

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ВОКСЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ АППАРАТА R-ФУНКЦИЙ

А. Б. Яров 

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Россия, 127055, г. Москва, пер. Вадковский, 3а

 ab.yarov@yandex.ru

В статье рассматривается задача функционально-воксельного моделирования зоны обнаружения радиолокационной станции с учётом влияния рельефа местности. Описан принцип пересчёта локальных характеристик обновлённой функции, основанный на использовании локальных функций в виде V-представлений зоны обнаружения радиолокационной станции и местности. Пространство моделирования задаётся ограниченной областью и аппроксимируется регулярной дискретной сеткой.

Для объединения моделей используется аппарат R-функций Рвачёва, позволяющий реализовать теоретико-множественные операции пересечения и объединения в форме локальных функций. Это обеспечивает формирование результирующей модели в виде объединённого локального аналитического уравнения и корректный учёт экранирующих эффектов рельефа при построении зоны обнаружения.

Программная реализация демонстрирует работоспособность метода на тестовой сцене с дискретизацией на примере 200^3 вокселей. Предложенный подход может быть использован при анализе пространственных характеристик радиолокационного контроля и при разработке программных средств моделирования сложных геометрических сцен.

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

Для цитирования: Яров А. Б. Функционально-воксельное моделирование зоны обнаружения радиолокационной станции с учётом влияния рельефа местности на основе аппарата R-функций // Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 73–79. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-73-79>. EDN: ZQAWHW.



© Яров А. Б., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

FUNCTIONAL VOXEL MODELING OF THE RADAR DETECTION ZONE CONSIDERING THE TERRAIN INFLUENCE BY THE R-FUNCTION APPARATUS

А. Б. Яров 

Moscow State University of Technology "STANKIN",
Vadkovsky Ln., 3a, Moscow, 127055, Russia

 ab.yarov@yandex.ru

The article addresses the problem of functional-voxel modeling of a radar detection zone considering terrain effects. The author describes a principle for recalculating the local characteristics of the updated function by the use of local functions represented as V-representations of the radar detection zone and the terrain model. Moreover, the author defines the modeling space as a bounded domain and approximates by a regular discrete grid.

The article performs the integration of the models using the R-function apparatus developed by Rvachev, which enables the implementation of set-theoretic operations such as intersections and joins in terms of

local functions. This approach provides the construction of the resulting model in the form of a unified local analytical equation and ensures proper consideration of terrain-induced shielding effects in the formation of the detection zone.

The software implementation demonstrates the applicability of the method with the discretization of 200^3 voxels. The proposed approach can be applied to the analysis of spatial characteristics of radar coverage and to the development of software tools for modeling complex geometric stages.

Keywords: functional voxel method, M-image, R-functions, homogeneous vector, local geometric characteristics, radiation pattern, radar station modeling

For citation: Yarov A. B. Functional voxel modeling of the radar detection zone considering the terrain influence by the R-function apparatus. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):73–79. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-73-79>. EDN: ZQAWHW. (In Russ.).



© Yarov A. B., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Моделирование зон обнаружения радиолокационных станций (РЛС) невозможно без учёта рельефа поверхности. Земная поверхность влияет на формирование итоговой зоны обнаружения РЛС, что приводит к её искажению и уменьшению дальности обнаружения. Это особенно существенно при малых углах места, например, при обнаружении целей на малых высотах (50–500 м) [1–7].

В работе [8] описан порядок моделирования функционально-воксельной (ФВ) модели зоны обнаружения РЛС без учёта рельефа. В работе [9] описан принцип моделирования такой модели рельефа с учётом теневых зон. Для получения полноценной ФВ модели, которая учитывает все точки пространства, в которой она обнаруживает объекты, необходимо сопоставить существующий рельеф с моделируемой зоной РЛС.

Целью работы является описание принципов ФВ метода для разработки объединения модели зоны обнаружения РЛС с цифровой моделью рельефа, обеспечивающего учёт экранирующих эффектов и теневых областей.

Научная новизна работы заключается в объединении ФВ-модели зоны обнаружения и ФВ-модели рельефа в единую аналитическую форму, а также в применении R-конструкций пересечения и объединения, построенных на основе локальных уравнений разрабатываемых моделей.

Моделирование реализовано в виде программного комплекса на языке C++ с использованием WinAPI, выполняющего построение геометрической модели зоны обнаружения и её визуализацию в графической среде.

Подготовка используемых существующих моделей

Рассмотрим ФВ модель трёхмерного рельефа. Она представляет собой множество M-образов $\{M_i\}$, $i = 1 \dots 5$, отражающих локальные характеристики поверхности [10]. Пространство моделирования обозначается $\Omega \subset R^3$ и представляется дискретизацией на множество элементов $\{V_q\}$, $q = 1 \dots Q$, где q — воксель в соответствии с [11]. Каждый воксель V_q каждого M-образа необходимо понимать как значение локальной функции четырёхмерных атрибутов дискретного элемента пространства. Первые три атрибута — это положение (x, y, z) , а четвёртое является значением в виде цветовой кодировки. Для перехода от цветовой (V-представления)

к числовому описанию локальных характеристик (FV-представления) вводится оператор декодирования N [11], вычисляемый по формуле:

$$n_i = \frac{2M_i - P}{P},$$

где n_i — локальная геометрическая характеристика вокселя V_q i -го M-образа; M_i — цветное представление локальной характеристики V-представления модели вокселя V_q i -го M-образа; P — выбранная цветовая палитра; $P = 16777215$ цветов (глубина цвета — 24 бита).

Цветовое представление M_i определяется как взвешенная сумма трёхканальной модели цвета RGB-палитры. Значения каналов объединяются в одно 24-битное число рассматриваемого вокселя по формуле:

$$M_i = r + g \cdot 256 + b \cdot 65536,$$

где r, g, b — каналы (r — красный, g — зелёный, b — синий) — целые безразмерные числа в диапазоне от 0 до 255, означающие основные оттенки цветов RGB-палитры рассматриваемого вокселя.

Таким образом, для каждой точки функционально-воксельной модели получаем локальную функцию, которая представляется в виде:

$$L_1(x, y, z, u) = n_1^{(1)}x + n_2^{(1)}y + n_3^{(1)}z + n_4^{(1)}u + n_5^{(1)} = 0. \quad (1)$$

В аналогичном виде представляется модель зоны обнаружения РЛС, которая предварительно была описана аналитическими уравнениями по требуемой методике с учётом основного уравнения РЛС.

Значение максимальной дальности обнаружения антенны $r_{\max 0}$ в данной работе задаётся параметрически. В отличие от классического подхода, основанного на расчёте по прикладной форме основного уравнению РЛС (8), здесь он фиксируется численно с целью демонстрации работы алгоритма интеграции моделей:

$$r_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{2P_{\text{cp}} t_n G_m \sigma A_{\max}}{(4\pi)^2 \alpha_n q_0^2 k_{\text{ш}} k T}}, \quad (2)$$

где P_{cp} — средняя мощность излучения, Вт; t_n — время наблюдения отраженного сигнала, с; G_m — максимальное значение коэффициента усиления

передающей антенны; $A_{\max}$ — максимальное значение эффективной площади приемной антенны, м²; σ — значение эффективной площади рассеяния воздушной цели, м²; α_n — результирующий коэффициент потерь энергии при обработке сигналов и прохождении всех трактов радиолокационной системы, в размах; q_0^2 — значение отношения сигнал/шум, соответствующее заданному значению вероятности правильного обнаружения; $k_{\text{ш}}$ — коэффициент шума; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура окружающей среды, К.

Расчёт зоны обнаружения РЛС на пересечённой местности невозможен без учёта зон, экранированных рельефом. Для этого необходимо использовать модель рельефа, в которой задана точка установки РЛС r_0 ($r_0 \in \Omega$). От этой точки к каждой грани сцены строятся геометрические лучи для определения теневых зон. На основании этого строится обновлённая ФВ модель рельефа.

Координатные системы ФВ моделей рельефа и зоны обнаружения должны быть согласованы. Обе модели должны быть заданы в одной и той же декартовой системе координат с совпадающим началом отсчёта и ориентацией осей. В противном случае их области определения не пересекаются, что приводит к формированию пустой результирующей модели при выполнении операции R-пересечения.

Кроме того, требуется согласование масштабов и единиц измерения геометрических параметров. Если цифровая модель рельефа построена в километрах, то аналитическая модель зоны обнаружения также должна быть выражена в километрах. Несогласованность единиц измерения приводит к масштабному искажению локальных функций и, как следствие, к некорректному формированию результирующей ФВ модели.

Таким образом, для обновления ФВ модели зоны обнаружения РЛС необходима базовая модель этой зоны, а также ФВ модели рельефа, учитывающая экранирование для зоны обнаружения РЛС.

Расчёт построения цельной модели

Для расчёта результирующей модели используются ФВ представления двух моделей: итоговой модели зоны обнаружения РЛС и рельефа, учитывающего экранирование. Каждая из них задаётся аналитически в виде локальной функции, где индекс локальной геометрической характеристики показывает принадлежность к функции:

$$L_1(x, y, z, u) = n_1^{(1)}x + n_2^{(1)}y + n_3^{(1)}z + n_4^{(1)}u + n_5^{(1)} = 0;$$

$$L_2(x, y, z, u) = n_1^{(2)}x + n_2^{(2)}y + n_3^{(2)}z + n_4^{(2)}u + n_5^{(2)} = 0, \quad (3)$$

где x, y, z — декартовы координаты точки объекта в трёхмерном пространстве $\in \Omega$; u — значение величины в точке.

Так как локальная функция для любого объекта имеет одинаковую форму, то для удобства принимаем обозначение L_1 для зоны обнаружения, а L_2 — для рельефа.

Области используемых функций определяются следующими условиями:

$$u_{L1} = -\frac{n_1^{(1)}}{n_4^{(1)}}x - \frac{n_2^{(1)}}{n_4^{(1)}}y - \frac{n_3^{(1)}}{n_4^{(1)}}z - \frac{n_5^{(1)}}{n_4^{(1)}} \geq 0;$$

$$u_{L2} = -\frac{n_1^{(2)}}{n_4^{(2)}}x - \frac{n_2^{(2)}}{n_4^{(2)}}y - \frac{n_3^{(2)}}{n_4^{(2)}}z - \frac{n_5^{(2)}}{n_4^{(2)}} \geq 0, \quad (4)$$

где u_{L1}, u_{L2} — значения функции в точке в моделях L_1 и L_2 .

Результирующая модель зоны обнаружения РЛС формируется как теоретико-множественное пересечение этих моделей, которое достигается за счёт использования R-функциональных операций для локальной геометрии (R-функции) [12–15].

Операция пересечения задаётся следующей R-конструкцией:

$$L_3(x, y, z, u) = L_1(x, y, z, u) \wedge L_2(x, y, z, u) = u_{L1} + u_{L2} - \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2}. \quad (5)$$

Докажем, что при $u_{L1} \geq 0, u_{L2} \geq 0$ и $u_{L1} \wedge u_{L2} = u_{L3} \geq 0$ использование R-пересечения для получения итоговой модели корректно. Для этого установим необходимость и достаточность указанных условий.

Пусть $u_{L3} \geq 0$, значит $u_{L1} + u_{L2} - \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2} \geq 0 \Rightarrow u_{L1} + u_{L2} \geq \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2} \geq 0$.

Обе части выражения принимают неотрицательные значения, поэтому допустимо возвести их в квадрат, сохранив знак неравенства. Получим $(u_{L1} + u_{L2})^2 \geq u_{L1}^2 + u_{L2}^2$.

Раскрывая скобки в неравенстве, получаем $u_{L1}^2 + 2u_{L1}u_{L2} + u_{L2}^2 \geq u_{L1}^2 + u_{L2}^2$. Сокращая одинаковые слагаемые, приходим к формуле $2u_{L1}u_{L2} \geq 0$, откуда следует $u_{L1}, u_{L2} \geq 0$. Последнее означает, что величины u_{L1}, u_{L2} имеют одинаковый знак или равны нулю. С учётом условия $u_{L1} + u_{L2} \geq 0$ значения u_{L1} и u_{L2} больше или равны нулю.

Пусть $u_{L1} \geq 0$ и $u_{L2} \geq 0$, тогда $(u_{L1} + u_{L2})^2 = u_{L1}^2 + 2u_{L1}u_{L2} + u_{L2}^2 \geq u_{L1}^2 + u_{L2}^2$. Извлекая квадратный корень из обеих частей неравенства, получаем формулу $u_{L1} + u_{L2} \geq \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2}$. Следовательно, $u_{L1} + u_{L2} - \sqrt{u_{L1}^2 + u_{L2}^2} \geq 0$, что и требовалось доказать.

Для удобства вычислений локальная функция результирующей модели $L_3(x, y, z, u)$ может быть найдена путём раздельного определения результирующих коэффициентов.

Формулы для вычисления локальных геометрических характеристик результирующей модели [11]:

$$n_1^{(3)} = \frac{n_1^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_1^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_1^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_1^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right);$$

$$n_2^{(3)} = \frac{n_2^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_2^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_2^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_2^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right);$$

$$n_3^{(3)} = \frac{n_3^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_3^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_3^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_3^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right);$$

$$n_4^{(3)} = 1;$$

$$n_5^{(3)} = \frac{n_5^{(1)}}{n_4^{(1)}} + \frac{n_5^{(2)}}{n_4^{(2)}} - \left(\frac{\frac{n_5^{(1)}}{n_4^{(1)}}u^{(1)} + \frac{n_5^{(2)}}{n_4^{(2)}}u^{(2)}}{\sqrt{u^{(1)2} + u^{(2)2}}} \right). \quad (6)$$

Подставив локальные геометрические характеристики для точки, мы получим локальную функ-

цию пересечения двух ФВ моделей. Она имеет тот же привычный вид, но уже с другими характеристиками каждой рассматриваемой точки:

$$L_3(x, y, z, u) = n_1^{(3)}x + n_2^{(3)}y + n_3^{(3)}z + n_4^{(3)}u + n_5^{(3)} = 0. \quad (7)$$

Существуют задачи, в которых необходима модель рельефа и зоны обнаружения как единая модель. Например, когда необходимо определить точки в пространстве с пустыми зонами, где объект не задевает местность и не попадает в зону РЛС, используется аналогичный подход. В данном случае используются полученные локальные уравнения для рассматриваемых точек в сцене и применяется теоретико-множественная операция объединения. При этом используется функция L_2 первоначально рельефа.

$$L_4(x, y, z, u) = L_3(x, y, z, u) \cup L_2(x, y, z, u) = u_{L_3} + u_{L_2} + \sqrt{u_{L_3}^2 + u_{L_2}^2}, \quad (8)$$

где $L_4(x, y, z, u)$ — локальная функция объединенных моделей.

Визуализация построения

Для демонстрации результатов приведены V-представления двух исходных моделей. Область моделирования аппроксимируется регулярной дискретной сеткой 200^3 вокселей.

Все модели заданы в единой декартовой системе координат. Область пространства определяется как ограниченная область $\Omega \subset R^3$, где $\Omega = \{(x, y, z) \in R^3: -307 \leq x \leq 307; -307 \leq y \leq 307; 49 \leq z \leq 253\}$.

В качестве точки размещения РЛС выбрана точка $A \in \Omega$ с координатами (99, -56, 131). Положение точки выбрано таким образом, чтобы обеспечить наглядную демонстрацию влияния рельефа на формирование теневых зон.

Поскольку трёхмерная модель состоит из 200 дискретных слоёв по координате z , для иллюстрации выбран один характерный слой. Для этого слоя формируются пять М-образов, отражающих локальные геометрические характеристики модели на рис. 1.

Используя М-образы существующих моделей и выполнив пересчёт локальных характеристик, получаем обновлённую модель на рис. 2.

После выполнения расчётов (6) получаем обновлённую модель функции L_3 (7) на рис. 3.

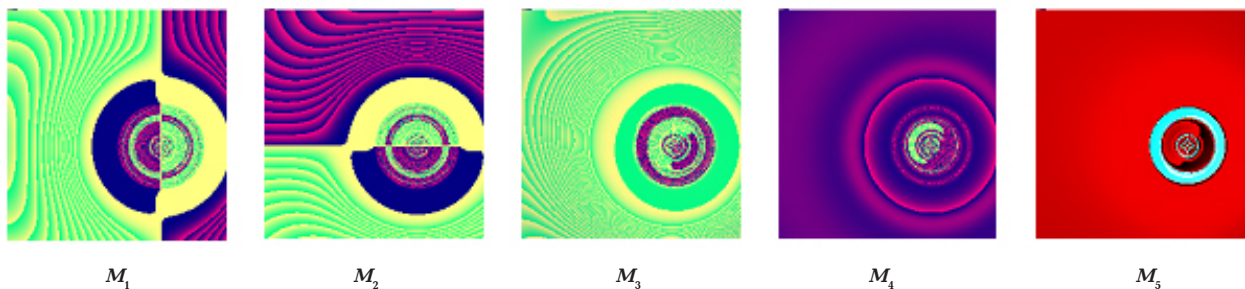


Рис. 1. V-представление модели L_1 зоны обнаружения (пять М-образов для 83-го слоя из 200, $z = 133.66$)
Fig. 1. V-representation of the L_1 detection zone model (five M-images for the 83rd layer out of 200, $z = 133.66$)
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

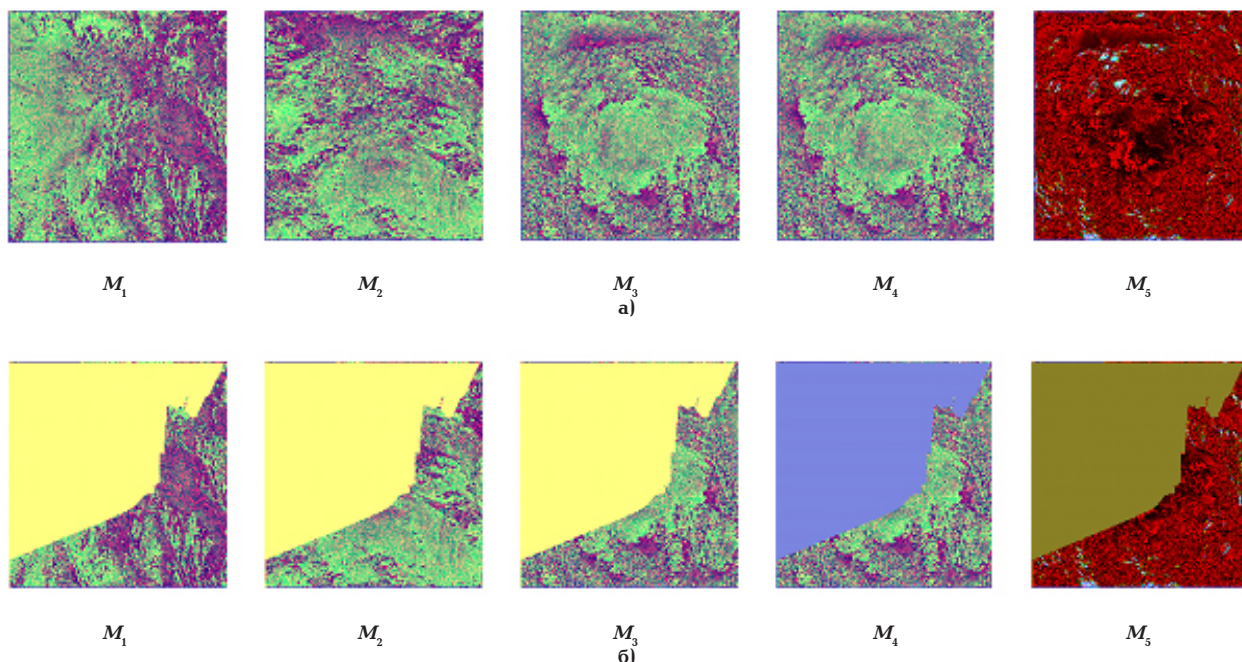


Рис. 2. V-представление модели L_2 : а) первоначального рельефа;
б) с применённым алгоритмом (пять М-образов для 83-го слоя из 200, $z = 133.66$)
Fig. 2. V-representation of the L_2 model: а) initial terrain;
б) with the applied algorithm (five M-images for the 83rd layer out of 200, $z = 133.66$)
Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

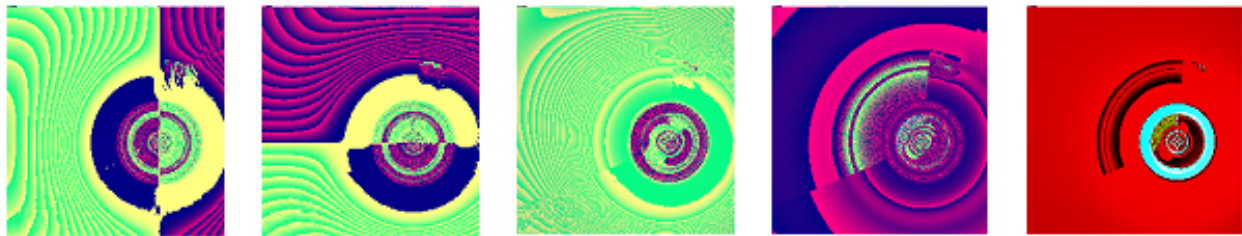


Рис. 3. V-представление модели L_3 зоны обнаружения РЛС (пять М-образов для 83-го слоя из 200, $z = 133,66$)
Fig. 3. V-representation of the L_3 radar detection zone model (five M-images for the 83rd layer out of 200, $z = 133,66$)

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

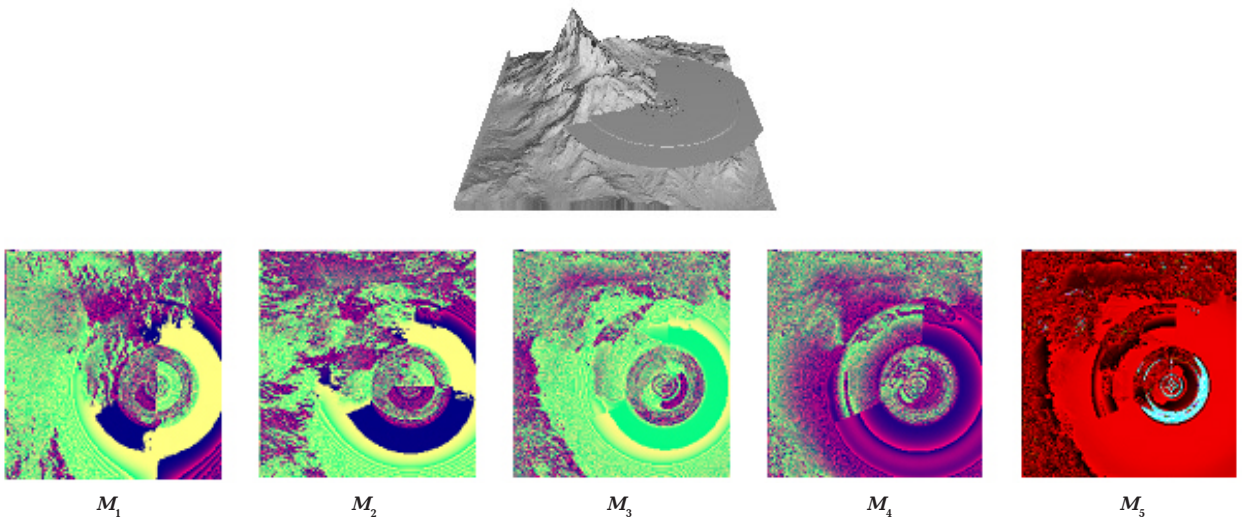


Рис. 4. V-представление объединённой модели L_4 рельефа с применённым алгоритмом (пять М-образов для слоя) с 3D-визуализацией

Fig. 4. V-representation of the integrated L_4 terrain model with the applied algorithm (five M-images for the selected layer) with 3D visualization

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Заключительная модель для этой статьи представляет собой объединённую модель первоначального рельефа и полученную модель объединённой зоны РЛС L_4 на рис. 4.

Результаты

Построенные модели являются V-представлениями совмещённых моделей зоны обнаружения РЛС совместно с используемым рельефом. Они состоят из пересчитанных элементов М-образов, сгенерированных для каждого слоя сцены с помощью ФВ подхода.

Полное время рендеринга всех М-образов модели зоны обнаружения РЛС с учётом экранирования рельефом составило 2 мин 36 с. Время построения модели, объединяющей рельеф и скорректированную зону обнаружения, оказалось идентичным. Следовательно, вычислительная сложность при моделировании ФВ методом не зависит от сложности рельефа или зоны обнаружения.

Компьютерное моделирование модели зоны обнаружения РЛС с учётом рельефа местности выполнено на вычислительной машине со следующими параметрами: процессор 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12400F 2.50 GHz; 32 ГБ оперативной памяти; операционная система Microsoft Windows 10 Pro, версия 22H2, сборка ОС 19045.6332.

Обсуждения

Для построения полученной модели использовался алгоритм из статьи [9] с применением метода

Supersampling (SSAA). Это позволило учесть влияние алиасинга при затенении. В результате модель получилась твердотельной, без ошибочных точек в зоне обнаружения, что повышает точность моделирования. Однако использование технологии GDI WinApi в настоящее время является устаревшим и подходит только для академических исследований. Для прикладных задач компьютерного моделирования следует применять современные кроссплатформенные фреймворки и библиотеки, такие как Qt с модулем QImage для попиксельного доступа, а также Direct2D.

Построенная ФВ модель зоны РЛС и рельефа пригодна для решения задач проектирования доступных пространств, в частности — для поиска оптимального пути воздушных объектов с учётом рельефа и зон обнаружения. Так как данная модель состоит из точек, описываемых локальными уравнениями, это даёт возможность использовать её в дальнейших аналитических расчётах.

Заключение

В работе реализован подход к геометрическому моделированию зоны обнаружения радиолокационной станции с учётом экранирующего влияния рельефа на основе ФВ метода. Показано, что использование локальных аналитических функций в сочетании с аппаратом R-функций позволяет корректно выполнять теоретико-множественные операции пересечения и объединения моделей без потери аналитической целостности описания.

Предложенная схема интеграции ФВ модели зоны обнаружения и цифровой модели рельефа обеспечивает формирование единого локального уравнения результирующей сцены, которое учитывает теневые области и геометрические ограничения, обусловленные поверхностью местности. Это подтверждает применимость метода для задач пространственного анализа радиолокационного покрытия.

Программная реализация продемонстрировала устойчивость вычислительного процесса при дискретизации пространства размерностью $200i$ точек.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения разработанного подхода при проектировании систем радиолокационного контроля, анализе доступных пространств, а также при решении задач оптимизации маршрутов движения объектов с учётом зон обнаружения и особенностей рельефа.

В качестве дальнейшего направления исследований целесообразно рассматривать оптимизацию вычислительных процедур построения ФВ моделей, включая распараллеливание трассировки лучей и применение специализированных структур данных для ускорения рендеринга и аналитической обработки трёхмерных сцен, чтобы на практике использовать предложенный метод в моделях с большим количеством точек.

Список источников / References

1. Абраменков В. В., Алферьев А. В., Андриухин М. В. [и др.]. Радиолокация. Теория и практика: монография / под ред. А. В. Бляхмана. Москва: ЮНИТИ, 2023. 711 с. ISBN 978-5-238-03712-7.

Abramennkov V. V., Alferyev A. V., Andryukhin M. V. [et al.]. Radiolokatsiya. Radar. Theory and practice / Ed. by A. V. Blyakhman. Moscow, 2023. 711 p. ISBN 978-5-238-03712-7. (In Russ.).

2. Куприяшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением: монография. Москва: Радиотехника, 2020. 279 с. ISBN 978-5-93108-191-5.

Kupryashkin I. F., Likhachyov V. P., Ryazantsev L. B. Malogabaritnyye mnogofunktsionalnyye RLS s nepreryvnyy chototno-modulirovannym izlucheniym. Moscow, 2020. 279 p. ISBN 978-5-93108-191-5. (In Russ.).

3. Лавров А. А., Антонов И. К. Многолучевые радиолокаторы. Борьба с дронами: монография. Москва: Радиотехника, 2021. 249 с. ISBN 978-5-93108-209-7. EDN: YPUWJF.

Lavrov A. A., Antonov I. K. Mnogoluchevyye radiolokatory. Bor'ba s dronami. Moscow, 2021. 249 p. ISBN 978-5-93108-209-7. EDN: YPUWJF. (In Russ.).

4. Васюков В. Н., Лозовский И. Ф., Морозов Ю. В. [и др.]. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов в радиолокационных системах с адаптивными цифровыми антенными решетками: монография. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. 239 с. ISBN 978-5-7782-4743-7. EDN: MLXGRJ.

Vasyukov V. N., Lozovskiy I. F., Morozov Yu. V. [et al.]. Space-time processing of wideband signals in radar systems with adaptive digital antenna arrays. Novosibirsk, 2022. 239 p. ISBN 978-5-7782-4743-7. EDN: MLXGRJ. (In Russ.).

5. Гарин Е. Н., Ратушняк В. Н., Гладышев А. Б., Смирнов Д. И. Программное и аппаратное моделирование радиолокационных сигналов РЛС вертикального зондирования // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 13, № 3. С. 370–378. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0229> EDN: PHQEYU.

Garin E. N., Ratushnyak V. N., Gladyshev A. B., Smirnov D. I. Software and hardware simulation of radar system signals of the vertical sounding. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020;13(3):370–378. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0229> EDN: PHQEYU. (In Russ.).

6. Владимирцов В. М., Дмитриев Д. Д., Ратушняк В. Н., Колупаев А. Ю. Экспериментальные исследования макета радиолокационной станции вертикального зондирования // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 7. С. 874–884. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0442> EDN: ZFMJGV.

Vladimirov V. M., Dmitriyev D. D., Ratushnyak V. N., Kolupayev A. Yu. Experimental investigations of the vertical sounding radar layout. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022;15(7):874–884. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0442> EDN: ZFMJGV. (In Russ.).

7. Белый Ю. И. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения: монография. Москва: Радиотехника, 2018. 456 с. ISBN 978-5-93108-183-0. <https://doi.org/10.18127/B9785931081830>. EDN: URXSMJ.

Belyy Yu. I. Radiolokatsionnyye sistemy spetsialnogo i grazhdanskogo naznacheniya. Moscow, 2018. 456 p. ISBN 978-5-93108-183-0. <https://doi.org/10.18127/B9785931081830>. EDN: URXSMJ. (In Russ.).

8. Толоч А. В., Яров А. Б., 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. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-196-43-50>. EDN: BIQLJD.

Tolok A. V., Yarov A. B., Pankova A. E., Chenstov A. E. Functional-voxel method for geometric description of radar station detection zone. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025;196(4):43–50. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-196-43-50>. EDN: BIQLJD. (In Russ.).

9. Яров А. Б., Толоч А. В. Визуализация затенения объемного поля методом лучевого сканирования на основе метода функционально-воксельного моделирования // Программирование. 2026. № 2. С. 76–83. <https://doi.org/10.7868/S3034584726010058>. EDN: HMITQF.

Yarov A. B., Tolok A. V. Development of a volumetric field shading visualization algorithm using ray scanning based on the functional-voxel modeling method. *Programming and Computer Software*. 2026;2:76–83. <https://doi.org/10.7868/S3034584726010058>. EDN: HMITQF. (In Russ.).

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

Tolok A. V. Graphic image-models in information technologies. *Journal of Applied Informatics*. 2009;4:31–40. EDN: KWMTBP. (In Russ.).

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

Tolok A. V. Funktsional'no-voksel'nyy metod v komp'yuternom modelirovanii / Ed. by S. N. Vasilyeva. Moscow, 2016. 112 p. ISBN 978-5-9221-1680-0. EDN: WIGUOJ. (In Russ.).

12. Толоч А. В., Толоч Н. В. Принципы организации непрерывности в дискретизованном пространстве. *Scientific Visualization*. 2025;17:10–18. <https://doi.org/10.26583/sv.17.5.02>.

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

Rvachev V. L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryye yeye prilozheniya. Kiev, 1982. 552 p. (In Russ.).

14. Максименко-Шейко К. В., Мацевитый А. М., Толоч 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., Matsevityi A. M., Tolok A. V., Sheyko T. I. R-functions and inverse problem of analytic

geometry in three-dimensional space. *Information Technologies*. 2007;10:23–32. EDN: IJQBMN. (In Russ.).

15. Литвинова Ю. С., Максименко-Шейко К. В., Шейко Т. И. Математическое и компьютерное моделирование строительных конструкций на основе R-функций // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17, № 3. С. 12–18.

Litvinova Yu. S., Maksimenko-Sheyko K. V., Sheyko T. I. Mathematical and computer modeling of building structures based on R-functions. *Problems of Mechanical Engineering*. 2014;17(3):12–18. (In Russ.).

Информация об авторе:

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

e-mail: ab.yarov@yandex.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 11.02.2026; одобрена после рецензирования 02.06.2026; принята к публикации 08.07.2026.

YAROV Aleksey Borisovich, Postgraduate of the Engineering Graphics Department, Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow.
e-mail: ab.yarov@yandex.ru

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

The author has read and approved the final manuscript. The author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 11.02.2026; approved after reviewing 02.06.2026; accepted for publication 08.07.2026.