

# Анимация перезамыкания магнитных силовых линий в двумерных конфигурациях.

С.В. Буланов  
Институт общей физики РАН  
Москва, Россия

Е.Ю. Ечкина, И.Н. Иновенков, А.В. Леоненко  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Москва, Россия

## Аннотация

Исследования процесса пересоединения магнитных силовых линий в высокотемпературной лабораторной и космической плазме представляет большой интерес, как для теории, так и для приложений. Для более полного понимания этого сложного физического процесса необходима его эффективная визуализация. Для создания такой анимации в псевдо двумерном случае был применен метод локального интегрального сглаживания (line integral convolution).

**Ключевые слова:** Анимация, перезамыкание, создание текстур, топология, визуализация потоков.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные наблюдения свидетельствуют о том, что магнитные поля являются одной из основных причин активных явлений на Солнце и в космосе. Во всех этих явлениях либо непосредственно наблюдается, либо предполагается быстрая диссипация магнитной энергии в высокопроводящей плазме, которую обычно связывают с изменениями структуры магнитного поля - магнитным пересоединением [6].

Исследуемый процесс описывается в рамках нелинейной многомерной магнитогидродинамической системы. Поскольку использование аналитических методов для решения этой системы затруднено, то практически единственным приемлемым способом исследования процесса самосогласованной эволюции магнитного поля и плазмы является численное моделирование. Представление результатов такого вычислительного эксперимента является самостоятельной важной проблемой. Графическое представление является наиболее предпочтительным. Данная работа посвящена изложению способа получения анимации процесса перезамыкания с помощью метода локально-интегрального сглаживания.

Особенностью проведенного численного моделирования была ориентация на получение качественных результатов. В связи с этим, большой интерес представляло наблюдение поведения топологии магнитного поля и поля скоростей.

## 2. ИЗОБРАЖЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЛОКАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ.

Подробное изложение метода локально-интегрального сглаживания можно найти, например, в [2-4]. Необходимо сделать следующие замечания:

1. Название «line integral convolution» дословно переводится как «свертка вдоль интегральных линий». Этот термин в точности описывает метод, однако, довольно неудобен в использовании, поэтому в данной работе используется название «локально-интегральное сглаживание».

2. Получающееся с помощью этого метода изображение поля хорошо передает его топологию. В то же время, информация о направлении и величине векторов никак не отображается. Для устранения этого недостатка можно использовать анимацию в совокупности с фильтрами, создающими периодическое движение.

### 2.1 Фильтры, создающие периодическое движение.

Алгоритм локально-интегрального сглаживания хорошо отображает направление векторов поля с точностью до  $\pi$ . Однако, с помощью довольно простого приема, можно получать последовательность изображений, позволяющих учесть точное направление вектора. Для этого необходимо специальным образом подобрать весовую функцию - фильтр, зависящий от параметра - фазы. В оригинальной работе [2] в качестве такого фильтра предлагается использовать функцию следующего вида:

$$Q(w) = \frac{1 + \cos(cw)}{2} \times \frac{1 + \cos(dw + \beta)}{2}$$

Для такой функции можно в явном виде посчитать интеграл.

Рассчитаем  $n$  текстур для нескольких значений фазы  $\beta = i \cdot \frac{s}{N}$ , где  $s$  - период фильтра  $N$  - число кадров анимации. Мы получаем набор изображений, которые, затем, при достаточно быстрой смене кадров, создадут впечатление движения.

С помощью движения можно создавать различные эффекты. В частности, его можно использовать для изображения величины вектора. Для этого необходимо выполнить следующие шаги ([3]):

1. Сначала, необходимо рассчитать  $N$  текстур, изменяя фазу  $\Theta_i$  по формуле:

$$\Theta_i = i \cdot s / N, \text{ где}$$

$s$  - период фильтра,

$N$  - число кадров анимации. Чем больше величина  $N$ , тем качественнее получаемая анимация.

2. Обозначим  $T(i, p)$  - интенсивность пикселя  $p$  в  $i$ -ом изображении. Для каждой ячейки сетки рассчитаем следующую величину  $q(p)$ :

$$q(p) = \frac{|F(p)| - \min_{p \in Z_c} (|F(p)|)}{\max_{p \in Z_c} (|F(p)|) - \min_{p \in Z_c} (|F(p)|)}$$

Она характеризует относительную величину вектора скорости.

3. Наконец, вычислим интенсивность  $I(j, p)$  пикселя  $p$  в  $j$ -ом, модифицированном, изображении по формулам:

$$a(p) = q(p) \frac{N}{4} \bmod N - \left\lfloor q(p) \frac{N}{4} \right\rfloor \bmod N,$$

$$I(i, p) = (1 - a) T \left( \left\lfloor q(p) \frac{N}{4} j \right\rfloor \bmod N, p \right) + a T \left( \left\lceil q(p) \frac{N}{4} j \right\rceil \bmod N, p \right)$$

Получаемая с помощью вышеописанного метода анимация обладает свойством локально «ускоряться» в соответствии с величиной векторного поля.

### 3. ОСОБЕННОСТИ АНИМАЦИИ ПОЛЯ, ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ВРЕМЕНИ

Простейшим способом учесть зависимость изображаемого поля от времени является создание последовательности статических изображений, отвечающих фиксированным моментам времени, а затем воспроизвести полученные картинки для анимации изменения поля, однако «склейка» кусков анимации, соответствующих разным моментам времени, вызывает эффект «дрожания» изображения.

Для устранения этого эффекта, в данной работе при вычислении свертки было предложено использовать несколько временных слоев исходного поля. (Изображаемое векторное поле задано на прямоугольной сетке при фиксированных моментах времени, называемых временными слоями.) Для этого, интегральная линия, вдоль которой производится свертка, вычисляется путем решения задачи Коши, в которой поле зависит от параметра интегрирования, играющего роль «времени».

Использование дополнительного тонирования получаемой текстуры цветом показало хорошие результаты. В частности, для передачи величины поля использовалось тонирование цветом, зависящим от модуля вектора в данной точке.

Для передачи направления и величины векторов поля использовался метод «распространения краски», заключающийся в следующем:

- создается дополнительный массив, размерность которого совпадает с размерностью текстуры. Элементами этого массива являются RGB составляющие цвета. Некоторые элементы этого массива, которым соответствуют интересующие точки векторного поля, инициализируются значениями RGB компонент, отличными от нуля.

- по мере вычисления последующих кадров анимации, этот массив заполняется цветами, которые переносятся вдоль положительного направления трасс. Из исходных точек «краска» постепенно вымывается. Цвета точек дополнительного массива учитываются при вычислении свертки в слагаемых, соответствующих «обратному» направлению интегральной линии.

### 4. ЛИТЕРАТУРА

□1□ N. Max, R. Crawfis, and C. Grant. Visualizing 3d velocity fields near contour surfaces. In Proceedings of Visualization '94: 248--255. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1994.

□2□ B. Cabral and C. Leedom. Imaging vector fields using line integral convolution. In Proceedings of SIGGRAPH 93, pages 263--270. ACM SIGGRAPH, 1993.

□3□ Lisa K. Forssell. Visualizing flow over curvilinear grid surfaces using line integral convolution. In Proceedings of Visualization '94: 240--247. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1994.

□4□ L.K. Forssell and S.D. Cohen. Using line integral convolution for flow visualization: Curvilinear grids, variable-speed animation, and unsteady flows. IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 1(2):133--141, 1995.

□5□ T. Delmarcelle and L. Hesselink. «The topology of symmetric, second-order tensor fields». в Proceedings of Visualization '94: 140-147. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1994.

□6□ С.В. Буланов, Г.И. Дудникова, В.П. Жуков, И.Н. Иновенков, В.В. Пичушкин. «Токовые слои в окрестности критических точек магнитного поля. Влияние эффекта Холла. Численное моделирование формирования токовых слоев» в Труды ИОФАН; Т.51:101-123, Наука. Физматлит, Москва 1996.

### АВТОРЫ:

Леоненко Алексей Викторович, аспирант МГУ им. М.В. Ломоносова

Телефон: (095)451-54-71.

E-mail: lalex@nc.cs.msu.ru

### Animation of magnetic reconnection in two-dimensional configurations.

**Abstract** A study of magnetic reconnection in high-temperature plasma has an important theoretical and practical application. For a qualitative understanding of this complicated physical process an effective visualization is required. To create an animation of this process in two-dimensional case the line integral convolution method was used.