

## РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ И ИНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В. Е. Анциперов<sup>1</sup>, Г. К. Мансуров<sup>1</sup>, О. В. Евсеев<sup>1,2</sup>, А. А. Бельчик<sup>2</sup>,  
И. А. Ничипорук<sup>3</sup>, Б. В. Моруков<sup>3</sup>, О. И. Орлов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>3</sup>ГНЦ РФ - Институт медико-биологических проблем РАН

Получена 10 февраля 2011 г.

**Аннотация.** Изложены результаты исследований, посвященных вопросам построения информационных систем беспроводного мониторинга распределенных параметров (в частности, медицинских). Акцент в исследованиях сделан на разработку методов сопряжения в рамках таких систем ряда разнородных (гетерогенных) сетевых технологий. Приводятся результаты разработки действующего образца системы, использующего стандарт беспроводных сетей IEEE 802.15.4. Также обсуждается опыт тестирования образца в условиях испытательного стенда проекта МАРС-500 при моделировании работы в скафандре после высадки космонавтов на поверхность планеты.

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети, информационные распределенные системы, гетерогенные сети, мониторинг функционального состояния человека.

**Abstract.** The paper presents results of investigating the development of wireless information systems designed to monitor distributed parameters (in particular medical ones). The conjugation of heterogeneous network technologies in such systems is the focus of our attention. We discuss the results of implementing a system prototype based on wireless networking standard IEEE 802.15.4. We also present the results of testing this prototype in project Mars-500 (experiment of simulation the work in spacesuit after landing of cosmonauts on the surface of the planet).

**Keywords:** wireless monitoring, distributed information system, heterogeneous network.

Современный уровень развития информационной техники и технологий позволяет создавать устройства и системы различного назначения и масштаба для широкого спектра задач мониторинга. Мониторинг пространственно распределенных параметров предполагает существенное использование сетевых технологий, где в последнее время также наблюдается впечатляющий прогресс. Этот прогресс характеризуется следующими главными тенденциями: специализация сетей, изменение характера сетевых приложений и совместное использование сетей разных типов. Отметим, что в связи с этим сформировалась следующая классификация сетей: наряду с глобальными сетями WAN (Wide Area Network) типа Интернет и корпоративными сетями LAN (Local Area Network) на сегодняшний день широко используются и, так называемые, персональные сети PAN (Personal Area Network).

Сети класса PAN, ответственные, как правило, за первичный сбор данных обычно имеют простую архитектуру, обладают малым энергопотреблением, легко разворачиваются. Однако, область их охвата ограничивается отдельной комнатой, домом, компактной группой людей (например, пациентов палаты клиники) и т. д., поэтому для представляющих практический интерес распределенных систем сбора данных - в масштабах отделения, лечебного учреждения и т. п. - не удастся ограничиться только этой одной технологией. Решение проблемы заключается в совместном использовании персональных, локальных (LAN) и глобальных сетей (WAN).

В данной статье авторы предлагают результаты своих исследований системы автоматизированного мониторинга, основанной на технологиях распределенного хранения, обработки данных, а также дистанционного телекоммуникационного доступа к ним и нацеленной на повышение эффективности управления при сочетании специализированных и сугубо информационных подходов в здравоохранении или других сферах деятельности.

Разработка любой распределенной системы осуществляется на основе:

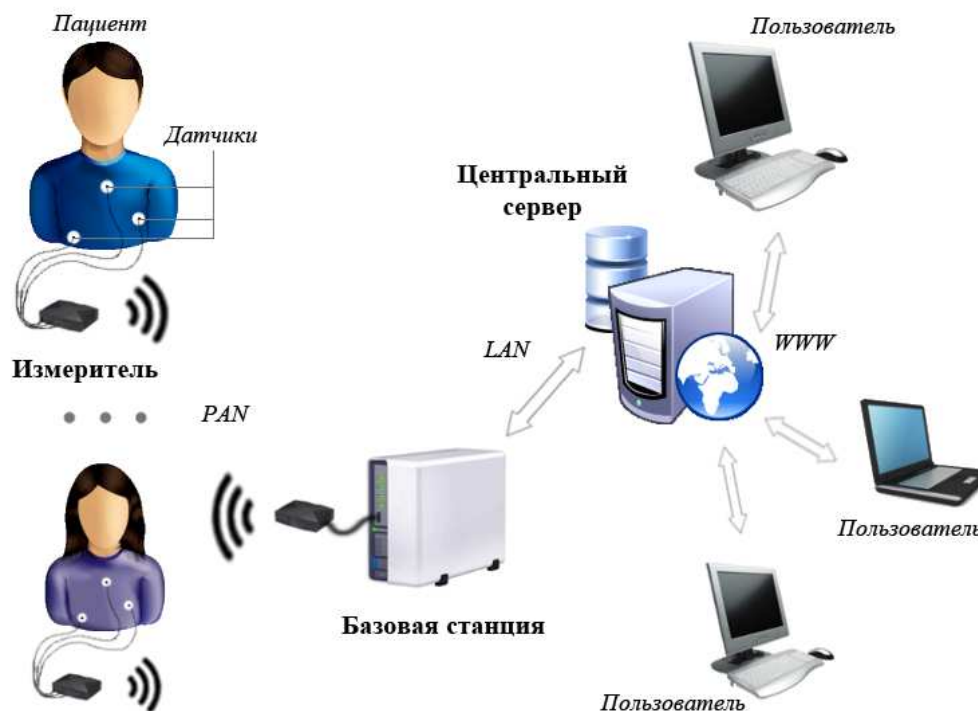
- ▲ анализа, моделирования и оптимизации информационных потоков с учетом применяемых дистанционных технологий;
- ▲ формирования элементно-технической базы и выработки сценариев работы каждой из подсистем;
- ▲ реализации пользовательских функций доступа и управления системой.
- ▲ проведения полномасштабного тестирования на специально созданном испытательном стенде.
- ▲ выявления достоинств и недостатков системы, а также определения направления возможного расширения функциональности системы.

Помимо инженерных задач, неизбежно возникающих при разработке каждой из подсистем, основная проблема, которую необходимо решать в гетерогенных (то есть смешанных) сетях, является проблема их "бесшовного" соединения. В принципе, эту проблему приходится решать для каждого из уровней открытой модели взаимодействия систем (OSI). Наш опыт в разработке показал, что для решения этой проблемы могут потребоваться большие усилия и далеко не одна итерация в проектировании программных сценариев, форматов данных, регламентов обращения компонент к сети и т.д. [1]. Вместе с тем, освоение и использование наработанных в мире средств и методологий проектирования может существенно облегчить этот этап разработки. В частности, для стандартизации и реализации форматов сообщений очень эффективной является сумма технологий, объединенная универсальной не зависящей от платформ спецификацией XML. Она обеспечивает концепции и технологии для гибких, открытых, и стандартизованных решений проблем хранения и обмена данными. Достоинством XML является его ориентация на возможность полной автоматизации обработки электронных сообщений (содержащих структурированные данные) компьютерными системами.

XML предоставляет весьма широкий спектр средств. Однако, проектирование системы с нуля даже при наличии подходящих средств может

оказаться весьма тяжелой задачей. К счастью, среди спецификаций XML есть специально разработанная для обмена данными в сетях технология SOAP. Структура SOAP сообщения состоит из обязательных разделов – <soap:Header> и <soap:Body> – заголовка и тела, что весьма напоминает оформление других, низкоуровневых протоколов. Однако, по сравнению с такими протоколами содержание этих разделов может быть произвольным и определяется полностью разработчиком. В теле обычно находятся собственно данные, причем их структура может быть сколь угодно сложной и задается глубиной вложения тэгов. Также следует отметить, что в SOAP реализована развернутая система типизации данных. Все это предоставляет разработчику практически неограниченные возможности для формирования собственных протоколов верхнего уровня для решения отмеченных выше задач согласования, синхронизации, поддержки целостности данных в сети.

Имеющийся у нас опыт по созданию сенсорных сетей на основе сопряжения разнородных каналов связи с помощью WEB технологии SOAP [2] лег в основу архитектуры проектируемой информационной системы мониторинга.



**Рис. 1.** Принципиальная схема архитектуры системы мониторинга.

Архитектура системы мониторинга пациентов представлена следующими элементами: измерители, базовые станции, центральный сервер (рис. 1).

Измерители (сенсоры) – это узлы беспроводной персональной сети для снятия и передачи показаний датчиков. Базовая станция – координатор беспроводной сети, отвечающий за управление сенсорами, прием и накопление данных. Центральный сервер обеспечивает основные функции системы и предоставляет пользователям доступ к ним через веб-интерфейс.

В предлагаемой системе сенсор представляет собой электронную плату в корпусе карманного формата с управляющим микроконтроллером, автономным возобновляемым источником питания, различными измерительными датчиками и приемо-передатчиком одного из стандартов персональных беспроводных сетей (Bluetooth, IEEE 802.15.4/Zigbee, Wi-Fi и др.). Базовой станцией в зависимости от масштаба системы и объемов снимаемых данных служит либо обычный персональный компьютер, либо сервер, с подключенным к нему устройством сопряжения с выбранной беспроводной сетью PAN. Централизованное хранилище данных может располагаться либо на базовой станции, либо на центральном сервере, либо на отдельной машине, что определяется конкретными задачами мониторинга и составом звеньев системы. Сервисы информационного портала, обеспечивающие доступ к централизованному хранилищу данных, предназначены для поддержания основных функций системы: регистрации пациентов и измерителей, закрепления определенных сенсоров за пациентами, пользовательского управления системой, мониторинга состояния здоровья с сохранением показаний, просмотра и дальнейшего анализа данных персоналом.

С точки зрения пользователя система является набором WEB-интерфейсов. Интерфейсы предназначены для доступа пользователя к основным функциям системы посредством WEB-сервисов. Сервисы осуществляют доставку данных в формате XML в виде SOAP сообщений, т.е. без инструкций по их представлению. Помимо данных пользователь может запросить загрузить

другую форму. При этом обращение происходит не к WEB-сервису, а непосредственно к серверу в виде обычного запроса XML файла разметки, которая на стороне клиента, при помощи связанных таблиц стилей XSLT, преобразуются в понятный браузерам XHTML формат (рис. 2).

Такое решение позволяет развязать уровни бизнес-логики системы и представления данных. В частности, при неизменном первом второй может быть заменен специализированным программным обеспечением клиента.

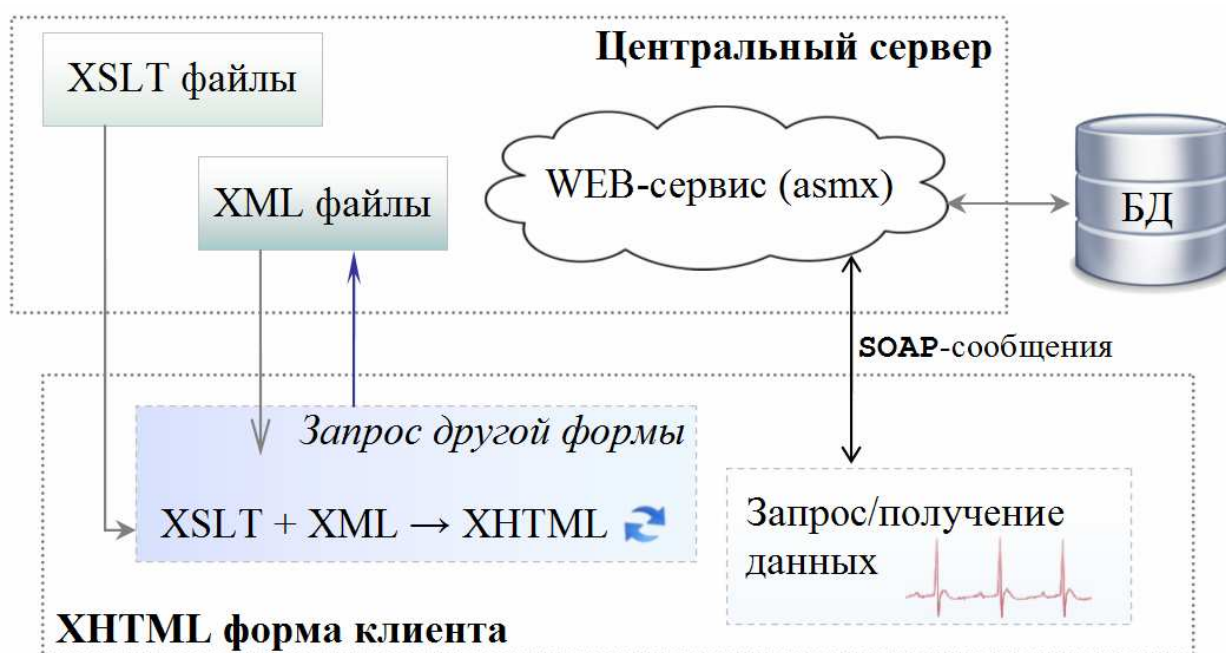


Рис. 2. Схема взаимодействия клиента с сервером.

Как можно заметить, уже сама предложенная концепция построения информационной системы беспроводного мониторинга, в отличие от некоторых аналогичных систем [3], избавляет пользователя от необходимости установки дополнительного программного обеспечения, хотя при этом не исключает возможность его создания и полноценного использования. Для доступа ко всем основным функциям системы достаточно обычного браузера.

Любые подобные проекты требуют как минимум одного варианта технического воплощения и тщательного тестирования для выявления достоинств и недостатков работы как каждой из подсистем в отдельности, так и их взаимодействия в целом. Для этого необходимо сформировать элементно-

техническую базу, выработать сценарий работы для каждой из подсистем, реализовать пользовательские функции доступа и управления системой.

В качестве приемо-передатчиков для построения персональной беспроводной сети были выбраны малогабаритные модули XBee™ OEM RF стандарта IEEE 802.15.4. XBee содержит встроенный протокол пакетной передачи данных с проверкой целостности передаваемой информации [4]. Это позволяет при минимальных программных затратах быстро разрабатывать специализированные сенсорные беспроводные сети. Управление модулем XBee осуществляется через асинхронный последовательный порт UART.

Дополнительным достоинством модулей XBee™ OEM RF стандарта IEEE 802.15.4. является относительно низкое потребление энергии и небольшая мощность передатчика, что существенным образом снижает воздействие ЭМИ гигагерцового диапазона на организм человека.

В общем виде схема одного аналогового датчика состоит из инструментального усилителя, фильтров нижних и верхних частот, построенных как полосовые усилители [5]. Суммарное усиление канала имеет заданные метрологические характеристики, и выходной сигнал усилителя подается на вход АЦП микроконтроллера. В качестве источника могут использоваться сигналы измерителей витальных параметров (в нашем случае это сигналы ЭКГ, пульсовой волны и дыхания). Для более полного тестирования системы кроме аналоговых датчиков, измеритель так же может снимать показания с цифрового термометра фирмы Dallas (интерфейс связи 1-Wire).

В качестве управляющего микроконтроллера используется STM32F103CB фирмы STMicroelectronics – 32-разрядный высокопроизводительный ARM микроконтроллер на базе ядра Cortex™-M3 [6]. Стоит отметить, что на плате измерителя аналоговые датчики присоединяются к одному из каналов АЦП микроконтроллера. Это означает, что в созданном варианте системы на

STM32F103CB, возможно подключение к измерителю до 16 аналоговых датчиков. Внешний вид измерителя представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Блок регистрации витальных функций (БРВФ).

Базовая станция представляет собой обычный персональный компьютер, с подключенным к нему через USB-порт устройством сопряжения с приемопередатчиком XBee. В системе общение базовой станций с сенсорами происходит путем обмена по беспроводному каналу заранее оговоренными типами сообщений.

Сценарий работы измерителя реализован на языке Си, а базовой станции – в виде Java-приложения, осуществляющего управление сенсорами и обеспечивающего сбор данных с датчиков.

В качестве СУБД централизованного хранилища данных выбран свободно распространяемый продукт фирмы Oracle MySQL Community Edition [7].



Прикладной уровень системы реализован серверными WEB-расширениями на основе Internet Information Services (IIS) компании Майкрософт [8], представляющих собой ASP-приложения, предназначенные для (опосредованного через БД) обмена данными между измерителями и пользователями. В генерируемые приложениями ASP страницы включены сценарии интерактивного взаимодействия пользователей с системой.

И базовая станция, и база данных, и центральный сервер в реализованном варианте физически располагаются на одном персональном компьютере.

Пользователь осуществляет управление системой через WEB-интерфейсы, которые представлены рядом вызывающих друг друга форм (рис. 4).

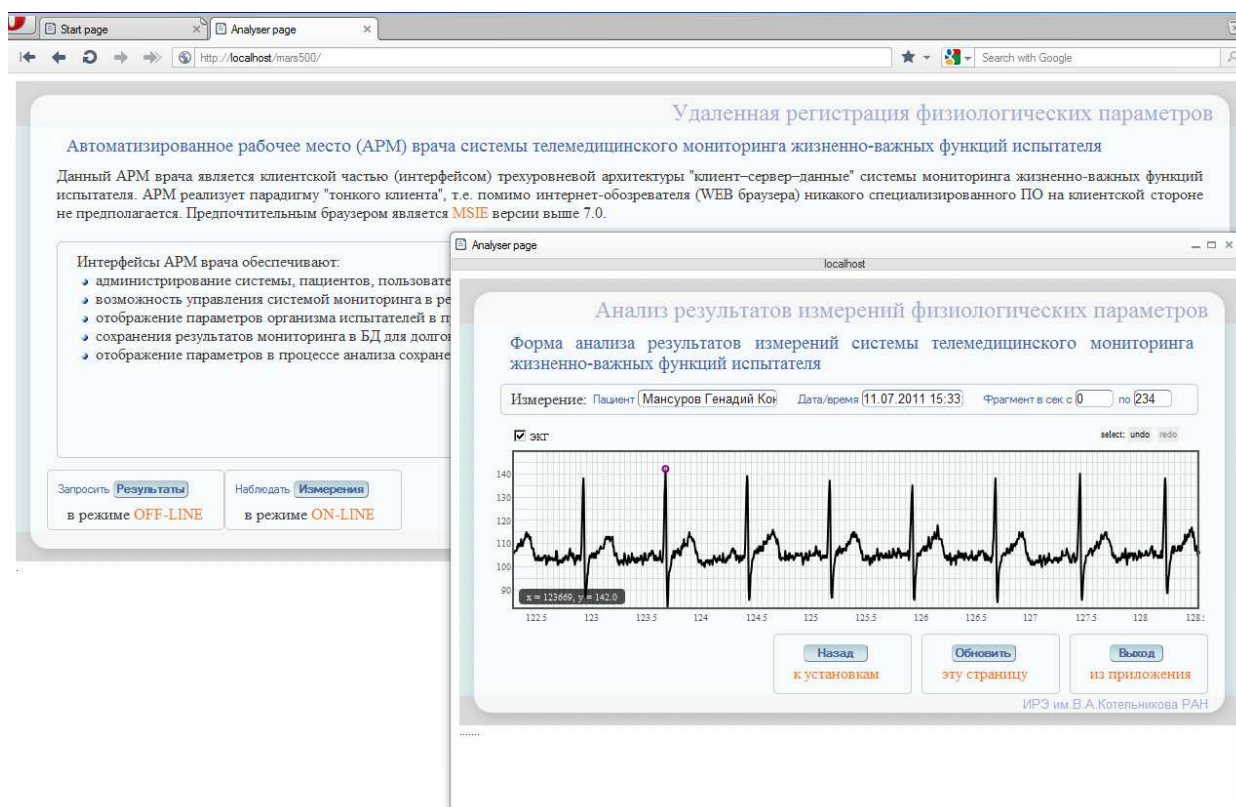


Рис. 4. Экранные формы WEB-интерфейса пользователя в браузере Opera.

Изложенная выше техническая реализация разработанной авторами распределенной информационной системы беспроводного мониторинга предназначена для автоматизированного сбора, передачи на основе беспроводных сетей стандарта IEEE 802.15.4 (2.4ГГц), обработки и накопления

значительных объемов информационных сигналов с датчиков измерителей, которые установлены на испытателях.

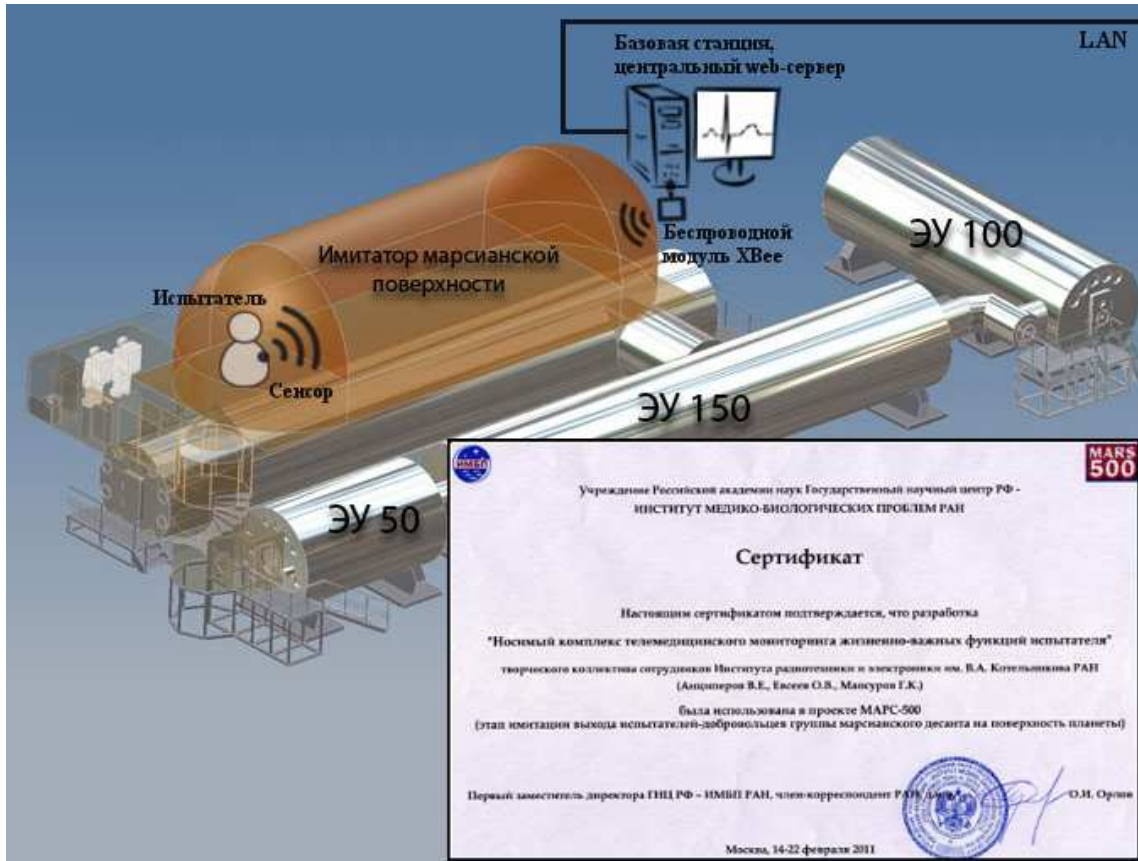
Для специализированных информационных систем их полномасштабное тестирование предполагает создание специального испытательного стенда. Благодаря заключенному Институтом радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН и Институтом медико-биологических проблем РАН Договору о научном сотрудничестве в 2010-2011 г. по проекту МАРС-500, оказалось возможным использовать в качестве основы стенда развернутый в ИМБП медико-технический экспериментальный комплекс [9].

Долгосрочный проект МАРС-500 по моделированию полета на Марс начат ИМБП в 2009 г. Целью эксперимента является изучение взаимодействия «человек – окружающая среда», получение данных о состоянии здоровья и работоспособности человека, длительно находящегося в условиях изоляции при моделировании основных особенностей марсианского полета (большая длительность, автономность, лимитированность ресурсов, задержка связи). Участие ИРЭ в проекте МАРС-500 выразилось в разработке и тестировании системы аппаратно-программных средств дистанционной регистрации физиологических показателей организма испытателя на этапе имитации высадки на поверхность планеты.

С помощью реализованной на основе описанных выше подходов системы "Носимый комплекс телемедицинского мониторинга жизненно важных функций испытателя" в ходе этапа тестирования информационной системы были произведены исследования по дистанционному on-line мониторингу функционального состояния космонавтов во время имитационного выхода испытателей на поверхность планеты в программе МАРС-500 (рис. 5).

В ходе стендового эксперимента на основе реальных данных создавались масштабные модели и сценарии тестирования системы. Тестирование последовательно проводилось как на уровне отдельных компонент системы, так и на уровне проверки функциональности системы в целом. Для тестирования

производительности и надежности системы, характера работы в зависимости от ограниченной пропускной способности коммуникаций и т. д. в режиме реального времени осуществлялся сбор, передача и обработка больших объемов биомедицинских данных.



**Рис. 5.** Тестирование информационной системы мониторинга в испытательном стенде программы МАРС-500, имитирующем выход на поверхность планеты.

Основные этапы испытаний:

- Тестирование производительности: исследование характеристик производительности системы для заданного уровня пользовательской нагрузки, объема данных и программно-аппаратной конфигурации.
- Тестирование объемов: исследование характеристик производительности системы на разных объемах данных.

- Тестирование конфигурационное: исследование характеристик производительности системы на разных программно-аппаратных конфигурациях.
- Тестирование надежности: исследование отказов системы при относительно длительной эксплуатации в условиях номинальной или пиковой нагрузки.
- Тестирование отказоустойчивости: исследование возможностей восстановления нормальной работы системы после аппаратных и программных сбоев.
- Тестирование инсталляционное: проверка комплектности дистрибутивов и их корректной установки в соответствии с поставляемой инструкцией.

Полномасштабное испытание системы продемонстрировало потенциал предложенной авторами распределенной архитектуры для автоматизированных систем on-line-мониторинга, в частности, в области медицинской деятельности.

Стендовый эксперимент отразил достоинства системы, а также недостатки и предпочтительные способы их устранения, обозначил возможные направления расширения функциональности системы.

Одно из главных достоинств созданной системы заключается в универсальности системы по отношению к датчикам измерителя. Набор снимаемых физических параметров определяется только выбором датчика из множества предлагаемых на рынке (при условии наличия у него одного из основных интерфейсов передачи данных, поддерживаемых микроконтроллером сенсора: аналоговый сигнал, 1-Wire, USART, I<sup>2</sup>C, SPI-подобный). При добавлении в систему нового датчика не требуется перепрограммирования каких-либо узлов системы. Администратору баз данных необходимо лишь добавить несколько строчек в таблицу, отвечающую за возможные каналы измерения. Из сказанного, очевидно, следует, что спектр областей применения разработанной системы на самом деле не ограничивается только медициной.

Несомненно, в системе присутствуют и недостатки. В первую очередь стоит отметить существенный объем передаваемых данных в сети PAN при наблюдении в режиме on-line и, как следствие, сильное уменьшение времени автономной работы измерителей без подзарядки. Данная проблема решается, в первую очередь, добавлением алгоритмов сжатия данных.

Особая ценность подобных систем заключается в возможности автоматической обработки физиологических сигналов данных, выявлении патологий и уведомлении о них в режиме тревоги (Alarm). Авторы считают появление подобного режима, наравне с возможностью записи в карту памяти измерителя (режим холтеровского мониторинга), одними из важнейших направлений дальнейшего развития системы. Реализация первичной обработки сигнала вычислительными средствами микроконтроллера и отправление данных на базовую станцию только при фиксации отклонений от нормы существенно увеличит время автономной работы измерителя.

Следует отметить, что использованный подход к формированию, передаче и сохранению данных позволит как осуществлять on-line контроль витальных параметров организма пациента, так и провести исследование новых алгоритмов обработки, ориентированных на выявление сердечно-сосудистых нарушений при анализе сигналов высокой степени разрешения по времени и существенной длительности периода измерений [10].

Рассмотренная информационная система является нашим первым опытом в создании распределенных информационных систем беспроводного мониторинга для медицинских и иных приложений. Предлагаемая авторами разработка представляет собой исследовательскую работу, требующую дальнейшего углубления и развития. Очевидно, что для этого необходимо апробация системы во всевозможных условиях и областях при полноценном взаимодействии со специалистами данных направлений.

Несомненно, существуют задачи, где более востребованы и целесообразны узкоспециализированные системы дистанционного мониторинга и на рынке

существует множество готовых решений, способных удовлетворить изрядную часть потребностей в информационных технологиях. Несмотря на это, авторы считают, что и для масштабных универсальных систем отведена своя ниша, и необходимо продолжать как теоретические исследования построения подобных систем, так и изучение результатов их конкретной практической реализации.

### Литература

1. Vjacheslav E. Antsiperov, Gennady K. Mansurov, Alexandr S. Bagdasaryan “Wearable wireless monitoring system "CardioBeat" based on ZigBee technology and new algorithm of heart rate detection” // “Труды 25 международной научно-технической конференции "Инновационные технологии в науке, технике и образовании" (ИНВАЦФОРМ-2008)”, стр. 17-19, 2008г., Хаммамет (Тунис).
2. Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Е. Анциперов, В.А. Морозов, Г.К. Мансуров “Сенсорные сети на основе сопряжения разнородных каналов связи” // “Труды VII Международной научно-технической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации" (ПТСПИ-2007)”, 2007г., Владимир-Суздаль.
3. Информационная система ЭКГ мониторинга Cardiac Rehab-CardioVision. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dmsecg.com/products/rehab.htm>
4. Техническая документация на беспроводные приемо-передатчики XBee RF Modules. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982\\_D.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_D.pdf)
5. Texas Instruments. Блок-схема построения ЭКГ-датчик. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ti.com/solution/ecg\\_electrocardiogram](http://www.ti.com/solution/ecg_electrocardiogram)
6. Описание и техническая документация на микроконтроллер STM32F103CB [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.st.com/internet/mcu/product/189782.jsp>
7. Официальный сайт системы управления базами данных (СУБД) MySQL [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mysql.com/>

8. Официальный сайт IIS - набор серверов для нескольких служб Интернета от компании Майкрософт. [Электронный ресурс]. Режим доступа:  
<http://www.iis.net/>
9. Описание Медико-технического экспериментального комплекса программы МАРС-500. [Электронный ресурс]. Режим доступа:  
<http://mars500.imbp.ru/nek.html>
10. В.Е. Анциперов “Многомасштабный корреляционный анализ нестационарных, содержащих квазипериодические участки сигналов” // “Радиотехника и электроника”, т. 53, № 1, стр.73-85, 2008г.