка результатов с использованием ультразвукового полигона.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой антенны (РСА), диаграмма направленности, цифровая обработка сигналов, ультразвуковой лоатор в режиме синтезирования апертуры, антенная решетка.

### **Введение**

В настоящее время для получения изображений земной поверхности

используются радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) авиационного и космического базирования. Создание РСА предполагает проектирование и разработку соответствующих макетов, реализующих основные режимы функционирования образца или его составных частей [1, 2, 3].

Построение макета РСА трудно реализуемо. Основной проблемой является высокая стоимость макета РСА, обусловленная дороговизной как аппаратуры, работающей в сверхвысокочастотном диапазоне, так и механических устройств [4].

В этой связи весьма интересным может оказаться подход, при котором в интересах макетирования используется не радиодиапазон, а диапазон ультразвуковых волн. Это обусловлено тем, что создание макета локатора в режиме синтеза апертуры антенны в ультразвуковом диапазоне длин волн требует несоизмеримо меньших финансовых и материальных затрат [5, 6, 7].

Ввиду сходства эффектов дифракции, интерференции, волновых свойств при распространении акустических и электромагнитных волн макет локатора в ультразвуковом диапазоне длин волн позволяет с высокой точностью и достоверностью моделировать основные процессы, происходящие в реальном устройстве [8].

Основными целями разработки макета ультразвукового локатора в режиме синтеза апертуры (УЛСА) антенны являются: повышение эффективности проведения научных исследований, совершенствование технологий цифровой обработки сигналов, подтверждение достоверности разрабатываемого математического аппарата формирования локационного изображения в различных режимах функционирования.

Однако, несмотря на имеющиеся преимущества в стоимости разработки УЛСА антенны, целесообразно до создания образца локатора выполнить моделирование процессов функционирования его элементов с целью получения значений характеристик диаграммы направленности (ДН) [9, 10, 11].

Для предварительной проработки технических решений при разработке УЛСА в статье предложена методика оценивания характеристик ДН УЛСА антенны. Значения данных характеристик получены с использованием программных пакетов для проведения инженерных расчетов в программе Mathcad.

Таким образом, новизна предлагаемой методики заключается в том, что до проектирования и разработки макетов, реализующих основные режимы работы образца или его составных частей, выполняется математическое моделирование процессов функционирования элементов разрабатываемого образца.

### **Постановка задачи**

Для сравнения ДН УЛСА, полученной в программе Mathcad, с характеристикой ультразвукового локатора в составе ультразвукового полигона (УЗП), разработанного в ВКА имени А.Ф.Можайского [12], необходимо [13, 14]:

- вычислить нормированную амплитудную характеристику направленности одиночного полуволнового линейного симметричного электрического вибратора;
- вычислить множитель антенной решетки (амплитудную характеристику направленности антенной решетки);
- построить ненормированную амплитудную ДН антенной решетки;
- построить нормированную ДН антенной решетки.

Для решения указанных задач необходимо использовать следующие исходные данные:

1. Вид ДН передающего ультразвукового датчика (УЗД) «МА40S4S» –  $f_{mp}(\theta, \alpha)$  согласно технической документации [15] (рис.1). Датчик указанного типа «МА40S4S» используется в качестве излучающего элемента в составе УЗП.

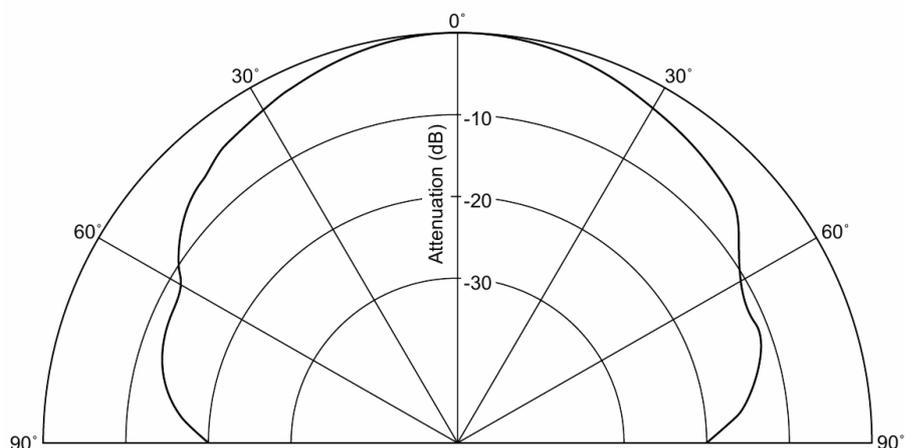


Рис. 1. Диаграмма направленности ультразвукового передающего датчика «МА40S4S»

2. Характеристики антенной решетки УЛСА:

- длина волны 8 мм;
- размер излучающего элемента  $0,5 \lambda$ ;
- расстояние между излучателями  $1 \lambda$ ;  $0,31 \lambda$ ;
- количество элементов в синтезируемой антенной решетке 2; 600 (количество элементов антенной решетки 600 при расстоянии между излучателями  $0,31 \lambda$  соответствует длине синтезирования решетки 1,54 м, реализованной в УЗП).

### **Формирование диаграммы направленности ультразвукового локатора в режиме синтезирования апертуры антенны**

Формирование ДН УЛСА антенны выполнялось в три этапа, в соответствии с разработанной методикой, структура которой представлена на рисунке 2.

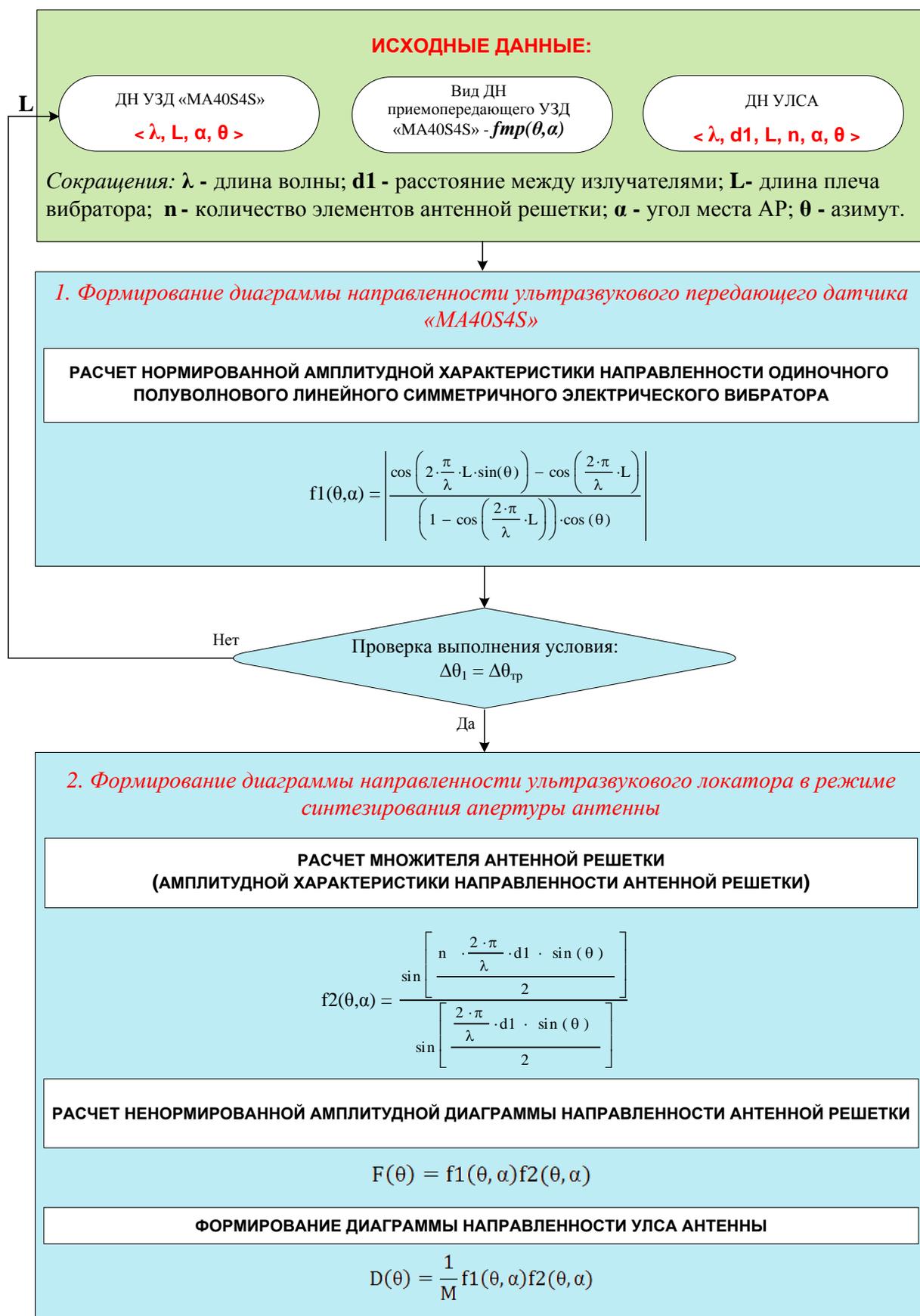


Рис. 2. Структура методики оценивания характеристики ДН УЛСА

Этап 1. Построение ДН УЗД «МА40S4S» с использованием нормированной амплитудной характеристики направленности одиночного симметричного электрического вибратора [16, 17].

Когда значение ширины ДН одиночного симметричного электрического вибратора ( $\Delta\theta_1$ ), представленного на рисунке 1, построение ДН УЗД «МА40S4S»  $-f_1(\theta, \alpha)$  будет равно значению ширины ДН УЗД «МА40S4S» ( $\Delta\theta_{тр}$ ), представленного на рисунке 1, построение ДН УЗД «МА40S4S»  $-f_1(\theta, \alpha)$  (рисунки 3 и 4) считается законченным.

Чтоб ширина ДН одиночного симметричного электрического вибратора была равна ширине ДН УЗД «МА40S4S» ( $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_{тр}$ ), представленного на рисунке 1, изменялось значение геометрического размера вибратора ( $L$ ).

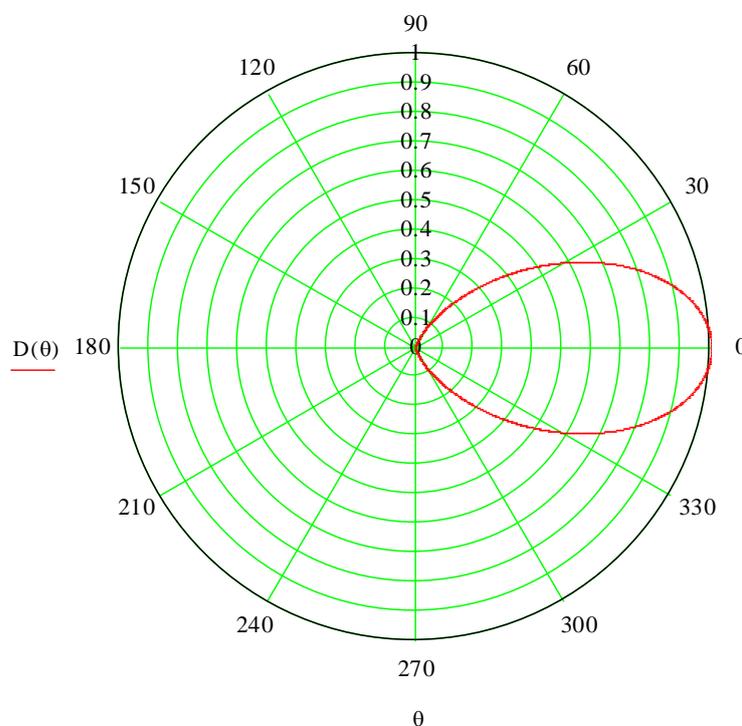


Рис. 3. Диаграмма направленности УЗД «МА40S4S» в полярной системе координат

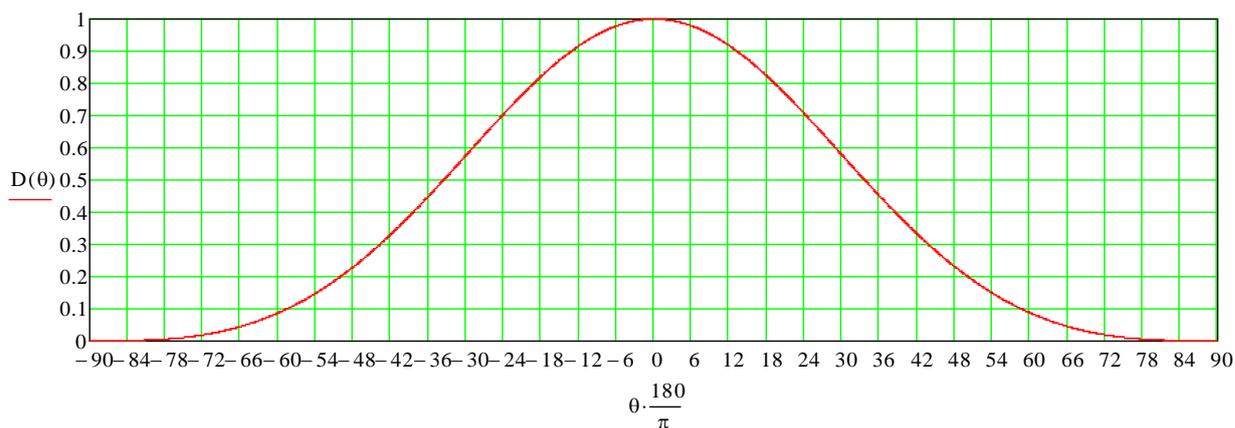


Рис. 4. Диаграмма направленности УЗД «МА40S4S» в прямоугольной системе координат

Результаты проведенных расчетов нормированной амплитудной характеристики направленности одиночного излучателя использовались на 2 этапе для формирования ДН УЛСА.

Этап 2. Построение ненормированной амплитудной ДН синтезированной антенной решетки по результатам выполнения расчетов [17, 18, 19]:

- амплитудной характеристики направленности антенной решетки;
- нормированной амплитудной характеристики направленности одиночного полуволнового линейного симметричного электрического вибратора.

Этап 3. Построение ДН УЛСА антенны, где  $M = \max(F(\theta))$ .

На рис. 5а и 5б представлены нормированная амплитудная ДН антенной решетки в полярной и прямоугольной системе координат для следующих условий:

$$n = 2; d_1 = 1\lambda.$$

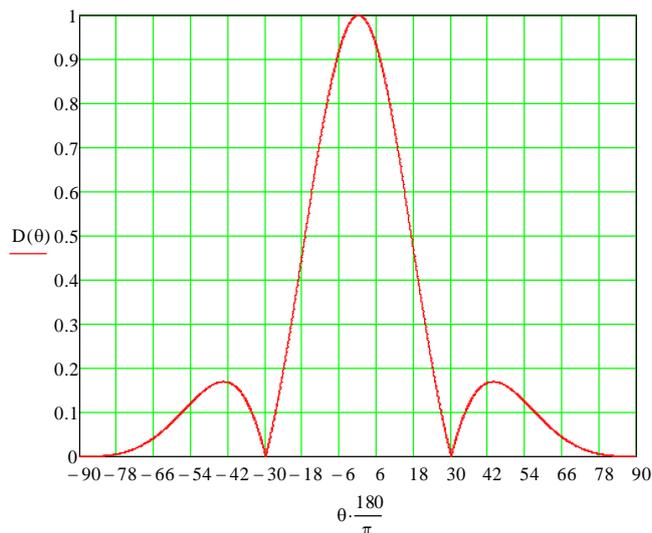
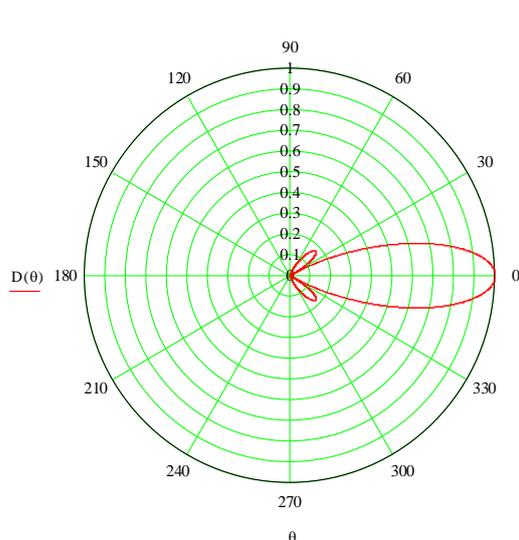


Рис. 5а. Нормированная амплитудная диаграмма направленности антенной решетки в полярной системе координат (при  $n = 2$ )

Рис. 5б. Нормированная амплитудная диаграмма направленности антенной решетки в прямоугольной системе координат (при  $n = 2$ )

На рис. 6 представлена нормированная амплитудная ДН антенной решетки в полярной системе координат для следующих условий:  $n = 600$ ;  $d_1 = 2,5 \times 10^{-3}$  м.

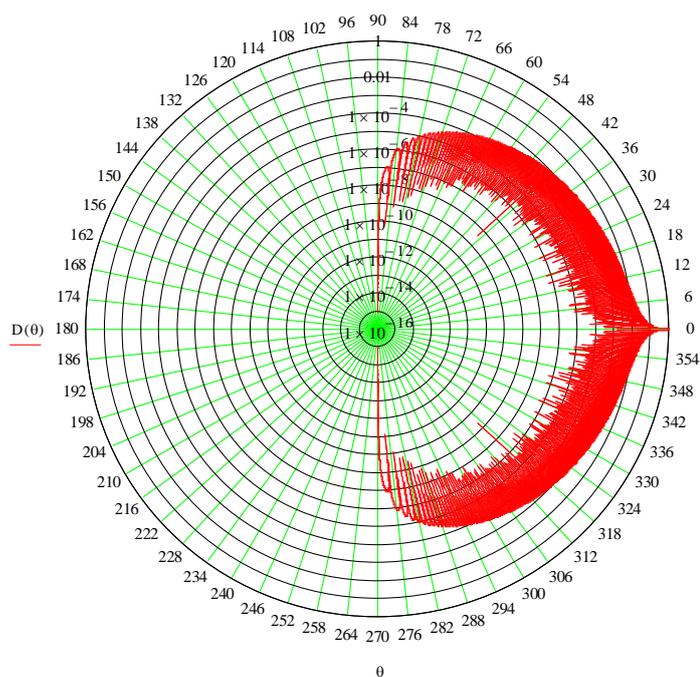


Рис. 6. Нормированная амплитудная диаграмма направленности антенной решетки в полярной системе координат (при  $n = 600$ ) в азимутальной плоскости

Предложенная методика позволяет, варьируя исходные данные: длину волны, размер излучающего элемента, расстояние между излучателями, количество элементов в синтезируемой антенной решетке, получить оценки характеристик ДН синтезированной антенной решетки.

### **Экспериментальная проверка расчетной характеристики ультразвукового локатора в режиме синтеза апертуры антенны**

С целью проверки полученных значений характеристик ДН УЛСА антенны проводится сравнение расчетных оценок ДН синтезированной антенной решетки

с соответствующими экспериментальными данными, полученными при аналогичных условиях наблюдения, но с использованием УЗП.

В качестве зондирующего сигнала использовался сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с полосой 10 кГц. Авторами работы [20] показано, что разрешение по азимуту в системах с синтезированной апертурой антенны, определяемое длиной волны излучения ( $\lambda = 8$  мм) и максимальным размером синтезируемой апертуры антенны, реализуемой в условиях работы УЗП ( $Lc = 1,54$  м), составило  $\delta_x = 0,84$  см.

Оценивание ширины ДН УЛСА по уровню 0,707 производилось в соответствии с методикой [18]. При длине волны  $\lambda = 8$  мм, количестве элементов антенной решетки  $n = 600$  и расстоянии между излучателями  $d_1 = 2,5 \times 10^{-3}$  м ширина ДН синтезированной антенной решетки в прямоугольной системе координат в азимутальной плоскости составила 0,841 см ( $\Delta\theta = 0,841$  см).

На рисунке 8а представлена ДН УЛСА (при  $n = 600$ ), полученная на основе использования разработанной методики, представленной на рисунке 2, а на рисунке 8б представлено сечение окрестности максимума функции отклика с оценкой разрешения по азимуту при использовании ЛЧМ сигнала, полученное с использованием ультразвукового локатора в составе УЗП [20].

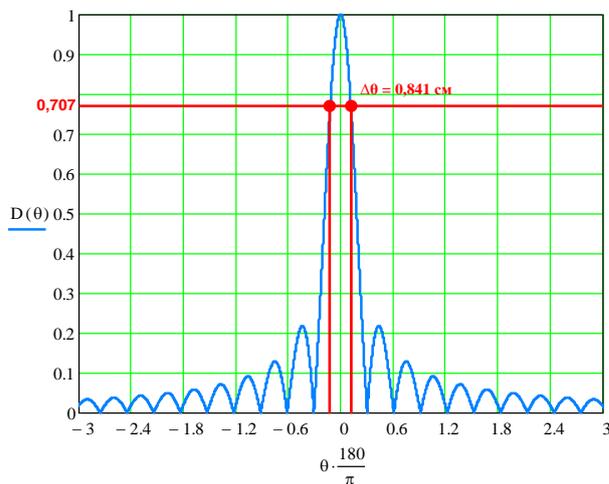


Рис. 8а. Нормированная амплитудная ДН антенной решетки в прямоугольной системе координат (при  $n = 600$ ) в азимутальной плоскости

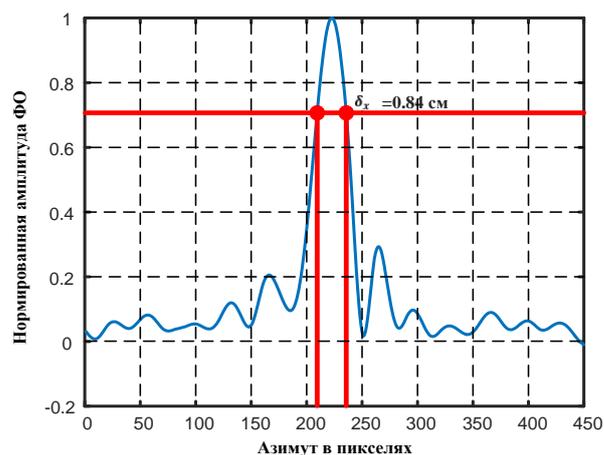


Рис. 8б. Оценка разрешения по азимуту для ЛЧМ сигнала (с использованием УЗП)

Таким образом, разработанная методика позволяет оценивать характеристики УЛСА в части ширины основного лепестка синтезированной ДН с высокой точностью (порядка 1%). Выполненные расчеты подтверждают целесообразность использования представленной методики, которая в дальнейшем требует апробации и в радиодиапазоне.

## Заключение

1. Использование указанного подхода позволит уточнить модель оценивания погрешностей радиолокационного канала разрабатываемого макета реальной РСА

и подойти к решению задачи радиометрической калибровки сквозного тракта системы еще до начала его изготовления.

2. Полученный опыт целесообразно использовать при разработке алгоритмов управления ДН перспективных локаторов с синтезированной апертурой уже на этапе лабораторной отработки.

3. В отличие от существующих методик, использование предлагаемой методики позволяет уточнить модель оценивания погрешностей радиолокационного канала макета радиолокатора с синтезированной апертурой антенны и решать задачи радиометрической калибровки сквозного тракта системы еще до начала его изготовления.

4. Расхождения экспериментальных и модельных данных в области боковых лепестков обусловлены: многолучевостью распространения ультразвуковых волн, нестабильностью характеристик среды распространения, влиянием собственных шумов приемного тракта, неоптимальностью системы цифровой обработки, влияние которых на величину расхождения требует дополнительного изучения.

### **Библиографический список**

1. Сахно И.В., Ткачев Е.А., Гаврилов Д.А., Симонов А.Б., Козлов А.В., Иванов А.А. Корреляционная обработка сложных сигналов с использованием свойств фрактальных отображений // Радиопромышленность. 2010. № 2. С. 68 – 76.
2. Козлов А.В., Косынкин А.И., Мороз А.В., Сахно И.В., Соколов С.М., Пименов В.Ф., Шерстюк А.В. Моделирование многопозиционной радиолокационной системы

с синтезированной апертурой антенны с использованием ультразвукового диапазона длин волн // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 16 – 17 апреля 2013). – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. Т. 1. № 10. С. 419 - 429.

3. Миронов А.Н., Цветков К.Ю., Ковальский А.А., Пальгунов В.Ю. Методика обоснования возможности и условий продления назначенных показателей срока службы антенных систем наземных станций измерительного комплекса космодрома // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91968>

4. Дашевский О.Ю., Невеженко Е.С. Исследование эффективности программно-алгоритмических средств синтеза апертуры в пассивной радиолокации на тестовых и реальных сигналах // Автометрия. 2009. № 5. С. 70 – 71.

5. Сахно И.В., Симонов А.Б., Ткачев Е.А. Способ формирования наборов ортогональных псевдослучайных последовательностей с использованием войств фрактальных отображений и устройство его реализующее. Патент RU 2006143688. Бюлл. 16, 10.06.2006.

6. Шкапский Г.И., Курнина Д.В., Смолин В.П. Масштабное физическое ультразвуковое моделирование, его программная и аппаратная сторона // VII международная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике: сборник статей. Часть I. – Новосибирск: СибАК, 2012. С. 86 – 98.

7. Суханов Д.Я., Латипова Л.М. Ультразвуковидение в воздухе с применением крестовидной матрицы ультразвуковых излучателей и приёмников // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 145 - 148.

8. Семин А.И., Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование радиолокационных систем получения и обработки радиолокационных изображений высокого разрешения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. №. 4. С. 143 - 157.
9. Иванов А.А., Козлов А.В., Сахно И.В., Ткачев Е.А., Симонов А.Б. Корреляционная обработка сложных сигналов с использованием свойств фрактальных отображений // Радиопромышленность. 2010. № 2. С. 68 - 76.
10. Francois Vincent, Bernard Mouton, Eric Chaumette, Claude Nouals, Olivier Besson. Synthetic aperture radar demonstration kit for signal processing education, available at: [http://oatao.univ-toulouse.fr/151/1/Vincent\\_151.pdf](http://oatao.univ-toulouse.fr/151/1/Vincent_151.pdf)
11. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденков А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100782>
12. Мороз А.В., Пименов В.Ф., Соколов С.М. Локационный акустический комплекс полунатурного моделирования радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны // Юбилейная 70-я Всероссийская научно-техническая конференция (СПБНТОРЭС): материалы конференции. – СПб.: СПБНТОРЭС имени А.С. Попова, 2015. Т. 1. С. 78 - 79.
13. Лялин К.С., Хасанов М.С., Мелёшин Ю.М., Кузьмин И.А. Спектральный метод подавления боковых лепестков автокорреляционной функции длинных

псевдослучайных бинарных последовательностей // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100800>

14. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. – М.: Советское радио, 1971. – 568 с.

15. Ultrasonic Sensors, available at: <https://www.murata.com/en-en/products/productdetail?partno=MA40S4S>

16. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.

17. Кубанов В.П. Направленные свойства антенных решеток. - Самара: ПГУТИ, 2015. – 56 с.

18. Воскресенский Д.И., Степаненко В.И., Филиппов В.С. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.

19. Кобелева С.П., Перевезенцев А.В., Фомин В.М., Френкель М.М. Расчет диаграммы направленности активной фазированной антенной решетки // Электронная техника. Серия: Полупроводниковые приборы. 2017. № 4 (247). С. 37 - 41.

20. Козлов А.В., Косынкин А.И., Мороз А.В., Сахно И.В., Пименов В.Ф. Технология и результаты полунатурного моделирования в условиях ультразвукового полигона системы цифровой обработки траекторного сигнала РЛС ОЗП, использующей различные типы сложных широкополосных зондирующих сигналов // Труды XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред»

(Санкт-Петербург, 18–19 апреля 2017). – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017.

Вып. 11. Т. 2. С. 51 - 63.