

УДК 004.921

DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-942-944

## Алгоритм построения рельефа с учётом затенения функционально-воксельным методом для моделирования зон обнаружения радиолокационных станций

А. Б. Яров<sup>1</sup>, А. В. Толок<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Россия, Москва.<sup>2</sup>Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, Москва

**Аннотация.** При моделировании зон обнаружения радиолокационных станций функционально-воксельным методом с учётом рельефа невозможно учитывать пространство, находящееся вне доступа для электромагнитных лучей за экранированными областями модели. Применение R-функций в рамках функционально-воксельного метода не учитывает области, находящиеся за препятствиями. Решением является применение специального алгоритма, который основывается на существующих программах трассировки лучей для воксельных сцен. Создаётся массив, который и заполняется данными существующего рельефа. При помощи метода трассировки лучей (Voxel Ray Traversal) алгоритм определяет необходимую территорию, которую нужно идентифицировать на существующей функционально-воксельной модели рельефа посредством изменения её локальных функций в найденных точках. Такое решение позволяет учесть углы затенения уже существующих моделей на сложных рельефах и использовать модель зоны обнаружения при решении различных задач радиолокации.

**Ключевые слова:** функционально-воксельный метод, моделирование РЛС, метод бросания лучей, трассировка лучей.

## An algorithm for constructing terrain with shadowing using the functional-voxel method for radar detection zone modeling

А. В. Яров<sup>1</sup>, А. В. Толок<sup>2</sup><sup>1</sup>Moscow State Technological University 'STANKIN', Russia, Moscow<sup>2</sup>V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

**Abstract.** When modeling radar detection zones using the functional-voxel method with terrain, it is impossible to account for the space beyond the shielded areas of the model that is inaccessible to electromagnetic rays. The use of R-functions within the functional-voxel method does not account for areas located behind obstacles. The solution is a specialized algorithm based on existing ray tracing programs for voxel scenes. An array is created and populated with existing terrain data. Using ray tracing (Voxel Ray Traversal), the algorithm determines the required area to be identified on the existing functional-voxel terrain model by modifying its local functions at the determined points. This solution allows for the shading angles of existing models on complex terrain and the use of the detection zone model in solving various radar problems.

**Keywords:** Functional-voxel method, radar modeling, ray casting, ray tracing.

### Введение

При построении зон обнаружения радиолокационных станций функционально-воксельным методом с заданным рельефом невозможно учитывать углы закрытия этой модели. Применение R-функций в рамках функционально-воксельного метода не учитывает области, находящиеся за препятствиями. В связи с этим возникает необходимость в разработке специализированного алгоритма, способного находить это затенение при построении трёхмерных зон видимости функционально-воксельным методом.

### Постановка задачи

Актуальной задачей в области моделирования радиолокационного наблюдения является точное определение трёхмерных зон видимости с учётом влияния рельефа местности. Такое ограничение не позволяет точно смоделировать зону обнаружения радиолокационных систем в сложно пересечённой местности.

### Теория

В основе разработанного алгоритма трассировки лучей лежат современные подходы компьютерной графики, которые могут подходить для задач функционально-воксельного моделирования. Базовыми

из них являются бросание лучей (Ray Casting), пошаговая трассировка (Ray Marching) с использованием функций знаковых расстояний (SDF), воксельная трассировка (Voxel Ray Traversal, DDA).

Так как для моделирования используется воксельная сетка, то целесообразно для каждого луча применять алгоритм DDA, который часто используют в воксельных моделях. Метод определяет последовательность вокселей, через которые проходит луч, обеспечивая полный охват траектории без пропусков.

Прокладка лучей в модели происходит при помощи создания трёхмерного массива сцены  $S(i,j,k)$ , в который записывается информация о рельефе.

Для заполнения данного массива используются локальные функции, получаемые в результате считывания нормалей заданной поверхности рельефа в форме M-образов. Сетка массива заполняется в каждой точке, где локальная функция  $n_1x+n_2y+n_3z+n_4 \geq 0$ . Такое условие позволяет точно определить наличие рельефа в каждой точке массива для последующего анализа трассировки лучей в моделируемой сцене.

В месте расположения радиолокационной станции инициируется набор лучей, направленных ко всем точкам всех границ сцены. Таким образом обеспечивается полное покрытие пространства за счёт перебора всех возможных направлений распространения электромагнитных волн.

На каждом шаге трассировки выполняется проверка текущего вокселя по предварительно сформированному массиву  $S(i,j,k)$ . Обнаружение препятствия (рельефа) интерпретируется как факт экранирования всех последующих вокселей вдоль данного луча. Эти воксели корректируют существующие M-образы рельефа, добавляя к ней теневую составляющую.

### Результаты экспериментов

Результатом обработки всех лучей является обновлённый трёхмерный воксельный рельеф в виде M-образов для каждого слоя объекта. Этот рельеф является обновлённым V-представлением модели (рис. 1), в котором локальные функции в теневых местах дополняются данными о препятствии.

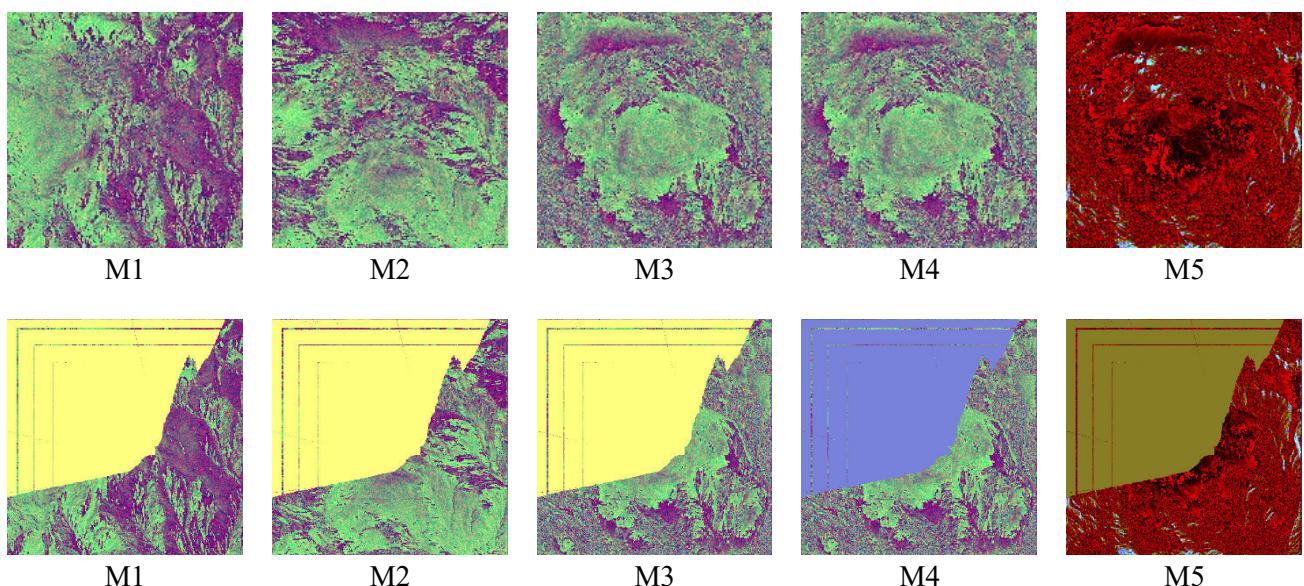


Рисунок 1. Результат работы алгоритма в одном из сечений, где демонстрируется  
отличие M-образов до и после его использования.

### Обсуждение результатов

Визуальный анализ результатов демонстрирует корректное построение теневых зон за препятствиями. На M-образах рельефа (рис. 1) чётко идентифицируются области, соответствующие лучам, остановленным препятствиями (M1-M3 – жёлтый цвет, M4 – голубой цвет, M5 – коричневый цвет).

Важным наблюдением является алиасинг (ступенчатость), который является следствием дискретной природы воксельного представления и применяемого алгоритма трассировки. Данный артефакт может быть существенно уменьшен с применением методов сглаживания компьютерной графики.

## Выводы

Полученная модель позволяет откорректировать зону обнаружения в условиях сложно пересечённой местности при использовании теоретико-множественных операций R-функционального моделирования, так как применяемый алгоритм позволяет учесть экранированную от лучей область. Дальнейшие исследования предлагается направить на оптимизацию производительности алгоритма, устранение создаваемых артефактов и внедрение его для функционально-воксельной модели.

## Список литературы

1. Толок А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании / под ред. академика РАН С.Н. Васильева. М.: Физматлит, 2016. 112 с.
2. Толок А.В. Графические образы-модели в информационных технологиях // Прикладная информатика. 2009. № 4. С. 31-40.
3. Толок А.В., Толок Н.Б. Построение функционально-воксельной модели рельефа методом билинейной интерполяции триангулированной сетки // Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019). М.: ИПГУ РАН, 2019. С. 3191-3196.
4. R-функции и обратная задача аналитической геометрии в трехмерном пространстве / Максименко-Шейко К.В., Мацевитый А.М., Толок А.В., Шейко Т.И. // Информационные технологии. 2007. № 10. С. 23-32.
5. Толок А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании. М.: Физматлит, 2016. 112 с.
6. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.
7. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. Москва: Советское радио, 1970. 560 с.