

Использование адаптивного фильтра новизны для улучшения качества изображений

П.В. Максимов

*Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича
Российской академии наук
pmaxitov@iitp.ru*

Аннотация

*Показано, что адаптивный фильтр новизны, использовавшийся для моделирования эффекта ориентационно-обусловленного цветового последействия или McCollough-effect (МЕ), после продолжительной адаптации к потоку случайных входных изображений способен компенсировать *a priori* неизвестные оптические искажения типа расфокусировки, астигматизма и пр., вносимые несовершенной оптикой.*

МЕ состоит в том, что после адаптации к цветным решеткам на черном фоне, отличающимся друг от друга по цвету и по ориентации, испытуемый видит такие же белые решетки окрашенными в дополнительные цвета. Ранее мы предположили, что МЕ может объясняться наличием в зрительной системе адаптивного фильтра новизны и предложили нейронную модель этого фильтра. Такой фильтр уменьшает корреляцию между сигналами соседних элементов изображения, что приводит к подчёркиванию высоких пространственных частот. В настоящей работе показано, что после длительной адаптации фильтра к различным, но одинаково искажённым (расфокусированным) изображениям возрастает корреляция между сигналами соответствующих элементов выходного и исходного (неискажённого) изображений, что говорит об улучшении качества выходного изображения фильтра по сравнению с поступающим на его вход.

1. Введение

Многие технические проблемы, связанные с обработкой изображений, аналогичны задачам, повседневно решаемым зрением животных и человека. Таким образом, имеется существенный ресурс готовых природных решений таких проблем. В настоящей работе описано одно из таких решений, касающееся улучшения качества изображений, которое было обнаружено нами в ходе

моделирования зрительной иллюзии, называемой эффектом ориентационно-обусловленного цветового последействия.

В первых разделах статьи описаны свойства этого эффекта и в общих чертах описано устройство модели фильтра новизны, построенной для его объяснения. Во второй части статьи исследована способность фильтра новизны «подстраиваться» в ходе естественной зрительной стимуляции под неизвестные ему искажения, внесённые во входной сигнал, и тем самым улучшать (в определенных пределах) качество изображения на выходе.

2. Общие свойства эффекта ориентационно-обусловленного цветового последействия

Ориентационно-обусловленное цветовое последействие, открытое С. Мак-Коллаф в 1965 г. [1] и носящее её имя: McCollough-effect (МЕ), состоит в том, что после адаптации в течение нескольких минут к цветным решеткам на черном фоне, отличающимся друг от друга как по цвету, так и по ориентации (например, предъявляемым попеременно красным полосам, ориентированным вертикально, и зеленым полосам, ориентированным горизонтально), испытуемый видит такие же белые решетки окрашенными в дополнительные цвета. Существенной особенностью МЕ является отсутствие иннерокулярного переноса (после адаптации одного глаза последействие не наблюдается при предъявлении тестовых решеток другому глазу), что считается свидетельством его периферического происхождения.

Первоначально МЕ пытались объяснить адаптацией открытых к тому времени в первичных отделах зрительной коры млекопитающих специфических детекторов ориентированных краёв. Предполагалось, в частности, что те из детекторов, рецептивные поля которых вытянуты вертикально и связаны с красночувствительными входами, под воздействием соответствующих адап-

тирующих стимулов теряют на время чувствительность. Поэтому бесцветные тестовые полосы той же ориентации воспринимаются в дополнительном (зеленом) цвете.

Однако это объяснение эффекта входит в противоречие с рядом его свойств. МЕ длится намного дольше, чем обычная цветовая адаптация: последействие легко видеть через неделю. Сообщалось даже, что, если вообще не производить тестирование в течение трех месяцев, то сила эффекта спадает за это время всего наполовину. В то же время эффект быстро спадает в процессе тестирования («затирается» адекватными стимулами – бесцветными полосками той же ориентации), и напротив, спад величины эффекта совершенно прекращается в отсутствие зрительной стимуляции – во время сна или когда в эксперименте один глаз надолго заклеен. Совсем необычна для адаптации также слабая зависимость силы последействия от интенсивности адаптирующего света.

Позднее оказалось, что сходные эффекты цветового последействия могут быть получены и со стимулами другой конфигурации: при адаптации к цветным периодическим решеткам одинаковой ориентации, но разных пространственных частот, к криволинейным решеткам, отличающимся знаком кривизны, и т.п. Объяснение всех этих эффектов в рамках адаптационной гипотезы требовало привлечения новых типов встроенных детекторов.

3. Модель МЕ на основе фильтра новизны

В работе [2] мы предложили другое объяснение – в рамках представлений об ассоциативной памяти и адаптивном фильтре новизны, которое не требует предопределённых детекторов, а опирается на то свойство нашей зрительной системы, что она имеет обыкновение замечать на каждом новом изображении в первую очередь новое, отличное от уже увиденного и хранящегося в памяти. В этих терминах в МЕ в процессе «адаптации» в памяти формируются образы красных и зеленых полос разной ориентации. В процессе тестирования предъявляемые белые полосы определенной ориентации инициируют соответствующий ассоциативный образ окрашенных полос, который «вычитается» из текущего тестового бесцветного изображения. В результате остается только непредсказуемая его часть – полосы, окрашенные в дополнительный цвет.

3.1. Устройство модели

Фильтр новизны представляет собой автомат, который под воздействием внешних стимулов изменяет свое состояние. В каждый (дискретный) момент времени на входы автомата подаются некоторые цветные изображения, задаваемые на квадратном растре $n \times n$, каждый пиксель которого характеризуется двумя параметрами: интенсивностями в красном и зеленом цветовых каналах.

Нейронная модель фильтра новизны (рис. 1) состоит из трех изоморфных слоев, содержащих по $m = n \times 2n$ нейронов. На первый слой подаются входные изображения. Этот слой мы будем называть также слоем рецепторов модели.

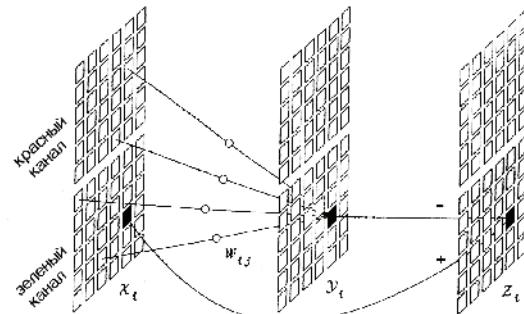


Рис. 1. Устройство нейронной модели фильтра новизны

Будем считать, что возбуждение каждого i -го рецептора x_i , где $i=1, 2, \dots, m$, определяется интенсивностью некоторого цветового канала в определенном пикселе входного изображения для того или иного глаза. Каждый нейрон y_i второго (ассоциативного) слоя синаптически связан со всеми рецепторами, кроме рецептора с тем же номером i , и суммирует возбуждения рецепторов с весами w_{ij} , которые будем называть синаптическими проводимостями:

$$y_i = \sum_j w_{ij} \cdot x_j, \quad (*)$$

причем отсутствие связи с i -ым рецептором означает, что $w_{ii} \equiv 0$. В третьем (выходном) слое вычисляется разность соответствующих элементов входного и ассоциативного изображений:

$$z_i = x_i - y_i.$$

Запоминание подаваемых в последовательные моменты времени t изображений состоит в изменении синаптических проводимостей w_{ij} , которое производится в соответствии со следующим правилом:

$$w_{ij}^{t+1} = w_{ij}^t + \varepsilon \cdot x_j^t \cdot z_i^t, \quad (**)$$

где ε – некоторая константа, характеризующая синаптическую пластичность.

Для обучения фильтра новизны на рецепторы многократно подают некоторое изображение, что приводит к его запоминанию в распределении синаптических весов w_{ij} . Считается, что нейронная сеть запомнила некоторый образ x и может извлечь его из памяти по ассоциации, если может предсказать (вычислить) возбуждение каждого i -го рецептора по сигналам от всех прочих рецепторов по формуле (**).

Для моделирования выработки эффекта ориентационно-обусловленного цветового последействия в процессе обучения (адаптации) на рецепторы вперемежку подавали изображения типа показанных на рис. 2 вертикальных красных и горизонтальных зеленых полос, где возбуждения рецепторов x_i принимали значения 0 (рецептор не возбужден) или 1 (рецептор возбужден). Для имитации произвольной стимуляции глаза после адаптации, когда эффект должен был забываться (спадать), на вход модели подавали случайные изображения, где возбуждения рецепторов были независимы и равномерно распределены внутри определенного интервала интенсивностей.

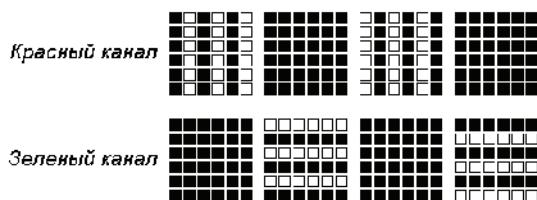


Рис. 2. Адаптирующие стимулы на растре 6×6 для выработки МЕ в модели.

В каждом из каналов белым цветом помечены рецепторы, возбуждающиеся при предъявлении решёток.

За происходящими в модели изменениями следили с помощью процедуры тестирования, аналогичной тестированию в реальных психофизических экспериментах. Для этого в каждом такте после изменения весов w_{ij} в соответствии с обучающим правилом (**) предъявляли тестовые изображения белых полос, типа приведенных на рис. 3, и рассчитывали изображения на выходе фильтра новизны для оценки того, какими модель «видит» белые полосы на тестовых изображениях. В ходе тестирования изменения весов w_{ij} по формуле (**) не производились, поэтому процедура тестирования не влияла на ход обучения и забывания.

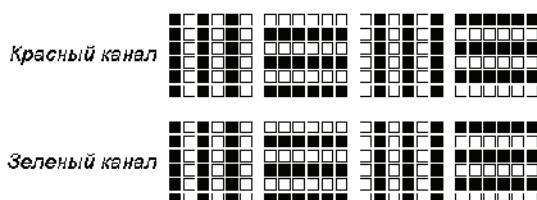


Рис. 3. Примеры тестовых стимулов для оценки величины эффекта.

Величину эффекта последействия в модели оценивали по степени «плзеленения» вертикальных и «покраснения» горизонтальных белых полос на тестовых изображениях. Рассчитанная величина эффекта показывала, насколько в среднем по всем пикселям на белых вертикальных полосах возбуждение зеленого цветового канала на выходе z превышало возбуждение красного, и наоборот – насколько в среднем на белых горизонтальных полосах возбуждение красного цветового канала превышало возбуждение зелёного.

3.2. Результаты моделирования

Все интересующее нас поведение модели может быть продемонстрировано на сетчатках малого размера. В этой серии экспериментов мы не делали сетчатку больше, чем 10×10 пикселей. На иллюстрациях приведены результаты, полученные на растре 6×6 , что составляет 72 нейрона в каждом слое (рис. 1) и свыше 5 тыс. синапсов ассоциативных нейронов с рецепторами.

Во время адаптации на вход модели в цикле подавали один и тот же набор изображений, например, для растра 6×6 – четыре изображения, показанные на рис. 2. Процесс запоминания зависит не только от адаптирующего набора стимулов, но в определенной степени – и от начального состояния, от начальных значений весов синапсов. Обычно адаптацию проводили либо от «нулевых» связей, когда все $w_{ij} = 0$, либо от состояния с однородными связями, когда $w_{ij} = w_0$ при $i \neq j$, где константа w_0 выбиралась такой, чтобы $\sum_j w_{ij} = 1$, либо от некоторого «случайного» распределения весов синапсов. Случайное распределение весов w_{ij} в модели создавалось в результате предъявления в течение долгого времени (несколько тысяч тактов) случайных изображений, где возбуждение каждого из рецепторов было случайно распределено внутри определенного интервала интенсивностей.

После достаточно большого числа тактов предъявления цветных решёток модель демонстрирует эффект, величина которого медленно убывает при последующих предъявлениях случайных стимулов – рис. 4. Отношение скоростей установления эффекта (ветвь a) и его спада (ветвь b) зависит от числа синаптических связей нейронов ассоциативного слоя с рецепторами, т.е. от размера матрицы рецепторов. На растре 6×6 пикселов это отношение равно 20, но при достаточно большой матрице рецепторов (например, 40×40), эффект сохранялся бы в тысячу раз дольше, чем

длительность адаптации, что примерно соответствует наблюдаемому в психофизических экспериментах. В то же время эффект быстро (даже несколько быстрее, чем при обучении) разрушается при демонстрации чёрно-белых решёток – ветвь δ на рис. 4. Как и следовало ожидать, сила эффекта в модели совсем не изменяется при предъявлении черных стимулов, что соответствует прекращению спада настоящего МЕ на время сна. Скорость нарастания эффекта при прочих равных условиях сильно (квадратично) зависит от интенсивности адаптирующих решёток. Пунктирная кривая на рис. 4 показывает рост эффекта при адаптации к стимулам вдвое меньшей интенсивности, чем для сплошной кривой. Тем не менее, конечная сила эффекта от интенсивности не зависит, что можно видеть и на рис. 4.

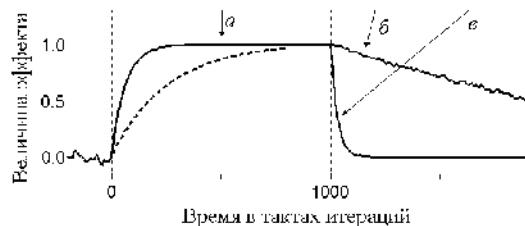


Рис. 4. Временной ход эффекта ориентационно-обусловленного цветового последействия в модели.

4. Улучшение качества изображений

Естественно предположить, что, как и всякая другая иллюзия, МЕ проявляется вследствие срабатывания некоторых механизмов переработки зрительной информации, полезных в естественных условиях, но дающих в искусственных экспериментальных условиях стимуляции неверные зрительные ощущения. Так, последовательный цветовой контраст считается одним из механизмов константности цветовосприятия, благодаря которому осуществляется правильное восприятие окраски объектов в естественных условиях. В то же время в эксперименте в результате продолжительной адаптации, например, к цветному кругу на нейтральном фоне испытуемый, после перевода взгляда на однородную серую поверхность, видит на ней круг, окрашенный в дополнительный цвет, т.е. получает неверное ощущение. Относительно исходных функций механизма, ответственного за МЕ, в частности, зачем нужны столь долговременные адаптационные перестройки на самых начальных этапах обработки зрительной информации, до сих пор никаких убедительных соображений не высказывалось.

Эти функции стали проясняться в наших экспериментах с моделью, в ходе которых неожи-

данно выяснилось, что она обладает замечательной способностью исправления оптических искажений. Действительно, ассоциативная память способна не только к запоминанию часто встречающихся изображений для последующего «вычитания» их из текущего изображения, но является также эффективным средством устранения корреляции между сигналами отдельных элементов сетчатки [3], уменьшающим их избыточность. В том случае, когда причиной взаимной корреляции сигналов соседних рецепторов является несовершенство оптики (приводящее к расфокусировке изображения), устранение этой корреляции с помощью адаптивного фильтра новизны улучшает воспроизведение высоких пространственных частот.

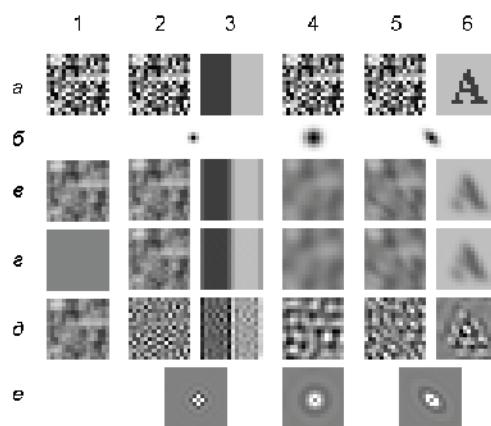


Рис. 5. Результаты экспериментов по улучшению качества изображений после адаптации к случайному шуму.

По столбцам приведены результаты разных экспериментов: 1, 2, 3 – слабая расфокусировка (1 – ответ модели на случайный шум до адаптации, 2 и 3 – ответы на шум и на границу после продолжительной адаптации к случайным изображениям); 4 – сильная расфокусировка; 5, 6 – астигматизм. По строкам: a – исходное неискаженное изображение; b – характер оптического искажения (пятно расфокусировки); c – искаженное сетчаточное изображение, подаваемое на вход модели; d – вызываемый им из памяти «ассоциативный образ»; e – выход фильтра новизны; f – типичное распределение синаптических весов ассоциативных нейронов после продолжительной адаптации к случайным изображениям (светлые цвета соответствуют положительным значениям, темные – отрицательным).

Для исследования этого вопроса исходная модель была несколько изменена: в каждом пикселе раstra вместо двух каналов был оставлен только один яркостный канал. Кроме того, в модель был введен этап преобразования, имитирующий оптические искажения – расфокусировку или астигматизм. В процессе адаптации в качестве исходных

(неискажённых) изображений использовались различные стимулы, в которых сигналы во всех пикселях были сгенерированы случайно и независимо друг от друга. После внесения искажений сигналы соседних входных нейронов становились коррелированными, а фильтр новизны в ходе адаптации стремился устранить эту корреляцию в выходных изображениях.

Результаты экспериментов с моделью, где исходно четкие изображения подавалось на сетчатку модели с разной степенью размытия, представлены на рис. 5. Как можно видеть, исходно выход модели воспроизводит ее вход (столбец 1), но после адаптации к случайному шуму выходное изображение (**б**) во всех случаях уже больше соответствует исходному, неискаженному изображению (**а**), чем тому размытому, которое подается на вход (**в**).

Для количественной оценки соответствия выходных изображений исходным рассчитывали коэффициенты корреляции между парами соответствующих изображений «исходное неискаженное изображение – выход фильтра новизны» и «вход фильтра новизны – выход фильтра новизны» на разных шагах обучения. Коэффициенты корреляции рассчитывали по следующей формуле:

$$C = \frac{\sum_i p_i \cdot z_i}{\sqrt{\sum_i p_i^2 \cdot \sum_i z_i^2}},$$

где p_i – значение i -го пикселя исходного изображения или изображения на входе фильтра новизны, а z_i – значение i -го пикселя выходного изображения.

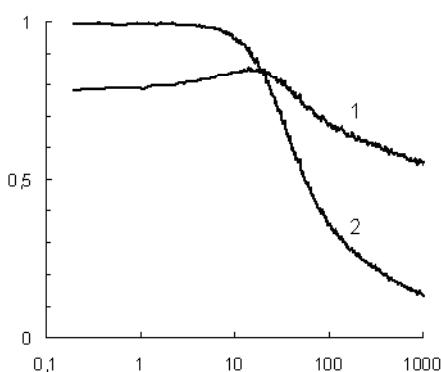


Рис. 6. Зависимость коэффициентов корреляции между изображением на выходе фильтра новизны и исходным изображением (1) и между изображением на выходе фильтра новизны и изображением на его входе (2) от времени адаптации (в тысячах тактов).

На рис. 6 показано, как изменялись коэффициенты корреляции между исходным неискаженным изображением и выходом фильтра новизны (кривая 1) и между расфокусированным изображением на входе фильтра новизны и изображением на его выходе (кривая 2) в ходе адаптации к случайному шуму в том же эксперименте, который приведен на рис. 5 в столбцах 5 и 6. В качестве тестового изображения использовалась буква «А». Очевидно, что до адаптации выходное изображение совпадает с размытым изображением, подаваемым на вход фильтра новизны, и коэффициент корреляции между этими изображениями равен единице (кривая 2). Корреляция выходного изображения с исходным неискаженным заметно меньше (кривая 1). В ходе адаптации к случайному шуму качество выходного изображения начинает повышаться благодаря подчеркиванию высоких пространственных частот. Соответственно растет корреляция с исходным изображением. Степень улучшения зависит от вида тестового изображения и от характера оптического искажения (естественно, что сильно размытые изображения существенно улучшить невозможно). Более того, через некоторое время чрезмерное подчеркивание высоких пространственных частот начинает приводить к ухудшению изображения на выходе фильтра новизны. В то же время в ходе адаптации корреляция с изображением, подаваемым на вход фильтра новизны монотонно снижается. Так что, начиная с некоторого момента, изображение на выходе фильтра новизны больше похоже на неискаженное изображение, чем на то, которое подается на его вход (кривая 1 на этом участке идет выше кривой 2).

5. Заключение

Исследована возможность использования фильтра новизны на модифицируемых синапсах в качестве инструмента исправления a priori неизвестных оптических искажений типа расфокусировки, астигматизма и пр., вносимых несовершенной оптикой. Показано, что модель такого фильтра действительно способна улучшать качество изображений – после продолжительной адаптации к случайному шуму выходное изображение больше соответствует исходному, неискаженному изображению, чем тому размытому, которое подается на вход.

Таким образом, проведенное исследование, во-первых, позволяет предположить, что в зрительной системе существует некий адаптивный механизм, по свойствам близкий к фильтру новизны на модифицируемых синапсах, локализованный на достаточно ранних этапах переработки зрительной информации (возможно, даже в сетчат-

ке), и предназначенный для исправления a priori неизвестных оптических искажений, вносимых несовершенной оптикой глаза. В качестве побочного продукта работы этого механизма в специальных экспериментальных условиях возникают долговременные иллюзии, подобные эффекту ориентационно-обусловленного цветового последействия.

Во-вторых, совершенно очевидно, что такой механизм может быть полезным и в технических системах обработки зрительной информации (в том числе и не связанных непосредственно с обработкой цветовой информации), благодаря способности фильтра новизны «подстраиваться» под неизвестные ему искажения в ходе естественной зрительной стимуляции.

6. Литература

- [1] C. McCollough, “Color adaptation of edge detectors in the human visual system”, *Science*, 1965, vol. 149, pp. 1115–1116.
- [2] Максимов В.В., Максимов П.В. “Зрительная ассоциативная память и эффект ориентационно-обусловленного цветового последействия”, *Биофизика*, 2004, том 49, № 5, стр. 920–927.
- [3] Barlow H., Földiák P. “Adaptation and decorrelation in the cortex”, *The Computing Neuron* (eds. R.M. Durbin, C. Miall, G.J. Mitchison) New York: Addison-Wesley, 1989, pp. 54–72.