

**Е.С. Захаров****АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ СТАДИЙ СНА**

Современное состояние вычислительной техники и микропроцессорных технологий позволяет применять диагностическое оборудование, способное регистрировать и обрабатывать широкий спектр физиологических показателей на протяжённых промежутках времени. Это, в свою очередь, предоставляет специалистам возможность детально исследовать жизнедеятельность организма человека в различных состояниях: в процессе выполнения специфической деятельности, при воздействии на организм всевозможных нагрузок, в процессе сна. Результатом таких исследований являются длительные записи физиологических сигналов, которые необходимо обрабатывать – выявлять специфические признаки и осуществлять с их помощью классификацию различных сегментов исходной записи сигналов по определённым критериям. Одной из актуальных и интересных с научной и практической точки зрения задач в этой области является задача распознавания стадий сна и построения гипнограммы. Первые попытки регистрации физиологических показателей с помощью примитивного оборудования были предприняты более 100 лет назад. С тех пор в этой области был выработан ряд стандартов и договорённостей. В частности, в 1968 г. вышел в свет и был принят в качестве стандарта справочник Rechtschaffen & Kales (*R&K*). В нём подробно описывались стадии сна и характерные признаки каждой из них. Было предложено разбить сон на пять стадий: стадии с медленным движением глаз (МДГ: *I, II, III, IV*) и стадию быстрого движения глаз (БДГ). В процессе исследования сна регистрируется широкий набор различных по своей природе физиологических показателей:

- электроэнцефалограмма (ЭЭГ) – электрическая активность мозга;
- электрокулограмма (ЭОГ) – движение глазных яблок в двух отведениях относительно контрлатеральных референтов;
- электромиограмма (ЭМГ) – тонус мышц;
- электрокардиограмма (ЭКГ);
- параметры дыхания. Регистрируются датчиком, установленным на специальном поясе в области груди или живота, либо датчиком потока дыхания;
- храп. Регистрируется с помощью специального микрофона (МКФ);
- кожно-гальваническая реакция (КГР);
- изменение содержания кислорода в крови ( $SpO_2$ );
- кровяное давление и другие показатели.

Обязательными сигналами для построения гипнограммы являются первые три показателя: ЭЭГ, ЭОГ и ЭМГ. Остальные показатели являются вспомогательными и в ряде случаев могут повысить надежность выявления стадий сна или достоверность диагностики тех или иных заболеваний. Для исследования стадий сна вся запись сигналов разбивается на интервалы фиксированной длины, называемые эпохами. Используемая в экспериментах длина эпохи – 30 секунд. Процесс исследования многочасовой.

В настоящее время задача распознавания стадий сна и автоматизированного построения гипнограммы с разным успехом решалась многими исследователями. Основная сложность этой задачи состоит в том, что стандарт *R&K* был выработан и сформулирован в виде рекомендаций для врачей-клиницистов, использующих визуальный анализ сигналов и оперирующих словесными, плохо поддающимися численной и формализованной оценке, характеристиками. Кроме того, сигналы, которые необходимо обрабатывать, и образы, которые надо распознавать, подвержены влиянию большого числа посторонних возму-

щающих воздействий (артефактов) и изменяются в зависимости от индивидуальных особенностей пациентов, таких, как возраст, образ жизни, различные заболевания, реакция на влияние окружающей среды. В связи с вышесказанным можно оценить задачу разработки и реализации предлагаемого алгоритма как актуальную и требующую для её решения применения новых, неординарных методов обработки данных и технологий программирования.

Анализ достижений в области автоматизации процесса распознавания стадий сна позволяет сделать вывод о том, что новый метод должен обладать следующими характеристиками:

- высокой достоверностью построения гипнограммы (совпадение с гипнограммой, построенной экспертами по общепринятым правилам на основании одних и тех же данных);
- минимальными требованиями к вычислительным ресурсам и, как следствие, возможностью функционирования в реальном времени (в настоящее время рядом исследовательских организаций прорабатывается возможность создания автономного прибора мониторинга сна);
- возможностью адаптации алгоритма под различные классификации стадий сна и правила построения гипнограммы;
- применимостью алгоритма к данным различных групп пациентов (например, физиологические паттерны сна у различных возрастных категорий испытуемых могут существенно отличаться, в частности у грудных детей, как правило, выделяют не пять, а всего две стадии сна).

Разработанный и описанный ниже метод автоматического построения гипнограммы использует математический аппарат из различных областей теоретической информатики.

Решение задачи распознавания стадий сна можно разделить на следующие составляющие:

- обработка первичных данных, регистрируемых многофункциональной диагностической системой (комплексом «Энцефалан 131-01», производства ООО НПКФ «Медиком МТД»), и расчет вторичных показателей (индексов выраженности ритмов, признаков наличия информативных графоэлементов – БДГ, сонных веретён и К-комплексов);
- статистическая обработка данных и определение базовых свойств распределения каждого из вторичных показателей для каждой из стадий сна;
- выполнение для каждой эпохи исследования оценки того, насколько её набор вторичных показателей близок к признакам каждой из известных стадий сна, и выбор наиболее близкой стадии сна;
- верификация полученной гипнограммы, проверка её на соответствие заданным правилам.

Расчет индексов вторичных показателей осуществляется с помощью спектрального и периодометрического анализа.

Как известно, в основе нечёткой логики для оценки степени принадлежности элемента множеству лежит применение функций, формируемых, в частности, с использованием эталонной статистической информации. Для решения данной задачи был разработан и реализован метод построения функции принадлежности на основе эталонной объективной информации, базирующийся на принципах кластерного анализа. Для оценки степени принадлежности заданного значения нормированного параметра одному из множества эталонных состояний введена нормированная величина, обратная квадрату евклидова расстояния от точки до каждого из статистических отсчётов для  $j$ -го параметра и  $S$ -й стадии сна:

$$Q(t_{Sj}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_S} (t_{Sj} - t_{Sji}^*)^2}; \sum_{i=1}^{N_S} (t_{Sj} - t_{Sji}^*)^2 \neq 0;$$

$$\mu(t_{Sj}) = \frac{Q(t_{Sj})}{Q(t_{Sj})_{\max}},$$

где  $t_{Sj}$  – значение параметра, для которого оценивается степень принадлежности,  $t_{Sji}^*$  – эталонное значение параметра, полученное в результате  $i$ -го статистического замера,  $S$  – номер стадии сна,  $j$  – номер параметра ( $j = \overline{1, M}$ ),  $M$  – количество параметров,  $N_S$  – количество эпох, классифицированных как стадия сна  $S$  ( $S = \overline{1, L}$ ),  $L$  – количество стадий сна,  $\mu(t_{Sj})$  – искомая функция принадлежности для  $j$ -го параметра и  $S$ -й стадии сна. Нормированные значения  $t_{Sj}$  или  $t_{Sji}^*$  соответствуют диапазону  $0 \div 1$ .

Данную оценку можно считать соответствующей методу взвешенного попарного среднего (Weighted Pair Group using arithMetic Averages – WPGMA) для определения расстояния между кластерами, но с той особенностью, что один из кластеров состоит из всего лишь одного элемента. Данный подход имеет существенное преимущество перед другими методами построения функций принадлежности в том, что в расчете учитывается абсолютно весь набор статистической информации. В рамках метода предусматривается также возможность уточнения функции принадлежности по мере поступления новых данных, что позволяет производить в процессе работы дообучение:

$$\mathcal{G}(t_{Sj}) = \frac{1}{\frac{1}{Q(t_{Sj})} + \sum_{i=1}^{K_S} (t_{Sj} - \xi_{Sji}^*)^2},$$

где  $\mathcal{G}(t_{Sj})$  – уточнённое значение функции  $Q(t_{Sj})$ ,  $Q(t_{Sj})$  – значение функции принадлежности для значения параметра  $t_{Sj}$  до получения новых эталонных результатов измерений,  $K_S$  – количество вновь полученных результатов замера значения  $j$ -го параметра для эпох стадии сна  $S$ ,  $\xi_{Sji}^*$  – значение параметра, полученное в результате  $i$ -го замера из новой серии замеров.

Для оптимизации и повышения быстродействия алгоритма функция  $Q$  может быть вычислена однократно и в дальнейшем аппроксимирована с помощью сплайна, что избавляет от необходимости иметь доступ ко всей статистике и производить полный перерасчёт значений функций принадлежности.

Процесс распознавания базируется на использовании полученных функций принадлежности для оценки близости показателей очередной эпохи к известным стадиям сна:

$$F_S = \prod_{j=1}^M \mu(t_{Sj}),$$

где  $M$  – количество параметров;  $\mu(t_{Sj})$  – функция принадлежности, рассчитанная для параметра  $j$  и стадии сна  $S$ ;  $t_{Sj}$  – значение параметра, относительно которого производится распознавание. Максимальное значение  $F_S$  позволяет нам определить, к какой стадии сна

необходимо отнести текущую эпоху.

Для отладки и апробации описанного в настоящей статье алгоритма разработан программный модуль для цифрового электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03», серийно выпускаемого ООО НПКФ «Медиком-МТД» и предназначенного для проведения широкого спектра нейрофизиологических исследований. Модуль реализует представленные в статье этапы автоматического распознавания стадий сна и осуществляет расстановку специальных маркеров на границах стадий сна. Для дальнейшего анализа эффективности работы алгоритма результаты представляются в виде классической гипнограммы (рис. 1). В качестве эталонной статистической информации использовалась база данных клинических полисомнографических исследований с построенными специалистами гипнограммами. Эта же база была использована для исследования работоспособности алгоритма и оценки его точности. В процессе проведения экспериментов было получено порядка 80 % совпадений между экспертными заключениями и результатами работы разработанной программной системы в условиях однородной выборки пациентов.

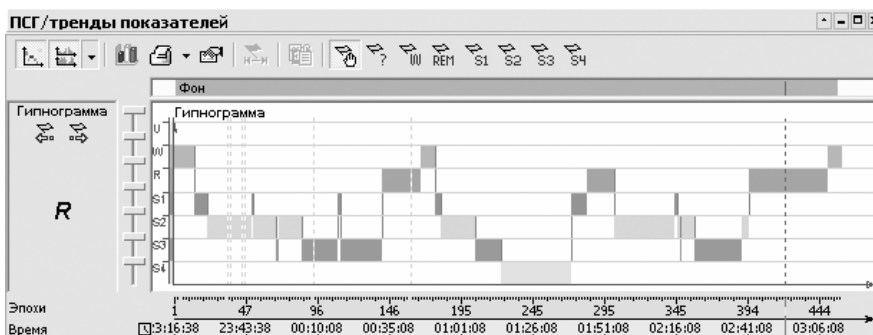


Рис. 1. Пример построенной гипнограмм: U – нераспознанные эпохи; W – бодрствование; R – стадия БДГ; S1 – S4 – стадии I – IV соответственно (На шкале в нижней части окна отображается астрономическое время и номер эпохи)

Данный метод позволяет получить результаты, приемлемые по достоверности для диагностики различных нарушений сна, а также обеспечивает возможность настройки алгоритма под разные возрастные группы, стандарты, требования и пожелания конкретных экспертов. Авторы предполагают, что использование рассмотренных в данной работе результатов позволит решить задачу существенного упрощения и ускорения работы в автоматизированном режиме специалистов, которым регулярно приходится осуществлять визуальную обработку многочасовых записей нейрофизиологических данных для построения гипнограмм.

УДК 615.471:616-073.97:616.12

П.П. Кравченко, А.С. Шульга

#### О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КОМПРЕССИИ БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДЕЛЬТА-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА С ГАРАНТИРОВАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Современная медицина невозможна без мощных программно-аппаратных комплексов, осуществляющих диагностику и функциональные исследования состояния человека. Концептуальная схема этих комплексов включает три основных элемента: стационарный или