

Динамическая модель нейронной сети, воспроизводящей выходной сигнал ганглиозной клетки

Аннотация

Предложена функциональная модель нейронной сети, воспроизводящей выходной сигнал ганглиозной клетки при образовании рецептивных полей с антагонистическими центром и периферией.

1. Введение

Рецептивные поля с антагонистическими центром и периферией давно известны [1]. Усовершенствование моделей производится, как правило, для более полного согласования с данными электрофизиологических экспериментов. В настоящей работе предлагается модель нейронной сети, воспроизводящая для заданного набора стимулов выходной сигнал ганглиозной клетки.

Каждая модель разрабатывается на основе данных, полученных из эксперимента. Однако в оригинале выходной сигнал ганглиозной клетки, представленный в виде осциллограммы, в большинстве случаев не является тем образцом, который должна воспроизводить модель. Даже при одной и той же стимуляции одной и той же ганглиозной клетки осциллограммы могут в чем-то отличаться друг от друга. Это в еще большей степени относится к осциллограммам от разных, хотя и однотипных, ганглиозных клеток. Другими словами, для получения исходного материала для моделирования необходим предварительный анализ достаточного количества осциллограмм, заключающийся в обнаружении общих закономерностей. Этот процесс носит сугубо субъективный характер. Дж. К. Максвелл по этому поводу заметил: «Неспециалистам наиболее часто бросается в глаза как раз не то обстоятельство, которое опытный ученый считает основным, между тем как успех всякого физического исследования зависит от правильного выбора того, что является наиболее важным и от *добровольного* игнорирования тех обстоятельств, для успешного исследования которых, как бы они не были интересны, наука еще развилась недостаточно» [2].

Выделенные свойства моделируемого объекта являются основой для построения модели. Они могут быть «материализованы» в нашем случае в виде некоторой обобщенной осциллограммы. Это синтезированный продукт, в котором присутствует то, что нужно воспроизвести при моделировании и отсутствуют частности, не относящиеся к делу.

В настоящей работе для моделирования использовались обобщенные осциллограммы, приведенные в работе [3, стр. 49] Они иллюстрируют выходной сигнал ганглиозной клетки при предъявлении каждого из четырех стимулов, представленных на рисунке 1. Соответствующие ответы ганглиозных клеток представлены на рисунке 2. Нетрудно заметить, что реакции ганглиозной клетки с *OFF*-центром повторяют (в обобщенной осциллограмме – буквально) реакции клетки с *ON*-центром, если поменять стимулы В и D местами. Поэтому для построения модели достаточно ориентироваться, например, на стимуляцию ганглиозной клетки с *ON*-центром (левая половина рис. 2)

2. Модель

Для проведения компьютерных экспериментов с обработкой изображений сетчаткой с *ON*- и *OFF*-центрами необходима математическая модель. Как правило, она описывает логические этапы обработки информации в зрительной системе, что до некоторой степени освобождает от соблюдения физического сходства с известными эквивалентными электрическими схемами работы биполяров, ганглиозных клеток и пр. Сетчатка рассматривается в целом без указания на то, какой ее компонент ответственен за выполнение очередного этапа обработки. Таким образом, не меняя существа дела, удается упростить конструкцию сети и ее описание.

На рисунке 3 показана блок-схема модели.

Употребление тех или иных элементов обосновывается анализом обобщенных осциллограмм рис. 2. Поясним это последовательно для каждого участка схемы.

На уровень “а” (рисунок 3) поступает аналоговый сигнал с центра рецептивного поля. На уровень “b” поступает взвешенная сумма сигналов от периферии рецептивного поля.

Как видно из осциллограмм рис. 2, при одновременной засветке центра и периферии рецептивного поля, выходной сигнал в установившемся режиме отсутствует (участок 1 на осциллограмме). Имеются лишь импульсы темновой активности. Этим объясняется введение разностной схемы на рисунке 3.

Участки осциллограммы на рис. 2, отмеченные точками 2 и 3, указывают на то, что разностный сигнал дифференцируется по времени. Заметим, что на указанных участках скорость затухания импульсов различна. На участке 3 она выше, чем на участке 2. Это указывает на особенность дифференцирующей цепи (блок «D» на схеме рис. 3), а именно – при отсутствии стимуляции постоянная времени (τ) цепи уменьшается. В электротехнической реализации это свойство модели реализуется несложным образом [4].

Уровень нулевого сигнала для ганглиозной клетки моделируется блоком «УН», введенным в схему рис. 3. Уровень сигнала на его выходе составляет примерно одну десятую часть динамического диапазона, причем амплитуда сигнала нестабильна во времени.

Поскольку речь идет об образовании рецептивного поля с *ON*-центром, то в цепь сигнала включен диод *D*, пропускающий сигналы только положительной полярности.

Далее в схеме предусмотрен блок «М», осуществляющий частотно-импульсную модуляцию аналогового (всегда положительного) сигнала в точке «е» схемы.

Частота импульсов на выходе модулятора пропорциональна значению сигнала на его входе. Модулятор построен на *RC* элементах по стандартной схеме (на рис. 3 не приводится).

Блок-схема, представленная схемой на рис. 3, достаточно наглядна. Она состоит из элементов, математическое описание которых по отдельности известно. Для проверки ее работы и определения значений параметров было получено математическое описание сочетания элементов, представленного схемой на рис. 3 (модель), и на его основе составлена компьютерная программа, моделирующая работу схемы. Наилучшее совпадение с осциллограммами рис. 2 для сетчатки с *ON*-центрами рецептивных полей было достигнуто для следующих параметров дифференцирующей цепочки:

при наличии стимуляции $\tau_1 = 0,5$ с

при отсутствии стимуляции $\tau_2 = 0,15$ с

На рисунке 4 представлены результаты компьютерного моделирования. Под каждым стимулом, в его колонке, приведены «осциллограммы» на различных уровнях схемы, полученные компьютерной программой. Уровень «f» дает выходной сигнал схемы. Для удобства сравнения в строке «z» приведены осциллограммы выходного сигнала, обобщающие данные электрофизиологических экспериментов, т.е. скопированные с рис. 2.

Сравнение импульсных осциллограмм показывает, что предложенная модель нейронной сети, представленная блок-схемой на рис. 3, достаточно точно воспроизводит работу сетчатки с *ON*-центром рецептивных полей. Что касается участка 4 осциллограммы на рис. 2, то его реализация также возможна в электротехнической модели, что показано в [4]

Для моделирования сетчатки с *OFF*-центром достаточно поменять в схеме на рис. 3 каналы в точках «а» и «b» местами. В остальном блок-схема для *OFF*-каналов совпадает со схемой на рисунке 3.

3. Заключение

Предложенная функциональная модель нейронной сети, описывающая работу сетчатки с *ON*- и *OFF*-центрами рецептивных полей, дает достаточно хорошее совпадение с результатами электрофизиологических экспериментов, проведенных для двух уровней освещенности (темнота, свет). Дальнейшее уточнение модели может быть произведено при наличии опытных данных о выходной сигнале ганглиозной клетки с аналогичными стимулами, но для нескольких промежуточных уровней освещенности рецептивного поля.

Наличие в зрительной системе рецептивных полей с антагонистическим центром и периферией приводит к необходимости обработки сигналов как положительной, так и отрицательной полярности. Это видно на осциллограммах рис. 3 (строка “с” для стимула D и строка “d” для стимулов B и D). Однако, частотно-импульсная модуляция ганглиозной клетки дает возможность отображать изменение какого-либо одного параметра сигнала. Поэтому представляется глубоко целесообразным существование в зрительном анализаторе двухканальной системы обработки информации. В этом случае частотно-импульсная модуляция передает амплитуду сигнала (грубо), а знак полярности (второй параметр сигнала) определяется принадлежностью ганглиозной клетки к системе с *ON*- или *OFF*-центрами рецептивных полей (т.е. практически без ошибки). Таким образом зрительная система работает по принципу сохранения контуров на изображении [5]. Хьюбелл [3, стр. 61] указывает на энергетическую выгоду двухканальной системы по сравнению с гипотетической одноканальной, у которой в ответ на оппонентные стимулы частота импульсов снижается или повышается относительно некоторой опорной («нулевой») частоты. Добавим к этому, что обнаружение контрастов в одноканальной системе сведется к сравнению импульсных последовательностей с нестабильной частотой, что вряд ли может составить конкуренцию двухканальной (*ON*, *OFF*) системе.

Предложенная модель указывает на принципиальную возможность построения системы каналов с *ON*- и *OFF*-центрами рецептивных полей, в которых ганглиозные клетки работают с выходными сигналами одной полярности (например, положительной). Другими словами, ганглиозные клетки *ON*-каналов и ганглиозные клетки *OFF*-каналов, выполняющие одну и ту же функцию, *могут быть устроены совершенно одинаково*.

Хотелось бы обратить внимание на реакцию сетчатки при воздействии стимулов D и C. И в том и в другом случае имеет место тормозящее действие освещенной периферии рецептивного поля. Однако выходные сигналы существенно различаются. При действии стимула D в выходном сигнале отсутствует импульсация (участок 5 рис. 2). Отсутствуют не только импульсы «полезного» сигнала, но и импульсы темновой активности. При действии стимула C тормозящее действие освещенной периферии не

подавляет фоновой активности (участок 1 рис. 2). В предложенной модели это свойство сетчатки четко реализуется (соответственно в осциллограммах строки “f” для стимулов D и C рис. 4), хотя при проектировании схемы рис. 3 ориентировки на выполнение этого свойства сетчатки сделано не было.

Разработка модели, дающей формальное описание сетчатки с ON- и OFF-центрами рецептивных полей, позволяет производить компьютерные эксперименты с целью, например, выделения контрастов на изображениях, спроектированных на эту сетчатку. Из осциллограмм рис.2 (участки 2 и 3) видно, что при постоянном действии стимула импульсация ганглиозной клетки постепенно затухает. В модели это свойство реализуется (строка “f” для стимулов B и D на рис. 4) Поэтому при компьютерном эксперименте можно использовать записи микродвижений глаз (дрейф, скачки) для устойчивого восприятия сцены.

4. Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность И. Н. Пигареву и Д. С. Лебедеву за ценные замечания, которые способствовали появлению публикации в настоящем виде.

Литература

1. Kuffler S.W. 1953, Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. J. Neurophysiol. 16, 37-68
2. Джеймс Кларк Максвелл «Речи и статьи» Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва-Ленинград, 1940, стр. 11
3. Хьюбелл Д. «Глаз. Мозг. Зрение», Москва, “Мир”, 1990 г.
4. Гладилин С.А., Лебедев Д.Г. «Нейронная сеть, воспроизводящая выходной сигнал ганглиозной клетки». Информационные процессы, Т. 5, № 3, 2005, стр. 258-264
5. Д. Г. Лебедев, Д.С. Лебедев «Дискретизация изображений посредством выделения и квантования контуров». Известия Академии Наук СССР. Техническая кибернетика. Москва, 1965.



Рисунок 1.

A – состояние покоя (стимула нет)

B – световое пятно, покрывающее только центр рецептивного поля

C – пятно, покрывающее центр и периферию рецептивного поля

D – кольцо, покрывающее только периферию

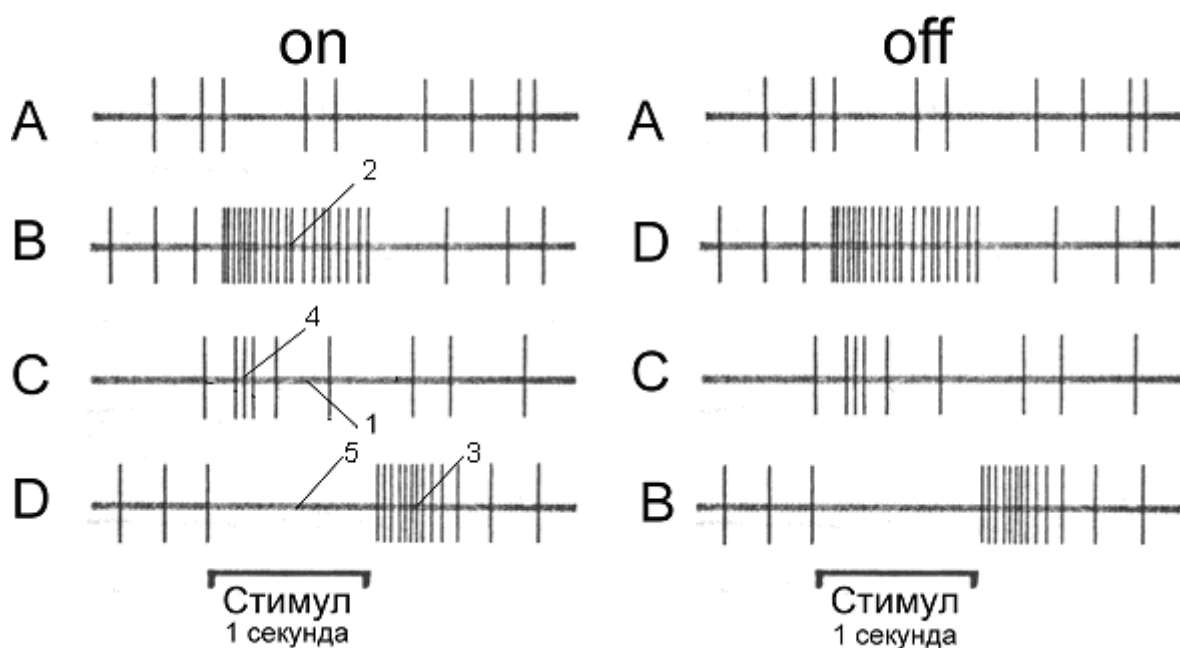


Рисунок 2.

Слева: четыре записи ответов типичной ганглиозной клетки с ON-центром

Справа: реакция ганглиозной клетки с OFF-центром на такой же набор стимулов.

Верхняя запись – состояние покоя (стимула нет). Импульсы (темновой активности) возникают редко и более или менее случайно. Топографическое совпадение ответов для ON- и OFF-клеток в этом случае указывает на искусственную природу записей ответов ганглиозных клеток. Цифрами (1–5) указаны характерные участки осциллограммы, обсуждаемые в тексте.

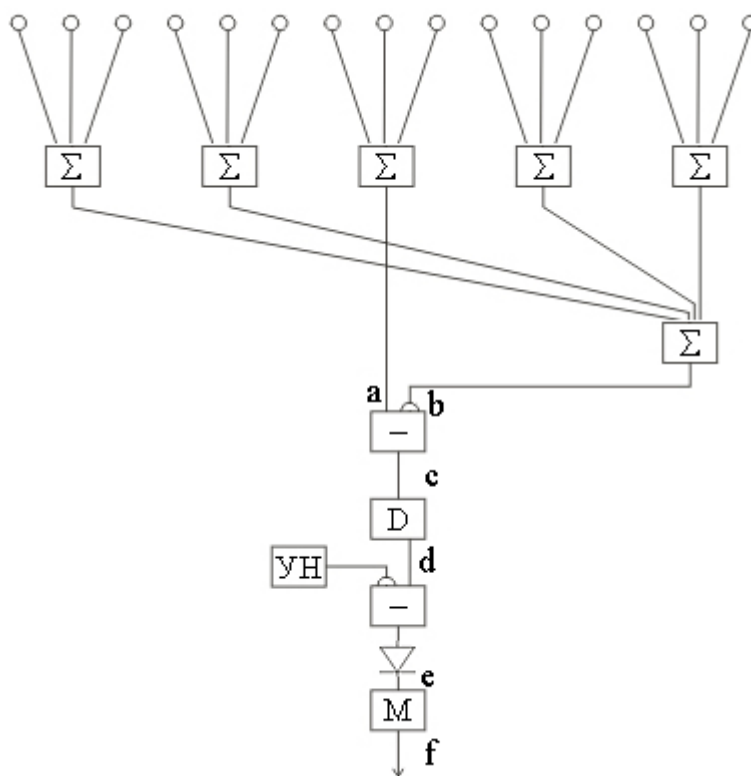


Рис. 3. Электрическая схема модели образования рецептивного поля с ON-центром
 о – преобразователи свет/сигнал
 Σ – усреднители сигнала
 D – дифференцирующее звено
 ∇ – вентиль, пропускающий сигнал одной полярности
 УН – формирователь нулевого уровня
 М – частотно-импульсный модулятор

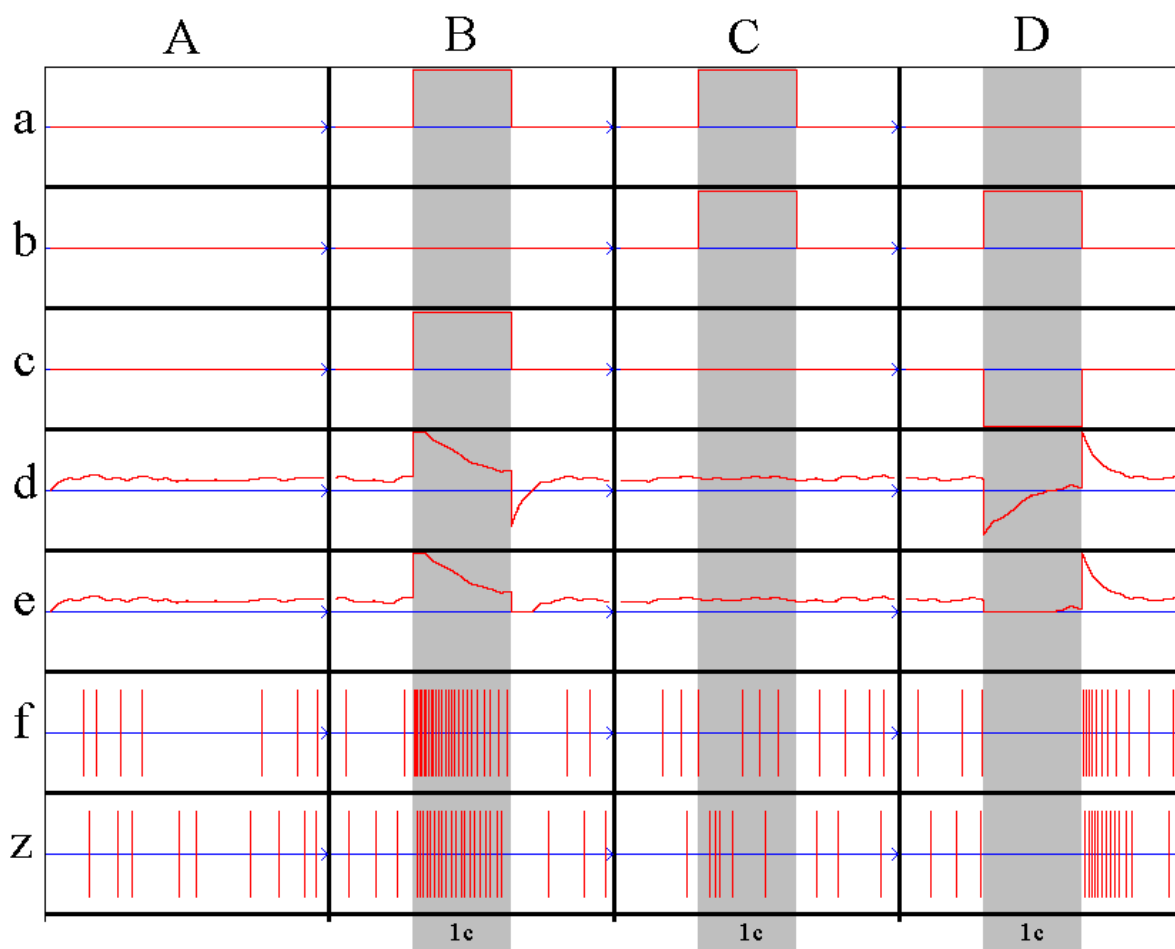


Рисунок 4. Результаты компьютерного эксперимента с моделью сетчатки с ON-центрами рецептивных полей.

A, B, C, D – набор стимулов из рис. 1

a, b, c, d, e, f – точки схемы на рис. 3, в которых регистрировался сигнал

f – вид выходного сигнала модели, полученный в компьютерном эксперименте

z – вид выходного сигнала из [3, стр. 49], обобщающий результаты физиологических экспериментов