

На правах рукописи
УДК 681.78

Гулина Юлия Сергеевна

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем

Научный руководитель: **Колючкин Василий Яковлевич**,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Торшина Ирина Павловна**,
доктор технических наук, доцент,
декан факультета оптико-информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»

Маргарянц Никита Борисович,
кандидат технических наук,
доцент факультета прикладной оптики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Ведущая организация: ФГБУН Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, г. Москва

Защита состоится «28» апреля 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, расположенном по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2021г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М.С. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Особенностью оптико-электронных приборов (ОЭП) наблюдения, к которым относятся телевизионные и тепловизионные приборы, приборы ночного видения и др., является то, что получателем информации, содержащейся в изображениях, формируемых этими приборами, является человек. Прибор и человек образуют систему наблюдения, значения показателей качества которой зависят от того, насколько характеристики и параметры изображения, формируемого прибором, соответствуют психофизическим свойствам зрительного восприятия. Показателями (критериями) качества системы наблюдения, характеризующими её функциональную эффективность, являются вероятности обнаружения и распознавания изображений объектов человеком, выполняющим функции оператора. Для расчёта значений этих показателей как на этапе проектирования ОЭП наблюдения, так и на этапе оценки качества готовых образцов приборов, требуется методика, основанная на методах математического моделирования ОЭП, преобразующих оптические сигналы от объектов, а также зрительной системы человека-оператора. Модельное описание ОЭП наблюдения является в достаточной степени решённой задачей, но теория зрительного восприятия человека пока далека от совершенства. Исследователи, работающие в этой области, едины во мнении, что обработка зрительных образов осуществляется как в глазах человека, так и в мозге. Модельное описание глаза, как системы предварительной обработки оптических сигналов, достаточно полно изложено в публикациях американского учёного Бартена П. Для описания процессов первичной и вторичной обработки изображений, осуществляемых в мозге человека, существуют две группы моделей. Одна из моделей основана на гипотезе о согласованной фильтрации зрительных образов – одноканальная модель, а другая – многоканальная модель, основана на гипотезе о пространственно-частотном анализе зрительных образов, который осуществляется в независимых каналах. Известны публикации отечественных авторов, в том числе, Глезера В.Д., Логвиненко А.Д., Красильникова Н.Н., Шелепина Ю.Е., а также зарубежных – Шаде О.Х., Кемпбелла Ф., Робсона Дж., Вильсона Г. и др. В этих публикациях содержатся результаты исследований, которые свидетельствуют как в пользу одной, так и другой гипотезы. Но, как показал анализ публикаций, достигнутый уровень разработки математических моделей зрительной системы позволяет приближенно оценивать значения только вероятностей обнаружения изображений объектов.

Поэтому в настоящее время для оценки показателей эффективности ОЭП наблюдения используются подходы, основанные на методе Джонсона, в котором значениям вероятностей обнаружения и распознавания изображений определённых классов объектов, ставится в соответствие обнаружение эквивалентных им в виде шпальных тест-объектов. Метод Джонсона является эвристическим и, как отмечается в публикациях отечественных специалистов в области разработки тепловизионных приборов, подмена проблемы распознавания образов объектов задачей различения эквивалентных им,

строго говоря, некорректна. Но относительная простота и положительные результаты практического применения этого метода обусловили его широкое распространение во всем мире. Для расчётной оценки вероятности обнаружения зашумлённых изображений шпальных тест-объектов известны формулы, которые выведены на основе свойства пространственной и временной интегрирующей способности зрительной системы. Однако эти формулы являются приближёнными, так как получены для обнаружения лишь одной полосы миры, не учитывают влияние передаточной функции оптической системы глаза, фотонного и нейронного шума, а также ряда других факторов.

На основании вышеизложенного можно констатировать, что уровень разработки существующих математических моделей зрительной системы не позволяет с достаточной степенью адекватности формализовать процессы обнаружения и, особенно, распознавания изображений объектов человеком-оператором. Для разработки моделей зрительной системы, которые позволят с более высокой точностью рассчитывать значения показателей эффективности ОЭП наблюдения, требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Поэтому тема диссертации, посвященная разработке методики оценки показателей эффективности ОЭП наблюдения на основе математических моделей зрительной системы, является актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка методики оценки показателей эффективности ОЭП наблюдения на основе математических моделей зрительной системы человека-оператора.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

- модернизированы известные математические модели зрительной системы человека-оператора в части предварительной и первичной обработки изображений и выведены выражения для расчёта значений отношения сигнала к шуму на выходе системы первичной обработки изображений;
- выведено математическое выражение для расчета функции контрастной чувствительности, которое использовано для уточнения параметров модели глаза;
- разработаны методики расчёта вероятности обнаружения человеком-оператором изображений объектов, формируемых на выходе ОЭП наблюдения на основе одноканальной и многоканальной моделей зрительной системы;
- разработаны методики расчёта вероятности распознавания человеком-оператором изображений объектов, формируемых на выходе ОЭП наблюдения на основе многоканальной модели зрительной системы;
- разработан лабораторный стенд и выполнены экспериментальные исследования с целью уточнения параметров математических моделей и проверки основных теоретических положений диссертации;
- разработана методика оценки вероятностных показателей эффективности ОЭП наблюдения, основанная на модельном описании комплекса, в состав которого входят математическая модель ОЭП,

формирующего изображение объектов, заданных тестовыми сигналами, а также модель зрительной системы человека-оператора, выполняющего функции обнаружения и распознавания изображений объектов.

Объектом исследования являются ОЭП наблюдения.

Предметом исследования являются методы оценки вероятностных показателей эффективности ОЭП наблюдения.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы методы теории оптико-электронных систем, теории случайных процессов и полей, теории обнаружения и распознавания образов, методы математического моделирования.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- разработана оригинальная методика оценки значений вероятностных показателей эффективности ОЭП наблюдения, которая основана на модельном описании комплекса, в состав которого входят математическая модель ОЭП, формирующего изображения объектов, заданных тестовыми сигналами, а также модель зрительной системы человека-оператора, выполняющего функции обнаружения и распознавания изображений объектов;

- предложены методики расчёта вероятности обнаружения изображений объектов на основе одноканальной и многоканальной моделей зрительной системы, которые по сравнению с известными методиками позволяют повысить точность оценки её значений;

- разработана оригинальная методика расчёта вероятности распознавания изображений полутоновых объектов на основе многоканальной модели зрительной системы;

- на основе многоканальной модели зрительной системы выведены новые математические выражения для расчёта функции контрастной чувствительности, которые учитывают влияние внешних и внутренних помех зрительной системы, а также зависимость эффекта латерального торможения от времени.

Положения, выносимые на защиту:

- многоканальная модель зрительной системы, по сравнению с одноканальной моделью, обеспечивает более высокую точность при оценке обнаружения зашумлённых изображений полутоновых объектов – расхождение расчётных и экспериментальных значений вероятности обнаружения не превышает 10%, но одноканальная модель даёт более точные результаты при оценке вероятности обнаружения зашумлённых изображений бинарных объектов – расхождение расчётных и экспериментальных данных не превышает 12%;

- предложенная методика оценки вероятности распознавания зашумлённых изображений объектов, основанная на многоканальной модели зрительной системы, обеспечивает получение расчётных результатов, которые отличаются от экспериментальных значений, не более чем на 10%;

- методика оценки эффективности ОЭП наблюдения по эквивалентным мирам Джонсона даёт заниженные (до 30%) значения

вероятности обнаружения и завышенные (до 30%) значения вероятности распознавания зашумлённых изображений объектов.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью постановки задач и использованных приближений, а также согласованностью результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что предложенные на основе модельного описания зрительной системы методики расчета вероятностных показателей обнаружения и распознавания могут быть использованы для оптимизации параметров элементов ОЭП наблюдения при их проектировании, а также для оценки качества готовых образцов приборов.

Внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы реализованы в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана в дисциплинах «Специальные оптико-электронные информационно-измерительные приборы», «Проектирование оптико-электронных приборов навигации и наблюдения» и «Наблюдательные оптико-электронные приборы и системы».

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 2 научно-технических конференциях: IX международная конференция «Прикладная оптика» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2010), конференция молодых ученых и специалистов «Будущее оптики» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2013).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах, из них 4 статьи [1–4] опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 3 – статьи в других изданиях и тезисы докладов [5–7].

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок, список литературы включает 90 библиографических описаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, аргументирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведен анализ литературных источников в области методов оценки эффективности ОЭП наблюдения и модельного описания зрительной системы человека.

Отмечено, что для рассматриваемого в диссертации статического режима функционирования основными показателями эффективности ОЭП наблюдения являются вероятностные характеристики обнаружения и распознавания

человеком-оператором изображений объектов, формируемых этими приборами. В настоящее время для оценки этих показателей используются подходы, основанные на методе Джонсона, в котором вероятностям обнаружения и распознавания изображений реальных объектов ставятся в соответствие значения вероятностей обнаружения эквивалентных мир. Метод Джонсона является эвристическим, а основанные на этом методе методики оценки эффективности ОЭП наблюдения базируются на результатах экспериментальных исследований. Поэтому область применения этих методик ограничена в пределах условий проведения экспериментальных исследований, для которых определён уровень яркости фона, контраст и текстура поверхности объекта. Кроме этого, для расчётной оценки вероятностных показателей обнаружения зашумлённых изображений эквивалентных мир в настоящее время используются приближённые формулы, в которых учтены лишь некоторые из свойств зрительного восприятия человека. В связи с этим в диссертации поставлена задача определения погрешности оценки эффективности ОЭП наблюдения по эквивалентным мирам.

На основе анализа литературных источников в области модельного описания зрительной системы отмечено, что в глазах осуществляется только регистрация и предварительная обработка оптических сигналов, а первичная и вторичная обработка этих сигналов, результатом которой является принятие решений о различении образов объектов, осуществляется в мозге человека. Известны модели предварительной обработки изображений, однако параметры их структурных звеньев нуждаются в уточнении.

Относительно первичной и вторичной обработки изображений, осуществляемой в зрительной системе, существуют гипотезы, основанные на одноканальных и многоканальных моделях. Согласно известным одноканальным моделям в нейронах стриарной коры мозга осуществляется согласованная пространственная фильтрация изображения. Эти модели позволяют получить удовлетворительные результаты при оценке вероятности обнаружения, но при оценке эффективности распознавания эти модели применимы только для относительно простых изображений объектов, для которых масштаб, ориентация и другие параметры априори известны. С позиций многоканальной модели, в зрительной системе осуществляется оптимальный приём и последующий анализ не всего изображения наблюдаемого объекта, а его отдельных гармонических составляющих, которые выделяются параллельно включёнными пространственными фильтрами, образованными рецептивными полями нейронов стриарной коры. Известна методика, основанная на многоканальной модели, которая позволяет с удовлетворительной точностью оценить значение вероятности обнаружения изображений объектов. Но используемая в этой методике модель нуждается в модернизации в части описания предварительной обработки изображений. Кроме этого, к настоящему времени на основе многоканальной модели не решена проблема оценки эффективности распознавания изображений объектов.

На основе обобщения результатов анализа публикаций сделан вывод об актуальности темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей зрительной системы человека, описывающих преобразования изображений в глазах человека и в стриарной коре головного мозга.

При модельном описании зрительной системы приняты следующие допущения и ограничения:

- зрительная система линейна, т.к. диапазон яркости в пространстве наблюдения невелик;
- человек-оператор наблюдает полутоновые, не цветные изображения объектов, содержащие аддитивную помеху с нормальным распределением;
- оптическая система глаза пространственно-инварианта, т.к. угловые размеры наблюдаемых образов объектов, находящихся в центральной области системы регистрации, меньше области «ясного» видения;
- эффекты пространственной дискретизации в наблюдаемых изображениях пренебрежимо малы.

На основе обобщения известных моделей принята модель глаза как линейной системы регистрации и предварительной обработки изображений, структурная схема которой приведена на Рисунке 1. Наблюдаемые человеком-оператором на экране дисплея ОЭП наблюдения зашумлённые изображения объектов задаются функцией $L(\varphi_x, \varphi_y, t)$, которая описывает реализации распределения яркости от угловых пространственных координат и времени. Эти реализации подвергаются пространственной фильтрации звеном ОС, которое учитывает линейные искажения оптической системы и фоторецепторов (ФР) сетчатки глаза. За счёт действия горизонтальных клеток (ГК) сетчатки осуществляется вычитание среднего уровня из зарегистрированного сигнала, а затем прибавляется помеха в виде реализаций фотонного шума $n_\phi(\varphi_x, \varphi_y, t)$. В линейном звене ЛТ осуществляется пространственная фильтрация, которая учитывает эффект латерального торможения в слоях нейронов сетчатки, после чего добавляются реализации помехи типа нейронного шума $n_n(\varphi_x, \varphi_y, t)$. Полученные реализации обрабатываются временным фильтром (ВФ) с импульсным откликом $H_B(t)$, который характеризует инерционность зрительной системы.

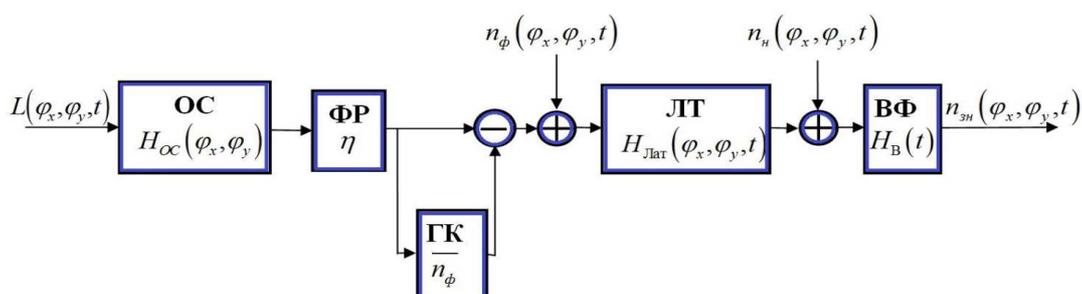


Рисунок 1. Структурная схема модели глаза.

На выходе зрительного нерва глаза формируется возбуждение в виде реализаций пространственно-временного распределения числа фотонов $n_{\text{зн}}(\varphi_x, \varphi_y, t)$. По волокнам зрительного нерва этот сигнал передается в наружное коленчатое тело (НКТ) зрительной системы, в котором, как предполагается, осуществляется пороговая сегментация зарегистрированных зрительных образов, а затем в стриарную кору головного мозга, где происходит их первичная обработка с целью выделения признаков, и затем – вторичная обработка, результатом которой является принятие решений об обнаружении и распознавании образов объектов. Во второй главе описаны процедуры первичной обработки изображений на основе многоканальной модели зрительной системы, структурная схема которой представлена на Рисунке 2.

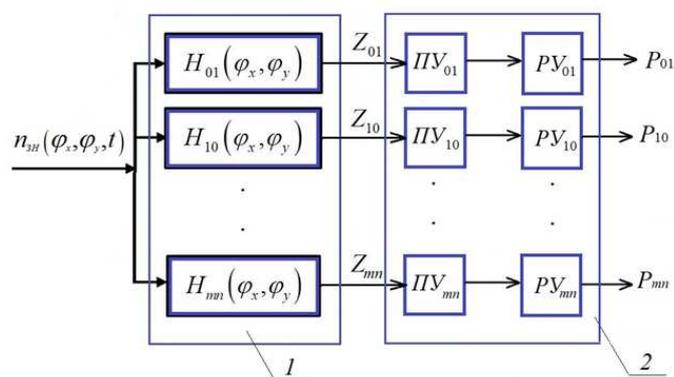


Рисунок 2. Структурная схема многоканальной модели зрительной системы: 1 – многоканальный пространственный фильтр; 2 – логический блок.

Реализации сигнала $n_{\text{зн}}(\varphi_x, \varphi_y, t)$ поступают на вход параллельно включённых пространственных фильтров, импульсные отклики которых в угловых координатах описываются выражением

$$H_{mn}(\varphi_x, \varphi_y) = \frac{1}{A_{\varphi_0}} \text{rect}(\varphi_x / l_{\varphi_x}, \varphi_y / l_{\varphi_y}) \cos \left[2\pi \left(\varphi_x m / l_{\varphi_x} + \varphi_y n / l_{\varphi_y} \right) + \phi \left(m / l_{\varphi_x}, n / l_{\varphi_y} \right) \right] \quad (1)$$

где $A_{\varphi_0} = l_{\varphi_x} \cdot l_{\varphi_y}$ – габаритная площадь сегментированного изображения объекта, имеющего угловые размеры l_{φ_x} и l_{φ_y} ; $\phi(m/l_{\varphi_x}, n/l_{\varphi_y})$ – начальная фаза гармонической функции с пространственной частотой m/l_{φ_x} и n/l_{φ_y} .

Стимулы на выходе mn -ных каналов определяются при наилучшем совмещении фаз гармонических составляющих реализаций сигнала и импульсного отклика, а именно

$$Z_{mn} = \max_{\phi_x, \phi_y} \left\{ \bar{n}_{\text{зн}}(\varphi_x, \varphi_y) \otimes H_{mn}(\varphi_x, \varphi_y) \right\} = S_{mn} + N_{mn}, \quad (2)$$

где S_{mn} – сигнальная составляющая, а N_{mn} – помеховая составляющая.

При допущении о нормальном законе распределения помех вероятности обнаружения каждой гармонической составляющей $P_{mn}^{\text{ОБН}}$ рассчитываются по формуле

$$P_{mn}^{OBH} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_{mn}^{\Pi}}^{\infty} \exp \left[-\frac{(\xi_{mn} - \mu_{mn})^2}{2} \right] d\xi_{mn}, \quad (3)$$

где $\xi_{mn}^{\Pi} = \frac{\ln \Lambda_{\Pi}}{\mu_{mn}} + \frac{\mu_{mn}}{2}$ – порог обнаружения, $\mu_{mn} = S_{mn} / \sigma_{mn}$ – отношение сигнала к шуму (ОСШ) на выходе пространственного фильтра mn -ного канала; σ_{mn} – СКО суммарной помехи на выходе пространственного фильтра mn -ного канала; $\Lambda_{\Pi} = 100$ – пороговое отношение правдоподобия, которое определяется экспериментально.

Выражения для расчета значений ОСШ на выходе каждого из mn -ных каналов, выведенные во второй главе имеют вид

$$\mu_{mn} = \frac{C_M \bar{n}_{\phi} \left| \tilde{L}_{NS} \left(\frac{m}{l_{\phi x}}, \frac{n}{l_{\phi y}} \right) \right| \cdot \left| \tilde{H}_{BKU} \left(\frac{m}{l_{\phi x}}, \frac{n}{l_{\phi y}} \right) \right| \cdot \left| \tilde{H}_{ГЛ} \left(\frac{m}{l_{\phi x}}, \frac{n}{l_{\phi y}} \right) \right|}{\sqrt{\sigma_{ам}^2 + \sigma_{фmn}^2 + \sigma_{нmn}^2}}, \quad (4)$$

где $C_M = \Delta L_M / \bar{L}$ контраст изображения объекта, наблюдаемого на экране дисплея при равномерном фоне яркостью \bar{L} ; \bar{n}_{ϕ} – среднее число фотонов, регистрируемых фоторецепторами сетчатки за время $\tau_{зр} = 0,1$ с, которое характеризует инерционность зрительной системы; $\left| \tilde{L}_{NS} \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right) \right| = \left| \tilde{L}_H \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right) \right| / A_{\phi o}$ – амплитуда mn -ой гармоники спектра сигнала, нормированная на габаритную площадь $A_{\phi o}$ изображения объекта; $\tilde{H}_{BKU} \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right)$ – значение передаточной функции (ПФ) экрана дисплея на пространственных частотах $m / l_{\phi x}$ и $n / l_{\phi y}$; $\tilde{H}_{OC} \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right)$ – значение ПФ оптической системы (ОС) глаза; $\tilde{H}_{ГЛ} \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right) = \tilde{H}_{OC} \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right) \tilde{H}_{лат} \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right)$ – значение ПФ глаза; $\tilde{H}_{лат} \left(m / l_{\phi x}, n / l_{\phi y} \right)$ – значение ПФ линейного звена, учитывающего эффект латерального торможения; $\sigma_{ам}^2$, $\sigma_{фmn}^2$ и $\sigma_{нmn}^2$ – значения дисперсий внешнего, фотонного и нейронного шума соответственно.

Среднее число фотонов, регистрируемых рецепторами глаза, выражается через среднее значение \bar{E} освещённости на сетчатке в соответствии с формулой $\bar{n}_{\phi} = \bar{E} \cdot \eta \cdot q_p / k_E$, где η – квантовая эффективность фоторецепторов; q_p [см²] – площадь рецептивного поля ганглиозных клеток сетчатки; $k_E = 6,1 \times 10^{-12}$ [лк×см/фотон] – коэффициент пересчёта значений освещённости, выраженной в люксах, в число фотонов.

ПФ экрана монитора описывается выражением

$$\tilde{H}_{BKU} \left(\nu_{\phi x}, \nu_{\phi y} \right) = \text{sinc} \left(\pi \nu_{\phi x} a_{\phi} \right) \text{sinc} \left(\pi \nu_{\phi y} b_{\phi} \right), \quad (5)$$

где a_{ϕ}, b_{ϕ} – угловые размеры пикселя ВКУ.

ПФ ОС глаза описывается выражением

$$\tilde{H}_{OC}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) = \tilde{H}_{OC}(v_{\varphi r}) = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 v_{\varphi r}^2), \quad (6)$$

где $v_{\varphi r} = \sqrt{v_{\varphi x}^2 + v_{\varphi y}^2}$, σ – параметр аппроксимации, который выражается в угловых градусах и рассчитывается по эмпирической формуле $\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (C_{ab}d)^2} / 60$, причём $\sigma_0 = 0,5$ угл. мин., $C_{ab} = 0,8$ [угл. мин/см]; $d = [5 - \text{th}(\lg \bar{L})] / 10$ – диаметр зрачка глаза в см.

ПФ латерального торможения описывается выражением

$$\tilde{H}_{лат}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) = \tilde{H}_{лат}(v_{\varphi r}) = \frac{i2\pi v_{\varphi r} r_{лат}}{1 + i2\pi v_{\varphi r} r_{лат}}, \quad (7)$$

где $r_{лат}$ – параметр латерального торможения, величина которого по результатам экспериментальных исследований принята равной $r_{лат} = 0,06^\circ$.

Выражение для дисперсии внешней аддитивной помехи имеет вид

$$\sigma_{ам}^2 = \frac{\bar{n}_\phi^2 \cdot \sigma_{анорм}^2 \cdot A_{\phi\pi}}{2v_k \tau_{зр}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \tilde{H}_{OC}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 \left| \tilde{H}_{лат}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 \times \left| \tilde{H}_{mn}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 \left| \tilde{H}_{ВКУ}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 dv_{\varphi x} dv_{\varphi y}, \quad (8)$$

где $\sigma_{анорм} = \sigma_L / \bar{L}$ – нормированное значение СКО внешней аддитивной помехи; $A_{\phi\pi} = a b_\phi$ – площадь корреляции аддитивной помехи; $\tilde{H}_{mn}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y})$ – ПФ пространственного фильтра mn -ного канала; $\left| \tilde{H}_{лат}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 = 1 - 1,85 \left[1 - \tilde{H}_{лат}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right] + 0,96 \left[1 - \tilde{H}_{лат}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right]^2$ – квадрат модуля усредненной по времени ПФ латерального торможения.

Выражения, выведенные для расчёта дисперсии помех типа фотонного и нейронного шума, соответственно, имеют вид

$$\sigma_{\phi mn}^2 = \bar{n}_\phi \cdot q_{\varphi r} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \tilde{H}_{лат}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 \left| \tilde{H}_{mn}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 dv_{\varphi x} dv_{\varphi y}, \quad (9)$$

$$\sigma_{н mn}^2 = \frac{\bar{n}_\phi^2 \tilde{R}_{н норм}}{2\tau_{зр}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \tilde{H}_{mn}(v_{\varphi x}, v_{\varphi y}) \right|^2 dv_{\varphi x} dv_{\varphi y}, \quad (10)$$

где $\tilde{R}_{н норм}$ – спектральная плотность нейронного шума, значение которой по результатам экспериментов принято равным $\tilde{R}_{н норм} = 6,0 \cdot 10^{-9}$ [град²×с].

На основе выведенных выражений в работе была получена формула для расчета функции контрастной чувствительности, определяющей зависимость от пространственной частоты $v_{\varphi x}$ величины $S(v_{\varphi x}) = 1 / C^*(v_{\varphi x})$, обратной значению порогового контраста C^* , при котором с вероятностью 0,5 обнаруживается финитный гармонический объект. Эта формула имеет вид

$$S(m/l_{\varphi x}, 0) = \frac{|\tilde{H}_{OC}(m/l_{\varphi x}, 0)| \cdot |\tilde{H}_{лам}(m/l_{\varphi x}, 0)| \cdot |\tilde{H}_{ВКУ}(m/l_{\varphi x}, 0)|}{2\mu_{mn}^* \sqrt{\sigma_{амн}^2 + \sigma_{фмн}^2 + \sigma_{нмн}^2}}, \quad (11)$$

где $v_{\varphi x} = m/l_{\varphi x}$, $m = \overline{0, \infty}$, $\mu_{mn}^* = 3, 2$.

Для проверки адекватности предложенной модели зрительной системы была разработана методика экспериментальных исследований и соответствующее программное обеспечение. Проведены эксперименты по обнаружению человеком чёрно-белых изображений тест-объектов в виде периодических вертикально ориентированных решёток с синусоидальным распределением яркости, у которых изменялись размеры, пространственная частота, контраст относительно равномерного фона и уровень внешней аддитивной помехи. На Рисунке 3 представлены расчётные и экспериментальные значения ФКЧ.

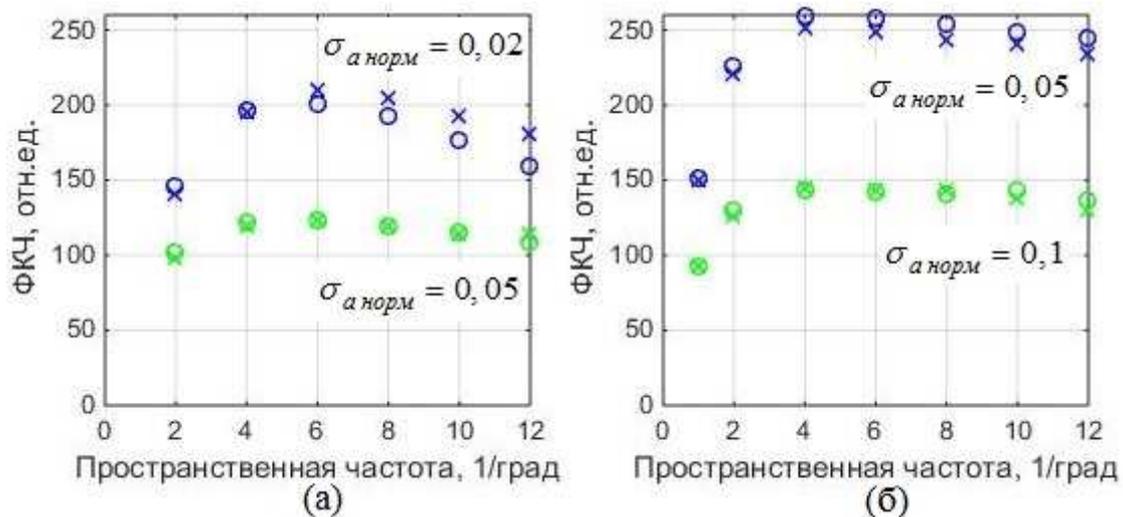


Рисунок 3. Расчётные «x» и экспериментальные «o» значения ФКЧ для тест-объектов с размерами $0.50^\circ \times 0.29^\circ$ (а) и $1.00^\circ \times 0.57^\circ$ (б).

По результатам этих исследований были уточнены используемые в модели значения спектральной плотности нейронного шума, значения параметров, используемых при описании эффекта латерального торможения, значение коэффициента для пересчёта значений освещённости, выраженной в люксах, в число фотонов. Хорошее совпадение расчётных и экспериментально полученных значений, подтверждает адекватность предложенных моделей предварительной и первичной обработки изображений, базирующейся на многоканальной модели зрительной системы и формул, выведенных для расчета ФКЧ на их основе.

Третья глава посвящена модельному описанию зрительной системы на этапе вторичной обработки изображений, когда реализуются функции обнаружения и распознавания образов объектов. Проведенные исследования показали, что для описания процесса обнаружения изображений объектов, осуществляемого в стриарной коре головного мозга, могут быть использованы как многоканальная, так и одноканальная модель зрительной системы.

Предложенная структурная схема многоканальной модели зрительной системы при обнаружении образов объектов приведена на Рисунке 4. В рамках многоканальной модели зрительной системы комплексные коэффициенты разложения образов объектов в ортогональном базисе финитных гармонических функций можно рассматривать как признаки, которые используются для обнаружения и распознавания объектов. Для расчёта вероятности обнаружения человеком-оператором изображения полутонного объекта, наблюдаемого на экране дисплея ОЭП наблюдения, предложено использовать формулу

$$P_{\text{ОБН}} = 1 - \prod_{m,n} (1 - P_{mn}^{\text{ОБН}}), \quad (12)$$

где $P_{mn}^{\text{ОБН}}$ – условные вероятности обнаружения гармонических составляющих образов объектов.

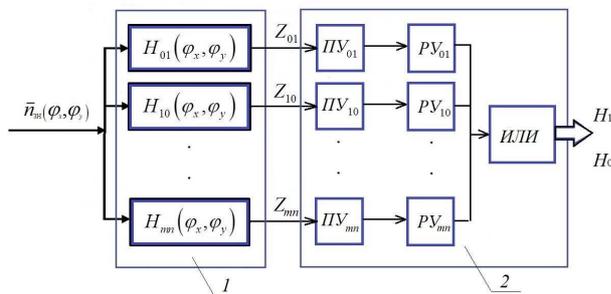


Рисунок 4. Структурная схема многоканальной модели зрительной системы при обнаружении: 1 – многоканальный пространственный фильтр; 2 – логический блок.

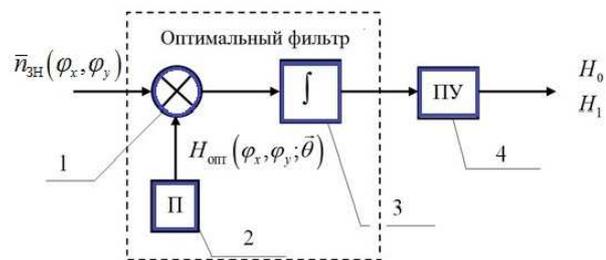


Рисунок 5. Структурная схема одноканальной модели зрительной системы при обнаружении: 1 – умножитель; 2 – блок памяти; 3 – интегратор; 4 – пороговое устройство.

Помимо многоканальной модели была рассмотрена одноканальная модель зрительной системы, в соответствии с которой зрительная система при обнаружении изображений бинарных объектов, имеющих резкие границы, работает как оптимальный приемник, а решение об обнаружении принимается на основе критерия максимума апостериорной вероятности. В соответствии со структурной схемой такого приемника, приведенной на Рисунке 5, на умножитель поступает реализация сигнала $\bar{n}_{\text{ЗН}}(\varphi_x, \varphi_y)$, передаваемого от глаза по зрительному нерву, и опорный сигнал $H_{\text{опт}}(\varphi_x, \varphi_y; \vec{\theta})$, в виде импульсного отклика оптимального фильтра, где $\vec{\theta}$ – вектор параметров, определяющий масштаб, ориентацию и положение изображения объекта.

Максимальное значение сигнала на выходе оптимального фильтра достигается при наилучшем совмещении при варьировании значений вектора параметров, а именно

$$Z = \max_{\vec{\theta}} \left\{ \bar{n}_{\text{ЗН}}(\varphi_x, \varphi_y) \otimes H_{\text{опт}}(\varphi_x, \varphi_y; \vec{\theta}) \right\} = S + N, \quad (13)$$

где S – максимальное значение сигнальной функции, а N – помеховая составляющая.

С учётом допущения о справедливости нормального закона для всех помех, содержащихся в реализациях сигнала, условную вероятность правильного обнаружения, можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{по}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_{\text{п}}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2}\right] d\xi, \quad (14)$$

где $\xi_{\text{п}} = \frac{\ln \Lambda_{\text{п}}}{\mu} + \frac{\mu}{2}$ – пороговый уровень, а μ – значение ОСШ на выходе оптимального фильтра, для расчета которого была получена формула

$$\mu = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_M^2 \bar{n}_{\phi}^2 |\tilde{L}_H(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 |\tilde{H}_{\text{ОС}}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 |\tilde{H}_{\text{Лин}}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 |\tilde{H}_{\text{БКВ}}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2}{2\tau_{\text{зр}} \left[\tilde{R}_{0a} |\tilde{H}_{\text{ОС}}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 |\tilde{H}_{\text{Лин}}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 |\tilde{H}_{\text{БКВ}}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 + \tilde{R}_{0\phi} |\tilde{H}_{\text{Лин}}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 + \tilde{R}_{0н} \right]} dv_{\phi x} dv_{\phi y}}, \quad (15)$$

где $\tilde{R}_{0a} = \bar{n}_{\phi}^2 \cdot \sigma_{a \text{ норм}}^2 \cdot A_{\phi \text{ п}} / \nu_{\kappa}$ – значение спектральной плотности аддитивной помехи; $\tilde{R}_{0\phi} = \bar{n}_{\phi} \cdot q_{\phi p} 2\tau_{\text{зр}}$ – значение спектральной плотности фотонного шума; $q_{\phi p}$ – площадь рецептивного поля в угловой мере; $\tilde{R}_{0н} = \bar{n}_{\phi}^2 \tilde{R}_{н \text{ норм}}$ – значение спектральной плотности нейронного шума.

Для проверки адекватности предложенных методик расчета вероятности обнаружения изображений реальных объектов на основе многоканальной и одноканальной моделей зрительной системы проведены экспериментальные исследования, в которых операторам предъявлялись изображения бинарного объекта в виде прямоугольника и грузовика с одинаковым габаритными угловыми размерами (Рисунки 6, а и 6, б), а также изображение тест-объекта, который синтезировался из первых гармоник пространственного спектра изображения грузовика (Рисунок 6, в).

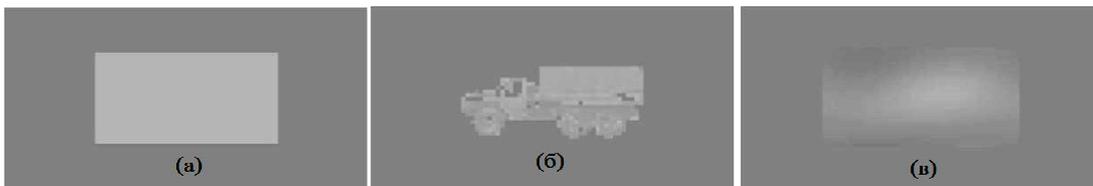


Рисунок 6. Изображения объектов в виде прямоугольника (а), грузовика (б) и тест-объекта (в).

На основе экспериментальных исследований, представленных на Рисунке 7, было показано, многоканальная модель более адекватно описывает обнаружение зашумлённых полутонных изображений объектов (отличие расчетных и экспериментальных данных не превышает 10%), а одноканальная модель более адекватно описывает обнаружение зашумлённых бинарных изображений объектов (отличие расчетных и экспериментальных данных не превышает 12%).

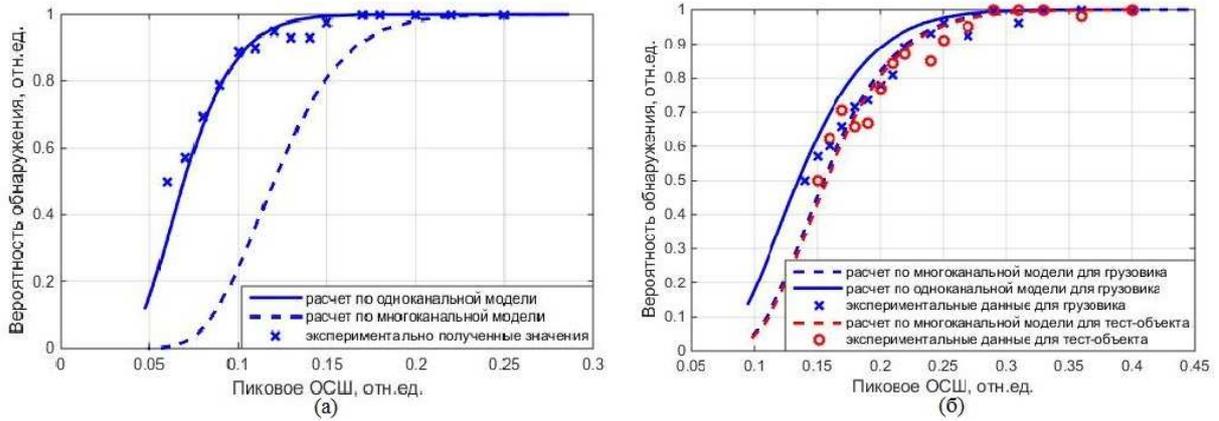


Рисунок 7. Зависимость вероятности обнаружения прямоугольника (а) и изображений грузовика и тест-объекта (б) от пикового ОСШ.

На основе многоканальной модели зрительной системы была разработана оригинальная методика расчета вероятности распознавания человеком-оператором изображений зашумленных объектов. Особенностью этой методики является то, что при анализе признаков, представляющих собой комплексные коэффициенты разложения в базисе финитных гармонических функций, учитываются не только значения модулей, но и фаз этих коэффициентов. Границы между классами распознаваемых объектов определяются на основе байесовского решающего правила, минимизирующего вероятность ошибки при разбиении областей в многомерном признаковом пространстве по принципу дихотомии, которое может быть представлено выражением

$$\sum_{k=1}^K \xi_k \mu_{i,k} \left[1 - \cos(\phi_k^i - \phi_k^j) \right] - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \mu_{i,k}^2 \left[1 - \cos^2(\phi_k^i - \phi_k^j) \right] \lesssim \ln \Lambda_p \rightarrow \Xi \in \left\{ \frac{\omega_i}{\bar{\omega}_i} \right\} \quad (16)$$

где $\mu_{i,k}$ – значение воспринимаемого ОСШ для k -ой гармонической составляющей изображения объекта i -го класса, определяемое по формуле (4), ϕ_k^i и ϕ_k^j – фазы k -ой гармонической составляющей изображений объектов i -го класса и j -го класса соответственно, K – количество признаков.

Условная вероятность правильного распознавания объектов i -го класса определяется выражением

$$P_{ППi} = \int_{D_i} \frac{1}{(2\pi)^{K/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (\xi_k - \mu_{i,k})^2 \right] d\Xi, \quad (17)$$

где D_i – область i -го класса в пространстве признаков.

Безусловную вероятность правильного распознавания, когда количество классов равно L , можно определить по формуле

$$P_{ПП} = \sum_{i=1}^L P(\omega_i) P_{ППi}, \quad (18)$$

где $P(\omega_i)$ – априорная вероятность появления объектов класса ω_i .

На основе экспериментальных исследований по распознаванию двух классов зашумлённых изображений объектов (Рисунки 8 и 9), которые близки

по пространственному распределению яркости, доказана адекватность предложенной методики оценки вероятности распознавания.

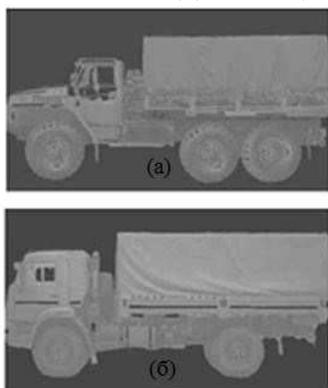


Рисунок 8. Изображения объектов:
(а) – Урал, (б) – КАМАЗ.

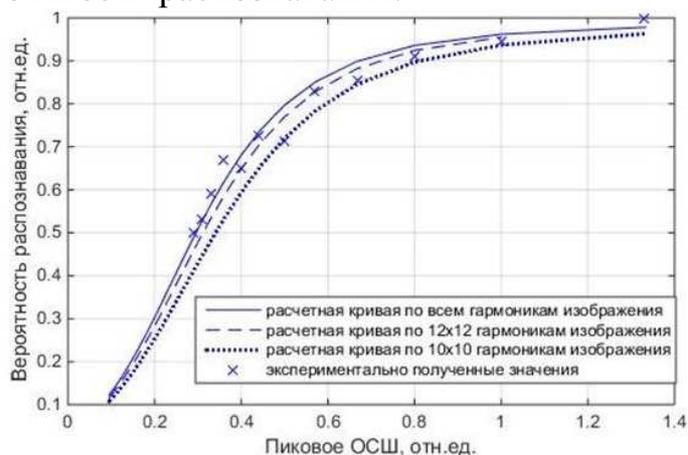


Рисунок 9. Зависимость вероятности распознавания от пикового ОСШ.

В четвертой главе изложена методика оценки вероятностных показателей эффективности ОЭП наблюдения, основанная на модельном описании комплекса, которое включает математическую модель ОЭП, формирующего изображение объектов, заданных тестовыми сигналами, а также модель зрительной системы человека-оператора, выполняющего функции обнаружения и распознавания образов объектов. Методика позволяет определить целевую функцию, которая требуется для выполнения проектных процедур многовариантного анализа и параметрической оптимизации ОЭП наблюдения. Кроме этого, в диссертации проведён анализ погрешностей оценки эффективности ОЭП наблюдения, возникающих при использовании в качестве тестовых сигналов эквивалентных мир Джонсона. На Рисунке 10 представлены расчётные и экспериментальные результаты оценки вероятностей обнаружения и распознавания по полутоновым изображениям объектов и эквивалентным мирам.

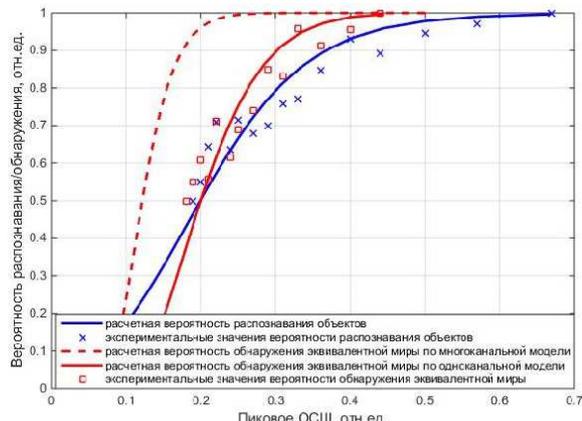
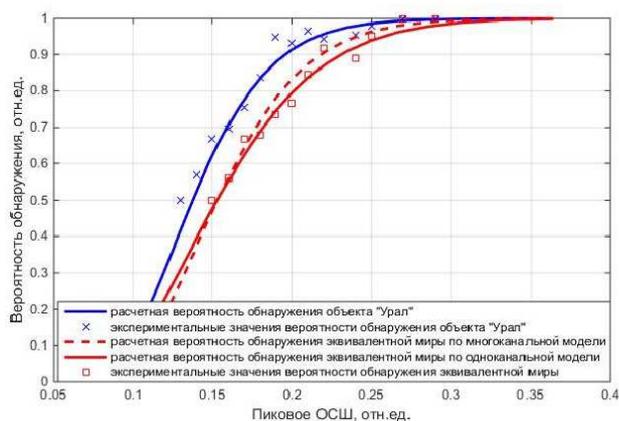


Рисунок 10. Зависимости вероятностей обнаружения и распознавания изображений полутоновых объектов и эквивалентных мир от пикового ОСШ.

Из этих результатов следует, что при использовании эквивалентных мир получаются заниженные значения вероятности обнаружения и завышенные значения вероятности распознавания по сравнению с зашумлёнными

изображениями объектов. На основании этого сделан вывод о применимости эквивалентных мир Джонсона для предварительной оценки эффективности ОЭП наблюдения. Для более точной оценки показателей эффективности рекомендовано использовать эквивалентные тест-объекты, которые представляют собой типовые изображения из алфавита классов объектов, определяемого назначением ОЭП наблюдения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана методика оценки вероятностных показателей эффективности ОЭП наблюдения, основанная на модельном описании комплекса, в состав которого входят математическая модель ОЭП, формирующего изображение объектов, заданных тестовыми сигналами, а также модель зрительной системы человека-оператора, выполняющего функции обнаружения и распознавания изображений объектов. На этапе проектирования предложенная методика позволяет определить целевую функцию проектирования, которая используется для выполнения проектных процедур многовариантного анализа и параметрической оптимизации ОЭП.

2. Предложена математическая модель глаза, как системы предварительной обработки оптических сигналов, которая учитывает зависимость эффекта латерального торможения от временных изменений предъявляемых зрительных стимулов и позволяет учесть особенности фильтрации внешних аддитивных помех, присутствующих в изображениях, наблюдаемых на экране дисплея ОЭП наблюдения.

3. Модернизирована многоканальная модель зрительной системы человека-оператора, описывающая первичную обработку изображений с целью выделения признаков, которые используются для обнаружения и распознавания образов объектов человеком-оператором. Выведены математические выражения для расчёта вероятностей обнаружения гармонических составляющих изображений объектов, а также формула для расчёта ФКЧ зрительной системы, учитывающая влияние как внешних, так внутренних помех зрительных образов.

4. Предложены методики расчета вероятности обнаружения зашумленных изображений объектов, которые основаны на многоканальной и одноканальной моделях зрительной системы человека оператора. Показано, что многоканальная модель более точно описывает обнаружение зашумлённых полутоновых изображений объектов, а одноканальная модель – обнаружение зашумлённых бинарных изображений объектов.

5. На основе результатов исследований по обнаружению зашумленных изображений объектов косвенно подтверждены существующие гипотезы о том, что в зрительной системе человека имеются детекторы, выделяющие как

признаки в виде гармонических составляющих, так и признаки в виде границ резких перепадов яркости в изображениях.

6. Разработана оригинальная методика расчета вероятности распознавания, которая основана на многоканальной модели зрительной системы. Особенностью этой методики является то, что при анализе признаков, представляющих собой комплексные коэффициенты разложения в базисе финитных гармонических функций, учитываются значения как модулей, так и фаз этих коэффициентов. Границы между классами распознаваемых объектов определяются по принципу дихотомии на основе байесовского решающего правила, которое минимизирует вероятность любой ошибки при разбиении областей в многомерном признаковом пространстве.

7. Разработан лабораторный стенд и методика экспериментальных исследований, результаты которых подтвердили основные теоретические положения диссертации.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Гулина Ю.С., Колючкин В.Я. Методика расчета вероятности распознавания изображений человеком-оператором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2012. №1(86). С. 100– 107. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

2. Gulina Y.S., Koliuchkin V. Ya., Trofimov N.E. Model of the Human Visual System// Optical Memory and Neural Networks. 2018. Vol. 27, № 4. P. 219–234. (1,2 п.л./0,6 п.л.)

3. Гулина Ю.С., Колючкин В.Я. Экспериментальные исследования модели зрительной системы человека//Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127, № 4. С. 622–630. (1 п.л./0,5 п.л.)

4. Gulina Y.S., Koliuchkin V.Y. Method for calculating detection probability of objects images by a human// Optical Memory and Neural Networks. 2020. Vol. 29, № 3. P. 209– 219. (0,8 п.л./0,4 п.л.)

5. Гулина Ю.С., Колючкин В.Я. Модель зрительной системы человека-оператора при распознавании образов объектов // Прикладная оптика: Сборник трудов IX международной конференции. СПб. 2010. Т.3. С. 263 – 267. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

6. Гулина Ю.С., Колючкин В.Я., Трофимов Н.Е. Распознавание человеком-оператором символов в условиях сильного зашумления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Специальный выпуск №9 «Современные проблемы оптотехники». 2012. С. 57– 65. (0,6 п.л./0,3 п.л.)

7. Гулина Ю.С., Трофимов Н.Е. Оценка робастности систем сокрытия данных на основе модели зрительного восприятия // Сборник трудов II конференции молодых ученых и специалистов «Будущее оптики». СПб. 2013. С. 8–10. (0,3 п.л./0,15 п.л.)