

---

---

# МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОСТРАНСТВ

---

---

УДК 519.8  
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-897-905

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ И ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛИ СИНТЕЗА КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ

А. Л. РОНЖИН<sup>1</sup>, О. О. БАСОВ<sup>2</sup>, Б. В. СОКОЛОВ<sup>1</sup>, Р. М. ЮСУПОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,  
199178, Санкт-Петербург, Россия*

*E-mail: sokol@iias.spb.su*

<sup>2</sup>*Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,  
302034, Орел, Россия*

Предложены концептуальная и формальная модели киберфизического интеллектуального пространства, основанные на новом подходе к распределению сенсорных, сетевых, вычислительных, информационно-управляющих и сервисных задач между мобильными роботом, встроенными устройствами, мобильными клиентскими устройствами, стационарным сервисным оборудованием, облачными вычислительными и информационными ресурсами. Формализована задача структурно-функционально-параметрического синтеза киберфизической системы и соответствующего киберфизического пространства; показана возможность решения задачи как методами теории управления сложными логико-динамическими объектами с перестраиваемой структурой, так и методами исследования операций.

**Ключевые слова:** *роботы, киберфизические системы, интеллектуальное пространство, динамическая и статическая альтернативно-графовая формализация*

**Введение.** Важную роль в успешной реализации современных информационных технологий в рамках той или иной предметной области играют и будут играть соответствующие единые информационные пространства. В общем случае эти пространства понимаются как совокупность данных и знаний, организованных специальным образом и построенных с использованием систем баз данных, файловых хранилищ и технологий их использования, а также информационно-телекоммуникационных систем и сетей, функционирующих по общим правилам и обеспечивающих информационное взаимодействие и доступ потребителей к территориально-распределенным информационным ресурсам организаций и предприятий, участвующих в совершенствовании системы информации. В связи с появлением и повсеместным внедрением на практике киберфизических и мобильных робототехнических систем, а также необходимостью организации индивидуального и группового управления ими особую актуальность приобретают вопросы формирования единых информационных пространств, обеспечивающих эффективное взаимодействие указанных систем.

Особенностью организации функционирования таких пространств, которые, следуя работам [1—5], будем называть кибернетическими интеллектуальными пространствами, является синтез системы распределения задач по многомодальному взаимодействию пользователей

с мобильными роботами и другими обеспечивающими устройствами киберфизических систем (КФС). Рассмотрению перечисленных вопросов посвящена настоящая статья.

**Анализ состояния исследований задач проактивного управления сложными объектами.** Проблеме прогнозирования поведения КФС посвящена работа [1]. Известно, что в системах управления объектами (в том числе КФС), функционирующих в режиме реального времени, точность и период прогнозирования становятся критичными. При этом чаще всего описываются время выполнения задач и привлекаемые для их решения ресурсы с использованием метрики минимального/максимального времени выполнения задачи [2].

В работе [3] обсуждается создание краудсенсорной платформы, использующей мобильные устройства для оценивания социальной динамики и предоставления персонализированных сервисов. Для современных мобильных клиентских устройств предложен новый облачный сервис SAaaS (Sensing and Actuation as a Service) [4], предоставляющий возможность пользователю контекстно воспринимать окружающую действительность. Более детально задачи, решаемые мобильными краудсенсорными системами, представлены в работе [5].

Обзор основных моделей и приложений, используемых в киберфизических системах, приведен в работе [6]. Проектируемая киберфизическая система, по мнению авторов работы [7], должна удовлетворять трем основным требованиям — стабильности, безопасности и систематичности, с обеспечением которых связаны проблемы надежности, согласованности, достоверности работы физических сенсоров, активаторов и вычислительных систем.

В работе [8] рассматривается возможность применения мобильных роботов для создания каскадной коммуникационной сети в труднодоступных местах или в районах проведения спасательных операций, где отсутствует сотовая связь. С применением методов и алгоритмов генетического программирования выполняется расчет координат местоположения отдельных роботов и их пиринговые связи с учетом препятствий на местности.

Анализ существующих подходов и технических решений, реализуемых в системах Wi-Fi, ZigBee, RFID, для пассивного определения пользователей в офисных помещениях с развернутой сетевой инфраструктурой для радиокommunikаций представлен в работе [9]. Особенностью этого исследования является анализ изменения мощности передаваемых сигналов между радиоточками вследствие присутствия пользователей на пути распространения сигналов, при этом не используются какие-либо клиентские устройства. Оценка чувствительности указанных систем к внешним факторам, а также результаты сравнения с другими исследовательскими системами приведены в работах [10, 11]. В аналогичном исследовании [12] экспериментально определена точность локализации людей, находящихся в помещении. Анализ существующих стандартов беспроводной связи, применяемых в киберфизических системах, представлен в работе [13].

Несмотря на наличие результатов решения частных задач по обеспечению функционирования киберфизических систем, решения по их синтезу для конкретных применений и, как следствие, решение задачи по обеспечению взаимодействия элементов систем в настоящее время отсутствуют. Важным этапом формирования этих решений является концептуальное моделирование.

**Технологические основы проактивного управления сложными объектами.** Для определенности предположим, что перед киберфизической системой стоит двойственная задача [14]:

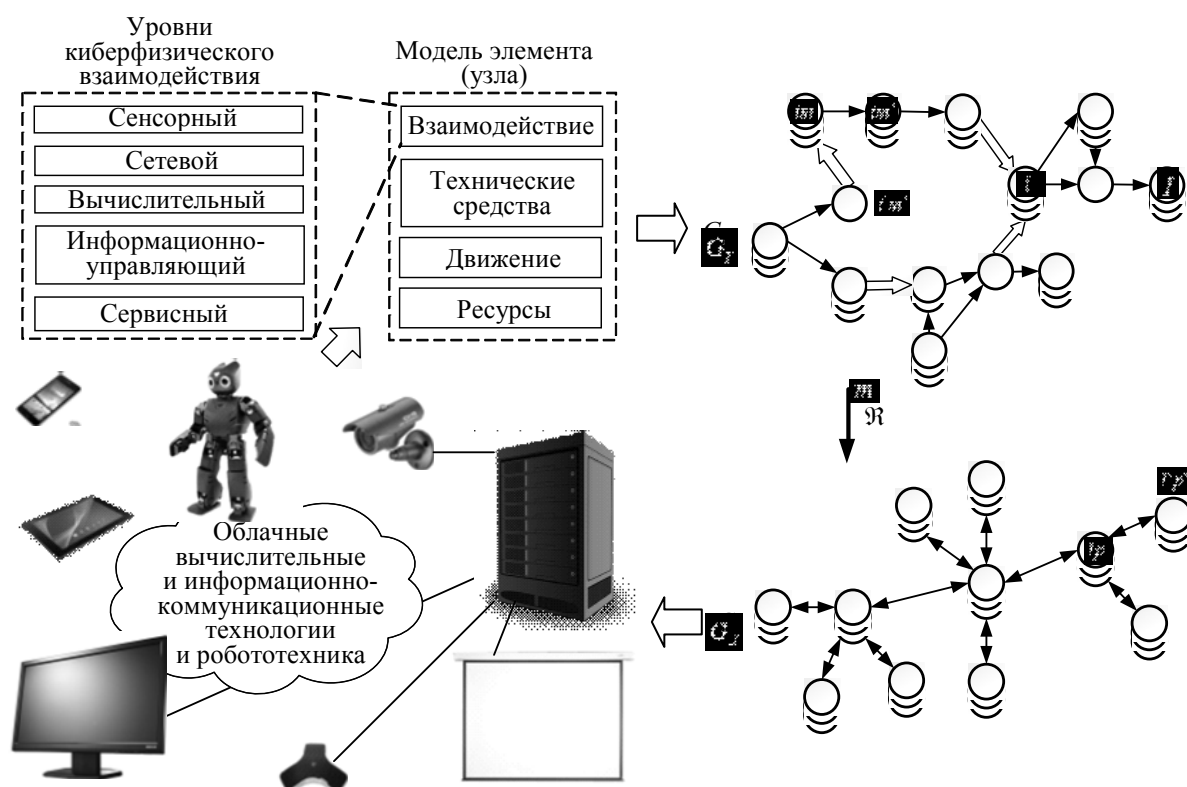
1) создание в заданных областях физического пространства таких условий („информационных полей“), при которых каждый элемент (узел) КФС, находящийся в указанных областях, может определять свое местоположение, обмениваться информацией с другими элементами, определять и оценивать состояние внешней среды (пользователя);

2) создание и поддержание в пространстве структуры КФС, позволяющей за заданное (либо минимальное) время осуществить непосредственное вещественное либо энергетическое

взаимодействие с пользователем, в ходе которого будет выполнена целевая задача, стоящая перед системой.

Следует подчеркнуть, что задача создания перечисленных условий может быть поставлена как для всего пространства (глобально), так и для некоторой его части (локально) на всем заданном интервале времени (непрерывно) либо в определенные дискретные моменты времени. При этом дополнительно может быть задан набор количественных параметров, характеризующих те или иные условия (информационные поля).

В качестве элементов КФС рассматриваются мобильные робототехнические, мобильные клиентские, встроенные, стационарные и облачные компоненты. Их основным подсистемам могут быть поставлены в соответствие четыре процесса (вида функционирования): взаимодействие, функционирование целевых и обеспечивающих технических средств, движение, расход и (или) пополнение ресурсов. Концептуальная модель киберфизической системы и соответствующего киберфизического пространства (КФП) представлена на рисунке.



Из анализа рисунка следует, что цель функционирования КФС (КФП) реализуется в ходе выполнения операций, связанных с информационным, вещественным и энергетическим обменом с пользователем, внешней средой и другими системами [14]. Таким образом, операция обмена является основным системообразующим фактором, объединяющим (интегрирующим) различные виды деятельности (движение, работу технических средств, расход ресурса и т.п.). Киберфизическое взаимодействие осуществляется на пяти основных уровнях: сенсорном, сетевом, вычислительном, информационно-управляющем, сервисном.

**Постановка и решение задачи.** Рассмотрим задачу распределения функций обработки информации и управления между элементами киберфизического интеллектуального пространства. Для формализации взаимосвязей между различными вариантами построения КФС воспользуемся традиционным альтернативно-графовым описанием [15], в рамках которого варианты построения элементов системы задаются как вершины соответствующего графа, а дуги — как взаимосвязи между ними (см. рисунок). Пусть:

$G_I$  — граф, описывающий варианты взаимосвязей альтернативных функций (задач, алгоритмов, программ) управления системы;  $G_I^* \in G_I$  — подграф, задающий один из возможных вариантов реализации функций системы; вершины графа  $G_I$  в зависимости от рассматриваемой задачи отождествляются с процедурами обработки информации, задачами управления и их этапами и т.п.; его дуги отражают уровни киберфизического взаимодействия;

$G_J$  — граф, задающий варианты состава и взаимосвязей возможных узлов КФС;  $G_J^* \in G_J$  — подграф, задающий один из возможных вариантов реализации узлов КФС с их взаимосвязями; вершины графа  $G_J$  отождествляются с вариантами построения узлов переработки информации, возможными местами их размещения, комплексами технических средств и т.д.; его дуги отражают взаимосвязи между узлами;

$\mathfrak{R}$  — операция отображения графа  $G_I$  на  $G_J$ , определяющая распределение реализуемых системой функций по ее узлам;

$n_\eta, \eta = \overline{1, \eta_0}$ , — характеристики качества создания и функционирования КФС.

Тогда статическая задача синтеза структуры КФС может быть представлена следующим образом [15]:

$$\begin{aligned} & \text{extr}_{\mathfrak{R}_0} \left\{ \left( G_I^* \in G_I \right) \mathfrak{R}^* \left( G_J^* \in G_J \right) \right\}, \\ & \mathfrak{R}_\eta \left\{ \left( G_I^* \in G_I \right) \mathfrak{R}^* \left( G_J^* \in G_J \right) \right\}, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}, \mathfrak{R}^* \in \mathfrak{R}. \end{aligned} \quad (1)$$

При распределении задач между узлами КФС возможны два типа отображений  $\mathfrak{R}$ :

1) каждая задача (этап) выполняется лишь в одном из нескольких возможных узлов системы;

2) задачи (этапы) выполняются в нескольких узлах системы.

Пусть задано множество задач  $i = \overline{1, I}$  (этапов  $m = \overline{1, m_i}$ ) взаимодействия (сенсорные, сетевые, вычислительные, информационно-управляющие, сервисные), их вариантов  $n = \overline{1, N}$  и способов решения  $k = \overline{1, K}$ , множество узлов системы  $j = \overline{1, J}$  и вариантов их построения  $p = \overline{1, P_j}$ .

Задача синтеза структуры КФС в данном случае может быть представлена как

$$F_0(x_{ik}, x_{imn}, x_{imj}, x_{jpt}) \rightarrow \text{opt}, \quad (2)$$

где  $F_0$  — оптимизируемые показатели качества, например среднее время пребывания задач в системе, при ограничении на затраты на функционирование

$$\sum_{i,m,n,j} B_{imnj} i \setminus m \setminus n \setminus j \cdot x_{imnj} x_{i \setminus m \setminus n \setminus j} \leq B \quad (3)$$

и загрузку узлов

$$\sum_{i,k,m,n} R_{ikmnt}^\lambda x_{ikmnt} \leq R_{jpt}^\lambda - P_{jpt}^\lambda, \quad \lambda = \overline{1, \lambda_0}; \quad (4)$$

здесь

$$B_{imnj} i \setminus m \setminus n \setminus j = \begin{cases} \alpha_{imnj}, & \text{если } imnj = i \setminus m \setminus n \setminus j; \\ \beta_{imni \setminus m \setminus n \setminus j} \gamma_{jlj \setminus t}, & \text{если } imnj \neq i \setminus m \setminus n \setminus j; \end{cases}$$

$\alpha_{imnj}$  — затраты на решение  $n$ -го варианта  $m$ -го этапа  $i$ -й задачи в  $j$ -м узле;  $\beta_{imni'm'n}$  — средний объем потока информации между  $m$ ,  $n$ -этапом  $i$ -й задачи и  $m'$ ,  $n'$ -этапом  $i'$ -й задачи в процессе функционирования системы;  $\gamma_{jj'}$  — затраты на передачу единицы объема информации из узла  $j$  в узел  $j'$ , которые оснащены техническими средствами  $l$ -го и  $l'$ -го типа соответственно;  $l$  — тип технических средств, используемых для решения  $n$ -го варианта  $m$ -го этапа  $i$ -й задачи  $k$ -м способом;  $B$  — допустимые затраты;  $R_{ikmnt}^\lambda$  — количество ресурсов  $\lambda$ -го типа в период  $t$ , необходимое для выполнения  $n$ -го варианта  $m$ -го этапа  $i$ -й задачи  $k$ -м способом;  $R_{jpt}^\lambda$  — количество ресурсов  $\lambda$ -го типа в период  $t$ , используемых для выполнения задач управления в  $p$ -м варианте  $j$ -го узла;  $P_{jpt}^\lambda$  — ресурсы, необходимые для выполнения оперативных задач.

В выражениях (2)—(4) соответствующие переменные принимают следующие значения:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я задача решается } k\text{-м способом;} \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$x_{imn} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи представлен } n\text{-м вариантом;} \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$x_{imj} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи выполняется в } j\text{-м узле;} \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$x_{jp} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й узел реализуется в } p\text{-м варианте;} \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$x_{imnj} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи в } n\text{-м варианте решается в } j\text{-м узле;} \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$x_{ikmij} = \begin{cases} 1, & \text{если } n\text{-й вариант } m\text{-го этапа } i\text{-й задачи,} \\ & \text{решаемой } k\text{-м способом, выполняется в } j\text{-м узле;} \\ 0 & \text{— иначе.} \end{cases}$$

В более общем случае возможен динамический вариант постановки рассматриваемых задач структурно-функционально-параметрического синтеза КФС и соответствующего киберфизического пространства, который базируется на разрабатываемой в настоящее время прикладной теории проактивного управления структурной динамикой сложных организационно-технических объектов [14, 16, 17]. Рассмотренная выше статическая задача и модель синтеза вида (1)—(4) может быть обобщена в рамках постановки задачи многокритериального синтеза программ управления функционированием и развитием КФС и КФП. В этом случае в основу описания структурной динамики КФС и КФП должен быть положен динамический альтернативный системный граф (ДАСТ) следующего вида:

$$G_\chi^t = \langle X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t \rangle, \tag{5}$$

где  $\chi$  — индекс, характеризующий различные типы структур КФС и КФП: топологическую, функциональную, техническую, программно-математического и информационного обеспечения, организационную;  $t \in T$  — множество моментов времени;  $X_\chi^t = \{x_{\langle \chi, l \rangle}^t, l \in L_\chi\}$  — множество

элементов, входящих в состав структуры  $G_\chi^t$  (множество вершин ДАСГ) в момент времени  $t$ ;  $\Gamma_\chi^t = \{\gamma_{\langle\chi,l,l'\rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$  — множество дуг ДАСГ типа  $G_\chi^t$ , отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени  $t$ ;  $Z_\chi^t = \{f_{\langle\chi,l,l'\rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$  — множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов ДАСГ.

При таком варианте формализации можно с единых управленческих позиций исследовать весь спектр задач анализа и синтеза КФС и КФП на различных этапах их жизненного цикла (ЖЦ). Формальная модель вида (2)—(4) в этом случае будет использоваться в каждый текущий момент времени (этап ЖЦ).

С учетом вышеизложенного задача структурно-функционально-параметрического синтеза КФС и соответствующего КФП может быть сформулирована следующим образом: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы и алгоритмы, позволяющие находить наиболее предпочтительные программы управления функционированием и развитием КФС и КФП  $\langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle$ , при которых выполняются следующие условия [14]:

$$J_\theta \left( X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle\chi,\chi'\rangle}^t, \Pi_{\langle\tilde{\delta},\tilde{\delta}\rangle}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{\langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle \in \Delta_g}{\text{extr}}; \quad (6)$$

$$\Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle \mid R_\beta \left( X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle\chi,\chi'\rangle}^t, \Pi_{\langle\tilde{\delta},\tilde{\delta}\rangle}^t \right) \leq \tilde{R}_\beta; \right. \\ \left. U^t = \Pi_{\langle\delta_1,\delta_2\rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle\delta_2,\delta_3\rangle}^{t_2} \circ \Pi_{\langle\tilde{\delta},\tilde{\delta}\rangle}^{t_2}; \beta \in B \right\}, \quad (7)$$

где  $J_\theta$  — показатели, характеризующие качество и эффективность использования основных элементов и подсистем КФС и КФП;  $U^t$  — управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуры КФС и КФП, так и процессы их использования на различных этапах ЖЦ;  $\theta \in \Theta$  — множество номеров показателей;  $\Delta_g$  — множество динамических альтернатив (множество структур и параметров КФС и КФП, множество программ их использования);  $\tilde{R}_\beta$  — заданные величины;  $F_{\langle\chi,\chi'\rangle}^t$  — отражение структуры  $G_\chi^t$  на структуру  $G_{\chi'}^t$ ;  $\Pi_{\langle\tilde{\delta},\tilde{\delta}\rangle}^t$  — отражение многоструктурных состояний  $\tilde{\delta}$  и  $\tilde{\delta}$  друг на друга;  $B$  — множество номеров ограничений; знак „ $\circ$ “ — операция композиции отображения.

Предложенная динамическая интерпретация задач структурно-функционально-параметрического синтеза КФС и соответствующего КФП позволяет для их решения использовать во всей полноте как существующий математический аппарат современной теории управления сложными логико-динамическими объектами с перестраиваемой структурой, так и методы и алгоритмы исследования операций [14, 16—18].

**Заключение.** Решение задачи синтеза оптимальных структур КФС и КФП с учетом их динамики и динамики поведения пользователей значительно усложняется в связи с тем, что оптимальные алгоритмы функционирования узлов (и соответствующих характеристик качества) и дисциплина их обслуживания могут быть определены лишь после того, как становится известен перечень задач, решаемых конкретным узлом, при этом распределение задач по узлам, в свою очередь, зависит от характеристик их обслуживания в узлах.

Направлением перспективных исследований является формирование перечня задач при многомодальном обслуживании пользователей киберфизического интеллектуального пространства [19, 20]. При этом для реализации соответствующей киберфизической системы предполагается использовать минимальный состав технических средств: 5 видеокamer, 3 массива микрофонов, 3 мобильных клиентских устройства с различными операционными системами, 2 мобильных робота, сетевое оборудование, активационные исполнительные устройст-

ва, сервер для поддержки ресурсоемких вычислений при обработке аудиовизуальных сигналов и анализе внешних информационных ресурсов, необходимых для получения дополнительных данных об обслуживаемых пользователях.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант №16-19-00044).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li B. S. X., Wan B., Wang C., Zhou X., Chen X.* Definitions of predictability for cyber physical systems // *J. of Systems Architecture*. 2016. DOI: 10.1016/j.sysarc.2016.01.007.
2. *Thiele L., Wilhelm R.* Design for timing predictability // *Real-Time Systems*. 2004. N 28. P. 157—177. DOI:10.1007/11561163\_14.
3. *Merlino G., Arkoulis S., Distefano S., Papagianni C., Puliafito A., Papavassiliou S.* Mobile crowdsensing as a service: A platform for applications on top of sensing Clouds // *Future Generation Computer Systems*. 2016. Vol. 56. P. 623—639. DOI:10.1016/j.future.2015.09.017.
4. *Distefano S., Merlino G., Puliafito A.* Sensing and actuation as a service: A new development for clouds // *Proc. of the 11th Intern. Symp. on Network Computing and Applications, NCA'12; IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2012*. P. 272—275.
5. *Ganti R., Ye F., Lei H.* Mobile crowdsensing: current state and future challenges // *IEEE Communications Magazine*. 2011. N 49(11). P. 32—39. DOI:10.1007/978-3-319-26401-1\_25.
6. *Hua F., Lua Y., Vasilakos A. V. b, Haoc Q., Maa R., Patil Yo., Zhanga T., Lua J., Li X., Xiong N. N.* Robust cyber-physical systems: Concept, models, and implementation // *Future Generation Computer Systems*. 2016. Vol. 56. P. 449—475. DOI:10.1016/j.future.2015.06.006.
7. *Hahn A., Ashok A., Sridhar S., Govindarasu M.* Cyber-physical security testbeds: Architecture, application, and evaluation for smart grid // *IEEE Transact. of Smart Grid*. 2013. N 4(2). P. 847—855. DOI:10.1109/TSG.2012.2226919.
8. *Mina B.-C., Kima Yo., Leea S., Jungb J.-W., Matsona E. T.* Finding the optimal location and allocation of relay robots for building a rapid end-to-end wireless communication // *Ad Hoc Networks*. 2016. Vol. 39. P. 23—44. DOI:10.1016/j.adhoc.2015.12.001.
9. *Gonga L., Yanga W., Zhoub Z., Mana D., Caic H., Zhoud X., Yange Z.* An adaptive wireless passive human detection via fine-grained physical layer information // *Ad Hoc Networks*. 2016. Vol. 38. P. 38—50. DOI:10.1016/j.adhoc.2015.09.005.
10. *Kosba A. E., Saeed A., Youssef M.* RASID: a robust WLAN device-free passive motion detection system // *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*. 2012. P. 180—189.
11. *Xiao J., Wu K., Yi Y., Wang L., Ni L.* FIMD: fine-grained device-free motion detection // *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*. 2012. P. 229—235.
12. *Joshi K., Bharadia D., Kotaru M., Katti S.* WiDeo: Fine-grained device-free motion tracing using RF backscatter // *Proc. of the 12th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '15)*. 2012. P. 189—204.
13. *Kabalci Y.* A survey on smart metering and smart grid communication // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2016. Vol. 57. P. 302—318. DOI:10.1016/j.rser.2015.12.114.
14. *Соколов Б. В., Юсупов П. М.* Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами // *Тр. СПИИРАН*. 2010. Вып. 15. С. 7—52.
15. *Цвиркун А. Д., Акиндиев В. К.* Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993. 160 с.
16. *Соколов Б. В., Юсупов П. М.* Концептуальная и теоретико-множественная модель управления структурной динамикой космических средств // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2003. № 5. С. 17.
17. *Ivanov D., Kaeschel J., Sokolov B.* Integrated supply chain planning based on a combined application of operations research and optimal control // *Central European Journal of Operations Research*. 2011. Vol. 19. N 3. P. 299—317.

18. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988. 320 с.
19. Ронжин Ал. Л., Будков В. Ю., Ронжин Ан. Л. Формирование профиля пользователя на основе аудиовизуального анализа ситуации в интеллектуальном зале совещаний // Тр. СПИИРАН. 2012. Вып. 23. С. 482—494.
20. Юсупов Р. М., Крючков Б. И., Карпов А. А., Ронжин А. Л., Усов В. М. Возможности применения многомодальных интерфейсов на пилотируемом космическом комплексе для поддержания коммуникации космонавтов с мобильным роботом-помощником экипажа // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 3 (8). С. 23—34.

**Сведения об авторах**

**Андрей Леонидович Ронжин**

— д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория автономных робототехнических систем; зам. директора по научной работе; E-mail: ronzhin@iias.spb.su

**Олег Олегович Басов**

— канд. техн. наук; Академия ФСО РФ; E-mail: oobasov@mail.ru

**Борис Владимирович Соколов**

— д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; зам. директора по научной работе; E-mail: sokol@iias.spb.su

**Рафаэль Мидхатович Юсупов**

— д-р техн. наук, чл.-кор. РАН; СПИИРАН, лаборатория прикладной информатики и проблем информатизации общества; директор; E-mail: spiiiran@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
01.06.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Ронжин А. Л., Басов О. О., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 11. С. 897—905.

**CONCEPTUAL AND FORMAL MODELS OF SYNTHESIS  
OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS AND CYBER-PHYSICAL INTELLECTUAL SPACES**

**A. L. Ronzhin<sup>1</sup>, O. O. Basov<sup>2</sup>, B. V. Sokolov<sup>1</sup>, R. M. Yusupov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: sokol@iias.spb.su

<sup>2</sup>Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation,  
302034, Orel, Russia

Conceptual and formal models of cyber-physical intellectual space are proposed. The models are based on a new approach to the distribution of the sensor, network, computation, information management, and service tasks between mobile robots, embedded devices, mobile client devices, fixed service equipment, cloud computing, and information resources. The problem of structural-functional and parametric synthesis of cyber-physical systems and the corresponding cyber-physical space is formalized. The possibility of solving the problem with the methods of the theory of logical control of complex dynamic objects with reconfigurable structure, as well as with the methods of operations research is demonstrated.

**Keywords:** robots, cyber-physical systems, intellectual space, dynamic and static alternative graph formalization

**Data on authors**

**Andrey L. Ronzhin**

— Dr. Sci., Professor; SPIIRAS, Laboratory of Autonomous Robotic Systems; Deputy Director for Research; E-mail: ronzhin@iias.spb.su

**Oleg O. Basov**

— PhD; Academy of Federal Security Guard Service of RF; E-mail: oobasov@mail.ru

**Boris V. Sokolov**

— Dr. Sci., Professor; SPIIRAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Deputy Director for Research; E-mail: sokol@iias.spb.su

**Rafael M. Yusupov**

— Dr. Sci., Corresponding Member of RAS; SPIIRAS, Laboratory of Applied Informatics and Society Informatization Problems; Director; E-mail: spiiiran@iias.spb.su



**For citation:** *Ronzhin A. L., Basov O. O., Sokolov B. V., Yusupov R. M.* Conceptual and formal models of synthesis of cyber-physical systems and cyber-physical intellectual spaces // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 11. P. 897—905 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-897-905