электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Методика бесконтактного контроля состояния оператора эргатической системы

77-48211/635919

11, ноябрь 2013

Алёхин М. Д., Корчагина Д. А., Демендеев А. А., Темляков А. Ю.

УДК 621.431.74-52 + 621.438-52 (075.8)

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
alexmakc@yandex.ru
gniiivm-k@yandex.ru
gniiivm-d@yandex.ru
andrey.temlyakov@rambler.ru

Введение

Государственная программа РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности на период до 2020 года» определяет одним из приоритетов создание инновационных, высокотехнологичных, надежных и безопасных образцов систем для всех отраслей промышленности. Подавляющее большинство таких систем состоит из человека–оператора и машины, посредством которой, взаимодействуя с технической средой, он осуществляет свою профессиональную деятельность, поэтому они относятся к классу *эргатических систем* (ЭС).

Успехи теории надежности и совершенствование технологии производства привели к тому, что надежность технических средств ЭС существенно возросла: более того, можно утверждать о возможностях ее дальнейшего повышения [1]. Однако говорить о существенном повышении надежности ЭС в целом нельзя, поскольку одновременно отмечаемая устойчивая тенденция повышения информационной нагрузки на оператора ЭС с усложнением структуры информационного потока обусловливает снижение работоспособности и надежности его деятельности, что требует разработки и реализации новых технологий управления ЭС, позволяющих учесть характеристики состояния оператора в контуре управления [1-4].

Трудами отечественных ученых разработаны теоретические основы функционально–адаптивного управления ЭС на базе оптимального распределения функций между человеком и автоматическими системами управления, позволяющие реализовать активное обеспечение безопасности эксплуатации ЭС [1-4]. Однако практическая реализация технологий

функционально-адаптивного управления ЭС затруднена вследствие недостаточной разработанности проблемы мониторинга состояния оператора, которая должна быть бесконтактной и позволять осуществлять мониторинг состояния оператора ЭС, обеспечивая надежное распознавание опасных состояний в реальном времени.

Ранние работы отечественных и зарубежных ученых показали целесообразность применения для дистанционного бесконтактного мониторинга состояния человека биорадиолокационных технологий, для реализации которых разработаны специализированные аппаратно-программные комплексы (АПК), удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к аппаратуре бесконтактного мониторинга состояния оператора ЭС [5-8]. Практическое применение таких АПК требует реализации автоматизированной обработки информации о состоянии оператора ЭС, представляющей собой совокупность нестационарных квазипериодических низкочастотных биорадиолокационных (БРЛ) сигналов.

1. Общая процедура обработки сигналов о состоянии оператора эргатической системы

Процедура обработки и анализа БРЛ сигналов включает следующие основные этапы: предобработка; извлечение информативных признаков; распознавание паттернов БРЛ сигнала (ПБРЛС) [8, 9].

На этапе предварительной обработки БРЛ сигналов для снижения уровня шумов и удаления случайных выбросов используется медианная фильтрация по методу скользящего среднего. При выделении информативных частотных диапазонов БРЛ сигналов эффективными являются полосовые фильтры Баттерворта с максимально плоской амлитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Анализ ПБРЛС целесообразно проводить после использования процедур сглаживания и аппроксимации, используя на заключительных этапах предобработки, методы объединения квадратур БРЛ сигналов, в частности, арктангенсную и комплексную демодуляции.

На этапе извлечения информативных признаков БРЛ сигналов в практических приложениях бесконтактного мониторинга состояния ЭС наибольшую ценность представляют значения характерных частот регистрируемых БРЛ процессов за время наблюдения. Традиционно для этих целей используется дискретное преобразование Фурье (ПФ) при том допущении, что на анализируемом участке сигнал является стационарным. В дальнейшем по полученному спектру определяются максимумы, соответствующие значениям характерных частот регистрируемых БРЛ сигналов. В работах отечественных и зарубежных ученых отмечается, что использование оконного преобразования Фурье (ОПФ) при выборе оптимальных параметров окна позволяет получить информацию и о временной зависимости изменения частотных компонент БРЛ сигналов [9, 10].

Этап распознавания ПБРЛС в задачах бесконтактного мониторинга состояния ЭС является наиболее слабо исследованным и требует разработки с учетом особенностей решаемой прикладной задачи. Начальным этапом распознавания ПБРЛС является определение их информативных признаков. Показано, что перспективным направлением решения этой задачи является использование время-частотного (ВРЧ) анализа [5].

2. Особенности формирования пространства информативных признаков паттернов биорадиолокационных сигналов

Системный анализ характеристик основных ВРЧ-преобразований позволил обосновать выбор вейвлет-преобразования (ВП) для задачи формирования признакового пространства ПБРЛС [9, 10]. Основными его преимуществами являются: лучшая ВРЧ локализация; возможность управления ВРЧ разрешением; хорошее подавление интерференции по времени и частоте; сравнительно невысокая вычислительная сложность; реализация быстрого алгоритма вычислений; разнообразие базисов ВП, позволяющее выбрать наиболее подходящий исходя из характерных особенностей анализируемого БРЛ сигнала.

В дальнейшем на основе систематизации желательных свойств семейств базисов ВП обоснована целесообразность использования класс ортогональных вейвлетов с компактным носителем (семейства Симлета, Коифлета и Добеши). При формировании пространства признаков ПБРЛС их преимущества обусловливаются: высокой компактностью носителя; несимметричностью базиса; наличием дискретного преобразования; реализацией быстрого алгоритма вычислений.

Для формирования векторов признаков ПБРЛС разработан оригинальный метод на основе последовательности абсолютных значений детализирующих коэффициентов ВП квадратур БРЛ сигнала [10, 11]. При этом отсутствует необходимость обработки данных в комплексной форме, а каждая компонента вектора признаков ПБРЛС на выбранной операционной частоте с заданным уровнем декомпозиции определяется как:

$$V_j = \sqrt{\left(d_j^Q\right)^2 + \left(d_j^I\right)^2} \ ,$$

где V_j - компонента вектора признаков; d_j^Q – детализирующий коэффициент Q-квадратуры сигнала; d_j^Q - детализирующий коэффициент I-квадратуры сигнала.

Для исследования эффективности предложенного метода проведена серия экспериментов с использованием АПК «БиоРаскан» для бесконтактного БРЛ мониторинга. Анализировались три класса ПБРЛС, при формировании пространства признаков ПБРЛС которых в качестве материнского использовался *вейвлет Хаара* (предельный случай семейства Добеши). Временная протяженность всех ПБРЛС составляла 320 отсчетов, что обеспечило по 20 компонент в структуре каждого вектора признаков на 4-ом уровне ВП. Амплитуды квадратур БРЛ сигналов и размах по оси времени нормировались, данные

анализировались на операционной частоте АПК бесконтактного БРЛ мониторинга 3,6 ГГц [11].

При *распознавании ПБРЛС* выполнялась последовательность действий:

• разметка массива данных и выбор ПБРЛС для дальнейшего анализа;

• фильтрация данных пятиточечным медианным фильтром скользящего среднего;

• удаление постоянной составляющей приведением к линии средней мощности;

• нормировка на максимальное значение амплитуды фрагмента БРЛ сигнала;

• декомпозиция квадратурных компонент БРЛ сигнала в соответствии с выбранным базисом ВП и заданным уровнем разложения;

• формирование векторов признаков ПБРЛС на основе абсолютных значений детализирующих коэффициентов ВП на заданном уровне декомпозиции;

• расчет евклидовых расстояний от объектов до центров масс классов ПБРЛС;

• классификация ПБРЛС на основании определения минимального евклидова расстояния до ближайшего центра масс в сформированном пространстве признаков;

• определение эффективности сформированного пространства признаков на основе определения максимального коэффициента корреляции с вектором средних значений для каждого класса ПБРЛС;

• проверка статистической значимости оценок коэффициентов корреляции.

При использовании такого подхода ПБРЛС могут быть классифицированы на основании, как самих низкочастотных особенностей, так и их непосредственного расположения в структуре векторов признаков [8-10]. При исследовании эффективности сформированного пространства признаков ПБРЛС использовались методы корреляционного и кластерного анализа.

Таким образом, пространство признаков ПБРЛС, сформированное с использованием последовательности абсолютных значений детализирующих коэффициентов ВП квадратурных компонент БРЛ сигналов, является эффективным в рамках решения задачи распознавания.

Для повышения эффективности обработки информации при формировании признакового пространства ПБРЛС разработан *алгоритм определения оптимальных параметров ВП*, в структуре которого можно выделить две основные составляющие [11]. Первая - метод формирования векторов признаков на основе абсолютных значений детализирующих коэффициентов ВП квадратурных компонент БРЛ сигнала. Вторая - определение оптимального уровня декомпозиции и осуществление выбора лучшего базиса ВП на основе расчета модифицированного энтропийного критерия (МЭК).

Алгоритм автоматизированного определения оптимальных параметров ВП для формирования пространства признаков ПБРЛС состоит из следующих этапов [11]:

• при инициализации задаются начальные параметры алгоритмов, обусловленные свойствами анализируемых сигналов (максимальная частота и частота дискретизации сигнала, желательные свойства ВРЧ преобразования);

• в общем случае сначала выбирается тип ВРЧ преобразования (дискретное ВП - лучшая ВРЧ локализация, что особенно важно при извлечении информативных признаков ПБРЛС; возможность реализации быстрых алгоритмов; доступность разнообразных базисов ВП);

• на основании требуемых характеристик ВП выбирается общий класс базисов (ортогональные вейвлеты с компактным носителем - характерно наличие числа нулевых моментов в соответствии с номером порядкового индекса базиса; хорошо реализуем быстрый алгоритм вычислений);

• выбор семейств базисов ВП с набором порядковых индексов (Добеши, Коифлета, Симлета - сконструированы исходя из необходимых требований кратномасштабного ВП, ортогональности, компактности носителя, при этом симметрия и гладкость возрастают с увеличением номера порядкового индекса);

• расчет оптимального уровня декомпозиции (на основе значений характерных частот исходного БРЛ сигнала);

• расчет МЭК (на основе энтропии логарифма энергии для задач классификации);

• выбор лучшего базиса ВП (выбор базиса с минимальным значением МЭК).

Для выбора оптимального базиса ВП из класса ортогональных вейвлетов с компактным носителем при формировании признакового пространства ПБРЛС разработан МЭК, значение которого рассчитывается в результате процедур усреднения для стандартной меры энтропии логарифма энергии. Для выбранного базиса ВП при заданном числе классов ПБРЛС и известном количестве реализаций в каждом из них МЭК определяется как:

$$E_o = -\sqrt{\frac{1}{CN}\left(\sum_{k=1}^{C}\left(\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{j=1}^{K}\ln\left(d_j^2\right)\right)\right)\right)} \to \min$$

где E_o - оценка МЭК; C - число классов фрагментов; N - число фрагментов в классе; K - число детализирующих коэффициентов ВП; $ln(d_j^2)$ - мера энтропии логарифм энергии; d_j - детализирующий коэффициент ВП при выбранном базисе.

При квадратурной обработке БРЛ сигналов для расчета МЭК следует использовать среднее квадратичное значение детализирующих коэффициентов ВП каждой из квадратурных компонент. В целом, в задачах распознавания образов минимизация МЭК может потенциально применяться для выбора лучшего базиса ВП при формировании пространства признаков для широкого класса нестационарных сигналов с выраженной низкочастотной составляющей

3. Особенности автоматизированного распознавания паттернов биорадиолокационных сигналов

На основе обобщения функциональных особенностей искусственных нейронных сетей (ИНС) прямого распространения обосновывается выбор базовой топологии ИНС для распознавания ПБРЛС - исходя из соображений конструирования ИНС минимальной сложности с возможностью использования широкого арсенала методов поиска оптимальных решений при относительно небольших аппаратных затратах оперативной памяти выбран многослойных перцептрон (МСП) с одним скрытым слоем и сигмоидальной функцией активации [11, 12].

Предложенный *метод распознавания ПБРЛС* на основе совместного использования ИНС и ВП, включает три основных этапа.

1) Во время предварительной обработки БРЛ сигналов производится фильтрация с использованием фильтров Баттерворта верхних (ФВЧ) и нижних (ФНЧ) частот, сглаживание медианным фильтром скользящего среднего и Z-нормализация данных.

2) Далее пространство признаков ПБРЛС формируется на основе последовательности абсолютных значений детализирующих коэффициентов ВП квадратурных компонент БРЛ сигналов.

3) Описание ПБРЛС подается на вход ИНС, на выходе которой регистрируется значение, соответствующее одному из выбранных классов состояний.

4. Исследование эффективности разработанной технологии

Сбор верифицированного массива БРЛ сигналов для исследования эффективности предложенных решений осуществлялся при проведении бесконтактного БРЛ мониторинга состояния ЭС параллельно с записью полной стандартной полисомнографии (ПСГ) [12].

Верификация сигналов осуществлялась следующим образом. Визуально анализировалась вся запись и если находился участок БРЛ сигнала длительностью более 10 с, потенциально похожий на один из характерных ПБРЛС, то он сравнивался с аналогичным по времени участком на записи ПСГ. Интерпретация результатов мониторинга выполнялась квалифицированными специалистами.

При исследовании информативности бесконтактного метода по сравнению со стандартным контактным методом мониторинга состояния ЭС в зависимости от принятия положительного или отрицательного решения о наличии характерных ПБРЛС.

Алгоритм автоматизированного распознавания ПБРЛС на основе детализирующих коэффициентов 3-го уровня ВП по базису Симлет 13 для формирования пространства признаков и МСП с 9 скрытыми нейронами с настройкой по алгоритму Левенберга–Марквардта для классификации обеспечивает общую точность распознавания более 84% при величине ошибки второго рода менее 8%. Рассчитанные показатели чувствительности 69% и

прогностической ценности положительного решения 72% о наличии ПБРЛС удовлетворяют рекомендациям по бесконтактному мониторингу состояния оператора ЭС, производимых машиностроительной и оборонной промышленностью.

Заключение.

Результаты исследований позволяют утверждать о целесообразности использования бесконтактного радиолокационного мониторинга состояния оператора ЭС в интересах повышения надежности их функционирования, достигаемого за счет обеспечения возможности учета оценки состояния оператора в контуре управления ЭС, имеющая существенное значение для общего, тяжелого, среднего и точного машиностроения, а также для оборонной и медицинской промышленности.

Работа поддержана стипендией Президента РФ для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (СП-2061.2013.4).

Список литературы

1. Гузий А.Г., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Теоретические основы функционально-адаптивного управления системами "человек-машина" повышенной аварийности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 1. С. 39.
2. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Методологические аспекты динамического контроля функциональных состояний операторов опасных профессий // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2010. № 4-2. С. 6-12.
3. Горячкина Т.Г., Ушаков И.Б., Евдокимов В.И., Богомолов А.В. Методико-методологические рекомендации авторам инноваций по диагностике функционального состояния человека-оператора // Технологии живых систем. - 2006. Т. 3. № 3. С. 33-38.
4. Ушаков И.Б., Ворона А.А., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Аппаратно-программные комплексы для медико-психологического обеспечения контроля надежности профессиональной деятельности человека в условиях высокого риска возникновения чрезвычайной ситуации // Безопасность жизнедеятельности. 2004. № 3. С. 8-13.
5. Бугаев А.С., Васильев И.А., Ивашов С.И. Дистанционный контроль параметров кардиореспираторной системы человека с помощью радиолокационных средств // Биомедицинская радиоэлектроника. 2004. № 10. С. 24.

6. Охотников Д.А. Бесконтактный радиолокационный контроль состояния пилота при работе на тренажере // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 23.
7. Алёхин М.Д., Анищенко Л.Н., Корчагина Д.А. Метод биорадиолокации в анализе перемещений грудной клетки при спокойном дыхании // Биомедицинская радиоэлектроника. - 2009. - №10. - С. 56-61.
8. Богомолов А.В., Майстров А.И. Теоретико-экспериментальное исследование сходимости оценок спектральных показателей вариабельности сердечного ритма человека // Медицинская техника. 2009. № 2. С. 26-31.
8. Кукушкин Ю.А., Майстров А.И., Богомолов А.В. Методы аппроксимации ритмокардиограмм для расчета оценок спектральных показателей вариабельности сердечного ритма // Медицинская техника. 2010. № 3. С. 15-30.
9. Майстров А.И., Богомолов А.В., Алёхин М.Д. Технология автоматизированной обработки участков локальных нестационарностей в ритмокардиографических сигналах // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2012. №1. 4 с.
10. Алёхин М.Д., Анищенко Л.Н., Журавлев А.В. Кратномасштабный вейвлет-анализ в формировании пространства признаков двигательных паттернов биорадиолокационного сигнала // Радиотехника. 2011. №11. С. 20-25.
11. Алёхин М.Д. Процедура определения оптимальных параметров вейвлет-преобразования и нейросетевого классификатора для повышения эффективности распознавания паттернов нестационарных биорадиолокационных сигналов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2012. №6. С. 46-54.
12. Алехин М.Д., Анищенко Л.Н., Журавлев А.В., Ивашов С.И., Коростовцева Л.С., Свиряев Ю.В., Конради А.О., Парашин В.Б., Богомолов А.В. Исследование диагностической информативности биорадиолокационной пневмографии в бесконтактном скрининге синдрома апноэ во сне // Медицинская техника. 2013. №2. С. 36-38.