

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ АНТЕНН

**А. Н. Якимов**

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия  
y\_alder@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* При автоматизированном проектировании антенн различного назначения одной из основных решаемых задач является контроль параметров диаграмм направленности этих антенн в процессе их оптимизации для обеспечения требований технического задания. К таким параметрам обычно относят ширину главного лепестка амплитудной диаграммы направленности на уровне половинной или нулевой мощности, а также максимальный уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны. При проектировании остронаправленных микроволновых антенн требования к точности определения параметров амплитудной диаграммы направленности оказываются существенными и необходимы дополнительные исследования возможности использования известных математических методов для решения этой задачи. *Материалы и методы.* Предложен подход к определению параметров амплитудной диаграммы направленности антенны при ее автоматизированном проектировании, основанный на использовании численного метода поиска максимума или минимума функций действительных переменных, описывающих эту диаграмму направленности. Показаны возможности программной реализации полученных решений в системе MATLAB. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования возможностей определения ширины главного лепестка амплитудной диаграммы направленности на заданном уровне численным методом касательных Ньютона. Дана оценка погрешности определения ширины диаграммы направленности, рассчитанной с использованием этого метода. Показана перспективность использования метода касательных Ньютона, а также матричных представления и методов анализа матриц для контроля ширины главного лепестка амплитудной диаграммы направленности и уровня ее боковых лепестков при автоматизированном проектировании остронаправленных микроволновых антенн.

**Ключевые слова:** микроволновая антенна, диаграмма направленности, главный лепесток, боковые лепестки, контроль параметров, численный метод

**Для цитирования:** Якимов А. Н. Использование численного метода для контроля параметров диаграмм направленности при автоматизированном проектировании антенн // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 80–85. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-10

## USING THE NUMERICAL METHOD TO CONTROL OF PARAMETERS OF RADIATION PATTERNS AT AUTOMATED ANTENNA DESIGN

**A.N. Yakimov**

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia  
y\_alder@mail.ru

**Abstract.** *Background.* In the automated design of antennas for various purposes, one of the main tasks to be solved is to control of parameters of the radiation patterns of these antennas in the process of optimizing them to meet requirements of the technical specification. These parameters usually include the width of the main lobe of the amplitude radiation pattern at half or zero level power, as well as the maximum level of the side lobes of the radiation pattern of the antenna. *Materials and methods.* An approach to determining the parameters of the amplitude radiation pattern of an antenna in its automated design is proposed, based on the use of a numerical method for searching for the maximum or minimum of functions of real variables describing this radiation pattern. The possibilities of software implementation of the obtained solutions in the MATLAB system are shown. *Results and conclusions.* The results of a model study of the possibilities of determining the width of the main lobe of the amplitude radiation pattern at a given level using the numerical method of Newton tangents are presented. An estimate of the error in determining the width of the radiation

pattern calculated use this method is given. The prospects of using the Newton tangent method, as well as matrix representations and matrix analysis methods to control of the width of the main lobe of the amplitude radiation pattern and the level of its side lobes in the automated design of acutely directional microwave antennas are shown.

**Keywords:** microwave antenna, radiation pattern, main lobe, side lobes, control of parameters, numerical method

**For citation:** Yakimov A.N. Using the numerical method to control of parameters of radiation patterns at automated antenna design. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):80–85. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-10

## Введение

Одной из основных задач, решаемых для обеспечения требований технического задания при автоматизированном проектировании антенн различного назначения, является контроль параметров диаграмм направленности (ДН) этих антенн в процессе их оптимизации. К таким параметрам обычно относят ширину главного лепестка амплитудной ДН на уровне половинной или нулевой мощности, а также максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН антенны. При этом возникает задача математического синтеза ДН, предполагающая нахождение амплитудно-фазового распределения источников возбуждения в антенне, относящаяся к некорректным задачам математической физики, решение которых может быть получено лишь с некоторым приближением [1–3].

В рамках автоматизированного проектирования микроволновой антенны при решении задачи синтеза исходным соотношением является операторное уравнение вида

$$Au = f, \quad u \in U, \quad f \in F, \quad (1)$$

где  $u$  – искомое распределение источников возбуждения антенны;  $f$  – ДН антенны – элементы нормированных пространств  $U, F$  соответственно;  $A$  – интегральный оператор, который математически описывает существующий физический процесс трансформации распределения возбуждения антенны в поле излучения дальней зоны, с областью определения  $D(A) \subset U$  и областью значений  $R(A) \subset F$ . При этом обратный оператор  $A^{-1}$  многозначный и не является непрерывным.

Известно, что задача определения решения  $u$  из пространства  $U$  по «исходным данным»  $f$  из пространства  $F$  является корректно поставленной на паре метрических пространств  $(U, F)$ , только когда выполняются условия корректности Адамара [4]:

- 1) для всякого элемента  $f \in F$  существует решение  $u$  из пространства  $U$ ;
- 2) решение определяется однозначно;
- 3) задача устойчива на пространствах  $U$  и  $F$ .

Особенностью решения некорректных задач, к которым относится задача синтеза антенны, является невозможность оценить близость приближенного решения задачи к точному. Однако если известно, что точное решение задачи существует и принадлежит некоторому компактному множеству, то задача становится корректно поставленной и появляется возможность оценки погрешности решения [5].

Аналитические зависимости между геометрическими или электрофизическими характеристиками антенн и параметрами формируемых ими ДН установлены лишь для простейших типов антенн и ограниченного числа видов распределений источников возбуждения в них [6, 7].

Обычно в системах автоматизированного проектирования антенн задачу синтеза решают через анализ: путем расчета ДН антенн по распределению источников возбуждения в антенне, что позволяет исследовать влияние вида распределения, а также геометрических и электрофизических характеристик антенны на ее ДН в процессе оптимизации. При этом на каждом шаге оптимизации требуется оценка близости параметров формируемых антенной ДН с их значениями в техническом задании [1].

Для остронаправленных микроволновых антенн требования к точности определения параметров амплитудной ДН оказываются существенными и возникает необходимость дополнительных исследований возможности использования известных математических методов для решения этой задачи.

## Постановка задачи

Рассмотрим микроволновую антенну с остронаправленной ДН. Такую ДН можно считать разделяющейся, что позволяет принять допущение об одинаковой форме ее горизонтального сечения  $F(\varphi)$  для разных фиксированных значений угла  $\theta$  в вертикальной плоскости. При этом вертикальное

сечение ДН  $F(\theta)$  имеет одинаковую форму для разных фиксированных значений угла  $\varphi$  в горизонтальной плоскости.

Пространственная осесимметричная амплитудная ДН остронаправленной антенны  $F(\varphi, \theta)$  в этом случае полностью определяется функциями, описывающими ДН в ее главных плоскостях:

$$F(\varphi, \theta) = F(\varphi)F(\theta), \quad (2)$$

где  $F(\varphi, \theta)$  – функция, описывающая пространственную ДН антенны по полю;  $F(\varphi)$ ,  $F(\theta)$  – функции, описывающих ДН по полю в горизонтальной (азимутальной) и вертикальной (угломестной) плоскостях соответственно при  $\varphi = 0^\circ$  и  $\theta = 0^\circ$ ;  $\varphi$ ,  $\theta$  – углы относительно оси излучения антенны в направлении точки наблюдения в горизонтальной и вертикальной плоскостях [8].

Таким образом, появляется возможность управления формой ДН антенны за счет изменения амплитудно-фазового распределения электрической составляющей электромагнитного поля в каждой из плоскостей декартовой системы координат отдельно в процессе ее оптимизации.

Перспективным подходом к контролю параметров ДН антенны при ее автоматизированном проектировании является использование численных методов поиска максимума или минимума действительных переменных. Эти методы позволяют с высокой точностью определить аргумент функции одной переменной в точке ее перегиба. К этому классу функций относят и функции, описывающие ДН в ее главных плоскостях. Среди численных методов, позволяющих решать подобные задачи, одним из перспективных является метод касательных Ньютона [9, 10].

### Решение задачи

Рассмотрим возможности определения методом касательных Ньютона параметров амплитудной остронаправленной ДН микроволновой антенны в ее главных плоскостях на примере ДН в горизонтальной плоскости (рис. 1).

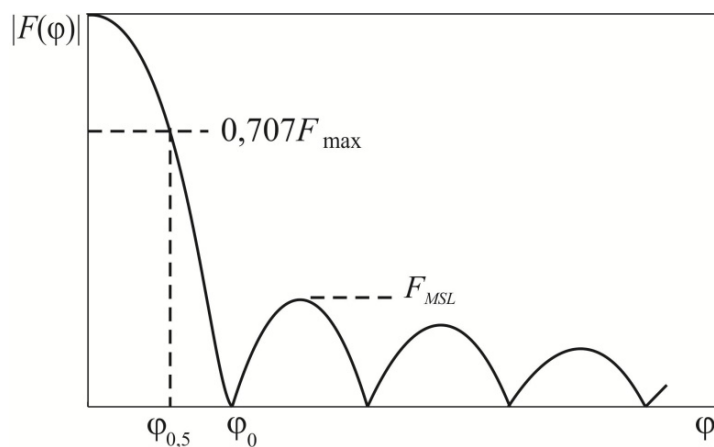


Рис. 1. Амплитудная осесимметричная ДН остронаправленной антенны

Здесь  $\varphi_{0,5}$ ,  $\varphi_0$  – половина ширины главного лепестка ДН на уровне половинной мощности (соответствует  $0,707 F_{\max}$ , т.е.  $0,707$  от максимального уровня главного лепестка ДН по полю) и на уровне нулевой мощности соответственно;  $F_{MSL}$  – максимальный уровень боковых лепестков ДН.

Для такой антенны при равноамплитудном синфазном распределении возбуждающих источников в качестве математической модели амплитудной ДН антенны  $F(\varphi)$  по полю (рис. 2) может быть выбрана функция [1, 7]

$$F(\varphi) = \frac{\sin[(kL/2)\sin\varphi]}{(kL/2)\sin\varphi}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол относительно оси излучения антенны в направлении точки наблюдения в горизонтальной плоскости;  $L$  – линейный горизонтальный размер излучающей поверхности антенны;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина излучаемой электромагнитной волны.

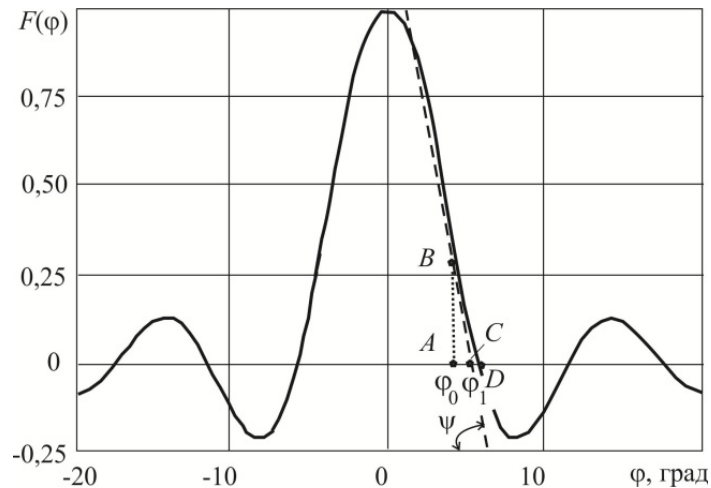


Рис. 2. Иллюстрация к определению ширины осесимметричной ДН методом касательных Ньютона

Для определения ширины главного лепестка ДН на уровне половинной мощности  $2\varphi_{0,5}$  в соответствии с методом касательных Ньютона выполняются следующие процедуры. Задается  $BC$  – касательная в точке  $B$  к функции  $F(\varphi)$ , описывающей ДН в горизонтальном сечении. Определяются  $A$  – проекция точки  $B$  на ось  $\varphi$ ,  $C$  – точка, в которой касательная пересекает ось  $\varphi$ ,  $\psi$  – угол между  $BC$  и осью  $\varphi$ . Тогда  $OC$  является аппроксимацией отрезка  $OD$ , соответствующего точке  $D$  и половине ширины ДН на нулевом уровне  $\varphi_0$ .

Таким образом, задавая угол  $\varphi_0$ , соответствующий точке  $B$ , можно, исходя из геометрических построений, получить приближенное значение  $\varphi_1$  половины ширины ДН на нулевом уровне, соответствующее точке  $C$ . Учитывая, что в соответствии с рис. 2  $OC = OA + AC$  и  $AB / AC = \operatorname{tg} \psi = F'(\varphi_0)$ , для точки  $\varphi_0$  получим  $AC = AB / F'(\varphi_0) = F(\varphi_0) / F'(\varphi_0)$ . Принимая во внимание отрицательный знак производной функции  $F(\varphi)$  в области анализа, приближенное значение  $\varphi_1$  опишется выражением

$$\varphi_1 = \varphi_0 - F(\varphi_0) / F'(\varphi_0). \quad (4)$$

Величина  $\varphi_1$  может быть исходным значением для дальнейшей более точной аппроксимации. Итерации могут быть продолжены до тех пор, пока для двух последующих аппроксимаций не будет достигнута заданная точность. При этом расчетная формула в общем случае примет вид

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n - F(\varphi_n) / F'(\varphi_n), \quad (5)$$

где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ ,  $\varphi_0, \varphi_n, \varphi_{n+1}$  – промежуточные приближенное и уточнение значения половины ширины ДН на нулевом уровне.

Аналогичная процедура может быть применена и для определения ширины ДН на уровне половинной мощности, т.е. 0,707 максимального нормированного уровня 1 по полю. При этом функция, описывающая ДН, должна быть представлена как  $F_1(\varphi) = F(\varphi) - 0,707$ , т.е. уровень анализа ДН должен быть приведен к нулю.

### Полученные результаты

В качестве тестовой задачи выбрано определение ширины ДН линейной антенны размером  $L = 10 \lambda$  с равноамплитудным синфазным распределением источников излучения. При расчете по известным формулам [7] ширины ДН на уровне половинной ( $2\varphi_{0,5} = 50,8 \lambda/L$ ) и нулевой ( $2\varphi_0 = 114,8 \lambda/L$ ) мощности для заданного размера антенны  $L$  получаем  $2\varphi_{0,5} = 5,08^\circ$ ,  $2\varphi_0 = 11,48^\circ$ . Метод касательных Ньютона, реализованный в системе MATLAB для заданной точности  $|F(\varphi)| < 10^{-3}$  и начальной точки аппроксимации, равной  $\varphi_0 = 0,1 (2\varphi_{0,5})$ , позволил получить  $2\varphi_{0,5} = 5,078^\circ$  и  $2\varphi_0 = 11,478^\circ$ .

Таким образом, отклонение ширины ДН, рассчитанной по методу касательных Ньютона, от соответствующего значения, полученного по стандартной формуле, составило  $0,002^\circ$ . Эти данные подтверждают высокую точность метода, достаточную для большинства практических расчетов.

### Заключение

Предложенный подход позволяет определить не только ширину ДН, но и УБЛ ДН, если предварительно оценить точку перехода от главного к боковому лепестку или от одного бокового лепестка к другому и задать начальную точку аппроксимации для определения экстремума функции, описывающей ДН на заданном отрезке. Другим подходом к расчету указанных параметров, реализованным в большинстве математических пакетов прикладных программ, является использованная для проведения расчетов представления данных массивом. Например, в системе MATLAB для нахождения максимального и минимального элементов массива, представленного в виде матрицы, существуют специальные функции `max` и `min` соответственно [11].

Этот подход может быть также использован и для контроля параметров ДН, описываемых при автоматизированном проектировании разными функциями в области главного и боковых лепестков [12].

Полученные результаты дают основание рекомендовать метод касательных Ньютона, а также матричные представления и методы анализа матриц для использования в автоматизированном проектировании остронаправленных микроволновых антенн с целью контроля ширины ДН и уровня ее боковых лепестков.

### Список литературы

1. Воскресенский Д. И., Кременецкий С. Д., Гринев А. Ю., Котов Ю. В. Автоматизированное проектирование антенн и устройств. М. : Радио и связь, 1988. 240 с.
2. Минкович. Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. М. : Сов. радио, 1969. 296 с.
3. Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. М. : ИПРЖР, 2002. Кн. 1. 72 с.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1974. 224 с.
5. Титаренко В. Н., Ягола А. Г. Метод отсечения выпуклых многогранников и его применение к некорректным задачам // Вычислительные методы и программирование. 2000. Т. 1, вып. 1. С. 8–13.
6. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пonomарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д. И. Воскресенского. М. : Радиотехника, 2006. 376 с.
7. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л. : Судостроение, 1967. 518 с.
8. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
9. Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2014. 592 с.
10. Якимов А. Н. Методы определения параметров при расчете диаграммы направленности антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 74–75.
11. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. В. П. Дьяконова. М. : Нолидж, 2001. 880 с.
12. Якимов А.Н. Универсальная модель излучения микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 5–12. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-1
13. Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Зуев Д. В. [и др.]. Автоматизация визуально-измерительного контроля // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 119–126. doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-13
14. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме автоматизированного проектирования антенны вивальди для излучения сверхширокополосного электромагнитного импульса // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 87–101. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-9

### References

1. Voskresenskiy D.I., Kremenetskiy S.D., Grinev A.Yu., Kotov Yu.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie antenn i ustroystv = Computer-aided design of antennas and devices*. Moscow: Radio i svyaz', 1988:240. (In Russ.)
2. Minkovich B.M., Yakovlev V.P. *Teoriya sinteza antenn = Theory of antenna synthesis*. Moscow: Sov. radio, 1969:296. (In Russ.)
3. Zelkin E.G., Kravchenko V.F. *Zadachi sinteza antenn i novye metody ikh resheniya = Antenna synthesis problems and new methods for their solution*. Moscow: IPRZhR, 2002;Bk.1:72. (In Russ.)
4. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach = Methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka, 1974:224. (In Russ.)
5. Titarenko V.N., Yagola A.G. The method of clipping convex polyhedra and its application to ill-posed problems. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye = Computational methods and programming*. 2000;1(1):8–13. (In Russ.)
6. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroystva SVCh i anteny = Microwave devices and antennas*. Moscow: Radiotekhnika, 2006:376. (In Russ.)
7. Kyun R. *Mikrovolnovye anteny = Microwave antennas*. Leningrad: Sudostroenie, 1967:518. (In Russ.)
8. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)

9. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2014:592. (In Russ.)
10. Yakimov A.N. Methods for determining parameters when calculating the antenna radiation pattern. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:74–75. (In Russ.)
11. D'yakonov V.P., Abramenkova I.V., Kruglov V.V. *MatLAB 5.3.1 s paketami rasshireniy = MatLAB 5.3.1 with extension packages*. Moscow: Nolidzh, 2001:880. (In Russ.)
12. Yakimov A.N. Universal model of microwave antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):5–12. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-1
13. Tulegulov A.D., Ergaliev D.S., Zuev D.V. et al. Automation of visual and measuring control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):119–126. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-4-13
14. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of computer-aided design of a Vivaldi antenna for ultra-broadband electromagnetic pulse radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):87–101. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-9

### Информация об авторах / Information about the authors

**Александр Николаевич Якимов**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры конструирования  
и технологий электронных и лазерных средств,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)  
E-mail: y\_alder@mail.ru

**Aleksandr N. Yakimov**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of construction  
and technology of electronic and laser equipment,  
Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation  
(67 Bolshaya Morskaya street,  
Saint Petersburg, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 25.10.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2024**

**Принята к публикации/Accepted 30.11.2024**