

УДК 004.414.23: 519.876.5

И.В. Рудаковский (4 курс, каф. ИУС), В.И. Филимонов, к.т.н., доц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА МЕТОДОМ ЧАСТИЦ

Изучение процессов в ряде электронных приборов (в том числе в лампах бегущей и обратной волны, в клистронах и т.д.) связано с анализом динамики объемного заряда. Подобные задачи решаются путем создания и анализа соответствующей математической модели в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, дифференциальных уравнений в частных производных и других уравнений, причем, в большинстве случаев это представляет собой нетривиальную задачу, которая может быть решена только с использованием ЭВМ. Альтернативой указанному выше подходу является использование метода частиц [1], имеющего имитационный характер.

Данная работа посвящена имитационному моделированию динамики двумерной плотности $\rho(x,y,t)$ одноименных зарядов. Предлагаемый путь решения – переход от плотности зарядов к дискретным зарядам, моделирование динамики дискретных зарядов под действием электростатических сил с одновременным обратным переходом к плотности в любой дискретный момент времени. Вычисление силы взаимодействия между отдельными зарядами производится в соответствии с законом Кулона:

$$F_{i,j} = k \cdot \frac{q_i \cdot q_j}{r_{i,j}^2},$$

где q_i и q_j – величины зарядов, $r_{i,j}$ – расстояние между ними, k – коэффициент пропорциональности.

Модель представляет собой систему взаимодействующих зарядов, изначально расположенных на плоскости произвольным образом и имеющих в общем случае различные значения по величине. Первоначальное положение и величины зарядов определяются из поверхностной плотности, заданной аналитически или таблично. Поведение зарядов воспроизводится моделью при выбранном шаге по времени. При этом осуществляется автоматический контроль устойчивости системы при выбранном шаге с предупреждением о необходимости его уменьшения при недопустимо высоких значениях, что определяется физическими свойствами объекта. После перехода системы в очередное состояние имеется возможность получения всех параметров состояния в табличном или графическом виде.

В ходе реализации модели были выявлены сложности, связанные с преобразованием плотности в дискретные заряды и с обратным преобразованием, которое оказалось более сложным. Прямое преобразование осуществляется путем деления области задания начальной плотности на равные квадраты, с занесением в каждый из них дискретного заряда в соответствии с величиной интегральной плотности в данном квадрате. Таким образом, количество зарядов определяется размерностью сетки, получаемой вышеупомянутым делением. В результате получается некоторая система зарядов, расположенных в первоначальный момент времени на одинаковых расстояниях друг от друга. В процессе работы происходит изменение координат зарядов, что вызывает значительные трудности для обратного преобразования. В данной реализации эта задача решается следующим образом. Вся площадь, на которой находятся заряды, делится сеткой на равные части с таким расчетом, чтобы количество незаполненных клеток оставалось минимальным, что достигается изменением количества строк и столбцов сетки. Далее, величины зарядов, попавших в одну ячейку, суммируются и преобразуются в значение плотности, в результате чего данные можно представить в табличном или графическом виде.

Вычислительный процесс реализован на ЭВМ на языке Паскаль с помощью компилятора Borland Pascal 7.0 с использованием встроенного ассемблера. В программе используются графические видеорежимы для визуального отображения информации с размером экрана 640x480, 800x600, 1024x768 точек и глубиной цвета 8 бит. В связи с тем, что отображение графической информации занимает много машинного времени и большой объем оперативной памяти (до 768 килобайт), процедуры вывода написаны на языке ассемблера с использованием возможностей защищенного режима процессора, а также 32-х битной адресации. Это позволяет использовать оперативную память в виде непрерывного массива, что невозможно в 16-битном режиме, в котором работают программы, созданные с помощью вышеуказанного компилятора. 16-битный режим накладывает ограничения на размер массива до 65536 байт, в результате чего вывод графической информации на экран должен осуществляться порциями, при этом необходимо определять, в какой странице находится необходимая точка экрана и производить при этом переключение страниц, что само по себе является достаточно медленной операцией. Взамен этого для отображения информации выделяется непрерывный блок памяти, охватывающий все изображение. Вывод информации производится в этот блок с помощью 32-х битной адресации, и после формирования всего изображения оно копируется на экран. При таком подходе возможно отображение до 40 кадров в секунду на процессоре с частотой 700 МГц. Для уменьшения машинного времени процедуры вычисления основных характеристик также написаны на встроенном ассемблере с использованием арифметического сопроцессора, что позволяет сократить время вычислений в 3-5 раз по сравнению с аналогичным алгоритмом на языке высокого уровня.

Основными факторами увеличения точности моделирования являются степень дискретизации в пространстве и шаг по времени. При увеличении количества зарядов и уменьшении шага по времени точность моделирования возрастает, однако, одновременно возрастают и требования к аппаратуре. Варьируя эти параметры можно достичь оптимального сочетания точности результатов и быстродействия системы.

В результате разработана и отлажена программа, позволяющая для произвольной формы начальной плотности $\rho_n(x,y)$ получать $\rho_n(x,y,t)$ в дискретные моменты времени. Контроль точности осуществляется путем сравнения результатов, полученных с разной степенью дискретизации, а также путем сравнения с решением подобной задачи для небольшого числа зарядов качественно другим методом, а именно – путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений с использованием процедуры RK4-45.

Возможное увеличение времени моделирования и более высокие требования к аппаратуре (по сравнению с использованием других методов решения поставленной задачи) окупаются наглядностью имитационной модели, невысокими требованиями к степени гладкости начальной плотности и относительной простотой программной реализации.

Подобный подход может быть применен также и в трехмерном случае, однако при этом потребуются значительно большие вычислительные ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М., «Мир», 1987, 638 с.