

**ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСЕНСУСА  
В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ**

**Ю.А. ДУЙНОВА, Н.И. ЛУЩИК**  
*(Белорусская государственная академия связи, Минск)*

Децентрализованные сети составляют значительную часть современных сетей. В таких сетях очень важно эффективно распределять пакеты (задания) среди большого числа агентов (узлов) [1]. Задание может быть выполнено одним агентом или может быть распределено между группой агентов. Задача балансировки загрузки состоит в поддержании равномерной загруженности всех агентов во времени. Задача балансировки загрузки тесно связана с задачей достижения консенсуса [2]. В работе [3] был предложен протокол локального голосования для задачи достижения консенсуса в сети агентов с нелинейной динамикой, в условиях изменяющейся топологии, помех и задержек. Задача балансировки загрузки была преобразована в задачу достижения консенсуса в динамических сетях в [4]. В [4] рассмотрена возможность применения протокола локального голосования для децентрализованной балансировки загрузки в сети с изменяющейся топологией, с учетом помех и задержек при условии поступления всех заданий в систему в единый начальный момент времени.

Широкое применение мультиагентных технологий привлекает все большее число исследователей к задачам управления и распределенного взаимодействия в сетях динамических систем. Однако решение таких задач не всегда является удовлетворительным из-за сложности обмена информацией и ее полноты, а также наличия задержек и помех.

Так В.И. Меркулов, Д.А. Миляков и И.О. Самодов провели исследование, целью которого являлась разработка одного из возможных вариантов группового управления беспилотными летательными аппаратами (ГУ БЛА) при движении по требуемым траекториям с сохранением заданной топологии и сниженными требованиями к вычислительной производительности. Известен протокол для фиксированной топологии связей и заданных задержках по времени, называемый линейным протоколом консенсуса (ЛПК). Также Амелина Н. О. предложила алгоритм управления, называемый протоколом локального голосования (ПЛГ).

Сводная характеристика рассмотренных алгоритмов приведена в таблице 1.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика алгоритмов управления

Требование	ГУ БЛА	ЛПК	ПЛГ
Наличие случайных задержек и помех	Не учитывает	Учитывает	Учитывает
Эффективность при полносвязной топологии	Учитывает	Учитывает	Учитывает
Минимизация времени достижения консенсуса	Не учитывает	Не учитывает	Учитывает

На основании сравнительной характеристики рассмотренных алгоритмов управления для проведения исследований на базе имитационного моделирования поведе-

ния агентов при распределении заданного объема задач в мультиагентной сети был выбран протокол локального голосования.

Для решения задачи достижения консенсуса группой взаимодействующих агентов, обменивающихся информацией, часто применяются алгоритмы типа стохастической аппроксимации с уменьшающимся размером шага. При постоянно меняющихся внешних состояниях агентов с течением времени алгоритмы стохастической аппроксимации с уменьшающимся до нуля размером шага неработоспособны. Поэтому актуальной является задача исследования свойств алгоритма типа стохастической аппроксимации при малом постоянном или неубывающем до нуля размере шага при нелинейной постановке задачи, в условиях случайно изменяющейся структуры связей в сети при действии помех.

Применительно к теории графов динамическая сеть состоит из набора агентов (узлов)  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ . Граф  $(N, E)$  определяется  $N$  и множеством ребер или дуг  $E$ . Множеством соседей узла  $i$  называется  $N^i = \{j: (j, i) \in E\}$ , т. е. множество узлов с ребрами, входящими в  $i$ . Поставив в соответствие каждому ребру  $(j, i) \in E$  вес  $a^{ij} > 0$ , определяем матрицу смежности (или связности)  $A = [a^{ij}]$  графа, обозначаемого далее  $G_A$  (верхние индексы у переменных показывают соответствующие номера узлов). Взвешенная полустепень захода вершины  $i$  определяется как сумма  $i$ -й строки матрицы  $A$ :

$$d^i(A) = \sum_{j=1}^n a^{ij}.$$

Каждому агенту  $i \in N$  в момент времени  $t = 1, 2, \dots, T$  ставится в соответствие изменяющееся во времени состояние  $x_t^i \in \mathbb{R}$ , динамика которых описывается разностными уравнениями

$$x_{t+1}^i = x_t^i + f^i(x_t^i, u_t^i)$$

с некоторыми функциями  $f^i(\cdot, \cdot): \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , зависящими от состояний в предшествующий момент времени  $x_t^i$  и управляющих воздействий  $u_t^i \in \mathbb{R}$ , которые в момент времени  $t$  воздействуют на узел  $i$ .

Пусть мультиагентная система состоит из динамических агентов с входами  $u_t^i$ , выходами  $y_t^{i,j}$ , и состояниями  $x_t^i$ .

Узлы  $i$  и  $j$  называются согласованными в сети в момент времени  $t$  тогда, когда  $x_t^i = x_t^j$ . Для достижения консенсуса требуется согласовать все узлы между собой, т.е. найти такой протокол управления, который переводит все состояния в одно и то же постоянное значение  $x^* = x^i, \forall i \in N$ .

Предположим, что структура связей динамической сети моделируется с помощью последовательности ориентированных графов  $\{(N, E_t)\}_{t \geq 0}$ , где  $E_t \subset E$  меняются во времени. Если  $(j, i) \in E_t$ , то узел  $i$  в момент времени  $t$  получает информацию от узла  $j$  для целей управления с обратной связью. Обозначим  $A_t$  – соответствующие  $E_t$  матрицы смежности;  $E_{\max} = \{(j, i): \sup_{t \geq 0} a_t^{ij} > 0\}$  – максимальное множество каналов связи. Для формирования правила управления каждый узел  $i \in N$  имеет информацию о своем собственном состоянии (может быть и зашумленную)

$$y_t^{i,j} = x_t^j + w_t^{i,j}$$

и, если  $N_t^i \neq \emptyset$ , зашумленные наблюдения о состояниях соседних узлов

$$y_t^{i,j} = x_{t-d_t^{i,j}}^j + w_t^{i,j}, j \in N_t^i,$$

где  $w_t^{i,j}, w_t^{j,i}$  – помехи, а  $0 \leq d_t^{i,j} \leq \bar{d}$  – задержка,  $\bar{d}$  – максимально возможная задержка. Так как система начинает работу при  $t=0$ , неявное требование к множеству соседних узлов:  $j \in N_t^i \Rightarrow t - d_t^{i,j} \geq 0$ . При  $w_t^{i,j} = 0$  для всех остальных пар  $i, j$ , определим  $\bar{w}_t \in \mathbb{R}^{n^2}$  вектор, составленный из элементов  $w_t^{i,j}, i, j \in N$ .

Алгоритм управления, называемый протоколом локального голосования, задается формулами:

$$u_t^i = a_i \sum_{j \in \bar{N}_t^i} b_t^{i,j} (y_t^{i,j} - y_t^{j,i}),$$

где  $a_i > 0$  – размеры шагов протокола управления,  $b_t^{i,j} > 0, \forall j \in \bar{N}_t^i$ . Принимая  $b_t^{i,j} = 0$  для всех остальных пар  $i, j$ , определим  $B_t = [b_t^{i,j}]$  – матрицу протокола управления.

Для визуализации результатов моделирования разработано программное обеспечение на объектно-ориентированном языке программирования Java с помощью специальной среды разработки Eclipse.

Объектно-ориентированный язык программирования выбран благодаря своей парадигме представлять программы в виде совокупности объектов. Каждый из создаваемых объектов относится к определенному классу и является его конкретным представителем, то есть экземпляром. Сами же классы образуют иерархию наследования, передавая доступ к своим атрибутам и методам.

Для выполнения имитационного моделирования все случаи являются стационарными, то есть в начальный момент времени в систему на все узлы приходит заданный объем задач. Следовательно, новые задания не поступают, а все узлы имеют заданную начальную загрузку.

Так как рассматриваемая топология является полностью связной, увеличение количества агентов может быть неэффективным. Для каждого объема задач можно определить оптимальное количество агентов, при котором время схождения к консенсусу будет минимальным. График зависимости времени схождения к консенсусу и количества агентов при объеме заданий равном 100000 приведен на рисунке 1.

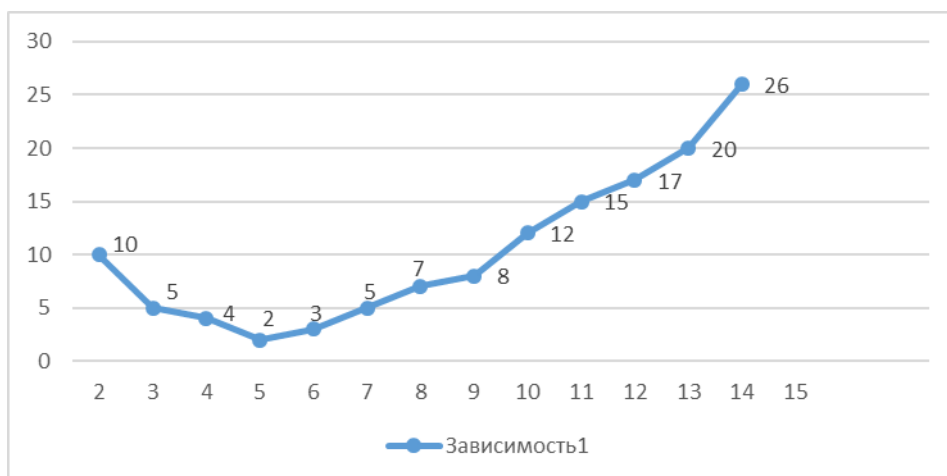
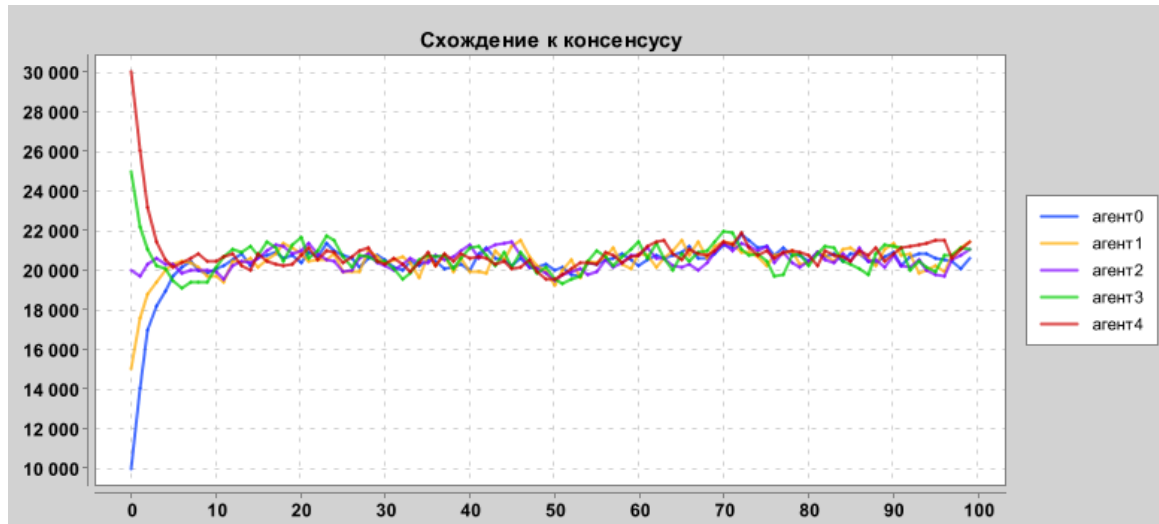


Рисунок 1. – Зависимости времени схождения к консенсусу и количества агентов

В рассматриваемом случае оптимальное количество агентов равно 5, а время достижения консенсуса равно 2 временным отсчетам.

Имитационное моделирование процесса схождения к консенсусу, полученное при помощи разработанного программного продукта, при оптимальном количестве агентов (5 агентов) показано на рисунке 2.



**Рисунок 2. – График схождения к консенсусу при оптимальном количестве агентов**

Имитационное моделирование процесса схождения к консенсусу, полученное при помощи разработанного программного продукта, при минимальном количестве агентов (2 агента) показан на рисунке 1.

Примеры моделирования позволяют исследовать границы применимости алгоритма локального голосования. Результаты имитационного моделирования показали, что для каждой конкретной задачи нужно выбирать свой параметр шага, при котором система максимально быстро приходит к консенсусу.

### Литература

1. Скобелев, П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем / П.О. Скобелев // Мехатроника, управление, автоматизация. – 2011. – № 12. – С. 33–46.
2. Амелина, Н.О. Исследование консенсуса в мультиагентных системах в условиях стохастических неопределенностей / Н.О. Амелина // Вестник ННГУ. – 2013. – № 1 (3). – С. 173–179.
3. Huang, M. Stochastic approximation for consensus: a new approach via ergodic backward products / M. Huang // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2012. – Vol. 57, №. 12. – P. 2994–3008.
4. Амелина, Н.О. Приближенный консенсус в стохастической динамической сети с неполной информацией и задержками в измерениях / Н.О. Амелина, А.Л. Фрадков // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 11. – С. 6–30.