

УДК 614.21 + 616 + 681.14

А.П. Казанцев, А.А. Сенин, О.В. Пикуленко

АРХИТЕКТУРА И РЕАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ

Предложена архитектура программно-аппаратных комплексов мобильной дистанционной электрокардиографии в виде корпоративной IP-сети портативных микрокомпьютерных регистраторов с беспроводной связью и серверов-анализаторов. На этих принципах были построены и внедрены в медицинскую практику типовые комплексы скорой телекардиологической помощи и мобильной дистанционной функциональной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

Цель работы – построение телемедицинской системы дистанционной электрокардиографии, оптимизированной для мобильных приложений, на основе использования IP-сети с беспроводными соединениями. Цель возникла в связи с актуальностью проблемы создания комплексов мобильной и домашней телемедицины для оказания повсеместной квалифицированной и своевременной кардиологической помощи. Эта техника в настоящее время широко востребована у нас в стране и за рубежом, т.к. сердечно-сосудистые заболевания приобрели характер эпидемии [1].

Обзор литературы, а также системный анализ существующих задач и решений внебольничной кардиологии показывают необходимость использования комплексных методов дистанционной электрокардиографии для получения оперативной информации о состоянии сердечно-сосудистой системы пациентов, из чего возникают новые задачи исследования и разработки мобильных сетей дистанционной электрокардиографии.

Для решения этих задач была предложена архитектура системы мобильной дистанционной электрокардиографии в виде корпоративной IP-сети портативных микрокомпьютерных регистраторов с радиосвязью, а также серверов-анализаторов для дистанционной обработки данных [2]. Каждый регистратор – это автономная портативная измерительно-вычислительная микросистема, инструмент медицинского персонала, непосредственно работающего с пациентами. Регистратор предназначен для цифровой записи электрокардиосигналов пациентов и поддержания собственной базы этих данных, которые должны храниться вместе с прочей ин-

формацией обследований пациентов до передачи на удаленный сервер-анализатор. Передача данных должна выполняться самой микросистемой-регистратором посредством беспроводных соединений с сетью. С другой стороны, каждый сервер-анализатор должен выполнять функцию сетевого приемника и обеспечивать автоматизированный анализ, служить инструментом кардиолога, интерпретирующего данные, получаемые от удаленных регистраторов.

Архитектура сети основывается на эталонной модели взаимодействия открытых систем Open System Interconnect и стандартном стеке протоколов TCP/IP. Любые варианты топологии сети предусматривают возможность соединения каждого регистратора с каждым сервером-анализатором для надежности проведения дистанционного обследования пациентов и диагностики заболеваний.

Информационным базисом архитектуры сети является распределенная информационная система [3]. Она интегрирует локальные базы данных регистраторов и базы данных анализаторов. Предусматривается интеграция с общим информационным пространством медицинских учреждений.

Показателем качества системы дистанционной электрокардиографии является ее пропускная способность. Телемедицинская сеть может рассматриваться как система массового обслуживания, где характеристикой пропускной способности является время отклика на запрос обслуживания. Медицинские методики предусматривают стандартные процедуры обследования и диагностики, которые дают стандартные средние объемы информации. Анализ стандартного процесса дистанционного обследования и диагно-

стики позволяет выделить составляющие его фазы и их длительность t_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Сумма средних длительностей фаз представляет собой значение времени отклика

$$\tau = \sum_{i=1}^{i=N} t_i. \quad (1)$$

Процедура обследования и диагностики имеет свою себестоимость, выражающуюся в виде суммы экономических затрат на проведение процедуры. Средняя себестоимость c стандартной процедуры является еще одним показателем качества системы. Для поиска наилучшей конфигурации системы мобильной дистанционной электрокардиографии того или иного назначения был разработан и применялся двухкритериальный метод оптимизации, который можно формализовать следующим образом. Задается характеристическая модель системы

$$(\tau, c) = f(\mathbf{T}), \quad (2)$$

где $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_N)$ – вектор длительностей фаз. При допустимых пределах

$$0 \leq t_i \leq t_{i\max} \text{ для } i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

и функциональных ограничений

$$\tau(\mathbf{T}) \leq \tau_{\lim}, c(\mathbf{T}) \leq c_{\lim} \quad (4)$$

выполняется минимизация времени отклика τ и себестоимости c . Оптимальными считаются наилучшаемые по обоим критериям варианты системы (множество Парето-оптимальных решений). Далее экспертным путем делается выбор единственного окончательного решения.

Системный анализ, расчеты и эксперименты показали [4], что карманные персональные компьютеры (КПК), смартфоны или коммуникаторы позволяют получать оптимальные решения при использовании их в составе портативных электрокардиографических регистраторов для работы в телемедицинских сетях. Во многих случаях их ресурсы достаточны и для использования на стороне удаленных наблюдателей и консультантов. Главное качество этих устройств – мобильность. Они просты в использовании и постоянно готовы к работе. Особенно важно то, что они специально предназначены для работы в IP-сетях.

У современных КПК, коммуникаторов и смартфонов имеются мощные аппаратные ресурсы:

- микропроцессоры 32-разрядной архитектуры с тактовой частотой 200-400 МГц и выше;
- цветной графический экран (до 65536 цветов) с пространственным разрешением от 240 x 240 до 480 x 640 точек;
- энергонезависимая оперативная память 32-256 Мбайт и более;

- накопители на миниатюрных флэш-картах в сотни мегабайт и встроенные флэш-диски, а в некоторых моделях и миниатюрные жесткие диски;
- различные аппаратные интерфейсы (USB, RS-232, IrDA, SDIO и др.);
- беспроводные интерфейсы Bluetooth, Wi-Fi.

Многие модели КПК (смартфонов, коммуникаторов) работают под управлением развитых операционных систем, включающих следующие основные свойства:

- графический человеко-машинный интерфейс с графическим вводом информации;
- управление памятью, приспособленное для ведения баз данных;
- многозадачность;
- стек стандартных сетевых протоколов;
- управление внешними устройствами и сетевой аппаратурой в том числе;
- интерфейс прикладных программ (API), доступный для разработчиков нового программного обеспечения.

Все это вместе со сравнительно низкой стоимостью является преимуществами устройств этого класса перед мобильными персональными компьютерами, такими, как ноутбуки или панельные ПК. КПК (коммуникаторы, смартфоны) позволяют строить на их основе мобильные телемедицинские измерительно-вычислительные микросистемы (ИВМС) с возможностью подключения к сетевым ресурсам. Важно также подчеркнуть, что КПК (коммуникатор, смартфон), оставаясь без связи с сетью, способен автономно хранить сотни записей обследований пациентов в своей локальной базе данных.

В составе ИВМС нужно выделять аппаратную часть и программное обеспечение (ПО). Аппаратная часть ИВМС включает в себя: портативные микрокомпьютеры постоянной готовности, портативные измерительные регистраторы, коммуникационную аппаратуру.

За основу ИВМС принимаются мобильные универсальные микрокомпьютеры постоянной готовности – КПК, смартфоны или коммуникаторы (см. выше). Для сопряжения микрокомпьютера с другими частями ИВМС применяются интерфейсы RS-232, USB, Bluetooth. Последний является беспроводным, что важно для портативных систем.

Измерительные регистраторы – это различные цифровые регистраторы электрокардиограмм (ЭКГ), применяемые в соответствии с медицинскими методиками. Используются электрокардиографы и кардиоблоки на 12 синхронных отведений для методик ЭКГ покоя, а также

накопители ЭКГ для суточного мониторинга по методу Холтера.

Коммуникационное оборудование – беспроводные модемы и адаптеры обеспечивают сетевые соединения по различным стандартам: GSM/GPRS/EDGE, CDMA, UMTS, Wi-Fi. Эта аппаратура, если она внешняя по отношению к КПК, интегрируется в ИВМС посредством разных интерфейсов, в частности Bluetooth. Модемы и адаптеры, встроенные в КПК, превращают его в коммуникатор или смартфон.

Для ввода данных из приборов, для хранения и защиты информации, для управления передачей зарегистрированных данных удаленным участникам процесса дистанционного обследования и диагностики авторами разработано программное обеспечение ИВМС на платформах Palm OS 4/5 и Windows Mobile 5. Программно реализованы типовые задачи проведения методик обследования, визуального представления данных медицинскому работнику, непосредственно работающему с аппаратурой. Оптимизирован для медицинских работников пользовательский интерфейс, а также система подсказок и помощи. Реализована обработка ошибочных состояний для сохранения устойчивости программных процессов.

Программная часть микросистем разрабатывалась по принципу Smart Client. При использовании этого подхода достигается автономность ИВМС. Во всех проектах создавались локальные базы данных ИВМС для ввода, временного хранения и выборки информации ЭКГ обследованных.

Для передачи данных разработаны программы-клиенты, включенные в состав ПО ИВМС, использующие прикладные протоколы, основанные на стандарте TCP/IP. Создан унифицированный алгоритм сжатия и передачи данных во взаимодействии с сервером, который применяется во всех типах клиентов. Для повышения надежности доставки данных в условиях помех транспорт данных выполняется с регулярной проверкой правильности передачи.

Данные принимаются из сети и восстанавливаются без потерь сервером-анализатором, которому они были адресованы. Затем они обрабатываются и интерпретируются врачом-специалистом с помощью программ кардиологического анализа. По результатам анализа выполняется консультирование лечащего врача, готовится врачебное заключение, которое по факсу или электронной почте отправляется также лечащему врачу. Сервер-анализатор эффективно реализуется на платформе персонального компьютера с операционной системой Windows

XP Professional специально разработанным комплексом программ для приема и анализа данных. Применение ПК позволяет получать высокую скорость обработки данных обследований и подготовки диагноза, надежное сетевое взаимодействие с клиентами, обеспечивая малое время отклика на запросы при низком уровне затрат на оборудование и обучение персонала. Для сетевых подключений ПК можно использовать различные модемы и адаптеры.

В применяемой операционной системе принципиально важным является сервис RAS (Remote Access Service). Он позволяет прямое подключение удаленного клиента, что обеспечивает наименее затратную и наиболее надежную схему соединений. В разработке сетевого ПО серверов-анализаторов главную роль играет компонент Winsock (Windows Sockets), за счет которого достигается унификация серверов, и минимизируются затраты на модификацию.

Разработанное авторами серверное ПО является одним из ключевых компонентов мобильной сети дистанционной электрокардиографии. Оно позволяет автономное функционирование в сети любого анализатора без посредников и Интернета.

Программы обработки предоставляются производителями приборов-регистраторов и обеспечивают соответствующий анализ данных. Нами выполнена интеграция этих программ в разработанные серверы-анализаторы. Являясь инструментами врачей, ответственных за дистанционную обработку, программы-анализаторы выполняют амплитудные и временные измерения на ЭКГ, подготавливают таблицы и графики, производят автоматический анализ для подготовки проекта врачебного заключения, отображают результаты на экране компьютера в стандартных форматах, предоставляют доступ к архивам исследований и заключений. Дополнительно разработаны программы создания, редактирования, распечатки и передачи по телекоммуникациям текстов врачебных заключений с необходимыми таблицами и графиками.

В составе серверов-анализаторов имеются базы данных ЭКГ обследований с результатами обработки и врачебными заключениями. Хранимые данные, относящиеся к одному пациенту, используются для оценки динамики заболевания сравнением с новыми данными. Разработана база данных для комплексных обследований. Спроектированы интерфейсные формы, упрощающие манипуляции данными.

Важным требованием к системе дистанционной электрокардиографии является высокая надежность передачи данных. Этого можно до-

биться минимизацией числа задействованных звеньев сети, что также дает сокращение времени передачи. Эта задача была решена использованием прямых соединений, специальных протоколов (см. выше) и технологии потоковой передачи данных (Data Streaming), за счет чего данные передаются от источника к получателю с минимальными задержками и перерывами. При этом исключаются промежуточные звенья соединения, образуется непрерывный поток данных, и их временной ряд не искажается. При достаточной пропускной способности канала связи возможна передача данных в реальном масштабе времени. В дистанционной электрокардиографии подразумевается, что для проведения обследования и диагностики в пункте регистрации может работать медицинский работник, не имеющий достаточной кардиологической квалификации. В этом случае на удаленного специалиста может возлагаться задача управления процессом обследования. Ему может понадобиться удаленное мониторирование ЭКГ – наблюдение электрокардиограммы в реальном времени. Это становится возможным при применении потоковой передачи.

На основе изложенных выше принципов были разработаны типовые программно-аппаратные комплексы для двух различных медицинских назначений.

Комплекс скорой телекардиологической помощи предназначен для дистанционных консультаций медперсонала выездных бригад скорой медицинской помощи, использующих портативные регистраторы ЭКГ с беспроводной связью [5]. При опытной эксплуатации в 31 % случаев телемедицинских сеансов дистанционно выявлены электрокардиографические признаки инфаркта миокарда, и больные были своевременно госпитализированы. В 26 % сеансов выявлены острые нарушения сердечного ритма, при этом только 8 % случаев потребовали госпитализации (обычной практикой была госпитализация во всех случаях). В 43 % сеансов электрокардиографические признаки по заключению удаленного кардиолога соответствовали норме, экстренная госпитализация не требовалась, хотя ранее часто производились необоснованная транспортировка и госпитализация больных.

Второй комплекс предназначен для мобильной дистанционной функциональной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний и обеспечивает внебольничное медицинское обслуживание с использованием ЭКГ покоя и Холтеровского мониторирования (ХМ). При обращении к терапевту поликлиники больного с симптомами кардиопатологии врач устанавливает пациенту

носимый аппарат ХМ и после завершения мониторирования, через сутки, передает данные удаленному консультанту-кардиологу. Установка аппарата и передача данных при необходимости выполняются у пациента на дому. После интерпретации данных кардиолог отправляет свое заключение терапевту по факсу и дает консультацию по телефону. В целом применение комплекса дало следующие результаты [6]: срок до госпитализации сократился с 12 до 2 дней; длительность пребывания в стационаре сократилась с 17 до 11 дней; процент острых коронарных событий (инфаркт миокарда, внезапная смерть и др.) снизился с 24 % до 5 %; процент коронарных вмешательств увеличился с 2,4 % до 21,1 %.

Эти и другие применения разработанных комплексов показывают, что предложенные организационные и программно-технические решения экономически доступны для медицинских учреждений Российской Федерации.

В заключение перечислим основные результаты выполненной работы.

1. Предложена архитектура системы мобильной дистанционной электрокардиографии в виде корпоративной IP-сети портативных микрокомпьютерных регистраторов с беспроводной связью и серверов-анализаторов с распределенной информационной системой. Разработан метод оптимизации систем дистанционной электрокардиографии на основе минимизации времени отклика на запрос обслуживания. Апробация показала высокий потенциал развития и модернизации систем предложенной архитектуры.

2. Определен агрегатный состав телемедицинских комплексов мобильной дистанционной электрокардиографии, предусматривающий модернизацию агрегатов, и разработаны принципы построения подсистем: портативного электрокардиографического многоцелевого регистратора на основе коммутатора с беспроводной связью; сервера-анализатора на базе персонального компьютера удаленного консультанта, интерпретирующего данные функциональных обследований; распределенной информационной системы с использованием локальных баз данных портативных регистраторов.

3. Разработан алгоритм помехоустойчивого протокола передачи данных, обеспечивающий бесперебойность процесса дистанционного обследования и диагностики, а также принцип потоковой передачи данных для дистанционного мониторирования ЭКГ пациентов в реальном масштабе времени.

4. Апробирован телемедицинский комплекс для дистанционных консультаций медперсонала выездных бригад скорой медицинской помощи,

позволяющий исключить пропуск опасных кардиопатологических состояний, а также и необоснованную госпитализацию. Комплекс имеет следующие характеристики: время передачи данных – 1 мин; чистое время цикла дистанционного обследования и диагностики – 14 мин; полное время цикла с учетом задержек – 20 мин; время восстановления после отказа – 0,16 % полного времени цикла.

5. Апробирован телемедицинский комплекс для внебольничного обследования и диагностики методами ЭКГ покоя и мониторинга по Холтеру, обеспечивающий принятие своевременных решений о госпитализации. Показано, что срок до госпитализации сокращается в 6 раз (с 12 до 2 дней), длительность пребывания в стационаре – в 1,5 раза (с 17 до 11 дней), процент острых коронарных событий снижается в 5 раз (с 24 % до 5 %), процент коронарных вмешательств повышается в 9 раз (с 2,4 % до 21,1 %).

6. Обосновано внедрение в практику здравоохранения разработанных комплексов и новых организационно-технических решений на их основе. Предложенные решения экономически доступны для медицинских учреждений Российской Федерации.

Библиографический список

1. Федорова С.И., Шумский В.И., Булыгин В.П., Пронина В.П., Казанцев А.П., Шокин В.И. Организация дистанционной многоуровневой службы функциональной диагностики Подмосковья. Альманах клинической медицины «Современные медицинские технологии и развитие специализированной медицинской помощи населению Московской области», М.: МОНИКИ, 2005. Т. VIII, С. 139-143.

2. Казанцев А.П. Разработка мобильной телемедицинской сети для ЭКГ исследований // V научно-практическая конференция "Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы" (Москва, Главный клинический госпиталь МВД России, 19 марта 2003 г.). - М., 2003. - С. 165-169.

3. Казанцев А.П. Разработка и исследование электрокардиографической телемедицинской инфор-

мационной системы // Отчет по гранту РФФИ № 04-07-97214 – 2005. - 23 с.

4. Казанцев А.П. Мобильная телемедицинская сеть «ТелеЭКГ» для электрокардиографических исследований // Мобильные телекоммуникации. – 2003. - № 9. - С. 30-32.

5. Торчинов В.У., Казанцев А.П., Кочкин В.С., Курников В.С. Экспериментальная телемедицинская сеть мобильной дистанционной электрокардиографии // Главврач. – 2005. – № 10. – С. 82-85.

6. Федулаев Ю.Н., Казанцев А.П., Щелкунова И.Г., Корочкин И.М., Лебедева А.Ю., Клыков Л.Л., Гордеев И.Г., Неведомская Т.В., Грибченко О.Ф. Дистанционная методика оценки результатов суточного мониторинга ЭКГ в выявлении преходящей ишемии миокарда. Организационные и прогностические аспекты // Медицинский вестник МВД (принято в печать 26.10.2006).

7. Булыгин В.П., Федорова С.И., Шумский В.И., Пронина В.П., Лебедева Т.Ю., Агальцов М.В., Пирвердиев Ч.А., Казанцев А.П., Шокин В.И. Современные возможности технологий мобильной телефонии при проведении диспансеризации профессиональных групп населения. Альманах клинической медицины, М.: МОНИКИ, 2006. Т. X, С. 30-33.

8. Казанцев А.П., Шокин В.И., Федорова С.И., Арапов Н.А. Создание мобильной телемедицинской сети для дистанционной функциональной диагностики // VI научно-практическая конференция "Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы" (Москва, Главный клинический госпиталь МВД России, 24 марта 2004 г.). - М., 2004. - С. 101-104.

9. Казанцев А.П., Сенин А.А., Федорова С.И., Арапов Н.А., Давыдов Д.В., Тарасов А.А., Шокин В.И., Неведомская Т.В. Телемедицинская IP-сеть мобильной дистанционной функциональной диагностики // Тезисы докладов конференции «Фундаментальные науки – медицине» (Москва, Президиум РАН, 14-16 декабря 2005 г.) – М., 2005. – С. 118-119.

10. Сенин А.А., Казанцев А.П. Беспроводные технологии для мобильной телемедицины на примере системы дистанционной электрокардиографии // Наука-Бизнес-Образование. Биотехнология – Биомедицина – Окружающая среда: Тезисы докладов второй международной конференции (10-13 мая 2005 г.). – Пушино: «Биоресурсы и Экология», 2005. - С. 97-99.