

ГИБКАЯ АРХИТЕКТУРА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Е. Л. ВАССЕРМАН^{1,2,3}, Н. К. КАРТАШЕВ¹, О. В. ЖВАЛЕВСКИЙ¹, С. Б. РУДНИЦКИЙ¹

¹Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ewasser@ev7987.spb.edu

²Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,
191186, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждаются проблемы разработки гибких аппаратно-программных комплексов для физиологических исследований. Проанализирован наиболее общий случай: использование серийной медицинской аппаратуры в качестве составных частей комплекса. Для устранения ряда возникающих при этом проблем в качестве ядра комплекса предлагается использовать универсальное устройство, обеспечивающее синхронизацию всей аппаратуры и позволяющее расширять комплекс путем каскадирования. Программное обеспечение комплекса предлагается делать модульным и работающим на основе трех типов сценариев: аппаратной конфигурации, алгоритмов регистрации сигналов и обработки полученных данных. Система хранения данных при этом должна быть адаптивной, подстраиваемой под сценарий.

Ключевые слова: гибкая архитектура, аппаратно-программный комплекс, регистрация физиологических сигналов, полиграфические исследования, модуляризация, конфигурирование на основе сценариев

Введение. Аппаратно-программные комплексы (АПК), предназначенные для давно и широко используемых (рутинных) медицинских обследований, как правило, мало приспособлены или даже вовсе непригодны для научных исследований и внедрения их результатов в клиническую практику. Причина этого заключается в том, что при составлении технического задания на разработку подобных комплексов невозможно заранее определить набор регистрирующих устройств, необходимых для очередного исследования, и соответственно конфигурацию оборудования, а также последовательность и структуру накапливаемых и обрабатываемых данных. Поэтому при построении АПК для исследовательской деятельности и решения сложных диагностических задач представляется целесообразным использование гибкой архитектуры.

В общем случае для каждого регистрирующего, управляющего или стимулирующего устройства, входящего в состав комплекса, требуется специфическое программное обеспечение (ПО), являющееся в настоящее время основным инструментом исследователя во многих предметных областях. К сожалению, разработка ПО зачастую ведется непрофильными специалистами, что приводит к нестабильной или неточной работе ПО и, следовательно, к ошибочным результатам исследований. Это становится серьезной системной проблемой, которая подробно описана в работе [1], где намечены также и пути ее решения. Подходы к созданию ПО, предлагаемые в настоящей статье, позволят, по мнению авторов, несколько сгладить остроту этой проблемы при научном применении АПК.

Гибкость состава комплекса и „непредсказуемость“ его с точки зрения разработчика диктуют и соответствующие свойства ПО. Модификация ПО для каждой новой задачи представляется нерациональной — альтернативой является модульная архитектура ПО с возможностью добавления по мере необходимости как уже существующих, так и специально разработанных новых модулей.

Данная статья посвящена общим принципам построения АПК с гибкой архитектурой (далее — гибких АПК), ориентированных в первую очередь на использование в физиологических исследованиях. В статье не затрагиваются специальные вопросы обеспечения максимальной надежности ПО, защиты медицинской информации и контуров управления исполнительными устройствами, а также облегчения сертификации медицинских киберфизических систем: эти вопросы в той или иной степени раскрыты в работах [2—5].

Аппаратная архитектура гибких АПК. В различных областях экспериментальной и клинической физиологии часто возникает необходимость в полиграфической записи — синхронной регистрации нескольких сигналов биологического и технического происхождения. Измеряться могут как разноименные, так и одноименные параметры объекта исследования, а методы измерения могут быть основаны на одинаковых или разных физических принципах [6]. Конкретный набор синхронно регистрируемых сигналов определяется задачами самого исследования и может варьироваться при переходе от одной серии измерений к другой. Полиграфическая запись существенно расширяет возможности по комплексной обработке сигналов, обеспечивая робастность оценок и информативность исследования (см., например, [7—9]). Оптимальным, относительно гибкости всего комплекса и экономии средств при его создании, представляется использование в качестве интегрирующего элемента более или менее универсального синхронизатора [10].

Каждый из регистрируемых сигналов (электро-, механо-, фоно- или видеодиаграмма, параметр стимуляции исследуемого объекта, отметка значимого события, показатель работы аппаратуры и т. д.) в общем случае представляет собой временной ряд или сводится к нему с допустимой погрешностью. Готовые системы, способные синхронно регистрировать все интересующие исследователя сигналы, достаточно легко можно выбрать из серийно производимой аппаратуры, но только для проведения рутинных диагностических процедур. Аппаратура, пригодная для решения исследовательских задач, связанных с записью нестандартных наборов сигналов, на рынке отсутствует и чаще всего изготавливается по специальному заказу, что требует больших временных и материальных затрат.

Поэтому, как правило, сбор информации производится исследователем с помощью регистрирующих приборов, имеющихся в его распоряжении. В настоящее время каждый из этих приборов чаще всего тоже представляет собой АПК, в состав которого входит персональный компьютер (ПК), работающий под управлением операционной системы (ОС) с разделением времени (например, Microsoft Windows, UNIX-подобные системы). Во избежание двусмысленности далее будем такой АПК называть „прибором“. В среде ОС запускается разработанное создателями прибора прикладное ПО, взаимодействующее с его инструментальной частью: настройка параметров записи, прием потока данных (результатов измерений) и т. п. Это ПО обычно является закрытым.

Все это порождает проблему синхронизации сигналов, записанных различными приборами, особенно если точность синхронизации должна быть высокой. Все сигналы регистрируются не связанными между собой приборами, каждый из которых функционирует в собственном времени. Даже если удастся установить ПО всех приборов на один ПК или синхронизировать системные таймеры всех используемых ПК, время для всех приборов не станет единым, поскольку работают они под управлением ОС с разделением времени, а сами являются закрытыми системами с неизвестным и, более того, переменным запаздыванием. Таким образом, невозможно собственными средствами всех задействованных приборов отметить в записях момент какого-либо значимого для исследования события, например запланированного внешнего воздействия — звукового, визуального или иного стимула.

В такой ситуации целесообразно не менять полностью приборную базу при появлении потребности в новых каналах, а лишь пополнять ее недостающими приборами, сохраняя, если нужно, имеющиеся. Однако для того чтобы производить с помощью разнородных

приборов многоканальную запись в едином времени, необходимо синхронизировать все приборы между собой. В случаях когда синхронизируемая аппаратура не требует специальных мероприятий по обеспечению совместимости на физическом уровне (как, например, при комбинировании электроэнцефалографической аппаратуры и функционального магнитно-резонансного томографа, которые приходится частично разносить и во времени, и в пространстве [8, 11]), предлагается осуществлять это при помощи специального внешнего устройства — синхронизатора. Основная функция этого устройства — формирование импульсов для подачи на свободные входы регистрирующей аппаратуры или, если таких входов нет, наложение импульсов на измеряемый аппаратурой сигнал. Предлагаемое решение позволяет преодолеть ограничения, присущие всем вариантам программной синхронизации, благодаря тому, что формируемые синхронизатором импульсы относятся к той же временной шкале, что и сигналы, регистрируемые приборами; при этом импульсы подвергаются такой же предварительной обработке, фильтрации, оцифровке и прочим преобразованиям, что и основной измеряемый сигнал. Более того, синхроимпульсы, проходящие по всему каналу распространения сигнала, позволяют отслеживать состояние самой регистрирующей аппаратуры.

Такой синхронизатор — как устройство с открытой архитектурой — становится основой комплекса регистрирующих приборов, легко адаптируемого для решения различных исследовательских задач. Особые требования к синхронизируемой аппаратуре в этом случае минимальны: либо (лучше) наличие одного свободного цифрового или аналогового канала, либо принципиальная техническая возможность наложения синхроимпульсов на один из регистрируемых сигналов. Мощность, длительность и форма синхроимпульсов, а также частота их следования задаются в зависимости от характеристик синхронизируемых приборов, схемы исследования и планируемых методов последующей обработки данных.

Для снятия ограничения на количество синхронизируемых приборов в схеме синхронизатора должно быть предусмотрено каскадирование с поддержкой на аппаратном уровне. За счет этого N синхронизаторов, соединенных между собой через отдельный интерфейс, будут по отношению к программному обеспечению высокого уровня и с точки зрения пользователя представлять собой единое устройство, имеющее в N раз больше входов и выходов, чем один синхронизатор [10].

В 2010—2012 гг. авторами настоящей статьи было разработано и успешно испытано устройство, получившее название „Полиграф-синхронизатор ЛБМИ-001“ [10], которое объединяет в себе функцию синхронизации внешних устройств и ряд функций, обычных для традиционного полиграфа (используемого как „детектор лжи“). Чтобы обеспечить возможность изменения и расширения списка синхронизируемых приборов, к набору выходов и входов синхронизатора было добавлено несколько свободных каналов с настраиваемыми характеристиками. Область применения АПК на базе такого синхронизатора шире, чем сугубо научные исследования: во-первых, если решаемая в медицинском учреждении диагностическая задача еще не стала повседневной процедурой, могут быть сэкономлены значительные материальные и технические средства за счет рекомбинации аппаратуры с сохранением ядра комплекса и некоторых подключаемых к нему приборов; во-вторых, после нахождения эффективных с точки зрения диагностики вариантов конфигурации и их апробации АПК можно коммерциализировать, реализовав удачную его конфигурацию в виде самостоятельного прибора с заданным набором функций.

Таким образом, предложенный подход к комплексным измерениям, проводимым с использованием закрытых аппаратно-программных комплексов, позволяет преодолеть ряд описанных выше проблем и предоставляет исследователю принципиально новую возможность — оперативно распоряжаться всей имеющейся аппаратурой как адаптивной к решаемым задачам матрицей диагностических ресурсов.

Проблемы построения ПО гибких АПК. К функциям рассматриваемых гибких АПК относится не только сбор „сырых“ данных. В ходе научных исследований обработка данных в основном осуществляется не в реальном времени, поскольку заранее не всегда известны методы, позволяющие решить конкретную задачу. Тем не менее некоторые вычисления целесообразно производить непосредственно во время измерения. К таким вычислениям относятся, например, определение традиционных для медицинской диагностики усредненных характеристик пациента, рассчитываемых в скользящем временном окне (частота сердечных сокращений, дыхательных движений и т.п.), распознавание требующих вмешательства патологических паттернов мониторируемых сигналов или их параметров, от которых зависит дальнейший ход эксперимента (см., например, [12]). Желаемый набор вычислительных процедур также не всегда можно определить заранее, поэтому в ПО АПК должна быть предусмотрена возможность их встраивания уже в процессе его эксплуатации.

Однако требования к ПО АПК не ограничиваются модульностью: при использовании одной и той же конфигурации оборудования могут быть реализованы различные сценарии исследования. При разработке ПО трудно или невозможно определить, какую последовательность функциональных проб, какой набор измеряемых параметров и какие условия выберет оператор-физиолог. Чем шире набор функций АПК, тем выше неопределенность. Вследствие расширяемости и каскадируемости устройства „ЛБМИ-001“ АПК на его основе демонстрирует один из крайних вариантов этой неопределенности. С другой стороны, чем выше гибкость АПК, тем выше вероятность некорректной конфигурации комплекса и появления технических артефактов в получаемых данных, соответственно тем более высокий уровень компетенции требуется от его пользователя.

Описанные неопределенности (конфигурация оборудования, сценарии исследования и методы оперативной обработки данных) порождают ряд проблем при разработке ПО; к наиболее существенным относятся выбор интерфейса пользователя и выбор структуры хранения данных, полученных в ходе исследований.

Общие принципы архитектуры ПО гибких АПК. При разработке пользовательского интерфейса следует учитывать, что конечный пользователь АПК, как правило, не является специалистом по информационным технологиям (ИТ). Поэтому наиболее очевидное решение для обеспечения гибкости интерфейса — встраивание в ПО языка программирования и доступ к базовым функциям комплекса и графическим элементам управления — в этом случае не будет достаточным. Желательно использовать более высокий уровень абстракции и предложить пользователю своеобразный „конструктор“ интерфейса. Более высоким уровнем абстракции является сценарий, управляющий нижележащими системой хранения и интерфейсом пользователя.

К структуре хранения данных, полученных в ходе исследований, также предъявляется требование универсальности. От ИТ-специалиста, обслуживающего АПК, требуется хорошее знание особенностей генерации данных каждым модулем ПО, в противном случае даже незначительная ошибка может остаться незамеченной и породить вторичные артефакты на этапе обработки и анализа данных. Лучшим решением представляется разработка универсальной структуры для хранения данных, позволяющей охватить все возможные сценарии использования АПК. При этом, учитывая сложность и многомерность данных, необходимы уникальные идентификаторы для пациента, визита пациента, исследования в рамках визита, набора однотипных данных в рамках исследования.

Кроме того, чтобы минимизировать вероятность пропуска значимого события при использовании столь гибкого АПК, необходимо предусмотреть ведение двух протоколов: неотключаемого полного протокола всех событий (включая действия пользователя), конфигурации и состояния оборудования, а также настраиваемого пользовательского протокола по его требованию.

Для повышения качества физиологических измерений во многих случаях желательно обеспечить достаточный уровень автоматизации, что позволяет минимизировать влияние случайных факторов на характеристики предъявляемых стимулов и управляющие воздействия, а также на процессы измерения. Следовательно, каждый новый сценарий исследования должен поддерживаться ПО, желательно на уровне пользовательского интерфейса. Например, если по плану эксперимента различные функциональные пробы выполняются последовательно, автоматизация запуска соответствующих модулей ПО позволит не только обеспечить равные задержки между пробами у различных пациентов, но и исключить человеческий фактор. Когда появляются, например, новые типы физиологических сигналов, или уже известные пробы должны быть повторены, система продолжает работать с сохранением прозрачности для пользователя, а перестройка в нижележащих системах происходит автоматически.

Возможны как минимум два типа сценария — регистрации и обработки. Причем сценарии обработки делятся на оперативные и отсроченные: в первом обработка и анализ известными методами производится сразу (например, для предоставления информации больному или для архивирования), а во втором часть регистрируемых данных откладывается для последующей обработки и углубленного анализа.

Заключение. Создать полностью универсальную систему из закрытых составных элементов, выпускаемых разными производителями, и универсальное исследовательское ПО к ней невозможно. Однако предложенный в данной статье общий подход к построению гибкой архитектуры исследовательских АПК и введенные уровни абстракции позволяют преодолеть основные трудности. Ключевыми особенностями таких АПК должны стать:

- интеграция как регистрирующей, так и управляющей аппаратуры на базе внешнего синхронизирующего устройства;
- каскадируемость синхронизатора с поддержкой на аппаратном уровне;
- использование настраиваемых синхроимпульсов, проходящих по всему каналу распространения регистрируемого сигнала;
- модульная архитектура ПО с единообразным интерфейсом (адаптированным к задачам каждого модуля) и возможностью подключения новых модулей;
- использование настраиваемых пользователем сценариев исследования, включающих разные конфигурации оборудования и различные алгоритмы сбора и обработки данных;
- универсализация системы идентификаторов и базы регистрируемых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goble C. Better software, better research // IEEE Internet Computing. 2014. Vol. 18, N. 5, P. 4—8. DOI: 10.1109/MIC.2014.88.
2. Lee I., Sokolsky O., Chen S., Hatcliff J., Jee E., Kim B.G., King A., Mullen-Fortino M., Park S., Roederer A., Venkatasubramanian K. Challenges and research directions in medical cyber-physical systems // Proc. of the IEEE. 2012. Vol. 100, N. 1. P. 75—90. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2165270.
3. Silva L. C., Almeida H. O., Perkusich A., Perkusich M. A model-based approach to support validation of medical cyber-physical systems // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 27625—27670. DOI: 10.3390/s151127625.
4. Lee E. A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 4837—4869. DOI: 10.3390/s150304837.
5. Silva L. C., Perkusich M., Almeida H. O., Perkusich A., Lima M. A. M., Gorgônio K. C. A baseline patient model to support testing of medical cyber-physical systems // MEDINFO 2015: eHealth-enabled Health: Proc. of the 15th World Congress on Health and Biomedical Informatics / Eds.: I. N. Sarkar et al. Amsterdam; Washington, DC, USA: IMIA and IOS Press, 2015. P. 549—553. (Ser. Studies in Health Technology and Informatics; Ebook: Vol. 216). DOI: 10.3233/978-1-61499-564-7-549.

6. Рудницкий С. Б., Иванцевич Н. В., Курпанев А. В. Принципы построения системы предупреждения несанкционированного использования воздушных судов на основе использования биометрических методов // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2012. № 176(2). С. 153—158.
7. Бабич О. А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
8. Storti S. F., Formaggio E., Franchini E., Bongiovanni L. G., Cerini R., Fiaschi A., Michel C. M., Manganotti P. A multimodal imaging approach to the evaluation of post-traumatic epilepsy // Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine. 2012. Vol. 25. P. 345—360. DOI: 10.1007/s10334-012-0316-9.
9. Вассерман Л. И., Ананьева Н. И., Вассерман Е. Л., Иванов М. В., Мазо Г. Э., Незнамов Н. Г., Горелик А. Л., Ежова Р. В., Еришов Б. Б., Сорокина А. В., Янушко М. Г. Нейрокогнитивный дефицит и депрессивные расстройства: структурно-функциональный подход в сравнительных многомерных исследованиях // Обозрение психиатрии и медицинской психологии им. В. М. Бехтерева. 2013. № 4. С. 58—67.
10. Рудницкий С. Б., Вассерман Е. Л., Карташев Н. К., Жвалевский О. В. Комплексование измерений в физиологических исследованиях: программно-аппаратный комплекс на основе внешнего синхронизирующего устройства // Биотехносфера. 2012. № 3—4. С. 72—77.
11. Gotman J., Kobayashi E., Bagshaw A. P., Bénar C.-G., Dubeau F. Combining EEG and fMRI: a multimodal tool for epilepsy research // J. of Magnetic Resonance Imaging. 2006. Vol. 23. P. 906—920. DOI: 10.1002/jmri.20577.
12. Попова Е. А., Вассерман Е. Л., Карташев Н. К. Дихотическое прослушивание речи с точки зрения статистики: гипергеометрическое распределение и случайные блуждания // Материалы IX Междунар. науч. конф. „Системный анализ в медицине“ (САМ 2015). Благовещенск: ДНЦ ФПД, 2015. С. 35—38.

Сведения об авторах

- Евгений Львович Вассерман** — канд. мед. наук; СПИИРАН, лаборатория биомедицинской информатики; СПбГУ, кафедра организации здравоохранения; РГПУ им. А. И. Герцена, кафедра основ коррекционной педагогики; E-mail: ewasser@ev7987.spb.edu
- Николай Константинович Карташев** — СПИИРАН, лаборатория биомедицинской информатики; науч. сотрудник; E-mail: kolq@spiiras.ru
- Олег Валерьевич Жвалевский** — СПИИРАН, лаборатория биомедицинской информатики; науч. сотрудник; E-mail: ozh@spiiras.ru
- Сергей Борисович Рудницкий** — д-р техн. наук; СПИИРАН, лаборатория биомедицинской информатики; E-mail: sbr@spiiras.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
01.06.16 г.

Ссылка для цитирования: Вассерман Е. Л., Карташев Н. К., Жвалевский О. В., Рудницкий С. Б. Гибкая архитектура аппаратно-программных комплексов для физиологических исследований // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 11. С. 952—958.

FLEXIBLE ARCHITECTURE OF HARDWARE-SOFTWARE COMPLEXES FOR PHYSIOLOGICAL RESEARCHES

E. L. Wasserman^{1,2,3}, N. K. Kartashev¹, O. V. Zhvalevsky¹, S. B. Roudnitsky¹

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, Russia
E-mail: ewasser@ev7987.spb.edu

² St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Russia

³ Herzen State Pedagogical University of Russia, 191186, St. Petersburg, Russia

The problems of design of flexible PC-controlled systems for physiological researches are discussed. The most common case of using ready-made medical subsystems in building of the resulting system has been analysed. To mitigate inherent to this case problems as a core part is introduced the universal device synchronizing other parts of system also allowing its cascading. Considering the software design the following principles are proposed: modularity; script-based configuring of 1) hardware, 2) algorithms of registering of signals, 3) data processing algorithms; and also using of adaptive storage system.

Keywords: flexible architecture, PC-controlled system, physiology signals acquisition, polygraph investigation, modularization, script-based configuring

Data on authors

- Evgeny L. Wasserman** — MD, PhD; SPIIRAS, Laboratory of Biomedical Informatics; St. Petersburg State University, Department of Healthcare Management; Herzen State Pedagogical University of Russia, Department of Foundations of Special Education; E-mail: ewasser@ev7987.spb.edu
- Nikolay K. Kartashev** — SPIIRAS, Laboratory of Biomedical Informatics; Scientist; E-mail: kolq@spiiras.ru
- Oleg V. Zhvaleyvsky** — SPIIRAS, Laboratory of Biomedical Informatics; Scientist; E-mail: ozh@spiiras.ru
- Sergey B. Roudnitsky** — Dr. Sci.; SPIIRAS, Laboratory of Biomedical Informatics; Scientist; E-mail: sbr@spiiras.ru

For citation: *Wasserman E. L., Kartashev N. K., Zhvaleyvsky O. V., Roudnitsky S. B.* Flexible architecture of hardware-software complexes for physiological researches // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 11. P. 952—958 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-952-958