

Научная статья  
УДК 621.396.967  
DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)

## АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЛОСКОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Валентина Игоревна Тепликова<sup>1</sup>, Антон Александрович Сенцов<sup>2</sup>,  
Вадим Александрович Ненашев<sup>3</sup>✉, Вадим Борисович Поляков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Котлин-Новатор», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2,3,4</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического  
приборостроения» (ГУАП), Санкт-Петербург

<sup>3</sup>[nenashev@guap.ru](mailto:nenashev@guap.ru)✉

**Аннотация.** Представлено исследование методики корректировки искажений параметров диаграммы направленности, вызванных взаимным влиянием излучателей, на примере прямоугольной активной фазированной антенной решетки с количеством излучателей: 64 в азимутальной плоскости, 8 в угломестной плоскости. Рассмотрена зависимость основных характеристик диаграммы направленности от отклонения луча при электронном сканировании и изменения напряженности электромагнитного поля в процессе формирования амплитудного распределения косинус-квадрат на пьедестале. Определены характеры зависимостей и предложена методика по управлению искажениями характеристик, возникающими

при отклонении луча. Реализация методики позволяет скорректировать параметры диаграммы направленности, имеющей искажения, вследствие изменения взаимного влияния излучателей, получить требуемые характеристики активной фазированной антенной решетки, использовать режимы работы, требующие сохранения параметров антенной решетки неизменными.

**Ключевые слова:** диаграмма направленности, фазированная антенная решетка, корректировка искажений, моделирование, многоэлементная антенна

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06029

**Для цитирования:** Тепликова В.И., Сенцов А.А., Ненашев В.А., Поляков В.Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки // Труды МАИ. 2022. №125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)

Original article

## ANALYSIS OF THE DIRECTION PATTERN OF A FLAT MULTI-ELEMENT ACTIVE PHASED ARRAY

**Valentina I. Teplikova<sup>1</sup>, Anton A. Sentsov<sup>2</sup>, Vadim A. Nenashev<sup>3</sup>✉, Vadim B. Polyakov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>JSC «Kotlin-Innovator», Saint Petersburg, Russia

<sup>2,3,4</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup>[nenashev@guap.ru](mailto:nenashev@guap.ru)✉

**Abstract.** The article presents a study of a technique for correcting distortions in the radiation pattern parameters caused by the mutual effect of radiators, on the example of a rectangular active phased antenna array with the following number of radiators: 64 in the azimuthal plane, and 8 in the elevation plane. The authors considered the dependence of the main characteristics of the directional diagram on the beam deflection while electron scanning and the change in the strength of the electromagnetic field during the cosine-square amplitude distribution forming on the pedestal. The nature of the dependencies is determined and a technique is proposed for controlling the distortions of the characteristics occurring while the beam deflection. This technique realization will allow correcting the directional pattern, having distortions due to the changes in mutual effect of radiators, obtaining the required characteristics of active phased antenna array, and implement operation modes, which require keeping the antenna array parameters unchanged.

The following initial data is necessary when developing an algorithm: the number of rays, minimum scanning step, and the beam setting accuracy. As long as the result of this algorithm realization represents a data array, it is necessary to pay special attention account for the minimum memory size required for the initial data storage for the algorithm.

This technique realization allows correcting parameters of the directional pattern, which contains distortions due to changes in the mutual effect of radiators, to obtain the required the APAA characteristics. Its application allows employing the radar operating modes, which require keeping the antenna array parameters unchanged.

**Keywords:** radiation pattern, phased antenna array, distortion correction, modeling, multi-element antenna

**Funding:** The reported study was funded by RFBR, project number 19-29-06029.

**For citation:** Teplikova V.I., Sentsov A.A., Nenashev V.A., Polyakov V.B. Analysis of the direction pattern of a flat multi-element active phased array. *Trudy MAI*, 2022, no. 125.

DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)

## Введение

Современные антенны с фазированными решетками применяются уже несколько десятилетий, при этом технологии их проектирования и изготовления довольно проработаны [1-5], при этом остаются некоторые особенности, которые в научно-технической литературе не освещены в достаточной мере. Среди прочих особенностей выделяют управление направленными параметрами диаграммы направленности антенны (ДНА) при электронном сканировании.

Управление вышеуказанными параметрами и свойствами подобных антенных решёток завязано на интерференции электромагнитных волн. Если волны, излученные различными элементами антенной решетки, усиливают друг друга, то в этом случае формируется главный лепесток ДНА. В других случаях, излучения отдельных элементов антенной решетки в большей или меньшей степени компенсируют друг друга, в результате чего формируются боковые лепестки ДНА. Для формирования основного лепестка ДНА и управления его максимумом в заданном направлении следует воздействовать на изменения фазовых и амплитудных значений элементов фазированных антенных решеток.

Конструкции ФАР с задаваемыми значениями амплитудно-фазовых распределений существуют в не малом количестве. В такой же степени

многообразна совокупность вопросов, которые необходимо прорабатывать при конструировании и исследовании свойств ФАР с электрическим сканированием ДНА.

ФАР с электронным сканированием ДНА является набором элементарных излучателей, расположенных на полотне антенны. Как правило при начале проектирования и конструировании антенны с ФАР, а также при аналитическом исследовании ее характеристик в первую очередь следует просчитать параметры для построения необходимой формы ДНА.

Сложностью реализации процесса управления для электронного сканирования ДНА является воздействие на следующие параметры: коэффициент усиления (КУ), ширина основного лепестка ДНА по уровню мощности 0.5 (ШГЛ), а также значения уровней боковых лепестков (УБЛ). Далее следует рассмотреть основные причины искажений вида ДНА.

1. Гистерезис фазовращателей.
2. Эффекты, вызванные температурными влияниями.
3. Взаимное влияние элементов излучения ФАР.
4. Непропорциональность фазового сдвига, заданного фазовращателями, частоте сигнала.
5. Влияния, вызванные из-за взаимной связи между элементами излучения ФАР и особенности фидерной системы, питающей эти элементы [6].

Далее предлагается исследование методики корректировки искажений параметров диаграммы направленности (ДН), вызванных взаимным влиянием излучателей, на примере прямоугольной активной фазированной антенной решетки

(АФАР) с рабочей длиной волны 3 см и следующим количеством излучателей: 64 шт. в азимутальной плоскости, 8 шт. в угломестной плоскости.

Вычисления коэффициента системы плоской ФАР осуществляется суммированием полей всех отдельных элементов излучения. При этом для каждого элемента излучения, находящегося в плоскости ФАР в точке с координатами  $x_n$ ,  $y_n$ , набег фазы вычисляется по формуле:

$$\psi_{xy} = 57,3 \cdot k \cdot (x_n \cdot \sin(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) + y_n \cdot \sin(\vartheta) \cdot \sin(\varphi)),$$

где  $k$  – волновое число;

$x_n$ ,  $y_n$  – координаты расположения излучателя по оси  $X$  (азимутальная плоскость) и по оси  $Y$  (угломестная плоскость) соответственно;

$\varphi$  – угол между осями  $y$  и  $z$ , вектор ортогонален проекции на плоскость  $yz$  (рисунок 1);

$\vartheta$  – угол между осью  $x$  и плоскостью  $yz$  [7].

Расположение углов  $\vartheta$  и  $\varphi$  представлено на рисунке 1.

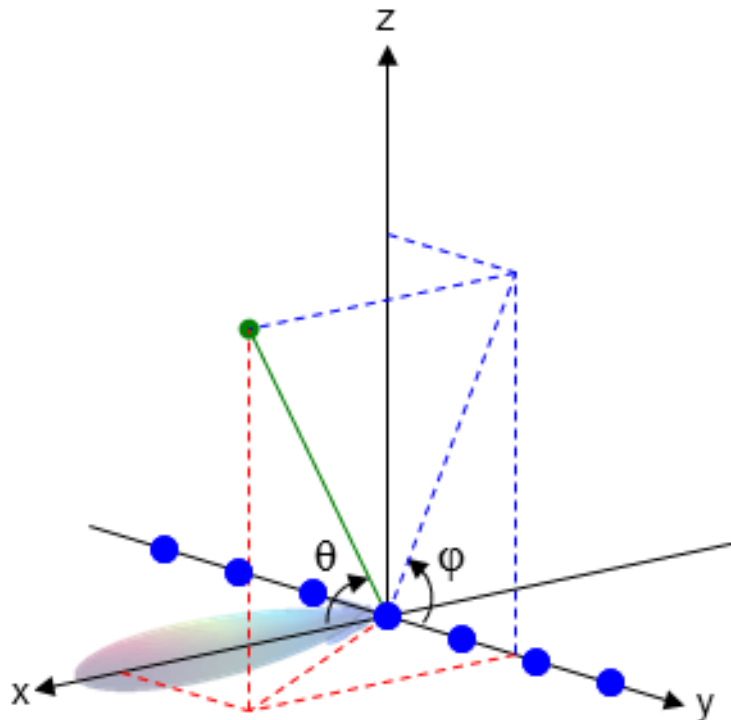


Рисунок 1 – Расположение углов между осями  $x$ ,  $y$  и  $z$  системы координат

Анализ влияния электрического сканирования на параметры антенной решетки проводился на плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетке. В решетке используются тракты передачи сигнала с дискретными фазовращателями, дискрет равен 5,625 градуса. Анализ проводился в системе автоматизированного проектирования методом конечных элементов. Ниже приведены результаты анализа в графическом виде: рассчитана ДН АФАР с равномерным фазовым распределением (рисунок 2), а также ДН при отклонении главного луча на 0,02, 5, 20, 45 и 60 градусов в азимутальной плоскости (рисунки 3-7 соответственно). В угломестной плоскости результаты не приводятся, так как по техническому заданию отклонение требуется в пределах  $\pm 10$  градусов, что не требует корректировки.

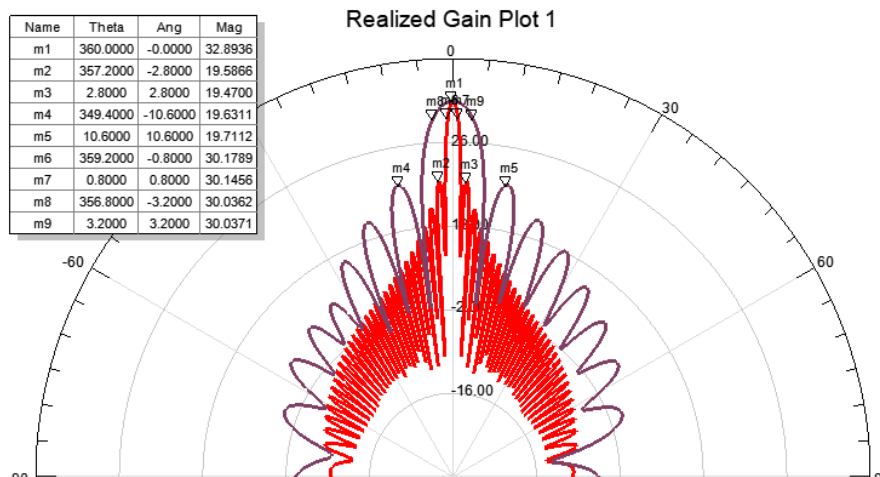


Рисунок 2 – Диаграмма направленности АФАР с равномерным распределением

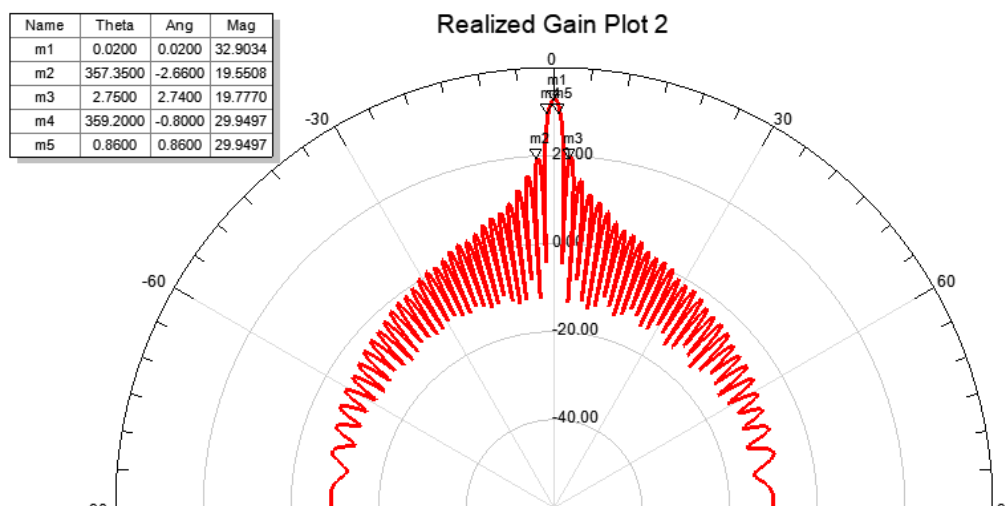


Рисунок 3 – Диаграмма направленности АФАР с отклонением луча на 0,02 градуса

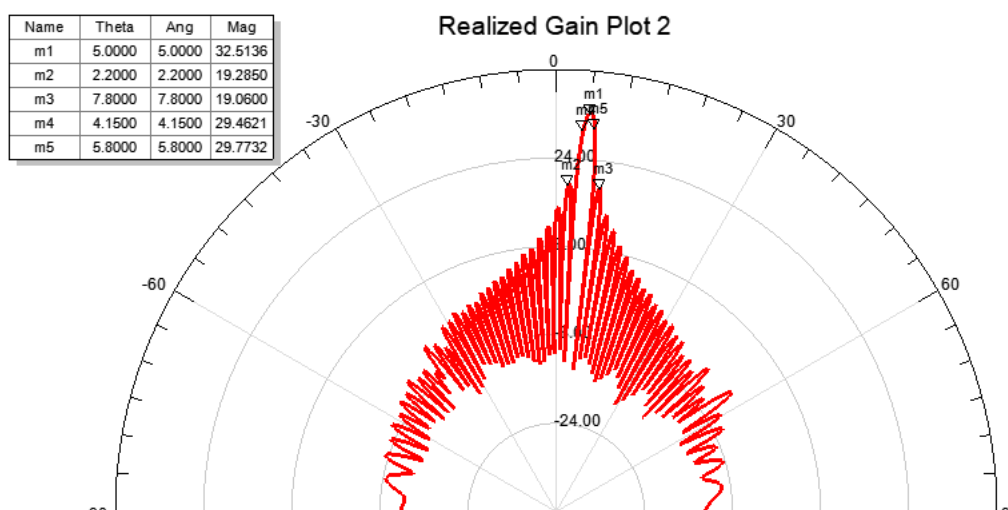


Рисунок 4 – Диаграмма направленности АФАР с отклонением луча на 5 градусов



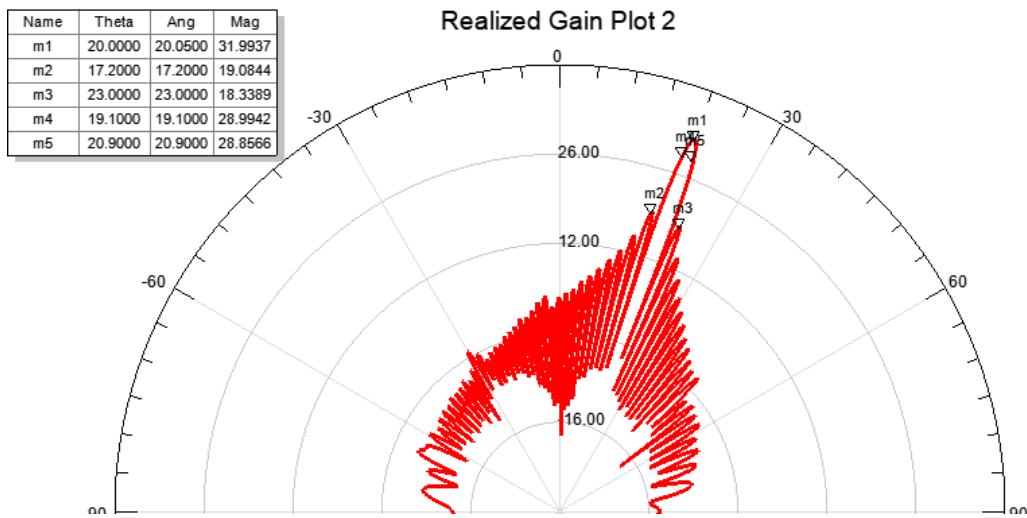


Рисунок 5 – Диаграмма направленности АФАР с отклонением луча на 20 градусов

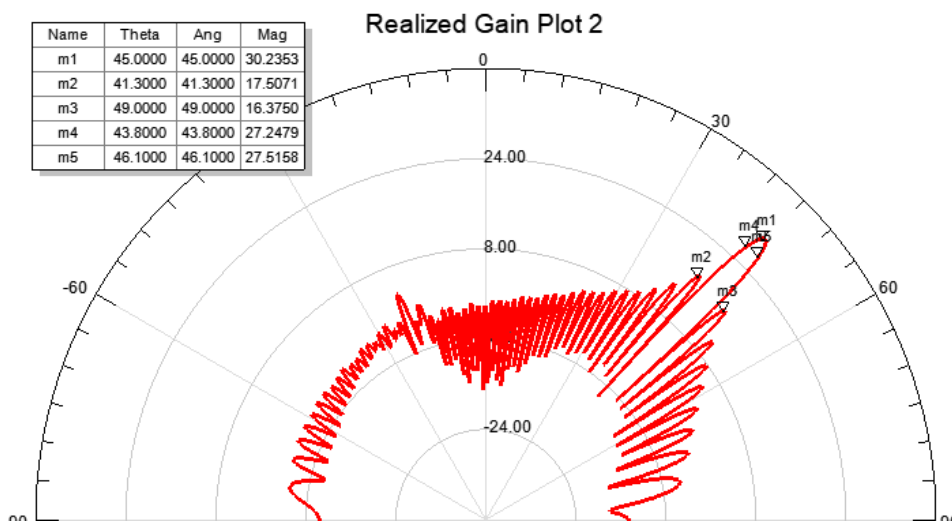


Рисунок 6 – Диаграмма направленности АФАР с отклонением луча на 45 градусов

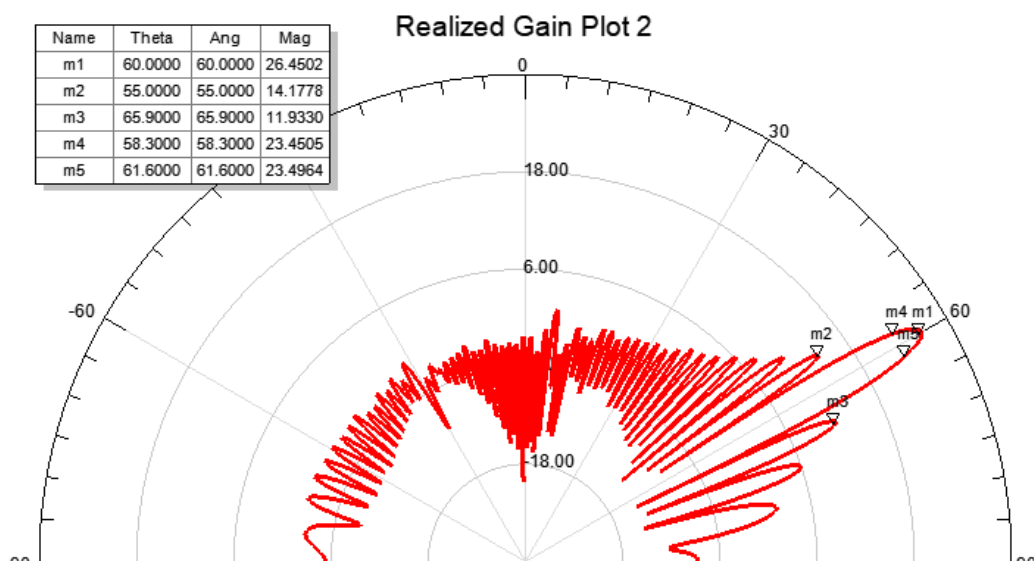


Рисунок 7 – Диаграмма направленности АФАР с отклонением луча на 60 градусов

На рисунке 2 приведены срезы диаграммы направленности антенной решетки на частоте 9 ГГц по азимуту и углу места. Дальнейший анализ производился только по азимуту, по причине малого количества излучателей по углу места. Как видно, при отклонении главного луча от нормали характеристики диаграммы направленности изменяются. Для удобства анализа они сведены в общую таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования ДН

Угол поворота, °	КУ, дБ	УБЛ, дБ	ШГЛ, °
0	32,9	13,3	1,6
0,02	32,9	13,2	1,65
5	32,5	13,2	1,65
20	32	12,9	1,8
45	30,2	12,7	2,3
60	26,45	12,3	3,3

Как видно из таблицы, отклонение луча диаграммы направленности от нормали в следствие электронного сканирования непосредственно влияет на ширину главного и уровни боковых лепестков диаграммы направленности антенны. При отклонении луча до 60 градусов КУ падает на 6,45 дБ, УБЛ ухудшается на 1 дБ, а ШГЛ по уровню 0.5 увеличивается более чем в два раза.

Для корректировки характеристик диаграммы направленности предлагается использовать амплитудное распределение напряженности электромагнитного поля

косинус квадрат на пьедестале, так как именно оно наиболее вариативно в части выбора высоты пьедестала:

$$A_{n,m} = \left( \Delta x + (1 - \Delta x) \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi n}{N-1} \right) \right) \left( \Delta y + (1 - \Delta y) \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi m}{M-1} \right) \right),$$

где  $\Delta x, \Delta y$  – высота пьедестала по оси  $x$  и  $y$  соответственно;

$n, m$  – расстояние между центрами излучателей, расположенных по оси  $x$  и  $y$  соответственно;

$N, M$  – количество излучателей, расположенных по оси  $x$  и  $y$  соответственно [7].

Для анализа влияния амплитудного распределения на характеристики антенны были взяты фиксированные значения пьедестала по оси  $X$ : 0,5, 0,3, 0,15, 0,1, по оси  $Y$ : 0,5, 0,3, 0,1, 0,05, 0,01.

Расчеты напряженности электромагнитного поля для каждого случая были произведены с помощью программного обеспечения Matlab. Электромагнитный анализ антенной решетки для оценки характеристик диаграммы направленности был произведен в системе автоматизированного проектирования методом конечных элементов. Результаты анализа для удобства сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета амплитудного распределения

Тип амплитудного распределения	Высота пьедестала		КУ, дБ	УБЛ, дБ		ШГЛ, °	
	по оси	по оси		аз	ум	аз	ум
	Y	X					
Равномерное	–	–	32,9	13,2	12,9	1,6	6,61

Косинус- квадрат на пьедестале	0,5	0,5	32,8	16,4	16,95	1,8	6,4
	0,3	0,3	32,3	19,1	20,2	1,9	6,4
	0,1	0,1	31,7	23,75	28,3	2	8,3
	0,05	0,15	31,9	24,7	25,3	2,1	7,95
	0,05	0,1	31,6	24,7	28,8	2,1	8,2
	0,01	0,1	31,3	24	28,4	2,2	8,3

Как видно из таблицы, высотой пьедестала по оси X и Y можно влиять на перечисленные выше основные характеристики диаграммы направленности. Очевидно, что желание уменьшить уровень боковых лепестков сказывается на коэффициенте усиления и ширине главного лепестка, но именно эту зависимость предлагается использовать в целях корректировки диаграммы направленности.

Необходимо заведомо определиться с начальным амплитудным распределением косинус-квадрат на пьедестале для равномерного фазового распределения, затем проанализировать искажение характеристик рассчитанных фазовых распределений для поворота луча. Выбор высоты пьедестала для каждого направления луча определит конечные характеристики антенного полотна.

Для наглядности на рисунке 8 приведено графическое отображение амплитудного распределения косинус квадрат на пьедестале 0,01 по оси Y и 0,1 по оси X.

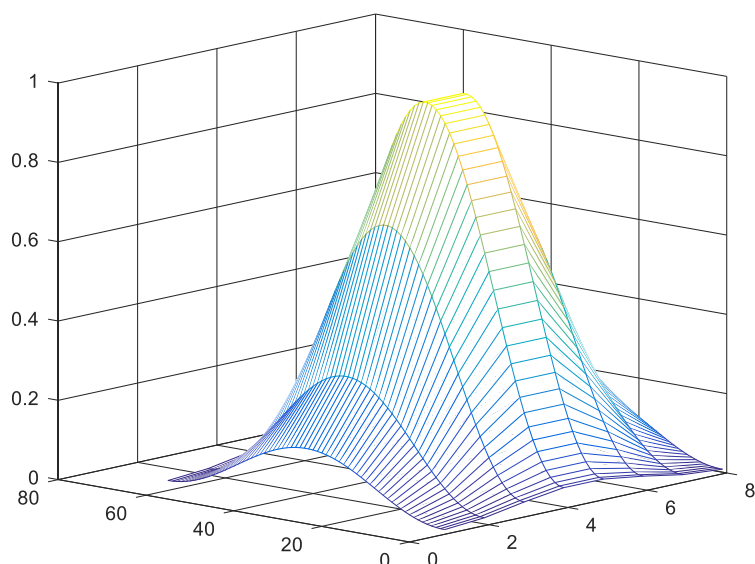


Рисунок 8 – Графическое отображение амплитудного распределения косинус  
квадрат на пьедестале

Из рисунка 8 следует, что заданное количество излучателей в угломестной плоскости (8 шт.) ограничивает возможности реализации амплитудных распределений. Увеличение количества излучателей является одним из способов улучшения точности результатов корректировок искажений ДН.

### **Выводы**

В данной работе предложена методика корректировки искажений ДН, вызванных взаимным влиянием излучателей. Для реализации этой методики необходима разработка алгоритма изменения амплитудного распределения напряженности электромагнитного поля от фазового распределения напряженности электромагнитного поля для компенсации искажений параметров, вызванных отклонением луча диаграммы направленности.

При разработке алгоритма необходимо исходные данные: количество лучей, минимальный шаг сканирования, точность установки луча. Так как результатом

реализации данного алгоритма является массив данных, необходимо обратить особое внимание на учет минимальной необходимой памяти для хранения исходных данных для алгоритма.

К недостаткам реализации данной методики относится заведомое ухудшение части характеристик в угоду другим и необходимость хранения большого массива данных. То есть имеет место частный случай решения многокритериальной задачи распределения требований.

Реализация методики позволяет скорректировать параметры диаграммы направленности, имеющие искажения вследствие изменения взаимного влияния излучателей, получить требуемые характеристики АФАР. Применение методики позволяет использовать режимы работы РЛС, описанные в [8-24], требующие сохранения параметров антенной решетки неизменными.

## **Список источников**

1. Bestugin A.R., Kirshina I.A., Ryzhikov M.B., Svanidze V.G. Computational-oriented mathematical model of direct and inverse target direction finding characteristics in airborne weather radar based on multi-channel phased antenna array // Proceedings of the 2019 Antennas Design and Measurement International Conference, ADMInC 2019, pp. 62-66. DOI: [10.1109/ADMInC47948.2019.8969115](https://doi.org/10.1109/ADMInC47948.2019.8969115)
2. Sentsov A.A., Ivanov S.A., Nenashev S.A., Turnetskaya E.L. Classification and Recognition of Objects on Radar Portraits Formed by the Equipment of Mobile Small-Size Radar Systems // Wave Electronics and its Application in Information and

Telecommunication Systems (WECONF), 2020, pp. 1–4. DOI:  
[10.1109/WECONF48837.2020.9131475](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131475)

3. Polyakov V.B., Ignatova N.A., Sentsov A.A. Multi-Criteria Selection of the Radar Data Compression Method // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2021, pp. 1-4. DOI:  
[10.1109/WECONF51603.2021.9470755](https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470755)

4. Novikova Y.A., Ryzhikov M.B. Research of requirements for the antenna pattern of the airborne weather radar to the reduce of false detection of hazards turbulence areas in low-altitude flight conditions // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2020, pp. 1–4. DOI:  
[10.1109/WECONF48837.2020.9131533](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131533)

5. Ryzhikov M.B., Kryachko A.F., Svanidze V.G. Measurement of angular coordinates of point targets in the onboard weather navigation radar based on a multi-channel phased antenna array with an assimetic pattern // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2020, pp. 1–4. DOI:  
[10.1109/WECONF48837.2020.9131533](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131533)

6. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием (Введение в теорию). – М.: Сайнс-Пресс, 2002. - 232 с.

7. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1989. - 352 с.

8. Верба В.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р. и др. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства. - М.: Радиотехника, 2014. - 576 с.

9. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. - М.: Радиотехника, 2014. - 525 с.
10. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г. и др. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. - М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. - 1112 с.
11. Паршуткин А.В., Левин Д.В., Галандзовский А.В. Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех // Информационно-управляющие системы. 2020. № 6. С. 22–31.
12. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths and Wolfgang Koch (Eds.). Novel Radar Techniques and Applications // Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar, SciTech Publishing, 2017, vol. 1, 952 p.
13. Лучков Н.В. Анализ объединения данных РЛС, их временная и пространственная привязка // Автоматизированные системы управления. 2015. № 1 (39). С. 21-26.
14. Nenashev V.A., Sergeev M.B., Sentsov A.A., Grigoriev E.K. Triple-Station System of Detecting Small Airborne Objects in Dense Urban Environment // Smart Innovation, Systems and Technologies, Singapore, 2021, vol. 238, pp. 83-93. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2765-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2765-1_7)



15. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение в передней зоне обзора бортовой радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны // Радиотехника. 2004. № 1. С. 47–49.
16. Bhattacharyya S. et al. Recent Trends in Signal and Image Processing, Singapore, Springer, 2019, 224 p.
17. Richard Klemm (ed.). Novel Radar Techniques and Applications. Vol. 2. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion, London, Scitech Publishing, 2017, 553 p.
18. Блаунштейн Н.Ш., Сергеев М.Б., Шепета А.П. Прикладные аспекты электродинамики. – СПб.: Аграф+, 2016. – 272 с.
19. Blaunstein N., Christodoulou C., Sergeev M. Introduction to Radio Engineering, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2016, 286 p.
20. Shepeta A.P., Nenashev V.A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars // Information and Control Systems, 2020, no. 2(105), pp. 31-36. DOI: [10.31799/1684-8853-2020-2-31-36](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-2-31-36)
21. Генералов А.Г., Гаджиев Э.В., Салихова М.Р. Применение спиральных антенн для бортовых систем и комплексов // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105685>
22. Лунёв Е.М., Неретин Е.С., Дяченко С.А. Дуброво А.И. Разработка программно-алгоритмического обеспечения прототипа системы синтетического видения для перспективных объектов авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66366>

23. Дяченко С.А. Разработка модели системы синтетического видения для перспективных гражданских самолётов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91966>

24. Звонарев В.В., Мороз А.В., Шерстюк А.В. Методика оценивания характеристик диаграммы направленности ультразвукового локатора в режиме синтезирования апертуры антенны // Труды МАИ. 2019. № 106. <https://trudymai.ru/published.php?ID=105683>

## References

1. Bestugin A.R., Kirshina I.A., Ryzhikov M.B., Svanidze V.G. Computational-oriented mathematical model of direct and inverse target direction finding characteristics in airborne weather radar based on multi-channel phased antenna array, *Proceedings of the 2019 Antennas Design and Measurement International Conference, ADMInC 2019*, pp. 62-66. DOI: [10.1109/ADMInC47948.2019.8969115](https://doi.org/10.1109/ADMInC47948.2019.8969115)

2. Sentsov A.A., Ivanov S.A., Nenashev S.A., Turnetskaya E.L. Classification and Recognition of Objects on Radar Portraits Formed by the Equipment of Mobile Small-Size Radar Systems, *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1–4. DOI: [10.1109/WECONF48837.2020.9131475](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131475)

3. Polyakov V.B., Ignatova N.A., Sentsov A.A. Multi-Criteria Selection of the Radar Data Compression Method, *2021 Wave Electronics and its Application in Information and*

*Telecommunication Systems (WECONF)*, 2021, pp. 1-4. DOI: [10.1109/WECONF51603.2021.9470755](https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470755)

4. Novikova Y.A., Ryzhikov M.B. Research of requirements for the antenna pattern of the airborne weather radar to the reduce of false detection of hazards turbulence areas in low-altitude flight conditions, *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1-4. DOI: [10.1109/WECONF48837.2020.9131533](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131533)

5. Ryzhikov M.B., Kryachko A.F., Svanidze V.G. Measurement of angular coordinates of point targets in the onboard weather navigation radar based on a multi-channel phased antenna array with an assimetic pattern, *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1-4. DOI: [10.1109/WECONF48837.2020.9131533](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131533)

6. Vendik O.G., Parnes M.D. *Antenny s elektricheskim skanirovaniem* (Antennas with electric scanning), Moscow, Sains-Press, 2002, 232 p.

7. Kocherzhevskii G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. *Antenno-fidernye ustroistva* (Antenna-feeder devices), Moscow, Radio i svyaz', 1989, 352 p.

8. Verba B.C., Tatarskii B.G., Il'chuk A.R. et al. *Radiolokatsionnye sistemy aviatsionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoi poverkhnosti i vozdushnogo prostranstva* (Radar systems of aerospace monitoring of the Earth's surface and airspace), Moscow, Radiotekhnika, 2014, 576 p.

9. Verba B.C. *Aviatsionnye kompleksy radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Printsipy postroeniya, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniya* (Aviation complexes of

radar surveillance and guidance. Principles of construction, problems of development and features of functioning), - Moscow, Radiotekhnika, 2014, 525 p.

10. Dudnik P.I., Kondratenkov G.S., Tatarskii B.G. et al. *Aviatsionnye radiolokatsionnye komplekсы i sistemy* (Aviation radar complexes and systems), Moscow, Izd-vo VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2006, 1112 p.

11. Parshutkin A.V., Levin D.V., Galandzovskii A.V. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2020, no. 6, pp. 22–31.

12. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths and Wolfgang Koch (Eds.). *Novel Radar Techniques and Applications, Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*, SciTech Publishing, 2017, vol. 1, 952 p.

13. Luchkov N.V. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya*, 2015, no. 1 (39), pp. 21-26.

14. Nenashev V.A., Sergeev M.B., Sentsov A.A., Grigoriev E.K. Triple-Station System of Detecting Small Airborne Objects in Dense Urban Environment, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, Singapore, 2021, vol. 238, pp. 83-93. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2765-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2765-1_7)

15. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. *Radiotekhnika*, 2004, no. 1, pp. 47–49.

16. Bhattacharyya S. et al. *Recent Trends in Signal and Image Processing*, Singapore, Springer, 2019, 224 p.

17. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications. Vol. 2. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion*, London, Scitech Publishing, 2017, 553 p.

18. Blaunshtein N.Sh., Sergeev M.B., Shepeta A.P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* (Applied aspects of electrodynamics), Saint Petersburg, Agraf+, 2016, 272 p.
19. Blaunstein N., Christodoulou C., Sergeev M. *Introduction to Radio Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2016, 286 p.
20. Shepeta A.P., Nenashev V.A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars, *Information and Control Systems*, 2020, no. 2(105), pp. 31-36. DOI: [10.31799/1684-8853-2020-2-31-36](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-2-31-36)
21. Generalov A.G., Gadzhiev E.V., Salikhova M.R.. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105685>
22. Lunev E.M., Neretin E.S., Dyachenko S.A. Dubrovo A.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66366>
23. Dyachenko S.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91966>
24. Zvonarev V.V., Moroz A.V., Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105683>

Статья поступила в редакцию 31.05.2022

Статья после доработки 03.06.2022

Одобрена после рецензирования 15.06.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 31.05.2022; approved after reviewing on 15.06.2022; accepted for publication on 25.08.2022