

Имитационная модель распространения дециметровых радиоволн Введение. Одной из важнейших задач радиофизики является прогнозирование распространения радиоволн в неоднородных средах. Вследствие невозможности решить эту задачу аналитически, было разработано множество приближенных эмпирических моделей, которые имели ограниченный диапазон применения [1,2]. Современные технологии позволяют производить численные эксперименты, которые дают возможность учитывать множество факторов при моделировании процесса. В статье освещается численный метод моделирования распространения радиоволн под названием «трассировка лучей». Данный метод успешно применяется в оптике [3] и акустике [4,5]. Трассировка лучей позволяет учитывать неограниченное количество факторов, но предъявляет высокие требования к вычислительной мощности. Также трассировка лучей производится при помощи оптического приближения движения лучей, но данный недостаток можно компенсировать при помощи использования метода Монте-Карло [2,6]. Проведено множество исследований, которые доказывают работоспособность трассировки лучей для прогноза распространения радиоволн [7,8]. Описанные ниже методы представления среды и распространяющейся волны позволяют ассимилировать результаты других моделей или экспериментальных данных. Основной сложностью реализации трассировки лучей оставались слабые вычислительные способности компьютеров, но современные технологии позволяют проводить расчеты трассировки большого количества лучей и хранения результатов. Представление среды. При моделировании используется полигональное представление среды. В трехмерном моделировании полигональное представление является наиболее распространенным методом, так как позволяет моделировать формы предметов любой сложности [9]. Каждый трехмерный объект представляет сетку "склеенных" между собой элементарных фигур - полигонов. Размеры полигонов не ограничены, поэтому возможна экономия памяти при моделировании путем применения полигонов переменного размера. Также применение полигональной модели позволяет производить расчеты различных масштабов. В представленной модели мы используем треугольники в качестве фигур для полигонов. На рис. 1 продемонстрированы примеры использования полигонов для представления трехмерных поверхностей. Рис. 1 – Представление ландшафта при помощи набора треугольных полигонов Выбор в пользу полигональной модели объясняется тем, что все больше исследований проводится для систем компьютерного зрения и распознавания образов, которые также применяют полигональную модель [10], что позволяет ассимилировать результаты систем анализа среды и получить более точные входные данные модели. Объекты моделируемой среды, составленные из полигонов, должны быть замкнутыми, так как внутри каждого объекта определены свои радиофизические параметры. В данной статье мы применяем результаты исследования индекса рефракции

дециметровых радиоволн, проведенные в [11]. В качестве параметра, характеризующего вещество, мы использовали индекс рефракции.

Представление радиоволны. Фронт волны определяется набором точек, которые имеют начальные координаты, совпадающие с координатами источника сигнала. Траектория движения каждой точки подчиняется законам геометрической оптики и может интерпретироваться как луч радиоволны. Каждый луч проходит свой путь, взаимодействуя с преградами во время распространения.

Совокупность точек с одинаковым временем генерации является волновым фронтом. Движение точки волнового фронта дискретизировано, и определяется следующими параметрическими выражениями:  $x_n = x_{n-1} + i_{n-1}dt$   $y_n = y_{n-1} + j_{n-1}dt$ ,  $(1) z_n = z_{n-1} + k_{n-1}dt$  где  $x_n$  - координата X точки волнового фронта при итерации n,  $y_n$  - координата Y точки волнового фронта при итерации n,  $z_n$  - координата Z точки волнового фронта при итерации n,  $i_{n-1}$  - составляющая вектора следования вдоль оси абсцисс,  $j_{n-1}$  - составляющая вектора следования вдоль оси ординат,  $k_{n-1}$  - составляющая вектора следования вдоль оси аппликат,  $dt$  - это шаг времени модели. При взаимодействии с препятствием луч может отразиться или отклониться от первоначального направления движения: изменятся параметры вектора следования луча  $i, j, k$ . Критерии выбора происходящего явления и его реализация будут описаны ниже. Точность выходных данных модели зависит от количества моделируемых частиц. Количество частиц в моделируемой среде ограничено вычислительной мощностью и объемом хранилища данных. Источник сигнала. В модели источник сигнала испускает лучи в разных направлениях в соответствии с заданной для него диаграммой направленности. Количество источников сигнала не ограничено. Количество лучей в каждом направлении пропорционально мощности сигнала источника в заданном направлении. На рис. 2 показана трассировка лучей точечного источника со сферической диаграммой направленности в однородном пространстве. Рис. 2 - Излучение точечного источника со сферической диаграммой направленности в однородном пространстве На рис. 2 можно видеть, как фронт волны равномерно распространяется по всем заданным направлениям. Распространение лучей в пространстве. При генерации моделируемой среды в модели формируется набор элементов, состоящих из неограниченного количества полигонов каждый. Каждый элемент проходит предобработку: для каждого полигона вычисляется нормаль и направляется от центра элемента в бесконечность. Нормаль вычисляется при помощи векторного произведения векторов, которые сформированы из двух сторон треугольника. Пусть вершины полигона описываются точками  $A(X_A, Y_A, Z_A)$ ,  $B(X_B, Y_B, Z_B)$ ,  $(X_C, Y_C, Z_C)$ , тогда мы можем получить векторы:  $a_1 = (X_B - X_A, Y_B - Y_A, Z_B - Z_A)$   $a_2 = (X_C - X_A, Y_C - Y_A, Z_C - Z_A)$  тогда вектор нормали будет равен:  $n = (a_1 \times a_2) / |n|$  После вычисления нормали, формируется уравнение плоскости полигона вида:  $A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$ , (2)

где  $D = -(a \cdot X_A + b \cdot Y_A + c \cdot Z_A)$ . После вычисления уравнения плоскости для полигона, данные о полигоне отправляются в базу данных. При выполнении моделирования все элементы и их полигоны копируются из базы данных в оперативную память вычислительной станции. Вывод: полигональная модель представления среды позволяет формировать среду любой сложности для трассировки лучей. Данный подход дополняет способы трассировки радиолучей, опубликованных в источниках [1-3].

Взаимодействие луча со средой. При распространении луч пересекает множество элементов моделируемой среды. Каждый элемент состоит из полигонов, то взаимодействие происходит при пересечении луча с полигоном. Так как распространение луча описывается системой формул (1), то пересечение луча и полигона вычисляется следующим образом: выполняется поиск ближайшего полигона, который находится на пути следования волнового фронта. Поиск выполняется следующим образом: подставим значения координат из системы уравнений (1) в (2) и получим выражение, которое выглядит следующим образом: (3) Решая уравнение (3) относительно  $t_{\text{столкн}}$ , получаем следующее выражение: (4) Если  $t_{\text{столкн}}$  меньше нуля или его значение равно бесконечности, то пересечения с плоскостью полигона нет. Если пересечение существует, то выполняется проверка принадлежности точки полигону. После проверки всех полигонов выбирается ближайший, а после этого сравнивается  $t_{\text{столкн}}$  с шагом  $dt$  и если  $t_{\text{столкн}} \leq dt$ , то модель считает, что столкновение произошло. После этого происходит отражение или преломление. Преломление лучей подчиняется закону Снеллиуса. Так как при решении задачи распространения луча мы используем векторную формулировку, то более удобным и эффективным является следующее выражение, которое представляет упрощенное выражение из [13,14]: где  $\vec{n}$  – вектор преломленного луча,  $\vec{i}$  – вектор падающего луча,  $\vec{n}_1$  – вектор нормали к поверхности,  $n_1$  – коэффициент преломления среды 1,  $n_2$  – коэффициент преломления среды 2. Данная формулировка позволяет производить расчет преломления наиболее эффективным способом, так как не содержит даже тригонометрических функций. Как известно, при прохождении луча через границу раздела двух сред возможно как преломление, так и отражение. В данной модели учитывается явление полного внутреннего отражения, которое происходит, если выполняется следующее условие, которое выводится из закона Снелиуса:  $n_1 \cdot \sin \theta_1 > n_2$ , тогда  $\theta_2 = \pi - \theta_1$ . В случаях, когда  $n_1 \cdot \sin \theta_1 > n_2$ , преломление луча невозможно, и происходит полное внутреннее отражение, реализуемое по принципу, представленному ниже. Формулировка отражения для радиолучей формулируется следующим образом:  $\vec{r} = \vec{i} - 2(\vec{i} \cdot \vec{n})\vec{n}$ , где  $\vec{r}$  – вектор отраженного луча,  $\vec{i}$  – вектор падающего луча – вектор нормали к плоскости полигона. Пример использования Для того, чтобы можно было наглядно показать работу трассировки, мы использовали модель атмосферы, которая представлена в виде элементов, имеющих формы параллелепипеда, находящихся друг над другом и

имеющих значения коэффициента преломления, который бы повторял вертикальный профиль коэффициента преломления реальной атмосферы, представленный в работах [11,12]. Сформировав набор полигонов, мы провели трассировку лучей из точечного источника с полусферической диаграммой направленности в указанной синтезированной среде, расположенного на высоте 20 м над идеально ровной поверхностью Земли. Вследствие неоднородности структуры атмосферы волновой фронт радиосигнала с поверхности Земли искажается. Трассировка лучей позволяет определить, как происходит это искажение. На рис. 3 мы можем наблюдать искажения фронта радиоволны при полусферической диаграмме направленности. Для наглядности рекомендуем рис. 3 сравнить с рис. 1. Рис. 3 – Искажение волнового фронта радиоволны в неоднородной атмосфере. Данные рисунки несут лишь качественный характер, так как для получения количественных данных требуется больше информации о топографии, антропогенных факторах и др. Заключение Разработанная модель позволяет производить моделирование распространения радиоволн с заданной точностью. Применение полигональной модели представления среды позволяет проводить моделирование в среде любой геометрической формы. На представленном примере показана возможность ассимиляции данных из внешних источников