

# Методы повышения эффективности распределенных систем моделирования

В. И. Анисимов<sup>1</sup>, Г. Д. Дмитриевич<sup>2</sup>  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
<sup>1</sup>vianisimov@inbox.ru -mail, <sup>2</sup>gddm@inbox.ru

В. Н. Гридин  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Центр информационных технологий  
в проектировании РАН  
info@ditc.ras.ru

**Аннотация.** Рассматриваются способы повышения эффективности распределенных систем моделирования за счет минимизации времени взаимодействия веб-сервисов с сетью Интернет на основе перехода к компактной форме хранения и обработки разреженных матриц. Дается описание основных методов компактного хранения и обработки разреженных матриц и приводится сравнительная оценка эффективности метода индексно-адресных матриц, списковых схем хранения, метода строчного фиксированного формата, метода строчно-столбцового формата. Показывается, что отличительной особенностью методов фиксированного формата является невозможность включения в описание дополнительных ненулевых элементов, что исключает возможность непосредственного применения этих методов для обработки информации при решении систем уравнений любым численным методом, вследствие неизбежного появления новых ненулевых элементов в процессе этого решения. Для возможности учета новых ненулевых элементов в компактное описание моделируемой системы предлагается использовать двухэтапную процедуру формирования такого описания и дается описание реализации двухэтапной процедуры обработки разреженных матриц на основе разделения ее на две независимые части символьного и численного анализа.

**Ключевые слова:** веб-сервисы; моделирование систем; компактная обработка; разреженные матрицы; распределенные системы; Интернет-технологии

При организации работы распределенных систем моделирования особенно актуальными являются вопросы увеличения их производительности, поскольку для повышения надежности функционирования распределенной системы необходимо минимизировать время взаимодействия веб-сервисов с сетью Интернет [1–3]. Такая задача может быть решена путем перехода к компактной форме хранения и обработки разреженных матриц на основе тех или иных методов сжатия данных.

Известные методы компактной обработки разреженных матриц существенно отличаются по своим характеристикам и своей эффективностью, поэтому необходимо провести их сравнительную оценку, которая приводится ниже для метода индексно-адресных матриц, для методов связанных списков и для методов

фиксированного формата. В качестве критерия такой оценки принят коэффициент эффективности использования памяти  $\beta = M/M_1$ , где  $M$  – объем памяти, требуемый для полного описания разреженной матрицы,  $M_1$  – объем памяти, требуемый для компактного описания разреженной матрицы.

Метод индексно-адресных матриц основан на том, что вводится некоторая целочисленная матрица, которая в точности повторяет структуру исходной матрицы  $W$ , входящую в уравнение системы моделирования. В качестве элементов индексно-адресная матрица содержит порядковый номер  $a$  ненулевых элементов матрицы  $W$ , которые перечисляются в некотором массиве  $WZ$ . При этом если порядковый номер ненулевого элемента исходной матрицы равен  $a$ , то в индексно-адресную матрицу вводится значение  $A(i,j)=a$ .

При практической реализации метода индексно-адресных матриц достаточно провести сканирование индексно-адресной матрицы и выбрать из нее очередной ненулевой элемент. В соответствии с ее численным значением, затем необходимо выбрать соответствующий порядковый элемент из массива  $WZ$ . Коэффициент эффективности использования памяти метода индексно-адресных матриц в случае, когда для хранения индексно-адресной матрицы  $A$  используется тип данных длиной два байта, а для хранения каждого значащего элемента исходной матрицы, используются данные длиной 8 байтов, может быть определен выражением:

$$\beta = \frac{8n^2}{n^2(\alpha * 8 + 2)} = \frac{1}{\alpha + 0,25}$$

Из приведенного соотношения видно, что коэффициент экономии памяти для данного метода всегда меньше 4. Следовательно, метод индексно-адресных матриц характеризуется незначительной эффективностью при компактной записи разреженных матриц.

Метод связанных списков [4, 5] основан на списковых схемах хранения и для его использования метода необходимо создать следующие массивы:

WZ – для значений ненулевых элементов  $w_{ij}$  исходной матрицы.

WI – для номеров строк ненулевых элементов.

WJ – для номеров столбцов ненулевых элементов.

NR – для хранения относительного адреса  $a$  следующего ненулевого элемента строки ( $a$  – порядковый номер элемента в массиве WZ).

NC – для хранения относительного адреса  $a$  следующего ненулевого элемента столбца.

ER – для относительного адреса  $a$  входа в очередную строку.

EC – для относительного адреса  $a$  входа в очередной столбец.

Весьма важной особенностью метода является возможность записи элементов массива WZ в любом порядке, и как следствие, возможность введения в описание дополнительных ненулевых элементов. Достоинством метода является также возможность сканирования исходной матрицы, как по строкам, так и по столбцам.

Если учесть, что массивы WZ, WI, WJ, NR, NC имеют длину  $m$ , определяемую числом ненулевых элементов, а массивы ER, EC имеют длину  $n$ , определяемую порядком исходной матрицы, то эффективность использования памяти может быть определена для метода списковых схем выражением:

$$\beta = \frac{8n^2}{16 * n^2 * \alpha + 4 * n} \cong \frac{1}{2 * \alpha}$$

Из полученного выражения видно, что с уменьшением  $\alpha$  эффективность метода неограниченно возрастает.

Для уменьшения числа используемых массивов можно исключить из полного описания метода ряд массивов, которые реализуют сканирование по столбцам или по строкам. При этом в первом случае необходимо ввести в описание только массивы WZ, WJ, NR, ER, а во втором случае – только массивы WZ, EC, NC, WI.

Эффективность любой из схем сокращенного метода связанных списков может быть определена выражением

$$\beta = \frac{8 * n^2}{n^2 * \alpha * 12 + n * 2} \cong \frac{1}{1,5 * \alpha}.$$

Очевидно, что эффективность использования памяти сокращенной схемы выше, чем эффективность полной схемы связанных списков, однако это достигается за счет ограничения возможности выбора направления сканирования, что является некоторым недостатком сокращенных методов связанных списков.

К методам фиксированного формата относятся метод строчного фиксированного формата и метод строчно-столбцового фиксированного формата [5, 6]. Для

использования первого метода требуются следующие массивы:

WZ – для хранения значения ненулевых элементов  $w_{ij}$  исходной матрицы.

WJ – для хранения индексов столбцов ненулевых элементов исходной матрицы  $W$ .

ER – массив, содержащий указатели точек входа в очередную строку.

Длина массивов WZ, WJ составит  $m$  элементов, а длина массива ER составит  $n + 1$  элементов, при этом в  $n + 1$  заносится значение  $m + 1$ .

Одной из отличительных особенностей метода является невозможность произвольного выбора порядка записи ненулевых элементов в массиве WZ, и как следствие, невозможность включения в описание дополнительных ненулевых элементов. Это объясняется тем, что формат всех массивов жестко зафиксирован, и не может меняться произвольным образом в процессе расчета.

Эффективность метода строчного фиксированного формата может быть определена выражением:

$$\beta = \frac{8 * n^2}{n^2 * \alpha * 10(n + 1) * 2} \cong \frac{1}{1,25 * \alpha}.$$

Очевидно, что эффективность метода выше, чем эффективность рассмотренных ранее методов. Существенным недостатком метода является невозможность включения в описание дополнительных элементов, что объясняется наличием фиксированного формата.

В методе строчно-столбцового фиксированного формата, предполагается, что исходная матрица является структурно-симметричной, так что для каждого ненулевого элемента  $w_{ij}$  можно поставить в соответствие элемент  $w_{ji}$ . В случае если такой элемент в исходной матрице отсутствует, то его необходимо создать искусственно путем включения в компактное описание элемента  $w_{ji} = 0$ .

Для компактного хранения исходных элементов матрицы, требуется создать три массива.

WD – для хранения диагональных элементов.

WL – для хранения ненулевых элементов, расположенных ниже диагонали (поддиагональных элементов)

WU – для хранения ненулевых элементов, расположенных выше диагонали (наддиагональных элементов).

В соответствии с методом при формировании массива WU наддиагональные элементы записываются по строкам, а при формировании массива WL поддиагональные элементы записываются по столбцам. Согласно принятому порядку формирования массивов WU, WL, относительный

адрес некоторого элемента  $w_{ij}$ , расположенного в массиве WU, совпадает с относительным адресом элемента  $w_{ji}$ , расположенном в массиве WL. Отмеченное свойство существенно упрощает процесс программирования для организации сканирования элемента.

Для хранения индексов строк и столбцов ненулевых элементов в методе строчно-столбцового фиксированного формата используется массив WJI, при этом этот массив содержит номера столбцов ненулевых элементов, расположенных выше диагонали, которые совпадают с номерами строк транспонированных ненулевых элементов, расположенных ниже диагонали. Для определения точки входа в строку выше диагонали (точка входа в столбец ниже диагонали) используется массив ERC. В последний  $n$ -ый элемент этого массива заносится значение  $0.5(m-n)+1$ .

Если учесть, что длина массива WD составляет  $n$  элементов, длина массивов WU, WL, WJI составляет  $0.5(m-n)$  элементов, а длина массива ERC составляет  $n$  элементов, то эффективность метода строчно-столбцового фиксированного формата может быть определена выражением:

$$\beta = \frac{8 * n^2}{n^2 * \alpha * 9 + n} \cong \frac{8}{9} = \frac{1}{1,1 * \alpha}.$$

Отсюда следует, что эффективность метода выше, чем всех рассмотренных ранее методов. Однако, так же как для метода строчно-столбцового фиксированного формата, метод строчно-столбцового фиксированного формата не позволяет перечислять ненулевые элементы в произвольном порядке, следовательно, не имеется возможность включения дополнительных элементов в компактное описание.

На основании сравнительной оценки методов компактной обработки следует, что наибольший интерес для практической реализации высокопроизводительного программного обеспечения распределенных систем автоматизации схмотехнического проектирования представляют метод индексно-адресных матриц и метод строчно-столбцового фиксированного формата. Первый метод, хотя и имеет сравнительно низкую эффективность, но характеризуется чрезвычайно простой технологией реализации программного обеспечения, для построения которого достаточно выполнить формирование индексно-адресной матрицы A и одномерного массива параметров моделируемой схемы WZ. Массив WZ целесообразно создавать как объект класса коллекций ArrayList, что позволяет использовать для формирования и обработки этого массива методы класса коллекций. Обработка данных компактного массива WZ осуществляется на основании результатов простого сканирования индексно-адресной матрицы A, при этом относительный адрес элемента  $w_{ij}$  в массиве WZ определяется значением элемента  $A(i,j)$ . Использование этого метода особенно целесообразно в случаях, когда имеется программное обеспечение системы моделирования на основе полного

описания разреженных матриц, так как его переработка к форме с компактной обработкой данных требует минимальных затрат трудовых ресурсов.

Метод строчно-столбцового фиксированного формата обладает наибольшей эффективностью по сравнению со всеми остальными рассмотренными методами. Однако, поскольку формат всех массивов жестко зафиксирован, и не может меняться произвольным образом в процессе расчета, отличительной особенностью метода является невозможность включения в описание дополнительных ненулевых элементов. Это обстоятельство исключает возможность непосредственного применения строчно-столбцового фиксированного формата для обработки информации при решении систем уравнений любым численным методом вследствие неизбежного появления новых ненулевых элементов в процессе этого решения. Поэтому для возможности учета новых ненулевых элементов в компактное описание моделируемой системы необходимо использовать двухэтапную процедуру формирования такого описания. Двухэтапная процедура характеризуется относительно сложной логикой построения программного обеспечения и переход к компактному описанию является весьма трудоемким процессом. Построение веб-сервиса на основе компактной обработки данных существенно упрощается при наличии его прототипа на основе полного математического описания задачи.

При реализации двухэтапной процедуры на первом, символьном этапе решается задача определения размеров всех используемых массивов, при этом не ставится задача численного формирования этих массивов. Поскольку задача формирования численных массивов на символьном этапе не ставится, то выполнение этого этапа может быть осуществлено путем заполнения всех массивов произвольными численными константами, которые должны отобразить наличие или отсутствие соответствующих элементов матрицы некоторой информации. Иначе говоря, на первом этапе работа над численной матрицей может быть заменена обработкой некоторой индексной матрицы C, элементы которой имеют только два произвольных значения, (например, 0 и 1). При этом, если в исходной матрице некоторый элемент  $w_{ij} \neq 0$ , то для введенной индексной матрицы C, соответствующий элемент  $C_{ij} = 1$ , а все остальные элементы равны 0. Таким образом, вместо рассмотрения исходной схемы, будет рассматриваться некоторый «портрет» этой схемы, в точности отображающий ее структуру, но не содержащий информации о численных значениях параметров. Проведение процедуры LU-факторизации над индексной матрицей C позволяет выявить все появляющиеся при LU-факторизации новые ненулевые элементы и установить тем самым фактический формат всех массивов. Все параметры этого формата на заключительном шаге символьного этапа заносятся в координатные массивы WJI и ERC, что позволяет после выполнения символьного этапа удалить индексную матрицу C.

Формирование численных массивов WD, WU, WL осуществляется на втором этапе, при выполнении которого используются определенные на первом этапе форматы массивов, учитывающие зарезервированные места для всех новых ненулевых элементов. Для формирования компактных численных массивов, а также для решения систем уравнений на основе LU-факторизации, используются виртуальные алгоритмы формирования и обработки компактных массивов, не требующие построения полного математического описания задачи.

Существенным достоинством такой двухэтапной процедуры является разделение ее на две независимые части символьного и численного анализа. Так как практически все реальные задачи проектирования электронных схем связаны с многовариантным расчетом схемы одной и той же структуры, то символьный этап выполняется для каждой структуры единственный раз, в то время как численный этап реализуется десятки, сотни, а часто и тысячи раз. Поэтому накладные расходы от введения символьного этапа в реальных задачах моделирования систем с разреженными матрицами оказываются весьма незначительными, так как все объекты, связанные с обработкой индексной матрицы  $C$ , не используются при выполнении численного этапа. Поскольку программное обеспечение современных распределенных систем автоматизированного проектирования реализуется на платформенно-независимых языках Java или C#, имеющих встроенные средства распределения и освобождения неиспользуемой динамической памяти, то все объекты, созданные на символьном этапе, автоматически удаляются системой при завершении этого этапа.

Сравнительная оценка методов сжатия данных на основе компактной обработки разреженных матриц позволяет сделать вывод, что наибольший интерес для практической реализации высокопроизводительного программного обеспечения распределенных систем автоматизации схемотехнического проектирования представляют методы индексно-адресных матриц и метод строчно-столбцового фиксированного формата. Метод индексно-адресных матриц позволяет наиболее просто привести программное обеспечение к требуемой компактной форме, а метод строчно-столбцового фиксированного формата обеспечивает наибольшую эффективность при функционировании распределенных систем автоматизированного проектирования. Для возможности учета новых ненулевых элементов в компактном описании моделируемой системы при использовании метода строчно-столбцового фиксированного формата необходимо использовать двухэтапную процедуру формирования такого описания,

при этом на первом, символьном этапе решается задача определения размеров всех используемых массивов, а на втором этапе ставится задача численного формирования рабочих массивов.

Практическая реализация рассмотренных методов компактной обработки данных позволяет существенно повысить производительность работы веб-сервисов распределенных систем моделирования и обеспечивает повышение надежности работы системы вследствие уменьшения времени взаимодействия с сервером.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительная оценка методов сжатия данных на основе компактной обработки разреженных матриц позволяет сделать вывод, что наибольший интерес для практической реализации высокопроизводительного программного обеспечения распределенных систем автоматизации схемотехнического проектирования представляют методы индексно-адресных матриц и метод строчно-столбцового фиксированного формата. Для возможности учета новых ненулевых элементов при использовании метода строчно-столбцового формата в работе предлагается использовать двухэтапную процедуру, при этом на первом, символьном этапе решается задача определения размеров всех используемых массивов, а на втором этапе ставится задача численного формирования и решения уравнений.

Практическая реализация рассмотренных методов компактной обработки данных позволяет существенно повысить производительность работы распределенных систем автоматизированного проектирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гридин В.Н., Анисимов В.И. Методы построения систем автоматизированного проектирования на основе Интернет-технологий и компактной обработки разреженных матриц. // Информационные технологии в проектировании и производстве. №1, 2009, с. 3-7.
- [2] Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А. Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-технологий. // Информационные технологии, №5, 2011, с. 23-27.
- [3] Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А. Построение веб-сервисов систем автоматизации схемотехнического проектирования. // Информационные технологии и вычислительные системы, №4, 2012, с. 79-84.
- [4] Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ, т. 1 / пер. с англ. М.: Мир, 1976, 734 с.
- [5] Писсанецки С. Технология разреженных матриц / пер. с англ. М.: Мир, 1988, 406 с.
- [6] Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем, пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988, 560 с.