

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.3>

УДК: 537.876:004.942

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРЫ

К.Ю. Коваленко, Р.Р. Латыпов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики  
420111, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 16а

Статья поступила в редакцию 16 мая 2025 г.

**Аннотация.** Целью настоящего исследования является разработка вычислительной модели распространения коротковолновых радиосигналов в условиях неоднородной ионосферы с учетом сферичности Земли. В работе представлен программный комплекс, реализующий метод трассировки лучей на основе геометрической оптики. Особенностью разработанной модели является использование реалистичных профилей электронной плотности в многослойной структуре ионосферы, позволяющих учитывать эффект рефракции при прохождении радиоволн через слои различной плотности. В алгоритм расчета включены механизмы учета полного внутреннего отражения, а также преобразования координат между геодезическими и декартовыми системами. Модель поддерживает интеграцию эмпирических данных Международной эталонной ионосферы IRI2016, как напрямую, так и с применением радиальных базисных функций для ускорения расчетов. Разработка реализована на языке Python с использованием научных библиотек и средствами трехмерной визуализации. Результаты моделирования позволяют отображать траектории радиоволн различных частот и анализировать влияние параметров ионосферы на

их распространение. Проведенный сравнительный анализ с существующими методами моделирования, такими как метод параболического уравнения и метод нормальных волн, показал, что предложенный подход обеспечивает высокую точность прогнозирования при значительно меньших вычислительных затратах. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и оптимизации систем дальней радиосвязи, а также для исследования физических процессов в ионосфере.

**Ключевые слова:** коротковолновые радиосигналы, ионосферное распространение, компьютерное моделирование, геометрическая оптика, трассировка лучей, многослойная ионосфера, системы радиосвязи, электронная плотность.

**Автор для переписки:** Коваленко Константин Юрьевич, [kintonk@yandex.ru](mailto:kintonk@yandex.ru)

## Введение

Надежность коротковолновой (КВ) радиосвязи в значительной степени зависит от состояния ионосферы и характеристик распространения радиоволн [Крюковский и др., 2024] [Смирнов, Смирнова, Тынянкин, 2019]. Моделирование траекторий распространения радиосигналов играет критическую роль в планировании и обеспечении эффективной радиосвязи, особенно для систем дальней связи, использующих отражение от ионосферы [Psiaki, 2019].

Современные методы моделирования распространения коротковолновых сигналов основываются на различных подходах, включая метод геометрической оптики, методы решения параболического уравнения, метод нормальных волн и полноволновые методы [Lytaev, 2019]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения с точки зрения вычислительной сложности, точности и применимости к различным сценариям распространения радиоволн.

Существующие модели, такие как International Reference Ionosphere (IRI), Simplified Ionospheric Regional Model (SIRM) и Advanced Stand-Alone Prediction System (ASAPS), предоставляют средства для предсказания характеристик

ионосферы и распространения радиоволн [Ja'far, A. Hadi, 2022]. Однако большинство этих моделей либо требуют значительных вычислительных ресурсов, либо вводят упрощения, которые могут снижать точность результатов в сложных условиях распространения.

В данной работе представлен программный комплекс для моделирования распространения коротковолновых радиосигналов, который сочетает в себе точность расчетов с вычислительной эффективностью. Разработанная модель учитывает сферичность Земли, многослойную структуру ионосферы и взаимодействие радиоволн с ионосферной плазмой, что позволяет получать более точные прогнозы распространения сигналов в различных условиях.

Целью исследования является разработка и валидация компьютерной модели распространения коротковолновых радиосигналов, учитывающей реалистичные характеристики ионосферы и обеспечивающей визуализацию траекторий распространения сигналов для практического применения в системах радиосвязи.

## **1. Теоретические основы распространения радиоволн в ионосфере**

### **1.1. Структура ионосферы и ее влияние на распространение радиоволн**

Ионосфера представляет собой слой верхней атмосферы Земли, расположенный на высоте примерно от 50 до 1000 км, характеризующийся наличием свободных электронов и ионов, образованных в результате ионизации молекул воздуха солнечным ультрафиолетовым и рентгеновским излучением. Структура ионосферы не является однородной и традиционно разделяется на несколько слоев с различными характеристиками: D-слой (60-90 км), E-слой (90-150 км), F1-слой (150-250 км) и F2-слой (250-500 км) [Шерстюков, Зыков, Акчурин, 2021] [Radio Waves and the Ionosphere, 1999].

Каждый из этих слоев характеризуется специфическим профилем электронной концентрации, что непосредственно влияет на распространение радиоволн. В разработанной модели электронная концентрация для каждого слоя описывается специфическими упрощёнными функциями [Rukundo, 2022]:

1) D-слой:  $n_D(h) = n_{D0} \cdot e^{\left(\frac{h-h_D}{H_D}\right)}$ , где  $n_{D0}$  – базовая электронная плотность на высоте  $h_D$ , а  $H_D$  – масштаб высоты для D-слоя.

2) E, F1 и F2 слои моделируются с использованием гауссовых распределений:

$n(h) = n_{\max} \cdot e^{\left(\frac{-(h-h_{\max})^2}{2 \cdot H^2}\right)}$ , где  $n_{\max}$  – максимальная электронная концентрация,  $h_{\max}$  – высота максимума концентрации, а  $H$  – масштаб высоты для соответствующего слоя.

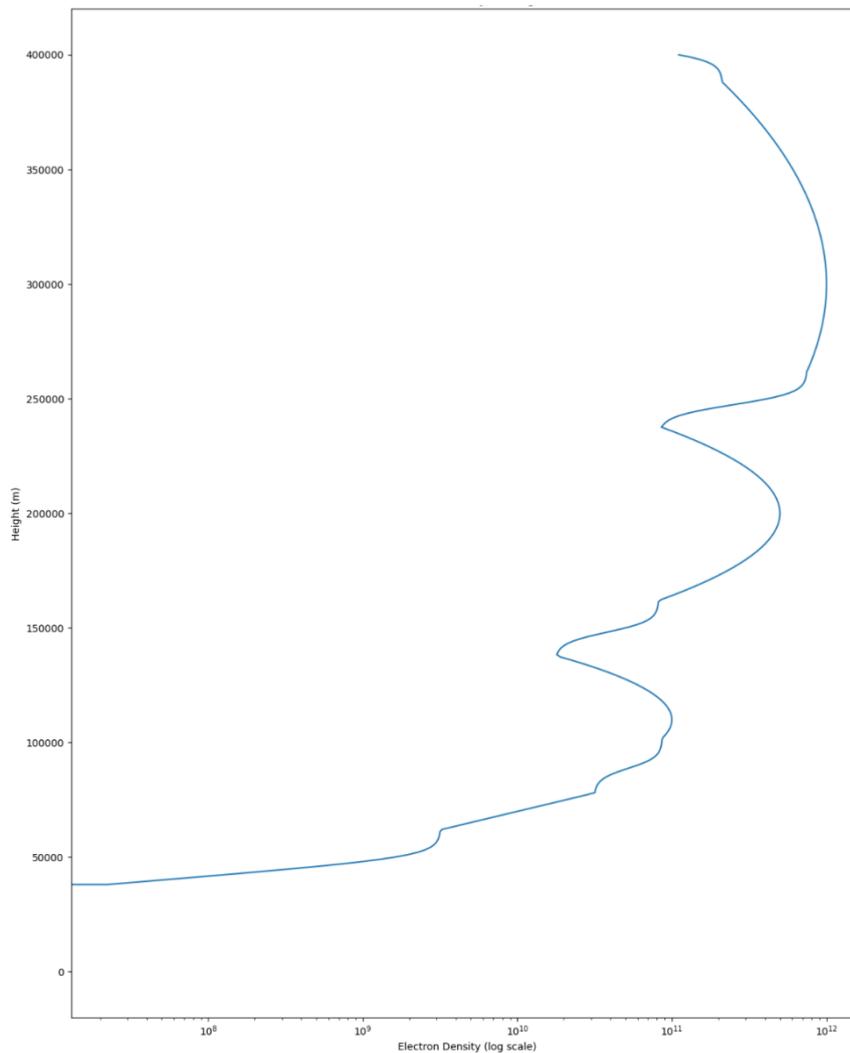


Рис. 1. Распределение электронной плотности в зависимости от высоты, применяемое в модели.

## 1.2. Показатель преломления в ионосфере

Распространение радиоволн в ионосфере определяется показателем преломления, который зависит от частоты волны и электронной концентрации среды. Для КВ диапазона показатель преломления можно описать формулой Эпплтона-Хартри [Бринелли, Намгаладзе, 1988]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - \frac{iZ}{1 \pm Y_L} - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2}},$$

где:  $X = \omega_p^2 / \omega^2$  – отношение квадрата плазменной частоты к квадрату частоты волны;

$Y = \omega_H / \omega$  – отношение гирочастоты электронов к частоте волны;

$Y_L$  и  $Y_T$  – компоненты вектора  $Y$ , параллельная и перпендикулярная магнитному полю;

$Z = \nu / \omega$  – отношение частоты столкновений электронов к частоте волны.

В упрощенном виде, без учета магнитного поля и столкновений, показатель преломления можно представить как [Афонин, Петров, 2021]:

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{e^2 \cdot N_e}{4\pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot m_e \cdot f^2},$$

где  $\omega_p$  – плазменная частота,  $e$  – заряд электрона,  $N_e$  – электронная концентрация,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $m_e$  – масса электрона, а  $f$  – частота радиоволны.

## 1.3. Закон преломления радиоволн

Траектория радиоволны определяется дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n,$$

где  $r$  – радиус-вектор точки на траектории луча,  $s$  – длина пути вдоль луча, а  $n$  – показатель преломления среды.

При распространении радиоволн в ионосфере, характеризующейся неоднородным показателем преломления, траектория волны отклоняется в соответствии с законом Снеллиуса [Агарышев, Жанг, 2013]:

$$\frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы падения и преломления,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления в соответствующих средах. В разработанной модели используется обобщенная форма закона Снеллиуса для расчета рефракции радиоволн в ионосфере с непрерывно меняющимся показателем преломления.

## 2. Предлагаемый метод моделирования

### 2.1. Математическая модель

Предлагаемый метод основан на геометрической оптике и трассировке лучей с учетом сферичности Земли и неоднородной структуры ионосферы. Ключевая особенность метода заключается в моделировании распространения радиоволн через многослойную ионосферу с реалистичными профилями электронной концентрации.

Для расчета траектории сигнала используется метод пошагового интегрирования уравнений распространения луча с учетом непрерывно меняющегося показателя преломления.

Для учета сферичности Земли в модели используются геодезические координаты (широта, долгота) с преобразованием в геоцентрические декартовы координаты:

$$X = R \cdot \cos\phi \cdot \cos\lambda,$$

$$Y = R \cdot \cos\phi \cdot \sin\lambda,$$

$$Z = R \cdot \sin\phi,$$

где  $R$  – радиус Земли,  $\phi$  – широта, и  $\lambda$  – долгота.

## 2.2. Алгоритм расчета траектории радиоволны

Алгоритм расчета траектории радиосигнала включает следующие основные этапы:

- 1) Задание начальных параметров: частота сигнала, начальные координаты, угол возвышения, азимут.
- 2) Расчет начального направления распространения в локальной системе координат.
- 3) Пошаговое интегрирование уравнений траектории с учетом изменения показателя преломления.
- 4) Определение точек отражения сигнала от ионосферных слоев.
- 5) Расчет полной траектории сигнала до точки приема или до выхода сигнала за пределы ионосферы.

Центральной частью алгоритма является расчет угла отражения при прохождении через слои с различными показателями преломления. Данный алгоритм учитывает явление полного внутреннего отражения, которое происходит, когда угол падения превышает критический угол, определяемый отношением показателей преломления сред. В общем случае, он может использоваться для расчётов при переходе между средами.

## 2.3. Особенности реализации

Разработанный программный комплекс реализован на языке Python с использованием библиотек для научных вычислений (NumPy, SciPy) и визуализации (Matplotlib). Ключевые особенности реализации включают:

- 1) Модульная архитектура, разделяющая функциональность на логические компоненты (расчет углов, моделирование ионосферы, визуализация).
- 2) Многопоточная обработка для повышения производительности расчетов.
- 3) Детальное моделирование ионосферных слоев с использованием эмпирических и аналитических моделей.
- 4) 3D-визуализация траекторий распространения сигналов различных частот.

Модель ионосферы реализована с использованием класса Layer, который позволяет рассчитывать электронную плотность для различных ионосферных слоев. Визуализация результатов моделирования осуществлялась с использованием трехмерных графиков, позволяющих наглядно представить траектории сигналов с учетом сферичности Земли. На рисунке показаны траектории распространения сигналов различных частот при одинаковых начальных условиях:

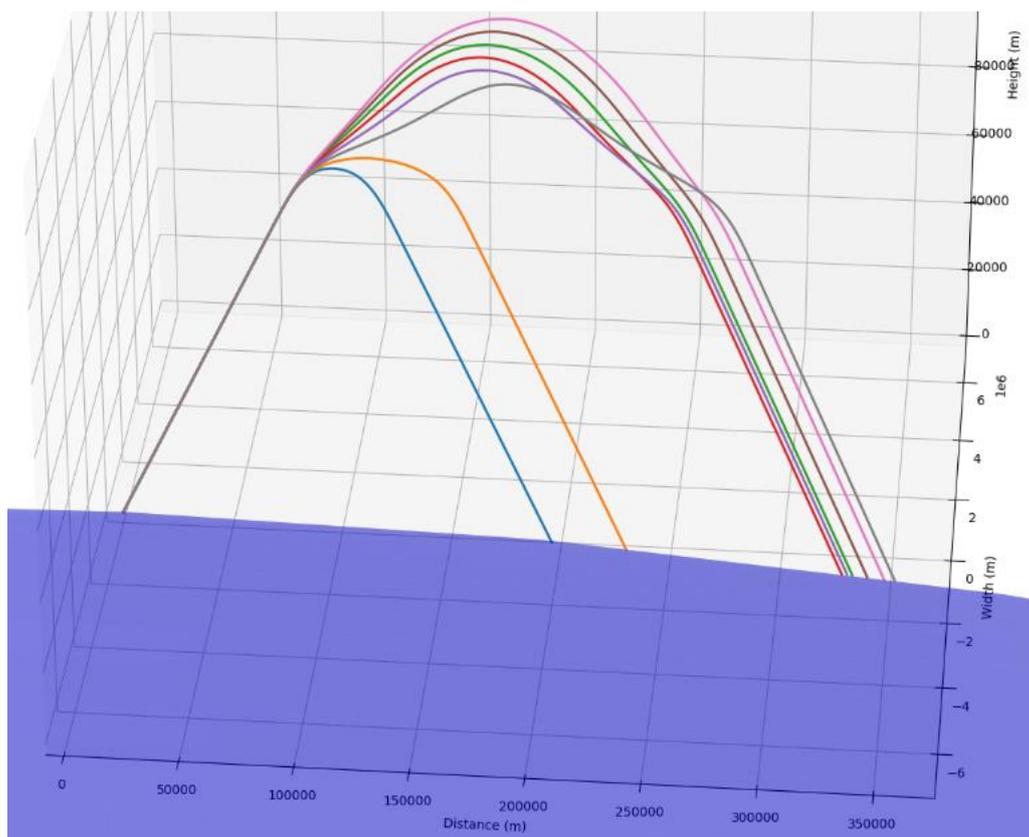


Рис. 2. Визуализация траекторий гармонических сигналов разных частот.

## 2.4. Структура программы

Программный комплекс реализован на языке Python с использованием модульной архитектуры, что соответствует современным принципам разработки научного программного обеспечения. Основные компоненты включают:

- 1) Модуль ионосферы (ionosphere.py) – реализует модель ионосферы с различными слоями и расчет электронной плотности.
- 2) Модуль расчета углов (angles.py) – содержит функции для расчета углов преломления и отражения.

- 3) Модуль земной геометрии (`earth_math.py`) – реализует функции для работы с геодезическими и геоцентрическими координатами.
- 4) Модули визуализации (`earth_path_render.py`, `signal_path_render.py`) – обеспечивают отображение результатов моделирования.
- 5) Модуль расчета траектории (`path_calculator.py`) – основной алгоритм расчета пути сигнала.

Модульная структура программы обеспечивает гибкость и расширяемость, позволяя легко модифицировать отдельные компоненты без необходимости изменения всей программы. Такой подход облегчает внедрение новых моделей ионосферы или алгоритмов расчета траекторий, что важно для научных исследований и практических приложений.

## **2.5. Методика использования данных IRI2016**

Разработанный программный комплекс предусматривает возможность интеграции эмпирических данных Международной эталонной ионосферы (IRI2016) для повышения точности моделирования. Реализация включает два подхода: прямое использование IRI2016 и аппроксимацию данных с помощью радиальных базисных функций (RBF).

Для прямого доступа к данным IRI2016 используется библиотека для Python `iri2016`, позволяющая получать профили электронной концентрации для заданных координат и времени.

Для прямого доступа к данным IRI2016 используется библиотека для Python `iri2016`, позволяющая получать профили электронной концентрации для заданных координат и времени.

## **2.6. Сравнение методов расчета электронной концентрации**

Для ускорения расчетов реализован метод аппроксимации данных IRI с использованием RBF-интерполяции.

Проведенный анализ показал, что использование RBF-аппроксимации позволяет сократить время расчета профилей электронной концентрации на 98%

при сохранении точности в пределах 5% относительно прямого использования IRI2016. Для оценки погрешности был использован метод  $\|f - s\| \leq Ch^p \|f\|_V$  [Wendland, 2004], где:

- $\|f - s\|$  – норма ошибки между функцией  $f$  и её интерполянтom  $s$ ;
- $C$  – константа, зависящая от выбранного ядра и распределения узлов
- $h$  – максимальное расстояние между узлами интерполяции (шаг сетки, 3 км);
- $p$  – порядок аппроксимации, зависящий от гладкости функции и свойств ядра;
- $\|f\|_V$  – норма в соответствующем пространстве (например, в нативном пространстве, связанном с выбранным ядром).

Основные характеристики методов представлены в таблице 1:

Таблица 1. Сравнение использования библиотеки IRI независимо и совместно с RBF-аппроксимацией.

Параметр	Прямой расчет IRI	RBF-аппроксимация
Время расчета, с	10 000	200
Погрешность, %	0	< 5%

### 3. Сравнительный анализ с существующими методами моделирования

#### 3.1. Критерии сравнения

Метод можно отнести к семейству методов, опирающихся на геометрическую оптику (трассировку лучей), используя свою модель электронной плотности ионосферы или эмпирическую модель IRI.

Для оценки эффективности предложенного метода проведен сравнительный анализ с существующими методами моделирования распространения коротковолновых сигналов по следующим критериям:

- 1) Точность прогнозирования траектории сигнала;
- 2) Вычислительная эффективность;
- 3) Учет многослойной структуры ионосферы;

- 4) Способность моделировать распространение сигналов различных частот;
- 5) Визуализация результатов моделирования.

В качестве референтных методов были выбраны [Lytaev, 2019]:

- Метод параболического уравнения (PE);
- Метод нормальных волн (MNW).

### 3.2. Результаты сравнения

Проведенный анализ показал, что предложенный метод обеспечивает достаточную точность прогнозирования траектории радиосигналов при значительно меньших вычислительных затратах по сравнению с методом параболического уравнения и методом нормальных волн. При использовании математического метода трассировки, а не эмпирической модели IRI, разработанный метод показал сопоставимую точность при лучшей производительности благодаря оптимизированному алгоритму расчета.

Основные результаты сравнения представлены в таблице:

Таблица 2. Сравнение методов моделирования.

Метод	Точность	Вычислительная эффективность	Учет многослойной структуры	Моделирование различных частот	Визуализация
Предложенный метод (Ray Tracing, IRI)	Высокая	Средняя	Да	Да	2D/3D, интерактивная
Предложенный метод (Ray Tracing, ionosphere model)	Средняя	Высокая	Да	Да	2D/3D, интерактивная
PE	Очень высокая	Низкая	Частично	Ограниченно	2D
MNW	Высокая	Низкая	Да	Да	2D

Если использовать встроенную модель ионосферы вместо модели IRI, то особенностью предложенного метода можно считать более детальное моделирование структуры ионосферы с учетом плавных переходов между слоями, что обеспечивает более реалистичное представление распространения

сигналов. Использование сигмоидных функций для моделирования переходов между слоями позволяет избежать нефизичных скачков в траектории луча:

$$V = a + \frac{b-1}{1 + e^{-\frac{x-center}{2 \cdot transition}}}$$

Подход с использованием методов сглаживания переходов между слоями ионосферы находит своё отражение в работах, посвящённых моделированию профилей электронной плотности [Limberger и др., 2013] [Lalgudi Gopalakrishnan, Schmidt, 2022].

### 3.3. Обсуждение результатов

Предложенный метод демонстрирует наилучший баланс между точностью и вычислительной эффективностью среди рассмотренных подходов. Особенно заметное преимущество наблюдается при моделировании распространения сигналов в условиях сложной ионосферной структуры, например, во время солнечных возмущений или в период захода/восхода солнца.

Интеграция современных моделей ионосферы (IRI2016) в разработанный алгоритм позволяет учитывать реальные данные о состоянии ионосферы, что повышает точность прогнозирования для конкретных геофизических условий. Это особенно важно для практических приложений, таких как планирование радиосвязи в условиях изменяющейся ионосферной обстановки.

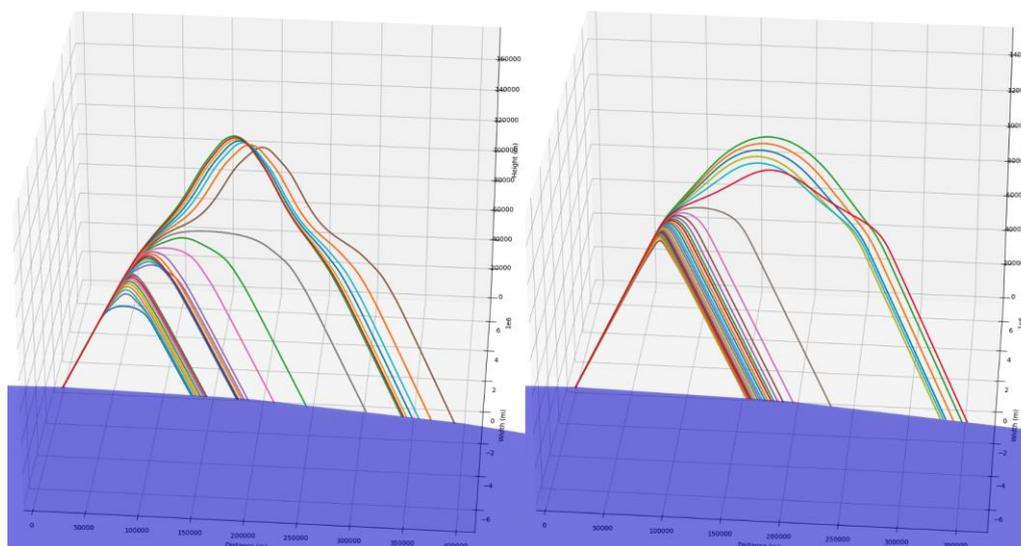


Рис. 3. Сравнение предложенной модели ионосферы и эмперических данных IRI.

### 3.4. Примеры расчетов

Для демонстрации возможностей разработанного метода были проведены расчеты траекторий распространения радиосигналов в диапазоне частот от 3 до 30 МГц при различных начальных условиях. Основные параметры моделирования:

- Радиус Земли: 6371 км
- Высота ионосферы: 400 км
- Максимальное расстояние трассировки: 800 км
- Количество точек для расчета траектории: 4000

Расчеты проводились для различных значений угла возвышения (от  $5^\circ$  до  $85^\circ$ ) и азимутальных направлений, что позволило оценить влияние этих параметров на траекторию распространения сигнала.

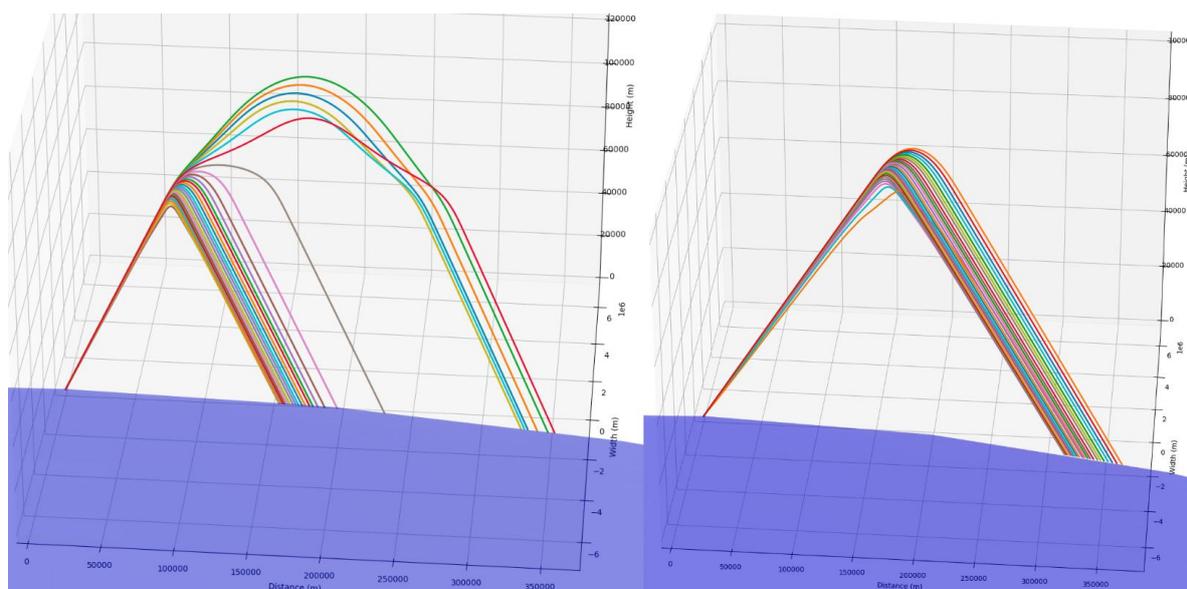


Рис. 4. Сравнение пары угла возвышения 60 градусов и азимутом 25 градусов с парой угла возвышения 40 градусов и азимутом 205 градусов.

### 3.5. Передача произвольного сигнала

Для передачи сигнала комплексной формы, состоящего из гармоник, лежащих в коротковолновом диапазоне, могут быть переданы его составляющие. Для учёта временных задержек каждой гармоники необходимо моделировать прохождение каждой гармоники через ионосферу так, чтобы у них имелась одна точка схождения.

### 3.6. Алгоритм бисекция лучей методом бинарного поиска

Для обеспечения точного попадания радиолуча в заданную точку приёма реализован адаптивный алгоритм коррекции угла места на основе бинарного поиска. Метод основан на итеративном сужении диапазона начальных углов до достижения заданной точности позиционирования.

Уравнение для расстояния между расчётной позицией луча и целевой точкой:  $\Delta d(\theta_0) = \|r_{расч}(\theta_0) - r_{приём}\|$ .

Алгоритм включает следующие шаги:

- 1) Инициализация диапазона углов  $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ ;
- 2) Вычисление траекторий для  $\theta_{min}$  и  $\theta_{max}$ ;
- 3) Определение знака ошибки  $\Delta d(\theta_{min})$  и  $\Delta d(\theta_{max})$ ;
- 4) Итеративное деление диапазона пополам;
- 5) Проверка условия остановки:  $\Delta d < \varepsilon$ .

Критерий остановки выбирается из необходимости расчёта. За точку приёма может быть выбрана любая, берётся средняя изначальных крайних точек. Сведённый в одну точку сигнал выглядит так:

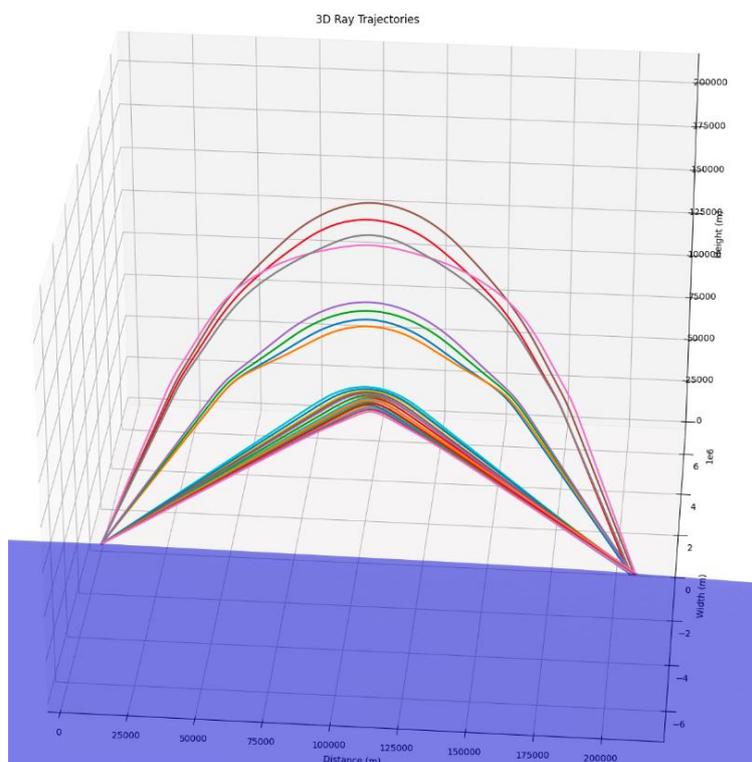


Рис. 5. Моделирование гармоник, сведённых в одну точку.

### 3.7. Методика синтеза результирующего сигнала

Суммирование сигналов с учётом временных задержек выполняется по формуле [Fuchs, Delyon, 1997]:  $s_{sum}(t) = \sum_{k=1}^N A_k * s(t - \tau_k)$ , где:

- $A_k$  – амплитуда  $k$ -го луча;
- $\tau_k = \frac{L_k}{c}$  – временная задержка;
- $L_k$  – длина траектории луча;
- $c$  – скорость света.

Для импульсного сигнала длительностью  $T$  условие разрешения лучей:  $\Delta\tau > T$  [Levanon и др., 2015], где  $\Delta\tau$  – разность задержек между соседними лучами.

### 3.8. Спектральные характеристики

Спектральная плотность мощности (СПМ) вычисляется через преобразование Фурье:  $S(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s_{sum}(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2$ .

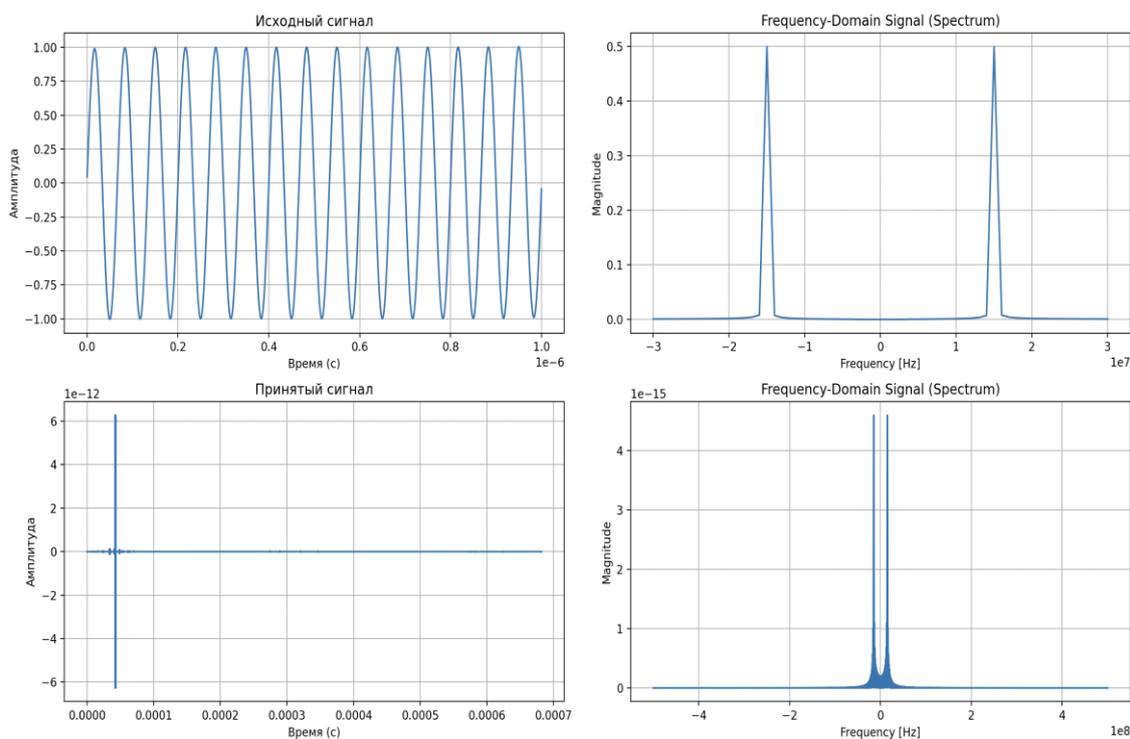


Рис. 6. Спектральные характеристики и сигналы во времени до и после передачи.

На рисунке видно, что после прохождения через ионосферу форма сигнала искажена и распределена ввиду задержек, однако общая форма спектра сигнала сохраняется.

## Заключение

В работе представлен программный комплекс для моделирования распространения коротковолновых радиосигналов в условиях неоднородной ионосферы с учетом сферичности Земли. Разработанный метод обеспечивает высокую точность расчетов при умеренной вычислительной сложности и включает моделирование многослойной структуры ионосферы, учет эффектов рефракции и отражения радиоволн, а также визуализацию трехмерных траекторий сигналов. Проведенные симуляции согласуются с теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными, что подтверждает корректность модели. Перспективы дальнейших исследований связаны с учетом солнечной активности, горизонтальных градиентов электронной плотности и разработкой алгоритмов оперативного прогнозирования условий радиосвязи.

## Литература

1. Fuchs J.J., Delyon B. The Sampling Theorem and Time Delay Estimation // IFAC Proceedings Volumes. 1997. Т. 30. № 11. С. 495.
2. Ja'far J.M., Hadi K.A. A comparison between IRI-2016 and ASAPS models for predicting foF2 ionospheric parameter over Baghdad city // AIP conference proceedings. 2022. Т. 2563. С. 30002.
3. Шерстюков О.Н. Импульсное радиозондирование ионосферы: учебно-методическое пособие / О.Н. Шерстюков, Е.Ю. Зыков, А.Д. Акчурин. // Казань: Казанский федеральный университет, Институт Физики, 2021. – 5 с.
4. Lalgudi Gopalakrishnan G., Schmidt M. Ionospheric electron density modelling using B-splines and constraint optimization // Earth Planets and Space. 2022. Т. 74. № 1.

5. Levanon N. и др. Non-coherent pulse compression – aperiodic and periodic waveforms // IET Radar Sonar & Navigation. 2015. Т. 10. № 1. С. 216.
6. Limberger M. и др. Regional representation of F2 Chapman parameters based on electron density profiles // Annales Geophysicae. 2013. Т. 31. № 12. С. 2215.
7. Лытаев М. С. Разработка и исследование методов численного решения задачи распространения электромагнитных волн в неоднородной тропосфере : дис. – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2019.
8. Psiaki M.L. Ionosphere Ray Tracing of Radio-Frequency Signals and Solution Sensitivities to Model Parameters // Radio Science. 2019. Т. 54. № 8. С. 738.
9. Rukundo W. Ionospheric Electron Density and Electron Content Models for Space Weather Monitoring // IntechOpen eBooks. 2022.
10. Wendland H. Scattered data approximation // Cambridge university press, 2004. – Т. 17.
11. Агарышев А.И., Жанг Н.М. Применение закона Снеллиуса для расчёта траекторий радиоволн в регулярной рассеивающей ионосфере // – 2013. –Т. 4. – С. 75.
12. Афонин К.Ю., Петров В.Г. Влияние высокотемпературных эффектов на интерпретацию измерений времени задержки зондирующей волны в рефрактометрии ИТЭР // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 4. С. 299.
13. Бринелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы, 1988. 6 с.
14. Крюковский А.С. и др. Mathematical modeling of the influence of Earth's ionosphere inhomogeneities on the propagation of electromagnetic waves // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69. № 6. С. 501.
15. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Тынянкин С.И. Прогнозирование коротковолновой радиосвязи по данным навигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 9. С. 881.
16. Ian Poole. Radio Waves and the Ionosphere // QST – Official Journal of ARRL. November 1999. P. 62-64.

**Для цитирования:**

Коваленко К.Ю., Латыпов Р.Р. Компьютерное моделирование распространения коротковолновых радиосигналов с учётом неоднородной структуры ионосферы // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.3>