

Г.В. АНЦЕВ, Г.П. ЖИГУЛИН, В.А. САРЫЧЕВ
**ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ
СТРУКТУР И ОПЕРАЦИЙ**

Анцев Г.В., Жигулин Г.П., Сарычев В.А. **Описание распределенных сетецентрических структур и операций.**

Аннотация. Предложен математический способ описания автономного группового множества объектов, позволяющий выявить общность технологий для организации сетецентрических операций. С его помощью описано взаимодействие группы интеллектуальных и неинтеллектуальных объектов с внешней средой, их поведение в зависимости от изменения характеристик внешней среды, в том числе и при наличии, так называемой, дуэльной ситуации.

Ключевые слова: сетецентрические операции, групповое взаимодействие, роевое управление, асинхронное управление.

Antsev G.V., Shigulin G.P., Sarychev V.A. **Description of distributed network-centric structures and operations.**

Abstract. A mathematical description of an autonomous group of multiple objects, allowing to identify common technologies for network-centric operations is considered. With its help, an intelligent and non-intelligent objects interaction with external environment is described. Their behavior according to the characteristics changes of external environment, including the duel situation is also described.

Keywords: network-centric operations, group interaction, swarm control, asynchronous control.

1. Введение. Сегодня, прежде всего, из-за необходимости включения сетецентрических технологий в арсенал информационных средств, используемых в боевых операциях, появился устойчивый интерес к проблемам децентрализованного (асинхронного) управления группой объектов, объединенных общей целью. Важно подчеркнуть, что эта группа действует автономно, хотя и выполняет функцию воздействия на внешний мир (среду), определенную этой группе заранее. Как всегда, на ранней стадии — при становлении проблемы, каждая задача базируется на своем частном описании ситуации, что приводит к тому, что «за деревьями не видно леса». Сказанное целиком и полностью относится к сетецентрическим технологиям. Обращает также внимание, что при рассмотрении соответствующих вопросов, из-за всё той же начальной стадии проблемы, преобладает вербальное (качественное, словесное) описание. В этом убеждают, например, труды недавно состоявшегося научно-технического семинара «Управление в распределенных сетецентрических и мультиагентных системах» (УР-

СиМС-2010). Очевидно, что математика здесь позволит значительно прояснить суть анализируемых проблем.

2. Описание. По ставшей уже традиционной технике исследования задач управления будем полагать, что все «действующие лица» суть динамические системы, полностью описываемые своими состояниями. В основу формирования математического описания будет положено представление для динамических систем, предложенное школой чл-кор. РАН В.А. Якубовича [4]. Анализируемые процессы будут рассматриваться в дискретном времени, которое принимает значение на множестве $T = \{0, 1; 2, \dots, t\}$. Условие $t < \infty$ соответствует конечным дискретным процессам, а при $t = \infty$ — бесконечным. Следовательно, в основе описания процессов лежат функции, определенные на множестве T и ставящие в соответствие каждому целому числу, принадлежащему T , некоторую совокупность отсчетов. Для цифровых процессов область значений ограничена конечным множеством действительных или комплексных чисел.

Элементы множества отсчетов текущих процессов или функций, которые по стандартным в теории управления технологиям в случае необходимости приобретают векторную или иную многомерную алгебраическую структуру (в совокупности с соответствующими операторами их преобразования), будем обозначать строчными буквами, например, x, y, z, w , соответствующий им конечный или бесконечный упорядоченный набор как $x_s^t = \{x_s, x_{s+1}, \dots, x_t\}$, $w_s = \{w_s, \dots\}$, где $0 < s < t$. Символ y_s^t при $s > t$ означает пустое множество \emptyset .

Заглавными латинскими буквами будем обозначать операторы, например $z_t = Z(\cdot)$. Если операторы изменяются во времени, то для них используются те же принципы отметки динамики $Z_t(\cdot)$. Операторы инвариантны относительно своих аргументов (воздействий), что отмечено записью — внутри скобок (\cdot) вместо точки может помещаться модель любого процесса, соответствующего области определения оператора, сам оператор от этого процесса не зависит (естественно, указанный процесс непосредственно через оператор влияет на выходной сигнал — область значений оператора). Инвариантность соблюдается и в отношении представления (явного вида, записи) оператора.

В соответствии с сущностью группового управления основным предметом исследования выступают действия группы из N объектов, которых мы впредь будем именовать роботами, описываемых состоя-

ниями: $s1_t, s2_t, \dots, sN_t$. Эти роботы должны быть интеллектуальными, что подразумевает, согласно воззрениям научной школы член-кор. РАН И.А. Каляева, что их группа должна самостоятельно (автономно) сформировать управление роботами, то есть групповое управление для достижения поставленных целей. В связи с этим возникают задачи оценки поставленных целей, условий их достижения, анализа ситуации в целом и управления как группой в целом, так и отдельных роботов на уровне группы или ее кластера [2]. Совокупность этих задач и составляет содержание группового управления. Введение в обиход понятие кластера означает, что здесь учитывается процедура отбора из группы такой совокупности (кластера) роботов, которые способны выполнить текущие необходимые действия.

Образование кластеров при организации группового управления говорит о необходимости описания одного из характерных свойств функционирования сетцентрических систем — динамического изменения состава элементов, входящих в систему. Во времени может происходить изменение состава и возможностей роботов, может происходить передислокация или появление дополнительных подразделений, изменение условий их боевого применения и т.д. В связи с этим к сетцентрическим системам предъявляется следующее требование [5]: «Любой элемент боевого построения должен иметь возможность быстро включиться в сеть или отключиться в процессе ее функционирования без отрицательных последствий для работоспособности и своей, и сети». Однако, такое включение или выключение роботов в кластер, конечно, предполагает соответствующую «включательную» готовность роботов, хотя бы программно.

Системы, которые характеризуются указанным свойством, называют «открытыми системами». Предполагается, что состав роботов может динамически изменяться в соответствии с изменениями, происходящими в окружающей обстановке. Требуемое взаимодействие при формировании кластеров базируется на наделении роботов сервисами, которые в том числе при изменении состава роботов способны получать и поддерживать в актуальном состоянии данные, необходимые для того, чтобы знать, с кем в тех или иных ситуациях можно или нужно взаимодействовать для решения своих задач.

Роботы, входящие в текущий кластер, отмечаются, как прежде: $s1_t, s2_t, \dots, sM_t$. Если какие-то роботы не вошли в анализируемый кластер, то они отмечаются соответствующей «остаточной» нумерацией

$s(M+1)_t, s(M+2)_t, \dots, sN_t$. Очевидно, что $M \leq N$. В случае, когда нужно индивидуализировать роботы кластера, то можно применить в качестве одного из аргументов для состояния робота переменную δ , принимающую два значения, ноль или единицу, тогда i -й робот после вхождения в кластер обозначается как $si_t(1, \dots)$, где многоточие указывает на возможность включения других аргументов для описания робота. Итак, при «параметрическом» описании i -го робота, с точки зрения его вхождения или не вхождения в кластер, будет действовать запись $si_t(\delta_t, \dots)$, где переменная δ_t может мгновенно изменять свое значение в «общие» дискретные моменты времени, а открытость системы, образованной роботами, отмечается перечислительной записью: $s1_t(\delta_t, \dots), s2_t(\delta_t, \dots), \dots, sN_t(\delta_t, \dots)$.

Наверное, также не требует какого-либо объяснения факт использования термина интеллектуальный робот, если для него $\delta_t = 1$ и неинтеллектуальный — при $\delta_t = 0$. Для формирования открытой среды кластер должен содержать, по крайней мере, два интеллектуальных робота. Если тактикой группового управления предусмотрено ранжирование ответственности (например, наделение одного или нескольких интеллектуальных роботов полномочиями лидера), то это может быть отмечено верхним скобочным индексом у функции принадлежности $\delta_t^{(n)}$, где n — уровень иерархического развертываемого автономного управления.

Формирование описания для задачи группового управления отталкивается от представления действий одиночного неинтеллектуального робота, что дает возможность «до поры» избегать соответствующего «порядкового» индексирования. Роботы предполагаются технологного происхождения (это уже непосредственно зафиксировано в названии объектов группового управления — роботы), что предполагает фиксированным множество действий, предусмотренных заранее разработчиком системы, руководствовавшимся моделью ситуации, выступающей ареной для формирования технологий группового управления в соответствующей также формируемой открытой среде. При составлении описания мы также будем иметь в виду до некоторой степени типовую для группового управления задачу — уничтожения цели неким высокоточным авиационным боевым средством.

Состояние внешней для робота среды обозначим функцией z_t , самого робота s_t . В качестве внешней среды выбираются те объекты, которые влияют на состояние робота s_t .

Постулируем, что взаимодействие робота и внешней среды по соответствующему каналу функционально, то есть состояние робота и внешней среды функционально связаны:

$$\begin{aligned} z_t &= Z_t(0, z_0^{t-1}, s_0^{t-1}, u_0^t, \nu^{(z)}), \quad t = 1, 2, \dots, \\ z_0 &= Z_0(0, u_0, \nu^{(z)}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $z_0^t = \{z_0, z_1, \dots, z_t\}$ — история (динамика) внешней обстановки, s_0^t — динамика функционирования робота, Z_0^∞ — фиксированная последовательность операторов, изменяющихся во времени. Это уравнение характеризует намерения противодействующей стороны, с которой в дуэльной ситуации взаимодействует робот. В соответствующую группу уравнений состояния для внешней среды, структура которых задается (1), в качестве множеств состояний входят описания объектов и законов их функционирования, если целью робота выступает уничтожение таких объектов, фоновая обстановка, постановка противником помех, его цели и ценности. Другими словами, это полное описание внешней среды, но все-таки с точки зрения робота. Тот факт, что робота могут обмануть или не все донести до его «сознания», фиксируется функцией u_0^t , которая учитывает обычную ситуацию в целеустремленных системах, когда часть состояния внешней среды не воздействует непосредственно на робота, а неизвестным образом кодируется в параметрах того подмножества состояний внешней среды, которое соответствует ее взаимодействию с роботом. Не представляет каких-либо серьезных трудностей интерпретировать u_0^t как неизвестный «вход» для внешней среды. Параметр $\nu^{(z)}$ соответствует параметру неопределенности, а множество $\Gamma^{(z)} \supset \nu^{(z)}$ характеризует набор внешних сред (а значит, и возмущений со стороны внешней среды), где функционирует или может функционировать исследуемый неинтеллектуальный робот. С помощью $\nu^{(z)}$ исследователь пытается «удержать» при анализе данного робота структуру (1) для разнообразных сред, где этот робот функционирует, а также номенклатуру учитываемых при исследовании параметров состояний среды и робота.

В (1) учтена, таким образом, ситуация когда внешняя среда реагирует на присутствие и функционирование робота, например, созданием соответствующей внешней и/или помеховой обстановки и меняет воздействие на робота в соответствии с наблюдавшейся ранее предысторией и целями (задачами).

Функционирование в среде робота (например, полет по траектории и уничтожение цели) описывается аналогично (1):

$$s_t = S_t(0, s_0^{t-1}, z_0^{t-1}, \tau_t, \nu^{(s)}), \quad t = 1, 2, \dots, \quad s_0 = S_0(0, \nu^{(s)}), \quad (2)$$

где $\nu^{(s)}$ — параметр, характеризующий конкретику уже самого робота. В отношении этого параметра справедливы те же замечания, что и для $\nu^{(z)}$, множество $\Gamma^{(s)} \supset \nu^{(s)}$ определяет набор роботов, попадающих с точки зрения описания входа под юрисдикцию (2).

Наверное, не представляет труда интерпретировать (2) как стратегию изменения характеристик робота на случай предсказуемого (ожидаемого) для робота изменения внешней среды. В этом случае верхние индексы $t-1$ у состояний s_t и z_t , являющихся «аргументами» оператора функционирования робота $S_t(\cdot)$, позволяют перенести «будущую» среду на настоящее время. Другими словами, мы стараемся подобными соглашениями удержать описываемых роботов в классе динамических (причинных) систем.

Последовательность τ_0^∞ в (2) соответствует множеству настраиваемых параметров (настроек) робота, с которыми он «работает», причем множества состояний робота s_t и настроек τ_t не пересекаются. Настройки и определяют закон управления роботом. Благодаря введению (выявлению, выделению, актуализации) параметров τ_t при описании робота появляется возможность влиять на динамику функционирования при достижении определенных целевых установок.

Поскольку настройка обычно осуществляется по типу обратных связей с учетом доступных роботу данных, то эта ситуация соответствует использованию еще пары соотношений:

$$\tau_t = T_t(0, y_0^t, \tau_0^{t-1}), \quad t = 2, 3, \dots, \quad \tau_1 = T_1(0, y_0), \quad (3)$$

$$y_t = Y_t(0, s_0^t, z_0^t, y_0^{t-1}, \tau_t, \nu^{(y)}), \quad t = 1, 2, \dots, \quad y_0 = Y_0(0, \nu^{(y)}), \quad (4)$$

Здесь первое уравнение описывает динамику для технологии управления, а второе – фактическую динамику робота и реакции среды, если последовательность y_t интерпретировать как доступные дан-

ные (оценки) о состоянии среды и робота, учитываемые при формировании настройки роботом в соответствии со стратегией, отображаемой оператором $T_t(\cdot)$. По этой причине (4) называют сенсорным уравнением. Для случая оснащения роботов радиолокационными сенсорами уравнение (4) определяет процесс радиолокационного наблюдения, вплоть до формирования синтезированного антенного раскрытия. Настройка для техногенных роботов осуществляется распределением в определенную последовательность предусмотренных заранее (при разработке робота) действий (поэтому принципиально их конечное число) и установление силы соответствующих воздействий. Сегодня, как правило, динамика смены таких воздействий, оказывается, еще жестко установлена и «доводится» роботу заранее. Радикальное изменение внешней среды, не укладывающееся в множества неопределенности, используемые в (1)–(3), могут стать фатальными для робота с точки зрения выполнения возложенной на него задачи. Во втором уравнении $V^{(y)}$ представляет совокупный параметр неопределенности $V^{(y)} = \{V^{(z)}, V^{(s)}\}$, то есть $\Gamma^{(y)} = \Gamma^{(z)} \times \Gamma^{(s)}$. Таким образом, реализуемые стратегии настройки определяются доступной информацией о роботе и среде, а значит, напрямую не зависят от неизвестных роботу всех состояний системы и среды (эти состояния в соответствии с (1) и (2) предполагаются известными соответственно для робота и среды), а также целей, поставленных перед роботом.

Неинтеллектуальный робот это всегда актер, поскольку какого-либо разделения функций и полномочий здесь принципиально не предусматривается, и робот предназначен для совершения определенных действий по изменению окружающей среды, например, для физического воздействия на объекты противника.

Очевидно, что тактика функционирования робота должна быть напрямую связана с некоторыми или всеми данными y_t о состоянии среды и робота («грамотное» функционирование должно обязательно учитывать поведение внешней среды, как реакции на действия робота). Значит, (3)–(4) может интерпретироваться как реализуемая по традиционной для теории управления технологии некая программа управления роботом, где в качестве воздействий выступают настройки τ_t . Теперь «качество» действий робота проявляется в качестве реализации цели управления, реализуемой развивателем. Все неудачи и просчеты в управлении роботом отображаются параметром $V_t^{(y)}$ в (4). По «обратной связи» это возмущение влияет на y_t . В дальнейшем возмуща-

ющий параметр $V_t^{(y)}$ будем обозначать как V_t , допуская уже обозначением возможность расширительного толкования множества возмущений, мешающих с точки зрения робота эффективному функционированию. Если данные, соответствующие y_t , не являются взаимообусловленными, то цель управления может быть сформулирована «покомпонентно». В этом случае для каждого из данных о роботе и среде y_t , учитываемых в процессе функционирования в случае ограниченного возмущения v_t , цель управления состоит в выполнении канонического для теории систем неравенства:

$$|y_t| < 1/r_y, \quad (5)$$

спустя некоторое время переходного процесса, где r_y — уровень качества управления. Итак, мы хотим найти для анализируемого робота такой закон управления, отображаемый динамикой и уровнем настроек τ_t , чтобы учитываемые и «настраиваемые» при управлении данные о роботе и среде y_t спустя какое-то время (время переходного процесса) колебались бы вокруг нулевого значения, не выходя за дорожку шириной $2/r_y$ (никаких минимумов, достаточно выбором номенклатуры и силы настроек попасть в эту дорожку). Например, на языке предлагаемого описания задача радиоэлектронной борьбы со стороны внешней среды сводится к тому, чтобы в (4) «втолкнуть» такую функцию z_0^t (правильнее, ее составляющую u_0^t), чтобы кардинально изменить структуру этого уравнения (множеству $v^{(y)}$ не удастся «удержать» эту структуру), получить искаженную информацию (а лучше, не получить вообще) о намерениях противоборствующей стороны, что непосредственно через детерминированный закон управления (3) катастрофически повлияет на действия робота. В принципе, и робот может повлиять на действия противоборствующей стороны, «вталкивая» в (1) специально подобранную функцию s_0^t (разумеется, не саму функцию, а ее оценку — при таком противоборстве среда может также считаться неким роботом, но «вражеским», управляющим своим состоянием по тем же правилам (1)–(5)). Конечно, особых проблем в решении задачи по попаданию в дорожку шириной $2/r_y$, то есть формирования соот-

ветствующего управления, никогда не было (предполагается, что соблюдаются условия управляемости и наблюдаемости), если бы отсутствовали возмущения v_t . Если внешнее возмущения v_t представляют стационарный случайный процесс, то условие (5) должно быть несколько изменено

$$M_t |y_t|^2 < \frac{1}{r_y^1}, \quad (6)$$

где нижний индекс t около знака оператора математического ожидания M_t говорит о том, что операция математического ожидания совершается в момент времени t при фиксированной предыстории функционирования робота до этого момента. Вместо математического ожидания при формулировке цели управления может быть использована другая ансамблевая операция.

Если данные, заключенные в y_t , оказались взаимообусловленными, то опять же по канонической для теории управления технологии переходят к соответствующему функционалу качества управления.

Теперь перейдем к описанию открытой системы, включающей определенный набор интеллектуальных роботов. Пока отставим в сторону вопрос о мотивах превращения роботов в интеллектуальные. Отметим только, что кластер сегодня рассматривается в виде некоей компьютерной сети, объединяющей роботов, осуществляющих сбор информации (сенсоры), совершение требуемых действий (акторы), а также анализ ситуации, принятие и реализацию решений по управлению роботами-сенсорами и роботами-актерами — информационно-управляющие роботы (лидеры). В роботах кластера присутствуют соответствующие сценарии поведения и правила принятия решений. Понятно, что перечисленные функции могут совершаться и без соответствующей специализации роботов в кластере, однако если такая специализация произошла, то кластер налицо. Организация эффективной схемы взаимодействия роботов по выполнению заданной совокупности функций и создает кластер, поскольку поведение роботов предусматривает их взаимодействие при решении тех или иных задач.

Для определенности будем считать кластер состоящим из трех роботов.

Факт появления у некоторого робота кластера свойства интеллектуальности будет отмечен тем, что (1) конкретизируется

$$z_t = Z_t(1, z_0^{t-1}, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, u1_0^t, u2_0^t, u3_0^t, v^{(z)}), \quad t = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

$$z_0 = Z_0(1, u1_0, u2_0, u3_0, v^{(z)}),$$

Соответственно (2) станет системой, в нашем случае, трех уравнений одинаковой структуры, что позволяет ограничиться записью одного из них:

$$\begin{aligned} s1_t &= S1_t(1, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1} z_0^{t-1}, \tau1_t, \nu^{(s)}), \quad t = 1, 2, \dots, \\ s1_0 &= S1_0(1, \nu^{(s)}), \end{aligned} \quad (8)$$

Появление интеллектуальных роботов в принципе никак не может повлиять при автономном управлении на действия прочих «оставшихся» роботов, по этой причине на уравнения (1)–(6), описывающих поведение неинтеллектуальных роботов, возникновение кластера не называется. Вместе с тем, выполненные действия неинтеллектуальными роботами через соответствующие накопленные изменения в окружающей среде z_0^{t-1} , конечно же, учитываются кластером, как это непосредственно следует из (8), где учитывается факт слежения за ними. При описании внешней среды (7) эти изменения рассматриваются как предусмотренные заранее.

Соответственно, управляющие воздействия и динамика сенсоров будут описываться соотношениями:

$$\tau1_t = \Pi_t(1, y1_0^t, \tau1_0^{t-1}, \tau2_0^{t-1}, \tau3_0^{t-1}), \quad t = 2, 3, \dots, \quad \tau1_1 = \Pi_1(1, y_0), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y1_t &= Y1_t(1, s1_0^t, z_0^t, y1_0^{t-1}, \tau1_t, \tau2_t, \tau3_t, \nu^{(y)}), \quad t = 1, 2, \dots, \\ y1_0 &= Y1_0(1, \nu^{(y)}), \end{aligned} \quad (10)$$

Из этих соотношений видно, что сенсорная информация у каждого робота своя, но другие объекты кластера влияют на них передачей им сведений о своих намерениях. В этом случае представители научной школы чл.-кор. РАН И.А. Каляева говорят о коллективной стратегии группового управления. Однако, можно более сурово организовать управление в этом кластере в рамках коллективной стратегии — один или несколько роботов непосредственно управляют другим:

$$\tau1_t = \Pi_t(1, \tau2_0^{t-1}, \tau3_0^{t-1}), \quad t = 2, 3, \dots, \quad (9a)$$

Пара уравнений (конечно, в совокупности с (7)–(8))

$$\begin{aligned} \tau1_t &= \Pi_t(1, y1_0^t, \tau1_0^{t-1}, y2_0^{t-1}, y3_0^{t-1}), \quad t = 2, 3, \dots, \\ \tau1_1 &= \Pi_1(1, y_0), \end{aligned} \quad (11)$$

$$y1_t = Y1_t(1, s1_0^t, z_0^t, y1_0^{t-1}, \tau1_t, y2_t, y3_t, \nu^{(y)}), \quad t = 1, 2, \dots, \quad (12)$$

$$y1_0 = Y1_0(1, v^{(y)}),$$

будет свидетельствовать о стайной стратегии группового управления, когда управление базируется на анализе изменений, происходящих в среде, а уравнения

$$\tau1_t = T1_t(1, y1_t^t), \quad t = 2, 3, \dots, \tau1_1 = T1_1(1, y_0), \quad (13)$$

$$y1_t = Y1_t(1, s1_0^t, z_0^t, y1_0^{t-1}, v^{(y)}), \quad t = 1, 2, \dots, y1_0 = Y1_0(1, v^{(y)}), \quad (14)$$

о роевой стратегии группового управления [2].

Роевая стратегия группового управления сегодня часто рассматривается как новый путь развития систем вооружения, направленный на повышение эффективности системы с точки зрения сопоставления качества и стоимости разрабатываемых средств вооружения. Этот путь связывается с переходом к массовому созданию менее чувствительных, менее интеллектуальных в отдельности роботов, но при этом обеспечивающих за счет их коллективного использования требуемый уровень интеллектуальных возможностей системы в целом. Образно такой подход определяется как «вместо нескольких «птиц» или «акул»... целесообразно иметь «рой насекомых» [5]. При этом интеллектуальность кластера, его возможности определяются главным образом не столько возможностями роботов, а сколько схемой и результатами их взаимодействия. Например, здесь возможна адаптация по роботам в кластере. Если в результате выбранной тактики робот «стаи» не выполнил свою задачу, что говорит о несоблюдении неравенств (5)–(6), то последующие роботы могут изменить свою тактику, по их «мнению» в нужную сторону, чтобы обеспечит соблюдение исходных неравенств. Здесь технология адаптации, представленная в варианте [4], где предусмотрены «неудачи», непосредственно распределяется на кластер.

Взаимодействие роботов в кластере по выходному каналу осуществляется (здесь первого робота со вторым) в соответствии с оператором

$$s2_t = E2_t(1, s1_0^t, s2_0^{t-1}, \tau2_0^{t-1}, u_0^{t-1}). \quad t = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Если бы робот вдруг опять стал бы неинтеллектуальным, ему пришлось бы действовать на основе уравнения состояния

$$s2_t = E2_t(0, s2_0^{t-1}, \tau2_0^{t-1}, u_0^{t-1}), \quad (16)$$

не производя через (8) информационного воздействия на кластер, а с помощью него и на внешнюю среду по входному каналу в соответствии с (7).

В (15) и (16) характеристика внешней среды u_0^t играет роль мешающего параметра для интеллектуального робота, поскольку она влияет на его действия и принимаемые решения. Как же помогает робот другим? При формировании управления (9) учитываются непосредственно состояния самих роботов, а также через сенсоры — состояние среды. Поскольку соотношение (15) включает важные, но неизвестные для робота характеристики среды u_0^t , то при выработке настройки $\tau 2_0^t$ он уже был вынужден преодолевать действие среды. Таким образом, в соответствии с (15) робот, передавая другим «проверенную практикой» информацию о своих действиях, детализирует и уточняет операторы взаимодействия других роботов со средой, а, следовательно, уменьшает информационную неопределенность всего кластера относительно намерений противоборствующей стороны, запечатленных в u_0^t , а значит, формирует более адекватную тактику действия. Такое влияние роботов в кластере, повышающее эффективность действий акторов, сенсоров и лидеров, выступает одним из мотивов для создания открытой среды.

Анализируя (7)–(16), можно акцентировать свое внимание на зависимости

$$y1_t = F1_t(1, y1_0^{t-1}, u_0^t, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, \mathcal{V}^{(F)}), \quad (17)$$

которая демонстрирует, как робот успел «подготовиться» к восприятию внешней обстановки для выработки соответствующей тактики действия — с поправками на неопределенность он связывает динамику своего функционирования с состоянием обстановки и кластера. Значит, из анализа своей динамики (соотнося ее с ожидаемым изменением во внешней среде) робот способен вынести заключение о внешней среде, с которой сейчас «работают» и другие роботы. В этом случае, если робот получил «неожиданные» (не предсказанные с помощью (17)) данные о текущей ситуации, он попытается уточнить оператор $F_t(\cdot)$ (например, сделав «грамотные» предположения относительно u_t и $\mathcal{V}^{(F)}$, исходя из предшествующего своего опыта или воспользовавшись информацией от других роботов кластера). Здесь, как видно, допускается учет противодействующей реакции внешней среды на действия роботов, но уже из анализа текущей тактики управления. В обычном («неинтеллектуальном») варианте эта информация (точнее, сведения о ней, доступные при формировании задания) роботу предполагается известной, поскольку она непосредственно «заложена» в

процедуру его функционирования (9) и (15). У робота появляется возможность скорректировать настройку (9), исключив из (9) y_t , что позволит заменить (15) соотношением:

$$s2_t = E2_t(1, s2_0^{t-1}, \tau2_0^{t-1}, \nu^{(E)}). \quad t = 1, 2, \dots \quad (18)$$

где неопределенность мешающего параметра $\nu^{(E)}$ предполагается меньшей, чем неопределенность у пользователя относительно u_0^t .

Уравнение (17) можно представить системой двух уравнений:

$$y1_t = F1_t^{(1)}(1, y1_0^{t-1}, u_0^t, \nu^{(F)}), \quad (19)$$

$$y1_t = F1_t^{(2)}(1, y1_0^{t-1}, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, \nu^{(F)}) \quad (20)$$

Соотношение (19) отображает соответствие полученной роботом информации о внешней среде реальной ситуации, а (20) соответствие этой информации тактике действий кластера. Соотношение (19) отображает степень «неожиданности» для робота зафиксированной им ситуации у внешней среды, а (20) — такое же соответствие текущей тактики кластера и подготовленной ему информации о текущем состоянии внешней среды и самого робота. В инфологии указанные соответствия связывают с семантической и прагматической сторонами информационного процесса. Более того, когда некая система использует семантическую или прагматическую информацию, как раз и заявляют, что эта система интеллектуальная [6]. Таким образом, приведенные рассуждения несколько по-иному обосновывают наименование роботов кластера.

Часто в литературе организация группового взаимодействия связывается с проявлением самоорганизации (самосинхронизации) у соответствующей открытой системы. Под самоорганизацией понимается возможность обеспечения наибольшей эффективности как своих действий, так и действий других частей открытой системы на основе их взаимного согласования. Для согласования действий объектов вводятся правила согласования, имеющие проблемно ориентированное происхождение.

Пока описание группового управления предполагало, что те или иные действия интеллектуальные роботы выполняют одновременно и согласованно. Однако вполне может встретиться случай группового управления, когда действия роботов, совершаемые ими за определенный промежуток времени, разные.

До сих пор считалось, что для той или иной ситуации роботу заранее сообщили соответствующие действующие для данной ситуации

настройки τ_i , а управление свели только к регулированию параметров в таких настройках. Более того, как следует из (3) и (9) выбранная тактика управления всегда работает определенно — используются только оценки окружающей обстановки, сформированные теми роботами кластера, которые участвуют в данном взаимодействии («если ситуация такая-то, надо поступать так-то, только нужно уточнить как»). Чаще всего, это обеспечивается тем, что определенным образом классифицируются и ранжируются грядущие боевые ситуации и в соответствие им ставится определенное (разумеется, конечное) множество функций, реализуемых роботом. Даже для интеллектуальных роботов не бывает «нестандартных» ситуаций, что, конечно, заставляет усомниться в их названии (прав академик РАН С.Н. Васильев [1], когда применительно к техногенным объектам он использует изобретенный им осторожный термин — интеллектуальный). Каждая ситуация требует реализации определенной номенклатуры функций и опять же в определенном порядке (функциональная декомпозиция по [3]). Итак, робот при групповых и «одиночных» действиях должен реализовывать конечное множество возложенных на него функций, каждая из которых сопровождается соответствующей технологией (алгоритмом) управления, в нашем случае — настройкой τ_i . Следовательно, конечному множеству реализуемых роботом функций Ω может быть поставлено во взаимно однозначное соответствие множество настроек $\tau_i^{(1)}, \tau_i^{(2)}, \dots, \tau_i^{(\Omega)}$. Структура настроек сформирована таким образом, что реакция на текущую ситуацию воспроизводится в выборе соответствующих параметров, включая и те, что говорят о вступлении данного робота в информационно-управленческий контакт с другими роботами кластера.

3. Заключение. Отход от регламентированного порядка выполнения настроек приводит к принципиально новой задаче группового управления, когда не заранее, а в текущем режиме — из анализа обстановки (по совокупности сенсоров y_i кластера) для каждого робота кластера требуется из элементов множества настроек (функций) $\tau_i^{(1)}, \tau_i^{(2)}, \dots, \tau_i^{(\Omega)}$ установить порядок их реализации (разумеется, в этот порядок входит и выбор элементов множества). Это очень сильное допущение, поскольку при соответствующем обращении задачи группового управления здесь может рассматриваться ситуация, когда для группы роботов отсутствует конкретная общая цель, а также неизвестно состояние среды, обеспечивающее достижение этой цели. Гарантией успеха здесь служит принципиальная возможность достижения

данной цели в «обычном» режиме (цель операции кластеру роботов известна заранее), а также конечность имеющихся в управленческом арсенале кластера роботов множества настроек. Указанная конечность мощности множества настроек, в свою очередь, ведет к тому, что, несмотря на отсутствие ясной глобальной цели перед группой, каждый робот группы на своем уровне призван обеспечить (хотя бы на начальном «неинтеллектуальном» этапе групповых действий) реализацию некоей имманентной функции, наверняка, сенсорной, но в интересах группы. Другими словами, в указанном «подготовительном» этапе с помощью всех роботов в группе формируется образ внешней среды сначала в соответствии с роевой стратегией (14), заменяемой на стайную (12), а потом, когда во внешней среде обнаружено нечто «интересное», обеспечиваются групповые действия согласно коллективной стратегии по (10). Коллективная стратегия группового управления, по своей природе предназначенная для обслуживания акторов, из сенсорной трансформируется в акторную для реализации сформированной в процессе сенсорного наблюдения стратегии.

Литература

1. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматлит, 2000. 352 с.
2. *Калаяев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группе роботов. М.: Физматлит, 2009. 279 с.
3. *Радзиевский В.Г., Сирота А.А.* Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. М.: ИПРЖР, 2001. 456 с.
4. *Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А.* Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 448 с.
5. *Шеремет И.А.* Компьютеризация как путь к победе в вооруженной борьбе. // Независимое военное обозрение. 2005. №42 (451)
6. *Шрейдер Ю.А., Шаров А.А.* Системы и модели. М.: Радио и связь, 1982. 152 с.

Анцев Георгий Владимирович — канд. техн. наук.; Генеральный директор – Генеральный конструктор ОАО "НПП "Радар ммс". Область научных интересов: интеллектуальные информационные системы. Число научных публикаций — более 250. ОАО "НПП "Радар ммс", ул. Новосельковская, д. 37, Санкт-Петербург, 197375, РФ; р.т: +7 (812) 777-5051.

Antsev Georgiy Vladimirovich — Candidate of Technical Sc., general director – general constructor, Radar mms. Research interests: intellectual information systems. The number of publications — over 250. Radar mms, Novoselkovskaya str., 37, St. Petersburg, 197375, Russia; office phone +7 (812) 777-5051.

Жигулин Георгий Петрович — канд. техн. наук; декан ИКВО — зав. каф. МИПИУ НИУ ИТМО. Область научных интересов: интеллектуальные информационные системы.

Число научных публикаций — более 70. ИКВО, Кронверкский пр., д.49, Санкт-Петербург, 197101, РФ; р.т.: +7(812)595-4132

Shigulin Georgiy Petrovich — Candidate of Technical Sc., Dean, Head of Department of MaFIT. Research interests: intellectual information systems. The number of publications — over 70. IKVO, Kronverksky pr-t., 49, St. Petersburg, 197101, Russia; office phone +7(812)595-4132.

Сарычев Валентин Александрович — д-р техн. наук, профессор; директор НЦ прикладных проблем радиолокации и радиофизики, зам. Ген. конструктора по радиолокации и радиофизике ОАО "НПП "Радар ммс". Область научных интересов: интеллектуальные радиоэлектронные системы. Число научных публикаций — 400. SARYCHEV_VA@RADAR-MMS.COM; ОАО "НПП "Радар ммс", ул. Новосельковская, д. 37, Санкт-Петербург, 197375, РФ; р.т.: +7 (812) 777-5051 (доп. 213).

Sarychev Valentin Aleksandrovich — Dr. Sc. in Technology, professor; Dir. of Sc. Center of applied radar and radiophysics problems, dep. general dir., Radar mms. Research interests: intelligent radio electronic systems. The number of publications — 400. SARYCHEV_VA@RADAR-MMS.COM; Radar mms, Novoselkovskaya str., 37, St. Petersburg, 197375, Russia; office phone +7 (812) 777-5051.

Рекомендовано лабораторией автоматизации научных исследований, заведующий лабораторией Александров В.В., д-р техн. наук, проф.

Статья поступила в редакцию 21.09.2012

РЕФЕРАТ

Анцев Г.В., Жигулин Г.П., Сарычев В.А.; **Описание распределенных сетцентрических структур и операций.**

Предложен математический способ описания автономного группового множества объектов, позволяющий выявить общность технологий для организации сетцентрических операций. Взаимодействие робота и внешней среды по соответствующему каналу функционально, то есть состояние робота и внешней среды функционально связаны:

$$z_t = Z_t(0, z_0^{t-1}, s_0^{t-1}, u_0^t, \nu^{(z)}), \quad t = 1, 2, \dots, \quad z_0 = Z_0(0, u_0, \nu^{(z)}),$$

где $z_0^t = \{z_0, z_1, \dots, z_t\}$ — история (динамика) внешней обстановки, s_0^t — динамика функционирования робота, Z_0^∞ — фиксированная последовательность операторов, изменяющихся во времени. Это уравнение характеризует намерения противодействующей стороны, с которой в дуэльной ситуации взаимодействует робот.

Функционирование в среде робота описывается так:

$$s_t = S_t(0, s_0^{t-1}, z_0^{t-1}, \tau_t, \nu^{(s)}), \quad t = 1, 2, \dots, \quad s_0 = S_0(0, \nu^{(s)}),$$

где $\nu^{(s)}$ — параметр, характеризующий конкретику уже самого робота. В отношении этого параметра справедливы те же замечания, что и для $\nu^{(z)}$.

Факт появления у некоторого робота кластера свойства интеллектуальности будет отмечен конкретизацией:

$$z_t = Z_t(1, z_0^{t-1}, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, u1_0^t, u2_0^t, u3_0^t, \nu^{(z)}), \quad t = 1, 2, \dots, \\ z_0 = Z_0(1, u1_0, u2_0, u3_0, \nu^{(z)}),$$

соответственно уравнение функционирования робота в среде станет системой, в нашем случае, трех уравнений одинаковой структуры, что позволяет ограничиться записью одного из них:

$$s1_t = S1_t(1, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, z_0^{t-1}, \tau1_t, \nu^{(s)}), \quad t = 1, 2, \dots, \\ s1_0 = S1_0(1, \nu^{(s)}).$$

Взаимодействие роботов в кластере по выходному каналу осуществляется в соответствии с оператором

$$s2_t = E2_t(1, s1_0^t, s2_0^{t-1}, \tau2_0^{t-1}, u_0^{t-1}). \quad t = 1, 2, \dots$$

Зависимость

$$y1_t = F1_t(1, y1_0^{t-1}, u_0^t, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, \nu^{(F)})$$

демонстрирует, как робот успел «подготовиться» к восприятию внешней обстановки для выработки соответствующей тактики действия.

SUMMARY

Antsev G.V., Shigulin G.P., Sarychev V.A.; **Description of distributed network-centric structures and operations**

A mathematical way of describing an autonomous group of set of objects, which allows a community of technologies for organization a network-centric operations is proposed.

The interaction of the robot and the external environment through the appropriate channels is connected functionally:

$$z_t = Z_t(0, z_0^{t-1}, s_0^{t-1}, u_0^t, \nu^{(z)}), t = 1, 2, \dots, z_0 = Z_0(0, u_0, \nu^{(z)}),$$

where $z_0^t = \{z_0, z_1, \dots, z_t\}$ — is the history (dynamics) of the external environment, s_0^t — is the dynamics of the functioning of the robot, Z_0^∞ — is the fixed sequence of time-varying operators. This equation describes the intention of opposing side, which interacts with the robots during a duel situation .

The functioning of the robot in the external environment is described in this way:

$$s_t = S_t(0, s_0^{t-1}, z_0^{t-1}, \tau_t, \nu^{(s)}), \quad t = 1, 2, \dots, \quad s_0 = S_0(0, \nu^{(s)}),$$

where $\nu^{(s)}$ — is the parameter, which characterizes the specifics of the robot. In respect of this parameter, the same remarks are hold as for $\nu^{(z)}$.

The fact of the appearance of a certain cluster properties of the robot intellectuality will be concrete:

$$z_t = Z_t(1, z_0^{t-1}, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, u1_0^t, u2_0^t, u3_0^t, \nu^{(z)}), \quad t = 1, 2, \dots,$$

$$z_0 = Z_0(1, u1_0, u2_0, u3_0, \nu^{(z)}),$$

Accordingly, the equation of the functioning of the robot in the environment will be a system, in our case, of three equations of the same structure, which allows to use only one of them:

$$s1_t = S1_t(1, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, z_0^{t-1}, \tau1_t, \nu^{(s)}), \quad t = 1, 2, \dots,$$

$$s1_0 = S1_0(1, \nu^{(s)}),$$

The interaction of the robots in the cluster through the output channel is held out according to operator:

$$s2_t = E2_t(1, s1_0^t, s2_0^{t-1}, \tau2_0^{t-1}, u_0^{t-1}). \quad t = 1, 2, \dots$$

The equation

$$y1_t = F1_t(1, y1_0^{t-1}, u_0^t, s1_0^{t-1}, s2_0^{t-1}, s3_0^{t-1}, \nu^{(F)})$$

demonstrates how robot has "been prepared" to accept the external environment for the development of appropriate tactics of the action.