

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ВОКСЕЛЬНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

А. Б. Яров¹, А. В. Толлок^{1,2}, А. Е. Панкова³, А. Е. Ченцов³

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Россия, 127055, г. Москва, Вадковский пер., 1

²Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65

³Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова,
Россия, 170100, г. Тверь, ул. Жигарева, 50

В исследовании разработана усовершенствованная методика построения точных геометрических моделей зон обнаружения радиолокационных станций наземного базирования. Основной акцент сделан на интеграции функционально-воксельного подхода. Аналитическое описание диаграммы направленности задаётся через кусочно-заданные функции с углами $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$. Учтено преобразование между полярной и декартовой системами координат, а также применены R-функции для объединения используемых аналитических уравнений. Моделирование осуществляется с учётом интерференционного множителя земли с использованием следующих вычислительных методов: разложение матриц 5×5 на подматрицы 4×4 методом Лапласа; построение локальных аппроксимирующих плоскостей с нормированием коэффициентов. В работе разработаны 2D-модели с максимальной дальностью обнаружения 125,5 км, а также построены 3D-модели. В связи с использованием функционально-воксельного метода были построены базовые M-образы локальных характеристик. Точность моделирования соответствует показаниям функционально-воксельного метода, следовательно, значения модели рассчитываются в каждой точке и поддерживают непрерывность в зависимости от используемого масштаба.

Ключевые слова: функционально-воксельный метод, M-образ, R-функции, однородный вектор, локальные геометрические характеристики, диаграмма направленности, моделирование радиолокационных станций.

Для цитирования: Яров А. Б., Толлок А. В., Панкова А. Е., Ченцов А. Е. Функционально-воксельный метод для геометрического описания зоны обнаружения радиолокационной станции // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 43–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-43-50. EDN: BIQLJD.



© Яров А. Б., Толлок А. В., Панкова А. Е., Ченцов А. Е., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

FUNCTIONAL-VOXEL METHOD FOR GEOMETRIC DESCRIPTION OF A RADAR DETECTION ZONE

A. B. Yarov¹, A. V. Tolok², A. E. Pankova³, A. E. Chentsov³

¹Moscow State University of Technology "STANKIN", Russia, Moscow, Vadkovsky Ln., 1, 127055

²V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow, Profsoyuznaya St., 65, 117997

³Zhukov Air and Space Defence Academy, Russia, Tver, Zhigareva St., 50, 170100

The study presents an improved methodology for constructing precise geometric models of detection zones for ground-based radar stations. The primary focus is on integrating a functional-voxel approach. The analytical description of the radiation pattern is defined via piecewise functions with angles $\varepsilon_{\min} = 0.1^\circ$; $\varepsilon_0 = 1.7^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$. The transformation between polar and Cartesian coordinate systems is accounted for, and R-functions are applied to combine the analytical equations used. The modeling incorporates the Pattern Propagation Factor of the Earth using the following computational methods: decomposition of

5×5 matrices into 4×4 submatrices via Laplace's method and construction of local approximating planes with coefficient normalization. The study develops 2D-models with a maximum detection range of 125.5 km, as well as 3D-models. Since the functional-voxel method is employed, base M-shapes of local characteristics are constructed. The simulation accuracy aligns with functional-voxel method readings, meaning the model's values are calculated at each point while maintaining continuity, depending on the scale used.

Keywords: functional-voxel method, M-shape, R-functions, homogeneous vector, local geometric characteristics, radiation pattern, radar simulation.

For citation: Yarov A. B., Tolok A. V., Pankova A. E., Chentsov A. E. Functional-voxel method for geometric description of a radar detection zone. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 43–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-43-50. EDN: BIQLJD.



© Yarov A. B., Tolok A. V., Pankova A. E., Chentsov A. E., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В современных радиотехнических системах точное моделирование диаграмм направленности антенн играет ключевую роль [1–3]. В работе представлен поэтапный анализ формирования диаграммы направленности с использованием функционально-воксельного метода [4] для компьютерного представления. В первую очередь рассматривается базовая диаграмма направленности антенны на открытом пространстве, построенная на основе четырех функций при заданных, определяющих её, углах [5]. Далее, в модель вводится интерференционный множитель земли (ИМЗ), учитывающий переотражения от поверхности и её неидеальные свойства (комплексный коэффициент отражения Френеля) [6–8]. На заключительном этапе строится трёхмерная модель диаграммы направленности, интегрирующая пространственное распределение поля с учётом интерференционных эффектов.

Моделирование производится в программе на C++ с использованием WinAPI (<windows.h>), которая визуализирует геометрический объект в графическом окне. Реализация включает математическое описание объекта и его отрисовку через функцию SetPixel графической подсистемы Windows GDI (Graphics Device Interface).

$$\sqrt{x^2 + y^2} - \left\{ \begin{array}{ll} 1 - \frac{\varepsilon_{\min} \frac{\pi}{180} - \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)}{\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)}, & \text{при } 0 < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \varepsilon_{\min} \\ 1, & \text{при } \varepsilon_{\min} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \varepsilon_0 \\ \sin\left(\varepsilon_0 \frac{\pi}{180}\right) \operatorname{cosec}\left(\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)\right), & \text{при } \varepsilon_0 \leq \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \varepsilon_{\max} \\ x \tan\left(\varepsilon_{\max} \frac{\pi}{180}\right), & \text{при } \varepsilon_{\max} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < 90^\circ \end{array} \right. = 0, \quad (2)$$

где $\sqrt{x^2 + y^2}$ — расстояние от начала координат до границы области, выраженное через формулу преобразования; $\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)$ — угол между положительной осью Oх и радиус-вектором точки аргумента, выраженный через формулу преобразования.

Полученные функции задают необходимую область в неявном виде. Чтобы построить функционально-воксельную модель (ФВ-модель) на компьютере, необходимо привести их к предикатному виду [9].

1. Построение диаграммы направленности приёмопередающей антенны наземной обзорной радиолокационной станции

Рассмотрим функции, описывающие диаграмму направленности антенны для радиолокационных систем:

$$F(\varepsilon) = \begin{cases} 1 - \frac{\varepsilon_{\min} - \varepsilon}{\varepsilon_{\min}}, & \text{при } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{\min} \\ 1, & \text{при } \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \sin(\varepsilon_0) \operatorname{cosec}(\varepsilon), & \text{при } \varepsilon_0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{\max} \\ 0, & \text{при } \varepsilon_{\max} < \varepsilon < 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

где $F(\varepsilon)$ — базовая функция диаграммы направленности радиолокационной станции (РЛС) в вертикальной плоскости, зависящая от угла места, ε ; $\varepsilon_{\min}$ — значение минимального угла места, рад.; ε_0 — значение характеристического угла места, рад.; $\varepsilon_{\max}$ — значение максимального угла места, рад.

Так как функция задаётся для полярной системы координат, то необходимо перевести её в декартову. В данном случае функция примет следующий вид:

Для этого приравняем правую часть полученной неявной функции к переменной w . В данном случае для функции можно выделить нулевую, положительную и отрицательную зоны для заданной области значений, чтобы применять их в теоретико-множественных операциях R-функционального моделирования [10–11]. Следовательно, все четыре функции с сохранением условий возможно объединить в одну. Дадим каждой функции последовательные номера w_1, w_2, w_3, w_4 и объединим их в одну с использованием R-функции пересечения:

$$w = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2} - \sqrt{w_3^2 + (w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2})^2} - \sqrt{\left(\frac{w_1 + w_2 + w_3 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2}}{-\sqrt{w_3^2 + (w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2})^2}} \right)^2} + w_4^2. \quad (3)$$

Для получения компьютерного представления области такой функции обеспечим переход к локальной функции в точке на заданной области в пространстве аргументов, применив инструмент функционально-воксельного моделирования. Получим локальные геометрические характеристики для каждой точки области функции (3):

$$\begin{aligned} a_1 &= y_1(z_2 - z_3) - y_2(z_1 - z_3) - y_3(z_1 - z_2), \\ a_2 &= -(x_1(z_2 - z_3) - x_2(z_1 - z_3) - x_3(z_1 - z_2)), \\ a_3 &= x_1(y_2 - y_3) - x_2(y_1 - y_3) - x_3(y_1 - y_2), \\ a_4 &= -\begin{pmatrix} x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) - \\ -x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) - x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Угловые локальные геометрические характеристики вычисляются нормированием коэффициентов:

$$n_i = \frac{a_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 a_i^2}}, \quad i = 1 \dots 4, \quad (5)$$

$$M_i = \frac{P(1 + n_i)}{2}, \quad i = 1 \dots 4, \quad P = 256, \quad (6)$$

где P — выбранное разрешение палитры глубины цвета, которое пропорционально точности моделирования. Для представленной задачи достаточно использование 256 оттенков цвета.

Полученное уравнение вида $n_1 x + n_2 y + n_3 z + n_4 = 0$ является аппроксимирующей функцией или локальным представлением области функции, которое позволяет рассчитывать значение функции z в каждой точке на заданной области [12]. На основании функции (6) на рис. 1 демонстрируется наглядное представление получаемых локальных геометрических характеристик, закодированных в полутоновое значение, а на рис. 2а визуализирован график для зон положительных и отрицательных значений. Рис. 2б представляет собой диаграмму направленности, получаемую классическим расчётом для сравнения.

2. Построение двухмерной зоны обнаружения наземной обзорной РЛС с учётом отражений от плоской подстилающей поверхности и рефракции радиоволн

Эффект многолучевого распространения радиоволн, обусловленный переотражениями от земной поверхности, учитывается посредством интерференционного множителя земли $|\Phi(\epsilon)|$, представляющего собой комплексную функцию.

Для его определения необходимо учитывать высоту расположения антенны h' (подъема излучателя), коэффициент $\hat{R}_r$ (коэффициент Френеля), отражения плоской волны от плоской границы раздела двух сред, угол возвышения точки наблюдения

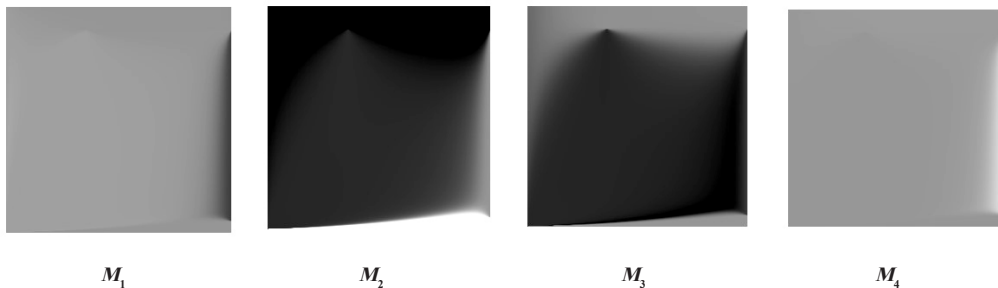


Рис. 1. М-образы, отображающие локальные геометрические характеристики для диаграммы направленности при минимальном значении угла места $\epsilon_{\min} = 0,1^\circ$; максимальном значении угла места $\epsilon_{\max} = 4^\circ$; значении характеристического угла места $\epsilon_0 = 1,7^\circ$

Fig. 1. M-shapes displaying local geometric characteristics for the radiation pattern at minimum elevation angle $\epsilon_{\min} = 0.1^\circ$; maximum elevation angle $\epsilon_{\max} = 4^\circ$; characteristic elevation angle $\epsilon_0 = 1.7^\circ$

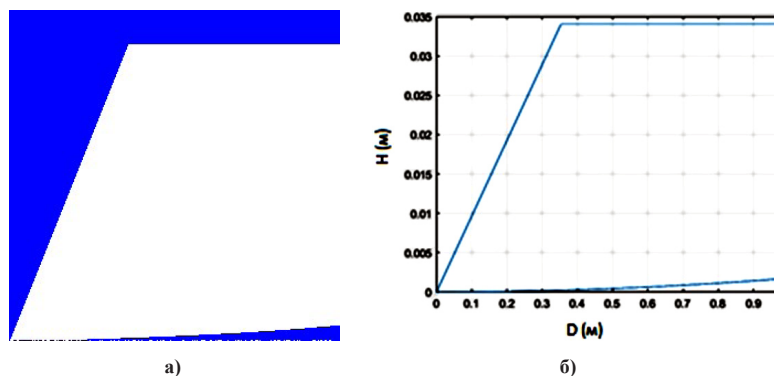


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны в полярной системе координат: а — график зон положительных и отрицательных значений; б — диаграмма направленности, получаемая классическим расчётом для сравнения

Fig. 2. Antenna radiation pattern in polar coordinate system: а — a map of positive and negative value zones; б — a radiation pattern obtained by classical calculation for comparison

ϵ (воздушного объекта), вид поляризации радиоволны и характера подстилающей поверхности.

При построении диаграмм направленности или расчёте напряжённости поля всегда используется модуль интерференционного множителя, поэтому диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости с учетом отражений от плоской подстилающей поверхности и дальности обнаружения рассчитывается в соответствии с выражением:

$$Dn(\epsilon) = r_{\max} \cdot F(\epsilon) \cdot |\Phi(\epsilon)|, \quad (7)$$

где $r_{\max}$ — дальность обнаружения, м; $F(\epsilon)$ — базовая функция диаграммы направленности РЛС в вертикальной плоскости, зависящая от угла места по формуле (1), м.

Интерференционный множитель земли для горизонтально поляризованной плоской волны вычисляется следующей функцией:

$$|\Phi(\theta)| = \sqrt{1 + |\dot{R}_r|^2 + 2 \cdot |\dot{R}_r| \cdot (2k_0 \cdot h' \cdot \sin(\epsilon) + \beta_r)}, \quad (8)$$

где k_0 — волновое число; λ — длина волны; $\dot{R}_r$ — коэффициент отражения для горизонтальной поляризации электромагнитной волны; β_r — аргумент коэффициента $\dot{R}_r$.

Коэффициент отражения для горизонтальной поляризации плоской волны определяется в соответствии с выражением (индекс 2 соответствует подстилающей поверхности, а индекс 1 — атмосфере):

$$\dot{R}_r = \frac{\dot{\mu}_{a2} \dot{k}_1 \sin(\epsilon) - \dot{\mu}_{a1} \sqrt{k_2^2 - k_1^2 (\cos(\epsilon))^2}}{\dot{\mu}_{a2} \dot{k}_1 \sin(\epsilon) + \dot{\mu}_{a1} \sqrt{k_2^2 - k_1^2 (\cos(\epsilon))^2}}, \quad (9)$$

где $\dot{k} = \omega \sqrt{\dot{\epsilon}_a \cdot \mu_a}$ — комплексный коэффициент фазы; $\omega = 2\pi \frac{3 \cdot 10^8}{\lambda}$ — круговая частота, рад/с;

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left(1 - \frac{\epsilon_{\min} \frac{\pi}{180} - \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)}{\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)} - \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\epsilon)|, & \text{при } 0 < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \epsilon_{\min} \\ \left(1 - \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\epsilon)|, & \text{при } \epsilon_{\min} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \epsilon_0 \\ \left(\sin\left(\epsilon_0 \frac{\pi}{180}\right) \operatorname{cosec}\left(\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)\right) - \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\epsilon)|, & \text{при } \epsilon_0 \leq \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \epsilon_{\max} \\ x \tan\left(\epsilon_{\max} \frac{\pi}{180}\right) - y, & \text{при } \epsilon_{\max} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < 90^\circ \end{array} \right. = 0. \quad (10)$$

Вычислительная реализация модели разрабатывается в соответствии с методологией, изложенной в разделе 1.

Математической основой является последовательное применение уравнений (3) – (5) для расчёта в соответствии с [12].

На рис. 3 показана диаграмма направленности с изменёнными зонами положительных и отрицательных значений в сравнении с рис. 2.

Учёт ИМЗ привёл визуализацию диаграммы направленности к более привычному виду «лепестка».

Результаты локальных геометрических характеристик представлены на рис. 4.

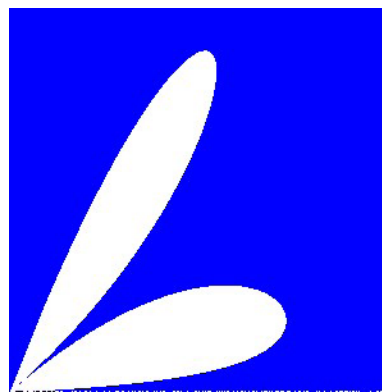


Рис. 3. Диаграмма направленности зон отрицательных и положительных значений используемой функции (10)
Fig. 3. Radiation pattern showing zones of positive and negative values of the applied function (10)

λ — длина волны, м; $\dot{\epsilon}_a = \epsilon_a - j \cdot \frac{\sigma}{\omega}$ — комплексная абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9}$ — электрическая постоянная вакуума; μ — абсолютная магнитная проницаемость среды; $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ — относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная вакуума; σ — удельная проводимость среды.

Значение максимальной дальности обнаружения воздушного объекта с заданными величинами вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги воздушного объекта в РЛС с потерями определяется отдельно. В качестве примера принято значение $r_{\max} = 125\,500$ м.

Итоговый вид функций:

3. Построение трехмерной ФВ-модели зоны обнаружения наземной обзорной РЛС с учётом отражений от плоской подстилающей поверхности и рефракции радиоволн

Для построения модели зоны обнаружения целесообразно применить метод вращения. В качестве оси вращения выбирается ось X , после чего аргумент Y заменяется на радиус вращения $\sqrt{x^2 + y^2}$. Учитывая, что исходная функция уже содержала единичную ось Z при переходе к однородным координатам, необходимо выполнить переход в пространстве более высокой размерности. В результате преобразований итоговые функции принимают следующий вид:



Рис. 4. M -образы, отображающие локальные геометрические характеристики для диаграммы направленности при значении угла места $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$ аналитического уравнения (10)
Fig. 4. M -shapes displaying local geometric characteristics for the radiation pattern at: elevation angle $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$ of the analytical equation (10)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\min} \frac{\pi}{180} - \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)}{\operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \times \\ \times r_{\max} \cdot |\Phi(\varepsilon)|, & \text{при } 0 < \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < \varepsilon_{\min} \\ \left(1 - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\varepsilon)|, & \text{при } \varepsilon_{\min} < \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < \varepsilon_0 \\ \left(\sin\left(\varepsilon_0 \frac{\pi}{180}\right) \operatorname{cosec}\left(\operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)\right) - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \times \\ \times r_{\max} \cdot |\Phi(\varepsilon)|, & \text{при } \varepsilon_0 \leq \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < \varepsilon_{\max} \\ \sqrt{x^2 + y^2} \tan\left(\varepsilon_{\max} \frac{\pi}{180}\right) - z, & \text{при } \varepsilon_{\max} < \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < 90^\circ \end{array} \right. = 0. \quad (11)$$

При построении трёхмерной зоны и при увеличении размерности функции необходимо брать не три, а четыре точки для нахождения локальной функции. Используем применяемую ранее методику и получаем локальные геометрические характеристики для каждой точки области функции (3) при условии использования аналитических уравнений, указанных в (10).

Разложим определитель для получения коэффициентов уравнения плоскости. Для матрицы 5×5 используется метод Лапласа.

Основные коэффициенты уравнения плоскости получают следующий вид:

$$\begin{aligned} a1 &= y1 \cdot Ma11 - z1 \cdot Ma12 + u1 \cdot Ma13 - Ma14, \\ a2 &= -(x1 \cdot Ma21 - z1 \cdot Ma22 + u1 \cdot Ma23 - Ma24), \\ a3 &= x1 \cdot Ma31 - y1 \cdot Ma32 + u1 \cdot Ma33 - Ma34, \\ a4 &= -(x1 \cdot Ma41 - y1 \cdot Ma42 + z1 \cdot Ma43 - Ma44), \\ a5 &= x1 \cdot Ma51 - y1 \cdot Ma52 + z1 \cdot Ma53 - u1 \cdot Ma54. \end{aligned} \quad (12)$$

После нормирования полученных коэффициентов (12) по имеющейся формуле (5) получаем уравнение вида $n_1x + n_2y + n_3z + n_4u + n_5 = 0$. Оно является локальным представлением области функции трехмерной модели на компьютере.

На рис. 5 показано одно из сечений положительных и отрицательных значений по оси Z получаемой модели. В отличие от прошлых вариантов, в данном случае диаграмма направленности представлена в горизонтальной плоскости для лучшей

видимости результата получаемой геометрической модели.

На рис. 6 представлены графические образы локальных геометрических характеристик [13]. Количество характеристик увеличилось в сравнении с рис. 4, так как расчёт ведётся для трёхмерного объекта.

Итоговый вариант модели показан на рис. 7.

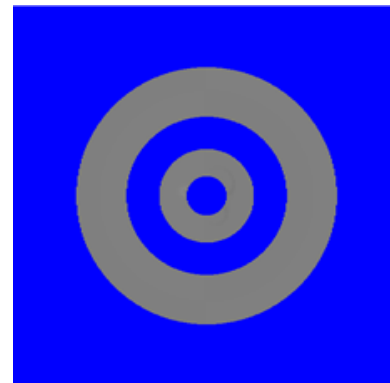


Рис. 5. Визуализация сечения области положительных и отрицательных значений модели
Fig. 5. Cross-section visualization of positive and negative values of the model

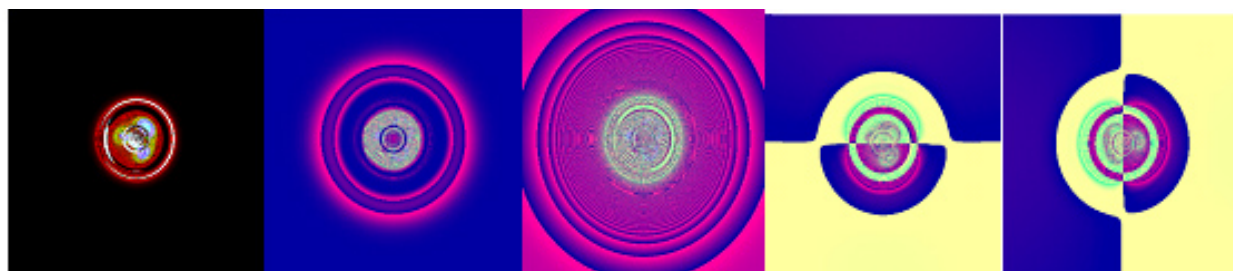


Рис. 6. М-образы в RGB-формате (16777215 оттенков цвета), отображающие локальные геометрические характеристики для 3D-модели в одном из сечений при значении угла $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$
Fig. 6. M-shapes in RGB-format (16777215 colour shades), displaying local geometric characteristics for the 3D-model in one cross-section at angle $\varepsilon_{\min} = 0.1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1.7^\circ$

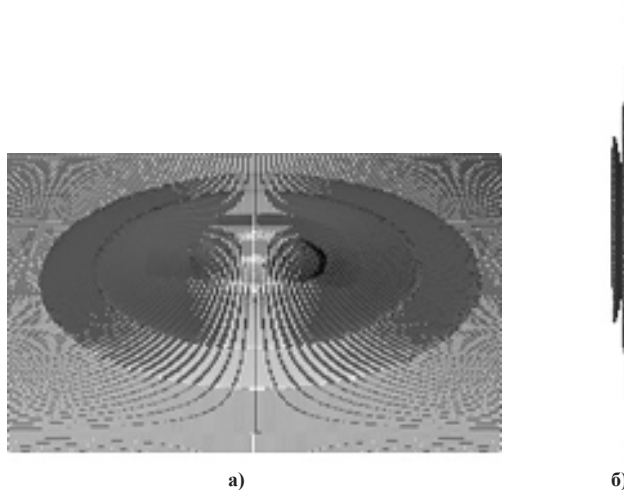


Рис. 7. Визуализация модели зоны обнаружения РЛС:
а — вид сверху; б — вид справа
Fig. 7. Visualization of the radar detection zone model:
a — top view; б — right-side view

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует эффективность применения функционально-воксельного метода для моделирования диаграмм направленности на компьютере.

Базовая диаграмма направленности, построенная на основе локальных уравнений, послужила отправной точкой в построении радиолокационной модели.

Учёт интерференционного множителя земли и радиуса дальности позволил выявить характерные минимумы и максимумы излучения, обусловленные взаимодействием прямого и отражённого лучей.

3D-модель наглядно продемонстрировала пространственное распределение поля, включая азимутальные и угломестные зависимости.

Полученные данные могут быть использованы для:

- оптимизации размещения антенн над реальным рельефом;
- прогнозирования зон покрытия в радиосвязи;
- анализа помех в сложных электромагнитных условиях.

Перспективным направлением исследования являются построение зоны обнаружения с учётом влияния Земли и кривизны земной поверхности.

Список источников / References

1. Сухоруков А. П., Бабушкин А. К., Михайлов Е. В. [и др.]. Возможности систем геопро пространственного моделирова-

ния в задачах прогнозирования распространения радиоволн и электромагнитной экологии // Радиолокация и радиосвязь: III Всерос. конф. 2009. С. 630 – 640.

Sukhorukov A. P., Babushkin A. K., Mikhaylov E. V. [et al.]. Vozmozhnosti sistem geoprostranstvennogo modelirovaniya v zadachakh prognozirovaniya rasprostraneniya radiovoln i elektromagnitnoy ekologii [Capabilities of geospatial modeling systems in the problems of radio wave propagation forecasting and electromagnetic ecology]. *Radiolokatsiya i Radiosvyaz'*. P. 630 – 640. (In Russ.).

2. Татарский Б. Г., Ясенцев Д. А., Сурков А. А. Формирование радиолокационных изображений в некогерентных многопозиционных радиолокационных системах // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2024. Т. 198, № 1. С. 47 – 53. EDN: BAYQMP.

Tatarsky B. G., Yasentsev D. A., Surkov A. A. Formirovaniye radiolokatsionnykh izobrazheniy v nekogerentnykh mnogopozitsionnykh radiolokatsionnykh sistemakh [Formation of radar images in incoherent multi-position radar systems]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM. Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies*. 2024. Vol. 198, no. 1. P. 47 – 53. EDN: BAYQMP. (In Russ.).

3. Дорогов А. Ю., Яшин А. И. Программный комплекс моделирования пакетных радиосетей КВ-диапазона // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12, № 6. С. 26 – 37. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-26-37. EDN: QOBFCL.

Dorogov A. Yu., Yashin A. I. Programmnyy kompleks modelirovaniya paketnykh radiosetey KV-diapazona [Software package for modeling HF-band packet radio networks]. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh*

Zemli. *High Tech in Earth Space Research*. 2020. Vol. 12, no. 6. P. 26–37. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-26-37. EDN: QOBFCL. (In Russ.).

4. Толок А. В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании / под ред. С. Н. Васильева. Москва: Физматлит, 2016. 112 с. ISBN 978-5-9221-1680-0. (In Russ.).

Tolok A. V. Funktsional'no-voksel'nyy metod v komp'yuternom modelirovani [Functional-Voxel method in computer modeling] / ed. by S. N. Vasilyev. Moscow, 2016. 112 p. ISBN 978-5-9221-1680-0. (In Russ.).

5. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. Москва: Советское радио, 1970. 560 с.

Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii [Theoretical radar foundations] / ed. by Ya. D. Shirman. Moscow, 1970. 560 p. (In Russ.).

6. Бердышев В. П., Гарин Е. Н., Фомин А. Н. [и др.]. Радиолокационные системы / под общ. ред. В. П. Бердышева. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 400 с. ISBN 978-5-7638-2479-7.

Berdyshev V. P., Garin E. N., Fomin A. N. [et al.]. Radiolokatsionnyye sistemy [Radar systems] / ed. by V. P. Berdyshev. Krasnoyarsk, 2011. 400 p. ISBN 978-5-7638 2479-7. (In Russ.).

7. Справочник по радиолокации. В 2 кн. / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. В. С. Вербы. Москва: Техносфера, 2014. Кн. 1. 672 с. ISBN 978-5-94836-381-3.

Spravochnik po radiolokatsii. V 2 kn. [Handbook of radar systems]. In 2 vols. / ed. by M. I. Skolnik; trans. from Engl. V. S. Verba. Moscow, 2014. Bk. 1. 672 p. ISBN 978-5-94836-381-3. (In Russ.).

8. Тяпкин В. Н., Фомин А. Н., Гарин Е. Н. [и др.]. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / под общ. ред. В. Н. Тяпкина. 2-е изд., перераб. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 536 с. ISBN 978-5-7638-3410-9.

Tyapkin V. N., Fomin A. N., Garin E. N. [et al.]. Osnovy postroyeniya radiolokatsionnykh stantsiy radiotekhnicheskikh voysk [Fundamentals of radar systems for radio engineering troops] / ed. by V. N. Tyapkin. 2nd ed., revised. Krasnoyarsk, 2016. 536 p. ISBN 978-5-7638-3410-9. (In Russ.).

9. Толок А. В. Применение воксельных моделей в процессе автоматизации математического моделирования // Автоматика и телемеханика. 2009. № 6. С. 167–180. EDN: MWKIBL.

Tolok A. V. Primeneniye voksel'nykh modeley v protsesse avtomatizatsii matematicheskogo modelirovaniya [Using voxel models in automation of mathematical modeling]. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2009. No. 6. P. 167–180. EDN: MWKIBL. (In Russ.).

10. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения: моногр. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.

Rvachev V. L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryye eye prilozheniya [Theory of R-functions and some of its applications]. Kyiv, 1982. 552 p. (In Russ.).

11. Максименко-Шейко К. В., Мацевитый А. М., Толок А. В., Шейко Т. И. R-функции и обратная задача аналитической геометрии в трехмерном пространстве // Информационные технологии. 2007. № 10. С. 23–32. EDN: IJQBMN.

Maksimenko-Sheyko K. V., Matsevityy A. M., Tolok A. V., Sheyko T. I. R-funktsii i obratnaya zadacha analiticheskoy geometrii v trekhmernom prostranstve [R-functions and inverse problem of analytic geometry in three-dimensional space]. *Informatsionnyye tekhnologii. Information Technologies*. 2007. No. 10. P. 23–32. (In Russ.).

12. Толок А. В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании / под ред. С. Н. Васильева. Москва: Физматлит, 2016. 112 с. ISBN 978-5-9221-1680-0.

Tolok A. V. Funktsional'no-voksel'nyy metod v komp'yuternom modelirovani [Functional-voxel method in computer modeling] / ed. by S. N. Vasilyev. Moscow, 2016. 112 p. ISBN 978-5-9221-1680-0. (In Russ.).

13. Толок А. В. Графические образы-модели в информационных технологиях // Прикладная информатика. 2009. № 4. С. 31–40. EDN: KWMTBP.

Tolok A. V. Graficheskiye obrazy-modeli v informatsionnykh tekhnologiyakh [Graphic image-models in information technologies]. *Prikladnaya informatika. Applied Informatics*. 2009. No. 4. P. 31–40. EDN: KWMTBP. (In Russ.).

ЯРОВ Алексей Борисович, аспирант кафедры «Инженерная графика» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), г. Москва.

Адрес для переписки: ab.yarov@yandex.ru

ТОЛОК Алексей Вячеславович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Инженерная графика» МГТУ «СТАНКИН», г. Москва; главный научный сотрудник лаборатории 18 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва.

SPIN-код: 9269-9260

ORCID: 0000-0002-7257-9029

AuthorID (SCOPUS): 28268055700

ResearcherID: V-7594-2019

Адрес для переписки: tolok_61@mail.ru

ПАНКОВА Анастасия Евгеньевна, адъюнкт кафедры «Автоматизированные системы управления (и связи)» Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь.

Адрес для переписки: nastya-pankova1998.1998@mail.ru

ЧЕНЦОВ Александр Евгеньевич, доктор военных наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра (ПВО-ПРО) Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025; одобрена после рецензирования 19.07.2025; принята к публикации 08.10.2025.

YAROV Aleksey Borisovich, Postgraduate of the Engineering Graphics Department, Moscow State University of Technology "STANKIN" (MSUT "STANKIN"), Moscow.

Correspondence address: ab.yarov@yandex.ru

TOLOK Aleksey Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Engineering Graphics Department, MSUT "STANKIN", Moscow; Chief Researcher at the Laboratory 18, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow.

SPIN-code: 9269-9260

ORCID: 0000-0002-7257-9029

AuthorID (SCOPUS): 28268055700

ResearcherID: V-7594-2019

Correspondence address: tolok_61@mail.ru

PANKOVA Anastasiya Evgenyevna, Adjunct of the Automated Control (and Communication) Systems

Department, Zhukov Air and Space Defence Academy, Tver.

Correspondence address: nastya-pankova1998.1998@mail.ru

CHENTSOV Aleksandr Evgenyevich, Doctor of Military Sciences, Senior Researcher at the Research Center (PVO-PRO), Zhukov Air and Space Defence Academy, Tver.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 03.06.2025; approved after reviewing 19.07.2025; accepted for publication 08.10.2025.