

УДК 528.7: 629.78

Мещеряков Д.В.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Черепанова Е.В.

Одесский государственный экологический университет

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ИНФРАКРАСНОЙ СИСТЕМЕ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В статье рассмотрена задача обработки выходных сигналов биологического объекта, находящегося в цепи обратной связи системы инфракрасного облучения. Показано, что значимость выходных признаков для принятия решения по управлению системой неодинакова и предполагает подчиненность локальных решений. Предложен подход обработки информации, основанный на нечеткой кластеризации и привязке процесса принятия решения к центральному кластеру.

Ключевые слова: принятие решений, инфракрасное облучение, биологическая обратная связь.

Постановка проблемы. В соответствии с принципами теории автоматического управления, элементы биотехнической системы могут рассматриваться в терминах «вход-выход-состояние». В системе инфракрасной пелоидотерапии с биологической обратной связью входным воздействием является энергия инфракрасного облучения кожи пациента. Тепловая нагрузка вызывает ответную реакцию организма в виде ускорения частоты сокращения сердца, повышении частоты дыхания, активизации работы потовых желез. Доли участия органов человека в теплоотдаче в условиях теплового комфорта являются такими: через кожу человека человек отдает примерно 80% теплоты, через легкие примерно 13% [1].

Выходными признаками пациента является изменение артериального давления, составляющих электрокардиограммы, частоты дыхания, насыщенности крови кислородом, температуры кожного покрова. Наиболее исследованной является электрокардиограмма, обработка которой позволяет выявить множество показателей сердечнососудистой системы. Анализ электрокардиологического сигнала существенно усложняется в связи с физиологическим прохождением электрических сигналов, приводящим к недетерминированности и нестационарности, изменчивости и влиянию разнообразных помех на восприятие сигнала измерителем на поверхности кожного покрова. Положительная предсказательная ценность этих показателей не превышает 85% [2]. Аналогичная неопределенность наблюдается и при анализе частоты дыхания и сопротивления кожного покрова, различающихся даже у одного

человека в различное время, зависящих от психологического состояния, внешних условий и т.п.

По этой причине кибернетический подход, состоящий в замене реального организма его математической или физической моделью, имеет ограниченную применимость. Выходной признак биологического объекта формируется в результате суммирования сигналов различных биофизических структур, поэтому результирующий сигнал является стохастическим. Если на биологический объект не действуют раздражающие факторы, то выходные признаки на определенном временном промежутке можно считать стационарными. Если организм находится под влиянием внешних воздействий, приводящих к изменению функционирования отдельных систем или их взаимодействия, выходные признаки становятся нестационарными. Основной проблемой обработки сигналов выходных признаков в инфракрасной системе с биологической обратной связью следует признать неоднозначность связи между входными воздействиями и реакцией на них биологического объекта. Кроме того, аппаратные средства считывания выходной информации должны быть неинвазивными и допускать простоту установки на объект. Это исключает такие информативные средства, как электроэнцефалографические, затрудняет электрокардиологические, которые необходимо совмещать с применением лечебной грязи на грудной клетке и подвижностью пациента.

Анализ последних достижений и публикаций. Аппаратные средства считывания первичной информации перерабатывают данные в режиме реального времени поступления сигналов, поэтому требования к быстройдействию

разование в адаптивное пространство параметры аппроксимирующих функций.

Применительно к модели полезного сигнала 2 важно, что преобразование Фурье не позволяет локализовать во времени частотные компоненты, поэтому оно приемлемо только для стационарных сигналов. Биологические сигналы к таковым не относятся, поэтому преобразование Фурье возможно только на выделенных квазистационарных участках или окнах. Однако при этом ухудшается разрешающая способность по частоте, а увеличение длительности окна приводит к влиянию нестационарности. Вейвлет преобразование в определенной мере компенсирует этот недостаток, однако проблема обработки биологических сигналов, связанная с неопределенностью связи между входным тепловым воздействием и выходными признаками реакции организма, остается нерешенной.

Постановка задания. Целью работы является анализ способов обработки выходных признаков биологического объекта, которые способствуют повышению достоверности принятия решений применительно к системе управления с биологической обратной связью.

Изложение основного материала исследования. Особенность сигналов выходных признаков человека заключается в том, что сигналы лишь косвенно отражают реакции на входные инфракрасные воздействия. Кроме того, значимость этих признаков не одинакова. Например, информативность сопротивления кожного покрова, которая отображает проницаемость кожного покрова для проникновения лекарственных веществ в подкожный слой, полностью соответствует медицинским задачам инфракрасной пеллоидотерапии. Тем более, что основной теплообмен с поверхностью осуществляется через кожный покров. Основная проблема состоит в существенном запаздывании реакции потовыделения и тем более высыхания жидкости на поверхности кожи, что должно оказывать влияние на процесс управления при использовании этой информации.

Частота сердечных не учитывает перераспределение кровяных потоков в периферийные области тела для переноса тепла от нагретых инфракрасным излучением областей. Очевидно, что информативность этого показателя повышается при избытке поглощенного тепла. Быстродействие отклика данного показателя на изменение радиационного воздействия более высокое, по сравнению с изменением сопротивления кожного покрова. Так, при исследовании динамиче-

ских характеристик электрокардиограммы при стресс-анализе на установке тредмила используется первая производная кривой кардиограммы, однако исследования проводятся не в реальном времени эксперимента. Аналогично, частота дыхания может служить вспомогательным признаком управления, поскольку прямую связь между интенсивностью инфракрасного облучения и частотой дыхания установить крайне сложно. Определение поверхностной температуры кожного покрова может быть осуществлено инфракрасным пирометром, при этом быстродействие считывания данных достаточно высокое и может быть использовано для принятия решения в системе управления. Информативность данного показателя не слишком высока, поскольку определяется только некий физический показатель внешнего воздействия на поверхность кожного покрова, а не функция организма.

Приведенный анализ признакового пространства показывает, что присутствует основной признаковый элемент – сопротивление кожного покрова, и вспомогательные признаковые элементы, которые дополняют по определенным свойствам основной. По каждому элементу признакового пространства можно принять локальное решение, например, пороговое, по увеличению или снижению интенсивности инфракрасного излучения при достижении сопротивлением кожного покрова значения, при котором происходит умеренное потовыделение. Основное значащее решение может влиять на вспомогательные решения, в частности, игнорировать их или готовить новые решения по принципам упреждающего управления. В свою очередь, вспомогательные решения могут оказывать влияние на основное путем учета собственных свойств, что способствует получению общего решения.

Обозначим, как это принято в теории неопределенного программирования [14], через x и y_i – управляющие векторы основного значимого элемента и i – вспомогательного, при $i = 1, 2, \dots, m$, целевые функции основного $F(x, y_1, y_2, \dots, y_m)$ и вспомогательного $f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m)$, S – допустимое множество управляющего вектора x основного элемента, определяемое как $S = \{x | G(x) \leq 0\}$, где G – векторзначная функция вектора решений x , 0 – вектор с нулевыми компонентами. Тогда для каждого решения x , выбранного основным элементом, в котором допустимые управляющие векторы y_i для всех вспомогательных элементов должны зависеть не только от x , но и от y_1, y_2, \dots, y_m и могут быть представлены

следующим образом $g_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \neq 0$, где g_i – векторзначные функции. При таком подходе выбор управляющего вектора приводит к выбору управляющего элемента $x \in S$, а затем определяется совокупность управляющих векторов (y_1, y_2, \dots, y_m) вспомогательными элементами. Задача сводится к задаче двухуровневого программирования и записывается в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_x F(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ \text{при ограничениях:} \\ C(x) \leq 0, \\ \text{где каждый } y_i \ (i = 1, 2, \dots, m) \\ \text{получается в результате решения} \\ \left\{ \begin{array}{l} \max_x f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{при ограничениях:} \\ g_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Выходные сигналы биологического объекта имеют вероятностный характер, на который накладываются составляющие сигналы иных процессов, протекающих в организме. Очевидно, что при большом объеме выборки влияние этих нежелательных составляющих сглаживается и появляется возможность определять очень тонкие нюансы исследуемых процессов. Например, приводятся данные, что при анализе более 50 000 электрокардиограмм можно выделить признаки работы сердечного клапана, которые различают людей южного и северного полушарий.

В случае решаемой задачи обработки информации инфракрасной системой с биологической обратной связью не может идти речь о таком объеме выборок. Если продолжительность процесса инфракрасной пелоидотерапии составляет примерно 20 минут, то максимальное время задержки реакции управляющей системы не может превышать 1 минуты. Это время согласовывается с задержкой реакции организма на тепловые воздействия, составляющие от единиц до десятков секунд. При этом выборка составляет от десяти до сотни измерений для каждого выходного признака. Учитывая их статистический характер и ограниченный диапазон существования при заданной интенсивности излучения, логично использование вероятностного анализа для данной совокупности.

Ранее были определены медицинские уровни состояния пациента применительно к условиям комфортного состояния пациента в камере инфракрасной пелоидотерапии [15]:

1. холодное – ощущается дискомфорт вследствие недостатка тепла;
2. умеренно теплое – отсутствие дискомфорта при движении;

3. теплое – комфортное состояние при отсутствии движения;

4. очень теплое – незначительное потовыделение кожного покрова;

5. горячее – температурный дискомфорт с повышением частоты сердечных сокращений и дыхания, обильное потоотделение.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что температурный диапазон таких состояний находится в пределах от 15°C до 45°C, при этом сопротивление кожного покрова меняется от 100 КОм до 100 Ом. Разбиение полученных значений текущих признаков при заданных температурах и нормировке значений: $z = \frac{x - \bar{x}}{x_{\max} - x_{\min}}$, где \bar{x} – среднее значение, от минимального до максимального значений, позволяет осуществить классификацию множества признаков на уровни комфортного состояния или кластеры. Если принять за пороговое значение четвертый кластер, соответствующий активному состоянию кожного покрова для процесса пелоидотерапии, то он может служить локальным управляющим признаком для изменения интенсивности инфракрасного излучения по цепи обратной связи. Учитывая разнородность свойств различных признаков можно дополнять основной признак в направлении, например, динамических характеристик, важных для системы управления. Формальное описание задачи кластеризации сводится к тому, что из данного множества объектов данных I , представленного набором атрибутов, необходимо создать множество кластеров C и отображение F множества I на множество C , т.е. $F: I \rightarrow C$. F задает модель данных и является решением задачи. Расстояние $d(i_j, i_p)$ – это мера близости между объектами. Если расстояние меньше некоторого значения σ , то элементы входят в один кластер, если нет – разные. В качестве метрики обычно используется Евклидово расстояние, которое является геометрическим расстоянием в многомерном пространстве:

$$d_{Ei,j} = \left(\sum_{i=1}^m (x_i^j - x_i^p)^2 \right)^{1/2}.$$

Очевидно, что в рассматриваемом случае кластеры будут перекрывающимися, поэтому невозможно с помощью математических процедур отнести объект к определенному кластеру.

Функционирование автоматической системы управления при наличии человека с цепью обратной связи предполагает этап принятия решения. Поскольку принятие решения ориентировано на конкретного человека, то стандартные подходы, ориентированные на усредненные показатели, не обеспечивают положительного результата. Это

означает, что в начале проведения лечебного воздействия управляющая система должна подстроиться под конкретного пациента, т.е. в условиях неопределенности определить реперные точки (центры или границы кластеров), которые потом могут уточняться.

Формирование решения в условиях определенности существенно отличается от выработки решений в условиях неопределенности, состоящей в том, что вероятности альтернатив не определены однозначно и множество исходов соответствует каждому варианту. Для снижения уровня неопределенности необходима информация о том, каков должен быть результат приоритетного решения и процедура его достижения. При таком подходе функцию принадлежности $\alpha_A(x)$ нечеткому множеству A элемента x , заданного на множестве X , будем рассматривать как меру близости x к прототипу A при трактовке зависимости $A = \{x, \mu_A(x)\}$. Аналогично, с помощью функции принадлежности будем осуществлять разделение элементов множества на более или менее предпочтительные. При медицинской интерпретации данного тезиса это означает, что существуют определенные дополнительные знания, которые не учтены в данной модели, но могут оказать влияние на результат принятия решения. С формальной точки зрения, $\alpha_A(x)$ можно трактовать как степень предпочтения или соответствия выбора x как значения переменной b . Возможна и иная трактовка меры неопределенности, направленная на принятие решений в автоматических системах управления с биологической связью: $x \geq_A x'$, т.е. x больше соответствует A чем x' . Это позволяет формировать управляющие решения по совокупности локальных решений, полученных от источников с разнородными признаками, что

соответствует рассматриваемой ситуации многокритериальной оптимизации с нечеткой исходной информацией.

Принятие решения о соответствии интенсивности инфракрасного облучения кожного покрова человека комфортному состоянию лечения методом пелоидотерапии принимается по нечеткой информации, поэтому выделим последовательность этапов:

1. уточнение целей и критериев важности каждого признака в цепи биологической обратной связи и соответствие его основной цели системы – управлению интенсивностью излучения по нечетким выходным признакам;
2. формирование вариантов решений, приводящих к достижению цели, учитывающих как биологические особенности организма, так и временные показатели реакции человека и технической системы на входные воздействия;
3. определение достаточности неинвазивных выходных признаков для достижения цели управления системой с биологической обратной связью;
4. построение логической модели системы принятия решений, т.е. связей между локальными целями, вариантами решений, временными и информационными ресурсами;
5. определение критерия выбора и лучшего варианта решения.

Выводы.

1. Показано, что в системе с биологической обратной связью выходные признаки объекта неравнозначны по значимости и им объективно присуща неопределенность.
2. Предложен подход обеспечения возможности принятия решения по управлению системой инфракрасной пелоидотерапии при нечеткости входной информации.

Список литературы:

1. Прищепа И.М. Физиология человека и животных: курс лекций / И.М. Прищепа; М-во образования РБ, УО «ВГУ им. П.М. Машерова». Витебск: Изд-во УО «ВГУ им. П. М. Машерова», 2005. 299 с.
2. Калиниченко А.Н. О точности и достоверности спектральных методов расчёта показателей variability сердечного ритма. Информационно-управляющие системы. 2007. № 6. С. 41–48.
3. Богатов Н.М., Гук В.Ф. Сравнительный анализ методов распознавания электрокардиограмм. Информационные технологии и компьютерные системы для медицины. 2006. С. 71–72.
4. Калиниченко А.Н. Компьютерные методы автоматического анализа ЭКГ в системах кардиологического наблюдения: дис. ... докт. техн. наук. Санкт–Петербург, 2008. 205 с.
5. Кавасма Р.А., Кузнецов А.А., Сушкова Л.Т. Автоматизированный анализ и обработка электрокардиографических сигналов. Методы и система. М.: Сайнс-пресс, 2006. 144 с.
6. Калиниченко А.Н. О точности и достоверности спектральных методов расчёта показателей variability сердечного ритма. Информационно-управляющие системы. 2007. № 6. С. 41–48.
7. Танеев Р.М. Математические модели в задачах обработки сигналов. М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 83 с.

8. Nonlinear filtration of biomedical signals with the locally concentrated signs in task of structural identification. Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. Kharkov: NTU "KhPI", 2011. № 17. Pp. 168–174.

9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие. СПб.: Питер, 2006. 752 с.

10. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: Практический подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 992 с.

11. Файнзильберг Л.С. ФАЗАГРАФ – эффективная информационная технология обработки ЭКГ в задаче скрининга ишемической болезни сердца. Клиническая информатика и телемедицина. 2010. Т. 6. Вып. 7. С. 22–30.

12. Файнзильберг Л.С. Методи та інструментальні засоби оцінювання стану об'єктів за сигналами з локально зосередженими ознаками: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.13.06 «Автоматизовані системи управління та прогресивні інформаційні технології». К., 2004. 35 с.

13. Філатова Г.Є. Структурна ідентифікація сигналів у кардіологічних системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.17. Харків, 2002. 177 с.

14. Лю Б. Теория и практика неопределенного. М.: БИНОМ, 2005. 416 с.

15. Гнатовская А.А., Мещеряков Д.В., Черепанова Е.В. Концепция преобразования данных инфракрасной системой с биологической обратной связью. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. 2018. Т. 29(68), № 2. С. 116–120.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДАНИХ В ІНФРАЧЕРВОНІЙ СИСТЕМІ З БІОЛОГІЧНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

У статті розглянута задача обробки вихідних сигналів біологічного об'єкта, що знаходиться у ланцюзі зворотного зв'язку системи інфрачервоного опромінювання. Показано, що значимість вихідних ознак для прийняття рішення з управління системою неоднакова і припускає підпорядкованість локальних рішень. Запропоновано підхід обробки інформації, заснований на нечіткій кластеризації і прив'язці процесу прийняття рішень до центрального кластеру.

Ключові слова: прийняття рішень, інфрачервоне випромінювання, біологічний зворотний зв'язок.

ANALYSIS OF METHODS OF DATA PROCESSING IN INFRARED SYSTEM WITH A BIOLOGICAL FEEDBACK

The article elucidated the problem of processing the output signals of a biological object which is located in the feedback loop of an infrared irradiation system. It was shown that the significance of the output characteristics for the decision making on the management of the system is not the same and assumes the subordination of local solutions. An information processing approach based on fuzzy clustering was proposed, and the decision-making process was linked to the central cluster.

Key words: decision making, infrared irradiation, biological feedback.