

УДК 621.373.826:772.99

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

В.П. Титарь, Т.В. Богданова

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 4, пл. Свободы, Харьков, 61022, Украина

E-mail: inhol@ukr.net

Поступила в редакцию 25 апреля 2014 г.

Рассмотрены основные принципы голографической модели зрительной системы человека, в которой фоторецепторы сетчатки регистрируют дифракционную картину наблюдаемого объекта в виде двух квадратурных составляющих комплексной голограммы. Модель включает логарифмирование, пространственную фильтрацию и усреднение сигнала по сетчатке с вычитанием среднего значения из зрительного сигнала. Логарифмическая обработка квадратурных составляющих голограммы в зрительной системе и получение по ним информации о наблюдаемом объекте описаны с помощью комплексного кепстрального анализа. Обсуждаются результаты цифрового моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: голография, зрительная система, сетчатка, кепстральный анализ, цифровое моделирование.

Розглянуті головні принципи голографічної моделі системи зору людини, в якій фоторецептори сітківки реєструють дифракційну картину об'єкта, що спостерігається, у вигляді двох квадратурних складових комплексної голограми. Модель містить у собі логарифмування, просторову фільтрацію та знаходження середнього значення сигналу по сітківці з відніманням знайденого середнього значення із зорового сигналу. Логарифмічна обробка квадратурних складових голограми в системі зору і одержання за її допомогою інформації про об'єкт, що спостерігається, викладається за допомогою комплексного кепстрального аналізу. Обговорюються результати цифрового моделювання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: голографія, система зору, сітківка, кепстральний аналіз, цифрове моделювання.

Basic principles of holographic model of the human visual system, in which retinal photoreceptors register the diffraction pattern of the observed object as two quadrature components of complex hologram, are considered. The model includes taking the logarithm, spatial filtering and signal averaging on the retina by subtracting the average value of the visual signal. Logarithmic processing quadrature components of hologram in the visual system and getting them information about the observed object are described by means of the complex cepstrum analysis. The results of digital simulations are discussed.

KEY WORDS: holography, visual system, retina, cepstral analysis, digital simulation.

В отличие от известных моделей, в которых предполагалось, что регистрируемое зрительными рецепторами поле является сфокусированным изображением объекта, в данной работе рассматривается возможность формирования голограмм в зрительной системе человека с возможностью последующего восстановления по ним трехмерного изображения. Ранее нами были рассмотрены некоторые иллюзии зрения на основе нейрофизиологической голографической модели зрительного восприятия на уровне оптической системы глаза и строения его сетчатки [1–6]. Предполагалось, что оптическая система глаза формирует на сетчатке не изображение наблюдаемого объекта, а его пространственный спектр, кодирование которого производится активными анизотропными квазикристаллическими структурами родопсинов палочек и йодопсинов колбочек. При этом регистрируется комплексная голограмма Фурье наблюдаемого объекта, состоящая из двух квадратурных составляющих.

В настоящей статье приводятся основные положения голографической модели зрительной системы человека, в которой фоторецепторы сетчатки регистрируют дифракционную картину наблюдаемого объекта в виде двух квадратурных составляющих комплексной голограммы. Обсуждаются результаты цифрового моделирования, произведенного в соответствии с предлагаемой моделью.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗРЕНИЯ

Согласно экологической гипотезе [7], человек составляет единое целое с Вселенной, поэтому модели познания могут быть выведены на основе общих принципов строения Вселенной. Наша модель включает в себя как голографическую модель системы зрения [1–6, 8–12], так и более общую голографическую модель Вселенной [13–18].

В [19] приведена блок-схема системы зрения человека (рис. 1), на которой показаны следующие блоки обработки зрительной информации:



Рис.1. Блок-схема системы зрения человека [19].

- блок «логарифмирования», который производит преобразования зрительного сигнала в соответствии с законом Вебера-Фехнера;
- блок «линейной пространственной фильтрации», который соответствует пространственно-частотной характеристике глаза $|H_e(f)|^2$;
- блок «насыщения», который соответствует способности системы зрения человека к насыщению, то есть к ограничению отклика при очень больших или очень малых интенсивностях светового потока.

Как отмечает Б.Р. Хант [19], данная модель не полностью отражает другие известные свойства системы зрения. В работах других авторов, в частности, в работах Н.Н. Красильникова [20–23] приведены другие, более подробные блок-схемы, например, обобщенная функциональная модель зрения [22]. Однако для нашей цели – моделирования свойств одноцветного (ахроматического) зрения – мы выбрали наиболее простую и общепринятую блок-схему, приведенную в работе Ханта [19] и показанную на рис. 1.

В [24] рассмотрено формирование комплексных Фурье-голограмм [25] интенсивности на сетчатке глаза. Показано, что за счет расщепления естественного (белого) света в слое нервных волокон сетчатки, представляющем собой одноосный биологический квазикристалл, происходит формирование комплексных Фурье-голограмм интенсивности. Регистрация таких голограмм осуществляется в наружных сегментах фоторецепторов, а обработка их – в зрительной коре мозга. При этом пара квадратурных составляющих голограммы на сетчатке формируется за счет расщепления белого света в биологическом квазикристалле на обыкновенную и необыкновенную составляющие для каждой из квазимонохроматических составляющих белого света, регистрируемых тремя типами колбочек сетчатки.

Рассмотрим подробнее формирование голограммы на сетчатке.

1. Рассматривая модель редуцированного (по Вербицкому [26]) глаза с некоторым постоянным коэффициентом преломления, можно сделать вывод, что такой глаз (включая роговицу, хрусталик и стекловидное тело) производит пространственно-частотное преобразование светового поля, попадающего в зрачок глаза, в результате чего на желтом пятне сетчатке фокусируется дифракционное поле, отраженное от объекта и преобразованное редуцированным глазом. С точностью до постоянных множителей такое распределение можно считать пространственно-частотным спектром Фурье объекта, расположенного в дальней дифракционной зоне.

2. Далее свет проходит систему нервных волокон, расположенных параллельно плоскости желтого пятна над колбочками. За счет слоистой структуры этого слоя нервных волокон производится форм-двулучепреломление падающего света [27]. Падающий свет разделяется на две линейно поляризованные волны: обыкновенную и необыкновенную, с взаимно ортогональными плоскостями поляризации.

3. В сетчатке глаза человека реализуется наиболее эффективный метод сокращения избыточности видеoinформации за счет уменьшения числа элементов регистрируемой голограммы, т.е. за счет неэквидистантного расположения колбочек в желтом пятне.

4. Фоторецепторы – колбочки – производят фильтрацию падающего света и выделяют из него три квазимонохроматические составляющие: красную, зеленую и синюю, в соответствии с типом содержащегося в них фермента йодопсина. Формирование голограмм происходит именно на этих трех квазимонохроматических длинах волн.

5. Поле, отраженное от точки фиксации взгляда (так называемая «блестящая» точка), которое содержит фазовую информацию о расстоянии до данного участка объекта, может служить опорным сигналом E_{on} при формировании голограммы на сетчатке. Расфокусированное поле E_{omp} от окружающего эту точку участка объекта является объектным, поскольку несет амплитудно-фазовую информацию о протяженном участке объекта.

6. Регистрация комплексной голограммы Фурье [28] на сетчатке производится с помощью двух опорных волн с взаимно ортогональными поляризациями, выделяемых слоями сетчатки из волны E_{on} , отраженной от «блестящей» точки – точки фиксации взгляда, и смещенных по фазе друг относительно друга на $\pi/2$ [24, 29]. При этом постоянство волнового фронта опорных волн по всей поверхности сетчатки поддерживается в процессе аккомодации с помощью мышц хрусталика [30–32] и глазных мышц [32, 35].

Каждая из квадратурных составляющих представляет собой интерференционную структуру, образующуюся при взаимодействии объектного E_{omp} и опорного поля E_{on} .

7. Колбочки регистрируют светлоту B , которая характеризует зрительную информацию J , зарегистрированную одним чувствительным элементом сетчатки (одной колбочкой). Таким образом, можно считать, что, регистрируя величину J в соответствии с законом Вебера-Фехнера, с точностью до постоянного коэффициента, колбочки определяют меру энтропии видеоинформации.

Сигнал в зрительной системе кодируется следующим образом: после логарифмирования плотности тока, протекающего в элементах сетчатки, происходит частотная модуляция сигналов, причем частота модулируется в соответствии с логарифмом плотности тока. Эта операция, по мнению А.В. Луизова [34], происходит следующим образом: «Где-то в сетчатке, в системе амакриновых клеток, биполяров и ганглиозных клеток происходит сложная переработка информации – логарифмирование плотности тока и преобразование логарифма в частоту импульсов. Последняя операция напоминает введение цифрового отсчета», т.е. происходит квантование сигнала по закону Вебера-Фехнера на уровень пороговой яркости и его цифровое преобразование в частоту – частотная модуляция, аналогичная частотной модуляции в системе цифрового телевидения.

В соответствии с нашей гипотезой, в отличие от обычного телевидения, в системе зрения происходит кодирование не изображения, а голограммы. Следовательно, передача информации в зрительной системе аналогична передаче сигналов в системе цифрового голографического телевидения.

8. Операция логарифмирования двух квадратурных составляющих комплексной голограммы $\Gamma(\mu, \nu)$ производится по отдельности для каждой из этих составляющих и не соответствует известной операции логарифмирования комплексного числа, т.к. эти комплексные составляющие регистрируются на сетчатке независимо друг от друга и представляют собой интенсивности соответствующих интерференционных картин. В результате логарифмирования получаем соотношение:

$$\Gamma_{log}(\mu, \nu) = \log[2\text{Re}F[S]] + i \log[2\text{Im}F[S]], \quad (1)$$

(где S – функция отражения объекта, F – оператор комплексного преобразования Фурье, регистрируемых сетчаткой), В отличие от известных операций комплексного кепстрального анализа, операция логарифмирования комплексной голограммы, регистрируемой сетчаткой, не приводит к разделению модуля амплитуды и фазы между двумя комплексными составляющими. В нашем случае квадратурными составляющими комплексной голограммы, формируемой сетчаткой, являются логарифмы квадратурных составляющих интерференционной картины.

9. В результате неравномерного расположения колбочек на сетчатке и других свойств системы зрения глаз формирует комплексную голограмму $\Gamma_{log}(\mu, \nu)$ с наложенным на нее пространственно-частотным фильтром $|He(f)|^2$

$$\Gamma_H(\mu, \nu) = \Gamma_{log}(\mu, \nu) |He(f)|^2. \quad (2)$$

Принято считать, что $|He(f)|^2$ – пространственно-частотная характеристика глаза [35], которая является передаточной функцией, образованной набором каналов (фильтров) зрительной коры мозга, каждый из которых настроен на определенную пространственную частоту [36].

10. Производится усреднение зрительного сигнала по сетчатке, при котором происходит адаптация к его уровню, в соответствии с В.Д. Глезером [36]. В рамках нашей модели, это соответствует вычитанию из голограммы ее постоянной составляющей, причем получают положительные и отрицательные значения сигнала, что необходимо для использования аппарата БПФ.

При этом формируется рельеф голограммы, т.е. ее интерференционной составляющей, т.к. постоянная составляющая вычитается, как описано выше. Эта голограмма аналогична «цифровой голограмме» [37], представляющей собой интерференционную составляющую голограммы в чистом виде. Таким образом, голограмма, сформированная сетчаткой, полностью аналогична голограммам, которые формируются с помощью компьютерного моделирования.

11. В результате восстановления изображения по такой голограмме с помощью обратного БПФ (оператор которого обозначим через F^{-1}), которое производится в зрительной коре мозга, получим:

$$J(\xi, \eta) = F^{-1}[\Gamma_H(\mu, \nu)] = F^{-1}\{\log[2\text{Re}F[S]] + i\log[2\text{Im}F[S]] |He(f)|^2\}. \quad (3)$$

Произведя преобразования, получим:

$$J(\xi, \eta) = F^{-1}[\Gamma_H(\mu, \nu)] = F^{-1}\{\log[2\text{Re}F[S]] + i\log[2\text{Im}F[S]]\} \otimes F^{-1}[|He(f)|^2], \quad (4)$$

где \otimes – оператор свертки. В этом соотношении $F^{-1}[|He(f)|^2] = A$ – аппаратная функция зрительного тракта. Следовательно, при восстановлении изображения получаем свертку обратного преобразования Фурье комплексной голограммы (2) и аппаратной функции зрительного тракта:

$$J(\xi, \eta) = F^{-1}[\Gamma_H(\mu, \nu)] = F^{-1}\{\Gamma_{log}(\mu, \nu)\} \otimes A. \quad (5)$$

Если ввести условную комплексную функцию

$$z = |z| \exp(i\varphi_z), \quad (6)$$

где $|z| = 2\text{Re}F[S]$, $\varphi_z = 2\text{Im}F[S]$, связанную с другой комплексной функцией Z оператором преобразования Фурье $z = F[Z]$, $Z = F^{-1}[z]$, то к нашей модели можно применить классический комплексный кепстральный

анализ. При этом восстановленное изображение будет представлять собой свертку комплексного кепстра функции Z с аппаратной функцией зрительного тракта A :

$$J(\xi, \eta) = F^{-1}[\log F[Z]] \otimes A. \quad (7)$$

12. Если зрительная система произведет операции, обратные описанным выше, то есть осуществит инверсию комплексного кепстра, то будет восстановлено поле $E_{SO}(x, y)$, формирующее изображение объекта.

13. Таким образом, система зрения формирует голограмму в плоскости сетчатки, передает информацию в кору головного мозга, обрабатывает видеoinформацию и, в соответствии с мнением И.М. Сеченова [38], «выносит» изображение в пространство предметов, то есть строит так называемое предэкранное голографическое изображение. (Это свойство системы зрения Сеченов назвал «соотнесенностью».) Следовательно, процесс зрения является не пассивной регистрацией видеосигнала, а активным процессом преобразования видеосигнала с его распознаванием, восстановлением изображения по зарегистрированной ранее голограмме и вынесением этого изображения за пределы глаза в предметное пространство.

14. Согласно теории экологической оптики Гибсона [7], зрительная информация, воспринимаемая глазом человека и передаваемая для дальнейшей обработки в мозг, представляет собой не изображение предмета, а так называемый «объемлющий свет» (или «стимул»), используемый для выделения инвариантов при распознавании предмета. В соответствии с голографической гипотезой, таким «объемлющим светом» («стимулом») может служить формируемая оптической системой глаза дифракционная картина, которая регистрируется фоторецепторами сетчатки в виде голограммы. Поступающая в мозг видеoinформация в процессе распознавания объекта в терминах голографии является восстанавливающей волной для голограммы, записанной ранее в памяти человека в процессе обучения.

15. Дальнейшая обработка зрительной информации может быть произведена как в высших отделах зрительной коры, так и при обратной передаче сигнала из коры на сетчатку глаза, с вынесением изображения во внешнее пространство в соответствии с принципом соотнесенности по Сеченову. Механизм такого вынесения изображения также может быть объяснен с учетом голографической модели системы зрения: в слоях сетчатки формируется динамическая голограмма [39], которая обеспечивает обращение волнового фронта (ОВФ) и совмещение изображения с формой наблюдаемого объекта.

16. На этапе обучения такие голограммы и восстановленные изображения строятся по всему объекту для записи в памяти как можно более полной информации о нем. Процесс обучения начинается для человека с момента рождения. Не исключено, что наиболее важные информативные характеристики о внешнем мире могут передаваться генетически, т.е. быть врожденными. Например, у животных и птиц такая информация передается генетически.

16. В соответствии с тремя зонами геометрии «разумного зрения», в теории перцептивной перспективы Б.В. Раушенбаха [40, 41], можно предположить, что в зоне дифракции Фраунгофера (в «дальнем плане») человек видит предметы в линейной перспективе, в зоне дифракции Френеля (по Раушенбаху – «неглубокие дальние планы») – в аксонометрии, и в зоне, переходной от ближней зоны к зоне Френеля – в обратной перспективе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате произведенного цифрового моделирования с использованием предложенной нами голографической модели зрения было показано [4], что инварианты изображения – контуры и вершины объекта (или «края» и «границы» по терминологии Гибсона [7]) – выделяются сетчаткой с помощью логарифмической обработки и пространственной фильтрации (вследствие неравномерного расположения колбочек), т.е. с помощью комплексной кепстральной обработки светового потока, отраженного от объекта («объемлющего света») по Гибсону). Таким образом, используя результаты нейрофизиологии о строении глаза человека, а также результаты психофизических исследований системы зрения человека, мы получили «инварианты» изображения объекта, предсказанные методом экологической оптики [7].

Выделение других инвариантных характеристик, например, свойств текстуры поверхности наблюдаемого объекта, может производиться в нейронных сетях зрительной коры путем дополнительной обработки зрительной информации другими интегральными преобразованиями (см., например, сборник работ [42]).

В процессе зрения, по мнению Гибсона, «сигнал, поступающие на сетчатку, вызывают подстройку глаза, что в свою очередь приводит к изменению сигналов, поступающих на сетчатку, и т.д. Это циклический процесс, а не передача в одном направлении» [7]. В нашей модели этот процесс может включать поочередные прямое и обратное кепстральные преобразования зрительной информации.

ВЫВОДЫ

1. В результате цифрового моделирования показано, что голографическая фильтрация на сетчатке позволяет человеку выделять объекты разных форм (их края, границы) из всего «объемлющего света», т.е. из всей информации, поступающей в глаз в оптическом диапазоне электромагнитных волн. Далее, с помощью

этой информации, в результате ОВФ на динамических голограммах, формируемых на сетчатке [7], изображение наблюдаемого объекта выносится во внешнее пространство.

2. Предлагаемая модель может быть использована как для построения новых систем диагностики заболеваний глаза, так и для создания систем регистрации и обработки электромагнитных полей [43], в частности, для систем голографического телевидения [44, 45].

3. Сочетание в голографической телевизионной системе матрицы фотодетекторов с логарифмическими характеристиками и полосовой пространственной фильтрации с характеристикой фильтра, аналогичной пространственно-частотной характеристике зрительной системы человека, позволит улучшать качество голографических изображений и подавлять сопутствующие шумы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова Т.В. Моделирование иллюзий при восстановлении изображений по голограммам / Т.В.Богданова, Г.С. Сафронов, М.Т. Торкатюк // "Оптическое изображение и регистрирующие среды": всесоюз. конф.: тезисы докл. – Л.: ГОИ, 1982. – С.134.
2. Сафронов Г.С. Оконтуривание изображений при сокращении избыточности голографической информации / Г.С. Сафронов, Т.В. Богданова, В.П. Титарь, М.Т. Торкатюк // V Всесоюз. школы по оптической обработке информации: тезисы докл. – Киев, 1984. – С.142–143.
3. Сафронов Г.С. Оконтуривание изображений при сокращении избыточности в телевизионных голографических системах / Г.С. Сафронов, Т.В. Богданова, В.П. Титарь, М.Т. Торкатюк // "Сокращение избыточности в цифровых телевизионных системах": – всесоюз. симп.: тезисы докл. – Тбилиси, 1983. – С.82–83.
4. Богданова Т.В. Использование особенностей системы зрения человека в Фурье-голографии / Т.В.Богданова, Г.С. Сафронов, В.П. Титарь // "Зрение организмов и роботов": – всесоюз. симп.: тезисы докл. – Вильнюс, 1985. – Т. II. – С.32–33.
5. Титарь В.П. Голографическая модель иллюзий зрения / В.П. Титарь, Т.В. Богданова, М.Т. Торкатюк // Вестник Международного Славянского Университета. – 2000. – Т. 3. № 3. – С. 40–45.
6. Титарь В.П. Иллюзии зрения: интерпретация в рамках голографической модели / В.П. Титарь, Т.В.Богданова, М.Т. Торкатюк // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93. № 4. – С.686–693.
7. Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию: пер. с англ. / Дж. Гибсон. – М.: Прогресс, 1988. – 464 с.
8. Van Heerden P.J. A new optical method of storing and retrieving information / P.J. Van Heerden // Appl.Opt. – 1963. – V.2. – P.387–392.
9. Van Heerden P.J. Theory of optical information storage in solids / P.J. Van Heerden // Appl.Opt. – 1963. – V.2. – P.393–400.
10. Gabor D. Holographic model of temporal recall / D. Gabor // Nature. – 1968. – V.217. – P.584.
11. Глезер В.Д. Зрение и мышление / В.Д.Глезер. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние. 1985. – 246 с.
12. Демидов В.Е. Как мы видим то, что видим / В.Е. Демидов. – М.: Знание, 1979. – 208 с.
13. Авраменко Р. Ф. Голографические свойства гиперсферы / Р. Ф. Авраменко, В. И. Николаева // Проблемы голографии. – 1975. – Вып. 6. – С. 64–75.
14. Дубров А.П. Парапсихология и современное естествознание / А.П. Дубров, В.Н. Пушкин. – М.: СП «Соваминко», 1989. – 280 с.
15. Прибрам К. Языки мозга: пер. с англ. / К. Прибрам. – М.: Прогресс, 1975. – 467 с.
16. Pribram K. Holonomy and Structure in the Organization of Perception. // In: John M Nicholas (Hrsg.): Images, Perception, and Knowledge. – 1977. – P. 155–185.
17. Bohm D. Wholeness and the Implicate Order / D. Bohm. – L.: Routledge and Kegan Paul, 1980. – 280 p.
18. Гроф С. За пределами мозга: пер. с англ. / С. Гроф. – М.: Изд-во "Соцветие", 1992. – 336 с.
19. Хант Б. Р. Цифровая обработка изображений / Б. Р. Хант / В кн. : Применение цифровой обработки сигналов : пер. с англ. / под ред. Э. Опенгейма. – М. : Мир, 1980. – С. 197–267.
20. Красильников Н.Н. Статистическая теория передачи изображений / Н.Н. Красильников. – М.: Связь, 1976. – 184 с.
21. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений / Н.Н. Красильников. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
22. Красильников Н.Н. Обобщенная функциональная модель зрения и ее применение в системах обработки и передачи изображений / Н.Н. Красильников // Автометрия. – 1990. – № 6. – С.7–14.
23. Красильников Н.Н. Новое в развитии функциональной модели зрения и результаты ее использования / Н.Н.Красильников // Оптико-мех.пром. – 1991. – № 1. – С.24–26.

24. Титарь В. П. Формирование комплексных Фурье-голограмм интенсивности на сетчатке глаза / В. П. Титарь, О. В. Шпаченко // Вісник Харківського національного університету. Серія: Радіофізика та електроніка. – 2004. – Вип. 1, № 622. – С. 136–141.
25. Богданова Т. В. Оптические комплексные голограммы / Т. В. Богданова, В. П. Титарь // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 5. – С. 37–46.
26. Кравков С.В. Глаз и его работа: Психофизиология зрения, гигиена освещения / С.В. Кравков. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 532 с.
27. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1970. – 556 с.
28. Богданова Т. В. Оптические комплексные голограммы / Т. В. Богданова, В. П. Титарь // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 5. – С. 37–46.
29. Титарь В. П. Голографическая модель физиологической оптики / В. П. Титарь, О. В. Шпаченко // Вісник Харківського національного університету. Серія: Радіофізика та електроніка. – 2000. – Вип. 1, № 467. – С.46–55.
30. Koretz J.F. Modeling age-related accommodative loss on the human eye / J.F. Koretz, G.H. Handelman // Mathematical modelling. – 1986. – V.7. – P. 1003–1014.
31. Coleman D.J. On the hydraulic suspension theory of accommodation / D.J. Coleman // Trans of the Am. Ophthalmol. Soc. – 1986. – V. 84. – P. 846–868.
32. Современная офтальмология : руководство для врачей / СПб. : Питер, 2000. – 672 с.
33. Зрение: сохранение, нормализация, восстановление / Составитель Кудряшова Н.И. – М.: Грэгори-Пэйдж, Новый центр, 1996. – 298 с.
34. Луизов В. Глаз и свет / А. В. Луизов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние, 1984. – 144 с.
35. Sakrison D.L. Comparison of line-by-line and tow-dimensional encoding of random images / D.L. Sakrison, V.R.Alagazi // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1971. – V. IT-17. – P. 386–398.
36. Глезер В.Д. Зрение и мышление / В.Д. Глезер. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние. 1985. – 246 с.
37. Федоров Б.Ф. Цифровая голография / Б.Ф. Федоров, Р.П. Эльман. – М.: Наука, 1975. – 152с.
38. Сеченов И.М. Избранные произведения. Т.П. Физиология нервной системы / И.М. Сеченов. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 944 с.
39. Титарь В. П. Нелинейная модель физиологической оптики / В. П. Титарь // «Сучасні проблеми науки і освіти»: матеріали конференції : 26 квітня – 05 травня 2013 р, м. Одеса. – Харків. – 2013. – С. 136–140.
40. Раушенбах Б.В. Пространственные построения в древнерусской живописи / Б.В. Раушенбах – М. Наука, 1975 – 184 с.
41. Прокофьев В.Н. О «перцептивной перспективе» и перспективах в живописи / В.Н. Прокофьев. – В кн.: Раушенбах Б.В. Пространственные построения в древнерусской живописи. – М. Наука, 1975. – С. 170–183.
42. Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Зрение организмов и роботов». – Вильнюс. – 1985. – Т.1. – 243 с; Т.2. – 217 с.
43. Титарь В.П. Построение голографических антенных решеток СВЧ с учетом психофизических свойств зрения / В.П. Титарь, Т.В. Богданова // "Теория и техника антенн": МККТА`95, 21 – 23 ноября 1995 г., Харьков, Украина : тез. докл. Международной конф. – Харьков, 1995. – С. 29.
44. Титарь В.П. Проблемы создания голографической телевизионной системы / В.П. Титарь, Т.В.Богданова // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 2. – С. 38–42.
45. Титарь В.П. Оптические синтезированные апертуры в голографических телевизионных системах / В.П.Титарь // Вісник Харківського національного університету. Серія: Радіофізика та електроніка. – 2011. – Вип. 18, № 966.– С. 56–67.