

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Abstract: The development of models of activation and interaction of systems of processing sensory information is described on the basis of researching bioelectrical activity of cerebral cortex. The regressive polynomials, reflecting statistical modeling reactions of the brain of the man on external irritants. These regressive polynomials may be used when forecasting formation of associative connections in cerebral cortex of the man.

Key words: bioelectrical activity brain, associative connections, cerebral cortex, sensory information.

Анотація: У статті описано розробку активації та взаємодії систем обробки сенсорної інформації на основі дослідження біоелектричної активності кори головного мозку людини. Отримано регресійні поліноми, які відображають статистичне моделювання реакцій головного мозку людини на зовнішні подразники. Ці регресійні поліноми можуть бути використані при прогнозуванні формування асоціативних зв'язків у корі головного мозку людини.

Ключеві слова: біоелектрична активність мозку, кора головного мозку, асоціативні зв'язки, сенсорна інформація.

Аннотация: Описана разработка моделей активации и взаимодействия систем обработки сенсорной информации на основе исследования биоэлектрической активности коры головного мозга человека. Получены регрессионные полиномы отражающие статистическое моделирование реакций головного мозга человека на внешние раздражители. Эти регрессионные полиномы могут быть использованы при прогнозировании формирования ассоциативных связей в коре головного мозга человека.

Ключевые слова: биоэлектрическая активность мозга, кора головного мозга, ассоциативные связи, сенсорная информация.

1. Введение

Постановка проблемы. При создании интеллектуальных систем, как правило, используются методы, базирующиеся на имитации особенностей восприятия, переработки и отображения информации высшими животными и человеком. Разработанные алгоритмы робототехнических комплексов ориентированы на непосредственную обработку звуковой и видеоинформации с фиксированной реакцией системы. Потребность в оценке случайных изменений внешней среды и выработке искусственными интеллектуальными системами адекватных решений составляет актуальность исследований реакций человека.

Анализ литературных источников. Интегративные функции центральной нервной системы (ЦНС) человека – это такие функции, которые не связаны непосредственно с обработкой сенсорных сигналов или управлением двигательными и вегетативными центрами. Согласно физиологическим данным, интегративные функции ЦНС лежат в основе сознания, речи, мышления (понимания и манипулирования понятиями), памяти (включая процессы обучения), эмоций. Структуры, отвечающие за реализацию этих функций, локализованы главным образом в новой коре головного мозга (неокортексе) [1]. В качестве одного из основных методов изучения механизмов обработки информации и управления поведением человека в настоящее время применяется электроэнцефалографическое исследование (ЭЭГ), результаты которого позволяют делать заключения о состоянии коры головного мозга и процессах, протекающих в ней (реакции

пробуждения, активации, торможения и т.д.). Так, регистрация δ -ритма (1-4 Гц) и θ -ритма (4-8 Гц) характерна для мозговой деятельности взрослого человека в состоянии сна, α -ритм (8-13 Гц) доминирует у человека в состоянии бодрствования с закрытыми глазами. При открытых глазах или поступлении сигналов от других органов чувств α -волны исчезают (блокада α -ритма) и сменяются волнами β -ритма (13-30 Гц), что характеризует β -ритм как одну из реакций коры на внешние раздражители [1,2].

Постановка задачи. Целью работы является создание математических моделей прогноза биофизической реакции коры головного мозга на воздействие различных стимулов: зрительных, слуховых, соматосенсорных и комплекса этих раздражителей, а также определение возможности использования полученных моделей для прогнозирования в интеллектуальных системах. Для реализации поставленной задачи используются спектральный и корреляционный анализы ЭЭГ, а также методы статистической обработки вызванных потенциалов (ВП) коры при воздействии зрительных, слуховых и соматосенсорных раздражителей.

2. Моделирование прогноза биофизических реакций коры головного мозга на воздействие различных стимулов

Для регистрации биоэлектрической активности мозга в виде электроэнцефалограммы (ЭЭГ) был использован нейрофизиологический комплекс, который включает:

- 1) 8-канальный электроэнцефалограф фирмы Medicoг;
- 2) персональный компьютер с аналого-цифровым преобразователем и специальным программным обеспечением «BRAINMAP» для сохранности и обработки электроэнцефалограмм (топографическое картирование ЭЭГ);
- 3) раздражающие устройства (РУ): фотостимуляция, наушники и т.д.

В эксперименте участвовали 150 здоровых индивидуумов, правшей, в возрасте от 18 до 25 лет. Испытуемый помещался на стул в затемненную комнату. Запись ЭЭГ осуществлялась при чувствительности ЭЭГ-канала 100 мкВ/см. Постоянная времени составляла 0,3 сек, а фильтр верхних частот - 50 Гц, что отвечает полосе регистрируемых колебаний 0,5-50 Гц, в которой находятся измеряемые ритмы ЭЭГ: δ -ритм (1-4 Гц), θ -ритм (4-8 Гц), α_1 -ритм (8-13 Гц), α_2 -ритм (9-11 Гц), β_1 -ритм (13-20 Гц), β_2 -ритм (20-30 Гц).

Проведенная классификация позволила определить совокупность измеряемых на объекте исследования переменных как y_{ij} , где $i = \overline{1,7}$, $j = \overline{1,9}$; x_p , $p = \overline{1,4}$ (факторы x_1, x_2, x_3, x_4 ранжированы):

y_{ij} – значение ВП (вызванного потенциала) i -го ритма (табл.1) на j -ом контрольном электроде (табл.2);

x_1 – зрительные раздражители, где фактор ранжирован следующим образом: $x_1=1$ – белый свет (2Гц), $x_1=2$ – белый свет (5Гц), $x_1=3$ – белый свет (10Гц), $x_1=4$ – красный свет, $x_1=5$ – синий свет, $x_1=6$ – зеленый свет, $x_1=7$ – открытые глаза, $x_1=8$ – двумерное изображение;

x_2 – слуховые раздражители, где фактор ранжирован следующим образом: $x_2=1$ – звук на оба уха (10Гц), $x_2=2$ – звук на левое ухо (10Гц), $x_2=3$ – звук на правое ухо (10Гц);

x_3 – обонятельные раздражители, где фактор ранжирован следующим образом: $x_3=1$ – запах камфоры, $x_3=2$ – запах апельсина, $x_3=3$ – запах мяты;

x_4 – комплекс раздражителей, где фактор ранжирован следующим образом: $x_4=1$ – зрительные раздражители, $x_4=2$ – слуховые раздражители, $x_4=3$ – обонятельные раздражители.

Таблица 1. Соответствие i -го индекса вызванного потенциала y_{ij} регистрируемому ритму

i	1	2	3	4	5	6	7
Регистрируемый ритм	δ (1-4Гц)	θ (4-8Гц)	$\alpha 1$ (8-13Гц)	$\beta 1$ (13-20Гц)	$\beta 2$ (20-30Гц)	$\alpha 2$ (9-11Гц)	Среднее (1-30Гц)

Таблица 2. Соответствие j -го индекса вызванного потенциала y_{ij} расположению контрольных электродов

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сигнал на датчике	Fp1	Fp2	C3	C4	O1	O2	T3	T4	Среднее

Схематическое изображение всех положений электродов на поверхности головы испытуемого в виде проекции сверху и их обозначения приведены на рис.1.

Основные точки отведения биопотенциалов были наложены соответственно международной

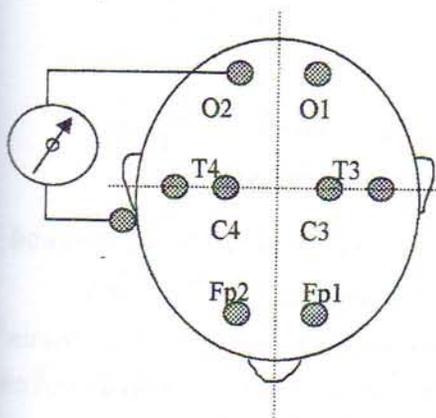


Рис.1. Схема размещения электродов для монополярного отведения биопотенциалов

системе «10-20», в которой соответствие между положениями каждого электрода с анатомическими структурами и областями коры головного мозга точно установлено рентгенологически, определены исходные точки отсчёта, учтена вариабельность анатомических структур, а также размеров и формы черепа. Точки отведения соответствуют тем областям мозга, на которые они проецируются: лобная – Fp1, Fp2 (frontalis), центральная – C3, C4 (centralis), затылочная – O1, O2 (occipitalis), височная – T3, T4 (temporalis). Применялось монополярное отведение, при котором колебания потенциала регистрируются только под электродом, расположенным над активной тканью.

В качестве математического аппарата моделирования принят статистический корреляционно-регрессионный анализ. Возможность проведения множественного корреляционно-регрессионного анализа обусловлена наличием достаточной по объему выборочной совокупности входных и выходных переменных, характеризующей объект исследования и полученной на основе проведения лабораторных экспериментов.

Согласно алгоритму регрессионного анализа, для оценки влияния на величину ВП входящих факторов, а также взаимного влияния ВП в зависимости от ритмов колебаний и морфологии априори был задан вид многофакторных полиномов (1):

$$y_{ij}^p = b_0 + \sum_{m=1}^7 b_{mj} y_{mj} + \sum_{n=1}^9 b_{in} y_{in} + \sum_{p=1}^4 b_p x_p, \quad (1)$$

где y_{ij}^p – значение вызванного потенциала i -го ритма (табл. 1) на j -ом электроде (табл. 2) при применении p -го фактора;

y_{mj} – значение вызванного потенциала m -го ритма на j -ом электроде при применении p -го фактора;

y_{in} – значение вызванного потенциала i -го ритма на n -ом электроде при применении p -го фактора;

b_o, b_{mj}, b_{in}, b_p – оценки значений коэффициентов регрессии;

$$b_{mj} y_{mj} = 0, \text{ если } m=i;$$

$$b_{in} y_{in} = 0, \text{ если } n=j.$$

В результате эксперимента были составлены информационные матрицы, на основании которых рассчитывались коэффициенты корреляции, оценки коэффициентов регрессии и все необходимые виды статистических оценок для случаев воздействия:

- а) зрительными раздражителями x_1 ;
- б) слуховыми раздражителями x_2 ;
- в) запахowymi раздражителями x_3 ;
- г) комплексом всех раздражителей x_4 .

Для каждого воздействия было построено 63 регрессионных полинома, которые подверглись каскадной процедуре оптимизации. Регрессионным полиномам соответствуют статистические оценки S_{1z}^2 – остаточная дисперсия масштабированной случайной величины z , F_1 – критерий Фишера, R – коэффициент множественной детерминации. Для оценок коэффициентов регрессии рассчитаны значения t -критерия Стьюдента, которые указывают на степень влияния факторов на отклик и учитываются при исключении незначимых факторов в каскадной регрессионной процедуре. В ходе дальнейшего анализа, на основании полученных статистических оценок, с учетом погрешностей измерения, вносимых субъективной оценкой оператора и техническими средствами, получены следующие результаты:

1. Под действием факторов x_p на контрольных электродах происходит уменьшение уровня δ -ритма (1-4 Гц) при возникновении сигналов θ -ритма (4-8 Гц), α -ритма (8-13 Гц), β -ритма (13-30 Гц), что соответствует большинству проведенных ранее научных исследований. Статистические оценки полученных полиномов находятся в следующих пределах:

- $0,0028 \leq S_{1z}^2 \leq 0,01376$ - рассчитанные значения показывают учет статистического материала регрессионными полиномами;

- $8,16473 \leq F_1 \leq 179,0041$ - рассчитанные значения показывают статистическую надежность полученных регрессионных полиномов, т.е. соответствие представленных полиномами связей реально существующим;
 - $0,87752 \leq R \leq 0,9944$ - рассчитанные значения оценивают долю вариации результативного фактора за счет представленных в полиноме факторов в общей вариации результата, т.е. показывают близость полученных регрессионных полиномов к функциональной связи.
2. На контрольных электродах происходит уменьшение уровня θ -ритма (4-8 Гц) при возникновении сигналов δ -ритма (1-4 Гц), α -ритма (8-13 Гц), β -ритма (13-30 Гц), что соответствует большинству проведенных ранее научных исследований. Статистические оценки полученных полиномов находятся в следующих пределах:
- $0,00072 \leq S_{1z}^2 \leq 0,09654$;
 - $10,43282 \leq F_1 \leq 93,79019$;
 - $0,91085 \leq R \leq 0,9958$.
3. На контрольных электродах происходит падение уровня (блокада) α -ритма (8-13 Гц) при возникновении сигналов δ -ритма (1-4 Гц), θ -ритма (4-8 Гц), β -ритма (13-30 Гц), что соответствует большинству проведенных ранее научных исследований. Статистические оценки полученных полиномов находятся в следующих пределах:
- $0,00078 \leq S_{1z}^2 \leq 0,09434$;
 - $8,73054 \leq F_1 \leq 943,96295$;
 - $0,88546 \leq R \leq 0,99913$.
4. Наиболее информативными представляются регрессионные полиномы, полученные при воздействии факторов x_p на частотных поддиапазонах β -ритма (13-30 Гц): β_1 (13-20 Гц) и β_2 (20-30 Гц). Статистические оценки полученных полиномов находятся в следующих пределах:
- $0,14179 \leq S_{1z}^2 \leq 0,46673$;
 - $2,14578 \leq F_1 \leq 7,07129$;
 - $0,53397 \leq R \leq 0,85858$.

Поскольку процедура регрессионного анализа чувствительна к исключению факторов 1-ой степени,

в качестве статистических моделей были выделены полиномы (2) – (16), для которых $S_{1z}^2 \leq 0.2$:

$$y_{45}^1 = -0,0868 y_{15} - 0,1013 y_{25} - 0,1169 y_{35} + 0,2501 y_{55} - 0,0280 y_{65} + 0,5973 y_{75} - 0,1573 y_{42} - 0,2371 y_{44} + 0,0802 y_{46} - 0,3959 y_{48} + 1,6981 y_{49} - 0,0058 x_1; \quad (2)$$

$$y_{46}^1 = -0,1269 y_{16} - 0,1096 y_{26} - 0,2665 y_{36} + 0,1962 y_{56} - 0,0201 y_{66} + 0,9327 y_{76} - 0,4376 y_{41} - 0,2139 y_{42} - 0,5018 y_{43} + 0,1190 y_{45} - 0,2912 y_{47} + 2,0833 y_{49} - 0,0096 x_1 ; \quad (3)$$

$$y_{47}^1 = -0,3530 y_{17} - 0,3765 y_{27} - 0,4188 y_{37} - 0,1568 y_{57} - 0,0287 y_{67} + 1,9787 y_{77} + 0,2827 y_{41} + 0,1660 y_{43} - 0,0449 y_{44} + 0,0471 y_{45} - 0,1424 y_{46} - 0,3573 y_{48} + 0,8419 y_{49} - 0,0008 x_1 ; \quad (4)$$

$$y_{45}^2 = -0,1469 y_{15} - 0,2047 y_{25} - 0,2946 y_{35} + 0,2541 y_{55} - 0,0266 y_{65} + 1,0785 y_{75} - 0,6463 y_{41} - 0,2599 y_{44} - 0,1788 y_{47} + 2,2187 y_{49} + 0,0156 x_2 ; \quad (5)$$

$$y_{46}^2 = -0,1878 y_{16} - 0,2209 y_{26} - 0,4304 y_{36} + 0,1119 y_{56} - 0,0330 y_{66} + 1,5050 y_{76} - 0,1721 y_{41} - 0,1113 y_{42} - 0,2702 y_{43} + 0,0579 y_{44} + 0,0613 y_{45} - 0,3504 y_{47} - 0,2481 y_{48} + 1,9117 y_{49} + 0,0021 x_2 ; \quad (6)$$

$$y_{47}^2 = -0,2539 y_{17} - 0,2854 y_{27} - 0,3164 y_{37} + 1,4045 y_{77} + 0,1629 y_{43} - 0,0795 y_{44} - 0,1156 y_{45} - 0,0864 y_{46} - 0,2577 y_{48} + 1,3507 y_{49} + 0,0177 x_2 ; \quad (7)$$

$$y_{57}^2 = -0,2438 y_{17} - 0,3136 y_{27} - 0,3538 y_{37} - 0,0454 y_{47} + 0,0319 y_{67} + 1,4057 y_{77} + 0,7053 y_{51} - 0,2203 y_{52} + 0,2659 y_{53} - 0,3678 y_{54} - 0,3161 y_{58} + 0,7690 y_{59} - 0,0046 x_2 ; \quad (8)$$

$$y_{45}^3 = -0,2022 y_{15} - 0,2056 y_{25} - 0,4028 y_{35} - 0,0060 y_{65} + 1,4005 y_{75} - 0,2292 y_{41} - 0,2623 y_{42} - 0,2062 y_{43} - 0,2133 y_{44} + 0,0705 y_{46} - 0,3771 y_{48} + 2,0083 y_{49} + 0,0066 x_3 ; \quad (9)$$

$$y_{46}^3 = -0,1562 y_{16} - 0,1729 y_{26} - 0,4146 y_{36} + 0,3302 y_{56} - 0,0065 y_{66} + 1,2803 y_{76} - 0,4252 y_{41} - 0,1288 y_{42} - 0,0763 y_{43} - 0,0380 y_{44} + 0,0272 y_{45} - 0,3261 y_{47} + 1,9482 y_{49} + 0,0033 x_3 ; \quad (10)$$

$$y_{47}^3 = -0,2930 y_{17} - 0,3014 y_{27} - 0,3417 y_{37} + 0,2188 y_{57} - 0,0226 y_{67} + 1,6427 y_{77} - 0,1419 y_{42} + 0,2506 y_{43} - 0,1542 y_{46} - 0,1459 y_{48} + 0,8199 y_{49} - 0,0062 x_3 ; \quad (11)$$

$$y_{55}^3 = -0,0137 y_{15} - 0,0747 y_{25} - 0,1052 y_{35} - 0,0066 y_{45} - 0,0085 y_{65} + 0,4479 y_{75} - 0,4321 y_{51} + 0,2487 y_{52} - 0,0725 y_{53} - 0,0322 y_{54} + 0,3018 y_{56} + 0,1452 y_{57} - 0,0107 y_{58} + 0,3894 y_{59} - 0,0001 x_3 ; \quad (12)$$

$$y_{57}^3 = -0,2465 y_{17} - 0,2714 y_{27} - 0,3271 y_{37} + 1,3579 y_{77} + 0,4390 y_{51} - 0,1787 y_{52} + 0,2493 y_{53} - 0,2324 y_{54} - 0,0576 y_{56} - 0,2367 y_{58} + 0,8937 y_{59} - 0,0042 x_3 ; \quad (13)$$

$$y_{45}^4 = -0,1124 y_{15} - 0,1305 y_{25} - 0,1737 y_{35} + 0,2421 y_{55} - 0,0175 y_{65} + 0,7332 y_{75} - 0,1310 y_{41} - 0,1109 y_{42} + 0,0344 y_{43} - 0,2359 y_{44} + 0,1037 y_{46} - 0,3347 y_{48} + 1,6722 y_{49} + 0,0020 x_4 ; \quad (14)$$

$$y_{46}^4 = -0,1343 y_{16} - 0,1280 y_{26} - 0,2916 y_{36} + 0,2198 y_{56} - 0,0144 y_{66} + 0,9937 y_{76} - 0,4756 y_{41} - 0,1888 y_{42} - 0,3439 y_{43} + 0,0909 y_{45} - 0,3253 y_{47} + 2,0698 y_{49} + 0,0110 x_4 ; \quad (15)$$

$$y_{47}^4 = -0,2955 y_{17} - 0,3188 y_{27} - 0,3354 y_{37} - 0,0267 y_{67} + 1,6337 y_{77} + 0,1906 y_{41} + 0,2027 y_{43} - 0,0656 y_{44} - 0,1308 y_{46} - 0,3108 y_{48} + 0,9604 y_{49} - 0,0085 x_4 ; \quad (16)$$

Значения статистических оценок полиномов (2) – (16) приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения статистических оценок полиномов (2) – (16)

№ полинома	S_r^2	F_r	R
2	0,14179	7,07129	0,85858
3	0,18462	5,43081	0,81587
4	0,19873	5,04513	0,80179
5	0,16198	6,21701	0,83915
6	0,19625	5,13148	0,80512
7	0,19543	5,15296	0,80594
8	0,16239	6,20151	0,83875
9	0,14571	6,91244	0,85533
10	0,17576	5,73051	0,82550
11	0,17387	5,79279	0,82737
12	0,19335	5,20908	0,80803
13	0,16494	6,10651	0,83624
14	0,14736	6,79649	0,85287
15	0,18389	5,44612	0,81638
16	0,19827	5,05117	0,80203

В каждом из полиномов (2) – (16) роль искомого отклика выполняет уровень ВП выбранного поддиапазона β -ритма на одном из контрольных электродов, а роль факторов - уровни ВП всех других измеряемых ритмов на этом электроде, уровни ВП выбранного поддиапазона β -ритма на всех других контрольных электродах и фактор внешнего воздействия. Согласно физиологическим данным, регистрация сигналов β -ритма свидетельствует об активации исследуемого участка неокортекса. Можно предположить, что указанные полиномы содержат информацию (знаки и величины оценок значений коэффициентов регрессии b_{ij} и значений t -критерия Стьюдента для каждой оценки), характеризующую активацию участков коры головного мозга, а также направленность и степень взаимодействия между участками коры под влиянием примененных раздражителей. В полиномах проявляется межполушарная функциональная асимметрия и межполушарные связи участков коры, зависящие от типа раздражителя, что также характеризуется знаковыми и численными значениями оценок коэффициентов b_{ij} при соответствующих y_{ij} , измеренных на контрольных электродах в разных полушариях.

3. Заключение

В результате проведенных исследований показано, что статистическое моделирование реакций головного мозга человека на внешние раздражители, отраженное полученными регрессионными полиномами, определяет научную новизну данной работы т.е. позволяет прогнозировать реакцию человека, перенося ее на адекватное поведение интеллектуальных систем и роботов. Практическое значение данной работы заключается в том, что регрессионные полиномы (2) – (16) могут быть использованы при прогнозировании формирования ассоциативных связей в коре головного мозга человека, что может повлиять на изменение скорости принятия решений интеллектуальной системой робота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмидт Р., Тевс Г. Физиология человека: В 3-т. – М.: МИР, 1996.
2. Жадин Н.М. Биофизические механизмы формирования электроэнцефалограммы. – М.: Наука, 1984.