

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ГАЗОАНАЛИЗА АТМОСФЕРЫ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА

О. А. Романовский^{а, б}, доктор физ.-мат. наук, профессор

А. Я. Суханов^{а, в}, канд. техн. наук

О. В. Харченко^а, канд. физ.-мат. наук

С. В. Яковлев^{а, б}, канд. физ.-мат. наук, доцент

С. А. Садовников^а, аспирант

^аИнститут оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, РФ

^бНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, РФ

^вТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, РФ

Введение: лидары дифференциального поглощения и устройства на основе метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии являются устоявшимися технологиями экологического мониторинга и успешно используются для газоанализа атмосферы. В лидарных газоаналитических устройствах дифференциального поглощения в качестве источников излучения традиционно применяются высокоомощные газовые лазеры с дискретным набором длин волн с шириной линий излучения до $0,01 \text{ см}^{-1}$ и генераторы гармоник, расширяющие рабочие спектральные диапазоны систем. При этом одновременный спектрально-временной анализ многочастотного отклика атмосферы в принципе не возможен из-за необходимости перестройки частоты излучения, ввиду чего контролю концентраций в режиме реального времени поддается жестко ограниченное количество компонент атмосферы. В свою очередь, в активных системах дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии применяются тепловые источники излучения с шириной спектра излучения сотни нанометров, что обеспечивает возможность проведения многокомпонентного спектрально-разрешенного газоанализа атмосферы интегрально по трассе зондирования с использованием зеркальных отражателей. **Цель исследования:** апробация разработанной методики лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы, совмещающей преимущества методов дифференциального поглощения и дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии. **Результаты:** проведены численные эксперименты для оценки возможностей дистанционного газоанализа атмосферы с помощью лазерной системы с параметрической генерацией света на основе нелинейного кристалла KTiOAsO_4 в диапазоне спектра 3–4 мкм. С помощью разработанной методики лидарного зондирования компонент атмосферы проведен поиск и отбор информативных для газоанализа длин волн. Проведено моделирование лидарных сигналов, анализ которых показал возможность дистанционного контроля HCN и C_2H_6 на горизонтальных трассах длиной 1 км.

Ключевые слова — атмосфера, лидарное зондирование, лидар дифференциального поглощения, дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия, газовые составляющие атмосферы, нелинейные кристаллы.

Введение

Развитие лазерных бесконтактных методов диагностики среды (атмосферы, океана) требует разработки лазерных источников излучения, способных генерировать излучение в определенном диапазоне длин волн с малым шагом перестройки по частоте. Современные лидары дифференциального поглощения, как правило, позволяют контролировать лишь несколько газовых компонент атмосферы. Используемые в их составе мощные источники излучения, такие как CO_2 , DF (HF) лазеры, имеют ограниченное число спектральных совпадений линий излучения и линий поглощения атмосферных газов [1].

Современные источники лазерного излучения для решения задач лидарного зондирования базируются на использовании широкодиапазонных ИК молекулярных лазеров, а также параметрических преобразователей частоты на основе нелинейных кристаллов, позволяющих путем ге-

нерации обертонов, гармоник, суммарных и разностных частот излучения лазеров перекрыть спектральный диапазон от 2 до 18 мкм. Для перекрытия ближней и средней ИК-областей используется излучение параметрических генераторов света (ПГС) на нелинейных кристаллах [1, 2].

Наземные [3] и самолетные [4] измерения по методу дифференциального поглощения (МДП) использовались для получения вертикальных профилей озона в тропосфере и стратосфере [5, 6], тропосферного водяного пара [7], для картирования сильного загрязнения приземного слоя этаном и NO_2 , определения горизонтального распределения NO_2 в выбросах дизельного двигателя [8]. Также МДП может быть использован в лидарном зондировании метеорологических параметров атмосферы [9–12].

Однако в стандартном МДП должно выполняться требование монохроматичности лазерного излучения. Широкий спектральный профиль лазерного излучения уменьшает эффективный

коэффициент поглощения, что снижает чувствительность измерений. Наличие аэрозоля в больших количествах также ведет к существенным ошибкам МДП. Наконец, проблема стандартных измерений МДП, использующих только две длины волны, означает, что наличие мешающего поглощения сторонними газами не учитывается, что приводит к ошибкам, вызванным неточностью априорного знания коэффициентов поглощения.

Этих недостатков можно избежать благодаря методу дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) [13–15]. ДОАС позволяет проводить спектрально разрешенные измерения в широкой полосе, что обеспечивает идентификацию нескольких газов даже в случае перекрывания полос поглощения. Еще одним преимуществом метода является независимость от аэрозольного и молекулярного рассеяния благодаря технике фильтрации высоких частот, используемой для получения спектров. Однако возможности метода ДОАС для получения вертикальных профилей ограничены, в настоящее время проведены только усредненные по трассе измерения.

Перспективным путем решения проблемы является методика, сочетающая преимущества обоих методов: пространственного разрешения МДП и идентификацию газов ДОАС. Новый метод использует широкополосное излучение и спектрометр с ПЗС-детектором, что обеспечивает измерение сигналов обратно рассеянного излучения с разрешением как по высоте, так и по длине волны одновременно.

Целью работы является апробация методики лидарного зондирования малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, совмещающей МДП и ДОАС в численном эксперименте для оценки возможностей дистанционного газоанализа состава атмосферы с помощью лазерной системы на основе ПГС в диапазоне спектра 3–4 мкм.

Методика лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью МДП и ДОАС

Основной принцип действия лидара дифференциального поглощения заключается в том, что часть обратно рассеянного лазерного излучения преобразуется молекулами и аэрозольными частицами при прохождении через атмосферу. Лазерный пучок ослабляется (в соответствии с законом Ламберта — Бера) молекулярным поглощением и молекулярным и аэрозольным рассеянием. Таким образом, сигнал, зарегистрированный детектором, является функцией этого ослабления, доли обратно рассеянных фотонов,

длины пути и мощности лазерного излучения. Сигнал P_R из рассеивающего слоя толщиной Δz можно представить в виде

$$P_R(z, \lambda) = P_0(\lambda) \frac{A_D}{z^2} \eta(\lambda) O(z) \Delta z \beta(z, \lambda) e^{-2\tau(z, \lambda)}, \quad (1)$$

где $P_0(\lambda)$ — мощность лазерного излучения; A_D — площадь приемного телескопа; $\eta(\lambda)$ — эффективность приемо-передающей системы; $O(z)$ — область перекрытия между лазерным лучом и полем зрения приемника; Δz — пространственное разрешение по трассе зондирования; $\beta(z, \lambda)$ — объемный коэффициент обратно рассеянного излучения; $\tau(z, \lambda)$ — объемный коэффициент ослабления.

Метод дифференциального поглощения заключается в определении концентрации атмосферного газа по разнице лидарных сигналов на длинах волн λ_{on} и λ_{off} с разным молекулярным поглощением. Концентрация исследуемого газа определяется следующим образом:

$$n(z) = \frac{1}{2\Delta\sigma_{abs}\Delta z} \ln \left(\frac{P_R(z, \lambda_{on})P_R(z + \Delta z, \lambda_{off})}{P_R(z, \lambda_{off})P_R(z + \Delta z, \lambda_{on})} \right), \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_{abs}$ — сечение поглощения.

Это выражение справедливо только в случае, если мешающее поглощение другими газами мало и рассеивающие свойства аэрозольных частиц не изменяются в диапазонах $\Delta\lambda$ и Δz .

Недостатки МДП обусловлены неточностью априорного знания коэффициентов поглощения на двух и более длинах волн. Метод ДОАС позволяет избежать их посредством проведения мониторинга пропускания атмосферы с использованием широкополосных источников излучения с полушириной на полувысоте от единиц до сотен нанометров. Молекулярное поглощение (шириной порядка нескольких нанометров) в ДОАС отделяется от рассеяния по закону Ламберта — Бера, которое слабо зависит от длины волны и может быть удалено с помощью высокочастотного фильтра. Кроме того, путем подбора (например, методом наименьших квадратов) рассчитанного молекулярного поглощения к наблюдаемому возможно одновременное измерение нескольких поглощающих газов. Измерение поглощения той или иной газовой составляющей на большом количестве длин волн позволяет решить проблему применения априорной информации, вносящей искажения в результаты экспериментальных исследований содержания газов в атмосфере.

В случае проведения МДП–ДОАС-измерений в первую очередь необходимо найти отношение наблюдаемого спектра (P_{obs}) к референтному (P_{ref}), которое определяется из спектра лазерного источника (P_0), полученного одним и тем же детектором. В качестве P_{ref} возможно использова-

ние спектра пропускания атмосферы при известном содержании поглощающих газов. Рассчитав отношение ($P_{\text{obs}}/P_{\text{ref}}$) и проведя минимизацию выражения (3) путем подгонки переменных коэффициентов, можно вычислить значения концентраций газов, входящих в диапазон зондирования:

$$\left(\frac{P_{\text{obs}}(v_j, z_i)}{P_{\text{ref}}(v_j, z_i)}\right) = \exp\left(-2\Delta z \sum_{k=0}^j \alpha_{j,k} + \ln(\beta_{j,k})\right) \times \int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} f(v, v_j) \times \exp\left(-\Delta z \sum_{k=0}^{i-1} \sum_g N_{\text{gases}} (\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g + \alpha_{\text{ma}}(v, z_{k+1})_g)\right) dv; \quad (3)$$

$$\alpha_{j,k} = \alpha(v_j, z_k);$$

$$\beta_{j,k} = \beta(v_j, z_i);$$

$$\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g = n_g(z_k) K_g(v, z_k),$$

где Δv — разрешающая способность приемника; $f(v, v_j)$ — аппаратная функция приемника на частоте v_j ; N_{gases} — число учитываемых газов; $\alpha(v_j, z_k)$ — коэффициент ослабления анализируемой среды; $\beta(v_j, z_i)$ — коэффициент обратного рассеяния, включающий молекулярное и аэрозольное рассеяние в направлении назад; $\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g$ — профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного поглощения; $n_g(z_k)$ — концентрация газовой компоненты; $K_g(v, z_k)$ — коэффициент поглощения соответствующего газа.

Отношение ($P_{\text{obs}}/P_{\text{ref}}$) не зависит от спектра излучения лазерного источника или спектральной зависимости принимающей оптики, спектрографа, приемника, что является важным преимуществом МДП–ДОАС-методики. Измеряемая таким образом величина составляет разницу содержания поглощающих газов в референтном случае и в случае реальной атмосферы.

Незначительно изменяющееся рассеяние $\beta(v)$ чаще всего удаляется с помощью фильтра высоких частот. Для этого используются различные методы, но самый простой — применение полинома второго или третьего порядка, который подгоняется к разнице в оптической толщине, а затем удаляется, оставляя так называемый дифференциальный спектр или дифференциальную оптическую толщину. Необходимо отметить, что именно этот процесс фильтрации позволяет МДП–ДОАС нивелировать проблемы ослабления неизвестным или некорректно учитываемым рассеянием (аэрозольным или рэлеевским), присутствующим МДП.

Как правило, дифференциальный спектр восстанавливается по нескольким сотням точек, при этом число параметров подгонки составляет не

более шести. Таким образом, уравнение (3) становится переопределенным и успешно решается методом наименьших квадратов. В свою очередь, коэффициенты подгонки варьируются для получения наилучшего совпадения спектра подгонки и наблюдаемого спектра. В общем случае разрешение метода соответствует молекулярному поглощению, при котором выполняется закон Ламберта. В этом случае если известны коэффициенты поглощения, можно определить концентрацию каждого газа. Важным преимуществом МДП–ДОАС по сравнению с МДП является возможность одновременного определения концентраций нескольких газов.

Для обеспечения практического функционирования систем указанного типа предлагается методика планирования и проведения лидарных МДП–ДОАС-измерений (рис. 1), которую можно представить в виде трех частей: 1) поисковой; 2) расчетной; 3) блока обработки экспериментальных результатов лидарного зондирования.

Известно, что выражение для минимально обнаружимых концентраций в экспериментах с использованием дифференциального поглощения при лидарном зондировании имеет следующий вид [16]:

$$N(z) = \frac{\ln P(v_{\text{on}}, z) - \ln P(v_{\text{off}}, z)}{2\Delta K(v)z}, \quad (4)$$

где $P(v_{\text{on}}, z)$ и $P(v_{\text{off}}, z)$ — сигналы, регистрируемые фотоприемником с трассы зондирования длиной z на частотах v_{on} и v_{off} , расположенные в узком спектральном диапазоне линии поглощения исследуемого газа и в соседнем окне прозрачности; $\Delta K(v)$ — дифференциальный коэффициент поглощения:

$$\Delta K(v) = K(v_{\text{on}}) - K(v_{\text{off}}), \quad (5)$$

где $K(v_{\text{on}})$ и $K(v_{\text{off}})$ — коэффициенты поглощения в линии и вне линии поглощения.

Для большинства реальных устройств регистрации и цифровой обработки, применяемых в экспериментах, значение разности логарифмов в выражении (4) должно удовлетворять условию [16]

$$\ln P(v_{\text{on}}, z) - \ln P(v_{\text{off}}, z) \approx 0,02. \quad (6)$$

С учетом выражения (6) значения минимальных интенсивностей линий поглощения можно определить путем моделирования и сравнения спектров пропускания атмосферы анализируемой газовой компоненты и мешающих составляющих с концентрациями, соответствующими предельно допустимым концентрациям для трассы длиной 10 км [12].



■ **Рис. 1.** Схема методики планирования и проведения лидарных МДП-ДОАС-измерений
 ■ **Fig. 1.** Scheme of planning technique and DIAL-DOAS lidar measurements

Необходимо отметить, что в случае реализации МДП-ДОАС-систем оптимальные интенсивности линий и полос поглощения выбираются исходя из характеристик приемного устройства лидара. Минимальная интенсивность линий поглощения должна соответствовать временному разрешению фотоприемного прибора, величине его суммарных шумов, а также концентрациям исследуемых газовых компонент. Данные критерии определяются спецификой метода, сущность которого заключается в извлечении информации о концентрациях газовых компонент атмосферы посредством нахождения отношения мощностей двух сигналов — опорного (или референтного) и сигнального.

В качестве входных данных выступают параметры трассы зондирования, тип трассы (горизонтальная, вертикальная или наклонная), характеристики источника излучения (ширина линии излучения, мощность) и приемной аппаратуры (спектральное и пространственное разрешение детектируемых сигналов).

Поисковый блок основывается на использовании базы спектроскопических данных [17], метеомоделей [18], априорной информации

о коэффициентах аэрозольного ослабления, обратного рассеяния [19] и молекулярного рассеяния [20].

Расчетная часть алгоритма необходима для решения следующих задач:

- расчета коэффициентов поглощения и спектров пропускания атмосферы методом «line-by-line»;
- моделирования лазерного зондирования с применением статистических моделей распределения атмосферных характеристик;
- моделирования систематических и случайных погрешностей восстановления газовых профилей;
- выработки требований к параметрам лидара.

Результаты моделирования и поиска информативных пар длин волн для МДП и диапазонов длин волн для МДП-ДОАС-методик формируются в табличной и графической формах.

Методика применима для реализации систем как с традиционным функционалом МДП- и ДОАС-подходов по отдельности, так и для перспективного объединенного МДП-ДОАС-подхода с применением одной и той же аппаратуры.

Лазерная система с ПГС для дистанционного зондирования атмосферы

В работе рассматривается лазерная система, входящая в состав разработанного лидара дифференциального поглощения и обеспечивающая перестраиваемую генерацию наносекундных импульсов излучения в спектральном диапазоне 3–4 мкм.

Лазерная система включает:

- Nd:YAG импульсный лазер LQ529B;
- преобразователь излучения с перестройкой длины волны 3–4 мкм;
- шаговые двигатели для управления длиной волны;
- контроллер для управления шаговыми двигателями;
- спектрометр S100;
- общее основание для лазера и преобразователя с системой заводки излучения накачки в преобразователь.

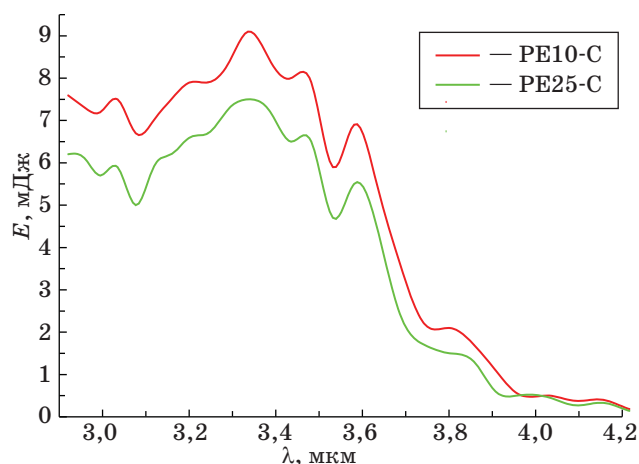
Основные характеристики лазера накачки и преобразователя излучения представлены в табл. 1 и 2.

■ Таблица 1. Спецификация лазера накачки LQ529B
 ■ Table 1. Specification of LQ529B pumping laser

Параметр	Значение параметра
Частота следования импульсов	10 Гц
Выходная энергия на 1064 нм	350 мДж
Длительность импульса на 1064 нм, FWHM	10–13 нс
Диаметр луча на 1064 нм	≤6 мм
Расходимость на 1064 нм	~1,5 мрад
Стабильность энергии импульсов на 1064 нм	±2,5 %

■ Таблица 2. Спецификация преобразователя
 ■ Table 2. Specification of radiation converter

Параметр	Значение параметра
Диапазон перестройки длины волны	3–4 мкм
Ширина линии излучения	1–5 см ⁻¹
Энергия в импульсе, в максимуме перестроечной кривой	7–9 мДж
Частота следования импульсов	10 Гц
Расходимость излучения	≤2 мрад
Управление перестройкой длины волны	От трех шаговых двигателей



■ Рис. 2. Перестроечные кривые ПГС на кристалле КТА в спектральном диапазоне 3–4 мкм
 ■ Fig. 2. Tuning curve of the KTA crystal based optical parametric oscillator (OPO) in spectral range 3–4 μm

На рис. 2 представлена перестроечная кривая параметрического генератора света на кристалле КТiOAsO₄ (КТА), полученная с использованием различных измерителей мощности (Ophir PE10-C и PE25-C). Видно, что в диапазоне длин волн 3–4 мкм ПГС на кристалле КТА имеет довольно высокую энергию в импульсе на выходе системы, несмотря на генерацию излучения без продувки резонатора лазера азотом (в максимуме перестроечной кривой ее значения достигают 7–9 мДж).

Разработанная МДП–ДОАС-методика измерений МГС была апробирована для оценки уровня лидарных сигналов с использованием характеристик описанной выше лазерной системы с ПГС на основе нелинейного кристалла КТА. На основе характеристик лазера проведена оценка возможностей зондирования некоторых газовых примесей атмосферы на приземных трассах в исследуемой области спектра.

Результаты моделирования лидарных измерений МГС атмосферы в диапазоне 3–4 мкм

Проведено численное моделирование зондирования некоторых газовых составляющих в атмосфере на приземных горизонтальных тропосферных трассах. При моделировании использовалась стандартная модель атмосферы лета средних широт [19]. Учитывалось мешающее поглощение всех основных атмосферных газовых компонент. Входные данные для проведения численного моделирования представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены информативные длины волн, пригодные для зондирования исследуемых в работе малых газовых составляющих атмосферы.

- **Таблица 3.** Входные данные для проведения численного моделирования лазерного зондирования
- **Table 3.** Input data for numerical simulation of laser sounding

Параметр лидарной системы	Значение параметра
Площадь приемника $A_{\text{приемн}} (D = 0,3 \text{ м})$	$7 \times 10^{-8} \text{ км}^2$
Ширина аппаратной функции	0,1; 1,5 см^{-1}
Эффективность приемной системы	0,3
Пространственное разрешение ΔR	0,2 и 1 км
Максимальная энергия в импульсе	5 мДж
Частота следования импульсов	10 Гц
Длительность импульса	10 нс
Расходимость излучения	2 мрад
Диапазон перестройки лазера	2,9–4 мкм
NEP фотодетектора	$1 \times 10^{-12} \text{ Вт}$

ры с использованием методики МДП–ДОАС для ширины аппаратной функции, равной $1,5 \text{ см}^{-1}$.

Необходимо отметить, что конструкция лазерной системы предусматривает возможность сужения линии лазерного излучения в широких пределах. Таким образом, в табл. 5 приведены информативные длины волн, пригодные для зондирования исследуемых в работе МГС атмосферы с использованием методики МДП–ДОАС для ширины аппаратной функции, равной $0,1 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 3 приведены рассчитанные для горизонтальной тропосферной трассы пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы для HCN и C_2H_6 в области информативных длин волн МГС атмосферы, представленных в табл. 4.

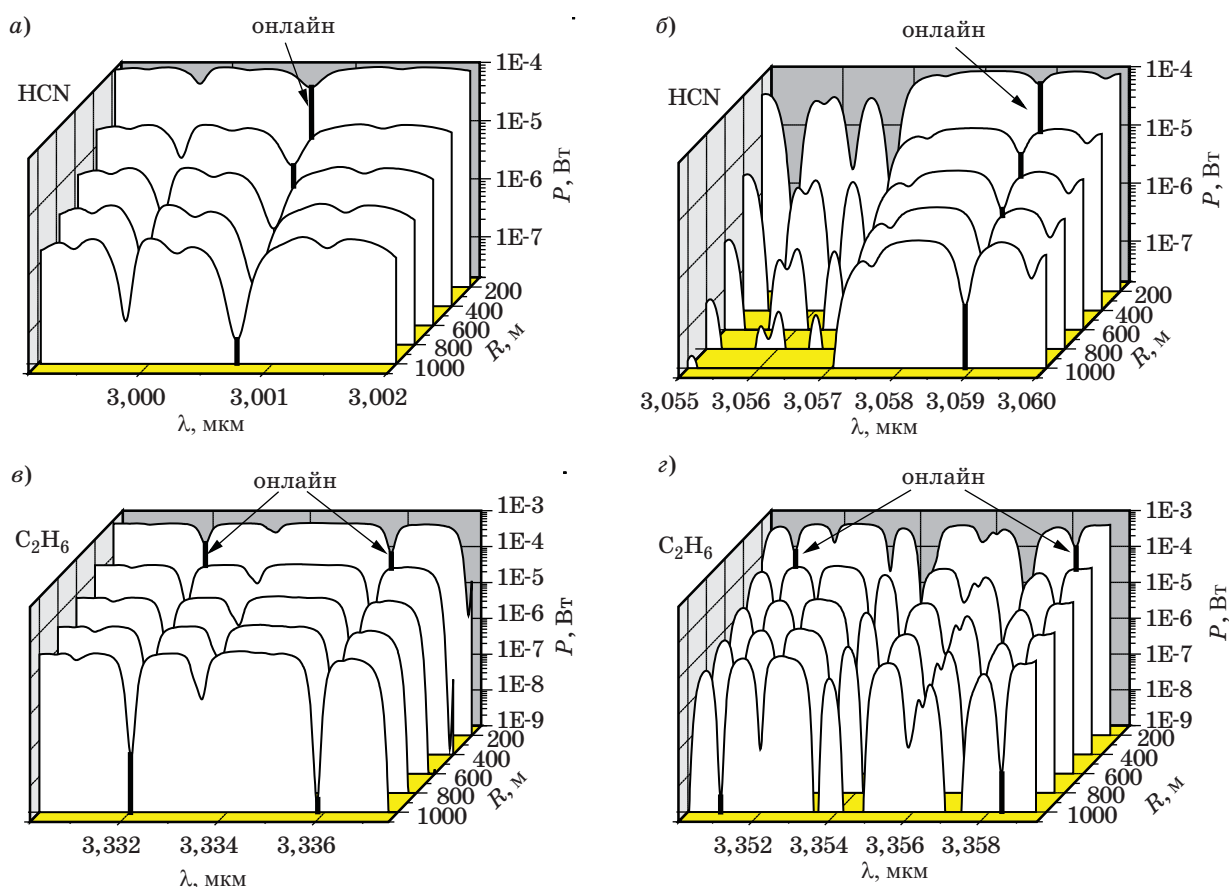
Из рисунков видно, что в рассматриваемых диапазонах длин горизонтальных трасс 0–1 км уровень лидарных сигналов существенно превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника $\text{NEP} = 10^{-12} \text{ Вт}$.

- **Таблица 4.** Длины волн, пригодные для зондирования HBr и HCl ($\Delta R = 1 \text{ км}$)
- **Table 4.** Informative wavelengths chosen for sounding HBr and HCl ($\Delta R = 1 \text{ km}$)

$\lambda_{\text{погл}}$, мкм (в воздухе)		$\nu_{\text{погл}}$, см^{-1} (в воздухе)		$T_{\text{газа}}$		$T_{\text{менш. погл}}$	
онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн
HBr							
3,95946	3,96183	2525,599	2524,088	0,86	0,98	0,99	0,99
3,98725	3,98964	2507,994	2506,493	0,85	0,98	0,99	0,99
4,01615	4,01376	2489,948	2491,429	0,85	0,98	0,99	0,99
4,04617	4,04860	2471,473	2469,993	0,86	0,99	0,99	0,99
4,07744	4,07497	2452,577	2454,008	0,89	0,98	0,99	0,99
HCl							
3,48945	3,49431	2865,778	2861,797	0,70	0,97	0,89	0,98
3,51558	3,51778	2844,482	2842,702	0,66	0,85	0,92	0,93
3,54298	3,54155	2822,486	2822,800	0,64	0,84	0,87	0,90
3,57193	3,57038	2799,609	2800,819	0,68	0,85	0,92	0,92

- **Таблица 5.** Длины волн, пригодные для зондирования HCN и C_2H_6 ($\Delta R = 0,2 \text{ км}$)
- **Table 5.** Informative wavelengths chosen for sounding HCN and C_2H_6 ($\Delta R = 0,2 \text{ km}$)

$\lambda_{\text{погл}}$, мкм (в воздухе)		$\nu_{\text{погл}}$, см^{-1} (в воздухе)		$T_{\text{газа}}$		$T_{\text{менш. погл}}$	
онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн
HCN							
3,05977	3,05998	3268,214	3267,994	0,72	0,89	0,96	0,96
3,00158	3,00144	3331,574	3331,724	0,62	0,79	0,97	0,96
C_2H_6							
3,33202	3,33228	3001,177	3000,947	0,50	0,93	0,98	0,99
3,33583	3,33560	2997,746	2998,027	0,37	0,86	0,97	0,98
3,36029	3,36108	2975,934	2975,234	0,45	0,92	0,95	0,96
3,35832	3,35852	2977,671	2977,501	0,45	0,79	0,95	0,95



■ **Рис. 3.** Пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы горизонтального зондирования HCN (а, б) и C₂H₆ (в, г) в области работы ПГС на основе кристалла КТА (ширина аппаратной функции 0,1 см⁻¹)
 ■ **Fig. 3.** Spatially and spectrally resolved lidar signals of HCN (a, б) and C₂H₆ (в, г) horizontal sounding in the region of KTA-based OPO operation (instrumental function width is 0.1 cm⁻¹)

Результаты численного моделирования показывают возможность восстановления лидарного сигнала на горизонтальных трассах 1 км при зондировании излучением ПГС на кристалле КТА в диапазоне 3–4 мкм паров HCN и C₂H₆.

Заключение

Применение разработанной методики лидарного зондирования МГС атмосферы, совмещающей МДП и ДОАС, и ее апробация в численном эксперименте подтверждают перспективность использования выбранных информативных длин волн для лидарного зондирования газового состава атмосферы с помощью лазерной системы на основе ПГС в диапазоне спектра 3–4 мкм. Проведенное численное моделирование показывает, что лазер с ПГС на основе нелинейного кристалла КТА является перспективным источником излучения для дистанционного зондирования с использованием методики МДП–ДОАС рассматриваемых в работе МГС атмосферы на приземных тропосферных трассах. Причем кон-

струкция лазерной системы предусматривает возможность сужения линии лазерного излучения в пределах 0,01–0,05 см⁻¹. Возможность такой модернизации, наряду с малым шагом перестройки линии лазерного излучения и наличием в рассматриваемом спектральном диапазоне линий поглощения других газовых составляющих и, в частности, атмосферных загрязнителей, делает рассматриваемый лазерный источник уникальным прибором для создания лидара дифференциального поглощения наземного базирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-45-700722 в части проведения численного моделирования лидарных измерений МГС атмосферы), финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых (грант № МК-1367.2017.5 в части разработки и апробации методики лидарных МДП–ДОАС-измерений малых газовых составляющих атмосферы) и финансовой поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-8199.2016.5.

Литература

1. Васильев Б. И., Маннун У. М. ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квант. электроника. 2006. Т. 36. № 9. С. 801–820.
2. Mitev V., Babichenko S., Bennes J., Borelli R., Dolfi-Bouteyre A., Fiorani L., Hespel L., Huet T., Palucci A., Pistilli M., Puiu A., Rebane O., Sobolev I. Mid-IR DIAL for High-Resolution Mapping of Explosive Precursors // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8894. P. 88940S–88940S-13. doi:10.1117/12.2028374
3. Sunesson J. A., Aplituley A., Swart D. P. J. Differential Absorption Lidar System for Routine Monitoring of Tropospheric Ozone // Applied Optics. 1994. Vol. 33. N 30. P. 7045–7058. doi:10.1364/AO.33.007045
4. Browell E. V. Differential Absorption Lidar Sensing of Ozone // Proc. of the IEEE. 1989. Vol. 77. N 3. P. 419–432. doi:10.1109/5.24128
5. McGee T. J., Gross M., Singh U. N., Butler J. J., Kimvilakani P. E. Improved Stratospheric Ozone Lidar // Optical Engineering. 1995. Vol. 34. N 5. P. 1421–1430. doi:10.1117/12.199883
6. Бурлаков В. Д., Долгий С. И., Невзоров А. А., Невзоров А. В., Романовский О. А., Харченко О. В. Лидарное зондирование озона в верхней тропосфере — нижней стратосфере: методика и результаты измерений // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 9. С. 124–132.
7. Higdon N. S., Browell E. V., Ponsardin P., Grossmann B. E., Butler C. F., Chyba T. H., Neale Mayo M., Allen R. J., Heuser A. W., Grant W. B., Ismail S., Mayor S. D., Carter A. F. Airborne Differential Absorption Lidar System for Measurements of Atmospheric Water Vapor and Aerosols // Applied Optics. 1994. Vol. 33. N 27. P. 6422–6438. doi:10.1364/AO.33.006422
8. Toriumi R., Tai H., Takechi N. Tunable Solid-State Blue Laser Differential Absorption Lidar System for NO₂ Monitoring // Optical Engineering. 1996. Vol. 35. N 8. P. 2371–2375. doi:10.1117/1.600617
9. Харченко О. В. Методика планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 06. С. 523–528.
10. Матвиенко Г. Г., Романовский О. А., Харченко О. В., Яковлев С. В. Результаты моделирования лидарных измерений профилей метеопараметров с помощью обертонового СО-лазера // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 02. С. 123–125.
11. Романовский О. А., Харченко О. В., Яковлев С. В. Применение многоволновых ИК-лазеров для лидарных и трассовых измерений метеорологических параметров атмосферы // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 10. С. 74–80.
12. Бобровников С. М., Матвиенко Г. Г., Романовский О. А., Сериков И. Б., Суханов А. Я. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. — 510 с.
13. Platt U., Perner D., Patz H. W. Simultaneous Measurement of Atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by Differential Optical Absorption // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. N C10. P. 6329–6335. doi:10.1029/JC084iC10p06329
14. Platt U. Air Monitoring by Spectroscopic Techniques // Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). — N. Y.: John Wiley, 1994. — P. 27–84.
15. Platt U., Stutz J. Differential Optical Absorption Spectroscopy. — Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. — 593 p. doi:10.1007/978-3-540-75776-4
16. Hinkley E. D. Laser Monitoring of the Atmosphere. — Springer-Verlag, 1976. — 396 p.
17. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. I., Wagner G. The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2013. Vol. 130. P. 4–50. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.07.002
18. Зуев В. Е., Комаров В. С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 264 с.
19. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Наука, 1982. — 199 с.
20. McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A. Optical Properties of Atmosphere // Report AFCRL-71-0297. — Bedford, Mass., 1971. — 86 p.

UDC 621.373.826; 551.510.411

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.71

Simulation of Remote Atmospheric Sensing by a Laser System based on Optical Parametric Oscillator

Romanovskii O. A.^{a,b}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, roa@iao.ruSukhanov A. Ya.^{a,c}, PhD, Tech., say@iao.ruKharchenko O. V.^a, PhD, Phys.-Math., olya@iao.ruYakovlev S. V.^{a,b}, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, ysv@iao.ruSadovnikov S. A.^a, Post-Graduate Student, sadsa@iao.ru^aV. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev Sq., 634021, Tomsk, Russian Federation^bNational Research Tomsk State University, 36, Lenin Av., 634050, Tomsk, Russian Federation^cTomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Av., 634050, Tomsk, Russian Federation

Introduction: Differential absorption lidars and differential optical absorption spectroscopy systems are an established technology for environmental monitoring, successfully used for remote atmospheric sensing. Differential absorption lidars traditionally use high-power gas lasers with a discrete set of wavelengths, having the emission line width of about 0.01 cm⁻¹, and harmonic generators which extend the operating spectral ranges of the systems. Simultaneous spectral and temporal analysis of a multi-frequency response from the atmosphere is not possible due to the necessity of wavelength tuning. For this reason, real-time concentration monitoring is possible only for a strictly limited number of the atmosphere components. In turn, active differential optical absorption spectroscopy systems use thermal radiation sources whose emission spectrum width is about hundreds of nanometers, which provides the possibility of a spectrally resolved integrated-path atmospheric gas analysis using mirror reflectors. **Purpose:** We test a developed method for lidar sensing of minor gas components of the atmosphere, which combines the advantages of differential absorption and differential optical absorption spectroscopy methods. **Results:** We have carried out numerical experiments in order to estimate the capability of remote atmospheric sensing using a laser system with parametric light generation in the spectral range 3–4 μm based on a non-linear crystal KTiOAsO₄. On the basis of the developed method of lidar remote sensing, we have found and selected certain wavelengths informative for gas analysis. We have also simulated lidar signals whose analysis showed the possibility of remote monitoring of HCN and C₂H₆ on 1 km long horizontal paths.

Keywords — Atmosphere, Lidar Sounding, Differential Absorption Lidar, Differential Optical Absorption Spectroscopy, Atmospheric Trace Gas, Non-Linear Crystals.

References

- Vasilev B. I., Mannun O. M. IR Differential-Absorption Lidars for Ecological Monitoring of the Environment. *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 9, pp. 801–820. doi:10.1070/QE2006v036n09ABEH006577
- Mitev V., Babichenko S., Bennes J., Borelli R., Dolfi-Bouteyre A., Fiorani L., Hespel L., Huet T., Palucci A., Pistilli M., Puiu A., Rebane O., Sobolev I. Mid-IR DIAL for High-Resolution Mapping of Explosive Precursors. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8894, pp. 88940S–88940S-13. doi:10.1117/12.2028374
- Sunesson J. A., Apituley A., Swart D. P. J. Differential Absorption Lidar System for Routine Monitoring of Tropospheric Ozone. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, no. 30, pp. 7045–7058. doi:10.1364/AO.33.007045
- Browell E. V. Differential Absorption Lidar Sensing of Ozone. *Proc. of the IEEE*, 1989, vol. 77, no. 3, pp. 419–432. doi:10.1109/5.24128
- McGee T. J., Gross M., Singh U. N., Butler J. J., Kimvilakani P. E. Improved Stratospheric Ozone Lidar. *Optical Engineering*, 1995, vol. 34, no. 5, pp. 1421–1430. doi:10.1117/12.199883
- Burlakov V. D., Dolgii S. I., Nevzorov A. A., Nevzorov A. V., Romanovskii O. A., Kharchenko O. V. Lidar Sensing of Ozone in the Upper Troposphere — Lower Stratosphere: Technique and Results of Measurements. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 127–136 (In Russian).
- Higdon N. S., Browell E. V., Ponsardin P., Grossmann B. E., Butler C. F., Chyba T. H., Neale Mayo M., Allen R. J., Heuser A. W., Grant W. B., Ismail S., Mayor S. D., Carter A. F. Airborne Differential Absorption Lidar System for Measurements of Atmospheric Water Vapor and Aerosols. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, no. 27, pp. 6422–6438. doi:10.1364/AO.33.006422
- Toriumi R., Tai H., Takechi N. Tunable Solid-State Blue Laser Differential Absorption Lidar System for NO₂ Monitoring. *Optical Engineering*, 1996, vol. 35, no. 8, pp. 2371–2375. doi:10.1117/1.600617
- Kharchenko O. V. The Method for Planning and Carrying out the Lidar Measurements of Profiles of Atmospheric Meteorological Parameters. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2012, vol. 25, no. 06, pp. 523–528 (In Russian).
- Matvienko G. G., Romanovskii O. A., Kharchenko O. V., Yakovlev S. V. Simulation of Lidar Measurements of Profiles of Atmospheric Meteorological Parameters using Overtone CO Laser. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2014, vol. 27, no. 02, pp. 123–125 (In Russian).
- Romanovskii O. A., Kharchenko O. V., Yakovlev S. V. Application of Multiwavelength IR Lasers for Lidar and Path Measurements of the Meteorological Parameters of the Atmosphere. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1380–1387. doi:10.1007/s11182-015-0392-1
- Bobrovnikov S. M., Matvienko G. G., Romanovskii O. A., Serikov I. B., Sukhanov A. Ya. *Lidarnyi spektroskopicheskiy gazoanaliz atmosfery [Lidar Spectroscopic Gas Analysis of the Atmosphere]*. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2014. 510 p. (In Russian).
- Platt U., Perner D., Patz H. W. Simultaneous Measurement of Atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by Differential Optical Absorption. *J. Geophys. Res.*, 1979, vol. 84, no. C10, pp. 6329–6335. doi:10.1029/JC084iC10p06329
- Platt U. Air Monitoring by Spectroscopic Techniques. In: *Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)*. New York, John Wiley, 1994. Pp. 27–84.
- Platt U., Stutz J. *Differential Optical Absorption Spectroscopy*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. 593 p. doi:10.1007/978-3-540-75776-4
- Hinkley E. D. *Laser Monitoring of the Atmosphere*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1976. 396 p.
- Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. I., Wagner G. The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, vol. 130, pp. 4–50. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.07.002
- Zuev V. E., Komarov V. S. *Statisticheskie modeli temperatury i gazovykh komponent atmosfery [Statistic Models of Temperature and Gas Components of the Atmosphere]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 264 p. (In Russian).
- Krekov G. M., Rakhimov R. F. *Optiko-lokatsionnaya model' kontinental'nogo aerologia [Optical Location Model of Continental Aerosol]*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 199 p.
- McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A., Volz F. E., Garing J. S. *Optical Properties of Atmosphere. Report AFCRL-71-0297*. Bedford, Mass., 1971. 86 p.

УДК 519.713

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.80

ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ СЕРВИСОВ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. Г. Шилов^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

М. С. Щекотов^а, научный сотрудник

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: сервисы киберфизических систем наделяются не только возможностью выхода в Интернет в целях поиска и извлечения информации, а также ее предоставления, но и принятия решений в зависимости от текущей ситуации. Ввиду ограниченной вычислительной мощности таких устройств использование для их описания и программирования управляющих автоматов является весьма перспективным. Однако необходимость их тесного взаимодействия вызывает проблемы, связанные с обеспечением интероперабельности. **Цель исследования:** онтологическое моделирование управляющих автоматов сервисов киберфизических систем. **Результаты:** предложено использование управляющих автоматов для разработки сервисов киберфизической системы; разработана совместимая с Resource Description Framework онтологическая модель управляющего автомата сервиса киберфизической системы, основанная на представлении сервисов, их состояний и выходных символов в виде классов, а входных символов — в виде отношений; результаты продемонстрированы на примере сценария взаимодействия роботов при формировании заданного слова из букв. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке сервисов киберфизических систем.

Ключевые слова — интероперабельность, онтологическое моделирование, управляющий автомат, сервис, киберфизическая система.

Введение

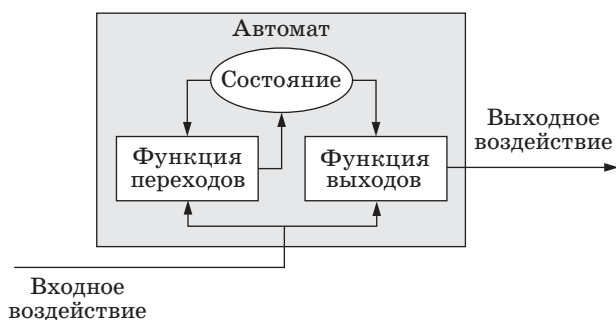
В эпоху Интернета вещей все больше устройств наделяются функциональностью, позволяющей им осуществлять доступ к Интернету. Данная функциональность была ориентирована в первую очередь на поиск и извлечение информации, однако развитие информационно-коммуникационных технологий привело к появлению новых требований и возможностей. Многие современные устройства помогают человеку в различных видах его деятельности, не только извлекая информацию, но и анализируя ее, а также принимая собственные решения в зависимости от текущей ситуации [3, 4]. Данные возможности стали одной из движущих сил развития киберфизических систем [1, 2]. Киберфизические системы представляют собой множество ресурсов, взаимодействующих между собой в информационном пространстве и управляющих устройствами в физическом пространстве в режиме реального времени. При этом они базируются на инфраструктурах, обеспечивающих связь, вычисления, управление и объединяющих сенсоры, вычислительные устройства, сервисы и средства коммуникаций. Устройства, входящие в киберфизические системы, зачастую имеют ограниченные вычислительные мощности, что существенно сужает возможности их программирования. Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является использование управляющих автоматов.

Теория автоматов появилась в рамках теории управляющих систем (теоретической кибернетики) в связи с бурным развитием средств электронной вычислительной техники и соответствующих областей математического знания в первую очередь для моделирования гипотетических цифровых систем. Однако последующее развитие информационных технологий вывело сферу приложения теории автоматов далеко за рамки моделирования аппаратных средств цифровой электроники, расширив ее до фундаментальных основ современной теоретической информатики. Сегодня абстракции и модели, разработанные в теории автоматов, востребованы такими научными дисциплинами, как теория формальных грамматик, математическая лингвистика, теория логических моделей, математическая логика и формальные аксиоматические системы, теория кодирования, теория вычислительной сложности и др. [8].

Под управляющим автоматом принято понимать конечный дискретный автомат, описываемый как

$$A = (X, Y, Z, \delta, \varphi, y_0),$$

где X — конечный алфавит входных символов; Y — конечное множество состояний; Z — конечный алфавит выходных символов; $\delta: X \times Y \rightarrow Y$ — функция переходов, определяющая состояние; $\varphi: X \times Y \rightarrow Z$ — функция переходов, определяющая выходной символ; $y_0 \in Y$ — начальное (стартовое) состояние.



■ **Рис. 1.** Управляющий автомат
 ■ **Fig. 1.** Finite-state machine

Схематично такой автомат изображен на рис. 1 [10].

Теория автоматов имеет широкие возможности применения [9]:

- проектирование систем логического управления;
- обработка текстов и построение компиляторов;
- спецификация и верификация систем взаимодействующих процессов;
- языки описания документов и объектно-ориентированных программ;
- оптимизация логических программ и т. д.

Одним из достаточно популярных направлений в данной области является автоматное программирование, т. е. подход к разработке программных систем со сложным поведением, основанный на модели автоматизированного объекта управления (расширении конечного автомата) [10].

Необходимость тесного взаимодействия устройств киберфизических систем также накладывает дополнительные требования, связанные с обеспечением интероперабельности. Одним из наиболее распространенных подходов к решению данной проблемы является онтологическое моделирование проблемной области [5–7]. В настоящей статье предложено решение задачи онтологического моделирования управляющих автоматов сервисов киберфизических систем.

Сервис киберфизической системы

Согласно ранее разработанной концепции [11], сервис киберфизической системы можно представить следующим образом (рис. 2).

Сервис — основной действующий субъект процесса многоуровневой самоконтекстуализации. Сервис может представлять сенсор, транспортное средство, компанию — поставщика услуг и т. п. Сервис обладает структурными знаниями, параметрическими знаниями и профилем. Сервис характеризуется такими свойствами, как самокон-

текстуализация, самоадаптация, автономность и проактивность и выполняет некоторые действия.

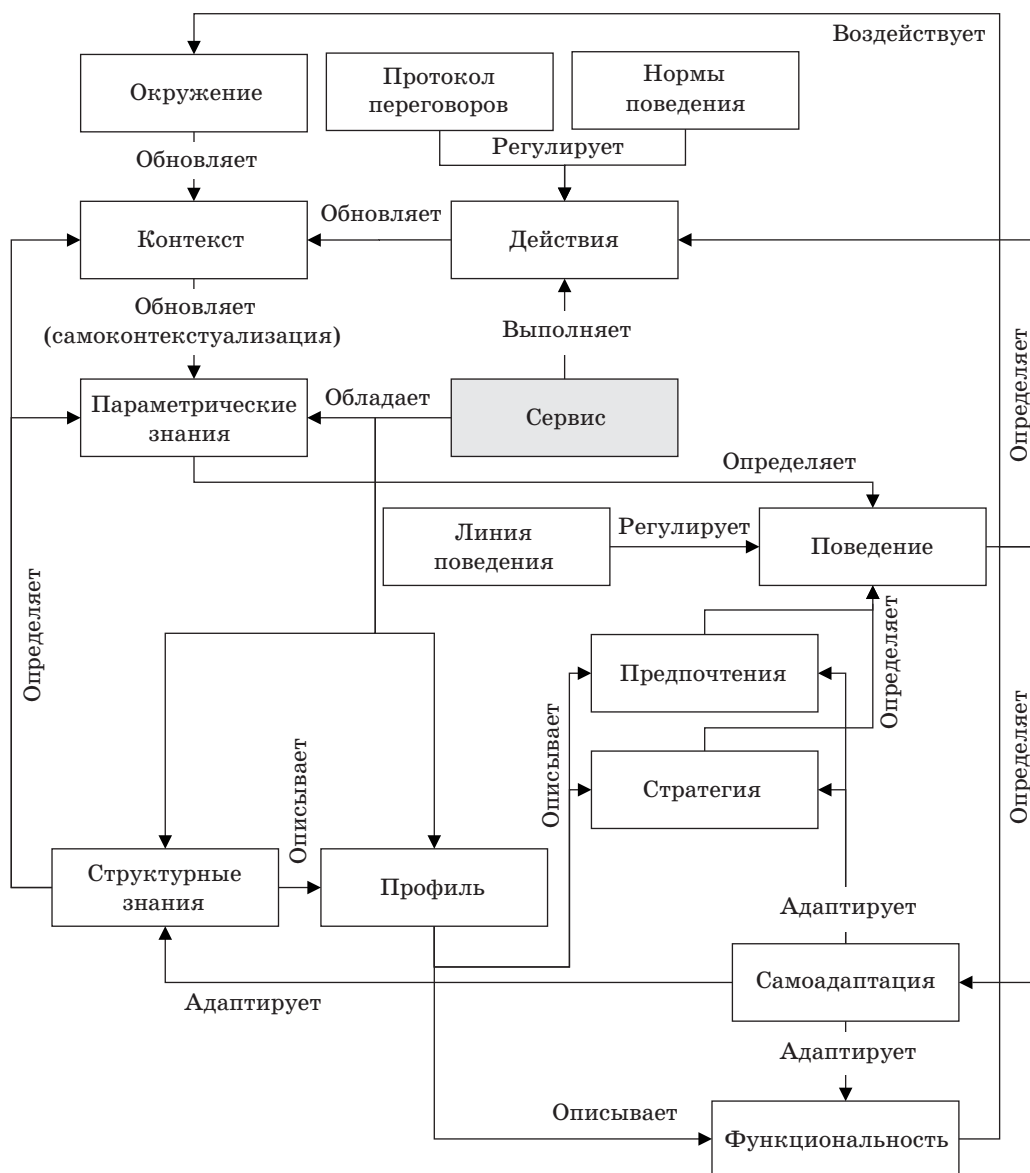
Структурные знания являются концептуальным описанием проблем, которые могут быть решены соответствующим сервисом. Они представляют собой внутреннюю онтологию сервиса. Структурные знания описывают структуру параметрических знаний сервиса. В зависимости от ситуации структурные знания могут быть модифицированы (адаптированы) посредством *самоадаптации*. Они также описывают терминологию контекста и профиля сервиса.

Параметрические знания являются знаниями о конкретной ситуации. Их структура определяется структурными знаниями сервиса, а параметрическая составляющая зависит от контекста текущей ситуации. Они определяют поведение сервиса.

Контекстом называется любая информация, которая может быть использована для описания ситуации объекта, где в качестве объекта может выступать человек, место и т. п., которые считаются относящимися к задаче, решаемой пользователем, включая самого пользователя и используемые им инструментальные средства [13].

Целью контекста является представление только релевантных информации и знаний из всего объема доступных. Релевантность информации и знаний оценивается на основе того, насколько они связаны с рассматриваемой задачей. Контекст описывается в терминологии структурных знаний сервиса. Он обновляется по мере поступления информации из окружения сервиса и как результат действий сервиса. Контекст обновляет параметрические знания сервиса, которые в свою очередь определяют его поведение. Способность системы (сервиса) описывать и использовать контекст, а также адаптировать свое поведение в зависимости от контекста называется *самоконтекстуализацией* [14]. Представленный подход использует идею самоконтекстуализации для автономной адаптации поведения сервисов согласно контексту текущей ситуации для принятия ими контекстно-зависимых решений. С этой целью предусмотрена концептуальная модель предусматривает контекстную зависимость сервисов и их адаптацию к контексту. В работе используется двухэтапное построение контекста: построение контекста текущей ситуации на основании знаний проблемной области (абстрактный контекст) и конкретизация абстрактного контекста значениями переменных, получаемыми от информационных сервисов (оперативный контекст).

Окружение является окружающей средой киберфизической системы, частью которой является рассматриваемый сервис. Такая среда способна взаимодействовать с данной системой. Окружение влияет на контекст сервиса. Сервис может воздействовать на окружение, если он имеет соответ-



■ **Рис. 2.** Концептуальная модель самоконтекстуализирующегося сервиса киберфизической системы
 ■ **Fig. 2.** Self-contextualizing service of cyber-physical system: conceptual model

ствующую функциональность (например, автобус может перевезти пассажира).

Функциональность — это набор киберфизических функций, которые могут быть выполнены сервисом. Посредством функциональности сервис может воздействовать на свое окружение. Функциональность сервиса может быть в некоторой степени изменена посредством самоадаптации. Функциональность описывается профилем сервиса.

Профиль описывает функциональность, предпочтения и стратегии сервиса в терминах его структурных знаний таким образом, чтобы он мог быть «понимаем» другими сервисами киберфизической системы.

Самоадаптация — это способность поведения сервиса модифицировать его структурные знания, функциональность, стратегию и предпочтения в ответ на изменения в окружении.

Поведение — это способность сервиса выполнять некоторые действия и самоадаптацию для изменения как собственного состояния, так и состояния окружения с текущего на желаемое. Поведение определяется предпочтениями и стратегиями сервиса, а также линиями поведения, заданными на более высоком уровне самоконтекстуализации.

Линии поведения — это набор принципов и (или) правил, получаемых с более высокого уровня самоконтекстуализации для направления по-

ведения сервиса в целях достижения рациональных результатов на более низких уровнях самоконтекстуализации.

Предпочтения — это склонность сервиса к определенным состояниям окружения или собственным состояниям, а также склонность избегать некоторых состояний. Предпочтения описаны в профиле сервиса и влияют на его поведение. Агент может изменять свои предпочтения посредством самоадаптации.

Стратегия — это предопределенный план действий или набор правил выбора действий для изменения состояния сервиса или его окружения с текущего на желаемое. Стратегия описывается в профиле сервиса и определяет его поведение. Сервис может изменять свои стратегии посредством самоадаптации.

Действия — это способность сервиса взаимодействовать с другими сервисами и вести переговоры посредством своего поведения. Они регулируются протоколом переговоров и нормами поведения.

Протокол переговоров — это набор базовых правил, сформулированных таким образом, чтобы при следовании сервисом этим правилам вся система вела себя так, как задумано ее создателями. Протокол переговоров определяет действия сервиса.

Нормы поведения — это правила, регулирующие действия сервиса. В отличие от протокола переговоров, нормы носят рекомендательный характер.

Использование управляющих автоматов для описания поведения сервисов

Как было показано ранее, описание поведения сервиса в киберфизической системе с помощью управляющих автоматов может быть весьма целесообразным. Можно сформулировать следующие составляющие управляющего автомата сервиса:

— конечный алфавит входных символов (X) — сообщения, которые может получать сервис от других сервисов;

— конечное множество состояний (Y) — совокупность значений переменных, описывающих состояние сервиса и окружения, для которой может быть определено значение «желаемости» с точки зрения сервиса;

— функции переходов (δ и φ) — функции, описывающие действия сервиса в зависимости от параметров текущей ситуации;

— конечный алфавит выходных символов (Z) — сообщения, которые сервис может посылать другим сервисам.

Рассмотрим простой, но иллюстративный пример киберфизической системы, являющейся под-

системой системы «умный дом» (рис. 3). Допустим, в наличии имеется датчик температуры (S_1) и обогреватель (S_3), представленные в системе с помощью сервисов, а также управляющий сервис (S_2). Также в системе присутствуют два типа сообщений для обмена информацией: сообщения с данными о текущей температуре в помещении (m_1); сообщение с управляющим воздействием, направленным на изменение режима работы обогревателя (m_2).

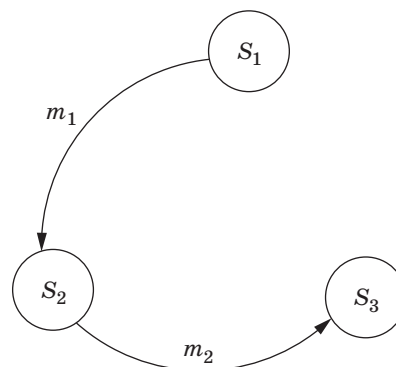
Рассмотрим автомат сервиса S_2 .

У него существует всего четыре состояния:

$$Y = (y_0, y_1, y_2, y_3),$$

где y_0 — температура (x) не определена (начальное состояние сервиса); y_1 — температура ниже необходимой; y_2 — температура соответствует необходимой (x_0); y_3 — температура выше необходимой.

Алфавит входных символов соответствует целым числам от -127 до 127 (температура в градусах Цельсия) и передается в сообщении m_1 : $X = [-127, -126, \dots, 127]$.



■ **Рис. 3.** Пример описания взаимодействия сервисов киберфизической системы управления температурой помещения

■ **Fig. 3.** The example of the interaction of cyber-physical system services for smart home temperature management

■ **Таблица 1.** Пример функции переходов φ управляющего сервиса умного дома

■ **Table 1.** The transition function φ of the smart home service state machine

Состояние (Y)	Управляющее воздействие (Z)
y_1	1
y_2	0
y_3	-1

Алфавит выходных символов соответствует целым числам -1 (снизить температуру), 0 (не менять температуру), 1 (повысить температуру) и передается в сообщении $m_2: Z = [-1, 0, 1]$.

Функция переходов δ выглядит следующим образом:

$$\delta(x): y = \begin{cases} y_1, & x < x_0 \\ y_2, & x = x_0 \\ y_3, & x > x_0 \end{cases}$$

Функция переходов φ представлена в табл. 1.

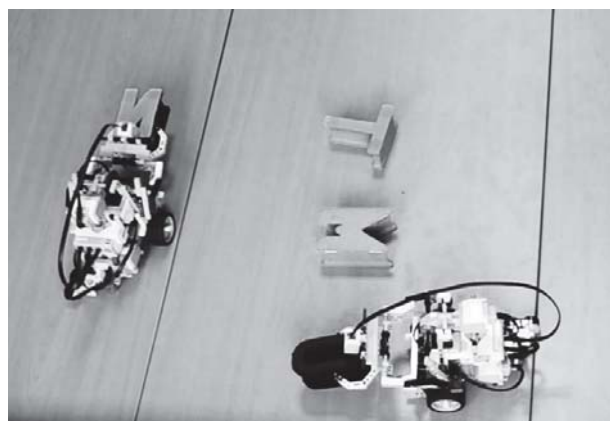
Онтологическое описание управляющих автоматов сервисов на основе модели представления данных RDF

Поскольку в разработанной ранее концепции построения сервисов киберфизических систем для их описания используются онтологии, а для передачи сообщений — модель представления данных RDF (Resource Description Framework — «среда описания ресурса» — модель, разработанная консорциумом W3C) [11, 12], необходимо определить способ сопоставления элементов управляющих автоматов и элементов онтологии с использованием RDF. Данная модель представляет утверждения о ресурсах в пригодном для машинной обработки виде и является частью концепции семантической паутины (Semantic Web).

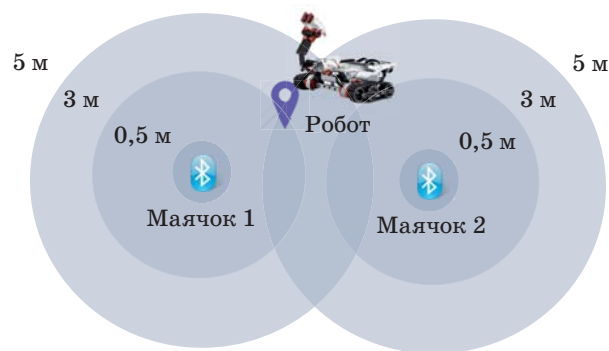
В качестве примера рассмотрим сценарий формирования роботами заданного слова из букв, произвольно размещенных на столе [12]. Для упрощения исследовательского макета роботы не распознают буквы, а определяют их на основе цветов (с использованием простых датчиков цвета), т. е. каждой букве в соответствие поставлен определенный цвет, в который она окрашена. Согласно сценарию, роботы сканируют пространство, находят буквы и складывают из них заданное слово (рис. 4).

Для определения местоположения роботов используется метод счисления координат на основе данных следующих встроенных датчиков: акселерометра, гироскопа, компаса. В начале сценария робот находится в точке с известными координатами, откуда и начинает движение. Также производится коррекция с помощью сигналов маячков BLE (Bluetooth Low Energy) [15, 16]. Использование маячков BLE позволяет определить, в какой из зон действия сигнала какого маячка находится робот (рис. 5).

Для обмена информацией используется интеллектуальное пространство, являющееся распределенным хранилищем информации. Сервисы



■ Рис. 4. Роботы складывают слово «ИТМО»
 ■ Fig. 4. Robots are assembling the word «ИТМО»

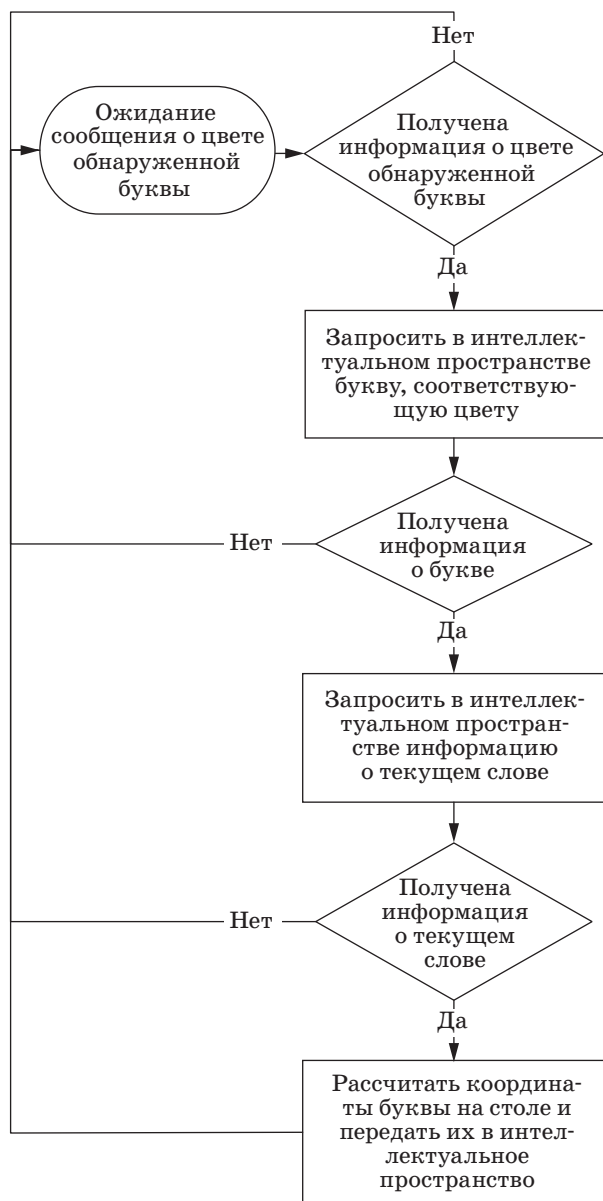


■ Рис. 5. Определение зоны местонахождения робота
 ■ Fig. 5. The robot localization

могут передавать информацию в интеллектуальное пространство и получать ее посредством запросов.

За текущее состояние (расположение букв на столе) и управление формированием слова отвечает сервис локализации букв (letter localization service). Данный сервис собирает информацию от роботов, рассчитывает, где должны оказаться буквы, и отдает соответствующие распоряжения роботам.

Диаграмма разработанного алгоритма работы сервиса локализации букв представлена на рис. 6 и подробно описана в статье [12]. Сервис подписывается на получение сообщений об обнаружении новой буквы и переходит в режим ожидания. При появлении информации о новой букве сервис получает информацию о ее цвете и на ее основе осуществляет запрос идентификации буквы. После идентификации буквы сервис осуществляет запрос текущего слова, которое должны собрать роботы. Если текущее слово успешно получено, сервис находит в нем расположение буквы и рассчитывает на столе ее координаты, которые



■ **Рис. 6.** Диаграмма алгоритма работы сервиса локализации букв (адаптировано из работы [12])
 ■ **Fig. 6.** The diagram of letter localization service operation algorithm (adapted from [12])

передаются роботам. Данную диаграмму в виде автомата представляет рис. 7, ему соответствует таблица состояний (табл. 2).

Дадим описание входных символов, состояний и выходных символов.

Входные символы:

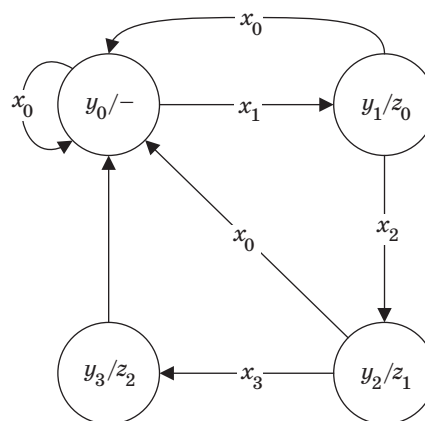
- x_0 — пустой или нераспознаваемый символ;
- x_1 — цвет обнаруженной буквы;
- x_2 — буква;
- x_3 — слово.

Состояния:

y_0 — ожидание сообщения о цвете обнаруженной буквы;

■ **Таблица 2.** Таблица состояний автомата сервиса локализации букв
 ■ **Table 2.** The state table of the letter localization service state machine

Y	y_0	y_1	y_2	y_3
Z	—	z_0	z_1	z_2
x_0	y_0	y_0	y_0	—
x_1	y_1	—	—	—
x_2	—	y_2	—	—
x_3	—	—	y_3	—



■ **Рис. 7.** Автомат сервиса локализации букв
 ■ **Fig. 7.** The state machine of the letter localization service

- y_1 — ожидание сообщения о букве;
 - y_2 — ожидание сообщения о слове;
 - y_3 — выполнение z_2 и переход в состояние y_0 .
- Выходные символы:

- z_0 — запрос в интеллектуальное пространство об определении буквы на основании заданного цвета;
- z_1 — запрос в интеллектуальное пространство о текущем слове;
- z_2 — определение координат буквы и их передача в интеллектуальное пространство.

Данный автомат можно представить в виде RDF-онтологии. Согласно RDF, любое утверждение имеет вид «субъект — предикат — объект» и называется триплетом. Для обозначения субъектов, отношений и объектов в RDF используются URI (Uniform Resource Identifier — унифицированный (единообразный) идентификатор ресурса).

Очевидным способом представления является создание классов Service для описания сервисов, State — состояний, is input for — входных символов и Output — выходных символов, а также их

экземпляров. Однако такое представление не позволяет описывать утверждения вида $\langle y_0, x_1, y_1 \rangle$ («входной символ x_1 переводит сервис из состояния y_0 в состояние y_1 »). В результате было предложено представить входные символы с помощью отношений, являющихся дочерними для более общего отношения is input for, связывающего состояния, т. е. его экземплярами (табл. 3, 4). Отношения RDF на уровне классов, соответствующие элементам автомата, показаны на рис. 8. В табл. 5 представлены отношения между экземплярами классов онтологии, соответствующие автомату сервиса локализации букв.

■ Таблица 3. Соответствие классов, отношений и экземпляров RDF элементам автомата

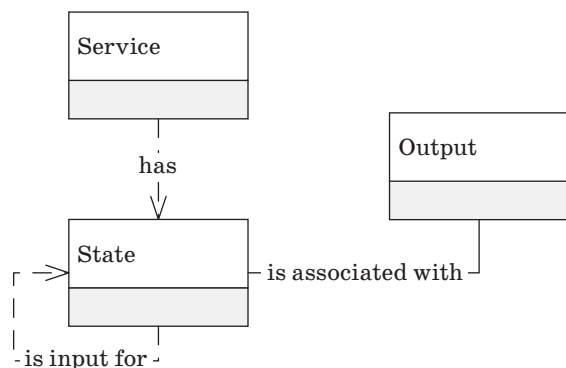
■ Table 3. Correspondence of RDF's concepts, properties and instances to state machine elements

Класс	Экземпляры
Сервис (Service)	Letter localization service
Состояние (State)	y_0, y_1, y_2, y_3
Выходной символ (Output)	null, z_0, z_1, z_2
Отношение «Входной символ» (is input for)	null, x_0, x_1, x_2, x_3

■ Таблица 4. Отношения RDF на уровне классов, соответствующие элементам автомата

■ Table 4. RDF properties corresponding to state machine elements

Отношение	Класс 1	Класс 2
has	Service	State
is associated with	State	Output
is input for	State	State



■ Рис. 8. Диаграмма отношения RDF на уровне классов, соответствующего элементам автомата

■ Fig. 8. RDF properties diagram corresponding to state machine elements

■ Таблица 5. Отношения между экземплярами классов RDF, соответствующие автомату сервиса локализации букв

■ Table 5. RDF triples corresponding to letter localization service state machine

Класс 1	Отношение	Класс 2
Letter localization service	has	y_0
То же	То же	y_1
- " -	- " -	y_2
- " -	- " -	y_3
y_0	is associated with	null
y_1	То же	z_0
y_2	- " -	z_1
y_3	- " -	z_2
y_0	x_0	y_0
y_0	x_1	y_1
y_1	x_0	y_0
y_1	x_2	y_2
y_2	x_0	y_0
y_2	x_3	y_3
y_3	null	y_0

```

<owl:Class rdf:about="#untitled-ontology-38:State">
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="#untitled-ontology-38:associated_with"/>
      <owl:someValuesFrom rdf:resource="#untitled-ontology-38:Output"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

<owl:NamedIndividual rdf:about="#untitled-ontology-38:Letter_localization_service">
  <rdfs:type rdf:resource="#untitled-ontology-38:Service"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y0"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y1"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y2"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y3"/>
</owl:NamedIndividual>
    
```

■ Рис. 9. Фрагменты построенной онтологии управляющего автомата

■ Fig. 9. Fragments of the letter localization service state machine ontology

Для последующей реализации предложенная онтология была построена в редакторе Protégé. На рис. 9 представлены фрагменты данной онтологии (описание класса State и описание экземпляров класса State).

Данная онтология используется сервисами, участвующими в сценарии формирования роботами заданного слова из букв, что обеспечивает однозначное «понимание» сервисами информационных сообщений, публикуемых в интеллектуальном пространстве.

Заключение

В статье рассмотрено онтологическое моделирование управляющих автоматов сервисов киберфизических систем. Проанализирована актуальность использования управляющих автоматов в киберфизических системах. Предложены онтологическая модель управляющего автомата сервиса киберфизической системы на основе RDF, а также онтологическое представление состояний управляющего автомата сервиса киберфизической системы.

Использование управляющих автоматов в ряде случаев может существенно упростить процесс разработки сервисов киберфизических систем, а их представление с помощью онтологического моделирования позволит частично решить проблемы, связанные с необходимостью поддержки семантической интероперабельности сервисов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-08092 и 15-07-08391) и бюджетных тем № 0073-2014-0005 и 0073-2015-0007.

Литература

1. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems // *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23.
2. Knight J., Xiang J., Sullivan K. A Rigorous Definition of Cyber-Physical Systems // *Trustworthy Cyber-Physical Systems Engineering*. 2016. Vol. 47. P. 47–70.
3. Wortmann F., Flüchter K. Internet of Things // *Business & Information Systems Engineering*. 2015. Iss. 3. Vol. 57. P. 221–224.
4. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions // *Future Generation Computer Systems*. 2013. Iss. 7. Vol. 29. P. 1645–1660.
5. Görner M., Göschel T., Kassel S., Sander S., Klein T. An Ontology for Interoperability: Modeling of Composite Services in the Smart Home Environment // *International IFIP Working Conf. on Enterprise Interoperability*. 2015. P. 30–38.
6. Brizzi P., Bonino D., Musetti A., Krylovsky A., Patti E., Axling M. Towards an Ontology Driven Approach for Systems Interoperability and Energy Management in the Smart City // *Computer and Energy Science (SpliTech): Intern. Multidisciplinary Conf.* 2016. P. 1–7.
7. Kiljander J., D'Elia A., Morandi F., Hyttinen P., Takalo-Mattila J., Ylisaukko-Oja A., Soininen J.-P., Cinotti T. S. Semantic Interoperability Architecture for Pervasive Computing and Internet of Things // *IEEE Access*. 2014. Vol. 2. P. 856–873.
8. Гуренко В. В. Введение в теорию автоматов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. — 62 с.
9. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. Automata Theory, Languages, and Computation. 3rd ed. — Cambridge: Pearson, 2006. — 750 p.
10. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. — СПб.: Питер, 2009. — 176 с.
11. Смирнов А. В., Левашова Т. В., Шилов Н. Г. Архитектура и модели самоконтекстуализирующейся сети сервисов на примере виртуального логистического хаба // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2013. № 4. С. 86–93.
12. Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M. Ontology-Based Collaboration in Multi-Robot System: Approach and Case Study // *11th System of Systems Engineering Conf. (SoSE)*, Kongsberg, Norway, June 12–16, 2016. P. 329–334.
13. Dey A. K. Understanding and using Context // *Personal Ubiquitous Computing*. 2001. Vol. 5. N 1. P. 4–7.
14. Raz D., Juhola A. T., Serrat-Fernandez J., Galis A. Fast and Efficient Context-Aware Services. — John Wiley & Sons, 2006. — 222 p.
15. Qiu J. W., Lin C. P., Tseng Y. C. BLE-based Collaborative Indoor Localization with Adaptive Multi-Lateration and Mobile Encountering // *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, Doha, Qatar, April 3–6, 2016. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7564799/> (дата обращения: 20.05.2017).
16. Yoon P. K., Zihajezadeh S., Kang B. S., Park E. J. Adaptive Kalman Filter for Indoor Localization using Bluetooth Low Energy and Inertial Measurement Unit // *IEEE 37th Annual Intern. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, Italy, August 25–29, 2015. P. 825–828.

UDC 519.713

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.80

Ontological Modelling of State Machines for Cyberphysical System ServicesShilov N. G.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, nick@iias.spb.suSchekotov M. S.^a, Researcher, shekotov@iias.spb.su^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Services of cyberphysical systems are supposed to be able not only to access Internet for information search, extraction and representation, but also to make decisions in accordance with the environment state. Due to computational limitations of such devices, it is considered to be promising to use state machines for their programming. However, the necessity of their interaction causes problems related to their interoperability support. **Purpose:** Our goal is ontological modelling of state machines for cyberphysical system services. **Results:** Usage of state machines for the development of cyberphysical system services has been proposed. A RDF-compatible ontological model of a state machine for a cyberphysical system service has been developed, based on a representation of the services, their states and output symbols as classes, and their input symbols as properties. The results are demonstrated via a case study of robot interaction for assembling a given word out of letters. **Practical relevance:** The obtained results can be used in the development of cyberphysical system services.

Keywords — Interoperability, Ontological Modelling, State Machine, Service, Cyberphysical System.

References

1. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, pp. 18–23.
2. Knight J., Xiang J., Sullivan K. A Rigorous Definition of Cyber-Physical Systems. *Trustworthy Cyber-Physical Systems Engineering*, 2016, vol. 47, pp. 47–70.
3. Wortmann F., Flüchter K. Internet of Things. *Business & Information Systems Engineering*, 2015, iss. 3, vol. 57, pp. 221–224.
4. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Generation Computer Systems*, 2013, iss. 7, vol. 29, pp. 1645–1660.
5. Görner M., Göschel T., Kassel S., Sander S., Klein T. An Ontology for Interoperability: Modeling of Composite Services in the Smart Home Environment. *Intern. IFIP Working Conf. on Enterprise Interoperability*, 2015, pp. 30–38.
6. Brizzi P., Bonino D., Musetti A., Krylovsky A., Patti E., Axling M. Towards an Ontology Driven Approach for Systems Interoperability and Energy Management in the Smart City. *International Multidisciplinary Conf. "Computer and Energy Science" (SpliTech)*, IEEE, 2016, pp. 1–7.
7. Kiljander J., D'Elia A., Morandi F., Hyttinen P., Takalo-Mattila J., Ylisaukko-Oja A., Soininen J.-P., Cinotti T. S. Semantic Interoperability Architecture for Pervasive Computing and Internet of Things. *IEEE Access*, 2014, vol. 2, pp. 856–873.
8. Gurenko V. V. *Vvedenie v teoriyu avtomatov* [Introduction into the State Machine Theory]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2013. 62 p. (In Russian).
9. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. *Automata Theory, Languages, and Computation*. 3rd ed. Cambridge: Pearson, 2006. 750 p.
10. Polikarpova N. I., Shalyto A. A. *Avtomatnoe programirovanie* [State Machine Programming]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2009. 176 p. (In Russian).
11. Smirnov A. V., Levashova T. V., Shilov N. G. Architecture and Models of Self-Contextualizing Service Network on a Case Study of Virtual Logistic Hub. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2013, no. 4, pp. 86–93 (In Russian).
12. Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M. Ontology-Based Collaboration in Multi-Robot System: Approach and Case Study. *11th System of Systems Engineering Conf. (SoSE)*, Kongsberg, Norway, June 12–16, 2016, pp. 329–334.
13. Dey A. K. Understanding and Using Context. *Personal Ubiquitous Computing*, 2001, vol. 5, no. 1, pp. 4–7.
14. Raz D., Juhola A. T., Serrat-Fernandez J., Galis A. *Fast and Efficient Context-Aware Services*. John Wiley & Sons, 2006. 222 p.
15. Qiu J. W., Lin C. P., Tseng Y. C. BLE-Based Collaborative Indoor Localization with Adaptive Multi-Lateration and Mobile Encountering. *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, Doha, Qatar, April 3–6, 2016. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7564799/> (accessed 20 May 2017).
16. Yoon P. K., Zihajezhadeh S., Kang B. S., Park E. J. Adaptive Kalman Filter for Indoor Localization using Bluetooth Low Energy and Inertial Measurement Unit. *IEEE 37th Annual Intern. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, Italy, August 25–29, 2015, pp. 825–828.