На правах рукописи

Яроцкая Екатерина Александровна

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВИДИМОГО И КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре оптико-электронных приборов Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор технических наук
Тарасов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Бездидько Сергей Николаевич

кандидат технических наук
Соколов Дмитрий Сергеевич

Ведущая организация: ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

Защита состоится «9» декабря 2010 г. в __10__часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064 Москва, Гороховский пер., 4, зал заседания Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Автореферат разослан «____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Климков Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсивное развитие теории и практики создания оптико-электронных систем (ОЭС) позволяет непрерывно расширять круг их применений, постепенно переходя к решению все более сложных задач, которые еще недавно были недоступны для практической реализации.

К одной из таких проблем, в частности, относится задача создания низкоуровневых (НУ) спектрозональных оптико-электронных систем (СЗОЭС), работающих в видимом и коротковолновом инфракраксном (КВИК) диапазонах ($\Delta\lambda = 0{,}4 \div 1{,}7$ мкм) при малых уровнях входных полезных сигналов.

Одной из важнейших сфер применения НУ СЗОЭС диапазона 0,4 ÷ 1,7 мкм (в особенности для нужд министерства обороны и силовых ведомств) является обнаружение и распознавание объектов (целей) в условиях низкой освещенности. При этом наличие нескольких спектральных каналов, входящих в состав НУ СЗОЭС, позволяет существенно повысить эффективность выделения полезных сигналов на фоне естественных природных ландшафтов.

Однако, в процессе проектирования таких систем, приходится большое внимание уделять выбору типов и параметров преобразователей «излучение-сигнал».

Это, в частности, связано с тем, что для обеспечения высокого спектрального разрешения, в состав НУ СЗОЭС вводят фильтрующие элементы, приводящие к значительным потерям исходящей от цели энергии излучения и, в конечном итоге, к снижению отношения сигнал/шум. Данное обстоятельство приводит к необходимости использования в составе НУ СЗОЭС преобразователей «излучение-сигнал», обеспечивающих высокое усиление и возможно более низкий уровень шумов.

Необходимо отметить, что теории и практике построения таких преобразователей изображения (ПИ) посвящены работы В.Г. Волкова, И.Л. Гейхмана, Н.Ф. Кощавцева, Д.С. Соколова, И.Н. Сурикова, А.С. Терехова и других известных ученых.

Однако специфика использования упомянутых ПИ в НУ СЗОЭС в этих

работах отражена достаточно фрагментарно.

Необходимо также отметить, что в нашей стране и за рубежом рядом исследователей (В.В. Тарасовым, Ю.Г. Якушенковым, Ю.С. Сагдуллаевым, A. Bodkin, A. Sheinis, Mc J. Cann) достаточно полно проработаны принципы построения оптико-электронных систем с матричными приемниками излучения, работающих в двух и более спектральных диапазонах.

В работах этих авторов рассмотрены различные аспекты функционирования таких систем и, в том числе, дан анализ особенностей распространения видимых и ИК волн в атмосфере. В частности, подробно описаны достоинства КВИК-диапазона для ведения наблюдения в ночное время суток, к которым относятся: высокий уровень естественной ночной освещенности (ЕНО) на длине волны $\lambda = 1{,}6$ мкм, высокий уровень контраста цели, повышенная прозрачность атмосферы и ряд других факторов.Однако в этих работах отсутствуют инженерные методики расчета НУ СЗОЭС с гибридно-модульными преобразователями (ГМП) и ТВ-камерами видимого и КВИК диапазонов.

По этим причинам, и с учетом существенно возросшего интереса специалистов к области спектра 0,4 ÷ 1,7 мкм, тема диссертации, направленная на разработку методов расчета и выбора параметров НУ СЗОЭС, представляется весьма актуальной.

Целью работы является решение задачи разработки методов расчета и выбора параметров низкоуровневых спектрозональных ОЭС видимого и коротковолнового ИК диапазонов, имеющее существенное значение для отрасли знаний «технические науки».

Для реализации этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать обобщенную структурную схему НУ СЗОЭС, являющуюся основой для проведения начального этапа проектирования систем этого класса.
2. Разработать методики расчета и выбора параметров основных элементов НУ СЗОЭС:

- преобразователей «излучение-сигнал»: ГМП, ПЗС-камер и камер КВИК диапазона;
- оптических систем, предназначенных для работы в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,7 мкм.

3. Разработать метод комплексирования изображений, формируемых отдельными спектральными каналами НУ СЗОЭС.
4. Проверить адекватность предложенных методов на примерах расчета базовых элементов реальных НУ СЗОЭС.

Предметом исследования являются НУ СЗОЭС видимого и коротковолнового ИК диапазонов и методы их расчета.

Методы исследования базируются на положениях общей теории расчета сложных оптико-электронных систем.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложена обобщенная структурная схема НУ СЗОЭС.
2. Разработаны методы расчета и выбора параметров основных элементов НУ СЗОЭС.
3. Разработан метод комплексирования изображений, формируемых спектральными каналами НУ СЗОЭС.
4. Предложен новый способ получения цветного изображения в условиях низкой освещенности.

Достоверность предложенных методов была подтверждена путем сопоставления расчетных параметров отдельных элементов вновь создаваемых НУ СЗОЭС с данными, полученными в результате их лабораторных испытаний, а также применением этих методов в практике производства современных приборов ночного видения (ПНВ).

Практическая значимость работы:

1. Предложенные методы позволяют с единых позиций осуществлять расчет и выбор параметров вновь создаваемых НУ СЗОЭС диапазона 0,4 – 1,7 мкм, а также совершенствовать характеристики элементной базы уже существующих изделий.

2. Использование разработанных методов позволяет проводить сравнительный анализ различных вариантов вновь создаваемых НУ СЗОЭС и выбирать из них наиболее рациональные схемы построения без проведения дорогостоящих натурных экспериментов. Это, в свою очередь, позволяет существенно сократить средства на разработку этих систем.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Обобщенная структурная схема НУ СЗОЭС видимого и коротковолнового ИК диапазонов может служить основой для проведения начального этапа проектирования вновь разрабатываемых систем этого класса.
2. Методы и методики расчета и выбора параметров основных элементов НУ СЗОЭС, а именно:
   - методика оценки чувствительности и разрешающей способности преобразователей «излучение-сигнал», используемых в НУ СЗОЭС видимого и КВИК диапазонов;
   - методика выбора и оценки параметров оптических систем, используемых в НУ СЗОЭС диапазона 0,4 ÷ 1,7 мкм;
   - метод совмещения изображений, формируемых рабочими спектральными каналами СЗОЭС;
3. Способ получения цветного изображения в условиях низкой освещенности.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на IV Международной конференции «Прикладная оптика», Санкт-Петербург, 2004г; на VII Международной конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание – 2005», Курск, 2005г; на VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009», Санкт-Петербург 2009г.

Публикации. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, представлены в 7 научных публикациях, в том числе одна статья в журнале, вошедшем в перечень ВАК РФ. По теме диссертации получен патент на изобретение №2308116 МПК 7 H01J 31/56 от 14.12.2005г. «Электронно-оптический преобразователь и способ получения видеоизображения».

Объем и структура работы. Диссертационная работа объемом 163 стр. состоит из введения, 4 глав и заключения. Работа содержит 49 рисунков, 7 таблиц и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель, методы исследования, научная новизна, практическая ценность полученных результатов, их достоверность, а также основные положения, выносимые на защиту. Приведены данные об апробации, объеме и структуре работы.

В первой главе диссертации проведен обзор методов построения НУ СЗОЭС видимого и КВИК диапазонов, лежащих в пределах от 0,4 до 1,7 мкм. В первой его части рассмотрены низкоуровневые цветные ОЭС, во второй – КВИК системы. В главе приводятся схемы построения известных устройств с описанием принципов их работы. Анализируются присущие им достоинства и недостатки. Описаны особенности электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и ГМП, входящих в состав НУ СЗОЭС видимого диапазона. Приведены параметры ПЗС-камеры с электронным умножением, которые уже сейчас становятся реальной альтернативой ГМП.

Анализ литературных источников, посвященных НУ СЗОЭС диапазона 0,4 ÷ 1,7 мкм, показал, что в настоящее время отсутствуют инженерные методики расчета и выбора их основных параметров позволяющие с единых позиций вести разработку новых ОЭС, а также совершенствовать характеристики базовых элементов уже существующих изделий.

В этой связи автором была предложена обобщенная структурная схема НУ СЗОЭС, являющаяся основой для проведения начального этапа проектирования систем этого класса и разработаны методики расчета и выбора

параметров основных элементов НУ СЗОЭС: преобразователей «излучение-сигнал» - ГМП, ПЗС-камер и камер КВИК диапазона, а также оптических систем, предназначенных для работы в спектральном диапазоне от 0,4 до 1,7 мкм.

Во второй главе приведена схема НУ СЗОЭС (рис. 1), которая включает: телескопическую систему 1, спектроделительную систему 2 с приводом 3, кассету фильтров КВИК-диапазона 4 с приводом 5, объективы видимого и КВИК каналов 6, цветной низкоуровневый ПНВ 7 на основе высокочувствительных ПЗС камер или ГМП (например, мозаичного типа), видеокамеру КВИК-диапазона 8, индикатор уровня освещенности 9, анализатор контраста видеосигнала 10, устройство управления 11, систему совмещения изображений 12, пульт управления 13, монитор 14 и блок хранения алгоритма совмещения изображений 15. Цифрой 16 на схеме обозначен объект наблюдения, цифрой 17 – источник излучения низкой интенсивности, цифрой 18 – атмосферные частицы (дым, пыль, туман, ядра конденсации и т.д.), рассеивающие и поглощающие отраженное от объекта излучение. Связи между компонентами схемы показаны на рис. 1 сплошными линиями.

Кассета со сменными фильтрами 4 позволяет выделять в КВИК диапазоне те области спектра, в которых (для данной цели) отношение полезного сигнала к шуму достигает максимума.

Спектроделительная система 2 с приводом 3 предназначена для перераспределения энергии отраженного от цели излучения между видимым и КВИК диапазонами в зависимости от состояния атмосферы (например, от уровня ее задымленности).

С этой целью на диске системы 2 по его окружности располагаются несколько полупрозрачных дихроичных фильтров различной плотности, а также зеркало и сквозное отверстие.

При развороте диска доля входного излучения, попадающего на цветной ПНВ и КВИК-камеру, изменяется.

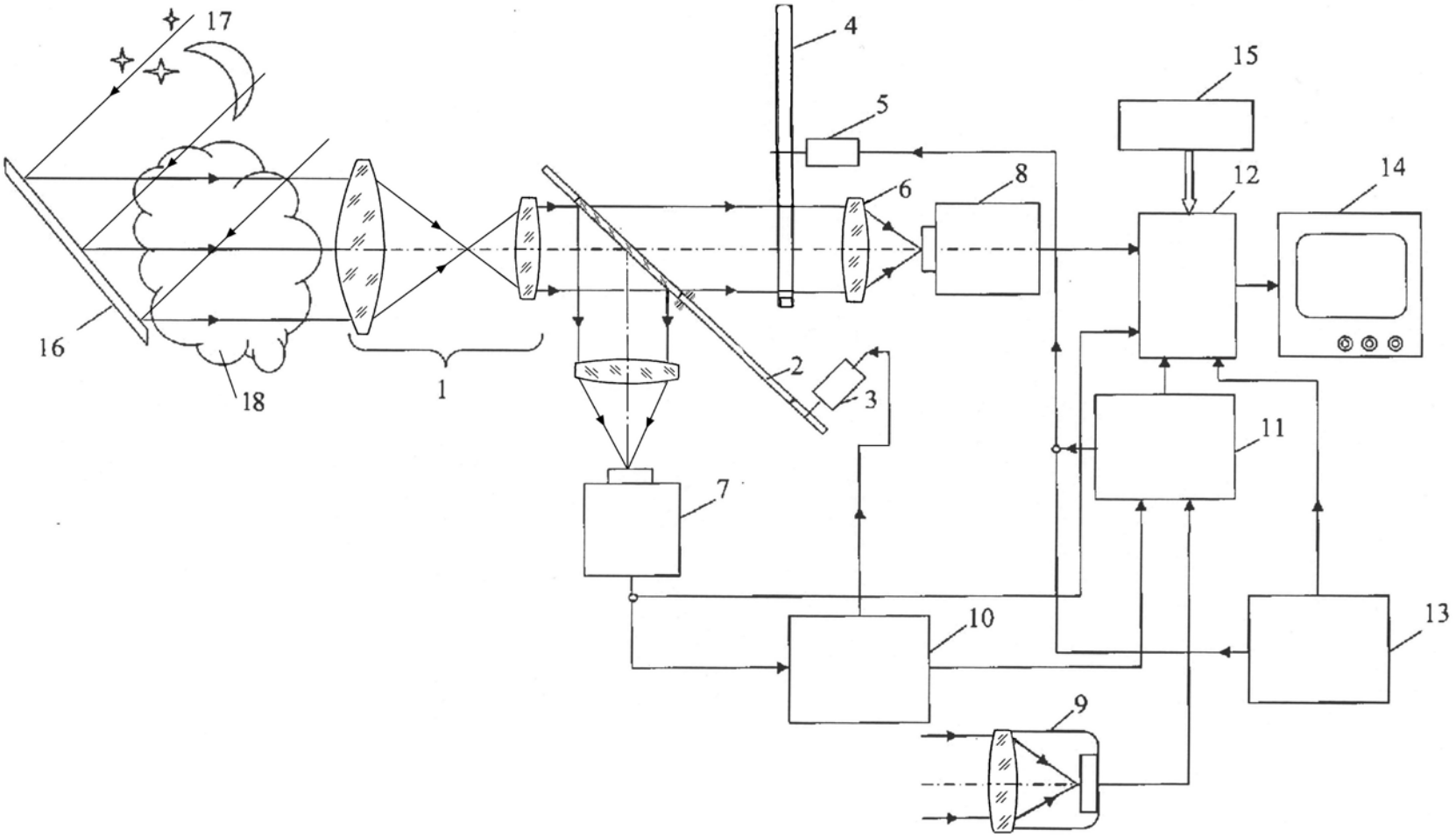


Рис. 1. Обобщенная структурная схема НУ СЗОЭС диапазона 0,4 ÷ 1,7 мкм:

1 – телескопическая система; 2 – спектроделительная система; 3, 5 – привод; 4 – кассета фильтров КВИК-диапазона; 6 – объективы видимого и КВИК каналов; 7 – цветной низкоуровневый ПНВ на основе высокочувствительных ПЗС-камер или ГМП, 8 – видеокамера КВИК-диапазона; 9 – индикатор уровня освещенности; 10 – анализатор контраста видеосигнала; 11 – устройство управления; 12 – система геометрического совмещения изображений; 13 – пульт управления, 14 – монитор; 15 – блок хранения алгоритма совмещения изображений; 16 – объект наблюдения; 17 – источник излучения низкой интенсивности; 18 – атмосферные частицы (дым, пыль, туман, ядра конденсации и т.д.).

Необходимость такого перераспределения энергии связана с тем, что каждый из компонентов НУ СЗОЭС (цветной ПНВ и КВИК-камера) наиболее эффективно функционируют при различных состояниях атмосферы.

Так, например, при низких уровнях помех на трассе цветные ПНВ видимого диапазона обеспечивают более высокую вероятность обнаружения и распознавания целей, формируя изображение в цветах, привычных для глаза человека-оператора.

С другой стороны, при наличии в атмосфере пыли, дымов и аэрозольных частиц целесообразно большую часть излучения, отраженного от объекта, сконцентрировать на чувствительной площадке КВИК-камеры, поскольку изображение с выхода цветного ПНВ из-за низкого контраста становится малоинформативным.

Это связано с тем, что в диапазоне длин волн 1,4 ÷ 1,7 мкм существенно повышается прозрачность атмосферы и, более чем на порядок (по сравнению с видимой областью спектра), снижается яркость атмосферной дымки. Кроме того, максимум ЕНО приходится на λ=1,6 мкм. Поэтому излучение в КВИК диапазоне лучше проходит через некоторые виды дымов, пыль и туман.

При этом изображение на экране монитора 14 становится черно-белым, но дальность четкого видения объектов существенно возрастает.

В качестве датчика сигнала, инициирующего разворот диска спектроделительной системы 2, могут быть использованы цветной низкоуровневый ПНВ 7 и индикатор уровня освещенности 9. Поскольку при появлении на трассе помех (например, пыли, дыма или аэрозольных частиц) контраст формируемого им изображения снижается, это приводит к возникновению на выходе анализатора 10 управляющего воздействия, поступающего на привод 3. Диск разворачивается, обеспечивая поступление большей части входного излучения на КВИК-камеру.

Представленная на рис.1. обобщенная структурная схема НУ СЗОЭС отображает основные особенности построения систем этого класса, служит

основой для проведения начального этапа проектирования вновь разрабатываемых ОЭС и позволяет проводить:

- синтез схем построения вновь создаваемых систем диапазона 0,4 ÷ 1,7 мкм;
- выбор наиболее рациональных типов преобразователей «излучение - сигнал»;
- выбор исходных данных для расчета параметров оптических систем;
- выбор исходных данных для разработки алгоритма геометрического совмещения изображений, формируемых цветным ПНВ и КВИК-камерой (например, при переходе из видимого в КВИК диапазон).

Во второй главе также детально рассмотрены методики оценки чувствительности и разрешающей способности различных схем построения НУ СЗОЭС, использующих современные ЭОП, ГМП и ПЗС-камеры в качестве преобразователей «излучение-сигнал».

Методика определения чувствительности НУ СЗОЭС заключается в последовательном выполнении следующих этапов:

1. Определяется освещенность на фотокатоде ЭОП как функция освещенности объекта на местности E_c, коэффициента отражения объекта ρ, коэффициента пропускания светофильтра $\tau_Ф$, коэффициента пропускания объектива $\tau_{ОБ}$ и телесного угла задней апертуры объектива Ω.

$$E_K = \frac{E_c \cdot \rho \cdot \Omega_{ОБ} \cdot \tau_Ф \cdot \tau_{ОБ}}{\pi}. \qquad (1)$$

2. Определяется яркость свечения экрана ЭОП $L_Э$ в зависимости от его электронно-оптического увеличения $Г_{ЭО}$ и коэффициента преобразования η

$$L_Э = \frac{E_K \cdot \eta}{\pi \cdot Г_{ЭО}^2}. \qquad (2)$$

3. Определяется освещенность на ПЗС-матрице $E_{пзс}$ в зависимости от коэффициента пропускания СПИ $\tau_{СПИ}$; яркости свечения экрана ЭОП $L_Э$ и телесного угла задней апертуры СПИ $\Omega_{СПИ}$

$$E_{ПЗС} = \frac{\tau_{СПИ} \cdot \Omega_{СПИ} \cdot E_c \cdot \rho \cdot \Omega_{ОБ} \cdot \tau_Ф \cdot \tau_{ОБ} \cdot \eta}{\pi^2 \cdot Г_{ЭО}^2}. \qquad (3)$$

4. Вводится коэффициент пересчета $К_П$ параметра η ЭОП для учета изменения спектрального состава излучения по сравнению с источником «А».

$$K_{П} = \frac{\int_0^{\infty} \upsilon_{\lambda} \cdot r_{A\lambda} \cdot d\lambda \cdot \int_0^{\infty} r_{X\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{A\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot d\lambda \cdot \int_0^{\infty} \upsilon_{\lambda} \cdot r_{X\lambda} \cdot d\lambda}, \quad (4)$$

$$\eta_1 = \eta \cdot K_{П}, \quad (5)$$

где υ_{λ} - относительная спектральная видность глаза; $r_{A\lambda}$ - спектр источника типа «А»; S_{λ} - спектральная чувствительность фотокатода ЭОП; $r_{X\lambda}$ - спектр излучения, пришедшего на фотокатод ЭОП; $r_{X\lambda} = \varphi_{\lambda} \cdot \tau_{ОБ\lambda} \cdot \tau_{Ф\lambda}$, где φ_{λ} - спектр падающего на входной объектив излучения; $\tau_{ОБ\lambda}$ - спектральный коэффициент пропускания входного объектива; $\tau_{Ф\lambda}$ - спектральный коэффициент пропускания светофильтра.

5. Вводится коэффициент пересчета $K_{ПЭ}$ интегральной чувствительности ПЗС-матрицы $E_{ПЗС}$ для учета изменения спектрального состава излучения по сравнению с источником «А».

$$K_{ПЭ} = \frac{\int_0^{\infty} \upsilon_{\lambda} \cdot r_{T\lambda} \cdot d\lambda \cdot \int_0^{\infty} r_{Э\lambda} \cdot S_{ПЗС\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{T\lambda} \cdot S_{ПЗС\lambda} \cdot d\lambda \cdot \int_0^{\infty} \upsilon_{\lambda} \cdot r_{Э\lambda} \cdot d\lambda}, \quad (6)$$

$$E_{ПЗС1} = (K_{ПЭ})^{-1} \cdot E_{ПЗС}, \quad (7)$$

где $r_{T\lambda}$ - спектр источника света с цветовой температурой, при которой определялась интегральная чувствительность ПЗС-матрицы. В рассматриваемом случае принимаем $r_{T\lambda} = r_{A\lambda}$; где $r_{Э\lambda}$ - спектр излучения экрана ЭОП; $S_{ПЗС\lambda}$ - спектральная чувствительность ПЗС-матрицы.

6. Рассчитывается чувствительность НУ СЗОЭС E_c как функция чувствительности ПЗС-матрицы $E_{ПЗС}$, с учетом спектральных характеристик ПЗС-матрицы, фотокатода и люминесцентного экрана ЭОП.

$$E_c = \frac{\pi^2 \cdot \Gamma_{ЭО}^2 \cdot E_{ПЗС}}{\tau_{СПИ} \cdot \Omega_{СПИ} \cdot \rho \cdot \Omega_{ОБ} \cdot \tau_{Ф} \cdot \tau_{ОБ} \cdot \eta \cdot K_{П} \cdot K_{ПЭ}}, \quad (8)$$

где $$\tau_{Ф} \cdot \tau_{ОБ} = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{Ф\lambda} \cdot \tau_{ОБ\lambda} \cdot \varphi_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot d\lambda}. \qquad (9)$$

Формулу (9) можно рассматривать как обобщенное выражение чувствительности НУ СЗОЭС, при условии, что $\tau_{Ф}$ – это коэффициент пропускания цветоделительного блока СЗОЭС. Параметры в формуле (8) выбираются исходя из конструктивных соображений. Некоторые их значения приведены в диссертации в таблицах и графиках, другие указаны в технических характеристиках на ЭОП, ПЗС-камеру и т.д.

Как следует из обзора, проведенного в главе 1, конструкции и параметры компонентов НУ СЗОЭС (фильтров, ЭОП, ГМП, ПЗС-камер) могут существенно отличаться друг от друга. Поэтому, провести сравнительный анализ различных вариантов их построения в общем виде не представляется возможным. В связи с этим, оценка чувствительности конкретных схем построения НУ СЗОЭС по приведенной методике проведена с использованием численных методов.

В диссертационной работе рассмотрены и проанализированы следующие варианты схем построения НУ СЗОЭС.

- Низкоуровневая цветная телевизионная камера (НУ ЦТВК) параллельного типа.

Анализ работы НУ ЦТВК, содержащей три параллельных канала передачи информации на базе ЭОП 2^{+}-поколения, проведенный с учетом особенностей многощелочного фотокатода, спектральных характеристик пропускания объектива и R, G, B светофильтров показал, что чувствительность такой камеры составляет E_c = 8,2·10^{-3} лк и ограничена «синим» каналом передачи информации. Существенно увеличить ее чувствительность можно, если перейти к ЭОП 3-го поколения с фотокатодом на основе GaAs-CsO, используя при этом фильтры со смещением основных цветов вправо по оси λ.

Другим способом увеличения чувствительности является переход к «псевдо-цветным» системам, использующим смешение двух

монохроматических цветов – красного и зеленого. Такая камера содержит два канала передачи информации на базе ЭОП 3-го поколения и обладает чувствительностью $E_c = 8{,}6 \cdot 10^{-5}$ лк.

- Низкоуровневая цветная телевизионная система (НУ ЦТВС) на базе «псевдо-цветного» бинокля, состоящего из двух ГМП с разными спектральными характеристиками фотокатодов.

Проведенный в работе анализ показал, что в отсутствии светофильтров благодаря использованию фотокатодов KSbCs и GaAs-CsO, можно обеспечить работу наблюдателя в широком диапазоне ЕНО вплоть до $E_c = 4 \cdot 10^{-5}$ лк.

- Низкоуровневая цветная телевизионная система на базе «псевдо-цветного» бинокля с фильтрами и ЭОП с ПЗС-матрицей.

Анализ работы такой системы привел к значениям чувствительности $E_c = 5{,}6 \cdot 10^{-5}$ лк, что обеспечивается благодаря использованию ПЗС-матрицы, установленной в вакуумном объеме ЭОП, и снижению шумов за счет исключения микроканальной пластины (МКП) из системы.

- Низкоуровневая цветная телевизионная камера последовательного типа.

Чувствительность НУ ЦТВК последовательного типа также как и чувствительность НУ ЦТВК параллельного типа ограничена «синим» каналом передачи информации. При этом она обладает более высокой разрешающей способностью благодаря использованию в оптическом канале только одного ЭОП 2^+-поколения.

Еще одной важнейшей характеристикой НУ СЗОЭС является ее разрешающая способность. Методика определения разрешающей способности НУ СЗОЭС заключается в последовательном выполнении следующих этапов:

1. Определяется разрешающая способность ЭОП, рассчитываемая исходя из значений разрешающей способности каждого его элемента. Она может быть представлена в виде:

$$\frac{1}{N_{ЭОП}^2} = \frac{1}{N_1^2} + \frac{1}{N_2^2} + \cdots + \frac{1}{N_m^2} \quad , \qquad (10)$$

где N_m – разрешающая способность элемента ЭОП (например, фотокатода,

ОЭС, МКП, экрана); *m* – число элементов, составляющих ЭОП.

2. Определяется разрешающая способность ПЗС-камеры $N_{ПЗС}$, в зависимости от ее характеристик.
3. Производится оценка разрешающей способности отдельного канала НУ СЗОЭС (R, G или B), с использованием выражения:

$$N_k = [L\cdot (\Gamma_{ЭО}\cdot\Gamma_{СПИ})^{-1}]\cdot[(2\cdot N_{ЭОП})^{-1}+L\cdot(N_{ПЗС}\cdot\Gamma_{ЭО}\cdot\Gamma_{СПИ})^{-1}]^{-1}, \qquad (11)$$

где N_k – разрешающая способность канала R, G или B;

L – размер растра ПЗС-матрицы в выбранном направлении, мм;

$\Gamma_{ЭО}$ - электронно-оптическое увеличение ЭОП;

$\Gamma_{СПИ}$ – линейное увеличение СПИ;

$N_{ЭОП}$ – разрешающая способность ЭОП, п.л./мм;

$N_{ПЗС}$ - разрешающая способность ПЗС-камеры, твл.

В выражении (11) не учитывается разрешающая способность оптических элементов (входного объектива и системы переноса изображения (СПИ)), поскольку обычно она превышает значения разрешающей способности остальных элементов ГМП и не приводит к ограничению N_k.

4. Производится оценка разрешающей способности НУ СЗОЭС в целом:

$$\frac{1}{N^2}=\frac{1}{N_R^2}+\frac{1}{N_G^2}+\frac{1}{N_B^2},$$

где N_R, N_G, N_B – разрешающие способности «красного», «зеленого» и «синего» каналов соответственно.

По приведенной методике проводилась оценка разрешающей способности НУ СЗОЭС различных схем построения.

Для сравнения различных типов НУ СЗОЭС была задана целевая функция, представляющая собой отношение чувствительности к разрешающей способности. Чем меньше значение этой функции, тем эффективнее система в соответствии с заданным критерием качества.

В таблице 1 приведены результаты расчета целевой функции для приведенных выше схем построения НУ СЗОЭС.

Таблица 1

№ п/п	Наименование НУ СЗОЭС	Значение чувстви-тельности E, лк	Значение разрешающей способности N, твл	Значение целевой функции E/N, лк/твл
1	НУ ЦТВК параллельного типа (3 канала)	$8{,}2\cdot10^{-3}$	225	$3{,}64\cdot10^{-5}$
2	НУ ЦТВК параллельного типа (2 канала)	$8{,}6\cdot10^{-5}$	298	$2{,}89\cdot10^{-7}$
3	НУ ЦТВС на базе «псевдо-цветного» бинокля, состоящего из двух ГМП с различными спектральными характеристиками фотокатодов	$4\cdot10^{-5}$	275	$1{,}45\cdot10^{-7}$
4	НУ ЦТВС на базе «псевдо-цветного» бинокля с фильтрами и ЭОП с ПЗС-матрицей	$5{,}6\cdot10^{-5}$	277	$2{,}02\cdot10^{-7}$
5	НУ ЦТВК последовательного типа	$8{,}2\cdot10^{-3}$	390	$2{,}10\cdot10^{-5}$

В третьей главе сформулированы основные требования, предъявляемые к оптическим системам НУ СЗОЭС видимого и КВИК диапазонов.

К ним относятся:

– обеспечение высокой светосилы входных ОС (не менее 1:1,5), что связано, во-первых, с работой НУ СЗОЭС в условиях низкой освещенности и, во-вторых, с потерями, вносимыми линзами и спектроделительными элементами. Наличие в составе НУ СЗОЭС светосильной оптики позволяет обеспечить в оптико-электронных трактах спектральных каналов высокие уровни отношения сигнал/шум и, тем самым увеличить дальность обнаружения и распознавания целей;

– обеспечение заданного качества работы объективов НУ СЗОЭС в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,7 мкм.

При этом разрешающая способность объективов должна быть выше разрешающей способности фотоприемных устройств соответствующих спектральных каналов. В диссертации рассмотрены особенности выбора и оценки их параметров, представлены результаты расчета линзовых, зеркально-линзовых объективов и малогабаритных высококачественных СПИ.

Одной из проблем, возникающих в процессе разработки объективов для НУ СЗОЭС, является задача их ахроматизации в достаточно широком спектральном диапазоне. Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволили выявить комбинацию оптических материалов ТК16, ОФ4 и флюорит, обеспечивающую весьма совершенную апохроматическую коррекцию объективов в диапазоне длин волн от 0,42 до 1,7 мкм. На основе этих материалов был рассчитан линзовый объектив для НУ СЗОЭС.

Для уменьшения аберраций высших порядков в этом объективе линзы, выполненные из ТК16, разделены на три, а из ОФ4 – на два компонента. Объектив при высокой светосиле (1:1,5) обладает весьма малыми остаточными аберрациями в широком спектральном диапазоне (0,4 ÷ 1,7 мкм).

В процессе выполнения работы была также проведена оценка коррекционных характеристик зеркально-линзового объектива построенного по схеме Е.И. Гагенторн. Как показал анализ, расширение рабочего спектрального диапазона с сохранением достаточно высокого качества изображения возможно путём применения в объективе комбинации стёкол ТК16, ОФ4, ФК14.

Незначительная модификация схемы за счёт введения дополнительного контрзеркала позволила уменьшить центральное экранирование до величины 0,46. Кроме того, в результате проведенных исследований установлено, что в объективе с данной схемой построения возможно увеличение (при сохранении качества изображения) относительного отверстия до значения 1:0,9.

Для НУ СЗОЭС на основе ГМП был рассчитан светосильный линзовый объектив для диапазона длин волн 0,48–0,8 мкм.

Еще одним типов оптических систем являются СПИ. Применение в цветных НУ СЗОЭС на основе ЭОП репродукционных объективов в качестве

СПИ имеет такие преимущества как, - относительная простота изготовления, возможность изменения масштаба и введения в конструкцию переключаемых зеркал, а также более высокое по сравнению с СПИ на основе волоконно-оптических пластин пространственное разрешение. Однако их применение в составе ГМП связано с увеличением габаритов и возрастанием энергетических потерь. При достаточно жестких требованиях к оптическим характеристикам, линзовые СПИ со сферическими рабочими поверхностями компонентов обычно состоят из восьми и более линз.

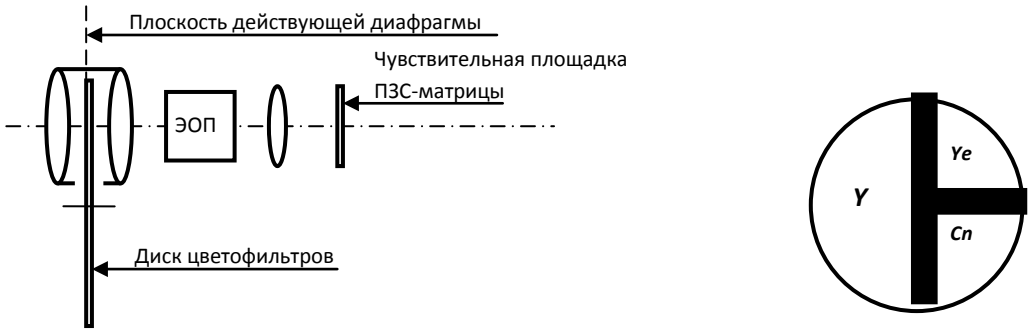
Существенно снизить (примерно в три-четыре раза) величины числовых апертур СПИ, позволяет использование в составе ГМП ПЗС-камер с повышенной чувствительностью (например, Watec-902H). Это упрощает конструкцию системы, которая может быть выполнена из 4-5 линз.

В этой главе также приводится методика геометрического совмещения изображений, формируемых камерами видимого и КВИК-диапазонов.

В четвертой главе подробно рассмотрены варианты построения низкоуровневых цветных телевизионных систем и представлены результаты экспериментальных исследований КВИК-камер. Резюмируя результаты, полученные в данной диссертационной работе и в работах других авторов необходимо отметить, что НУ ЦТВК параллельного типа, выполненные на основе ГМП, предъявляют весьма жесткие требования к идентичности параметров, используемых в них ЭОП и, как следствие, к точности совмещения цветоделенных изображений.

В связи с этим в работе были предложены 2 варианта схем построения НУ ЦТВК на основе ГМП, в которых эти проблемы в значительной степени упрощаются.

Первый вариант - НУ ЦТВК последовательного типа, в которой вращающийся фильтр выделяет излучения, дополнительные к излучениям основных цветов (B и R) и излучение (Y) в диапазоне от 0,4 до 0,68 мкм, несущее информацию о яркостном телевизионном сигнале (рис. 2).



а) б)

Рис.2. Схема НУ ЦТВК последовательного типа (а) и цветовой фильтр (б)

Показано, что чувствительность этого варианта НУ ЦТВК последовательного типа в 1,5 ÷ 2 раза выше чувствительности традиционной системы, использующей вращающиеся RGB-диски. Недостатком системы является наличие подвижных механических элементов, в частности, вращающегося цветоделительного фильтра.

Второй вариант - НУ ЦТВК на основе ГМП мозаичного типа с элетронно-возбуждаемой ПЗС-матрицей (рис. 3). На него получен патент РФ 2308116, МПК 7 H01J 31/56. «Электронно-оптический преобразователь и способ получения видеоизображения».

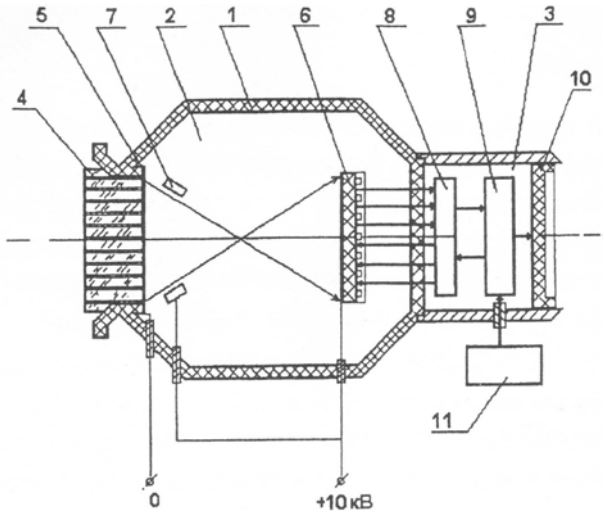


Рис. 3. Структурная схема цветного ГМП мозаичного типа:

1 – корпус; 2 – вакуумированная часть корпуса; 3 – невакуумированная часть корпуса; 4 – ВОП; 5 – электрические выводы фотокатода; 6 – черно-белая ПЗС-матрица; 7 – система фокусировки электронов 8 – блок формирования первичного видеосигнала; 9 – блок обработки видеосигнала; 10 – микродисплей; 11 – пульт управления.

В предлагаемой схеме построения НУ ЦТВК применена не цветная, а черно-белая ПЗС-матрица, обращенная утонченной до 10-15 мкм подложкой к входному окну ГМП и расположенная внутри вакуумированной части корпуса ЭОП. Для обеспечения работы НУ ЦТВК в штатном режиме, после изготовления системы проводят ее однократную цветовую калибровку, последовательно освещая входное окно ГМП RGB излучениями и запоминая координаты электронных изображений элементарных цветных светофильтров на подложке ПЗС-матрицы.

Предложенный вариант позволяет значительно снизить требования к точности поперечной юстировки электронно-возбуждаемой ПЗС-матрицы по отношению к элементам мозаичного RGB фильтра и, тем самым, существенно упростить технологию производства цветных НУ ГМП.

Кроме того, наличие в составе ГМП одной электронно-оптической системы позволяет в значительной степени устранить проблемы, связанные с рассовмещением цветоделенных изображений.

В этой главе также представлены результаты экспериментальных исследований КВИК-камеры (табл. 2) диапазона 0,9 ÷ 1,7 мкм. Продемонстрирована высокая эффективность ее работы на протяженных трассах при наличии в атмосфере пыли, дымов, аэрозольных частиц и других поглощающих и рассеивающих излучение мелкодисперсных элементов.

Таблица 2

Наблюдение через дымку и туман	
Видимый диапазон	КВИК диапазон

Продолжение табл. 2

Наблюдение через дымку и туман	
Видимый диапазон	КВИК диапазон
Наблюдение узоров камуфляжа на объекте	
Видимый диапазон	КВИК диапазон

<u>В приложении</u> приводятся расчеты оптических систем, выполненные с использованием программы Zemax.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований и разработок, проведенных в диссертации, получены следующие основные результаты:

1. Предложена обобщенная структурная схема НУ СЗОЭС, которая является основой для проведения начального этапа проектирования вновь создаваемых ОЭС диапазона 0,4 ÷ 1,7 мкм. Она позволяет проводить:

– синтез схем построения вновь создаваемых систем диапазона 0,4÷1,7 мкм;
– выбор наиболее рациональных типов преобразователей «излучение-сигнал»;
– выбор исходных данных для расчета параметров оптических систем;
– формирование исходных данных для разработки алгоритма функционирования спектроделительной системы;
– выбор исходных данных для разработки алгоритма геометрического совмещения изображений, формируемых цветным ПНВ и КВИК-камерой (при переходе из видимого в КВИК диапазон).

2. Разработанные методы расчета и выбора параметров НУ СЗОЭС видимого и КВИК диапазонов, позволяют проводить сравнительный анализ различных вариантов вновь проектируемых НУ наблюдательных систем, отбирая среди них наиболее рациональные схемы построения без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.
3. В результате проведенных исследований разработаны:
   – методики оценки чувствительности и разрешающей способности преобразователей «излучение-сигнал», используемых в НУ СЗОЭС;
   – метод совмещения изображений, формируемых рабочими спектральными каналами НУ СЗОЭС;
   – методика выбора и оценки параметров оптических систем, используемых в НУ СЗОЭС диапазона 0,4 ÷ 1,7 мкм;
   – способ получения цветного изображения с помощью ГМП мозаичного типа в условиях низкой освещенности.
4. Проведенные экспериментальные исследования технических характеристик наблюдательных систем на основе камер КВИК-диапазона выявили высокую эффективность их работы на протяженных трассах при наличии в атмосфере пыли, дымов, аэрозольных частиц и других поглощающих и рассеивающих излучение мелкодисперсных элементов. Это позволяет сделать вывод о том, что объединение в одной системе НУ цветных ПНВ и КВИК-камер приводит к существенному повышению

эффективности выделения полезных сигналов на фоне естественных и искусственных помех.

5. Предложенные в настоящей диссертационной работе методы расчета и выбора параметров НУ СЗОЭС видимого и коротковолнового ИК диапазонов позволяют с требуемой точностью оценивать характеристики их основных компонентов и определять качество работы этих систем в различных ситуациях.
6. Предложенные методики использованы в практике производства ряда современных цветных ПНВ, на что получены соответствующие акты о внедрении.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, вошедших в перечень ВАК РФ

1. Яроцкая Е.А. Методы расчета и выбора основных параметров низкоуровневых спектрозональных оптико-электронных систем видимого и коротковолнового ИК диапазонов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.-2010.-№4(68).-С. 117.

Другие издания

2. Яроцкая Е.А., Илюхин В.А. Способы построения устройств последовательного типа для получения цветного изображения в условиях низкой освещенности. // В сб. трудов IV Международной конференции «Прикладная оптика», С.-Пб.: 2004.
3. Колосов М.П., Костикова Н.Ю., Яроцкая Е.А. Оценка чувствительности низкоуровневой телевизионной камеры. // В сб. трудов VI Международной конференции «Прикладная оптика», т. 1(2). С.-Пб.: 2004.-С.319-323.
4. Яроцкая Е.А. Анализ путей построения спектральных низкоуровневых систем наблюдения. // В сб. трудов 59-й юбилейной конференции студентов и аспирантов. МИИГАиК, секция «Приборостроение», М., 2004.

5. Яроцкая Е.А. Метрологическая установка для оценки характеристик цветной низкоуровневой системы наблюдения. // В сб. материалов 7-ой Международной конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание - 2005».-Курск:2005
6. Яроцкая Е.А., Розвал Я.Б. Одноканальная цветная телевизионная камера. // В сб. «оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений», вып.2.-М.: ЦНИИ «Циклон»; 2007. – С.207-211.
7. Яроцкая Е.А., Демидов В.М. Цветной ЭОП с электронно-возбуждаемой ПЗС-матрицей. // В сб. трудов VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009», С.-Пб.:2009 -С.299.

Патенты

8. Тарасов В.В., Соснин Ф.С., Яроцкая Е.А, Демидов В.М. и др. Электронно-оптический преобразователь и способ получения видеоизображения. Патент РФ № 2176855, МПК 7 H04N 5/228 от 10.10.07.