

УДК 004

## РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРА

Крыль Е.В., Хмелевой С.В.

Донецкий национальный технический университет  
кафедра автоматизированных систем управления

E-mail: himikjeka@gmail.com

*Рассмотрен метод particle image velocimetry (PIV). Определены средства и способы реализации метода PIV с использованием кластерных технологий. Проанализировано использование пакета MPICH для решения поставленной задачи.*

### Краткое описание задачи

Задачей магистерской работы является исследование способов распараллеливания вычислительных процессов и применение одного из способов для ускорения работы реализации метода Particle Image Velocimetry (PIV).

В данной статье будет рассмотрен такой способ параллельных вычислений как кластерные технологии. Кластер будет создаваться при помощи программного пакета MPICH на основе ОС Windows.

### Описание метода PIV

Методы визуализации для изучения потоков были известны задолго до появления электронных вычислительных машин. Первые наблюдения за течением жидкости в водоемах при помощи естественных природных трассеров были описаны еще Леонардо да Винчи. Людвиг Прандтль (1875–1953) использовал взвесь из частиц слюды на поверхности воды для анализа обтекания цилиндров, призм и профилей крыла в экспериментальном канале.

Постепенно от качественных наблюдений произошел переход к измерению количественных характеристик течений, и к 60-м годам XX столетия сформировалось широкое направление в диагностике, известное как «стробоскопическая визуализация». Принцип стробоскопической трассерной визуализации заключается в измерении смещения трассеров в заданном сечении потока жидкости или газа за известный интервал времени. Областью измерения служит плоскость, освещаемая световым ножом (рис. 1) [1].

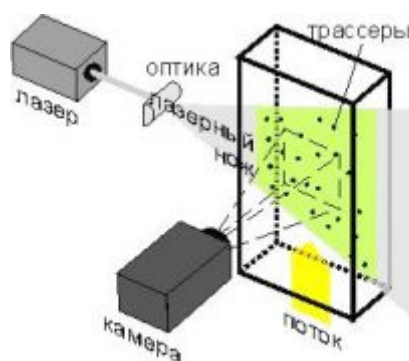


Рисунок 1. Стробоскопическая визуализация

Результатом измерения является мгновенное поле скорости в измерительной плоскости. Одной из наиболее показательных отечественных работ того времени является статья [2], в которой приведены результаты измерения полей скорости и турбулентных пульсаций в пограничном слое на пластине, полученные путем ручной обработки трассерных картин, зарегистрированных на фотографической пленке. Однако ручная обработка была трудоемка, занимала длительное время и не позволяла получать достаточного объема данных для расчета статистических характеристик. Данная ситуация являлась типичной для всех исследовательских групп в мире, занимавшихся количественной визуализацией потоков.

Появление термина PIV (Particle Image Velocimetry) — международное название метода цифровой трассерной визуализации, связывают с работой [3] в которой метод PIV был выделен как частный случай метода лазерной спеклометрии LSV (Laser Speckle Velocimetry) [4] базирующегося на оптическом преобразовании Фурье яркостных картин.

### **Кластерная технология**

Мощности современных процессоров достаточно для решения элементарных шагов большинства задач, а объединение нескольких десятков таких процессоров позволяет быстро и эффективно решать многие поставленные задачи, не прибегая к помощи мэйнфреймов и супер компьютеров (рис. 2).

Появилась идея создания параллельных вычислительных систем из общедоступных компьютеров на базе процессоров Intel и недорогих Ethernet-сетей, установив на эти компьютеры Linux и, объединив с помощью одной из бесплатно распространяемых коммуникационных библиотек (PVM или MPI) эти компьютеры в кластер. Эксперименты показали, что на многих классах задач и при достаточном числе узлов такие системы дают производительность, которую можно получить, используя дорогие суперкомпьютеры [5].

Сточкзрения ядра операционной системы поддержка кластеров и распределенных систем заключается в эффективной работе с сетью. С некоторым упрощением любую современную высокопроизводительную вычислительную систему можно представить как множество многопроцессорных вычислительных узлов, связанных одной или несколькими коммуникационными сетями. Важная общая характеристика таких систем - логическая организация оперативной памяти, с которой работают вычислительные узлы. Оперативная память может быть: разделяемой для всех узлов; распределенной - доступной только для процессоров своего узла; распределенной разделяемой - доступной для процессоров своего узла и из других узлов, но с применением специальных программно-аппаратных средств.

Важные преимущества кластеров - доступность технологий сборки и возможность экономически эффективного получения достаточно высокой производительности. Но насколько высока их производительность по отношению к тем системам, которые принято называть суперкомпьютерами? Сегодня наивысший уровень производительности суперкомпьютеров измеряется десятками терафлоп, достигаемых на многопроцессорных векторно-конвейерных системах (NEC Earth

Simulator System на базе SX-6 и Cray XI), массово-параллельных системах, в том числе, и системах кластерного типа от HP, IBM, Intel и Cray. Кластерные системы с числом процессоров в несколько тысяч и производительностью около 1 TFLOPS можно со всем основанием считать суперкомпьютером. Кластерные системы с производительностью от нескольких десятков до нескольких сотен GFLOPS будем называть просто высокопроизводительными системами. Именно этот класс машин широко используется в современных высокотехнологичных отраслях промышленности, а также в социально-экономической сфере и представляет наибольший практический интерес [6].

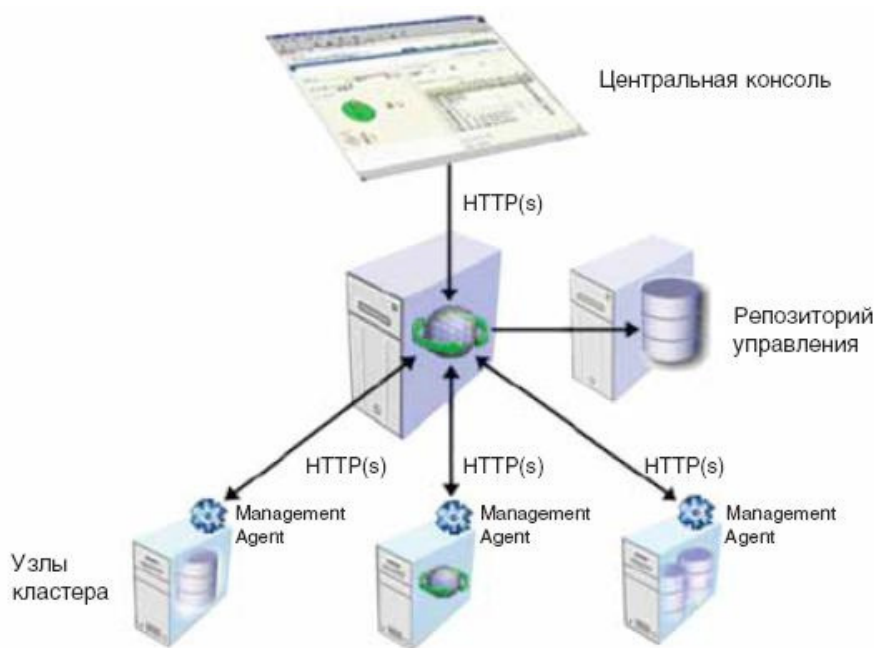


Рисунок 2. Кластер

## MPICH

Mpich есть свободно доступная реализация стандарта MPI, работающая на широком классе систем. Настоящий документ предполагает, что mpich уже установлена; если нет, нужно прочесть сначала Руководство по установке mpich, мобильной реализации MPI. Конкретнее, предполагается, что реализация mpich установлена в `/usr/local/mpich` и вы уже добавили `/usr/local/mpich/bin` к вашему пути. Если mpich установлена где-нибудь в другом месте, нужно вносить соответствующие изменения. Если mpich построена для нескольких различных архитектур и/или коммуникационных механизмов (которые в mpich называются устройствами), вы должны указывать соответствующие каталоги; проверьте, не установил ли кто-нибудь ранее mpich на вашем узле.

Mpich обеспечивает инструментарий, упрощающий создание рабочих программ MPI. Поэтому программы mpich могут требовать специальные библиотеки и параметры компиляции и вы должны пользоваться предусмотренными в Mpich командами для компиляции и компоновки программ.

MPI позволяет сравнительно легко писать переносимые параллельные программы. Однако, одна вещь, которую MPI не стандартизирует --- это окружение, в рамках которого исполняется параллельная программа. Существуют три базисных типа параллельных режимов: параллельные компьютеры, кластеры рабочих станций и интегрированные

распределенные среды, которые мы будем называть "вычислительными сетями", которые включают параллельные компьютеры и рабочие станции и могут охватывать многие узлы. Естественно, параллельный компьютер (обычно) обеспечивает интегрированный, сравнительно простой путь для исполнения параллельных программ. Кластеры рабочих станций и сетевое оборудование, с другой стороны, не обеспечивают стандартного пути для выполнения параллельных программ и требуют дополнительных усилий. Реализация `mpich` предназначена для того, чтобы преодолеть эту разницу с помощью сценария `mpirun`; однако, если вам необходимы какие-то специальные свойства или параметры, или возникают трудности при выполнении ваших программ, вам необходимо понимать различия между названными выше системами.

Большинство матричных параллельных процессоров (сокращенно MPP) обеспечивают возможность запуска программы на требуемом количестве процессоров; `mpirun` обеспечивает употребление соответствующей возможной команды. В отличие от этого, кластеры рабочих станций требуют, чтобы каждый процесс в параллельном задании был запущен индивидуально, хотя и существуют программы для облегчения запуска таких процессов. Поскольку кластеры рабочих станций не организованы как MPP, их использование требует дополнительной информации. `Mpich` должна устанавливаться со списком имеющихся рабочих станций в файле `'machines.arch?'` в каталоге `'/usr/local/mpich/share'`. Этот файл используется командой `mpirun` для выбора запускаемых процессоров [7].

### Реализация PIV на кластере

На вход алгоритма (рис.3) подается два изображения образов частиц, полученных в два последовательных момента времени с известной задержкой между ними. Необходимо получить мгновенное поле скорости, соответствующее мгновенной скорости потока в измерительной области. Для этого вся измерительная область разбивается на элементарные ячейки (расчетные области размером  $M \times N$ ) таким образом, чтобы в каждую расчетную область попало несколько частиц. Для стандартного алгоритма размер и количество расчетных областей в течение вычисления всего поля скорости остается постоянным. Смещение частиц между первым и вторым кадрами изображения может быть найдено путем вычисления функции пространственной корреляции.

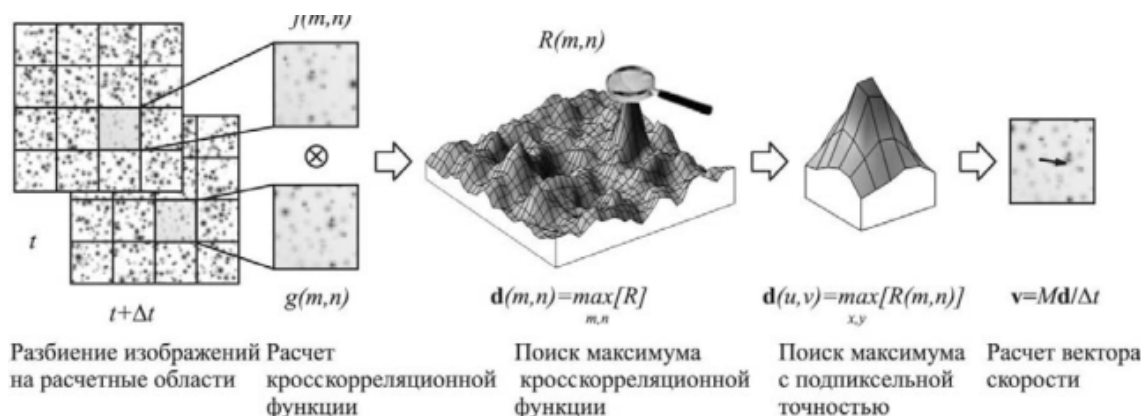


Рис.унок 3. Стандартный кросскорреляционный алгоритм вычисления вектора скорости по изображениям частиц в потоке



В стандартном алгоритме предполагается, что все частицы внутри области совершают одинаковое перемещение. В реальности это не совсем так, в области может существовать ненулевой градиент скорости, приводящий к ошибке определения смещения. Влияние эффекта градиента скорости будет рассмотрено ниже. Таким образом, интерпретация пространственной корреляционной функции в терминах смещения трассеров возможна только для несжимаемого потока с однородным распределением “идеальных” частиц трассеров. Если эти условия не выполняются, положение максимума корреляционной функции определяется не только движением потока, но и распределением частиц внутри него.

Корреляционная функция, записанная в терминах преобразования Фурье, будет иметь следующий вид:

$$R(m, n) = \frac{\zeta^{-1} [\zeta [W f - \langle W f \rangle] \zeta^* [W g - \langle W g \rangle]]}{\sqrt{\sigma^2(W f) \sigma^2(W g)}}, \quad (1)$$

где  $W = W(x, y)$  - весовая функция,  $\sigma$  - дисперсия значений интенсивности внутри расчетной области.

Далее по схеме (см. рис. 3) после вычисления корреляционной функции производится

поиск максимального корреляционного пика, отвечающего наиболее вероятному смещению в области. Поскольку изображение представляется в виде конечного числа элементов, найденное положение максимума будет иметь целочисленные координаты в пикселях. Для того чтобы определить смещение частиц с подпиксельной точностью, используют интерполяцию корреляционного максимума кривой (по одной координате) или поверхностью некоторой формы и затем определяют положение максимума численно.

По определенному наиболее вероятному смещению частиц  $d$  и интервалу времени между вспышками лазера  $\Delta t$  рассчитывается наиболее вероятная скорость частиц внутри расчетной области:

$$v = M \frac{d}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $M$  - масштабный коэффициент увеличения системы регистрации [8].

Расчет корреляционной функции является достаточно ресурсоемким, поэтому является оптимальным для распараллеливания. В таком случае главный компьютер будет рассылать узлам кластера необходимые данные. Машины будут производить необходимые расчеты и отправлять результат на главный компьютер. Таким образом можно получить значительный прирост в скорости вычислений. Однако, также значительную роль при наращивании производительности будет играть количество узлов кластера, а также производительность каждого из них.

### Перечень источников

- [1] PIV-метод. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: [http://www.laser-portal.ru/content\\_184#\\_ftn1](http://www.laser-portal.ru/content_184#_ftn1). – Загл. с экрана.
- [2] Хабахпашева Е.М., Перепелица Б.В. Поля скоростей и турбулентных пульсаций при малых добавках к воде высокомолекулярных веществ //

- ИФЖ. 1968. Т. 14, № 4. С. 598.
- [3] Adrian R.J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs. particle image velocimetry // *Appl. Opt.* 1984. Vol. 23. P. 1690–1691
- [4] Meynart R. Convective flow field measurement by speckle velocimetry // *Rev. Phys.Appl.* 982. Vol. 17. P. 301–330.
- [5] Сбитнев Ю.И. Параллельные вычисления. [Электронный ресурс]. – 1998-2011. – Режим доступа: <http://cluster.linux-ekb.info>. – Загл. с экрана.
- [6] Кластерные технологии. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: [http://technologies.su/klasternye\\_tehnologii](http://technologies.su/klasternye_tehnologii). – Загл. с экрана.
- [7] Руководство пользователя для MPICH, переносимой реализации MPI версия 1.2.1. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://cluster.onu.edu.ua/docs/mpich/>. – Загл. с экрана.
- [8] М.П. Токарев, Д.М. Маркович, А.В. Бильский. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // *Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия. 2007. Т. 4, № 3. С. 131*