

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КООРДИНАЦИИ ДЕЙСТВИЙ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

В статье представлена формальная постановка задачи координации управляющих процедур при совместных действиях объектов в иерархических системах управления в условиях дефицита времени. Предложено решать задачу координации действий согласованием во времени моментов выполнения операций объектами, что сводит ее к задаче синхронизации, решаемой методами удовлетворения совместных ограничений.

Ключевые слова: иерархическая система, динамический объект, управляющая процедура, операция, синхронизация по времени, удовлетворение ограничений.

В.Г. ШЕРСТЮК, О.М. ЛЯШЕНКО, Д.Л. КИРИЙЧУК
Херсонський національний технічний університет

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ КООРДИНАЦІЇ ДІЙ В ІЄРАРХІЧНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

У статті представлено формальну постановку задачі координації керуючих процедур при спільних діях об'єктів в ієрархічних системах управління в умовах дефіциту часу. Запропоновано вирішувати задачу координації дій узгодженням у часі моментів виконання операцій об'єктами, що зводить її до задачі синхронізації, розв'язуваної методами дотримання спільних обмежень.

Ключові слова: ієрархічна система, динамічний об'єкт, керуюча процедура, операція, синхронізація за часом, дотримання обмежень.

V. SHERSTJUK, E. LIASHENKO, D. KYRYJCHUK
Kherson National Technical University

THE PROBLEM OF ACTION COORDINATION IN A HIERARCHICAL CONTROL SYSTEM

The paper presents a formal statement of the control procedure's coordination problem for object's joint actions in a hierarchical control systems under time pressure. It is proposed to solve the coordination problem as the time consistency problem for the object's operations. It can be reduces to the time synchronization, which is solved as the satisfaction of joint constraints.

Keywords: hierarchical system, dynamic object, control procedures, operations, time synchronization, constraint satisfaction.

Постановка проблемы

Ежегодно в Украине возникают различного рода чрезвычайные ситуации (ЧС), которые приводят к гибели людей и наносят значительный материальный ущерб. Возможность возникновения ЧС техногенного и природного характера ставит задачи их предотвращения и ликвидации последствий, для чего требуется четкая координация действий различных органов управления в иерархической системе службы гражданской защиты, интеграция сил, средств и материальных ресурсов для проведения поисковых, аварийно-спасательных и других видов работ [1]. Решение задач предотвращения и ликвидации последствий ЧС предполагает необходимость планирования мероприятий с распределением имеющихся в распоряжении ресурсов, сил и средств и их дальнейшей координацией для достижения требуемого результата. Чем выше сложность и масштаб ЧС, тем труднее обеспечивать скоординированную работу вовлекаемых в решение указанных задач сил и средств. Как правило, складывающийся в условиях ЧС дефицит времени на принятие решений усугубляет проблему координации, которая становится трудноразрешимой. Таким образом, развитие теоретического базиса координации объектов в иерархической системе управления в условиях дефицита времени является важной и актуальной научной проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций

Привлекаемые службой гражданской защиты силы и средства в процессе ЧС могут рассматриваться как динамические объекты. Вопросам координации динамических объектов в литературе посвящено недостаточное внимание. В [2] на основе теоретико-множественного подхода рассмотрены задачи координации в двухуровневых системах на примере технологических и организационно-технических процессов, и возможность распространения полученных результатов на многоуровневые системы. В [3] представлен подход к решению задач координации как локально-оптимизационных задач элементов многоуровневой иерархической системы и предложены итеративные и безитеративные алгоритмы координации для промышленных систем. В [4] на основе [2] предложены алгоритмы координации, основанные на нечетких множествах. В [5] рассматривались вопросы координации в условиях неопределенности для сложных производственных систем.

Предложенные в [1-5] модели и методы координации узкоспецифичны, и в условиях неопределенности информации для решения задачи координации требуют наличия адекватных

математических моделей подсистем (координация системы управления) либо постановки оптимизационной задачи (координация решения задач) [6, 7].

В то же время, в ЧС возникает слабоструктурированная сложная динамическая система с многоуровневой иерархией, объекты которой функционируют в соответствии с планами и целенаправленно управляются ЛПР. В условиях дефицита времени процесс принятия решений ЛПР зачастую нерационален, а вследствие влияния факторов неопределенности не может быть формализован; соответственно, формальные модели систем указанного класса синтезировать невозможно, а модель предметной области, как правило, неполна и недостоверна. Таким образом, использование существующих подходов для построения моделей и механизмов координации при управлении объектами в ЧС не представляется возможным.

Целью статьи является постановка задачи координации действий объектов в иерархической системе и обоснование научных подходов к решению данной задачи в условиях дефицита времени для осуществления эффективного координационного управления.

Изложение основного материала исследования

Рассмотрим вопросы координации в иерархической системе, образованной органами управления в процессе совместной целенаправленной деятельности, основываясь на [8].

Зададим множество значений времени T . Введем шкалу времени, задав отношение частичного порядка $<_T$ и начальное значение времени t_0 . Пусть имеется также множество Y некоторой природы, и на этом множестве задана алгебра σ_Y .

Введем линейное нормированное равномерное пространство C с нормой:

$$\|y\|_c = \min_{t \in [0, T)} (y(t)). \quad (1)$$

Введем на T метрику ξ_T . Зададим соответствующую норме $\|y\|_c$ метрику $\xi_C(y_1, y_2) = \|y_1 - y_2\|_c$.

Построим иерархическую систему (ИС) Θ с n уровнями иерархии управления, для чего введем на пространстве C множество объектов:

$$A = \{A_{ij}\}, \quad (2)$$

где i – уровень управления, $i \in [1..n]$, содержащий m_i объектов;
 j – индекс конкретного объекта уровня i , $j \in [1..m_i]$.

Исходя из того, что всякий объект $A_{ij} \in A$ представляет собой определенный орган управления либо исполнителя, построим иерархию объектов Y в виде тройки:

$$Y = \langle \perp, A, < \rangle, \quad (3)$$

где A – множество объектов иерархии;
 $<$ – отношение нестрогого порядка, заданное над A ;
 \perp – наименьший элемент для $<$.

Отношение порядка $<$ представляет отношение подчиненности объектов: так, $A_{ij} < A_{kl}$ означает, что объект A_{ij} подчинен объекту A_{kl} . Соответственно, в указанной паре A_{ij} является управляемым объектом (исполнителем), а A_{kl} – управляющим объектом (органом управления), формирующим для A_{ij} (и других подчиненных объектов) управляющие воздействия.

Предположим, что всякий объект A_{ij} иерархии Y выполняет на пространстве C некоторую *активность*, связанную с достижением некоторой цели $G_{ij} \in C$, заданной для A_{ij} объектом A_{kl} , таким что $A_{ij} < A_{kl}$ и имеющей некоторое количественное либо качественное описание в C .

Пусть для достижения цели G_{ij} объекту A_{ij} требуется выполнить в пространстве C множество итеративных или рекурсивных операций управления $\{u_{ij1}, \dots, u_{ijk}\}$. Всякая *итеративная операция* осуществляет приближение к цели G_{ij} одним из методов $M_q \in M_{G_{ij}}$, а всякая *рекурсивная операция* последовательно отбирает лучший в некотором смысле метод M^* из множества $M_{G_{ij}}$ подходящих методов для достижения G_{ij} .

Тогда пространство C является *пространством состояний* для объектов множества A , а активность всякого объекта $A_{ij} \in A$ может быть представлена выполнением определенной программы (управляющей процедуры, плана) P_{ij} , представляющей собой последовательность операций управления

$[u_{ij1}, \dots, u_{ijl}]$, которые должны приближать объект A_{ij} к цели G_{ij} .

Степень достижения цели G_{ij} будем характеризовать *вектором критериев* Q_{ij} , где *критерий* $Q_k \in Q_{ij}$ представляет собой шкалу для оценки *близости* к цели. Для каждого $Q_k \in Q_{ij}$ может быть построена процедура γ_k , позволяющая всякому решению $y \in Y$ поставить в соответствие значение Q_k :

$$\|y\|_c = \gamma_k(y). \quad (4)$$

Пусть на каждом шаге $i=1..k$ выполнения последовательности операций управления $[u_{ij1}, \dots, u_{ijl}]$ ИС Θ переходит из некоторого состояния $x_q \in C$ в другое состояние $x_{q+1} \in C$. Введем показатель расстояния δ до цели G_{ij} в некотором состоянии $x_q \in C$:

$$\delta = \|x_q - G_{ij}\|, \quad (5)$$

Пусть на каждом шаге процедуры поиска решения проблемы существует подмножество $M_{G_{ij}}$ подходящих методов. Тогда на шаге i при $z = |M_q|$ для каждого из методов $M_q \in M_{G_{ij}}$, можно оценить расстояние δ_q^{i+1} , что дает возможность выбрать «наилучший» для данного шага метод:

$$q^* = \arg \min(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_z), \quad (6)$$

т.е. тот метод M_{q^*} , который ближе всего приводит к цели G_{ij} .

Введем вектор R_{ij} , включающий ограничения $R_l \in R_{ij}$, и для каждого из них построим процедуру ζ_l , позволяющую некоторому состоянию $x_q \in C$ поставить в соответствие значение R_l :

$$\|y\|_c = \zeta_l(x_q). \quad (7)$$

В ИС Θ управляющая процедура для объекта A_{ij} задается (строится) его ЛПП в соответствии с установкой $Z_{ij} = \langle G_{ij}, Q_{ij}, R_{ij} \rangle$, включающей цель G_{ij} , критерии Q_{ij} и ограничения R_{ij} (например, на множестве доступных ресурсов либо по времени).

Обобщенная задача принятия решения по управлению объектом A_{ij} , связанная с достижением цели G_{ij} , может быть сведена к задаче синтеза процедуры:

$$\Omega_{ij\langle Z \rangle} : x_{ij} \rightarrow y_{ij}, \quad (8)$$

где $x_{ij} \in C$ – исходное множество данных и знаний;

$y_{ij} \in Y$ – решение;

Z_{ij} – установка ЛПП, $Z_{ij} = \langle G_{ij}, Q_{ij}, R_{ij} \rangle$;

$\Omega_{ij\langle Z \rangle}$ – процедура (*план*) решения $y_{ij} \in Y$, позволяющего достичь цели G_{ij} или максимально приблизиться к ней в условиях Z_{ij} .

Если цель G_{ij} каждого объекта $A_{ij} \in A$ может быть определена как определенная точка или область в пространстве состояний C , которой требуется достигнуть, то цель Γ ИС Θ может быть выражена как желаемое состояние $x_* \in C$, при котором каждый из $A_{ij} \in A$ достиг своей цели G_{ij} .

Обобщенная задача принятия решения по управлению ИС Θ , связанная с достижением цели Γ , сводится к задаче синтеза управляющей процедуры:

$$\Omega_\Theta : \Omega_{ij} \circ \Omega_{jk} \circ \dots \circ \Omega_{nm}, \quad (9)$$

где Ω_{ij} – процедура решения, синтезированная для всех $A_{ij} \in A$;

\circ – операция композиции.

Для синтеза процедуры Ω_Θ , в свою очередь, необходимо решить задачу координации управляющих процедур $K : (\{\Omega_{ij}, \dots, \Omega_{kl}\}) \rightarrow \{\Omega'_{ij}, \dots, \Omega'_{kl}\}$, при этом каждая процедура Ω_{ij} представляет собой взаимосвязанную последовательность операций вида $[u_{ij1}, \dots, u_{ijl}]$.

Всякая операция u_{ijl} может быть представлена как пара

$$u_{ijl} = (t_{ijl}, a_{ijl}), \quad (10)$$

где a_{ijl} – некоторое действие;

t_{ijl} – момент времени запуска действия a_{ijl} на выполнение.

Таким образом, операция рассматривается как некоторое действие (например, изменение значения определенного параметра объекта), производимое в заданный момент времени.

Тогда для координации объектов необходимо развернуть управляющие процедуры в последовательности действий:

$$\Omega_{ij} = [m_{ij1}, m_{ij2}, \dots, m_{ijk}] = [(t_{ij1}, a_{ij1}), (t_{ij2}, a_{ij2}), \dots, (t_{ijk}, a_{ijk})], \quad (11)$$

при этом согласование взаимосвязанных операций по моментам запуска на выполнение (синхронизация по времени) составляет суть задачи координации действий. Цель координации действий состоит в установке корректных точек синхронизации $t_{ij1}^*, \dots, t_{ijk}^*$ в согласуемые последовательности выполняемых операций.

Задачей I_{ij} назовем процесс построения соответствующего заданному вектору критериев Q_{ij} решения $\Omega_{ij(z)}$, представляющего план P_{ij} в исходном состоянии $x \in C$. Методом решения задачи I_{ij} будем называть последовательность действий $[(t_{ij1}, a_{ij1}), (t_{ij2}, a_{ij2}), \dots, (t_{ijk}, a_{ijk})]$, упорядоченных с помощью отношения частичного порядка \prec_a , которое может быть задано с помощью метрики ξ_T .

Пусть I^* – множество задач, которые объектам $A_{ij} \in A$ необходимо совместно решить в процессе достижения целевых состояний $G_{ij} \in \Gamma$. Построим на основе I^* сеть задач $N = (\{I_{11}, I_{12}, \dots, I_{nm}\}, \prec_I)$, где \prec_I – отношение частичного порядка на I^* .

Задачи возникают и завершаются динамически по мере появления или исчезновения внешних возмущений, поэтому решение задач во времени может быть последовательным или параллельным. Отношение порядка \prec_I на множестве задач I^* позволяет выстроить в Ω_Θ процедуры Ω_{ij} по приоритету и срочности их решения и может быть задано с помощью метрики ξ_T .

Для согласования управляющих процедур необходимо: а) задать отношение порядка \prec_I ; б) задать отношение порядка \prec_a ; в) синхронизировать компоненты Ω_{ij} процедуры Ω_Θ по \prec_I , а операции u_{ijl} процедур Ω_{ij} – по \prec_a . Тогда порядок \prec_a позволяет установить на шкале времени точки синхронизации t_Z , такие что $\exists t_{ij}, t_{kl} \mid t_{ij} = t_Z \wedge t_{kl} = t_Z$ для $\Omega_\Theta = [(t_{ijk}, a_{ijk}), \dots, (t_{jlm}, a_{jlm})]$.

Решение задачи координации $K : (\{\Omega_{ij}, \dots, \Omega_{kl}\}) \rightarrow \{\Omega'_{ij}, \dots, \Omega'_{kl}\}$, таким образом, заключается в расстановке необходимых точек синхронизации в процедуре Ω_Θ , для чего можно использовать методы динамического удовлетворения ограничений [9].

Задача удовлетворения ограничений (ЗУО) для $A_{ij} \in A$ может быть задана как $\mathcal{R}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, R_{ij})$.

Задача удовлетворения ограничений выполняется для $y_{ij} \in \mathcal{R}_{ij}$, если: а) ЗУО согласована; б) $\forall x_{ij} \in \mathcal{R}_{ij} \quad \zeta_l(x_{ij}) \notin R_{ij}$. Задача удовлетворения ограничений \mathcal{R}_{ij} согласована, если все имеющиеся ограничения $R_l \in R_{ij}$ не противоречат друг другу.

Ограничением $R_l \in R_{ij}$ назовем пару $R_l = (b, \pi_R)$, где $b \subseteq Y^m$ – произвольное m -арное отношение на Y , а $\pi_R : Y^n \rightarrow Y^m$ – функция, проецирующая вектор $y = (y_{i1}, \dots, y_{ijn}) \in T$ на некоторые его m компонент, так что $\pi_R(y) = (y_{i1}, \dots, y_{ijm})$ для некоторых $i_{j1}, \dots, i_{jm} \in \{1, \dots, n\}$.

Задача удовлетворения ограничений \mathcal{R}_{ij} на множестве переменных $V = \{y_{i1}, \dots, y_{ijm}\}$, для которых заданы области определения $dom(y_{ij})$, определяется конечным набором ограничений $R_{ij} = \cup_{m=1}^M R_{ijm}$, где $R_{ijm} = t(y_{im}, y_{jm})$, $y_{im} = V_{im}$, $y_{jm} = V_{jm}$, как $\mathcal{R}_{ij} = (V_{ij}, Y, R_{ij}, b)$.

Обозначим как $\arg R_{ij}$ множество индексов $\{i_1, \dots, i_m\}$, на которые функция π_R выполняет проецирование. Если переменные задачи обозначить $\{y_{ij_1}, \dots, y_{ij_m}\}$, ограничение $R_k = (p, \pi_R) \in R_{ij}$ можно записать как $p(y_{k1}, \dots, y_{km})$.

Пусть $\pi_R(y_{ij_1}, \dots, y_{ij_m}) = (y_{k1}, \dots, y_{km})$, а $p(y_{k1}, \dots, y_{km}) = (v_1, \dots, v_m)$. Тогда

$$p(y_{k1}, \dots, y_{km}) = (z_{k1}, \dots, z_{km}), \quad (12)$$

$$z_{ki} = \begin{cases} \bigcap_{j: i_j=i} v_{kj} & | i \in \arg R_{ij} \\ y_{kj} & | i \notin \arg R_{ij} \end{cases}. \quad (13)$$

Множество решений $\mathcal{W}(R_{ij})$ задачи удовлетворения ограничений на Y определяется как

$$\mathcal{W}(R_{ij}) = \{y_k \in Y^n \mid (\forall R_k \in R_{ij}) \pi_R(y_k) \in p\}. \quad (14)$$

Тогда решение задачи согласования по времени может быть получено как решение задачи удовлетворения совместных ограничений, таких что $R = \bigcup_{i=1}^n \bigcap_{j=1}^m (R_{ij}) \quad \forall A_{ij} \in A$.

Выводы

Координация действий динамических объектов в иерархических системах может быть сведена к координации по времени, предполагающей согласование во времени моментов выполнения объектами операций, что позволяет решать задачу координации методами синхронизации по времени. Представленная формальная постановка задачи координации действий адекватна условиям неопределенности исходной информации и дефицита времени. Решение задачи координации действий с помощью методов удовлетворения совместных ограничений может быть использовано в слабоструктурированных иерархических сложных динамических системах, в том числе в иерархической системе управления службы гражданской защиты населения.

Список использованной литературы

1. Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій. - К.: Видавництво КіМ, 2010. – 352 с.
2. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахага. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
3. Алиев Р.А. Методы и алгоритмы координации в промышленных системах управления / Р.А. Алиев, М.И. Либерзон. – М.: Радио и связь, 1987. – 208 с.
4. Алтуниин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / А.Е. Алтуниин. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
5. Ходаков В.Е. О развитии основ теории координации сложных систем / В.Е. Ходаков, Н.А. Соколова, Д.Л. Кирийчук // Проблемы информационных технологий. – 2014. – №2 (016). – С.25-30.
6. Плюта Н.В. Актуальні напрямки розвитку математичної теорії координації в складних ієрархічних системах / Н.В. Плюта, С.І. Гоменок // Вісник Запорізького національного університету: серія Фізико-математичні науки. – 2010. – Вип.1. – С.104-109.
7. Катренко А.В. Механізми координації у складних ієрархічних системах / А.В. Катренко, І. В. Савка // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: серія Інформаційні системи та мережі. – 2008. – С.156-166.
8. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / Под ред. А.А. Большакова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 160 с.
9. Телерман В.В. Удовлетворение ограничений в задачах математического программирования / В. В. Телерман, Д. М. Ушаков // Вычислительные технологии. – 1998. – Т.3. – №2. – С.45-54.