

В. Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
С. Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПОНЕНТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ И СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ИММУННОЙ ПАРАДИГМЕ

Одним из основных компонент иммунных систем является компонент, оценивающий степень взаимосвязи между входными данными системы (антигенами) и детекторами их распознающими (антителами). Этот компонент базируется на основных четырех пространственных формах: евклидовой, хемминговой, целочисленной и символьной. В данной статье предлагается использовать для сопоставления элементов искусственной иммунной системы (ИИС) гибридные нейронные сети, являющиеся развитием нейронной сети Хемминга. На входы этих сетей могут подаваться как однотипные компоненты (двоичные, целочисленные (алфавит которых содержит более двух символов), вещественные, символьные), так и различные комбинации таких компонент. Ил.: 2 Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: вычислительные модели, антиген, антитело, пространственные формы: евклидова, хеммингова, целочисленная и символьная; искусственная иммунная система (ИИС); нейронная сеть.

Постановка проблемы и анализ литературы. Компонент, оценивающий степень взаимосвязи между антигенами и антителами, является одним из основных в вычислительных моделях и системах искусственных иммунных систем. Он базируется на четырех основных пространственных формах: евклидовой, хемминговой, целочисленной и символьной [1]. При этом вектора, описывающие информацию в искусственных иммунных системах (ИИС) в пространственной евклидовой форме, имеют компоненты в виде вещественных чисел. Вектора в хемминговой и целочисленной пространственной формах имеют соответственно при описании элементов ИИС бинарные вектора и вектора с целочисленными компонентами. Символьное описание информации в ИИС предполагает гибридное описание антител и антигенов.

Разработка и исследование искусственных иммунных систем базируется на изучении иммунных систем (ИС) животных и человека, которые формируют устойчивость (иммунитет) живых организмов к возбудителям инфекционных болезней. Термин иммунитет характеризует в общем случае способность живых организмов защищать себя от чужеродных белков, микробов и вирусов, от их токсинов, и от любых веществ, несущих организму чужую генетическую информацию.

© В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, 2020

Различают целый ряд различных видов иммунитета [2 – 6]: врожденный и приобретенный, активный и пассивный, антибактериальный и противовирусный, антитоксический, местный и т.д. Иммунология изучает различные виды иммунитета и причины возникновения недостаточности иммунитета, приводящие к бактериальным, вирусным и грибковым инфекциям и заболеваниям. Искусственные иммунные системы, как правило, основываются на двух основных понятиях: антиген и антитело [1 – 6].

Антигенами называются высокомолекулярные соединения: белки и различные производные белковой природы, яды змей и других живых существ и т.д., которые обладают определенными свойствами: антигенностью (способностью вызывать выработку определенных антител), иммуногенностью (быть чужеродными организму и создавать иммунитет к болезням, которые может вызвать антиген), специфичностью ((небольшим участком антигена, который после синтеза соответствующего антитела соединяется с этим участком) [2]. Так как в норме любой организм не воспринимает собственные антитела, к основным свойствам антигенов добавляют четвертое свойство – чужеродность. В антигене выделяют две составляющие компоненты – молекулу носителя и размещенные на ней низкомолекулярные группы – гангены, которые могут вызывать иммунный ответ. Как показывают исследования [2], иммунная система распознает не весь антиген, а отдельные его гангены, для взаимодействия антитела и антигена важна пространственная структура их молекул.

Как правило антиген способен вызывать образование антител к своим различным гангенам.

Антителами называются специфичные белки, которые синтезируются в организме под воздействием антигена [2, 3]. Антитела обладают свойством связываться специфически с антигенами. Антитела синтезируются в организме как при естественном заражении, так и после введения вакцин или после контакта организма с чужеродными клетками. Антителами являются специфические белки – иммуноглобулины, которые реагируют с антигенами с помощью так называемых активных центров – определенных структур в виде полостей или щелей, которые по своей конфигурации соответствуют определенным элементам архитектуры антигена (подобно соответствию ключей и замочных скважин замков). Степень связывания антител и антигенов оценивается с помощью аффинитета ((степени совпадения конфигураций антитела и антигена) и авидности, характеризующей силу связи между антигеном и антителом.

Механизм связывания антител и антигенов в настоящее время наиболее полно обосновывается с помощью теории, которая предполагает у антигенов наличие нескольких детерминантных групп. Детерминантная группа – это участок молекулы антигена, который несет определенный электрический заряд и который после синтеза антитела соединяется с синтезированным антителом. Кроме этого, предполагается наличие в молекуле антитела двух активных центров, которые имеют заряды противоположные зарядам антигена. Участки антигена и антитела, имеющие противоположные заряды, соединяются друг с другом. Прочность этого соединения зависит как от числа взаимодействующих участков, так и от совпадения структур полярно заряженных групп антигена и антитела.

Вследствие взаимодействия антитела с антигеном образуется устойчивое соединение антитело-антиген. При этом антиген нейтрализуется и утрачивает свои патогенные свойства.

Разработка и совершенствование искусственных иммунных систем и базируется на исследованиях иммунных систем животных и человека.

Количественной мерой оценки сходства ИИС и природных иммунных систем (ПИС) являются функции аффинности ((близости) и пригодности.

Неотъемлемой частью ИИС являются иммунные алгоритмы, основанные на результатах изучения ПИС, в частности, на клональном отборе, клонировании и соматической гипермутации [1 – 3].

Разработка и совершенствование искусственных иммунных систем базируются на изучении природных иммунных систем, которые формируют устойчивость (иммунитет) живых организмов по отношению к внешнему миру, наполненному бактериями, вирусами и другими чужеродными телами, называемыми антигенами, способными вызывать заболевания организмов животных и человека. И хотя между природными иммунными системами и ИИС имеются существенные различия, которые ряд биологов считают решающими для их сопоставления, однако целый ряд разработанных вычислительных моделей, основанных на аналогии с ПИС, показали себя эффективным инструментом как при изучении биологических систем, так и при решении различных технических задач [7 – 9]. ИИС, как правило, основываются на двух основных понятиях: антиген-антитело. Антитела – это своего рода детекторы, с помощью которых ИИС определяет входные данные (антигены). Формально антигены и антитела удобно задавать в виде векторов атрибутов:

$$\begin{aligned} Ab &= (Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_r), \\ Ag &= (Ag_1, Ag_2, \dots, Ag_r), \end{aligned} \quad (1)$$

где Ab и Ag соответственно r -мерные векторы атрибутов антителя и антигена, которые без потери общности можно принять одинаковой размерности. Каждый из атрибутов независимо от того, является ли он двоичным числом, вещественным числом или символьным выражением, называют геном (антителя или антигена). Количественная мера сходства векторов Ab и Ag определяется с помощью неотрицательно скалярного произведения, устанавливающего степень соответствия векторов Ab и Ag . Из применяемой меры сходства векторов следует, что чем больше скалярное произведение, тем выше их сходство (аффинность). Часто аффинность определяют как силу связи или взаимодействия участков антигена и антителя или двух антител [8]. Формально эта сила взаимодействия может быть описана с помощью одной из метрик, используемых в ИИС [7, 8].

Каждый антиген, чья форма находится внутри некоторого объема пространственных форм, может распознаваться множеством антител [8]. Каждое антитело также находится внутри некоторой пространственной области, внутри этой области антитело может взаимодействовать с антигенами и другими антителами.

Расстояние между векторами антител и антигенов может вычисляться с помощью различных метрик, в частности, с помощью манхэттенского или евклидова расстояний Dm и De .

$$Dm = \sum_{i=1}^r |Ab_i - Ag_i|, \quad (2)$$

$$De = \sqrt{\sum_{i=1}^r (Ab_i - Ag_i)^2}. \quad (3)$$

Для ускорения синтеза вектора антителя при использовании модифицированного алгоритма клонального отбора с использованием гипермутаций для каждого гена антителя может вводиться свой весовой коэффициент:

$$Ks_1(Ab_i) = \frac{1 - (\sum_{j=1}^r (Ab_j - Ag_j) - \sum_{k=1}^r (Ab_k - Ag_k))}{1 - \sqrt{\sum_{j=1}^r (Ab_j - Ag_j)^2}}, \quad k \neq i, \quad (4)$$

$$Ks_2(Ab_i) = \frac{1 - \left(\sum_{j=1}^r |Ab_j - Ag_j| - \sum_{k=1}^r |Ab_k - Ag_k| \right)}{1 - \sum_{j=1}^r |Ab_j - Ag_j|^2}, \quad k \neq i, \quad (5)$$

где $Ks_1(Ab_i)$ – вес гена антитела; Ab – вектор антитела; Ag – вектор антигена.

Формула (4) используется в случае, если расстояние между антителом и антигеном рассчитывается на основе евклидового расстояния, а формула (5) – когда используется расстояние (2).

Весовые коэффициенты для генов определяются на каждом шаге гипермутации [7, 8].

Заметим, что в ИИС различают два вида аффинности – аффинность (или степень различия) антигенов и антител, и степень подобия (или аффинность) связи "антитело-антитело".

Если компоненты векторов (1) описываются с помощью двоичного биполярного алфавита, то аффинность антигена и антитела можно оценивать с помощью расстояния Хемминга (число различных двоичных компонент у векторов Ab и Ag) и определять наиболее соответствующие друг другу антигены и антитела с помощью нейронной сети Хемминга (рис. 1), архитектура и алгоритмы функционирования которой детально описаны в работах [11 – 13].

Нейронная сеть Хемминга используется для распознавания черно-белых изображений, представленных в виде r -мерных биполярных векторов, которые подаются на входы слоя S биполярных нейронов. Эталонные изображения (биполярные вектора), D_1, D_2, \dots, D_m , с которыми сравниваются входные вектора, хранятся в весах связей нейронов Z -слоя. Мера сходства входного вектора $A = (a_1, a_2, \dots, a_r)$ и эталонного изображения $D_p = (d_{p1}, d_{p1}, \dots, d_{pr})$, хранящегося в весах связей нейрона $Z_p(w_{1p}, w_{2p}, \mathbf{K}, w_{rp})$, определяется скалярным произведением векторов A и D_p

$$AD_p = \sum_{k=1}^r a_k d_{pk} = a - R_X, \quad (6)$$

где r – число компонент входного и эталонного векторов; a – число одинаковых компонент у векторов A и D_p ; R_X – расстояние Хемминга между векторами, т.е. число несовпадающих компонент у векторов; $R_X + a = r$.

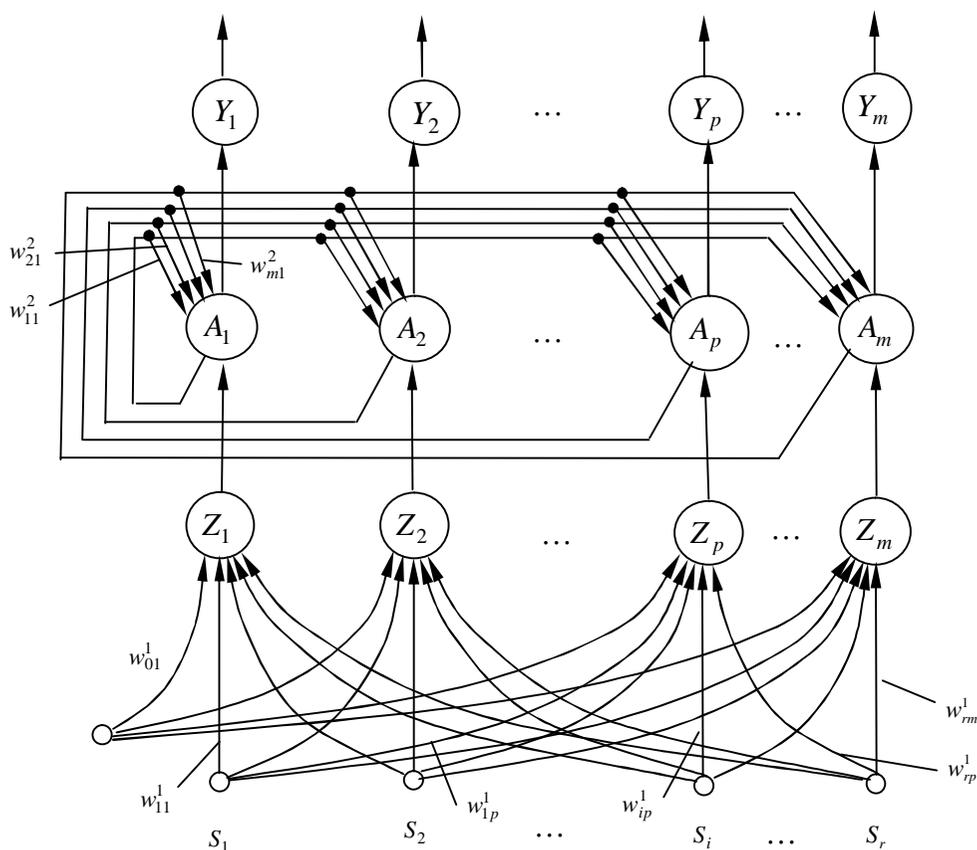


Рис. 1. Нейронная сеть Хемминга

Из определения расстояния Хемминга мера сходства R входного и эталонного изображения может задаваться и как число a совпадающих двоичных компонент векторов

$$R = a. \quad (7)$$

Поскольку вектора антигенов и антител в качестве своих компонент (генов) могут иметь как двоичные компоненты, так и более общие: целочисленные (с числом компонент больше двух), вещественные и символьные, то в общем случае для определения сходства векторов антигена и антитела необходима нейронная сеть, которая может определять сходство именно таких векторов.

В связи с этим, **целью статьи** является разработка нейронной сети, способной определять аффинность векторов антигенов и антител в случаях, когда эти вектора имеют как однотипные компоненты (двоичные биполярные, целочисленные (алфавит которых содержит более двух

символов), вещественные, символьные), так и различные комбинации таких компонент.

В нейронной сети Хемминга мера сходства входного и эталонного изображения задается как число a совпадающих двоичных компонент входного вектора и эталонного изображения, хранящегося в весах связей соответствующего Z -нейрона [10 – 13].

Сигналы с выходов Z -нейронов поступают на входы A -нейронов, которые являются нейронами сети Махнет, которая с помощью итерационного процесса в A -слое элементов выделяет нейрон Z^* в Z -слое с максимальным выходным сигналом. В результате итерационного процесса в сети Махнет только на выходе одного A -нейрона A^* появится ненулевой сигнал, который соответствует выходному сигналу нейрона Z^* . При этом на выходах всех остальных A -нейронов будут нулевые выходные сигналы. Поскольку нейроны Y -слоя имеют функцию активации вида

$$U_{\text{вых}Y} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}Y} > 0, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}Y} \leq 0, \end{cases}$$

где $U_{\text{вых}Y}$, $U_{\text{вх}Y}$ – соответственно выходной и входной сигнал нейрона Y -слоя, то на выходе только одного Y -нейрона появится единичный выходной сигнал, тем самым определяя и Z -нейрон, в весах связей которого хранится эталонное изображение, наиболее близкое по расстоянию (6).

Поскольку вектора антигенов и антител в качестве своих генов могут иметь как двоичные биполярные компоненты, так и целочисленные, вещественные и символьные, то для определения сходства указанных векторов необходима нейронная сеть, которая может определять сходство именно таких векторов.

Нейронная сеть Хемминга, работающая с входными биполярными векторами и биполярными векторами, хранящимися в весах связей нейронов Z -слоя (рис. 1) обеспечивает вычисление скалярных произведений входного вектора антигена и векторов антител. Определяет с помощью вычисления максимального скалярного произведения антитело, наиболее соответствующее входному антигену. Если вектор антигена имеет не только биполярные компоненты, но и целочисленные, вещественные и символьные, то нейронная сеть, определяющая антитела, которые образуют устойчивые соединения антитело-антиген и нейтрализуют антигены, должна иметь четыре канала обработки входной информации по антигену. Один из каналов должен обрабатывать информацию, которая описывает гены антигенов с помощью

целочисленных переменных, второй – для обработки информации, которая описывает гены с помощью вещественных переменных, третий – для обработки символьной информации. Причем эти каналы должны быть аналогичны каналу обработки входной информации, заданной с помощью биполярного алфавита и реализованного на нейронной сети Хемминга. Блок-схема такой нейронной сети изображена на рис. 2.

Блоки 1 – 4 выделения максимальных скалярных произведений для биполярных, целочисленных, вещественных и символьных частей антигена и антител могут выделять как одно единственное антитело, так и разные антитела. В последнем случае блок определения лучшего антитела для нейтрализации антигена синтезирует такое антитело из компонент двух, трех или четырех различных антител.

Рассмотрим пример, в котором входные вектора (антигены) нейронной сети и вектора антител задаются с помощью двух типов компонент – биполярных (первые m_1 компонент векторов) и m_2 компонент, которые задаются с помощью многозначного алфавита (в рассматриваемом примере – трехзначного алфавита). Запишем скалярное произведение двух таких векторов:

$$\begin{aligned} AgZ_p^* &= \sum_{i=1}^m Ag_i Z_{pi}^* = \sum_{i=1}^{m_1} Ag_i Z_{pi}^* + \sum_{k=m_1+1}^m Ag_k Z_{pk}^* = \\ &= a_1 - d_1 + \sum_{k=m_1+1}^m Ag_k Z_{pk}^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где $Ag = (Ag_1, Ag_2, \mathbf{K}, Ag_{(m_1+m_2)})$ – входной вектор (антиген); $Z_p^* = (Z_{p1}^*, Z_{p2}^*, \mathbf{K}, Z_{p(m_1+m_2)}^*)$, – вектор антитела, имеющего m_1 биполярных компонент и m_2 компонент трехзначного алфавита; a_1, d_1 – соответственно число положительных и отрицательных компонент в скалярном произведении биполярных компонент векторов Ag и Z_p^* .

Поскольку $a_1 + d_1 = m_1$, то из соотношения (8) следует

$$\sum_{i=1}^{m_1} Ag_i Z_{pi}^* = 2a_1 - m_1.$$



Рис. 2. Обобщенная блок-схема нейронной сети для обработки информации в ИИС

Таким образом имеем известное соотношение для сети Хемминга

$$a_1 = \frac{m_1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_1} Ag_i Z_{pi}^*, \quad (9)$$

с помощью которого можно рассчитать входные и выходные сигналы Z -нейронов для биполярных компонент [11, 13]. Теперь рассмотрим второе слагаемое в скалярном произведении (8). Его можно записать следующим образом

$$\sum_{k=m_1+1}^m Ag_k Z_{pk}^* = a_2 - d_2, \quad (10)$$

или

$$a_2 = \sum_{k=m_1+1}^m Ag_k Z_{pk}^* + d_2, \quad (11)$$

где a_2 и d_2 соответственно положительное и отрицательное число, получившееся при вычислении скалярного произведения.

Зная a_1 и a_2 можно получить взвешенную сумму

$$\Sigma = a_1 + a_2 \beta, \quad (12)$$

где β – весовой коэффициент, учитывающий, что слагаемые в (11) для значения a_2 в среднем по величине могут отличаться от слагаемых в соотношении (9). Зная скалярные произведения входного вектора (антигена) и векторов антител (хранящихся в весах связей Z -нейронов, можно определить максимальное значение скалярного произведения из полученных и, следовательно, вектор антитела, который наиболее соответствует входному вектору антигена.

Рассмотрим пример работы предложенной нейронной сети, когда антиген задается вектором

$$Ag = ((-1, -1, 1, 1, 1, 1), (0, 0, 1, 1, 2, 2)), \quad (13)$$

где первые шесть компонент вектора являются двоичными биполярными, а следующие шесть компонент задаются с помощью трехзначного алфавита с элементами (0, 1, 2). Операция умножения трехзначных чисел задается таблицей

	0	1	2
0	0	0	0
1	0	1	2
2	0	2	1

Четыре известных антитела задаются векторами (табл. 1)

Таблица 1

Компоненты известных антител

Антитело	Биполярные компоненты	Компоненты в трехзначном алфавите
Ан ₁	-1, -1, -1, 1, 1, 1	0, 0, 0, 1, 2, 2
Ан ₂	-1, -1, -1, 1, -1, 1	0, 0, 0, 1, 1, 2
Ан ₃	-1, -1, -1, -1, 1, 1	0, 0, 0, 2, 2, 1
Ан ₄	-1, 1, -1, 1, -1, 1	1, 1, 0, 2, 1, 1

С помощью известных соотношений для нейронной сети Хемминга определяем веса связей между входными нейронами S_1, S_2, \dots, S_6 и нейронами Z-слоя Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 , хранящими компоненты антител Ан₁, Ан₂, Ан₃, Ан₄:

	$Z_1(\text{Ан}_1)$	$Z_2(\text{Ан}_2)$	$Z_3(\text{Ан}_3)$	$Z_4(\text{Ан}_4)$
S_1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
S_2	-0,5	-0,5	-0,5	0,5
S_3	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
S_4	0,5	0,5	-0,5	0,5
S_5	0,5	-0,5	0,5	-0,5
S_6	0,5	0,5	0,5	0,5

Нейроны $S_7 - S_{12}$ являются входными нейронами, воспринимающими информацию от антигена с помощью трехзначного

алфавита. Веса связей между входными нейронами $S_7 - S_{12}$ и нейронами $Z_5 - Z_8$ определяются с помощью таблицы:

	$Z_5(Ан_1)$	$Z_6(Ан_2)$	$Z_7(Ан_3)$	$Z_8(Ан_4)$
S_7	-0,5	-0,5	-0,5	0,5
S_8	-0,5	-0,5	-0,5	0,5
S_9	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
S_{10}	0,5	0,5	1	1
S_{11}	1	0,5	1	0,5
S_{12}	1	1	0,5	0,5

Рассчитаем входные сигналы первых четырех нейронов Z -слоя, когда на вход нейронной сети подается антиген (8) с биполярными компонентами, приведенными в табл. 1.

$$U_{\text{ex}Z1} = \frac{m_1}{2} + \sum_{i=1}^{m_1} w_{i1} S_i^1 = 3 + (-0,5)(-1) + (-0,5)(-1) + (-0,5)(1) + 0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 = 5;$$

$$U_{\text{ex}Z2} = \frac{m_1}{2} + \sum_{i=1}^{m_1} w_{i2} S_i^2 = 3 + (-0,5)(-1) + (-0,5)(-1) + (-0,5)(1) + 0,5 \cdot 1 + (-0,5) \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 = 4;$$

$$U_{\text{ex}Z3} = \frac{m_1}{2} + \sum_{i=1}^{m_1} w_{i3} S_i^3 = 3 + (-0,5)(-1) + (-0,5)(-1) + (-0,5)(1) + (-0,5) \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 = 4;$$

$$U_{\text{ex}Z4} = \frac{m_1}{2} + \sum_{i=1}^{m_1} w_{i4} S_i^4 = 3 + (-0,5)(-1) + (-0,5)(-1) + (-0,5)(1) + 0,5 \cdot 1 + (-0,5) \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 = 3.$$

Таким образом, скалярные произведения компонент вектора антигена, которые описываются с помощью биполярных компонент двоичного алфавита, и соответствующих компонент антител, показывают, что антитело $Ан_1$ будет наиболее сильно взаимодействовать с входным антигеном.

Теперь с помощью соотношения (11) рассчитаем входные сигналы нейронов $Z_5 - Z_8$, воспринимающих информацию от антигена с помощью нейронов $S_7 - S_{12}$.

В результате расчетов получим: $U_{\text{exZ5}} = 3$; $U_{\text{exZ6}} = 4$; $U_{\text{exZ7}} = 5$; $U_{\text{exZ8}} = 6$.

Из расчетов следует, что антитело An_4 с помощью трехзначных компонент наиболее сильно взаимодействует с входным антигеном. Поскольку сила взаимодействия входного антигена и антител $\text{An}_1, \dots, \text{An}_4$ зависит от двух типов компонент: биполярных и трехзначных, рассчитаем суммарные силы взаимодействия антигена и антител (табл. 2). Из табл. 2 следует, что наиболее сильное взаимодействие антигена будет наблюдаться с антителами An_3 и An_4 .

Таблица 2

Силы взаимодействия антигена и антител

Антитело	Сила взаимодействия антигена и антител посредством биполярных компонент (в относительных единицах)	Сила взаимодействия антигена и антител посредством трехзначных компонент (в относительных единицах)	Суммарная сила взаимодействия антигена и антитела при $\beta = 1$ (в относительных единицах)
An_1	5	3	8
An_2	4	4	8
An_3	4	5	9
An_4	3	6	9

Выводы. Скалярные произведения векторов антигенов и антител используются для оценки силы взаимодействия этих векторов и возможности образования устойчивых соединений антитело-антиген и нейтрализации антигенов. Оценку силы взаимодействия векторов, когда гены антител и антигенов описываются двоичными числами удобно выполнять с помощью нейронных сетей. Однако, если вектора антител и антигенов имеют несколько разных переменных для описания генов: двоичные, целочисленные, вещественные, символьные, то в настоящее время отсутствуют нейронные сети для обработки такой разнородной информации. Для обработки подобной информации разработана на базе нейронной сети Хемминга новая сеть, способная обрабатывать как

однотипную входную информацию, так и вектора, имеющие четыре вида различных компонент: двоичные, целые, вещественные и символьные.

Список литературы:

1. *Литвиненко В.І.* Побудова штучних імунних систем / *В.І. Литвиненко* // Наукові праці. Комп'ютерні технології. – 2010. – Вип. 121. – Т. 134. – С. 166-178.
2. *Ионов И.А.* Современная иммунология. Курс лекций для студентов высших учебных заведений (для иностранных студентов) / *И.А. Ионов, Т.Е. Комисова, А.Н. Сукач, С.О. Шаповалов.* – Харьков: ЧП Петров В.В., 2017. – 123 с.
3. *Хантов Р.М.* Иммунология: учебник для студентов медицинских вузов / *Р.М. Хантов.* – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. – 320 с.
4. *Ройт А.* Иммунология / *А. Ройт, Дж. Бростофф, Д. Мейл.* – М.: Мир, 2000. – 592 с.
5. *Майлян Э.А.* Введение в клиническую иммунологию, клинико-лабораторная оценка иммунного статуса / *Э.А. Майлян* // Медико-социальные проблемы семьи. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 115-121.
6. *Katsikis P.D.* Crossroads Between Innate and Adaptive Immunity / *P.D. Katsikis, S.P. Schoenberger, B. Pulendran.* – New York: Springer Science+Business, 2013. – 136 p.
7. *Литвиненко В.І.* Компьютерная система для решения задач классификации на основе модифицированных иммунных алгоритмов / *В.І. Литвиненко, А.А. Дидык, Ю.А. Захарченко* // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – Т. 22. – № 2. – С. 66-73.
8. *Литвиненко В.І.* Применение модифицированных иммунных сетей для решения задач гидроакустического обнаружения / *В.І. Литвиненко, А.А. Дидык* // Системные технологии, 2008. – Т. 59. – № 6. – С. 99-115.
9. Искусственные иммунные системы и их применение / *Под ред. Д. Дасгупты.* Пер. с англ. под ред. А.А. Романюхи. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 344 с.
10. *Михерский Р.М.* Применение искусственной иммунной системы для распознавания зрительных образов / *Р.М. Михерский* // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42. – № 1. – С. 113-117.
11. *Дмитриенко В.Д.* Нейронные сети: Архитектура, алгоритмы и использование. Учебное пособие. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2020. – 222 с.
12. *Ямпольський Л.С.* Нейротехнології та нейрокомп'ютерні системи: підручник / *Л.С. Ямпольський, В.В. Лісовиченко, В.В. Олійник.* – К.: Дорадо-Друк, 2016. – 576 с.
13. *Fausett L.* Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms, and Applications / *L. Fausett.* – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 2006. – 483 p.

References:

1. Litvinenko, V.I. (2010), Building artificial immune systems, *Scientific works. Computer Technology*, Issue 121, Vol. 134, pp. 166-178.
2. Ionov, I.A., Komisova, T.E., Sukach, A.N., Shapovalov S.O. (2017), *Modern immunology. Course of lectures for students of higher educational institutions (for foreign students)*, Kharkov: Private enterprise Petrov V.V., 123 p.
3. Khantov, R.M. (2006), *Immunology: a textbook for medical students*, Moskow, GEOTAR-Media, 320 p.
4. Royt, A., Brostoff, J., Mail, D. (2000), *Immunology*, Moskow, Mir, 592 p.
5. Maylyan, E.A. (2014), Introduction to clinical immunology, clinical and laboratory assessment of the immune status, *Medical and social problems of the family*, Issue. 10, No. 1, pp. 115-121.

6. Katsikis, P.D., Schoenberger, S.P., Pulendran, B. (2013), *Crossroads Between Innate and Adaptive Immunity*, New York, Springer Science+Business, 136 p.
7. Litvinenko, V.I., Didyk, A.A., Zakharchenko, Yu.A. (2008), Computer system for solving classification problems based on modified immune algorithms, *Automation. Automation. Electrotechnical complexes and systems*, Issue. 22, No. 2, P. 66-73.
8. Litvinenko, V.I., Didyk, A.A. (2008), Application of modified immune networks for solving problems of hydroacoustic detection, *System technologies*, Issue. 59, No. 6, P. 99-115.
9. *Artificial immune systems and their uses* (2006), Ed. D. Dasgupta, Moscow, FIZMATLIT, 344 p.
10. Mikhersky, R.M. (2018), Using an artificial immune system for visual recognition, *Computer optics*, Issue. 42, No. 1, P. 113-117.
11. Dmitrienko, V.D. (2020), *Neural Networks: Architecture, Algorithms and Usage. Tutorial*. Kharkov, NTU "KhPI", 222 p.
12. Yampolskiy, L.S., Lisovichenko, V.V., Oliynyk, V.V. (2016), *Neurotechnology and neurocomputer systems: textbook*, Kyiv, Dorado-Print, 576 p.
13. Fausett, L. (2006), *Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms, and Applications*, New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 483 p.

Статью представил д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.И. Носков.

Поступила (received) 6.03.2020

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Leonov Sergey, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 911-911-3, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID 0000-0001-8139-0458

УДК 681.5

Аналіз і вдосконалення компонент обчислювальних моделей і систем, заснованих на імунній парадигмі / Дмитрієнко В.Д., Леонов С.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 1 (3). – С. 51 – 66.

Одним з основних компонент імунних систем є компонент, що оцінює ступінь взаємозв'язку між вхідними даними системи (антигенами) і детекторами їх розпізнавальними (антитілами). Цей компонент базується на основних чотирьох просторових формах: евклідової, хеммінгової, целочисленної і символної. У даній статті пропонується використовувати для зіставлення елементів штучної імунної системи (ІВС) гібридні нейронні мережі, що є розвитком нейронної мережі Хеммінга. На входи цих мереж можуть подаватися як однотипні компоненти (двійкові, цілочисельні (алфавіт яких містить більше двох символів), речові, символні), так і різні комбінації таких компонент. Іл.: 2. Бібліогр.: 13 назв.

Ключеві слова: обчислювальні моделі, антиген, антитіло, просторові форми: евклідова, хеммінгова, целочисленна і символна; штучна імунна система (ІВС); нейронна мережа.

УДК 004.48:004.94

Анализ и совершенствование компонент вычислительных моделей и систем, основанных на иммунной парадигме / Дмитриенко В.Д., Леонов С.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 1 (3). – С. 51 – 66.

Одним из основных компонент иммунных систем является компонент, оценивающий степень взаимосвязи между входными данными системы (антигенами) и детекторами их распознающими (антителами). Этот компонент базируется на основных четырех пространственных формах: евклидовой, хемминговой, целочисленной и символной. В данной статье предлагается использовать для сопоставления элементов искусственной иммунной системы (ИИС) гибридные нейронные сети, являющиеся развитием нейронной сети Хемминга. На входы этих сетей могут подаваться как однотипные компоненты (двоичные, целочисленные (алфавит которых содержит более двух символов), вещественные, символные), так и различные комбинации таких компонент. Ил.: 2 Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: вычислительные модели, антиген, антитело, пространственные формы: евклидова, хеммингова, целочисленная и символная; искусственная иммунная система (ИИС); нейронная сеть.

UDC 681.5

Analysis and improvement of components of computational models and systems based on the immune paradigm / Dmitrienko V.D., Leonov S.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2020. – № 1 (3). – P. 51 – 66.

One of the main components of immune systems is a component that estimates the degree of relationship between the input data of the system (antigens) and detectors that recognize them (antibodies). This component is based on the main four spatial forms: Euclidean, Hemming, Integer, and Symbol. This article proposes to use hybrid neural networks, which are the development of the Hemming neural network, to compare the elements of the artificial immune system (IIS). The inputs of these networks can be fed as components of the same type (binary, integer (the alphabet of which contains more than two symbols), real, symbolic), and various combinations of such components. Figs.: 2. Refs.: 13 titles.

Keywords: computational models, antigen, antibody, spatial forms: Euclidean, Hamming, integer and symbolic; artificial immune system (IIS); neural network.