

Контурный анализ фазовых плоскостей квазипериодических биосигналов

Аннотация

При исследовании живой системы выбирают две подсистемы, процессы в которых наблюдаются в виде синхронизированных квазипериодических сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$; осуществляют синхронную запись этих сигналов в течение времени T , определяемом целями исследований и природой исследуемой системы; в координатах $x_1(t) - x_2(t)$ строят фазовый портрет исследуемой динамической системы на интервале T ; затем определяют замкнутую кривую, оконтуривающую этот портрет; определяют дескрипторы Фурье полученной замкнутой кривой, после чего осуществляют классификацию исследуемой системы посредством обучаемого классификатора, построенного в пространстве дескрипторов Фурье.

В существующей практике исследования квазипериодических биологических сигналов используются двумерные изображения биосигнала, которые получают посредством компьютерной обработки одномерных кардиосигналов. Компьютерная обработка ЭКГ предусматривает разделение фазовой траектории на отдельные сердечные циклы, селекцию траекторий с одинаковой морфологией (отбраковку ненадежных траекторий, вызванных артефактами либо экстрасистолами), усреднение траекторий в фазовом пространстве с последующей оценкой «эталонного» цикла во временной области по усредненной фазовой траектории. Этот способ позволяет одновременно оценивать как амплитудные, так и скоростные параметры любых элементов электрокардиосигнала, что дает возможность с высокой точностью оценить форму ЭКГ и обнаружить в ней такие отклонения, которые обычно скрыты от врача при традиционном анализе ЭКГ во временной области [1].

Однако скоростные характеристики процесса, определяемые на основе дифференцирования цифрового сигнала, не являются однозначными и определяются как выбранными правилами (параметрами окна цифрового фильтра) дифференцирования, так и способом фильтрации исходного сигнала. Кроме того, анализируемые параметры не являются самодостаточными и используются как дополнительные параметры при оценке ЭКГ в стандартных отведениях.

С целью увеличения объема полезной информации, извлекаемой из биологических сигналов, в исследуемой живой системе целесообразно использовать две подсистемы, процессы в которых наблюдаются в виде синхронизированных квазипериодических сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$. Осуществив синхронную запись этих сигналов в течение времени T , определяемом целями исследований и природой исследуемой системы, в координатах $x_1(t) - x_2(t)$ может быть построен фазовый портрет исследуемой динамической системы на интервале T . По фазовому портрету можно построить замкнутую кривую, оконтуривающую этот портрет. Определив дескрипторы Фурье полученной замкнутой кривой, осуществляют классификацию исследуемой системы посредством обучаемого классификатора, построенного в пространстве дескрипторов Фурье.

Для классификации исследуемой динамической системы по дескрипторам Фурье к ее \tilde{K} дескрипторам Фурье в высокочастотную область добавляют $K_{max} - \tilde{K}$ дескрипторов Фурье с нулевой амплитудой, умножают все дескрипторы на величину K_{max} / \tilde{K} и из K_{max} получен-

ных дескрипторов выбирают K дескрипторов с младшими номерами, которые подают на K входных нейронов классификатора.

В качестве примера квазипериодических сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ можно использовать фотоплетизмосигнал и электрокардиосигнал (ЭКС). Технологию получения фазового портрета иллюстрирует алгоритм, представленный на рис. 1. В блоке 1 осуществляется ввод в компьютер времени мониторинга биосигналов T и шага дискретизации Δt . В блоке 2 осуществляется синхронный ввод в компьютер двух сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$, отражающих динамическое состояние системы.

В блоке 3 осуществляется построение фазового портрета динамической системы в координатах $x_1(t) - x_2(t)$. Оконтуривание фазового портрета, представленного на рис. 2, осуществляется путем использования морфологических операций, реализованных в блоках 4 и 5. Непосредственно оконтуривание фазового портрета осуществляют посредством морфологической операции *bwperim* – выделения границы бинарного объекта (блок 5 на рис. 1) [2]. Так как морфологический оператор *bwperim* оконтуривает бинарный объект без дыр, фазовый портрет не должен содержать внутренних дыр. Для выполнения этого условия в блоке 4 осуществляют морфологическую операцию дилатации.

Замкнутую кривую (рис. 2б), полученную в результате оконтуривания фазового портрета (рис. 2а) разлагают в ряд Фурье, определяют соответствующие дескрипторы Фурье, модули которых используют как информативные признаки на входе нейронной сети прямого распространения (блоки 6 и 7 на рис. 1).

Для того чтобы система распознавания была адекватна, необходимо, чтобы частотный диапазон, соответствующий дескриптору Фурье с определенным номером u , не зависел от числа отсчетов в оконтуривающей фазовый портрет кривой. В общем случае в различных кривых, определяющих границы фазового портрета, содержится различное число отсчетов. В процессе формирования информативных признаков из спектральных отсчетов они должны соответствовать одним и тем же частотным диапазонам. При одинаковой частоте дискретизации и различных количествах отсчетов в контурах это требование нарушается.

Характерной особенностью дескрипторов Фурье является то, что их амплитуда связана с частотой. Поэтому любые частотные морфизмы в реальном сигнале приводят к амплитудным изменениям спектральных составляющих. Критерием адекватности любых мор-

физмов в частотной области служит обратное преобразование Фурье и соответствующие различия между прямым и обратным преобразованием Фурье.

Выровнять числа отсчетов у кривых можно посредством интерполяции. Дополнение нулями спектра соответствует интерполяции в пространстве сигналов, т. е. появлению дополнительных отсчетов между исходными

отсчетами. Так как кривая дискретизирована с предельной частотой дискретизации, промежуточные отсчеты попадают в те же координаты, что и исходные. В том случае, если спектр определяется на контуре, координаты отсчета определяют и величину отсчета. Тогда дополнительные отсчеты имеют значения, равные значениям в смежных узлах интерполяции. Это ведет к нарушению

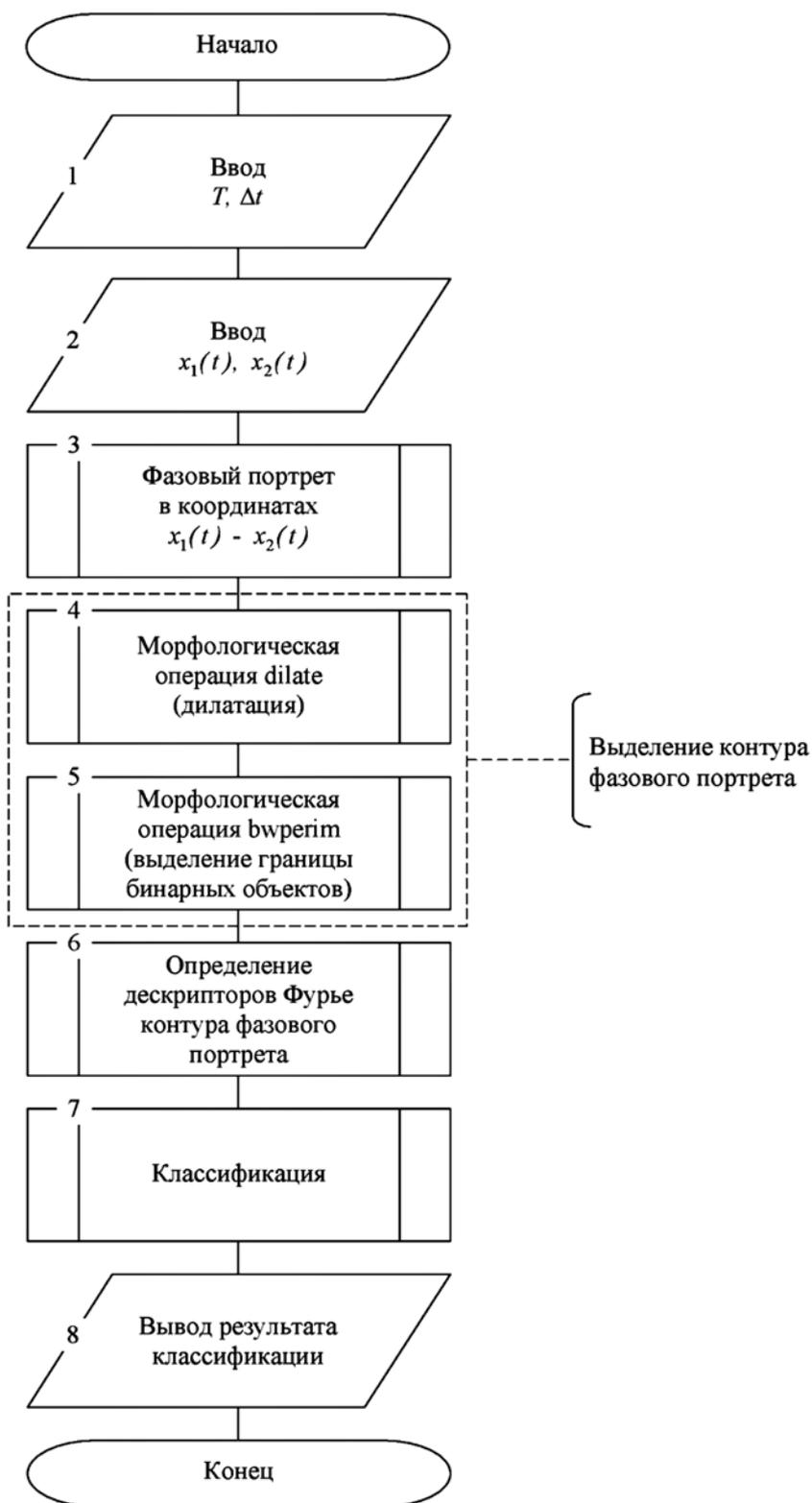


Рис. 1. Схема алгоритма получения фазового портрета

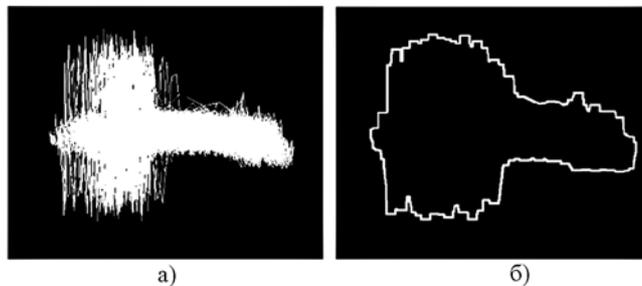


Рис. 2. Фазовый портрет (а) и замкнутая кривая, полученная в результате оконтуривания фазового портрета (б)

требований равенства Парсеваля. Для того чтобы сохранить энергетический эквивалент между пространством сигналов и пространством частот, необходимо увеличить амплитуду дескрипторов пропорционально числу промежуточных отсчетов, появившихся в пространстве сигналов в результате дополнения спектра нулями. Поэтому на *этапе* обучения классификатора все спектральные составляющие в спектрах i -й кривой умножают на величину K_{max} / K_i , где K_i – число отсчетов в i -й кривой.

Для оптимального выбора числа анализируемых дескрипторов (под оптимальностью здесь понимается минимизация их числа) необходимо осуществить обратные преобразования Фурье модифицированного спектра контура и сравнить его с исходным контуром.

Учитывая, что преобразование Фурье обратимо, по дескрипторам Фурье можем восстановить границы контура исследуемого фазового портрета. В любом случае для восстановления контура используют столько дескрипторов, сколько было получено отсчетов на контуре, т. е. K_{max} . Если часть дескрипторов приравнять к нулю, то при использовании нейросетевой классификационной модели узлы входного слоя нейронной сети, соответствующие этим дескрипторам, можно исключить, что приводит к значительному упрощению модели классификатора.

Таким образом, перед обучением нейросетевого классификатора по обучающей выборке определяются максимальное число в обучающей выборке K_{max} и число нейронов во входном слое классификатора K . Затем осуществляется настройка нейронной сети, выполняемая по известным алгоритмам, например по алгоритму обратного распространения ошибки [3].

Заключение

Технико-экономический эффект предложенного способа заключается в расширении получаемой информации о сложных динамических системах посредством учета взаимодействия их подсистем. Применительно к живым системам это обеспечивает более качественное диагностирование заболеваний сердечно-сосудистой системы человека, что позволяет оказывать адекватные терапевтические воздействия на пациента, у которого выявлена возможность возникновения жизнеопасных аритмий.

Данный способ является простым и экономичным для оценки показателя риска развития артериальной гипертензии (АГ) на основе выбранных факторов риска. Он может применяться при диспансеризации и профилактических осмотрах лиц от 20 до 76 лет в амбулаторных и стационарных условиях.

Полученные с помощью данного способа результаты позволяют помочь врачу общей практики, терапевту провести раннюю профилактику, направленную на предупреждение развития заболевания, тем самым способствуя снижению случаев первичной заболеваемости АГ.

Исследования выполнены при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, проект «Гибридные технологии анализа и классификации сложноструктурируемых изображений для медицинских приложений».

Список литературы:

1. Файнзильберг Л.С. Компьютерный анализ и интерпретация электрокардиограмм в фазовом пространстве // Системні дослідження та інформаційні технології. 2004. № 1. С. 32-46.
2. Филист С.А., Томакова Р.А. Метод обработки и анализа сложноструктурируемых изображений на основе встроенных функций среды MATLAB // Вестник Читинского государственного университета. 2012. № 1 (80). С. 3-9.
3. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.

*Евгений Николаевич Коровин,
д-р техн. наук, профессор,
зам. заведующего кафедрой системного анализа
и управления в медицинских системах (САУМС),
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»,
г. Воронеж,*

*Сергей Алексеевич Филист,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра биомедицинской инженерии
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный
государственный университет»,
Владимир Исаевич Серебровский,
д-р техн. наук, профессор,
проректор по учебной работе,
ФГБОУ ВПО «Курская государственная
сельскохозяйственная академия им. проф. И.И. Иванова»,
Леонид Васильевич Шульга,
д-р мед. наук, профессор,
кафедра охраны труда и окружающей среды,
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный
государственный университет»,
г. Курск,
e-mail: korovin@saums.vorstu.ru*