

УДК 004.891.3

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ С ЛОКАЛЬНО СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПРИЗНАКАМИ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ФИЛЬТРА

К. т. н. А. Е. Филатова

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Украина, г. Харьков
filatova@gmail.com

В работе предложен критерий оценки качества метода структурной идентификации биомедицинских сигналов с локально сосредоточенными признаками с помощью цифрового нелинейного фильтра. Выполнена экспериментальная проверка качества структурной идентификации при задании различных параметров нелинейного фильтра.

Ключевые слова: критерий качества, структурная идентификация, нелинейный фильтр, биомедицинский сигнал, локально сосредоточенные признаки.

С появлением новых методов функциональной диагностики в кардиологии таких, например, как холтер-мониторинг электрокардиограммы (ЭКГ) сердца, появилась необходимость в автоматическом анализе больших объемов информации. Поэтому проектирование интеллектуальных компьютерных кардиологических систем поддержки принятия решений (ИККСППР) является актуальной научно-технической проблемой. Большинство сигналов, полученных в результате функциональной диагностики состояния сердца и сердечно-сосудистой системы, относится к биомедицинским сигналам (БМС) с локально сосредоточенными признаками (ЛСП).

При создании эффективных методов структурной идентификации БМС с ЛСП для ИККСППР необходимо учитывать модель полезного сигнала (МПС), а также основанные на МПС методы преобразования БМС с ЛСП. Анализ различных МПС и соответствующих им методов преобразования БМС с ЛСП приведен в [1—4]. Задачу структурной идентификации БМС с ЛСП можно рассматривать как локальную цифровую обработку сигнала скользящим окном или апертурой, что по определению является цифровой фильтрацией [5—7]. Цель цифровой фильтрации БМС с ЛСП – обнаружение структурных элементов (СЭ) заданного вида, а также их локализация на рассматриваемом сигнале. Задача обнаружения сигнала широко рассмотрена в радиолокации [8]. При этом на основании параметров сигнала для задачи обнаружения проектируются соответствующие фильтры, например, согласованные фильтры. Идеи согласованной фильтрации были положены в основу синтеза нелинейного фильтра (НФ) для решения задачи структурной идентификации БМС с ЛСП. В результате в [9] была выполнена общая постановка проблемы и предложена обобщенная схема структурной идентификации БМС с ЛСП на основе НФ. Простейший случай обобщенной схемы, когда для выполнения структурной идентификации используется одна модель полезного сигнала, т. е. реализуется один канал обобщенной схемы, представлен на рис. 1.

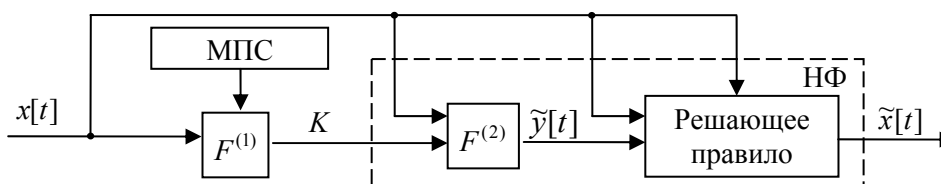


Рис. 1. Схема структурной идентификации БМС с ЛСП по одному каналу

На вход схемы подается дискретный сигнал $x[t]$. В результате преобразования 1-го уровня $F^{(1)}$ получаем кортеж $K = \langle x_0[t], \bar{p}, f(x[t], \bar{p}) \rangle$, где \bar{p} – вектор параметров преобразования; $f(x[t], \bar{p})$ –

функция преобразования сигнала $x[t]$ ($t = \overline{0; T_s - 1}$) в пределах апертюры для синтеза отклика НФ. При этом линейный размер апертюры N_a НФ определяются линейным размером эталона $x_0[t]$ искомого класса СЭ на временной оси, т. е. $N_a = T_0$. Полученная функция преобразования $f(x[t], \vec{p})$ используется не только для описания сигнала ω^t в пределах апертюры фильтра, но и для описания эталона ω^3 искомого класса СЭ, т. е. $y_j^3 = f_j(x_0[t], \vec{p})$, $y_j^t = f_j(x[t], \vec{p})$, где y_j^3 , y_j^t – координаты ω^3 и ω^t соответственно; j – индекс координаты. Таким образом, целью преобразования 1-го уровня $F^{(1)}$ является определение параметров нелинейного фильтра, таких как линейный размер апертюры и весовая функция фильтра, а также сигнала для обнаружения $x_0[t]$. Преобразование 2-го уровня $F^{(2)}$ (см. рис. 1) – это получение новой функции во временной области $\tilde{y}[t] \in [0; 1]$, которая показывает степень схожести ω^3 с ω^t . Назовем функцию $\tilde{y}[t]$ функцией обнаружения, которая рассчитывается по следующему выражению:

$$\tilde{y}[t] = \frac{1}{1 + \alpha \sum_{j=1}^{N_a} (y_j^3 - y_j^t)^2}, \quad (1)$$

где $\alpha > 0$ – коэффициент, отражающий чувствительность к изменениям структурных элементов одного класса за счет наложения помех и вариации параметров.

На основании анализа функции обнаружения $\tilde{y}[t]$ выполняется структурная идентификация (СИ) с помощью порогового решающего правила:

$$\tilde{x}[t] = \begin{cases} x[t] \quad \forall t \in [t_{0j}; t_{0j} + T_0], & \text{если } \tilde{y}[t_{0j}] > Pd; \\ const & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (2)$$

где Pd – пороговое значение; t_{0j} – точка локального максимума (ЛМ) функции $\tilde{y}[t]$ такая, что $y[t_{0j}] \geq \tilde{y}[t] \quad \forall t \in \dot{\mathbf{M}}(t_{0j})$; $\dot{\mathbf{M}}(t_{0j}) = \mathbf{M}(t_{0j}) \setminus \{t_{0j}\}$ – проколотая окрестность точки t_{0j} ; $\mathbf{M}(t_{0j})$ – окрестность точки t_{0j} ; j – индекс ЛМ; $const$ – константа, определяющая уровень сигнала, соответствующий отсутствию СЭ заданного типа на текущем фрагменте сигнала (например, уровень изолинии ЭКГ).

Целью настоящей работы является оценка качества структурной идентификации БМС с ЛСП на основе НФ.

Для оценки качества структурной идентификации на основе спроектированного НФ необходим критерий, который учитывал бы два обстоятельства:

1. НФ должен обеспечивать минимум ошибок 1-го и 2-го рода.

2. Локальные максимумы функции обнаружения $\tilde{y}[t]$, соответствующие искомым СЭ, должны стремиться к 1, тогда как все остальные ЛМ должны стремиться к 0.

Обозначим локальные максимумы функции обнаружения (1):

$$\tilde{y}[t_{oj}] = \begin{cases} y_0^{\max}[n], & \text{если } \tilde{y}[t_{oj}] > Pd; \\ y_1^{\max}[l] & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $y_0^{\max}[n]$ – ЛМ функции обнаружения $\tilde{y}[t]$, соответствующий найденному СЭ; $y_1^{\max}[l]$ – ЛМ функции $\tilde{y}[t]$, соответствующий другому найденному объекту; n, l – индексы ЛМ функции $\tilde{y}[t]$ для СЭ и всех остальных объектов соответственно.

Для учета указанных выше обстоятельств предлагается следующий критерий качества:

$$K_{СИ} = \frac{(m^0 - m^1)N_0 - \frac{m^0 + \sigma^0}{m^0 - \sigma^0} N_\alpha - \frac{1 - m^1 + \sigma^1}{1 - m^1 - \sigma^1} N_\beta}{N} \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$m^0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_0^{\max}[n], \quad m^1 = \frac{1}{N_1} \sum_{l=1}^{N_1} y_1^{\max}[l], \quad \sigma^0 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (y_0^{\max}[n] - m^0)^2}, \quad \sigma^1 = \sqrt{\frac{1}{N_1-1} \sum_{l=1}^{N_1} (y_1^{\max}[l] - m^1)^2},$$

где m^0 , m^1 , σ^0 , σ^1 – математические ожидания и стандартные отклонения ЛМ функции $\tilde{y}[t]$ для СЭ и всех остальных объектов соответственно; N , N_1 – количество ЛМ функции $\tilde{y}[t]$ для СЭ и всех остальных объектов соответственно.

Так как функция $\tilde{y}[t]$ нормирована (принимает значения из интервала $[0; 1]$), то $m^0, m^1, \sigma^0, \sigma^1 \in [0; 1]$. Чем больше похожи найденные СЭ на эталонный объект, тем ближе значение m^0 к 1. Аналогично, чем больше все остальные объекты не похожи на эталонный СЭ, тем ближе значение m^1 к 0. В предельном случае $m^0 = 1$, т. е. максимально возможное значение коэффициента $C_0 = 1$. Тогда в случае безошибочной СИ, когда $N_\alpha = N_\beta = 0$, при $C_0 \rightarrow 1$ значение $K_{СИ} \rightarrow 1$.

Для сравнительного анализа качества структурной идентификации БМС с ЛСП при различных параметрах НФ был выполнен ряд опытов для поиска в ЭКГ зубцов P грудного отведения V4. Во всех экспериментах использовался один и тот же эталон заданного класса СЭ $x_0[t]$, который был выделен на сигнале опорными точками t_k . Параметры НФ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры НФ (содержимое кортежа K_i) в различных опытах

№ опыта i	Модель полезного сигнала для эталона $x_0[t]$	Компоненты \vec{p}_i	Функция преобразования $y_{ij}^3 = f_{ij}(x_0[t], \vec{p}_i)$
1, 2	$x_0[t] = \sum_{k=0}^{T_0-1} a_k \varphi_k[t]$	T_0, \mathbf{S}	$y_{ij}^3 = a_k \quad \forall j = \overline{1, N_i}, k \in \mathbf{S}$
3, 4	$x_0[t] = \sum_j x_j[t] + \varepsilon[t], x_j[t] = \begin{cases} a_{0j} + a_{1j}t, & t \in [t_k; t_{k+1}] \\ 0, & t \notin [t_k; t_{k+1}] \end{cases}$	T_0, t_k	$y_{ij}^3 = \frac{x_0[t_{k+1}] - x_0[t_k]}{t_{k+1} - t_k},$ $j, k = 1, 2$
5, 6	$x_0[t] = \sum_j x_j[t], x_j[t] = \begin{cases} a_{0j} + a_{1j}t + \varepsilon_j[t], & t \in [t_k; t_{k+1}] \\ 0, & t \notin [t_k; t_{k+1}] \end{cases}$		$y_{ij}^3 = a_{1j}, j = 1, 2$
7, 8	$x_0[t] = \sum_j x_j[t], x_j[t] = \begin{cases} a_{0j} + a_{1j}t + a_{2j}t^2 + \varepsilon_j[t], & t \in [t_k; t_{k+1}] \\ 0, & t \notin [t_k; t_{k+1}] \end{cases}$		$y_{ij}^3 = a_{1j} + 2a_{2j}t_j, j = 1, 2,$ где $t_j = (t_k + t_{k+1})/2$

В опытах № 1 и 2 (см. табл. 1) эталонный сигнал $x_0[t]$ задан с помощью базисных функций Хаара. Тогда описание эталона имеет следующий вид: $y_{ij}^3 = a_k \quad \forall j = \overline{1, N_i}$ и $k \in \mathbf{S}$, где a_k – координаты базиса; $N_i = |\mathbf{S}|$ – количество координат, используемых для описания эталона; $\mathbf{S} \subseteq \{0, 1, \dots, T_0 - 1\}$ – множество индексов коэффициентов a_k . Если все a_k ($k = \overline{0, T_0 - 1}$) используются для описания эталона, то $\mathbf{S} = \{0, 1, \dots, T_0 - 1\}$ и $N_i = T_0$. В данных опытах $k = 0 \notin \mathbf{S}$. В опытах № 3—8 эталон $x_0[t]$ задан с помощью различных аппроксимирующих функций. Так, в опытах № 3—6 в качестве аппроксимирующих функций были использованы прямые, проходящие строго через последовательные пары опорных точек. При этом описание эталона в опытах № 3 и 4 выполняется с помощью разделенных разностей 1-го порядка. Основным достоинством использования разделенных разностей 1-го порядка является небольшая вычислительная сложность при хорошем качестве СИ. В опытах № 5 и 6 в качестве аппроксимирующих функций были использованы линейные функции, наилучшим образом аппроксимирующие участки сигнала между парами опорных точек. В этом случае для описания эталона используются угловые коэффициенты аппроксимирующих функций. И, наконец, в опытах № 7 и 8 в качестве аппроксимирующих функций были использованы функции 2-го порядка, наилучшим образом аппроксимирующие участки сигнала между парами опорных точек. При этом описание эталона осуществляется с помощью первых производных аппроксимирующей функции 2-го порядка, вычисленных в середине интервалов между соответствующими парами опорных точек.

В табл. 2 приведены результаты проверки качества структурной идентификации в восьми опытах при использовании различных МПС для описания эталона (см. табл. 1) и различных параметрах α функции обнаружения (1). Объем обучающей выборки N составлял 553 зубца P .

Расчет критерия качества структурной идентификации $K_{СИ}$

i	α	N_0	N_α	N_β	m^0	σ^0	m^1	σ^1	$K_{СИ}$
1	0,01	548	5	4	0,9165	0,0637	0,3755	0,2197	0,510631
2	0,05	548	5	4	0,6997	0,1056	0,1294	0,0915	0,543955
3	0,7	551	2	0	0,8897	0,1031	0,1081	0,0716	0,774209
4	0,9	552	1	1	0,86497	0,1167	0,08696	0,0593	0,772171
5	0,7	553	0	0	0,868	0,1055	0,0888	0,0618	0,7792
6	0,9	553	0	0	0,8394	0,1193	0,0711	0,0512	0,7683
7	0,5	553	0	0	0,8998	0,0888	0,1182	0,0792	0,7816
8	0,9	553	0	0	0,8394	0,1193	0,0711	0,0512	0,7683

Анализ результатов экспериментальной проверки качества структурной идентификации биомедицинских сигналов с ЛСП, проведенной с использованием различных моделей полезного сигнала, показал эффективность применения предложенных МПС.

Предложенный критерий оценки качества структурной идентификации этих сигналов, а также рассмотренные способы описания эталона искомого класса СЭ на основе различных моделей полезного сигнала позволили выполнить экспериментальную проверку качества СИ для отдельных каналов цифрового нелинейного фильтра. Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную проверку эффективности синтезированного коллектива решающих правил на реальных сигналах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Филатова А. Е. Нелинейная фильтрация биомедицинских сигналов с локально сосредоточенными признаками в задаче структурной идентификации // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання.— 2011.— № 17.— С. 168—174.
2. 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.
3. Абакумов В. Г., Рибін О. І., Сватош Й. Біомедичні сигнали. Генезис, обробка, моніторинг. Навчальний посібник.— Киев: Нора-прінт, 2001.
4. Вычислительные системы и автоматическая диагностика заболеваний сердца / Под ред. Ц. Касереса, Л. Дрейфуса. – Москва: Мир, 1974.
5. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический поход.— Москва: Издательский дом «Вильямс», 2004.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие.— СПб.: Питер, 2006.
7. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов.— Москва: «Техносфера», 2007.
8. Татарский Б. Г., Дудник П. И., Ильчук А. Р. Многофункциональные радиолокационные системы. Учебное пособие для вузов.— Москва: Дрофа, 2007.
9. Поворознюк А. И., Филатова А. Е. Описание эталона для синтеза функции отклика нелинейного фильтра в задаче структурной идентификация биомедицинских сигналов с локально сосредоточенными признаками // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання.— 2012.— № 38.— С. 136—141.

A. E. Filatova

The evaluation of the quality of structural identification of bio-medical signals with localized features using the non-linear filter.

The quality evaluation criterion for the method of structural identification of bio-medical signals with localized features using the digital non-linear filter is proposed in this study. The quality of structural identification in the process of setting various parameters of the non-linear filter is experimentally verified.

Keywords: *quality evaluation, structural identification, non-linear filter, bio-medical signal, localized features.*