Модели самоорганизации в информационных системах

А. В. Кочетков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

gaidn@yandex.ru

Н. М. Куприянов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

nikita.kupriyanov79@gmail.com

***Аннотация*. В статье рассматриваются понятия самоорганизации и самоорганизующихся систем, приводятся основные свойства таких систем. Даётся описание известных моделей самоорганизации, а также предлагается новая трехуровневая формальная модель самоорганизации. Возможное применение данной модели показывается на примере различных задач управления группой БПЛА.**

Ключевые слова: самоорганизация; самоорганизующиеся системы; модели самоорганизации; управление группой БПЛА

I. Введение

Возникновение понятия самоорганизация тесно с связано с развитием сравнительно молодой науки под названием синергетика, основоположником которой является немецкий физик Герман Хакен в 1970 годах. Синергетика возникла как попытка объяснения множества новых явлений из различных научных дисциплин, открытых в те годы, и не способных быть понятыми в рамках существующих теорий и учений. Примерами таких открытий являлись: в химии – реакция Белоусова–Жаботинского, когда результант химической реакции имел различную концентрацию в различных точках объема; в физике – открытие лазерного излучения, под воздействием «накачки» энергией кристаллов рубина и т. д. В результате анализа подобных явлений выяснилось, что все они имеют много общего, а процессы, протекающие в таких системах, проявляют свои закономерности. Возникшая новая наука – синергетика – как новое междисциплинарное направление, как раз и занялась изучением общих закономерностей развития сложных систем, путей их развития и эволюции.

Объектом изучения синергетики являются сложные самоорганизующиеся системы (СОС) самого различного происхождения, находящиеся вдали от состояния термодинамического равновесия. При этом самоорганизующимся будем называть системы, которые самостоятельно, без вмешательства извне, меняют свою структуру в ответ на изменения среды и/или самой системы. Синергетика, как теория самоорганизации, уже привнесла в науку много новых открытий и закономерностей. В частности, изучение естественных природных систем самого различного происхождения позволило сделать выводы о принципах их построения, изменения структуры, путей эволюции. В результате были сделаны следующие концептуальные выводы: все СОС являются открытыми, обменивающимися энергией, веществом и информацией с окружающей средой; в них присутствует существенная нелинейность – математические модели таких систем описываются дифференциальными, а не линейными уравнениями; развитие таких систем часто носит бифуркационный характер, когда свойства системы меняются в определенной точке скачком, и система переходит в другое качественное состояние. Кроме того, общими для многих СОС являются свойства диссипативности и фрактальности.

Впоследствии ученые и исследователи пришли к выводу, что для проектирования и реализации информационных систем необходимо использовать принципы, заложенные природой в естественные системы – такие системы должны быть построены по принципам самоорганизации. С другой стороны, современные информационные системы, спроектированные по сетецентрическому принципу и обладающие свойствами крупномасштабности, открытости, непредсказуемой динамики, сложности и изменчивости структуры, мобильности компонент, и функционирующими в непредсказуемой динамической среде, ставят в тупик жесткое централизованное управление по заранее предусмотренными алгоритмам. Становится очевидным, что такие системы должны быть построены по принципам самоорганизации [1].

В соответствии с общепринятым определением самоорганизацией принято назвать механизм или процесс, ведущий к возникновению, поддержанию и изменению организации системы без явного внешнего управления во время её работы. Информационные системы, построенные на принципах самоорганизации, называют самоорганизующимися системами (СОС). Отметим кратко основные свойства самоорганизующихся систем:

- автономность: в СОС отсутствует какое-либо управление извне;
- глобальный порядок (в организации, структуре СОС): он возникает в системе за счет внутренних локальных взаимодействий её компонент;
- эмерджентные свойства: т.е. свойства, которые СОС проявляет на макроуровне, за счет множественных взаимодействий элементов СОС на микроуровне. Такие свойства не могут быть получены путем рассмотрения только составляющих СОС элементов;

- нелинейная динамика, неустойчивость: СОС чувствительны к начальным состояниям и к малым изменениям параметров, когда при малых флуктуациях в некоторых критических точках пространства состояний поведение системы и её свойства меняются качественно и скачкообразно;
- множественность устойчивых состояний, так называемых аттракторов СОС;
- избыточность компонент и их взаимодействий: данное свойство обеспечивает надежность и отказоустойчивость СОС;
- адаптивность: СОС способны изменять своё поведение (параметры, функции, структуру) и переходить в новое устойчивое состояние. Адаптивность является реакцией системы на изменения в среде и в самой системе;
- сложность СОС в целом, несмотря на простоту правил взаимодействия элементов, составляющих саму систему.
- иерархическое строение. Самоорганизующаяся система рассматривается, как минимум, на двух уровнях: микроуровне, на котором происходят множественные взаимодействия элементов системы между собой, и макроуровне – на котором проявляются эмерджентные свойства системы (биологическая аналогия – стая птиц, косяк рыб, видимое явление которых возникает из-за поддержания особями определенной дистанции, интервалов и постоянной скорости).

Практическая программная реализация, проектирование и разработка самоорганизующихся систем и алгоритмов их функционирования наиболее эффективно реализуется с помощью мультиагентной технологии (МАС), в который каждый элемент СОС рассматривается как агент. Такой агент полностью автономен, способен воспринимать изменения состояния среды и соответствующим образом реагировать на них, изменяя среду, способен принимать собственные решения, управлять своим поведением, обмениваться сообщениями с другими агентами. Именно поэтому в настоящее время основное развитие принципов, методов и моделей самоорганизации, а также их программной реализации происходит в рамках исследований и разработок в области МАС [2].

Переходя к классификации и рассмотрению конкретных моделей самоорганизации в информационных системах, в том числе модели, предложенной авторами данной статьи, необходимо отметить, что в настоящее время не существует какой-либо универсальной модели СОС, способной адекватно описать произвольную СОС и предложить эффективные алгоритмы её функционирования. В основе многих моделей СОС лежат их биологические прототипы, а поиск алгоритмов их функционирования зачастую носит эвристический характер.

II. Обзор моделей самоорганизации

Глобально дихотомия классификации моделей самоорганизации и самоорганизующихся систем может быть проведена в зависимости от типа взаимодействия между её элементами:

- Модели, основанные на прямом взаимодействии элементов (агентов) системы между собой. В таких СОС обмен информацией между агентами в системе происходит напрямую, агенты могут посылать сообщения конкретным адресатам (в сетях ad-hoc архитектуры обычно этими адресатами являются непосредственные соседи агента, про существование которых агент «знает») или в широковещательном режиме. Прямое взаимодействие агентов находит широкое применение в задачах выстраивания какой-либо пространственной конфигурации агентов, когда необходимо поддержание определенных дистанций, интервалов и скоростей между агентами организации. Формирование и поддержание строя группы БПЛА является типичным примером данной модели самоорганизации.
- Модели, основанные на косвенном взаимодействии агентов между собой. В данной модели, агенты взаимодействуют непосредственно со средой, в которой они функционируют, и изменяют её, а другие агенты воспринимают эти изменения и, в соответствии с этими изменениями, модифицируют своё поведение.

Оба вышеупомянутых механизма взаимодействия между агентами СОС могут иметь следующие реализации, в зависимости от заложенных в них идей и алгоритмов.

A. Модели, основанные на обучении с подкреплением

В таких моделях движущей силой самоорганизации является функция полезности, или функция поощрения, которую каждый агент стремится максимизировать. В зависимости от конкретной задачи правильно сформированная функция полезности является залогом успешной алгоритмической реализации модели. Подчеркнем, что функция полезности должна учитывать, как текущее состояние агента, так и ограничения, накладываемые на его действия, и управлять поведением агента таким образом, чтобы агент стремился достичь в конечном итоге своего желаемого состояния. Обучение в процессе функционирования агента обычно заключается в настройке весовых коэффициентов функции полезности тем или иным методом оптимизации или искусственного интеллекта. К существенным недостаткам моделей такого типа является применение в них «жадных» алгоритмов оптимизации, которые учитывают только текущее состояние самого агента и среды, что может привести в общем случае к пропуску более выгодных решений в перспективе [1].

B. Модели, основанные на кооперации

В таких моделях агенты взаимодействуют между собой в «дружественной» манере, совместно работая над одной задачей, и при этом «помогая» друг другу с целью получения более точного решения.

C. Модели, основанные на градиентных полях

Биологическим прототипом таких моделей является морфогенез. В процессе морфогенеза клетки живого организма определяют своё местоположение

относительно источника благодаря оценке концентрации и градиента специальной химической субстанции – морфогена. Рост и развитие живого организма управляется множеством различных морфогенов. В информационных СОС аналогом морфогена является некоторая структура данных – вычислительное поле, которое формируется либо средой, либо непосредственно самими агентами. В каждой точке среды это поле имеет своё числовое значение. В зависимости от конкретного сценария задачи, вычислительное поле может изменяться как агентами, так и средой. Агенты в моделях такого типа анализируют поле и координируют своё поведение в зависимости от формы поля (направлений градиента) и его значений. Классическим примером СОС подобного типа является система управления дорожным трафиком в мегаполисе, агентами в которой являются автомобили и светофоры, и присутствуют два типа вычислительных полей – поле расстояний и поле траффика.

D. Рыночные модели самоорганизации

Модели такого типа заимствуют идеи из экономической теории [3]. Агенты в СОС подразделяются на агентов-продавцов (агентов, владеющих некоторыми ресурсами) и агентов-покупателей (агентов, заинтересованным в потреблении некоторых ресурсов). В системе вводятся некоторые виртуальные деньги. Задача продавца – получить как можно больше денег за имеющиеся у него ресурсы, а задача покупателя – заплатить за желаемые «услуги» как можно меньше. Содержательно такая модель может быть представлена в виде аукциона, где агенты-покупатели и агенты-продавцы ищут друг друга, предлагая ресурсы и свои цены за них. В случае совпадения интересов агентов двух типов между ними заключается «сделка». Модели СОС данного типа широко применяются в задачах логистики и построения адаптивных расписаний.

E. Модель аморфных вычислений

В моделях такого типа рассматривается множество одинаково запрограммированных миниатюрных вычислительных устройств, имеющих очень малые размеры и ограниченные ресурсы, и разбросанных хаотично в некотором пространстве [4]. Устройства могут содержать в себе какой-либо сенсор, имеют ограниченную дальность связи и могут выходить из строя. Применение СОС такого рода заключается в трансляции сигнала, полученного одним из агентов аморфной системы своим доступным для связи соседям по некоторому простому алгоритму. В итоге, часть агентов аморфной системы приобретает некоторую пространственную форму, сигнализирующую о наступлении какого-либо события в системе. «Умная» краска, в которую могут быть помещены такие миниатюрные устройства, и которой могут быть покрыты здания, мосты, может оповещать о повреждениях в сооружениях, сильном ветре, трещинах и т. д.

Рассмотренные модели самоорганизации носят содержательный характер, а алгоритмы функционирования агентов системы и правила их взаимодействия определяются спецификой конкретной задачи. Ниже предлагается еще одна модель самоорганизации в распределенных системах, имеющая более формальное и универсальное описание. Отметим, что данная модель может быть успешна применена в СОС различного назначения от финансового управления сетью гипермаркетов до управления автономной группой БПЛА, выполняющих задачи наблюдения, разведки и нанесения боевых ударов.

III. Трехуровневая модель самоорганизации

Будем рассматривать распределенную систему S как набор составляющих её элементов и связей между ними. Структура системы имеет ad-hoc архитектуру, отдельные элементы могут покидать систему и возвращаться в неё в любой момент времени. Связи элементов также носят динамический характер. В разработанной модели каждому элементу поставлен в соответствие программный агент, который моделирует поведение элемента. Иерархическая структура такой СОС может быть представлена в виде дерева. Узлы дерева делятся на два типа: узлы, соответствующие листам дерева – им поставлен в соответствие программный базовый агент (БА); остальным узлам поставлен в соответствие программный агент-посредник (АП). Отличие между базовым и агентом посредником заключается в том, что базовый агент моделирует выполнение агентом той или иной функции, в то время как агент-посредник осуществляет функции управления, передачи данных между уровнями, планирования дальнейших действий подчинённых ему базовых агентов. В корне такого дерева, который может быть виртуальным, задается целевая задача для СОС и осуществляется контроль за её выполнением.

Отметим, что такая структура часто применяется в настоящее время для управления группой (группами) БПЛА, выполняющими различный спектр задач – от задач наблюдения, до разведывательно-ударных. Корень дерева в данном случае соответствует центральному наземному пункту управления (ПУ), агенты-посредники – это так называемые «лидеры» своих групп, осуществляющие управление и контроль подчиненными им базовыми агентами – БПЛА-исполнителями. В функции АП входят также прием управляющих (корректирующих) команд от ПУ, сбор и передача информации на ПУ. Структура такой самоорганизующейся системы управления показана на рис. 1, где корень СОС – центральный пункт управления, АП_i – агенты-посредники, БА_i – базовые агенты.

Целевая задача системы формируется в её корне и доводится до всех агентов системы. В результате в системе формируется план решения задачи, исходя из текущих доступных её ресурсов. Для оценки качества и эффективности решения целевой задачи в корне такой СОС должен быть сформирован целевой функционал системы J_S (функция, подобная функции полезности в других моделях самоорганизации), учитывающий все требуемые параметры функционирования системы. Зададим также некоторое пороговое значение целевого функционала, при переходе через которое будем полагать, что функционирование системы перестало удовлетворять поставленным перед ней целям:

$$J_S \geq J_{min} \quad (1)$$

Нарушение данного неравенства должно вызывать старт процессов самоорганизации в системе.

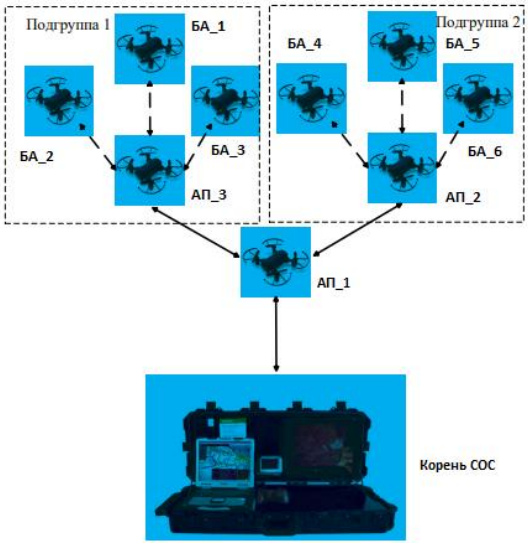

Рис. 1. Структура СОС в задачах управления группой БПЛА

Механизмы самоорганизации в такой системе предлагается рассматривать на трех уровнях: параметрическом, функциональном и структурном. Опишем формально сущность этих процессов на каждом из уровней. Все элементы системы (как АП, так и БА) можно отнести к одному из типов элементов $T_i \in T$, где T – множество всех типов элементов в системе. Тип элементов определяет, как характерный его набор параметров, так и набор функций, который данный элемент способен реализовать: $\{f_{i,1}, f_{i,2}, \ldots, f_{i,m}\}$, где m – число различных функций (алгоритмов), реализуемых элементом типа T_i. В свою очередь, каждая функция зависит от некоторых управляющих параметров $\{ x_{i,j}^1, x_{i,j}^2, \ldots, x_{i,j}^p \}$, где p – количество параметров функции $f_{i,j}$.

Такая формальная модель СОС позволяет агентам-посредникам запускать алгоритмы самоорганизации на множестве управляемых ими агентов. Первый уровень самоорганизации – параметрический – предполагает изменение параметров функционирования агентов таким образом, чтобы добиться выполнения неравенства (1). Параметрическая самоорганизация предполагает применение либо традиционных методов оптимизации, либо, в случае большой размерности задачи – обращение к тем или иным методам искусственного интеллекта, например, нейронным сетям, генетическим алгоритмам и др. В работе [5] были успешно промоделированы методы циклического покоординатного спуска и экспоненциальной релаксации для решения задачи параметрической самоорганизации.

В случае неуспеха первого уровня самоорганизации система пытается реализовать механизмы следующего – функционального уровня. Функциональная самоорганизация является наименее формализуемой, и предполагает изменение функций (алгоритмов) работы агентов системы. Обычно порядок выбора функций (если такая возможность заложена в системе) определяется методом экспертных оценок и априорно зашивается в ПО агента.

Последний – структурный – уровень самоорганизации предполагает изменение структуры самой СОС: состава её элементов и/или связей между ними. В работе [5] предлагаются следующие этапы структурной самоорганизации: изменение типов агентов, реконфигурация и включение новых агентов в систему. Изменение типов агентов может подразумевать перепрошивку ПО агента, замену навесного оборудования в случае БПЛА на более подходящее и т. д. В результате изменения типа агента меняется состав его исполняемых функций. Реконфигурация заключается в изменении управляющих связей между агентами системы без изменения количественного состава агентов. В задачах наблюдения наземной поверхностью группой БПЛА, необходимость реконфигурации группы может быть вызвана выходом из строя одного из участников. Как следствие, наблюдение на непокрытыми участками поверхности может быть перераспределено между оставшимися участниками.

Добавление новых агентов в систему является последним шагом на пути попытки выполнения неравенства (1) путем самоорганизации. К данному этапу система переходит в случае неуспеха попыток реализации предыдущих этапов или при обнаружении явных признаков, указывающих на необходимость выполнения этого этапа. Так, например, рассмотрим выполнение группой БПЛА из 4х агентов боевой задачи по уничтожению двух вражеских объектов. Будем считать, что каждый борт БПЛА несет потребный наряд, достаточный для уничтожения одной цели. Однако, пусть после прохождения постов ПВО противника, сбитыми оказали три союзных БПЛА. Очевидно, что одного уцелевшего борта БПЛА будет недостаточно для выполнения поставленной задачи, необходимо увеличение состава группы, или снятие поставленной задачи.

IV. Заключение

В заключении отметим, что описанная выше трехуровневая модель самоорганизации может быть успешно применена во многих системах управления сложными распределенными информационными системами. В частном случае, как показано ранее на примерах, такая СОС может быть внедрена для управления группой БПЛА, выполняющих задачи различного рода.

Список литературы

[1] Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2012. № 2.

[2] Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2012. № 3.

[3] Chavez A., Maes P. Kasbah. An Agent Marketplace for Buying and Selling Goods// Proc. First Intern. Conf. The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology. London, UK, 1996. P. 75–90.

[4] H. Abelson H., Allen D., Coore D., Hanson C., Homsy G., Knight T., Nagpal R., Rauch E., Sussman G., Weiss R., Amorphous Computing // Communication of the ACM, 2000 V. 43, № 5. P. 74–82.

[5] Куприянов М.С., Кочетков А.В. Управление сложными техническими системами на основе методов самоорганизации // XVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. СПб, 2015. Т. 1. С. 281-284.