

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А.А. Новиков *^{1,2}, К.С. Сычев², М.С. Михайлов²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 20.05.2024

Одобрена после рецензирования 03.07.2024

Принята к публикации 05.07.2024

Аннотация

В статье представлены результаты моделирования распространения радиоволн (РРВ) в условиях городской местности методом пошагового решения параболического уравнения. Разработана программа, которая позволяет на основе данных о геометрии застройки, извлечённых из цифровых карт местности, выполнить моделирование выбранного участка урбанизированной среды и рассчитать в нём распределение поля на любой высоте над поверхностью Земли (ЗП) и в любых сечениях. В качестве эксперимента выбрана область в пределах месторасположения метрополитена «Селигерская». Графики показывают излучение поля антенной, расположенной на крыше здания, обладающего наибольшим количеством надземных этажей, а также отображают зону тени.

Ключевые слова: распространение радиоволн, городская местность, параболическое уравнение, метод факторизации, распределение поля, цифровые карты местности

EDN KUJHBT

doi:[10.24412/2949-0553-2024-311-04-11](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2024-311-04-11)

Введение

Существует множество причин исследования распространения радиоволн в городской среде. Например, при помощи такого исследования решаются задачи расположения базовых станций мобильной связи и расчёта зон максимального покрытия [1]. Однако требуется учёт некоторых особенностей, среди которых стоит отметить довольно частое отсутствие прямой видимости между антеннами, многолучевое распространение, которое приводит к интерференционным замираниям, наличие дифракционных лучей, зона тени и т.д. Необходимо также решать проблему, связанную с отсутствием информации о параметрах среды.

Известны различные методы вычисления напряжённости поля в городе: модель Уолфиш-Икегами, широко используемая на практике методика Окамура – Хата [2, 3]. Несмотря на то, что модели дают хорошие результаты, они требуют больших вычислительных ресурсов. Наиболее популярным методом исследования распространения радиоволн является метод параболического уравнения (МПУ). Впервые он был введён в работах Леонтовича и Фока по решению задач распространения радиоволн над сферической поверхностью Земли [4]. В основу метода положена идея о том, что амплитуда поля в направлении распространения волн изменяется намного медленнее по сравнению с поперечным направлением. В последние годы этому методу уделяется особое внимание, поскольку он снижает сложность вычислений и может работать практически со всеми видами сложных сред. Имеется ряд аналитических и численных методов решения параболического уравнения, обзор работ по этим методам проведён в статье [5]. Из численных методов решения ПУ можно выделить: методы конечных элементов (МКЭ), методы конечных разностей (МКР) и методы дискретного преобразования Фурье с расщеплением. Несмотря на способность напрямую реализовывать граничные условия (ГУ) на границах со свободным пространством, первые два метода обладают низкой точностью вычислений. Метод преобразования

* Автор, ответственный за переписку: Антон Алексеевич Новиков, anovikov00@gmail.com

Фурье с расщеплением оказывается численно более точным, однако имеются трудности, связанные с введением граничных условий.

Широкое распространение получил способ расчёта напряжённости поля методом параболического уравнения с преобразованием Фурье в городской среде в сечениях. Однако модель городской местности либо задаётся произвольно (без учёта реальных географических данных), либо данные о городской застройке извлекаются из закрытых сервисов. В настоящее время не разработана программа для моделирования распространения радиоволн в городской среде на любой высоте над поверхностью Земли и в любых сечениях на основе общедоступных цифровых карт местности. Цель работы заключалась в разработке этой программы.

Метод пошагового решения параболического уравнения

Алгоритм решения ПУ заключается в следующем (Рисунок 1): начальное поле $U(x, z)$ распространяется от антенны (т.А) вдоль продольной координаты x , в точке $x_0 + \Delta x$ применяется прямое преобразование Фурье по продольной координате, далее поле умножается на передаточную функцию слоя пространства. Затем применяется обратное преобразование Фурье по продольной координате, результат вычисления умножается на фазовый множитель, который учитывает рефракцию радиоволн в атмосфере Земли [6, 7]:

$$U(x_0 + \Delta x, z) = e^{-jk_0(n-1)\Delta x} \mathcal{F}^{-1} \left\{ e^{-j \frac{jk_z^2 \Delta x}{k_0 + \sqrt{k_0^2 - k_z^2}}} \mathcal{F}[U(x, z)] \right\}, \quad (1)$$

где \mathcal{F} - прямое преобразование Фурье, \mathcal{F}^{-1} - обратное преобразование Фурье, $U(x, z)$ - начальное распределение поля, k_0 - волновой вектор в свободном пространстве (в работе частота сигнала равна 2,4 ГГц), n - показатель преломления (в работе показатель преломления равен единице), Δx - шаг по оси x .

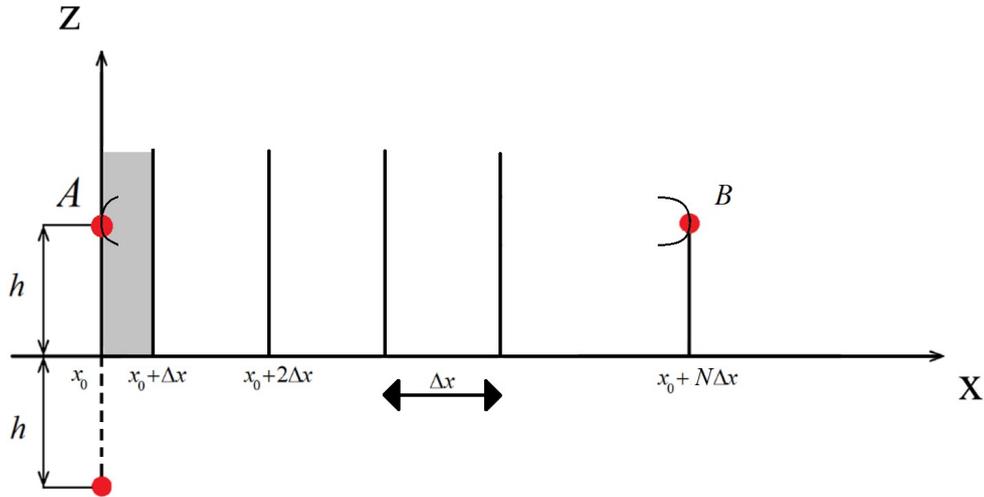


Рисунок 1 – Пошаговое решение параболического уравнения

Процесс вычисления поля повторяется в точках $x_0 + 2\Delta x$, $x_0 + 3\Delta x$, т.е. поле вычисляется шаг за шагом и распространяется до точки приёма (т. B).

Уравнение (1) записано в широкоугольном приближении (для антенн с широкой диаграммой направленности - $|\vartheta_{\max}| > 15^\circ$).

Дискретное преобразование Фурье

Необходимо отметить, что в случае горизонтальной поляризации излучения (когда отличным от нуля является вектор $E_y(x, z)$) выполняется граничное условие Дирихле:

$$U(0, x) = 0, x \geq 0. \quad (2)$$

Граничное условие соответствует случаю, когда от поля реального источника отнимается поле фиктивного излучателя. Таким образом, на высоте $h = 0$ поле равно нулю, а относительно границы

раздела Земля-воздух функция дополняется на полюсь нечётным образом, как показано на рисунке 2а. Тогда смешанное преобразование Фурье сводится к одностороннему синусному преобразованию.

В случае вертикальной поляризации излучения (когда отличным от нуля является вектор $H_y(x, z)$) выполняется граничное условие Неймана:

$$dU(0, x) = 0, x \geq 0. \tag{3}$$

Граничное условие соответствует случаю, когда проводится операция суммирования двух полей, тогда на высоте $h = 0$ поле принимает ненулевое значение, а относительно границы раздела Земля-воздух функция дополняется на полюсь чётным образом, как показано на рисунке 2б. Тогда смешанное преобразование Фурье сводится к одностороннему косинусному преобразованию.

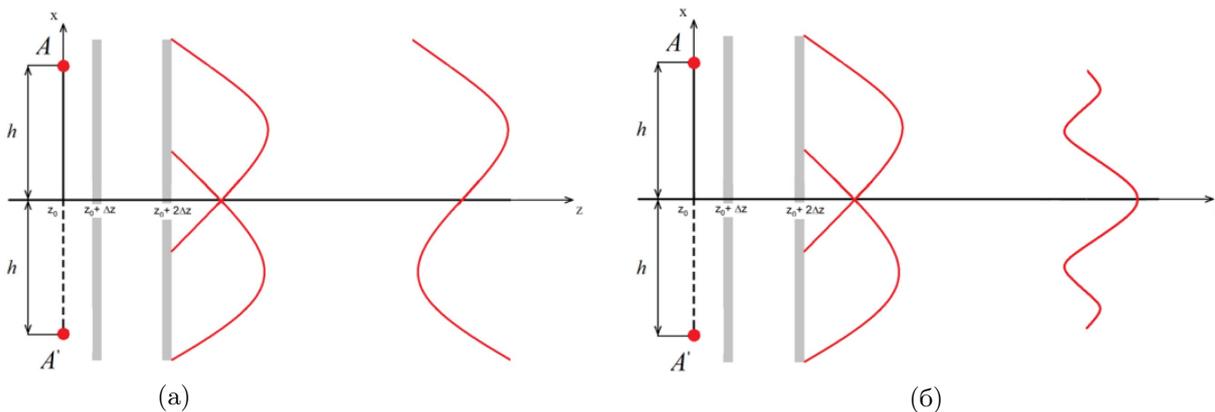


Рисунок 2 – Дискретное преобразование: а) синусное, б) косинусное

Результаты моделирования дискретных преобразований показаны на рисунке 3. Можно заметить, что на рисунке 3а в нижней области графика выполняется граничное условие Дирихле, а на рисунке 3б в нижней области графика выполняется граничное условие Неймана.

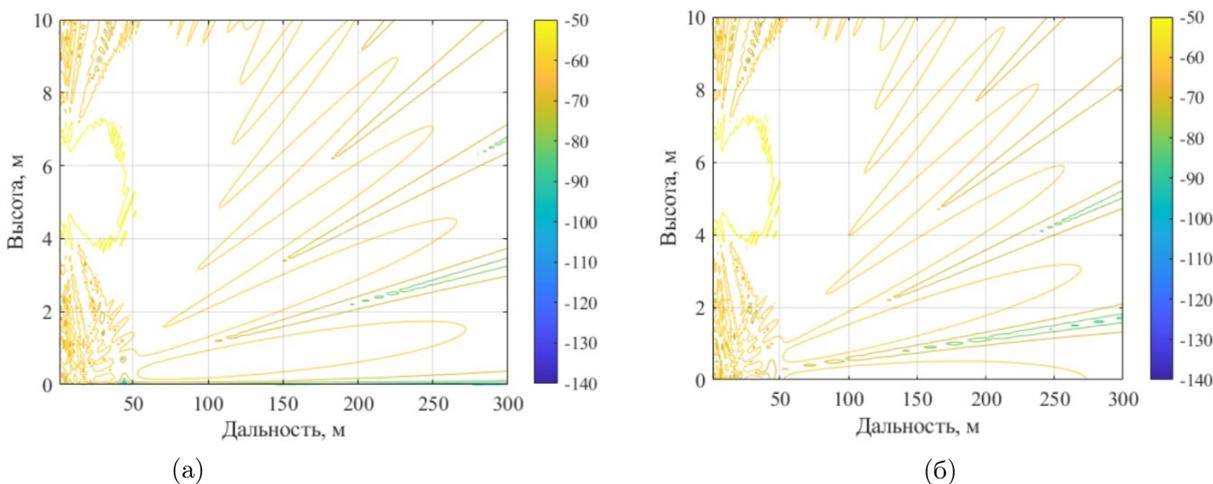


Рисунок 3 – Результаты моделирования дискретных преобразований: а) синусного, б) косинусного

Так как электромагнитное поле (ЭМП) падает на поверхность Земли под скользким углом, то коэффициент отражения для E- и H-поляризации равен минус 1. В этом случае считается, что выполняется условие Дирихле [6]. В работе моделирование распространения радиоволн выполняется при помощи дискретного синусного преобразования.

Верификация методов пошагового решения параболического уравнения и геометрической оптики

Для проверки точности вычисления распределения ЭМП проведена верификация МПУ с методом геометрической оптики (ГО). Ставилась задача рассчитать напряжённость электрического поля над поверхностью Земли, которая полагалась плоской, однородной и без препятствий. Пространство над ЗП

— вакуум, направление излучения антенны задавалось вдоль поверхности Земли. Расчёт напряжённости поля проводился на интервале расстояний 0–300 м.

Результаты расчёта поля в приближении ГО и МПУ над плоской Землёй показаны ниже (Рисунок 4). Можно заметить, что распределение поля и расположение максимумов практически одинаково. Таким образом, видно графическое соответствие результатов во всей области расчёта. Различие в верхней части графика можно объяснить влиянием верхнего граничного условия, которое накладывается на ПУ, различие в нижней части графика можно объяснить влиянием ЗП на распределение поля.

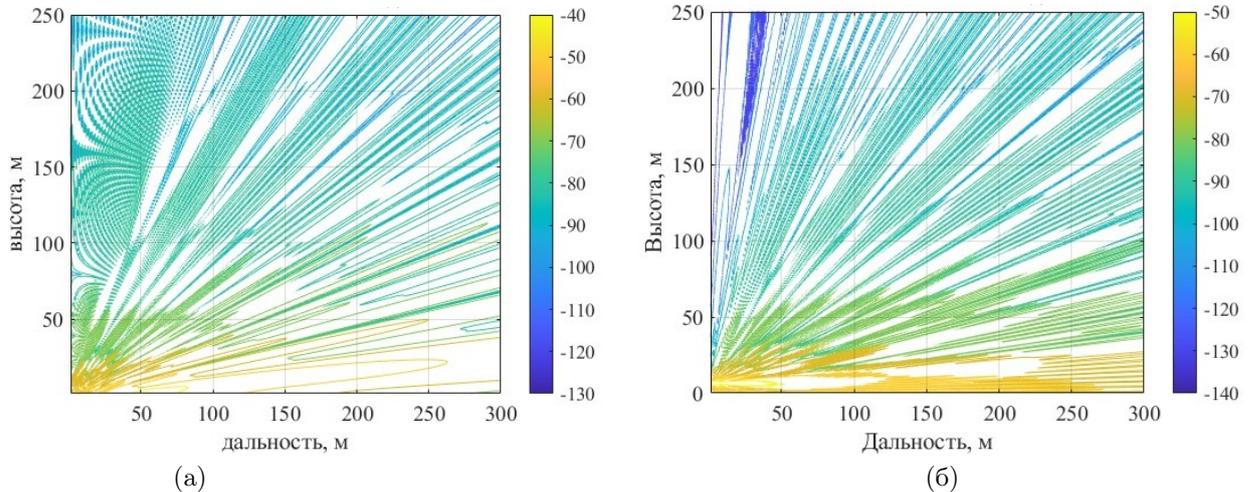


Рисунок 4 – Распределение поля методами а) геометрической оптики, б) параболического уравнения

Модель городской местности

Для моделирования участка городской застройки из общедоступного сервиса [8] были извлечены данные (широта, долгота и количество надземных этажей каждого здания). В качестве эксперимента была выбрана область в пределах месторасположения метрополитена «Селигерская». Таким образом, было выполнено моделирование городского участка (Рисунок 5). Для удобного отображения информации и дальнейшего расчёта распределения поля был осуществлён перевод географических координат (широты и долготы) в километры.

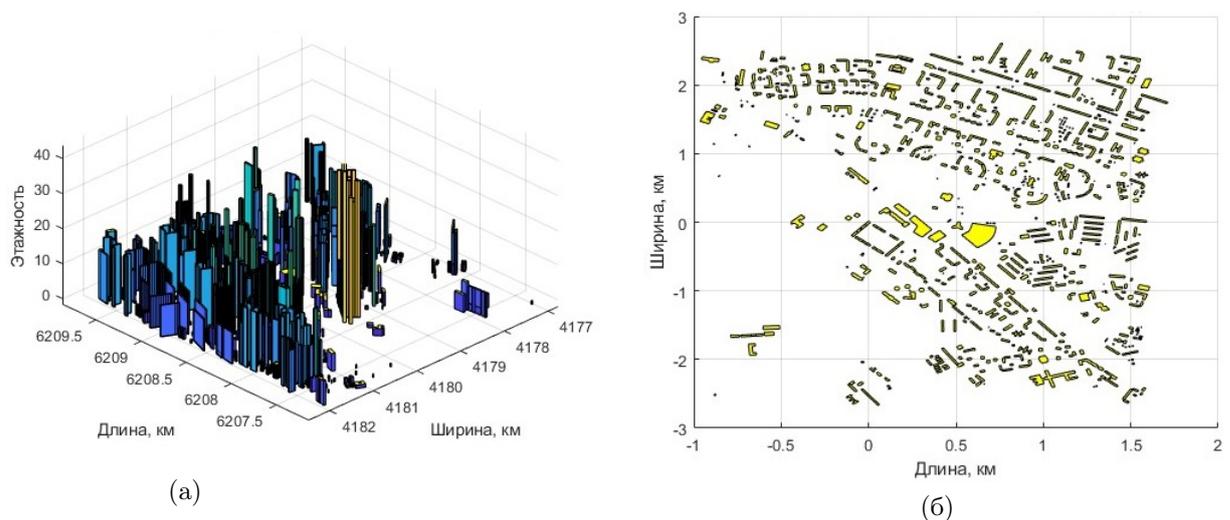


Рисунок 5 – Модель городской местности: а) трехмерный вид, б) вид сверху

Здания аппроксимировались параллелепипедами, расположенными перпендикулярно поверхности Земли.

Результаты расчёта

Стоит отметить, что вычислять напряжённость поля методом МПУ для крупномасштабных моделей затруднительно. Поэтому для упрощения расчётов урбанизированную среду можно разбить

на сечения (Рисунок 6а), по ним построить графики распределения поля и фиксировать значения напряжённости поля на высоте h (Рисунок 6б) [9]. По сохранённым значениям напряжённости поля можно будет построить график распределения поля на высоте h над поверхностью Земли:

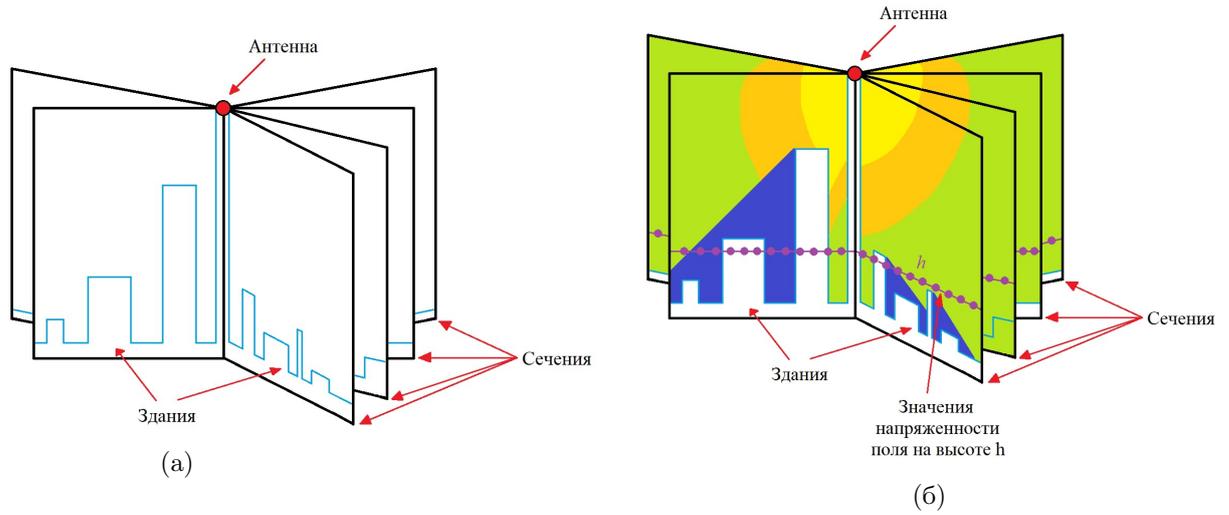


Рисунок 6 – Вычисление напряженности поля в городской среде методом ПУ

Для построения сечений необходимо в точке (x_0, y_0) расположить антенну на крыше здания с наибольшим количеством надземных этажей. Радиус-вектор, проведенный из начала координат до его конца, является осью абсцисс для будущих графиков сечений (Рисунок 7а).

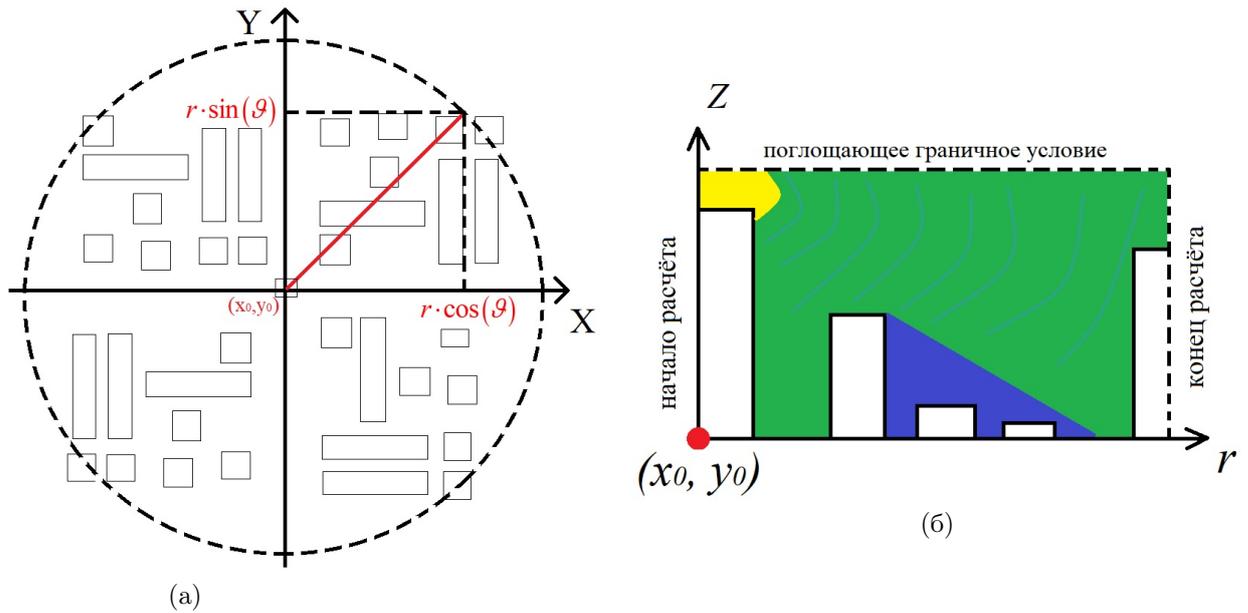


Рисунок 7 – а) построение сечения, б) вид распределения поля в сечении

Его длина определяется как квадратный корень из суммы двух составляющих:

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}, \tag{4}$$

где r_x и r_y учитывают поворот радиус-вектора вокруг места расположения антенны и определяются формулами:

$$r_x = x_0 + r \cdot \cos(\vartheta), \tag{5}$$

$$r_y = y_0 + r \cdot \sin(\vartheta), \tag{6}$$

где x_0 – это координата антенны по оси x , y_0 – это координата антенны по оси y , ϑ – угол, на который поворачивается радиус-вектор вокруг начала координат (диапазон углов и шаг изменения угла выбирался произвольно), r – радиус-вектор (в работе его длина равна 3000 метров).

По построенным графикам сечений можно рассчитать распределение поля. Для его правильного вычисления необходимо корректно ввести граничные условия на границе раздела Земля-воздух (нижняя граница) и в свободном пространстве на максимальной высоте над поверхностью Земли (верхняя граница) (Рисунок 76).

Считается, что нижней границей области является реальная физическая поверхность: Земля, вода, воздух. Такая поверхность обычно представляется поверхностным импедансным граничным условием.

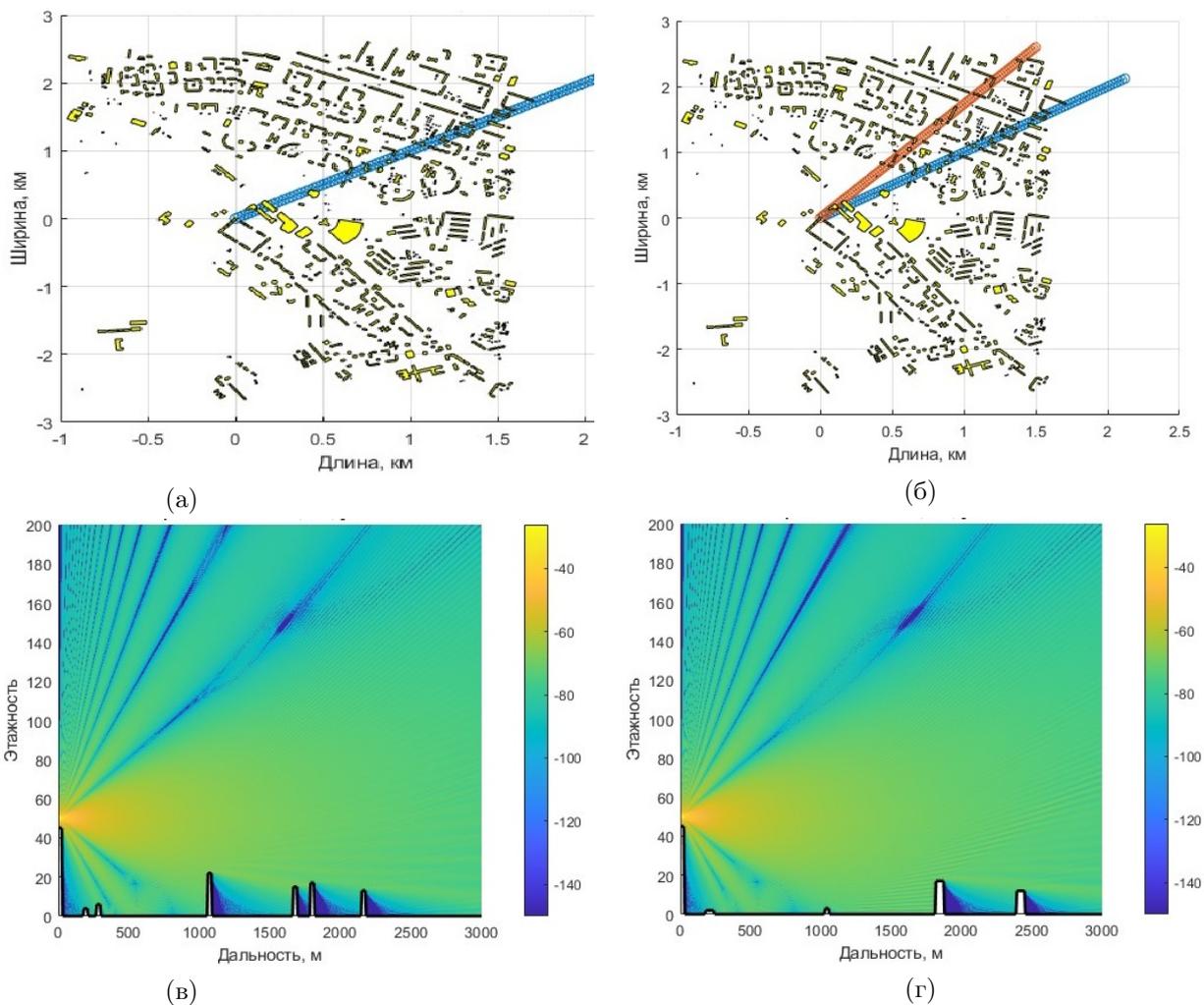


Рисунок 8 – а) сечение при 45 градусах, б) распределение поля в сечении при 45 градусах, в) сечение при 60 градусах, г) распределение поля в сечении при 60 градусах

Для верхней границы устанавливается предел области расчёта по высоте, так как имеется ограничение на объём оперативной памяти. Однако усечение расчётной области приводит к отражению радиоволн от искусственной границы, которая расположена на максимальной высоте. Поэтому необходимо введение искусственного поглощающего или идеально согласованного слоя [10]. Идеально согласованный слой представляется в виде среды с потерями, которые вводятся искусственно. В работе идеально согласованный слой вводится путём умножения уравнения (2) на весовую функцию:

$$w(z) = \begin{cases} 1, & |z| \leq 0,8 \times Z_{max} \\ e^{-b(|z|-1)^2}, & 0,8 \times Z_{max} < |z| \leq Z_{max} \end{cases}, \tag{7}$$

где $b = 0,5$ – задаётся произвольно; Z_{max} - максимальное значение области расчёта по высоте.

В результате было найдено распределение поля в плоскости (r, Z) в нескольких сечениях (Рисунок 8). Распределение поля в сечении на рисунке 8в соответствует синей линии, проведенной на

рисунке 8а. Аналогичным образом, поле на рисунке 8г совпадает с красной линией на рисунке 8б. Максимальная мощность поля соответствует жёлтому цвету. Более холодные цвета соответствуют меньшим значениям уровня напряжённости поля. Для отображения зоны тени используется фиолетовый цвет.

По значениям напряжённости поля в каждом сечении можно построить распределение поля на высоте h (Рисунок 9). Ниже представлены графики распределения поля на высоте 2 этажа и 20 этажа. Так как внутри зданий поле отсутствует, то его значение мощности соответствует белому цвету. Поэтому на рисунке 9 здания отмечены в виде белых геометрических фигур. Аналогично рисунку 8, наибольшая мощность поля соответствует жёлтому цвету, фиолетовому цвету соответствует зона тени. Таким образом, для расположения базовых станций мобильной связи необходимо выбирать место с наименьшей областью тени.

По мере увеличения высоты здания с меньшей этажностью не учитываются, следовательно, область тени уменьшается.

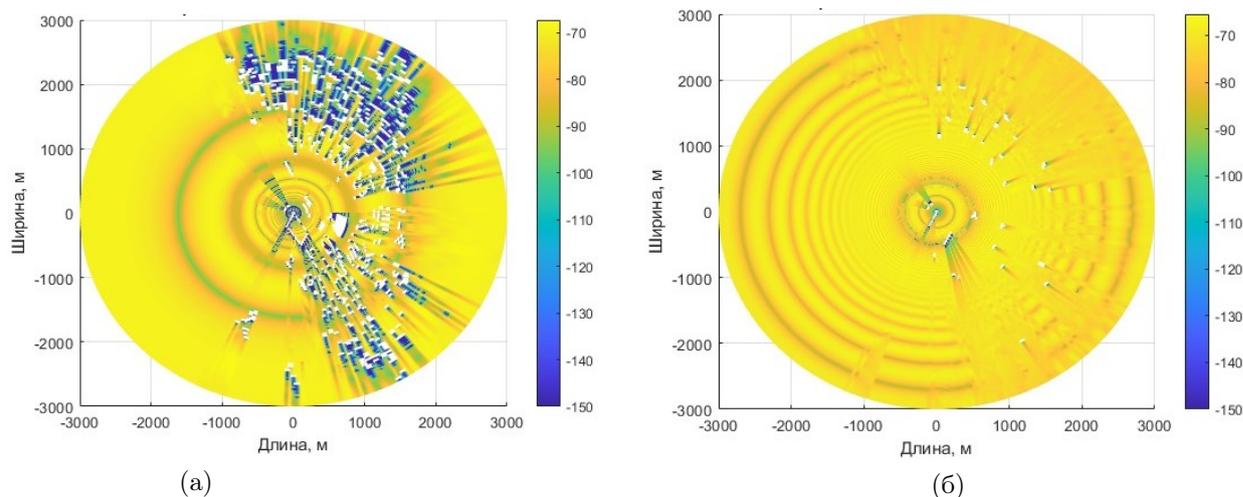


Рисунок 9 – а) распределение поля на высоте 2 этажа, б) распределение поля на высоте 20 этажа

5. Заключение

Итогом проделанной работы является разработанная программа для исследования распространения радиоволн в условиях городской местности. Для поставленных задач применялся метод пошагового решения параболического уравнения. По графикам напряжённости поля можно заметить, что при распространении поля имеется эффект дифракции. Однако стоит отметить, что в данном методе не учитывается горизонтальная дифракция.

Список литературы

- [1] V. A. Permyakov, M. S. Mikhailov and E. S. Malevich, "Analysis of Propagation of Electromagnetic Waves in Difficult Conditions by the Parabolic Equation Method," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 4, pp. 2167-2175, April 2019, doi:10.1109/TAP.2019.2905674.
- [2] Yoshihisa OKUMURA, Eiji OHMURI, Tomihiko KAWANO. Kaneharu FUKUDA "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service" // *Review of the Electrical Communication Laboratory*. Vol.16, Num.9-10, 1968, pp. 825-873.
- [3] Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. // *IEEE Trans. Veh. Technol.* – 1980, V. VT – 29, N.3, pp. 317-325.
- [4] Леонтович М.А., Фок В.А. Решение задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности Земли по методу параболического уравнения // *ЖЭТФ*, 16, 1946, № 7, стр. 557.
- [5] Акулиничев Ю. П., Захаров Ф. Н., Пермяков В. А., Михайлов М. С. Состояние и перспективы развития методов численного решения параболического уравнения // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016. Т. 59. №. 12-3. С. 169-177.
- [6] Ахияров В.В. Решение задачи дифракции радиоволн над земной поверхностью методом параболического уравнения // *Докл. IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН*. 2010. С.762.

- [7] M. Levy, Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation, London, IEE Institution of Electrical Engineers, 2000
- [8] Overpass Turbo. <https://overpass-turbo.eu/> (дата обращения: 18.05.2024)
- [9] Y. Shen and C. Cao, "Parallel method of parabolic equation for electromagnetic environment simulation," 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, 2016, pp. 515-519, doi:10.1109/ITNEC.2016.7560414.
- [10] Акулиничев Ю.П., Абрамов П.В., Ваулин И.Н. Влияние поглощающего слоя на численное решение параболического уравнения // Докл. ТУСУРа. 2007. №2 (16). С.139-145.
-

STUDY OF RADIO WAVE PROPAGATION PROCESSES IN URBAN CONDITIONS

A.A. Novikov^{*1,2}, K.S. Sychev², M.S. Mikhailov²

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

* anovikov00@gmail.com

Abstract

The article presents the results of modeling the propagation of radio waves in urban areas using the method of step-by-step solving a parabolic equation. A program has been developed that allows, based on data on the geometry of buildings extracted from digital maps of the area, to model a selected area of the urban environment and calculate the field distribution in it at any height above the Earth's surface (ES) and in any sections. An area within the location of the Seligerskaya metro was chosen as an experiment. The graphs show the field radiation from an antenna located on the roof of the building with the largest number of above-ground floors, and also display the shadow area.

Key words: radio wave propagation, urban area, parabolic equation, factorization method, field distribution, digital terrain maps
