

*И.М. Никольский*

## **СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ БОЛЬШОГО МАСШТАБА**

### **1. Введение**

В настоящее время наблюдается большой интерес к проектам, связанным с автоматизацией различных сторон деятельности человека - сельского хозяйства, промышленного производства, грузоперевозок. Очень часто в таких проектах используются беспроводные сенсорные сети (БСС, в англоязычной литературе - WSN, wireless sensor networks). Подобные сети объединяют устройства ("умные сенсоры"), которые периодически замеряют некоторую физическую величину (освещенность, температуру, влажность и т.д.), производят предварительную обработку данных и передают информацию на некоторую базовую станцию, используя другие сенсоры как ретрансляторы.

Типовой умный сенсор состоит из датчика, источника питания(батарейки), радиомодуля и микроконтроллера (либо микропроцессора). Обмен информации между узлами БСС производится по некоторому беспроводному протоколу. Это может быть WiFi, Bluetooth и т.д. Самым популярным протоколом для построения БСС на данный момент является ZigBee на основе стандарта IEEE 802.15.4[1]. Он более энергоэффективен по сравнению с WiFi, однако, уступает ему по скорости передачи данных.

Как нетрудно заметить, БСС значительно отличаются от привычных компьютерных сетей. Здесь приходится учитывать такие факторы как наличие препятствий, конкуренция за канал (вследствие интерференции радиосигнала), ограниченность заряда батареи. Кроме того, беспроводная сенсорная сеть динамична – узлы могут выбывать из строя, могут менять своё положение.

Новизна и сложность БСС привлекают внимание специалистов по математическому моделированию. В этой области возникают интересные задачи, относящиеся к теории графов, математической статистике, распределенным алгоритмам [2]. Модели БСС являются блочными - отдельно моделируются активность сенсора, сеть (маршрутизация), влияние интерференции, элемент питания. В настоящее время у исследователей есть возможность выбирать каждый блок из достаточно широкого набора моделей (см. [3], [4]).

Исследование эффективности БСС удобно проводить с помощью имитационного моделирования [5], [6]. Для выполнения подобных симуляций весьма актуальным становится использование суперкомпьютеров и параллельных вычислений. Это связано с ростом числа сенсоров в современных БСС. Особенно велики сети, разворачиваемые в так называемых умных городах. Они предназначены для снижения расходов на поддержание инфраструктуры города путем мониторинга мостов, дорог и строений в режиме реального времени. Для того, чтоб этот подход был эффективным, количество сенсоров должно быть очень велико. Например, БСС испанского города Сантандер насчитывает более 12 тыс сенсоров[7], а в городе PlanIT Valley (строится недалеко от города Порто компанией Living PlanIT) планируется достичь количества 100 млн сенсоров [8]. Всего же по оценкам экспертов к 2020 году в мире будет использоваться несколько миллиардов сенсоров.

В данной работе на примере модели Чиассерини-Гаретто [9] рассматриваются вопросы имитационного моделирования БСС на суперкомпьютере. Статья организована следующим образом. В п.2 описана модель Чиассерини-Гаретто. Пункт 3 посвящен описанию топологии БСС, рассматриваемой в данной работе, а именно цепочки сенсоров с несколькими стоками. В п.4 приведен алгоритм, позволяющий определить сенсоры, которые будут вести передачу информации на данном временном шаге. В п.5 описывается последовательная имитационная модель цепочки сенсоров, в п.6 - ее параллельный аналог. В пункте 7 приведены результаты вычислительных экспериментов на суперкомпьютере BlueGene/P, входящего в суперкомпьютерный комплекс МГУ им. М.В. Ломоносова.

## 2. Модель Чиассерини-Гаретто

Данная модель была впервые предложена в [9]. Утверждается, что это одна из первых моделей, учитывающая наличие фазы сна в режиме работы сенсоров. "Засыпание" устройств позволяет более экономно расходовать заряд батарей. В модели рассматривается сеть, состоящая из нескольких одинаковых конечных сенсоров и стока. Конечные сенсоры собирают информацию, передают её на сток, пользуясь другими сенсорами как ретрансляторами. Эти устройства находятся либо в активном состоянии (собирают информацию, принимают и передают данные), либо в состоянии сна. Сток - это сенсор, имеющий постоянное питание (следовательно, не спящий) и работающий только на прием. Предполагается, что каждый узел сети оснащён изотропной антенной

(имеющей круговую диаграмму направленности) с одинаковым радиусом действия  $r$ .

Время в модели предполагается дискретным, разбитым на шаги (в оригинале они называются слотами). Длительности рабочей фазы и фазы сна распределены по геометрическому закону с параметрами  $p$  и  $q$  соответственно. На каждом шаге сенсор может сгенерировать несколько единиц информации. Количество этой информации распределено по закону Пуассона с параметром  $\lambda$ . Информация сохраняется в буфер устройства, который предполагается бесконечным. Кроме того, за один шаг модели, сенсор может принять или передать одну единицу информации. Одновременная передача и приём данных невозможен.

Если по окончании рабочей фазы в буфере сенсора остается  $k$  единиц информации, сенсор переходит в дополнительную фазу, в которой может только передавать данные. Ее длительность не менее  $k$  временных шагов. По ее завершении сенсор переходит в фазу сна.

Учет конкуренции за радиоканал, возникающей вследствие интерференции радиосигнала, в модели Чиассерини-Гаретто осуществляется следующим образом. Сенсор  $i$  может передать информацию сенсорам  $j$ , если  $d_{ij} \leq r$ . При этом для каждого другого принимающего сенсора  $k$  и передающего сенсора  $l$  должны быть выполнены следующие условия:

$$d_{ik} > r, d_{lj} > r.$$

### 3. Цепочка сенсоров

В традиционных компьютерных сетях нет необходимости учитывать физическое положение узлов в пространстве. Однако в БСС этот фактор является весьма важным, так как он определяет множество достижимых (посредством радиосвязи) узлов для каждого узла сети.

В работе Чиассерини и Гаретто [9] (и во многих других) рассматривается равномерное размещение сенсоров по области обслуживания, имеющей форму круга. Представляется разумным исследовать случай регулярного размещения устройств, т.к. при монтаже сенсоров удобнее располагать их, следуя некоторой закономерности.

Рассмотрим цепочку из  $N+1$  сенсора. Узлы располагаются вдоль прямой и пронумерованы с 0 до  $N$ . Так могут быть расположены сенсоры системы мониторинга шоссе. Расстояние между соседними сенсорами одинаково и равно  $h$ . Выберем  $h$  так, что  $h < r < 2h$ . Это минимизирует влияние интерференции. Оно сведется к тому, что если  $i$ -й сенсор передает  $i+1$ -му, то  $i-1$ -й и  $i+1$ -й сенсор передавать на данном временном шаге не могут.

Очевидно, что в такой топологии одного стока недостаточно - время передачи данных от некоторых сенсоров до стока будет слишком велико. Необходимо наличие нескольких стоков. Будем считать, что в нашей цепочке  $m$  стоков, распределенных равномерно, причем первый и последний (более точно – 0-й и  $N$ -й) узел цепочки являются стоками. Нашу цепочку можно рассматривать как совокупность из  $m-1$  сегмента, в каждом из которых между двумя стоками находятся  $n$  конечных сенсоров (здесь  $m$  и  $n$  - целые числа, больше либо равные 2). При этом правый сток  $j$ -го сегмента является левым стоком  $j+1$ -го сегмента. Для того, чтобы это было выполнимо, потребуем, чтобы общее число узлов сети было бы равно  $mn+m-n$ . Из них  $(m-1)n$  конечных сенсоров,  $m$  стоков. Стоками будут узлы с номерами  $k(n+1)$ ,  $k = 0..m-1$ . Частный случай описанной топологии при  $m = 4$ ,  $n = 3$  показан на рис.1



Рис.1 Цепочка из четырех сегментов по 3 конечных сенсора на каждом

#### 4. Маршрутизация и захват радиоканала

В условиях описанной топологии маршрутизация проста - сенсор передает информацию соседнему устройству, которое находится между данным сенсором и ближайшим к нему стоком. Однако для осуществления передачи сенсор должен захватить радиоканал. Будем считать, что из двух соседних сенсоров преимущество при захвате будет у того, который сгенерировал на данном шаге меньше данных (т.к. он раньше начнет процедуру захвата канала). Оба соседа передающего сенсора не смогут передавать информацию на данном шаге.

Для определения сенсоров данного сегмента, которые смогут передать информацию на текущем временном шаге, будем использовать следующий алгоритм.

##### *Алгоритм 1*

1) на сегменте ищется активный сенсор, сгенерировавший минимальное количество единиц данных среди всех активных сенсоров данного сегмента. Он захватывает канал, оба соседа передающего сенсора на данном шаге передавать не смогут;

2) описанная процедура повторяется для остальных активных сенсоров сегмента.

## 5. Имитационная модель

Суммировав все вышесказанное, перечислим действия, выполняемые на очередном временном шаге:

*этап 0* каждый  $i$ -й сенсор генерирует  $\Delta_i$  единиц данных;

*этап 1* на каждом сегменте цепочки в соответствии с алгоритмом 1 определяются сенсоры, способные передавать информацию на данном временном шаге;

*этап 2* происходит передача информации между устройствами. Для каждого сенсора, передающего информацию на данном шаге, выполняем следующие действия: если среди соседей данного сенсора нет стока, он передает единицу данных соседу, который находится между данным сенсором и ближайшим к нему стоком при условии, что этот сосед находится в активном состоянии. Если среди соседей данного сенсора есть сток (обозначим за  $k$  его номер в цепочке), передача информации в этот сток осуществляется по следующим правилам:

а) если  $0 < k < N$ , то сток имеет двух соседей - сенсоры  $k-1$  и  $k+1$ . Если один из них не может передавать (из-за близости к другому передающему сенсору), то информацию в сток передаст другой сосед. Если же передавать могут оба, то передачу осуществит тот, который сгенерировал на данном шаге меньше информации (и, следовательно, раньше начал процедуру захвата канала);

б) если  $k=0$  или  $k=N$ , то у стока имеется лишь один сосед; сток получит единицу данных от этого соседа, при условии, что он может передавать информацию на этом временном шаге.

## 6. Параллелизация модели

Опишем декомпозицию цепочки сенсоров. Применим тот же подход, который используется в параллельных алгоритмах решения задач математической физики на сетке. Обозначим число рабочих процессов за  $P$ .

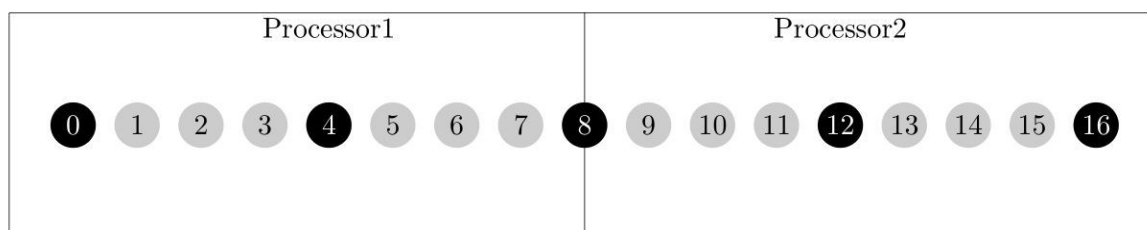
Разделим цепочку сенсоров на  $P$  отрезков. Для простоты будем считать, что число сегментов, равное  $m-1$ , делится на  $P$ . Тогда каждый отрезок состоит из  $(m-1)/P$  сегментов. Сток, являющимся последним для  $k$ -го отрезка и первым для  $(k+1)$ -го (будем называть такие стоки разделяемыми), будет отнесен и  $k$ -му, и  $(k+1)$ -му процессу. Пример декомпозиции для двух процессов показан на рис.2

Опишем один шаг параллельной модели, выполняемый на каждом процессе:

**этап 0** сгенерировать информацию на всех сенсорах отрезка;

**этап 1** на всех сегментах отрезка в соответствии с алгоритмом 1 определяем, какие сенсоры смогут осуществлять передачу на данном шаге по времени. Между процессами происходит обмен информацией о сенсорах, соседних с разделяемыми стоками (передается сообщение об объеме сгенерированных данных и способности сенсоров передавать информацию);

**этап 2** происходит передача информации всеми активными сенсорами, способными осуществлять передачу на данном шаге. Если среди соседей данного сенсора нет разделяемого стока - передача осуществляется аналогично этапу 2 последовательной модели. Если есть - передача осуществляется в разделяемый сток по правилам передачи в сток этапа 2 последовательной модели с учетом информации, полученной от соответствующего процесса.



*Рис.2* Декомпозиция цепочки сенсоров из четырех сегментов на два вычислительных узла. Разделяемый сток 8 отнесен и к первому, и ко второму узлу

## 7. Результаты вычислительных экспериментов

Описанная выше модель была реализована в виде программы на языке C++ с использованием технологии параллельного программирования MPI. На каждом временном шаге каждый из  $P$  процессов (за исключением нулевого и  $P-1$ -го) отправляет соседям справа и слева сообщение о состоянии сенсоров, ближайших к разделяемым стокам и принимает по одному такому же сообщению от соседей справа и слева. Эти сообщения состоят всего лишь из двух целых чисел (признак активности/сна сенсора и количество единиц сгенерированной информации). Благодаря малому объему пересылок между процессами значительных накладных расходов не возникает.

Это можно увидеть по результатам тестирования модели. Была взята цепочка из 128 тыс сенсоров (1280 сегментов по 100 конечных сенсоров). Параллельная модель запускалась на 16, 32, 64, 128 и 256 процессорах. Вычислительные эксперименты проводились на

суперкомпьютере BlueGene суперкомпьютерного комплекса МГУ. График зависимости времени расчета одного шага модели от количества процессоров показан на рис. 3. Полученная кривая говорит о хорошей масштабируемости модели.

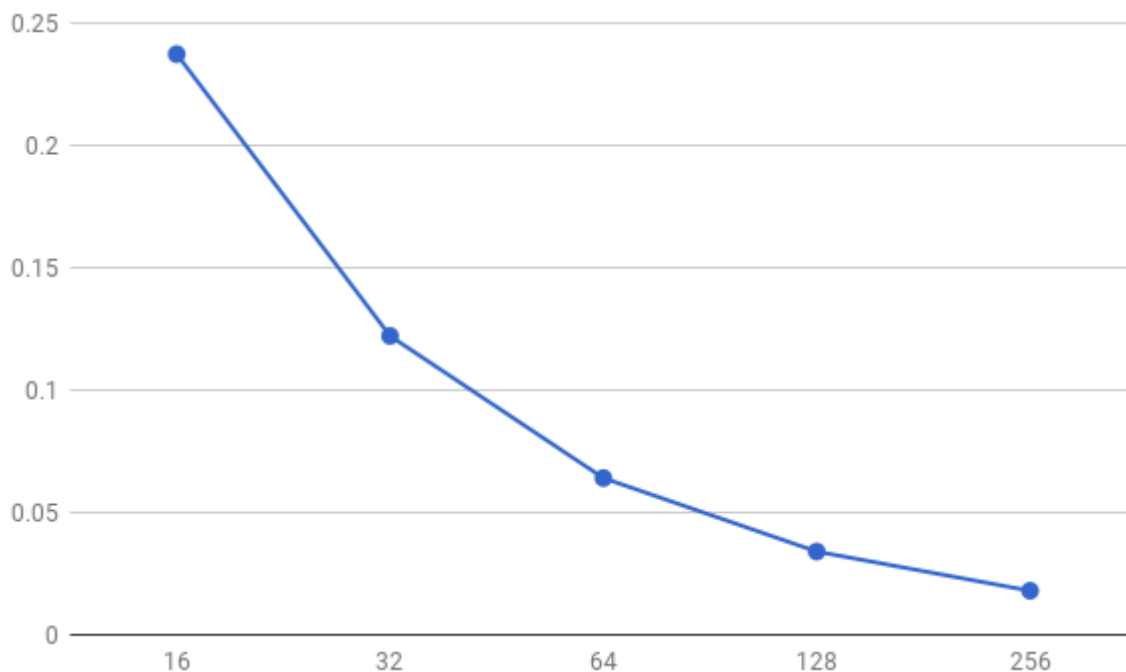


Рис.3 Зависимость времени расчета одного шага параллельной модели от количества используемых вычислительных узлов

## 8. Заключение

В данной работе построена имитационная модель цепочки статичных сенсоров. Поведение отдельных сенсоров и интерференция подчиняются предположениям модели Чиассерини-Гаретто. Предложена параллелизация этой модели под машины с распределенной памятью и технологию MPI. Программа, реализующая описанную модель, была оттестирована на суперкомпьютере BlueGene/P. Результаты вычислительных экспериментов показывают хорошую масштабируемость модели. Полученная модель может быть использована для исследования различных параметров работы БСС в системах мониторинга шоссе и участков береговой линии.

## Литература

1. ZigBee specification. Document 053474r13. - ZigBee Standards Organization, Dec. 1, 2006. - 534 p.
2. Wattenhofer R. Sensor Networks: Distributed Algorithms Reloaded – or Revolutions? // R. Flocchini and L. Gasieniec (Eds.): SIROCCO 2006, LNCS 4056, pp. 24–28, 2006., Springer-Verlag Berlin Heidelberg

3. Schmid S., Wattenhofer R. Modeling sensor networks // Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks, A.Boukerche, Ed., John Wiley & Sons, 2008.
4. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей //Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 40 [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)
5. Парамонов А.И. Имитационное моделирование систем и сетей связи // ЛОНИИС, 2000
6. Трифонов С.В., Холодов Я.А. Исследование и оптимизация работы беспроводной сенсорной сети на основе протокола ZigBee компьютерные исследования и моделирование// 2012, т.4, №4, с.855-869
7. <http://www.smartsantander.eu/>
8. [www.living-planit.com](http://www.living-planit.com)
9. Chiasserini C.-F., Garetto M. Modeling the Performance of Wireless Sensor Networks , Proc. Infocom, 2004.