

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С.М. Крылов, В.Н. Толчев

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: vt@samgtu.ru

В статье рассматриваются вопросы организации и программирования систем, способных в дистанционном режиме выполнять различные реальные процессы и эксперименты. Оцениваются условия, обеспечивающие максимальную гибкость, многофункциональность и программируемость таких систем.

Ключевые слова: *дистанционное обучение, реальные дистанционные эксперименты, многофункциональность дистанционных лабораторий, структура реальных дистанционных лабораторий.*

В последнее время интерес к реальным дистанционным лабораториям (РДЛ) значительно возрос. Это связано, прежде всего, с рядом факторов, выгодно отличающих такого рода лаборатории как от классических недистанционных, так и от дистанционных, но работающих с разного рода программными моделями и эмуляторами. К этим факторам можно отнести: *а)* доступность РДЛ для пользователей Интернета независимо от их возрастного, социального, имущественного, образовательного и территориального ценза или статуса; *б)* возможность круглосуточного режима работы, повышающего отдачу имеющегося оборудования и его экономическую эффективность; *в)* высокую потенциальную информационную интегративность РДЛ вследствие возможности эффективного подключения как существующих, так и перспективных дистанционных компьютерных сервисов и ресурсов типа поисковых систем, электронных библиотек, баз данных и т.д.; *г)* формирование у пользователей навыков дистанционного решения практических задач, включая использование реального оборудования и других реальных материальных ресурсов; *д)* достоверность получаемых результатов, исключая инсценированные и инспирированные ошибки и несуществующие эффекты вследствие неадекватности и некорректности моделирующих и симулирующих программ.

Достижение перечисленных целей и положительных эффектов существенно зависит от правильного выбора архитектуры РДЛ и параметров тех локальных и (или) глобальных сетей, через которые осуществляется доступ к ним.

Большинство существующих РДЛ имеют достаточно жесткую архитектуру, позволяющую выполнять только ограниченный набор лабораторных работ и экспериментов. К таким системам можно отнести ряд достаточно известных РДЛ, в том числе iLAB Массачусетского технологического института (MIT) для работ по микроэлектронике, химическому машиностроению, кристаллизации полимеров, проектированию зданий и сооружений, обработке сигналов [1]; дистанционную лабораторию по газовой хроматографии Института прикладных исследований во Фрайбурге, Швейцария [2]; лабораторию для экспериментов по дифракции, фотоэлектрическим

эффектам, радиоактивности, кристаллическим структурам, оптическому рассеиванию, магнитным полям проводников и др. [3]; отечественный аппаратно-программный комплекс для измерения магнитных величин (феррометр) [4]; систему для теплофизических измерений на основе среды LABVIEW [5]; LAB-on-WEB для исследования электронных компонентов – МОП-транзисторов, инверторов, емкостей, диодов и генераторов [6]; лабораторию для изучения фильтров второго порядка, разработанную в рамках европейской программы в области дистанционного обучения Marvell [7]. Основным отличием последней от iLab и LAB-on-WEB является использование генераторов и измерителей, выполненных в виде компьютерных плат. Система снабжена также веб-видеокамерой. Программа работы с лабораторией встроена в популярную обучающую среду Moodle.

В [8] приводится информация о дистанционных лабораториях для исследований солнечной энергетики, управления роботами, а также о роботизированной лаборатории в области химии растворов.

Все эти лаборатории имеют архитектуру, не предусматривающую ее реорганизации при проведении экспериментов. В частности, лаборатории по микроэлектронике типа iLab, LAB-on-WEB состоят из фиксированного набора измерительных дистанционно-управляемых (через интерфейс GPIB) специализированных приборов и коммутаторов фирм Agilent, NI, HP и др., автоматических измерительных головок и конкретных физических устройств, параметры которых измеряются или тестируются. При этом разработчики [1] и [6] отмечают высокую стоимость своих систем (дорогостоящие приборы и программное обеспечение).

Анализируя особенности РДЛ, авторы работы [8] отмечают, что, во-первых, основными областями применения таких лабораторий являются технологии машиностроения, электроника, химия, фундаментальные науки; во-вторых, большое значение для их реализации имеет длительность проводимых экспериментов – от секунд до одного часа; в-третьих, некоторые эксперименты могут повторяться многократно с использованием одних и тех же ресурсов (например, в электронике), тогда как другие требуют их периодического возобновления (к примеру, в химии) или даже могут быть уникальными (когда в ходе эксперимента разрушается вся установка или ее части).

Многие дистанционные лаборатории – особенно для проведения дистанционных экспериментов в физике, химии и робототехнике – имеют в своем составе веб-камеры, предназначенные для визуального контроля экспериментов [2, 7, 8].

Обобщая структурные решения для перечисленных РДЛ, можно выделить два их базовых варианта: 1) на основе фиксированного набора приборов с фиксированным же объектом (или набором объектов) исследований; 2) роботизированные лаборатории с фиксированным набором дополнительного оборудования и достаточно свободным выбором процесса реализации эксперимента и используемых объектов (обычно расходующихся в ходе таких экспериментов).

Существенным недостатком обоих вариантов представляется их высокая стоимость вследствие как наличия большого числа дорогостоящих измерительных, генерирующих и коммутирующих приборов – для случая 1, так и необходимости в дорогостоящих роботах – для случая 2, а также вследствие высокой стоимости программного обеспечения, необходимого для дистанционного управления и согласования работы приборов и роботов. Кроме того, к негативным факторам для случая 2 следует отнести сложность управления роботом в дистанционном режиме и высокую загрузку канала связи из-за использования видеокамер, а для случая 1 – низкую

гибкость системы. Единственный положительный момент, который можно отметить для варианта 2, – это гибкость роботизированных лабораторных систем.

Эффект повышения гибкости РДЛ в сравнении с вариантами [1, 6, 7] для сугубо цифровых систем можно получить за счет использования FPGA [9-12], представляющих собой массив электрически перепрограммируемых логических вентилях, которые можно программно сконфигурировать в изучаемую цифровую схему. Примером такой гибкой дистанционной лаборатории для экспериментов с реальными объектами может служить лаборатория, разработанная в рамках проекта PEARL [10]. Ее основой являются два компьютера – собственно сервер, выполняющий функции связи с локальной и глобальной сетями, и так называемый лаб-сервер (lab-server), выполняющий функции приборного интерфейса.

Лаборатория позволяет проводить эксперименты по программированию микроконтроллера 80C51, по изучению логических схем, использующих FPGA фирмы Xilinx, и эксперименты по изучению и применению интерфейсов для тестирования цифровых и аналого-цифровых схем по стандартам IEEE.

Использование в РДЛ подобных программно-конфигурируемых и программно-управляемых многофункциональных систем является весьма перспективным с точки зрения повышения их гибкости, многофункциональности и программируемости, что подчеркивается во многих публикациях [10-13]. Поэтому данные задачи можно рассматривать как одни из важнейших на пути развития современных технологий дистанционного образования и обучения. Кроме того, как уже отмечалось, важным вопросом является и стоимость таких многоцелевых РДЛ.

Сформулируем соответствующие требования к перспективным РДЛ более конкретно и перечислим их в порядке важности.

I. Максимальная многофункциональность РДЛ, а в идеале – их универсальность, то есть возможность перенастройки на проведение любых экспериментов, необходимых для освоения курса.

II. Функциональная полнота операций, используемых в РДЛ для построения различных экспериментов (которые обычно реализуются соответствующим набором функциональных блоков). С точки зрения математики функциональная полнота некоторой функциональной системы гарантирует реализацию в ней всего потенциала теоретически (и практически) возможных для этой системы процедур и процессов. То есть выполнение данного пункта в значительной степени гарантирует и выполнение п. I. Именно по этим причинам системы для дистанционного изучения логических элементов и простейших устройств из них проектируются на базе FPGA, представляющих собой наборы программируемых логических элементов из подходящего функционально-полного базиса.

III. Полная программируемость РДЛ для обеспечения полноценного дистанционного доступа к планированию, организации, выполнению и анализу итогов экспериментов и лабораторных работ в дистанционном режиме.

IV. Низкая стоимость оборудования и программного обеспечения (ПО) РДЛ.

Если в теоретическом аспекте пункты III и IV не вызывают особых проблем, то выполнение требований пунктов I и II для РДЛ нецифровой ориентации (т. е. предназначенных для практического освоения предметов, не связанных с изучением логических схем на базе FPGA) вызывает ряд сложных вопросов, и в первую очередь теоретического характера.

Например, при разработке программируемой «лаборатории на кристалле» Aqua-Core [14], которая потенциально вполне пригодна для реализации многофункциональной программируемой РДЛ по химии и связанным с ней дисциплинам, авторы

не смогли решить вопрос о функциональной полноте выбранного ими набора микро-технологических операций. Оставаясь в рамках традиционного рассмотрения функциональной полноты исключительно для технологии вычислений, т. е. базируясь на классическом подходе, связанном с моделью машины Тьюринга (м.Т.), они не справились с этой задачей, о чем честно признались в своей работе [14].

Между тем подход к аналогичным вопросам на основе нового научного направления, получившего рабочее название «Общая формальная технология» – ОФТ [15, 16, 17], позволяет подойти к их решению с более близких и более обоснованных позиций, включая технологии, не связанные с вычислительной математикой, но имеющие прямые аналоги в реальных технологиях, включая химию.

Согласно [15-17] подобные технологии можно задать парой множеств

$$T = \langle B, F \rangle, \quad (1)$$

где B – множество объектов, над которыми выполняются операции из конечного множества операций F , включающих как чисто технологические операции типа синтеза (соединения, склеивания, смешивания объектов) и декомпозиции (разъединения, разборки, разделения объектов), так и операции анализа (определения цвета, формы объекта – в том числе равенства форм двух объектов, его электропроводности и т.д.), а также их возможные комбинации. В общем случае любая операция $F_i, P_j \in F$ может быть записана в форме

$$Z_i(x_1, x_2, \dots, x_k; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \rightarrow \langle y_1, y_2, \dots, y_r; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m \rangle, \quad (2)$$

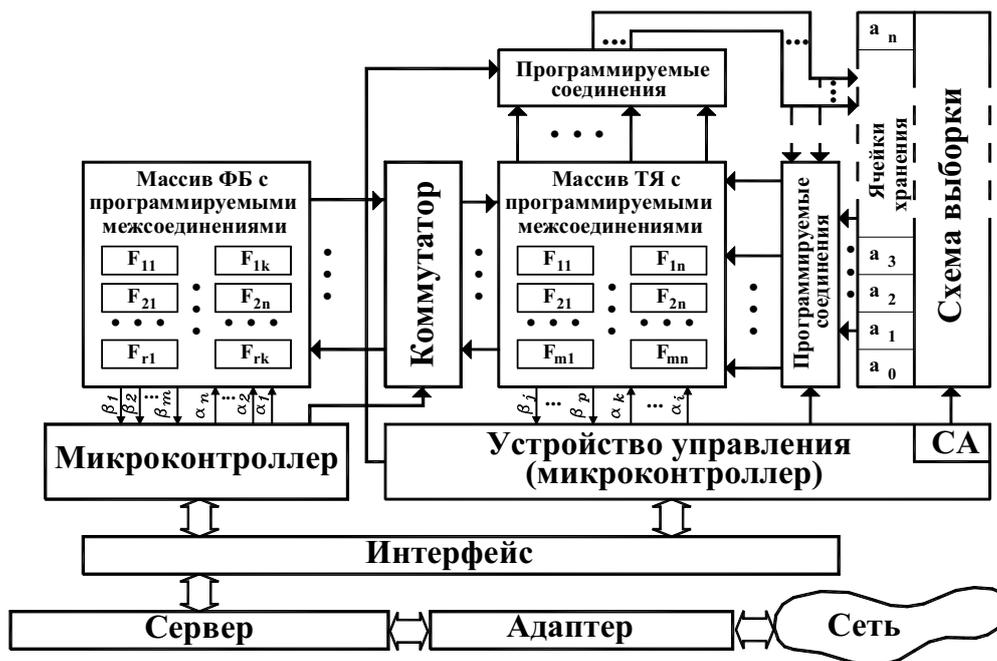
где $Z \in F$ – символ операции (анализа или технологической); $x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_r \in B$ – исходные объекты операции и объекты-результаты; $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ – числовые или нечисловые параметры операций; β_1, \dots, β_m – числовые или нечисловые параметры результатов операции (обычно операций анализа). Некоторые из перечисленных в (2) символов объектов и параметров могут отсутствовать.

Для достижения функциональной полноты технологий типа (1) существуют различные пути. Однако проведенный нами анализ показал, что все они сводятся, как правило, к наличию в них операций следующих типов:

- 1) достаточно разнообразный набор операций типа синтеза;
- 2) достаточно разнообразный набор операций типа декомпозиции (в принципе это условие не является критическим, но для многих технологий доказано, что наличие такого рода операций облегчает достижение их полноты);
- 3) в обязательном порядке – наличие операций анализа, причем желательно, чтобы такие операции отвечали сформулированным в [17] критериям «случайного стационарного отображения», т. е. на новых типах объектов давали различные непредсказуемые результаты даже в тех случаях, когда результаты таких операций (анализа) отображаются на двоичное множество $\{0, 1\}$.

Следует подчеркнуть, что первоначально условие полноты для технологий типа (1) сформулировано существенно отличным от условия функциональной полноты для систем математических функций, а именно как «возможность восстановления в заданной технологии любых допустимых для нее конструкций, даже если процесс синтеза (получения) таких конструкций на текущий момент неизвестен» [17]. В переводе на «технологии» вычислительной математики (например, на «технологии» частично-рекурсивных функций) это требование фактически означает возможность вычисления любого числа (любого математического объекта) с использованием операций соответствующей технологии (в нашем примере – с помощью базового набора частично-рекурсивных функций) и по смыслу вполне соответствует исходной трактовке понятия математической функциональной полноты, поскольку все вычисли-

мые объекты в математике иным образом, кроме как с использованием разнообразных композиций соответствующего базового набора функций (отвечающих условиям функциональной полноты), получены быть не могут. Именно по этим причинам условия «полноты технологий» для нематематических технологий и «функциональной полноты систем функций» для «технологий» вычислительной математики можно считать если и не полностью эквивалентными, то достаточно близкими по смыслу.



Архитектура, отвечающая основным требованиям к перспективным РДЛ:
СА – схема адресации ячеек хранения расходуемых материалов и объектов

Анализ возможных архитектур РДЛ с позиций ОФТ позволяет предложить следующее решение для перспективных РДЛ (см. рисунок). Архитектура отвечает требованиям пп. I-IV, выражениям (1), (2) а также подпунктам 1) – 3).

В отличие от решений, рассмотренных в [15-17], данная архитектура содержит два структурно очень похожих компонента – многоцелевую (многофункциональную) программируемую технологическую систему (МПТС) для проведения различных экспериментальных технологических процессов (справа) и аналогичную по структуре систему (слева) для организации обработки и преобразования сигналов на основе функционально-полного набора аналоговых и цифровых конфигурируемых ФБ, выполняющую роль программируемого многофункционального адаптера связи (МАС) различных датчиков, встроенных в МПТС, с устройством управления и через него – с основной программой РДЛ на сервере.

Технологические ячейки (ТЯ) МПТС выполняют в совокупности весь необходимый набор технологических и аналитических операций заданной *полной* технологии Т согласно выражениям (1), (2) и подпунктам 1) – 3).

В качестве устройств управления используются микроконтроллеры, вырабатывающие сигналы установки параметров ($\alpha_1, \dots, \alpha_n$) и анализирующие сигналы результаты аналитических операций (β_1, \dots, β_m).

Важной особенностью МАС, существенно снижающей общую стоимость РДЛ, является широкое использование концепции так называемых виртуальных приборов (ВП). Суть этой концепции заключается в том, что по мере необходимости в МАС программным путем (включая реконfigurирование ФБ) создаются структуры, выполняющие нужные измерительные и тестирующие функции.

Использование ВП, как уже отмечалось, существенно удешевляет систему, одновременно повышая ее гибкость. Этому же способствует и реализация программной оболочки РДЛ на бесплатных кросс-платформенных языках программирования типа Java. Кроме того, для выбранной структуры МПТС доказан ряд важных теорем (утверждений), гарантирующих ее многофункциональность (универсальность), гибкость и программируемость [16, 17].

Заключение. В статье предложены новые подходы и решения, позволяющие существенно продвинуться в плане преодоления наиболее существенных недостатков существующих РДЛ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. iLabs: Internet access to real labs – anywhere, anytime. Интернет-ресурс: <http://icampus.mit.edu/iLabs/default.aspx>.
2. Naef O. Real laboratory, virtual laboratory or remote laboratory: what is the most efficient way? // iJOE International Journal of Online Engineering – www.i-joe.org, 2006.
3. Gröber S., Vetter M., Eckert B., and Jodl Y.-J. Remotely controlled laboratories: Aims, examples, and experience // Am. J. Phys. 76 4&5, April/May 2008, pp. 374-378.
4. Учебная измерительная лаборатория с дистанционным доступом для общего и профессионального образования // В.К. Батоврин, А.С. Бессонов, Ю.В. Ефимов, О.Л. Заказов, В.В. Мошкин. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). – Москва, Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2002».
5. Пономарев С.В., Дивин А.Г., Чуриков А.А. Автоматизация теплофизических измерений и организация автоматизированного лабораторного практикума удаленного доступа на основе использования среды LABVIEW // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: Сб. тр. междунар. научн.-практич. конф., 14-15 ноября, 2003 г. - М.: РУДН, 2003, сс. 53-56.
6. Lab on the Web: Running Real Electronics Experiments via the Internet. Edited by Tor A. Fjeldly and Michael S. Shur. - John Wiley & Sons, Inc. 2003, pp. 1-47.
7. Fjeldly T.A., Strandman J.O., Berntzen R. LAB-on-WEB – A Comprehensive Electronic Device Laboratory on a Chip Accessible via Internet. In: Proceedings of International Conference on Engineering Education, August 18-21, 2002, Manchester, U.K., pp. 1-5.
8. MARVEL – Mechatronics Training in Real and Virtual Environments. Concepts, Practices, and Recommendations. Edited by: D. Müller. – Nationale Agentur Bildung für Europa beim Bundesinstitut für Berufsbildung (NA beim BIBB), D-53142 Bonn, 2005. – 100 p.
9. Rusten J., Kolberg S. Online FPGA laboratory for interactive digital design. In: Proceedings of International Conference on Engineering Education October 16-21, 2004, Gainesville, Florida.
10. Ferreira J.M.M., Costa R.J., Alves G.R., Cooper M. The PEARL Digital Electronics Lab: Full Access to the Workbench via the Web. In: Proceedings of 13th EAEEIE conference, New York, 2002.
11. Costa R., Alves G., Zenha-Rela M. Reconfigurable weblabs based on the IEEE 1451 std. // International Journal of Online Engineering (iJOE), Vol. 6, № 3, 2010, pp.18-25.
12. Easily integrable platform for the deployment of a remote laboratory for microcontrollers // García-Zubia J., Angulo I., Irurzun J., Orduña P., Ruiz J., Hernández U., Castro M., and Sancristobal E. // International Journal of Online Engineering (iJOE), Vol. 6, № 3, 2010, pp. 26-31.
13. Azad A.K.M. Internet Accessible Remote Experimentation: Setting the Right Course of Action // International Journal of Online Engineering, (iJOE), Vol. 6, № 3, 2010, pp. 4-12.
14. Aquacore: a programmable architecture for microfluidics / Amin A.M., Thottethodi M., Vijaykumar T.N., Wereley S., Stephen C., Jacobson S.J. // ACM SIGARCH Computer Architecture News archive, Vol. 35, № 2 (May 2007), pp. 254-265.

15. *Krylov S.M.* Formal technology and universal systems // Cybernetics and Systems Analysis (Springer, New York, ISSN 1060-0396), Part I, Vol. 22, №4, 1986, pp. 512-518; Part II, Vol. 22, №5, 1986, pp. 567-572.
16. *Krylov S.M.* Universal Programmable Completely Automated Factories-on-a-Chip. Proceedings of the 9th International Conference on the Commercialization of Micro and Nano Systems COMS2004. Aug. 29 – Sept. 2, 2004, Edmonton, Alberta, Canada. – MANCEF, Washington, 2004, pp. 269-273.
17. *Крылов С.М.* Формальная технология и эволюция. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 384 с.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2010 г.

UDC 004.771 + 004.388

MULTIFUNCTIONAL DISTANCE LABS FOR REAL EXPERIMENTS

S.M. Krylov, V.N. Tolchev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper deals with efficient architecture of remote labs for real experiments. The conditions, which provide maximum flexibility robustness and controllability of such systems are evaluated.

Keywords: *distance learning, real remote experiments, multifunctional remote labs, remote lab architecture for real experiments.*