

НАДЕЖНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ШУМОВ В ЗРИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗАТОРЕ

Зрительный анализатор функционирует в постоянно изменяющихся условиях окружающей и внутренней среды организма. Несмотря на это, выполняемые им вычислительные операции отличаются высокой надежностью, что позволяет животному эффективно приспосабливаться к среде обитания.

Для обеспечения надежной работы нейронной сети зрительного анализатора при малых поражениях (шумах) важное значение имеет избыточное кодирование зрительных сигналов. При анализе надежно работающих нейронных сетей необходимо исходить из принципа функционального кодирования [1]. Сущность его заключается в том, что каждый слой нейронной сети одновременно выполняет операции декодирования сигналов, входящих из других слоев, операцию вычисления некоторой функции от декодированных сигналов, а также операцию кодирования сигналов, передаваемых в другие слои. При использовании этого принципа между нейронными слоями передаются только избыточно закодированные сигналы и надежность вычислений в сети определяется надежностью ее входных и выходных слоев, в которых сигналы не закодированы. Необходимым условием осуществления данного принципа является однотипность операций кодирования, декодирования и вычисления. С. Виноград и Дж. Коуэн [1] ограничили осуществимость принципа функционального кодирования классом логических операций и корректирующих (n, k) кодов. Однако поскольку нейроны обладают не только логическими, но и интегральными свойствами, необходимо исследовать возможность осуществления этого принципа в классе интегральных операций.

Если такая возможность существует, то интегральное преобразование [2]

$$P_l(\vec{x}, t) = \varphi \sum_k \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_{lk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') P_k(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}', \quad (1)$$

которое совершает l -й слой нейронов зрительного анализатора

над входным сигналом k -го слоя $P_k(\vec{x}, t)$, может быть представлено в виде последовательности трех интегральных преобразований с функциями влияния $G_k^{ДК}$, $G_{lk}^{ВМЧ}$, $G_l^{КД}$ (рис. 1). В дальнейшем будем рассматривать только пространственные интегральные операции кодирования и декодирования, так как использование временных кодов значительно задержало бы передаваемые сигналы [3], что недопустимо в работе зрительного анализатора

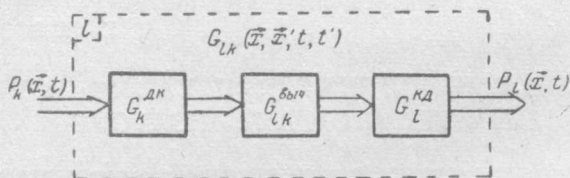


Рис. 1.

животного. Между ядрами отдельных интегральных преобразований $G_k^{ДК}$, $G_{lk}^{ВМЧ}$ и $G_l^{КД}$ существует связь

$$G_{lk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = \iiint_{R^3} \iiint_{R^3} G_l^{КД}(\vec{x}, \vec{x}'', t) G_{lk}^{ВМЧ}(\vec{x}'', \vec{x}'', t, t') G_k^{ДК}(\vec{x}'', \vec{x}', t) d\vec{x}'' d\vec{x}''', \quad (2)$$

где $G_k^{ДК}(\vec{x}'', \vec{x}', t)$ — ядро интегрального преобразования, соответствующего операции декодирования сигналов k -го слоя на входе l -го слоя; $G_{lk}^{ВМЧ}(\vec{x}'', \vec{x}'', t, t')$ — ядро операции вычисления, выполняемой в l -м слое над сигналом k -го слоя; $G_l^{КД}(\vec{x}, \vec{x}'', t)$ — ядро операции кодирования l -го слоя нейронной сети.

Связь между операциями кодирования k -го и декодирования l -го слоя подобна связи между прямым и обратным преобразованиями. Поэтому

$$\iiint_{R^3} G_k^{КД}(\vec{x}', \vec{x}'', t) G_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t) d\vec{x}' = \delta(\vec{x}'' - \vec{x}). \quad (3)$$

Полную реакцию l -го слоя нейронной сети зрительного анализатора можно представить в виде

$$P_l(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} G_l^{КД}(\vec{x}, \vec{x}'', t) \varphi \sum_k \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_{lk}^{ВМЧ}(\vec{x}'', \vec{x}'', t, t') \times \\ \times \iiint_{R^3} G_k^{ДК}(\vec{x}'', \vec{x}', t) P_k(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' d\vec{x}'' d\vec{x}'''. \quad (4)$$

Из этого соотношения следует, что в каждом l -м слое нейронной сети с помощью одной интегральной операции одновре-

менно производится декодирование сигналов, поступающих из других слоев, вычисление некоторого интегрального преобразования от каждого из декодированных сигналов, сложение полученных сигналов и кодирование этой суммы одним общим кодом. Коды следует изучать в первую очередь, так как без знания кодов, используемых в зрительном анализаторе, нельзя исследовать вычислительные функции, выполняемые отдельными слоями нейронной сети.

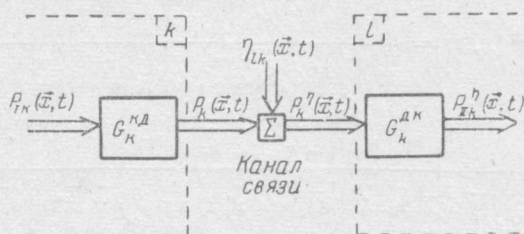


Рис. 2.

Прежде всего необходимо отыскать класс помехоустойчивых интегральных кодов, которые ослабляют шумы $\eta_{lk}(\vec{x}, t)$, действующие в канале связи k -го слоя нейронной сети с l -м слоем (рис. 2). В первом приближении шумы, связанные со спонтанным выбросом медиатора в синапсах, с изменением температуры и состава вне- и внутриклеточного пространства нервной ткани, с локальными нарушениями кровеносной системы и с другими явлениями [4,5], могут рассматриваться как аддитивные по отношению к сигналам, передаваемым в канале связи:

$$P_k^\eta(\vec{x}, t) = P_k(\vec{x}, t) + \eta_{lk}(\vec{x}, t). \quad (5)$$

Для упрощения математических выкладок в дальнейшем $\eta_{lk}(\vec{x}, t)$ понимается как случайная функция с нулевым математическим ожиданием $m_{\eta_{lk}}(\vec{x}, t) = 0$ и соответствующей пространственной корреляционной функцией $\text{cov}_{\eta_{lk}}(\vec{x}, \vec{x}', t)$.

Незакодированный выходной сигнал k -го слоя P_{1k} связан с декодированным входным сигналом l -го слоя P_{1l}^η соотношением (рис. 2)

$$P_{1l}^\eta(\vec{x}, t) = P_{1k}(\vec{x}, t) + \iiint_{R^3} G_k^{д,κ}(\vec{x}, \vec{x}', t) \eta_{lk}(\vec{x}', t) d\vec{x}'. \quad (6)$$

В частном случае, когда $G_k^{д,κ}(\vec{x}, \vec{x}', t) = \delta(\vec{x} - \vec{x}')$, кодирование отсутствует и

$$P_{1l}^\eta(\vec{x}, t) = P_{1k}(\vec{x}, t) + \eta_{lk}(\vec{x}, t). \quad (7)$$

Сравнение (6) и (7) показывает, что декодирование с ядром $G_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t)$ преобразует только шум $\eta_{lk}(\vec{x}, t)$, не влияя на передаваемый сигнал. Кодирование является эффективным, если мощность закодированного шума значительно превышает мощность закодированного шума при всех \vec{x} . Эффективность кодирования $q^2(\vec{x}, t)$ описывается отношением

$$q^2(\vec{x}, t) = \frac{M[\eta_{lk}^2(\vec{x}, t)]}{M\left\{\left[\iiint_{R^3} G_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t) \eta_{lk}(\vec{x}', t) d\vec{x}'\right]^2\right\}} = \frac{\text{сog } \eta_{lk}(\vec{x}, \vec{x}, t)}{\iiint_{R^3} \iiint_{R^3} G_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t) \bar{G}_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}'', t) \text{сog } \eta_{lk}(\vec{x}', \vec{x}'', t) d\vec{x}' d\vec{x}''}, \quad (8)$$

где M — знак математического ожидания случайной функции; $\bar{G}_k^{ДК}$ — комплексно сопряженная функция по отношению к $G_k^{ДК}$.

Возможности использования интегральных кодов при функциональном кодировании можно определить на примере так называемых голографических кодов [6, 7], для которых в общем случае справедливы соотношения

$$G_k^{КД}(\vec{x}', \vec{x}'', t) = G_k^{КД}(\vec{x}', t) e^{i\varphi_k^{КД}(\vec{x}', \vec{x}'', t)}; \quad (9)$$

$$G_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t) = G_k^{ДК}(\vec{x}', t) e^{-i\varphi_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t)}; \quad (10)$$

$$G_k^{КД}(\vec{x}', t) = [G_k^{ДК}(\vec{x}', t)]^{-1}; \quad (11)$$

$$\varphi_k^{КД}(\vec{x}', \vec{x}'', t) = 2\pi \sum_{m=1}^3 [x'_m x''_m + v_m^k(x''_m, t)] + \mu_k(\vec{x}', t); \quad (12)$$

$$\varphi_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t) = 2\pi \sum_{m=1}^3 [x_m x'_m + v_m^k(x_m, t)] + \mu_k(\vec{x}', t), \quad (13)$$

где $G_k^{КД}(\vec{x}', t)$, $v_m^k(x''_m, t)$, $\mu_k(\vec{x}', t)$ — произвольные однозначные ограниченные функции. Путем подстановки в (13) нетрудно проверить, что эти ядра соответствуют прямому и обратному преобразованиям. В частных случаях из (9) — (12) можно получить ядра преобразований Фурье и Френеля, широко используемые в когерентной оптике [5, 8].

Предпринимались попытки доказать наличие интегральных голографических кодов в мозге [6, 9, 10] в связи с проблемой памяти и «интеллектуальных функций» [11]. Однако до сих пор теоретически не обоснована эффективность этих кодов в борьбе

с шумами, хотя экспериментально подтверждена высокая устойчивость голограмм по отношению к одному из типов шумов — разрушению отдельных фрагментов голограмм [6, 7]. Такой шум можно представить как неоднородную случайную функцию, состоящую из N независимых очагов с центрами $\gamma^i = (\gamma_1^i, \gamma_2^i, \gamma_3^i) \in R^3$ и характеризующуюся корреляционной функцией

$$\text{сog}_\eta^N(\vec{x}', \vec{x}'', t) = \sum_{i=1}^N A_i(\vec{x}' - \vec{x}'', t) e^{-\alpha_i^2(t) \sum_{m=1}^3 [x'_m + x''_m - 2\gamma_m^i(t)]^2}, \quad (14)$$

где $A_i(\vec{x}' - \vec{x}'', t)$ — однородная составляющая корреляционной функции i -го очага шума;

$\alpha_i^{-1}(t)$ — функция, характеризующая эффективный размер i -го очага.

Аналогичный неоднородный шум отмечается в канале связи между k -м и l -м слоями нейронной сети. Он появляется при разрушении отдельных связей между нейронами и в процессе гибели групп нервных клеток в связи с заболеваниями кровеносной системы зрительных трактов. В частном случае, когда $G_k^{\text{дк}}(\vec{x}', t) e^{i\mu_k(\vec{x}', t)} = 1$, эффективность голографического кода при $\text{сog}_{\eta k}(\vec{x}', \vec{x}'', t) = \text{сog}_\eta^N(\vec{x}', \vec{x}'', t)$ определяется по формуле

$$q^2(\vec{x}, t) = \frac{\sum_{i=1}^N A_i(0, t) e^{-4\alpha_i^2(t) \sum_{m=1}^3 [x_{m-i_m}^i(t)]^2}}{\frac{\sqrt{\pi^3}}{8} \sum_{i=1}^N \alpha_i^{-3}(t) A_i(\vec{x}, t)}, \quad (15)$$

в которой $a_i(\vec{x}, t)$ — пространственный спектр однородной составляющей корреляционной функции $A_i(\vec{x}, t)$:

$$a_i(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x'_m} A_i(\vec{x}', t) d\vec{x}'. \quad (16)$$

Из (15) следует, что эффективность интегрального голографического кода тем выше, чем меньше количество очагов шума N , больше расстояние между ними, меньше размеры очагов $\alpha_i^{-1}(t)$, ограниченнее полоса пространственных частот спектра $a_i(\vec{x}, t)$ и сильнее различие между отдельными спектрами очагов шума. Эти выводы подтверждаются экспериментальными данными, полученными при исследовании интегральных кодов в голографии [6, 7] и в коре мозга животных [11].

На функцию $G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\nu_k(\vec{x}', t)}$ существенные ограничения не накладываются. Поэтому при наблюдении реакции отдельных слоев нейронной сети может возникнуть представление о случайности связей между отдельными элементами сети, в связи с чем разрабатываются «вероятностные» модели нейронных сетей [12—14]. Свойства таких моделей аналогичны свойствам интегральных преобразователей, использующих шумоподобные коды [7, 15, 16].

В общем случае корреляционная функция декодированного шума l -го нейронного слоя

$$\eta_{lk}^{dk}(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} G_k^{dk}(\vec{x}, \vec{x}', t) \eta_{lk}(\vec{x}', t) d\vec{x}' \quad (17)$$

приводится к виду

$$\begin{aligned} \text{cor}_{\eta_{lk}^{dk}}(\vec{x}, \vec{x}''', t) &= \iiint_{R^3} \iiint_{R^3} e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x_m} e^{2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m'''} \times \\ &\times G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\nu_k(\vec{x}', t)} G_k^{dk}(\vec{x}'', t) e^{-i\nu_k(\vec{x}'', t)} \times \\ &\times \text{cor}_{\eta_{lk}}(\vec{x}', \vec{x}'', t) d\vec{x}' d\vec{x}'' = F_{\vec{x} \rightarrow \vec{x}''} \left[G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\nu_k(\vec{x}', t)} \times \right. \\ &\times G_k^{dk}(\vec{x}'', t) e^{-i\nu_k(\vec{x}'', t)} \text{cor}_{\eta_{lk}}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \left. \right] = \\ &= \left\{ F_{\vec{x}} \left[G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\nu_k(\vec{x}', t)} \right] F_{\vec{x}''} \left[G_k^{dk}(-\vec{x}'', t) \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. e^{-i\nu_k(-\vec{x}'', t)} \right] \right\} * F_{\vec{x}} F_{\vec{x}''} \left[\text{cor}_{\eta_{lk}}(\vec{x}', -\vec{x}'', t) \right], \quad (18) \end{aligned}$$

где $F_{\vec{x}}$ — оператор преобразования Фурье по координате \vec{x} , спектр зависит от координаты \vec{x} ;

$F_{\vec{x}''}$ — оператор преобразования Фурье по координате \vec{x}'' , спектр зависит от координаты \vec{x}'' ;

* — знак операции свертки по \vec{x} и \vec{x}'' .

Из (18) следует, что чем шире полоса пространственных частот спектров функций $G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\nu_k(\vec{x}', t)}$, $G_k^{dk}(-\vec{x}'', t) e^{-i\nu_k(-\vec{x}'', t)}$, тем однороднее декодированный шум. В частном случае эти функции могут являться выборками белого шума, обладающего широкой полосой частот. Чем уже двойной спектр корреляционной

функции шума $\eta_{lk}(\vec{x}, t)$, тем выше эффективность $q^2(\vec{x}, t)$ шумоподобных кодов.

Таким образом, шумоподобные коды позволяют превратить неоднородные шумы (например, в виде нескольких независимых очагов (13)) в однородные, которые могут подавляться специальными пространственными фильтрами. Одновременно

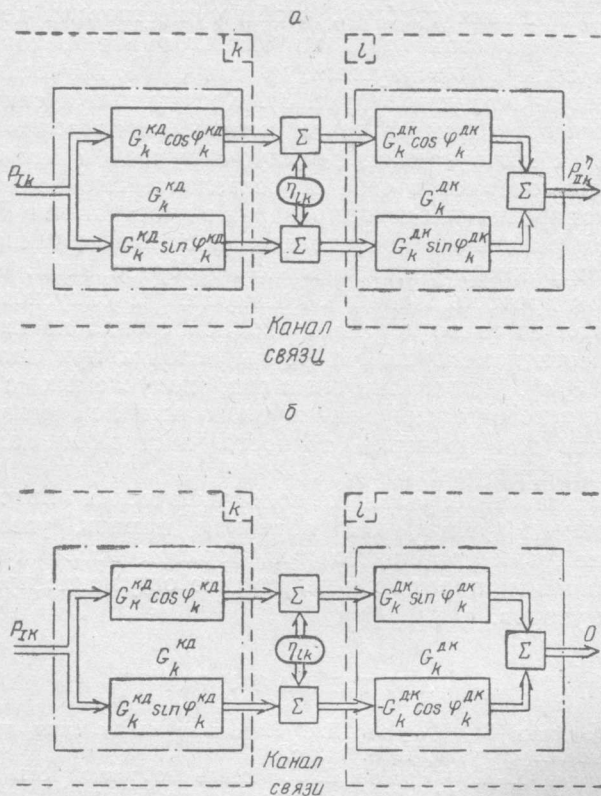


Рис. 3.

сигнал, передаваемый по каналу связи, принимает шумоподобный вид, что способствует его максимальному согласованию с каналом связи [16].

Важное следствие использования комплексных голографических кодов — многоканальность реализующей их системы. Так, вместо (3) с учетом (9) — (11) можно записать уравнения для мнимых и действительных частей ядер кодов:

$$\iiint_{R^3} \cos \left[\varphi_k^{кд}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \cos \left[\varphi_k^{дк}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' +$$

$$+ \iiint_{R^3} \sin \left[\varphi_k^{кд}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \sin \left[\varphi_k^{дк}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' = \delta(\vec{x}'' - \vec{x}); \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \iiint_{R^3} \cos \left[\varphi_k^{кд}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \sin \left[\varphi_k^{дк}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' - \\ & - \iiint_{R^3} \sin \left[\varphi_k^{кд}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \cos \left[\varphi_k^{дк}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Эти соотношения требуют, чтобы существовали четыре различных типа каналов передачи сигналов в помехоустойчивой нейронной сети: 1) косинусный, 2) синусный, 3) косинус-синусный, 4) синус-косинусный (рис. 3). Косинусный и синусный каналы отличаются друг от друга смещением преобразований по отношению к полю зрения. Косинус-синусный и синус-косинусный каналы сочетают в себе относительное смещение преобразований кодирования и декодирования в пространстве R^3 с комбинированием различных последовательностей включения смещенных и несмещенных интегральных преобразований. Сложение результатов преобразований в косинусном и синусном каналах связи позволяет точно передать входной сигнал по каналу связи, произвести помехоустойчивые вычисления при наличии шумов (рис. 3, а). Вычитание сигналов, получаемых с выходов косинус-синусного и синус-косинусного каналов связи, можно использовать для проверки точности настройки кодирующих преобразователей (рис. 3, б).

Свойствами интегральных голографических кодов объясняются такие эффекты, как образная память, увеличение и уменьшение размеров зрительных образов после наблюдения за вращающейся спиралью и неприятное ощущение при осмотре полосатых узоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноград С., Коуэн Дж. Надежные вычисления при наличии шумов. М., «Наука», 1968. 112 с.
2. Зозуля Ю. И., Червов В. Г. Модель нейронной сети зрительного анализатора. — В сб. Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 28—36.
3. Цыбаков Б. С. Линейное кодирование сообщений. — «Радиотехника и электроника», 1962, т. 7, № 1, с. 25—38.
4. Арбиб М. Мозг, машина и математика. М., «Наука», 1968. 224 с.
5. Петров А. А. К вопросу о статистическом характере передачи сигналов в нервной системе. — «Биофизика», 1969, т. 14, № 1, с. 143—150.
6. Габор Д. Ассоциативная голографическая память. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1970, № 4, с. 61—67.
7. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971. 616 с.
8. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М., «Мир», 1971. 495 с.
9. Суайгерт К. Дж., Фогельхут П. О. Пространственная фильтрация в модели нейронной сети. — В кн.: Модели нейронных структур. М., «Наука», 1970, с. 244—265.

10. Baron R. J. A Model for Cortical Memory. — «J. Psychology», 1970, vol. 7, № 1, p. 37—59.
11. Лешли К. С. Мозг и интеллект. М., Соцэкгиз, 1933. 222 с.
12. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. М., «Мир», 1965. 480 с.
13. Appinos P. A. e. a. Dynamics of Neural structures. — «J. Theoret. Biol.», 1970, vol. 26, № 1, p. 121—148.
14. Harth E. M. e. a. Brain Functions and Neural Dynamics. — «J. Theoret. Biol.», 1970, vol. 26, № 1, p. 93—120.
15. Вакман Д. Е. Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации. М., «Сов. радио», 1965. 304 с.
16. Вакман Д. Е. Регулярный метод синтеза фазоманипулированных сигналов. М., «Сов. радио», 1967. 97 с.

УДК 62.506.2

В. П. КЛЕВЦОВ, канд. техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ФОРМ ПЕРЦЕПТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ. СООБЩЕНИЕ I

В настоящее время все больший интерес исследователей вызывает та сторона зрительного восприятия, которая связана с регулятивными функциями в зрительной системе (ЗС). Неудовлетворительными представляются модели, которые, претендуя на универсальность, общность и адекватность зрению, основаны исключительно на стратегии последовательной (послойной) обработки одностороннего, афферентного потока стимульной информации с периферии анализатора в центр. Наряду с афферентными связями сетчатка — мозг, существует большое число эфферентных связей, проводящих информацию в обратном направлении [1, 2].

Глобальные (мозг — сетчатка) и локальные (например, на уровне сетчатки) обратные связи обеспечивают управление зрительным аппаратом в процессе восприятия. С их помощью ЗС адаптируется к условиям внешней среды, а сенсорные механизмы приспособляются к решению текущих задач. Например, обратные, нисходящие, связи позволяют перестраивать чувствительность сетчатки, управлять порогами различения [2, 3] и т. д.

Однако эфферентные процессы ЗС все же изучены значительно меньше, чем афферентные. Так, глубоко исследовались функции сетчатки, связанные с фоторецепцией [1, 4]. Описаны сенсорные функции более старших звеньев зрительной системы — рецептивных полей сетчатки и коры, реализующие измерительные и селективные функции зрения [1, 4, 5]. Разработаны также формальные модели соответствующих механизмов, произвольно [6] или произвольно [7] воплощающие отдельные сенсорные функции зрения.