



*Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования.
Входит в перечень ВАК с 20.03.2023.
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке.
Лицензионный договор №727-11/2014.*

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»
Издается с 2019 года.

СОДЕРЖАНИЕ

В.М. Вахрушева, П.А. Носов, А.М. Хорохоров Спектральные оптико-электронные системы в приборах ПЦР диагностики	2
В.А. Бабкин, Д.С. Андреев, А.В. Игнатов, М.Н. Гулюкин, В.С. Белоусова Волоконная оптика. Диэлектрический слой – полипропилен. Механизм инициирования пропиленена в присутствии аквакомплекса хлорида алюминия в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1 на квантовом уровне	13
Нога А.Р., Тимашова Л.Н. Синтез двухспектральной видеокамеры на основе зеркального телеобъектива	24
В.Я. Колючкин, Н.Е. Маренов Оценка погрешности оптико-электронной системы оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов	31
А.А. Аникьев, Д.С. Губанова Тепловизионный объектив с двумя угловыми полями зрения	41
Столяров А.В., Гладышева Я.В. Анализ особенностей извлечения фазы при расшифровке интерферограммы методом Фурье	53

Выходит 4 раза в год

Журнал печатается при поддержке руководителей организаций и предприятий оптической промышленности и учебных заведений.

Редакционный совет:

Абдулкадыров Магомед Абдуразакович
Архипов Сергей Алексеевич
Бажанов Юрий Владимирович
Бездидько Сергей Николаевич
Белов Михаил Леонидович
Кортаев Валерий Викторович
Лукин Анатолий Васильевич
Сеник Богдан Николаевич
Соколов Андрей Леонидович
Торшина Ирина Павловна

Редакционная коллегия:

Барышников Николай Васильевич – главный редактор
Иванов Сергей Евгеньевич
Ильянок Юлия Михайловна
Семенов Александр Павлович

Мнения, высказанные в материалах журнала, не обязательно совпадают с точкой зрения редакции.
Ответственность за содержание статей несут авторы.
При полной или частичной перепечатке ссылка на журнал «Контенант» обязательна.

Рукописи и фотографии не возвращаются.

Подписано в печать 28.06.2024
Статьи, подготовленные к изданию, передаются редакции электронного научно-технического журнала в издательство по электронной почте nukrlm@bmstu.ru для последующего размещения на сайте Диссертационного рецензируемого научно-технического журнала «Контенант» с последующей передачей по договору №727-11/2014 в Российский Индекс Научного Цитирования Научной Электронной Библиотеки.

Редакционная коллегия Диссертационного рецензируемого журнала «Контенант»

УДК 535.8

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ В ПРИБОРАХ ПЦР ДИАГНОСТИКИ

В.М. Вахрушева¹, П.А. Носов², А.М. Хорохоров²

¹ – ООО «СФБ Лаб», ² – МГТУ им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г.
Москва, 105005

E-mail: vmvakhrusheva@gmail.com

Аннотация: В работе представлены методы повышения точности и надежности приборов диагностики методом полимеразной цепной реакции (ПЦР). Описаны две предлагаемые схемы оптико-электронного блока прибора, в которых для возбуждения флуоресценции красителей применяется немонохроматический источник с широким спектром излучения, а выделение монохроматической составляющей осуществляется с помощью монохроматора и полихроматора. Это обеспечивает расширение их функциональных возможностей перед классическими схемами, использующими наборы светодиодов и интерференционных фильтров с присущими им недостатками.

Ключевые слова: полимеразная цепная реакция, флуоресценция, монохроматор, полихроматор.

SPECTRAL OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR PCR DIAGNOSTIC DEVICES

V.M. Vakhrusheva¹, P.A. Nosov², A.M. Khorokhorov²

¹ – LLC «SFB Lab», ² – Bauman Moscow State Technical University, 5 bld. 1,
2-nd Baumanskaya str., Moscow, Russia, 105005

E-mail: vmvakhrusheva@gmail.com

Abstract: The paper presents methods to improve the accuracy and reliability of diagnostic devices based on polymerase chain reaction (PCR). It describes two proposed designs for the optoelectronic component of the device, which utilize a non-monochromatic light source with a broad spectrum to excite fluorescence in dyes. The monochromatic component of the light is then selected using monochromators and polychromators, thereby extending the functionality of these devices beyond that of traditional systems based on sets of light-emitting diodes and interference filters, which have inherent limitations.

Keywords: polymerase chain reaction, fluorescence, monochromator, polychromator.

Введение

Одним из наиболее востребованных методов клинической диагностики на сегодняшний день является метод полимеразной цепной реакции (ПЦР) [1]. В основе данного метода лежит многократное увеличение (амплификация) количества определенных фрагментов дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) или рибонуклеиновой кислоты (РНК) в исследуемом материале при определенном циклическом изменении его температуры. В случае наличия в пробе фрагмента нуклеиновой кислоты возбудителя диагностируемого заболевания, происходит увеличение его концентрации до значения, достаточного для регистрации. Регистрация результатов ПЦР осуществляется с использованием ДНК-зондов – олигонуклеотидов, меченных флуоресцентными метками (красителями).

Основными достоинствами метода ПЦР являются высокая чувствительность и специфичность [2]. Метод позволяет определить наличие возбудителя инфекции при содержании в пробе всего нескольких молекул нуклеиновой кислоты, то есть диагностировать заболевания на ранних стадиях при отсутствии симптомов. Специфичность метода ПЦР обусловлена тем, что реакция происходит только в случае наличия в образце искомого фрагмента нуклеиновой кислоты, при этом на реакцию не оказывает влияния присутствие ДНК других микроорганизмов или ДНК пациента. Высокая автоматизация метода позволяет упростить и сократить время проведения диагностики. Результаты могут быть получены в течение нескольких часов, а в качестве пробы для ПЦР, помимо биологического материала пациента, могут быть использованы другие содержащие искомые фрагменты нуклеиновой кислоты материалы, такие как вода, почва и продукты питания.

Наиболее совершенным способом детектирования результатов ПЦР на сегодняшний день является гибридизационно-флуоресцентный с регистрацией продукта в режиме реального времени (Real-Time PCR, ПЦР-РВ) [3]. Для проведения ПЦР в режиме реального времени необходимо специальное устройство, отличительной особенностью которого является возможность возбуждать и детектировать сигнал флуоресценции, отражающий текущее количество копий искомых фрагментов ДНК на каждом цикле амплификации.

Устройство для детектирования результатов ПЦР-РВ представляет собой амплификатор ДНК, совмещенный с оптико-электронным блоком – измерителем флуоресценции, позволяющим производить измерения в реакционном объеме непосредственно в ходе ПЦР. Обобщенная схема детектирующего амплификатора приведена на рисунке 1 [4].

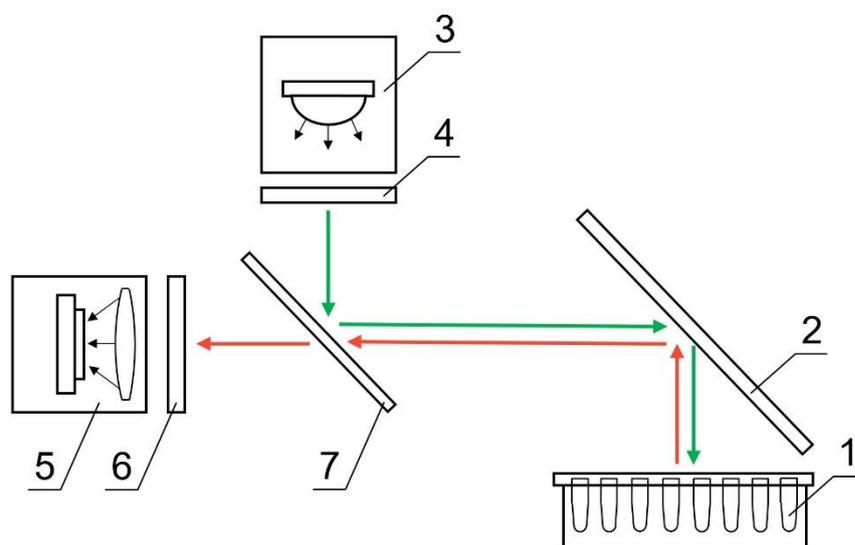


Рисунок 1 – Обобщенная схема детектирующего амплификатора. 1 – амплификатор с пробирками; 2 – зеркало; 3 – источник излучения возбуждения; 4 – светофильтр источника возбуждения; 5 – детектор излучения флуоресценции; 6 – светофильтр детектора; 7 – спектроделитель; зеленые линии – световой поток возбуждения; красные линии – световой поток флуоресценции

Пробирки 1 с образцами биоматериала установлены в амплификаторе, содержащем термоэлектрические модули, радиаторы и систему контроля температуры. Амплификатор обеспечивает определенный циклический температурный режим (нагрев, выдержка, охлаждение), при котором происходит интенсивное размножение фрагментов ДНК или РНК и, следовательно, усиливается флуоресцентное излучение красителей, возбуждаемое источником излучения оптико-электронного блока.

Свет от источника возбуждения 3 проходит светофильтр 4 и, отразившись от спектроделителя 7, освещает пробирки 1 с анализируемыми образцами. Излучение флуоресценции от образцов проходит спектроделитель 7, светофильтр 6 и регистрируется детектором флуоресценции 5.

Для разделения флуоресцентного излучения от возбуждающего в большинстве современных приборов ПЦР диагностики используются оптические

интерференционные фильтры. Первый фильтр устанавливается между источником возбуждения и пробиркой с реакционной смесью. Второй фильтр устанавливается между пробиркой и детектором. В его задачу входит подавления отраженного света возбуждения и максимальное использование флуоресцентного излучения.

В настоящее время для проведения ПЦР-РВ используют флуоресцентные красители со спектрами поглощения и флуоресценции во всем видимом диапазоне, а также в ближнем УФ и ИК диапазонах. При этом часто в пределах одного исследования приходится использовать несколько различных красителей, следовательно, опико-электронный блок прибора должен обеспечивать возможность проведения измерений сразу на нескольких длинах волн. Таким образом, к основным тенденциям развития приборов для проведения ПЦР относятся увеличение числа оптических каналов, позволяющих проводить ПЦР для большего количества различных целей, спектральная и пространственная мультиплексность, а также улучшение энергетических характеристик. Подавляющее большинство приборов ПЦР диагностики построены по рассмотренной обобщенной схеме с учетом указанных тенденций. Рассмотрим некоторые примеры.

В патенте RU 2548606 C2 [5] приведена система оптического мультиплексирования, позволяющая проводить ПЦР диагностику с применением до шести красителей. Для этого в системе предусмотрено шесть оптических блоков, которые пространственно разделены друг от друга. Каждый из оптических блоков построен в соответствии с классической схемой устройства для детекции результатов ПЦР и реализует один оптический канал. Смена каналов, т.е. длины волны излучения возбуждения и, соответственно, длины волны регистрируемого флуоресцентного излучения обеспечивается относительным перемещением оптических блоков вокруг неподвижного держателя образцов. Таким образом, данная система оптического мультиплексирования позволяет регистрировать несколько патогенов, присутствующих в одном образце, поскольку цветовое и пространственное мультиплексирование объединены. Однако при этом остается необходимость механического перемещения оптических блоков относительно образца.

Другая схема опико-электронного блока регистрации флуоресценции [6] представлена на рисунке 2. Источник света 5 выполнен в виде набора светодиодов, с установленными светофильтром и фокусирующей оптикой для каждого светодиода. Зеркалом 3 возбуждающее излучение светодиода направляется на пробирки с

образцами, а затем в обратном ходе лучей, вместе с флуоресцентным излучением образцов, фокусируется на приемник излучения 6. Перед приемником 6 устанавливается набор светофильтров 7, выделяющих излучение исследуемого материала. Смена длины волны регистрируемого излучения достигается одновременным перемещением светодиодов и интерференционных светофильтров 7 относительно приемника.

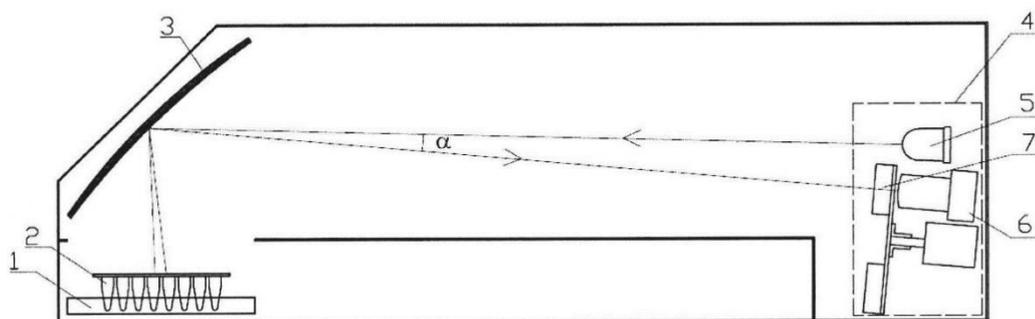


Рисунок 2 – Схема устройства для регистрации флуоресценции. 1 – адаптер для установки пробирок; 2 – пробирки, содержащие исследуемый материал; 3 – зеркало, 4 – блок освещения и регистрации; 5 – источник света; 6 – приемник излучения; 7 – набор светофильтров

Рассмотренные устройства для проведения ПЦР обладают тем недостатком, что в качестве источника возбуждения в них используется набор светодиодов. При этом в оптическом блоке прибора необходимо предусмотреть наличие интерференционных фильтров, временная деградация которых может приводить к погрешностям в работе прибора. Еще одним недостатком такого исполнения оптико-электронного блока является ограниченное число источников монохроматического излучения и жесткая привязка длин волн узкополосных фильтров к используемым светодиодам.

Целью статьи является изменение функциональной схемы оптико-электронного блока таким образом, чтобы, по возможности, исключить отмеченные недостатки. Так в качестве источника света предлагается использовать источник, обладающий широким спектром излучения, например, галогеновую лампу накаливания. Для выделения излучения возбуждения с требуемыми спектральными характеристиками вместо интерференционных фильтров предлагается использовать схемы спектральной селекции на основе диспергирующих элементов. Такие схемы обеспечивают возможность плавной перестройки длины волны и выбора требуемой спектральной

ширины излучения. Они также позволяют осуществить спектральную фильтрацию распространяющегося в обратном направлении излучения флуоресценции.

Схемы регистрации результатов ПЦР с призмным монохроматором и полихроматором

На рисунке 3 представлена предлагаемая схема устройства для регистрации результатов ПЦР [7]. В качестве источника возбуждения в ней используется немонохроматический источник света, обладающий широким спектром излучения, а выделение монохроматического излучения для возбуждения флуоресценции осуществляется монохроматором. Этот же монохроматор в обратном ходе лучей выделяет флуоресцентное излучение от образцов и направляет его на приемник излучения без использования каких-либо узкополосных фильтров.

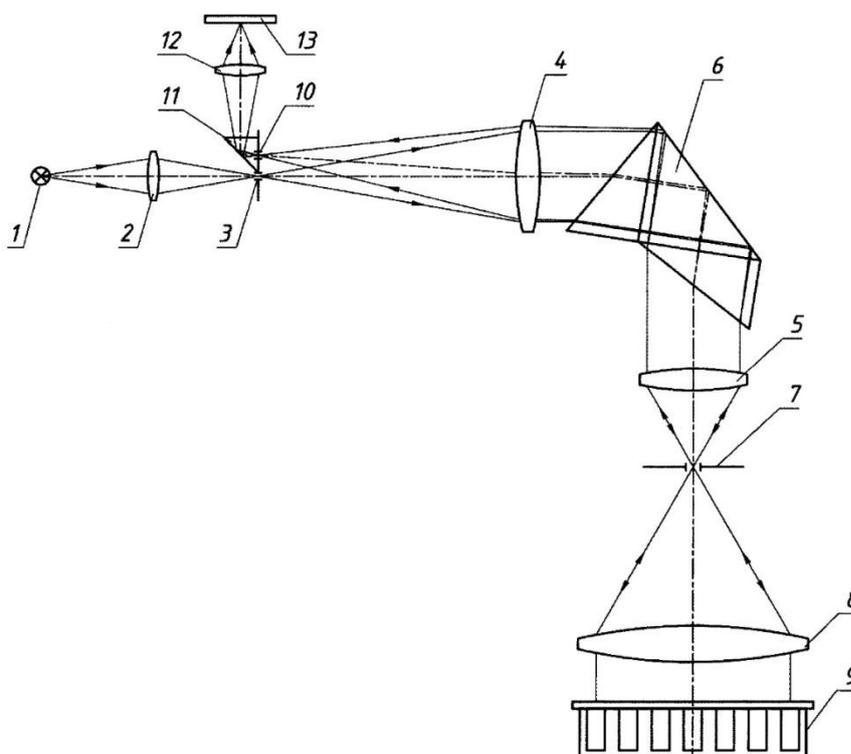


Рисунок 3 – Схема устройства регистрации результатов ПЦР с призмным монохроматором. 1 – источник излучения возбуждения; 2 – конденсор; 3 – входная щель монохроматора; 4, 5 – объективы монохроматора; 6 – диспергирующий элемент; 7 – выходная щель монохроматора; 8 – осветительный объектив; 9 – кювета с образцами; 10 – щель для выделения флуоресцентного излучения; 11 – призма; 12 – объектив приемника излучения; 13 – приемник излучения

Свет от источника излучения 1, например, от вольфрамовой галогеновой лампы, фокусируется конденсором 2 на входной щели 3 монохроматора. Монохроматор состоит из входного 4 и выходного 5 объективов, диспергирующего элемента 6. При расположении выходной щели 7 монохроматора в передней фокальной плоскости осветительного объектива 8 образцы в кювете 9 освещаются параллельным пучком монохроматического света. Флуоресцентное излучение образцов в автоколлимационном ходе возвращается объективом 8 в щель 7 и в обратном ходе лучей фокусируется в щель 10, находящуюся в плоскости входной щели 3 и отстоящей от нее на величину линейной дисперсии монохроматора, соответствующей разности длин волн возбуждающего и флуоресцентного излучений. Пройдя через призму 11, флуоресцентное излучение собирается объективом 12 на приемнике излучения 13.

В качестве диспергирующего элемента монохроматора можно использовать призму постоянного отклонения Аббе, вид которой показан на рисунке 4. Смена длины волны возбуждающего излучения осуществляется поворотом призмы. Спектр флуоресцентного излучения сдвинут относительно спектра возбуждающего света на 25-30 нм. в сторону больших длин волн. При использовании в призме Аббе боковых призм из стекла ТФ5 ($n_1 = 1,771$), при фокусном расстоянии объектива 4 – 350 мм. смещение щели 10 относительно щели 3 составит около четырех миллиметров, что обеспечивает надежную фильтрацию флуоресцентного излучения от возбуждающего. Если в качестве приемника излучения использовать матрицу, оптически сопряженную с плоскостью исследуемых образцов, то устройство дополнительно обеспечит возможность наблюдения, в том числе и визуального, динамики процесса размножения фрагментов ДНК или РНК для всех элементов массива пробирок.

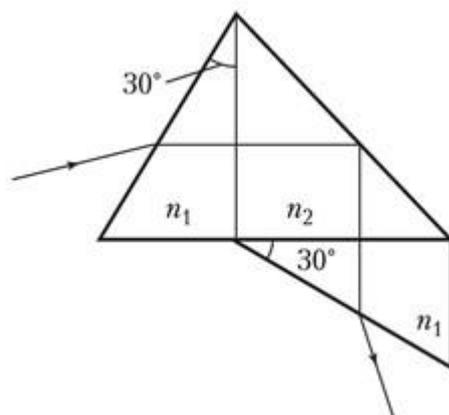


Рисунок 4 – Призма постоянного отклонения Аббе

Устройство отличается простотой. Оно без каких-либо изменений может использоваться для диагностики постоянно меняющихся разновидностей вирусов.

На рисунке 5 представлена схема устройства регистрации результатов ПЦР с полихроматором, построенным по схеме Иглы, в котором предусмотрена возможность одновременного воздействия на образцы любого числа произвольно выбранных спектральных излучений.

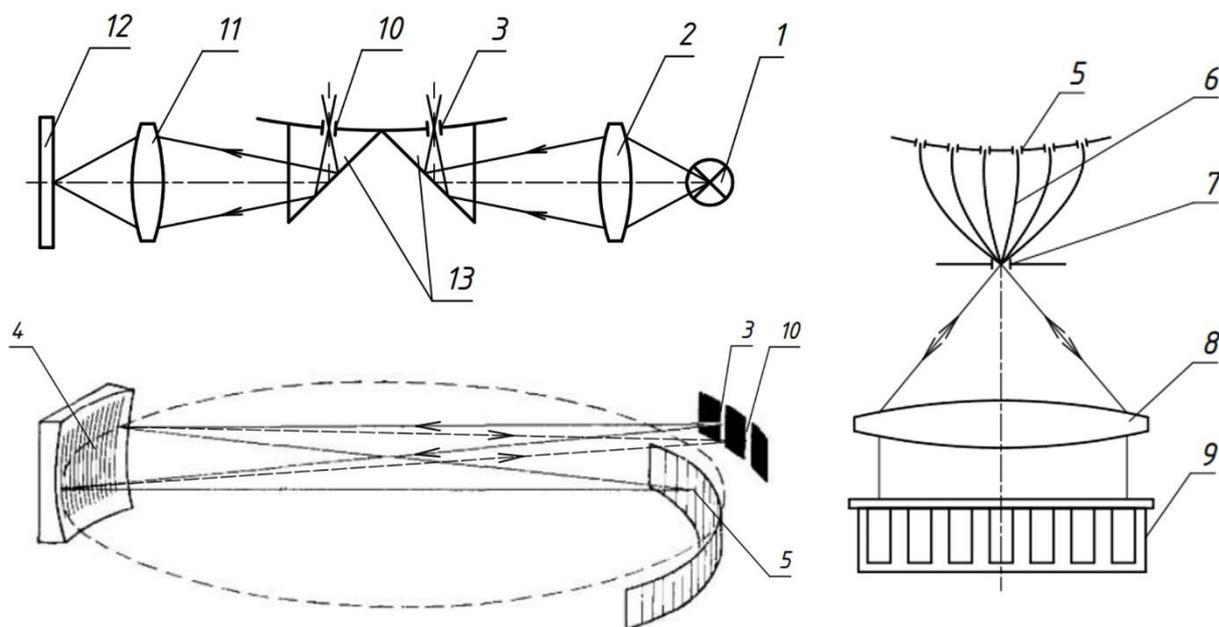


Рисунок 5 – Схема устройства регистрации результатов ПЦР с полихроматором, построенным по схеме Иглы. 1 – источник излучения, 2 – конденсор; 3 – входная щель полихроматора; 4 – вогнутая дифракционная решетка; 5 – выходная щель полихроматора; 6 – световоды; 7 – выходная щель полихроматора; 8 – осветительный объектив; 9 – кювета с образцами; 10 – щель для выделения флуоресцентного излучения; 11 – объектив приемника излучения; 12 – приемник излучения флуоресценции; 13 – призмы

Свет от источника излучения с широким спектром 1 фокусируется конденсором 2 на входной щели 3 полихроматора. Полихроматор построен по автоколлимационной схеме Иглы [8]. В качестве диспергирующего элемента полихроматор содержит вогнутую дифракционную решетку 4. Входная щель, дифракционная решетка и выходные щели 5 полихроматора размещены по кругу Роуланда – кругу, который лежит в плоскости перпендикулярной штрихам решетки и касается решетки в ее центре. Диаметр круга Роуланда равен радиусу кривизны решетки. В данной

модификации схемы входная щель располагается над плоскостью круга Роуланда, а спектр образуется по другую сторону от этой плоскости. К выходным щелям полихроматора подведены световоды 6, которые направляют излучение к щели 7, расположенной в передней фокальной плоскости осветительного объектива 8, таким образом, образцы в кювете 9 освещаются параллельным пучком света, спектр которого содержит монохроматические составляющие, соответствующие положениям щелей на круге Роуланда. Выходные щели полихроматора вместе со световодами могут перемещаться по кругу, таким образом, существует возможность выделять монохроматические составляющие, соответствующие максимумам поглощения используемых красителей. Далее флуоресцентное излучение образцов в автоколлимационном ходе возвращается объективом 8 в щель 7, пройдя световоды 6 и отразившись от дифракционной решетки 4, фокусируется в щель 10, находящуюся в плоскости входной щели 3 и отстоящей от нее на величину линейной дисперсии полихроматора. Величина дисперсии определяется разностью длин волн возбуждающего и флуоресцентного излучений. Далее флуоресцентное излучение собирается объективом 11, в плоскости изображения которого находится фоточувствительный слой приемника излучения 12. Включение и выключение оптических каналов может осуществляться, например, с помощью оптических аттенюаторов, действие которых основано на изменении оптических потерь в световодах или какими-либо механическими затворами электромагнитного типа.

Заключение

Предложенные функциональные схемы устройства регистрации результатов ПЦР диагностики обладают универсальностью, связанной с возможностью использования любых красителей со спектральными характеристиками, лежащими в пределах рабочих спектров устройств. Применение схем на основе монохроматора и полихроматора позволяет отказаться от использования узкополосных интерференционных фильтров для фильтрации излучений возбуждения и флуоресценции.

Схема на основе призмного монохроматора представляет собой оптический блок с последовательной сменой спектральных каналов. Дополнительными преимуществами схемы с полихроматором является возможность одновременной детекции флуоресцентных сигналов, отвечающих различным красителям, и отсутствие

необходимости перемещения элементов конструкции прибора в ходе ПЦР, что повышает надежность прибора, а также сопоставимость результатов, получаемых при использовании различных красителей, от эксперимента к эксперименту.

Область применения предлагаемых схем устройств ПЦР диагностики различна. Так, устройства, построенные по схеме с монохроматором, могут найти широкое применение в период пандемии при контроле массовости заболевания одной болезнью. Свободный выбор применяемых красителей обеспечит высокую специфичность исследования и позволит выявлять конкретное заболевание среди родственных инфекций, что особенно важно при диагностике вирусов, обладающих высокой антигенной изменчивостью. В свою очередь, устройства ПЦР диагностики на основе полихроматора позволят уменьшить время проведения исследований в периоды постоянного мониторинга эпидемиологической обстановки.

Литература

1. Маллис К.Б., Эрлих Г.А., Арнхейм Н., Хорн Г.Т., Сайки Р.К., Шарф С.Дж. «Процесс амплификации, детекции и/или клонирования последовательностей нуклеиновых кислот». Патент США № 4,683,195. 1987 г., 28 июля
2. Гладин Д.П., Королюк А.М. Дробот И.В. Козлова Н.С. Анненкова И.Д. Полимеразная цепная реакция в микробиологии // Российские биомедицинские исследования. 2021. Т. 6. № 3. С. 36-46
3. Хейд К.А., Стивенс Дж., Ливак К.Дж., Уильямс П.М. Количественная ПЦР в реальном времени. // Genome Res. 1996. № 6(10):986-94. doi: 10.1101/gr.6.10.986
4. Ребриков Д.В., Саматов Г.А., Трофимов Д.Ю., Семёнов П.А., Савилова А.М., Кофиади И.А., Абрамов Д.Д. ПЦР «в реальном времени»; под ред. д.б.н. Д.В. Ребрикова; предисл. Л.А. Остермана и акад. РАН и РАСХН Е.Д. Свердловца; 2-е изд., испр. и доп. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – С. 223
5. Патент № 2548606 Российская Федерация, МПК G01N 35/02 (2006.01), G01N 21/25 (2006.01). Оптическая система регистрации для мониторинга реакции ПЦР-РВ : № 2011146151/28 : заявл. 09.04.2010 : опубл. 20.04.2015 / Колисниченко А., Де Врисс Й.Е., Верслегерс Й.К.М., Де Йонг М., Хаддеман Т., Страуккен Л.; Биокартис НВ. 22 с. : ил. // Yandex.ru : патенты. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2548606C2_20150420
6. Патент № 177415 Российская Федерация, МПК G01N 21/00 (2006.01), G01J 1/58 (2006.01). Устройство для регистрации люминесценции : № 2017126960 : заявл.

26.07.2017 : опубл. 21.02.2018 / Чубаков В.П., Чубаков П.А., Краснов А.А.; ФГБУ н-ки ИАиЭ СО РАН, АО «Вектор-Бест». 7 с. : ил. // Yandex.ru : патенты. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU177415U1_20180221

7. Патент № 2774888 Российская Федерация, МПК G01N 21/64 (2006.01), C12Q 1/00 (2006.01). Устройство регистрации результатов ПЦР с монохроматором : № 2021111435 : заявл. 22.04.2021 : опубл. 24.06.2021 / Вахрушева В.М., Хорохоров А.М. 9 с. : ил. // Yandex.ru : патенты.

URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2774888C1_20220624

8. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972. С. 357.

**ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЛОЙ - ПОЛИПРОПИЛЕН.
МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПРОПИЛЕНА В ПРИСУТСТВИИ
АКВАКОМПЛЕКСА ХЛОРИДА АЛЮМИНИЯ В ГЕПТАНЕ
СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА 1:1:1:1 НА КВАНТОВОМ УРОВНЕ**

В.А. Бабкин¹, Д.С. Андреев¹, А.В. Игнатов¹,
М.Н. Гулюкин², В.С. Белоусова³

¹ – Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21

² – АО «Лыткаринский завод оптического стекла», 140080, Московская обл., г. Лыткарино, ул. Парковая, д. 1

³ – Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, 119991, ул. Трубецкая, 8, корпус 2

E-mail: babkin_v.a@mail.ru

Аннотация: В настоящей работе теоретическим квантовохимическим методом *ab initio* RHF изучен механизм инициирования пропилена в присутствии катализатора хлорид алюминия – вода в растворителе гептане стехиометрического состава 1:1:1:1. Получено значение энергии активации и теплового эффекта этой реакции. Эти данные могут быть полезными для дальнейших исследований в области катионной полимеризации, а также могут быть использованы при разработке новых технологических процессов полипропилена с заданными физико-химическими свойствами, которые необходимы для волоконной оптики.

Ключевые слова: пропилен, метод *ab initio* RHF 3.21G, реакция инициирования, хлорид алюминия – вода, энергия активации, тепловой эффект, растворитель, гептан.

FIBER OPTICS. POLYPROPYLENE DIELECTRIC LAYER. THE MECHANISM OF PROPYLENE INITIATION IN THE PRESENCE OF AN ALUMINUM CHLORIDE AQUACOMPLEX IN HEPTANE WITH A STOICHIOMETRIC COMPOSITION OF 1:1:1:1 AT THE QUANTUM LEVEL

Babkin V.A.¹, Andreev D.S.¹, Ignatov A.V.¹,
Gulyukin M.N.², Belousova V.S.³

¹ – Sebryakovsky branch of Volgograd State Technical University, 403343, Volgograd region, Mikhaylovka, Michurina str., 21

² – Lytkarinsky Optical Glass Factory, 140080, Moscow region, Lytkarino, Parkovaya str., 1

³ – I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, 119991, Trubetskaya str., 8, building 2

E-mail: babkin_v.a@mail.ru

Abstract: In this work, the mechanism of propylene initiation in the presence of an aluminum chloride – water catalyst in a heptane solvent of stoichiometric composition 1:1:1:1 was studied using a theoretical quantum chemical method *ab initio* RHF. The activation energy and thermal effect of this reaction were obtained. These data can be useful for further research in the field of cationic polymerization, and can also be used in the development of new technological processes for polypropylene with specified physicochemical properties characteristic of fiber optics.

Keywords: propylene, *ab initio* RHF 3.21G method, initiation reaction, aluminum chloride – water, activation energy, thermal effect, solvent, heptane.

Введение

Полипропилен (ПП) является прочным и жестким термопластичным полимером, получаемым из мономерного пропилена. Полипропилен имеет химическую формулу $(C_3H_6)_n$ и относится к семейству полиолефинов [1]. Основными классическими характеристиками полипропилена являются теплостойкость, плотность и диэлектрическая проницаемость. Теплостойкость находится в диапазоне температур - 20 °С – + 70 °С; при -20 °С полипропилен начинает трескаться, а при + 70°С – начинает размягчаться. Плотность полипропилена, которая является прочностной характеристикой полипропилена, равняется 0,92-0,93 г/см², а диэлектрическая

проницаемость находится в диапазоне 2,2-2,4 [2]. Для того, чтобы полипропилен был более привлекателен для использования в оптоволоконной оптике и получения его с заданными свойствами, очевидно, необходимо расширить диапазон его теплостойкости, увеличить параметры плотности.

Полипропилен широко используется в различных областях, включая строительство, производство потребительской продукции, оптоволокно и медицину. В медицинской сфере ПП применяется для создания различных медицинских изделий благодаря своей высокой химической стойкости и устойчивости к бактериальному воздействию.

На рынке представлены два основных типа полипропилена: гомополимеры и сополимеры. Гомополимерный полипропилен является наиболее распространенным и используется в широком спектре применений. Соплимеры полипропилена находят применение в различных отраслях, включая автомобильную промышленность, производство бытовой техники и упаковки. Помимо основных типов полипропилена, существуют также модифицированные варианты этого полимера, которые обладают улучшенными свойствами для конкретных приложений. Например, добавление стекловолокна или других усилителей может повысить прочность и жесткость полипропилена, делая его идеальным для использования в автомобильной промышленности. Также существуют модифицированные полипропиленовые материалы с повышенной устойчивостью к ультрафиолетовому излучению, что делает их подходящими для применения в открытом пространстве. Поэтому полипропилен является важным и универсальным полимером, который находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Его прочность, жесткость, химическая стойкость и низкая стоимость делают его предпочтительным выбором для многих производителей и потребителей пластмассовых изделий [3].

ПП также обладает хорошей термической стабильностью и устойчивостью к воздействию влаги и химических веществ. Это делает его надежным и долговечным материалом для использования в оптоволоконных кабелях, которые могут быть подвержены экстремальным условиям эксплуатации. Благодаря своим диэлектрическим свойствам, пропилен обеспечивает эффективную и надежную передачу оптических сигналов, что делает его неотъемлемой частью современных телекоммуникационных и сетевых систем.

Как диэлектрик, пропилен обладает рядом важных диэлектрических свойств, которые делают его ценным материалом в оптоволоконной промышленности. Пропилен обладает высокой электрической прочностью, выдерживая высокие напряжения, что особенно важно в оптоволоконной промышленности, где сигналы передаются на большие расстояния и могут сталкиваться с различными электрическими помехами. Благодаря своей высокой электрической прочности, пропилен обеспечивает надежную изоляцию и минимизирует потери сигнала. Как диэлектрик, он также обладает высокой электрической изоляцией, что позволяет эффективно передавать оптические сигналы без помех и потерь. Кроме того, пропилен обладает низкой диэлектрической потерей, что означает, что он практически не поглощает энергию от электрического поля. Это позволяет оптоволоконным кабелям, изготовленным из пропилена, эффективно передавать сигналы на большие расстояния без значительных потерь. Низкие диэлектрические потери пропилена также способствуют повышению пропускной способности оптического волокна и улучшению качества передачи данных [4].

Применение пропилена в волоконной оптике открывает новые возможности для развития передовых технологий и методов лечения. В связи со спецификой его применения в волоконной оптике он должен обладать уникальными свойствами. Поэтому качество полипропилена в данном случае имеет огромное значение. Для того, чтобы получать полипропилен с заданными физико-химическими свойствами и параметрами, необходимо этим процессом получения полипропилена – полимеризацией – управлять. Такая возможность в процессе производства полипропилена существует и заключается в управлении реакцией полимеризации путём варьирования лигандного окружения кислоты Льюиса и Бренстеда, которые входят в состав комплексных катализаторов этого процесса, так как полимеризация является процессом каталитическим. Меняя природу кислоты Льюиса ($\text{AlCl}_2\text{R}_{3-n}$, $\text{BF}_2\text{R}_{3-n}$, $\text{MgCl}_2\text{R}_{2-n}$ и др.) и Бренстеда (протонатора H_2O , HCl , HF , ROH), а также природу растворителя (гептан, толуол различного стехиометрического состава с катализатором), например, 1 (AlCl_3) : 1 (H_2O) : 1 (C_3H_6) : 1 (гептан), можно получать полипропилен с заранее заданными свойствами [5, 6]. Для этого нужно знать механизмы полимеризации (в частности, катионной) – инициирование, рост, обрыв. Из вышесказанного ясно, что управлять процессом полимеризации лучше на стадии инициирования, меняя природу кислоты Льюиса и Бренстеда. Кроме того,

несомненный интерес представляет внедрение в практику новых, более эффективных каталитических систем. В связи с этим, изучение механизма инициирования пропилена в присутствии различных катализаторов и, в частности, $\text{AlCl}_3\text{-H}_2\text{O}$ в гептане на квантовом уровне является актуальным, так как параллельно с изучением механизма мы получаем важную информацию о энергии активации и тепловом эффекте реакции, что нужно знать при разработке новых технологических процессов полипропилена с новыми, уникальными свойствами, направленными на улучшение физикохимических свойств полипропилена, применяемого в волоконной оптике. Кроме того, несомненный интерес представляет внедрение в практику новых, более эффективных каталитических систем катионной полимеризации пропилена, так как в рамках известных катализаторов пропилен трудно полимеризуем по катионному механизму.

В связи с этим, целью настоящей работы является расчёт на электронном уровне механизма инициирования пропилена в присутствии катализатора $\text{AlCl}_3\text{-H}_2\text{O}$ в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1 теоретическим квантовохимическим методом *ab initio* Restricted Hartree-Fock (ограниченный метод Хартри-Фока, RHF) в базисе 3-21g и оценка значения активационного барьера (E_A) и теплового эффекта (Q).

Методическая часть

Для исследования механизма первой стадии катионной полимеризации системы $\text{AlCl}_3\text{-H}_2\text{O}$ – пропилен – гептан стехиометрического состава 1:1:1:1 был выбран классический квантовохимический метод *ab initio* RHF в базисе 3-21G, который используется для расчета электронной структуры молекул. Метод RHF является наиболее распространенным методом *ab initio*, поскольку он относительно прост в реализации и даёт достаточно точные результаты [7-9]. Базисный набор метода – 3-21g состоит из трех функций Гаусса для каждого атомного ядра и одной функции Гаусса для каждого электрона в молекуле. Метод *ab initio* RHF 3-21g используется для расчета различных свойств молекул, в частности, таких как геометрия молекул и энергетика реакции. Для расчёта использовалась программа Firefly [10], основанная на исходном коде PC GAMESS [11]. Для изучаемой методом RHF модели использовались следующие исходные данные: количество атомов в модели, обозначение химического элемента из таблицы Менделеева, приблизительное геометрическое строение модели, общий заряд молекулярной системы (в нашем случае суммарный заряд системы = 0), мультиплетность $M = 2S+1$ (S - суммарный спин, который в данном случае равен 0,

поскольку все электроны спарены), тип оболочек – закрытые. Расчёт выполнялся в основном состоянии молекулярной системы. Основными выходными данными для метода RHF являлись: оптимизированное геометрическое и электронное строение, общая энергия системы на каждом шаге, общая электронная энергия системы на каждом шаге, дипольный момент, порядки валентных связей, матрица энергий молекулярных орбиталей.

Моделирование молекулы производилось в программе MacMolPlt [12] по методике, ранее применённой в работах [13-17]. Методика состоит в следующем. Чтобы начать моделирование, нужно иметь предварительно оптимизированную модель пропилена. Мы располагаем около неё катализатор. Далее на некотором расстоянии (около 3 ангстрем) размещаем молекулу гептана. После чего мы производим поиск оптимального геометрического строения. Далее, до тех пор, пока расстояние по координате реакции не достигнет 1.1 ангстрем, осуществляем уменьшение расстояние по координате реакции на 0.1 ангстрем и, после каждого такого уменьшения, выполняем поиск нового оптимального геометрического строения. Как только минимальное расстояние достигнуто, то моделирование считается завершённым (см. рисунок 1).

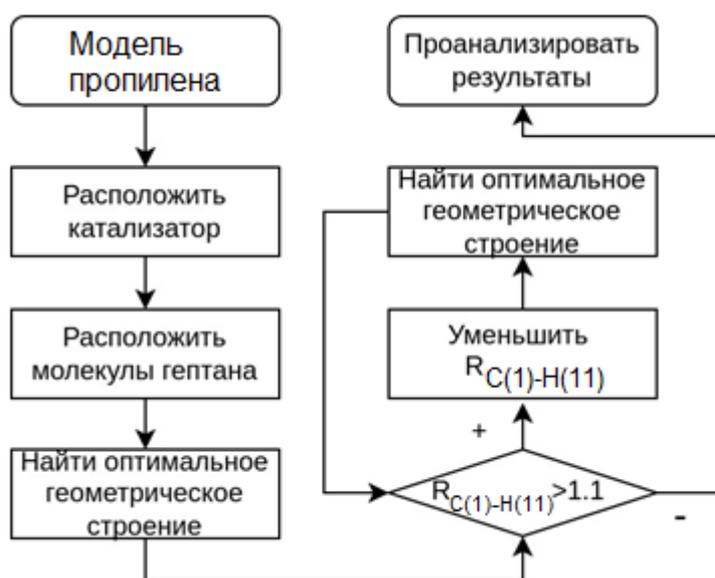


Рисунок 1 – Блок-схема квантовохимического моделирования механизма инициирования катионной полимеризации системы $\text{AlCl}_3\text{-H}_2\text{O}$ – пропилен – гептан стехиометрического состава 1:1:1:1

В качестве координаты реакции нами была выбрана связь $R_{C(1)-H(11)}$. Важно отметить, что на каждом шаге взаимодействия катализатора и пропилена выполнялся закон сохранения заряда.

Результаты расчетов

Результаты расчетов позволяют нам получить более подробное представление о механизме иницирования катионной полимеризации пропилена в присутствии катализатора $AlCl_3-H_2O$ в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1. На рис. 2 представлена исходная модель. Конечная структура после взаимодействия катализатора с мономером показана на рисунке 3. Изменение общей энергии системы вдоль выбранных координат реакции представлено на рисунке 4. Изменение зарядов на атомах моделей показано на рисунке 5.

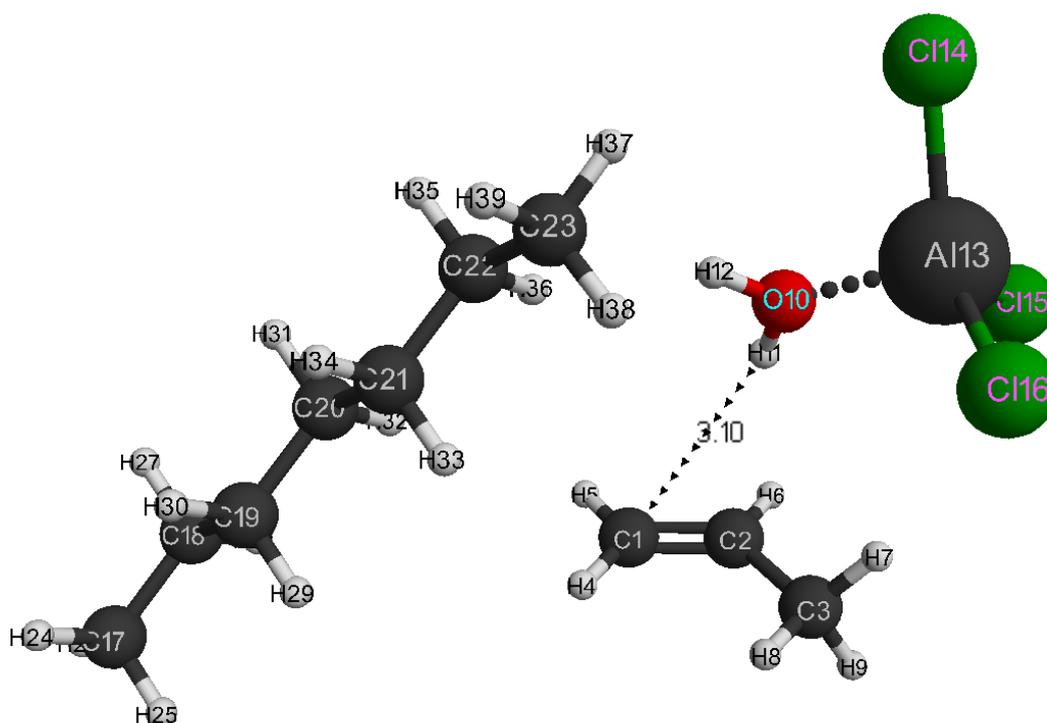


Рисунок 2 – Структура исходной модели в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1

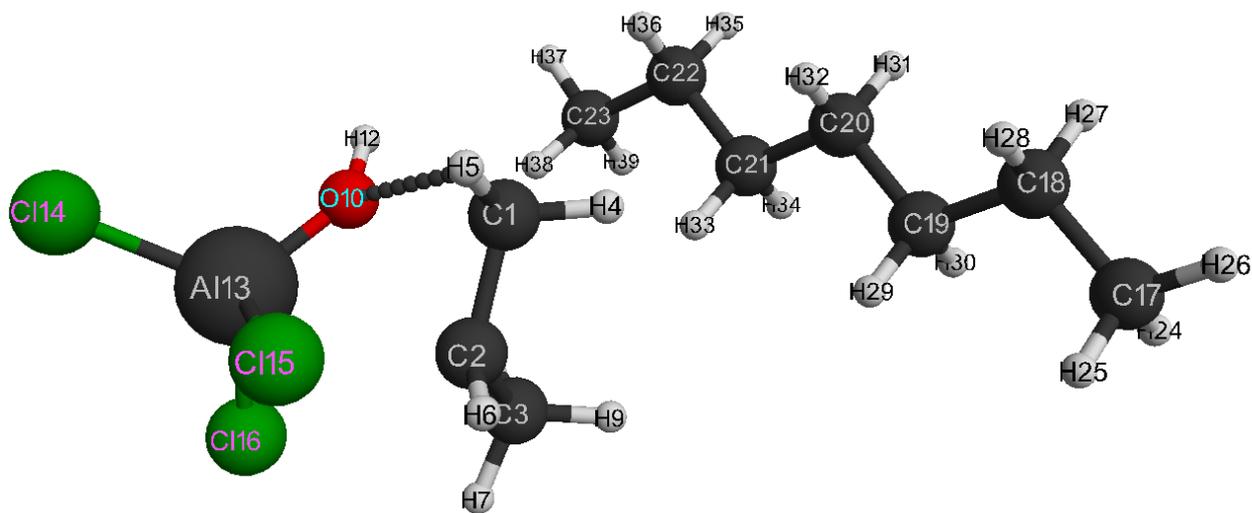


Рисунок 3 – Конечная структура взаимодействия

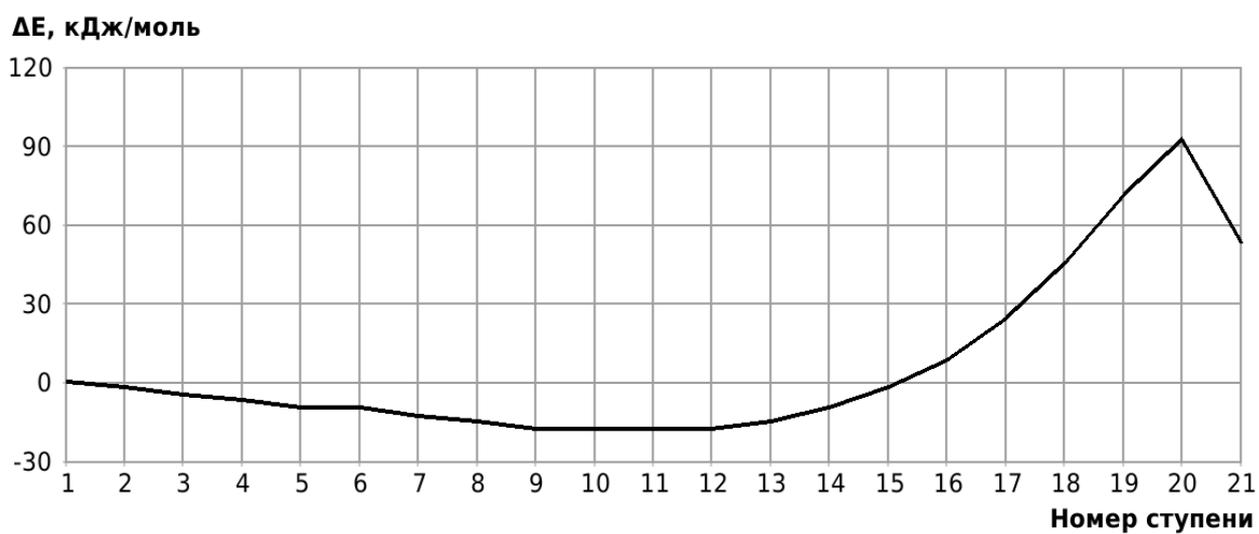


Рисунок 4 – Изменение общей энергии (ΔE) вдоль направления реакции (I)

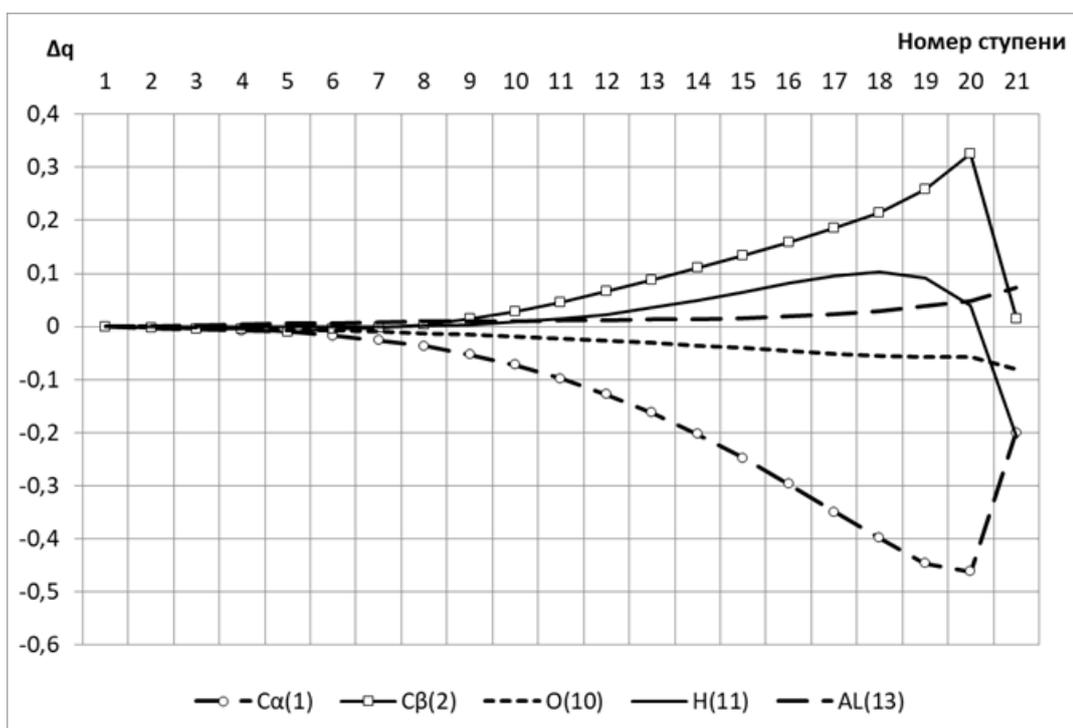


Рисунок 5 – Изменение зарядов вдоль координаты реакции на атомах, непосредственно участвующих в реакции ($C_{\alpha}(1)$, $C_{\beta}(2)$, $O(10)$, $H(11)$, $Al(13)$)

В процессе реакции происходит одновременный разрыв связей $O(10)-H(11)$ и превращение двойной $C(1)=C(2)$ связи в одинарную и формирование новой связи – $C(1)-H(11)$ и противоиона $[AlCl_3 - OH]^-$ (см. рис. 3). Энергетический барьер реакции равен 110 кДж/моль, а энтальпия равна 71 кДж/моль. Реакция носит эндотермический характер.

Заключение

Таким образом, нами была изучена стадия иницирования катионной полимеризации пропилена под действием комплексного катализатора $AlCl_3 - H_2O$ в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1. Получена электронная структура образовавшегося активного центра. Рассчитаны значения E_A и Q этой реакции. Установлено, что реакция эндотермична и носит черты согласованных взаимодействий. Полученные данные квантовохимических расчётов ($E_A = 110$ кДж/моль и $Q = 71$ кДж/моль) могут быть полезными для дальнейших исследований в области катионной полимеризации и создания квантовой теории электрофильных процессов, а также для поиска новых, более эффективных (селективных, экологически чистых и т.п.) катализаторов для получения полипропилена с заданными физико-химическими свойствами, которые необходимы для волоконной оптики.

Литература

1. Karger-Kocsis J. Polypropylene. An A-Z reference. // Great Britain: Kluwer Academic Publishers, - 1999. - 987 p.
2. Полипропилен [Электронный ресурс]: Материал из Википедии — свободной энциклопедии / — Википедия, свободная энциклопедия. — 2023. — URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=33092&oldid=134505539> (дата обращения: 19.03.2024). — Текст: электронный.
3. Гарифуллина А. Р., Гарипов Р. Р., Репина Е. М., Бамбуркина В. А. Полипропилен. его свойства и сфера применения // Аллея науки. — 2020. — Т. 2, № 12(51). — с. 145-148.
4. Сырье для производства оптоволоконного кабеля: основные компоненты : сайт / — Promenter.ru. — 2022. — URL: <https://promenter.ru/elektrika/syre-dlya-proizvodstva-optovolokonnoego-kabelya-osnovnye-komponenty> (дата обращения: 27.09.2023). — Текст: электронный.
5. Кеннеди Дж. Катионная полимеризация олефинов // М.: Мир, — 1978. — 431 с.
6. Бабкин В.А., Заиков Г.Е., Минскер К.С. Квантовохимические аспекты катионной полимеризации олефинов // Уфа: Гилем, — 1996. — 188 с.
7. Ермаков А.И. Квантовая механика и квантовая химия. // М.: Юрайт, - 2016. — 555 с.
8. Цирельсон, В.Г. Квантовая химия. Молекулы, молекулярные системы и твердые тела. // М.: Бином, —2010. — 422 с.
9. Froese Fischer, C. General Hartree-Fock program // Computer Physics Communications, 1987. — Vol. 43 (3). — pp. 355–365.
10. Firefly version 8: сайт / А.А. Granovsky // — Firefly computational chemistry program. — 2013. — URL: <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html> (дата обращения: 18.09.2023). — Текст: электронный.
11. Schmidt M. W., Baldrige K. K., Boatz J. A., Elbert S. T., Gordon M. S., Jensen J. H., Koseki S., Matsunaga N., Nguyen K. A., Su S. J., Windus T. L., Dupuis M., Montgomery J. A. General Atomic and Molecular Electronic Structure System. // Journal of Computational Chemistry. —1993. —Vol.14. — pp.1347-1363.
12. Bode B.M., Gordon M.S. MacMolPlt: A Graphical User Interface for GAMESS // Journal of Molecular Graphics. —1998. —№16. — pp. 133-138.

13. Babkin V. A. Quantum-chemical research of the interaction mechanism of the complex catalyst chloride aluminium – hydrochloric acid and p-methylstyrene in toluene by the ab initio method. / V. A. Babkin, D. S. Andreev, A. V. Ignatov, V. S. Belousova [and others] // Oxidation Communications. - 2020. - Vol. 43, № 2. - pp. 171-176.
14. Babkin, V. A. Quantum Chemical Calculation Of Initiation Mechanism Of Cationic Polymerisation Of Propylene With Chloride–Aluminium Aquacomplex / V. A. Babkin, D. S. Andreev, A. V. Ignatov, V. S. Belousova, V. T. Fomichev, M.I. Artsis, G. E. Zaikov // Oxidation Communications. - 2020. - Vol. 43, № 1. - pp. 24-29.
15. Babkin, V. A. Quantum Chemical Study Of Initiation Mechanism Of Cationic Polymerisation Of Isobutylene With Chloride–Aluminum Aqua Complex / V. A. Babkin, D. S. Andreev, A. V. Ignatov, I. I. Bakhholdin, A. P. Knyazev, V. S. Belousova, V. T. Fomichev, M. I. Artsis, G. E. Zaikov // Oxidation Communications. - 2019. - Vol. 42, № 4. - pp. 437-442.
16. Бабкин В. А. Энергия активации и тепловой эффект реакции иницирования катионной полимеризации изобутилена в присутствии комплексного катализатора фторид бора – вода в гептане / В. А. Бабкин, Д. С. Андреев, А. В. Игнатов, Е. С. Титова, А. И. Рахимов, Н. А. Шрейберт // Фторные заметки. -2022. - Выпуск № 2(141), март - апрель 2022. - с.3-4.
17. Бабкин, В.А. Волоконная оптика. Диэлектрический слой – полиэтилен. Механизм иницирования этилена в присутствии аквакомплекса хлорида алюминия в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1 на квантовом уровне / В.А. Бабкин, Д.С. Андреев, А.В. Игнатов, М.Н. Гулюкин, В.С. Белоусова // Электронный научно-технический журнал "Контенант". – 2023. – Т. 5. – №2. – с.9-17.

СИНТЕЗ ДВУХСПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНОГО ТЕЛЕОБЪЕКТИВА

Нога А.Р., Тимашова Л.Н.

Аннотация: Статья посвящена актуальной проблеме – проектированию двухспектрозональной видеокамеры, регистрирующей изображение в ближнем и дальнем ИК диапазонах. Предложено синтезировать оптическую схему на базе зеркального телеобъектива, позволяющего разместить видеокамеры разных спектральных диапазонов на одной оптической оси. Приведена методика расчета параметров оптической системы на основе геометрических параметров пространства объектов и матричных приемников излучения. Получение одноракурсных видео и ИК изображений позволяет с высокой точностью осуществлять привязку координат нагретых объектов к координатам объектов ближнего ИК диапазона.

Ключевые слова: двухспектрозональная камера, SWIR камера, LWIR камера, система Кассегрена, дихроичное покрытие, оптическая система, совмещение оптических осей.

SYNTHESIS OF A DUAL-SPECTROZONAL VIDEO CAMERA BASED ON A MIRROR TELEPHOTO LENS

Noga A.R., Tymashova L.N.

Abstract: The article is devoted to the actual problem of designing a multispectral video camera that registers images in SWIR and LWIR simultaneously. It is proposed to synthesize an optical scheme based on a mirror system that allows to place video cameras of different spectral ranges on one optical axis. The methodology for calculating the parameters of the optical system based on the geometric parameters of the object space and matrix radiation receivers is given. Obtaining single-view video and infrared images allows to link the coordinates of heated objects to the coordinates of near-infrared objects with high accuracy.

Keywords: dual spectrum camera, SWIR camera, LWIR camera, Cassegrain system, dichroic coating, optical system, optical axis alignment.

Введение

В настоящее время широкое распространение получают мультиспектральные оптико-электронные системы, работающие в нескольких спектральных диапазонах. Работа в нескольких спектральных диапазонах обеспечивает широкие возможности приборов специального назначения, для которых важнейшими задачами является круглосуточность и всепогодность наблюдения объекта. Большинство оптико-электронных приборов этого класса обычно состоят из нескольких отдельных видеокамер с различными спектральными диапазонами. Недостаток ОЭС с раздельными видеокамерами заключается в том, что при наложении изображений возникает параллакс, приводящий к погрешности определения координат объектов в разных камерах.

Поэтому актуальной проблемой является создание мультиспектральной видеокамеры с совмещенными оптическими осями объективов разных спектральных диапазонов.

Эта проблема решается за счет применения зеркального телеобъектива.

Зеркальный телеобъектив построен на основе системы Кассегрена, главное зеркало которого имеет асферическую поверхность, а малое зеркало представляет из себя линзу с дихроичным покрытием, отражающим дальний ИК диапазон и пропускающим ближний ИК диапазон. Использование зеркала со светоделительным покрытием позволяет установить фокусирующий объектив для ближнего ИК диапазона перед полупрозрачным зеркалом, и тем самым совместить оптические оси каналов.

В результате комплексирования изображений от разных камер формируется изображение в двух спектральных диапазонах: нагретый малоразмерный объект на фоне холодных объектов.

Канал дальнего ИК диапазона содержит зеркальный объектив, корректирующий 3-линзовый компонент и МПИ дальнего ИК диапазона. Излучение от объекта фокусируется главным зеркалом на малое зеркало, где отражается передней поверхностью с нанесенным светоделительным покрытием и фокусируется на МПИ.

Канал ближнего ИК диапазона содержит главное зеркало, малое полупрозрачное зеркало со светоделительным слоем, нанесенным переднюю поверхность, корректирующий 3-х линзовый компонент и МПИ ближнего ИК диапазона. Излучение

от объекта отражается главным зеркалом на малое зеркало, которое пропускает излучение на МПИ.

Разработанная двухспектральная ВК предназначена для наблюдения пространства объектов в угловом поле 2.8 градусов в режиме распознавания при дальности объектов до 1 км. Наблюдаемыми объектами является техника – автомобили, грузовики и т.п

На рисунке 1 приведена функциональная схема двухспектральной ВК содержащей зеркальный объектив, каналы ближнего и дальнего ИК диапазонов и два матричных приемника излучения.

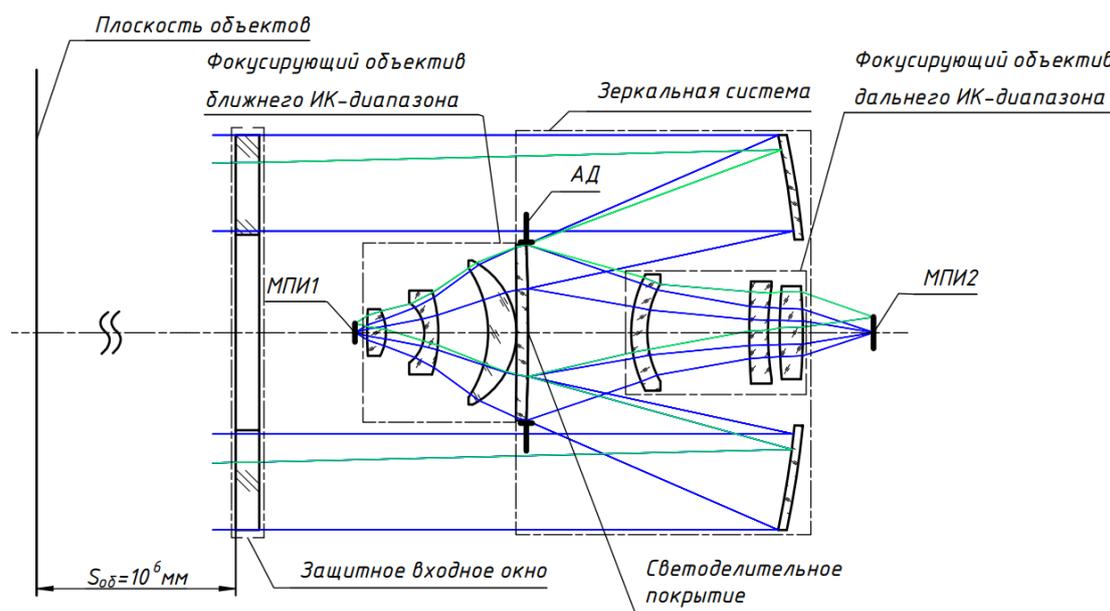


Рисунок 1 – Функциональная схема двухспектральной ВК

Исходными данными при проектировании являются геометрические параметры пространства объектов и МПИ.

Параметры пространства объектов:

- спектральный диапазон излучения $\Delta\lambda_{OB}$;
- угловое поле $2W$;
- размеры объектов $a_{OB} \times b_{OB}$;
- дальность объектов s_{OB} .

Параметры МПИ:

- размеры матрицы $a_M \times b_M$;
- диагональ матрицы d_M ;
- размеры элемента $a_{Э} \times b_{Э}$;

- пространственная частота элементов $\nu_M=1/2a_{\text{Э}}$.

Параметры объектива:

- фокусное расстояние $f'=d_M/2W$;

- максимальная пространственная частота изображения $\nu'_{\text{МАКС}}=\nu_M=1/2a_{\text{Э}}$;

- относительное отверстие $A=D/f'$;

$$A > 2\lambda_{\text{МАКС}} \cdot \nu'_{\text{МАКС}} = 2\lambda_{\text{МАКС}} \cdot \nu'_{\text{МАКС}} = \lambda_{\text{МАКС}}/a_{\text{Э}};$$

- диаметр входного зрачка $D=A \cdot f' = d_M \cdot \lambda_{\text{МАКС}}/(2W \cdot a_{\text{Э}})$;

- увеличение $\beta=f'/s_{\text{ОБ}}$.

Оптическая система каждого канала содержит зеркальный телеобъектив (ТО) и корректирующий компонент, обеспечивающий требуемую разрешающую способность.

Система работает в режиме распознавания в двух спектральных диапазонах.

В режиме распознавания система формирует на матрице изображение, содержащее не менее 22 элементов (критерий Джонсона)

$$N_{\text{Э}} = a_{\text{ОБ}}/a'_{\text{Э}} \geq 22.$$

Исходя из этого, определяется расстояние до объекта, при котором объект будет содержать требуемое количество элементов:

$$s_{\text{ОБ}} = f' \cdot a_{\text{ОБ}} / (N_{\text{Э}} \cdot a_{\text{Э}}).$$

На основе геометрических параметров объекта, МПИ и оптической системы разработана двухспектральная камера для ближнего и дальнего ИК-диапазонов с угловым полем $2W=2.8^\circ$.

Объектами для наблюдения является техника с размерами $a_{\text{ОБ}} \times b_{\text{ОБ}} = 5 \times 8 \text{ м}^2$.

Выбор спектральных диапазонов.

Спектральный диапазон 8 – 12 мкм выбирается для регистрации слабо нагретых объектов, к которым относятся, автомобили, грузовики и другая техника.

Для регистрации холодных объектов выбирается спектральный диапазон 0,9 – 1,7 мкм, так как этот диапазон намного эффективнее видимого диапазона из-за увеличенных коэффициентов отражения объектов.

МПИ ближнего ИК диапазона 0.9-1.7 мкм SONY IMX990:

- количество ФЧЭ $K \times L = 1280 \times 1024$;

- размер элемента; $a_{\text{Э}} = 5 \text{ мкм}$;

- размеры матрицы $a_{\text{М}} \times b_{\text{М}} = 6.4 \times 4.8 \text{ мм}$;

- период элементов матрицы (оптический): $T_{\text{М}} = 2a_{\text{Э}} = 10 \text{ мкм}$;

- оптическая частота матрицы $\nu_{\text{М}} = \frac{1}{T_{\text{М}}} = 100 \text{ мм}^{-1}$.

Параметры зеркального телеобъектива в ближнем ИК диапазоне:

- угловое поле $2\omega_1 = 2.8^\circ = \frac{\pi}{60} \approx 0,049$ рад;
- фокусное расстояние $f'_1 = \frac{d_M}{2\omega_1} = 160$ мм;
- относительное отверстие $A_1 > \frac{\lambda_{\text{МАКС}}}{a_3} = 1:2,94$;
- разрешающая способность в плоскости изображения $\nu' = 100$ мм⁻¹;
- увеличение объектива $\beta = \frac{f'}{s_{\text{ОБ}}} = 1,6 \cdot 10^{-4}$;
- размер изображения объекта $a'_{\text{ОБ}} = a_{\text{ОБ}} \cdot \beta = 0,8$ мм содержит 160 элементов матрицы.

Исходя из геометрических параметров объектива и МПИ канал ближнего ИК диапазона распознает изображение объекта на дальности до 8 км.

МПИ дальнего ИК диапазона 8-12 мкм АСТРОН-64017:

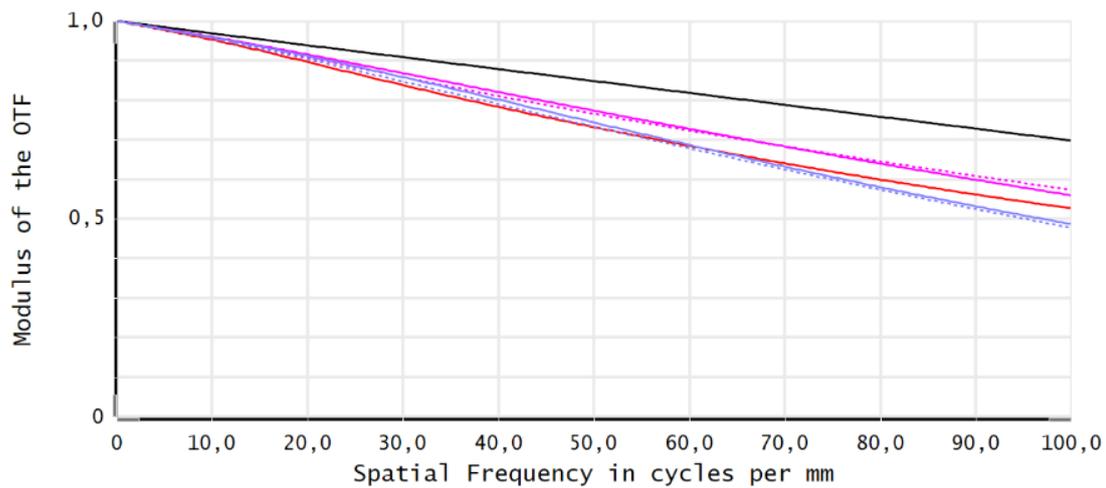
- количество элементов $K \times L = 640 \times 512$;
- размеры матрицы $a_M \times b_M = 10,9 \times 8,7$ мм;
- диагональ матрицы $d_M = 13,6$ мм;
- размер элемента $a_3 = 17$ мкм;
- оптическая частота элементов $\nu_M = \frac{1}{2a_3} = 30$ мм⁻¹.

Параметры зеркального телеобъектива в дальнем ИК:

- $2W=2.8^\circ; f' = 275$ мм; $A=1:1.5$;
- увеличение объектива $\beta = \frac{f'}{s_{\text{ОБ}}} = 2,75 \cdot 10^{-4}$;
- размер изображения объекта $a'_{\text{ОБ}} = a_{\text{ОБ}} \cdot \beta = 1,38$ мм = 80 элементов.

Дальность распознавания объектов канала дальнего ИК диапазона не превышает 3,5 км. При большей дальности режим работы ограничивается режимом обнаружением нагретого объекта.

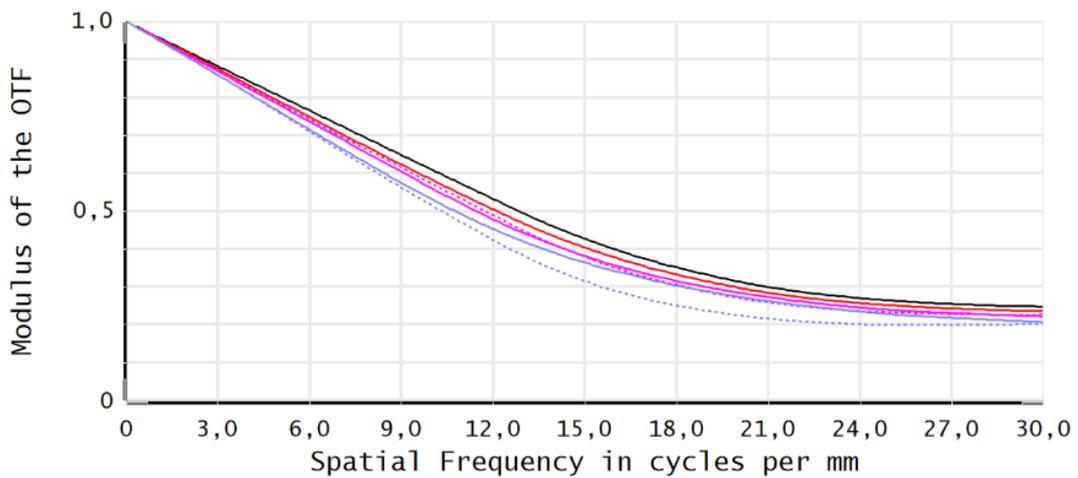
На рисунках 2, 3 показаны модуляционные передаточные функции двух каналов видеокамеры, из которых следует, что на частоте матриц коэффициент передачи модуляции близок к дифракционному и равен 0,5 на частоте 50 мм⁻¹ в ближнем ИК диапазоне и 0,2 на частоте 30 мм⁻¹ в дальнем ИК диапазоне.



<input checked="" type="checkbox"/> Diff. Limit-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> Diff. Limit-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential
<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential
<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Tangential
<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Tangential

Polychromatic Diffraction MTF	
08.04.2024 Data for 0,9000 to 1,7000 μm. Surface: Image	Multispectral12.zmx Configuration 1 of 2
Legend items refer to Field positions	

Рисунок 2 – МПФ канала ближнего ИК диапазона



<input checked="" type="checkbox"/> Diff. Limit-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> Diff. Limit-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential
<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 0,0000 (deg)-Tangential
<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,0000 (deg)-Tangential
<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Tangential	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Sagittal	<input checked="" type="checkbox"/> 1,4000 (deg)-Tangential

Polychromatic Diffraction MTF	
08.04.2024 Data for 8,0000 to 12,0000 μm. Surface: Image	Multispectral12.zmx Configuration 2 of 2
Legend items refer to Field positions	

Рисунок 3 – МПФ канала дальнего ИК диапазона

Заключение

Предложена методика проектирования двухспектральной видеокамеры, регистрирующей изображение в ближнем и дальнем ИК диапазонах. Камера работает в режиме распознавания объекта в угловом поле 2.8 градусов. Методика синтеза двухспектральной камеры основана на совмещении оптических осей двух каналов с помощью зеркальной системы Кассегрена, где малое зеркало имеет светоделительное покрытие. Это позволяет избавиться от параллакса изображений и повысить точность определения координат нагретых объектов относительно холодных объектов, а также минимизировать габариты видеокамеры.

Литература

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448с.
2. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.
3. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
4. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с
5. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982. 270с.

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ
ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ**

В.Я. Колучкин¹, Н.Е. Маренов²

МГТУ им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005

E-mail: ¹vkoluch@bmstu.ru, ²marenov@bmstu.ru

Аннотация: Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию оптико-электронной системы триангуляционного типа, предназначенной для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. Приведено описание принципа действия системы контроля, в которой для регистрации изображений используется линейная камера, и проведён анализ известных методик калибровки подобных систем. Изложена методика калибровки, в которой для уменьшения погрешности измерений применяются методы субпиксельного уточнения координат регистрируемых изображений полос структурированной подсветки. Произведена оценка погрешности системы при измерении дальности при различных положениях тест-объекта.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы, оптико-электронная система, структурированная подсветка, измерение, калибровка.

**ESTIMATION OF ERROR FOR THE SYSTEM FOR HIGH-SPEED
CORRUGATION MONITORING OF RAILS**

V.Ya. Koluchkin¹, N.E. Marenov²

Bauman Moscow State Technical University, 5 bld. 1, 2-nd Baumanskaya str., Moscow,
Russia, 105005

E-mail: ¹vkoluch@bmstu.ru, ²marenov@bmstu.ru

Abstract: This article is devoted to an experimental study of a triangulation-type optical-electronic system designed for high-speed corrugation monitoring of rails. A description of the optical-electronic system for high-speed corrugation monitoring of rails is given. Known methods for calibrating line cameras are investigated. The calibration method is described, in

which methods of subpixel refinement of the coordinates of recorded structured illumination images are used to reduce measurement errors. The error of the range measurement system was estimated for various positions of the test object.

Keywords: railway, optoelectronic system, structured light, measurement, calibration.

Введение

Развитие высокоскоростного движения поездов стимулирует совершенствование методов и средств контроля геометрических параметров железнодорожного пути. От состояния железнодорожного пути зависит бесперебойность и безопасность движения поездов, а также эффективность использования подвижного состава. Рельсовая колея железнодорожного пути непосредственно взаимодействует с подвижным составом и работает в сложных условиях динамических нагрузок, а также подвержена непредсказуемым воздействиям изменяющихся природных факторов. От ее технического состояния напрямую зависит безопасность движения поездов с установленными скоростями. При движении поезда в элементах верхнего строения пути возникают вибрации различной интенсивности. Причиной их являются неровности на поверхности катания колес и рельсов, зазоры между боковыми гранями головок рельсов и гребнями колес, расстройство болтовых соединений в стыках, неровности в зоне сварных стыков плетей, неправильное положение пути в плане и профиле. Динамическое воздействие подвижного состава возрастает при буксовании или юзе колес локомотивов и вагонов, а также при наличии на колесах дефектов в виде ползунов, наваров металла, раковин и др. Поэтому в составе оборудования путеизмерительных вагонов, которые в настоящее время используют для мониторинга верхнего строения железнодорожного полотна, требуется иметь средства для оперативного контроля прямолинейности рельсов.

На рисунке 1 представлена функциональная схема ОЭП для оперативного контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов, принцип действия которого основан на триангуляционном методе. В отличие от традиционных вариантов подобных приборов, в которых регистрация изображений структурированной подсветки осуществляется ТВ-камерой, в этой схеме используется камера линейного сканирования 2. Визирная ось этой камеры расположена под углом α относительно визирной оси проектора 1, который формирует набор полос вдоль оси

рельса. Положение изображений пятен, зарегистрированных в каждом кадре, содержит информацию о положении поверхности рельса вдоль визирной оси линейной камеры. Измерение относительного положения сечений поверхности рельса в вертикальном направлении осуществляется при движении ОЭП, который устанавливается на путеизмерительном вагоне. Так как линейные камеры обеспечивают регистрацию изображений с частотой до 50 кГц, то можно контролировать прямолинейность по сечениям, отстоящим на расстоянии 1 мм при скорости движения путеизмерительного вагона 180 км/ч.

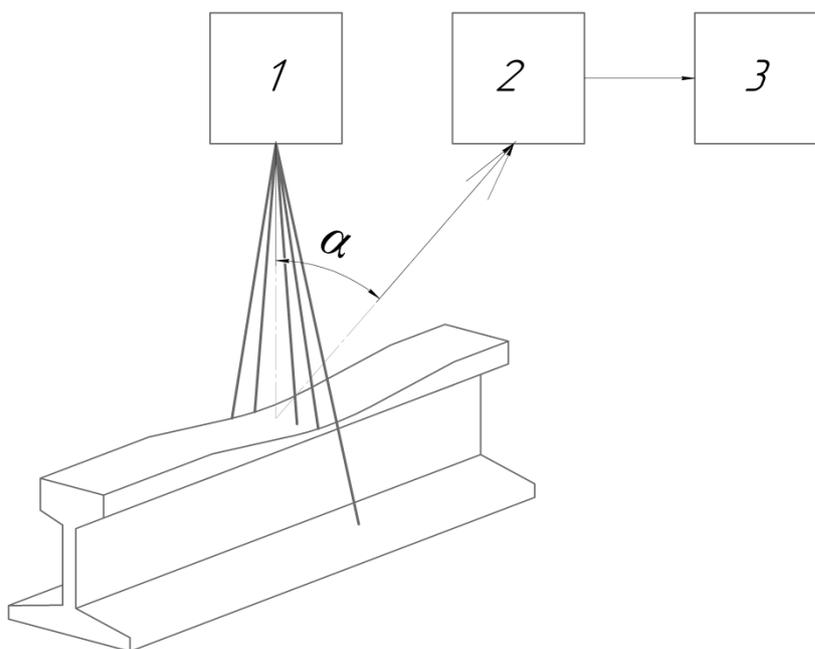


Рисунок 1 – Функциональная схема ОЭП для контроля прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов. 1 – проектор; 2 – линейная камера; 3 – ЭВМ

В статье [1] приведены результаты математического моделирования ОЭП, работающего на таком принципе, и показано, что при использовании алгоритмов обработки изображений структурированной подсветки с субпиксельным уточнением координат, пороговая чувствительность при измерении может составлять сотые доли миллиметров. Однако в этих исследованиях не учитывалась неопределённость значений конструктивных параметров системы контроля, которая также влияет на погрешность. Чтобы минимизировать погрешности измерений, обусловленных неопределённостью параметров схемы и её элементов, требуется производить калибровку прибора. Важным требованием для аппаратуры, которая используется в

реальных сложных условиях эксплуатации, является относительная простота и удобство методики калибровки.

Известны методики калибровки лазерных триангуляционных датчиков, используемых в различных областях контроля формы протяженных объектов, в том числе и железнодорожного пути [2]. Применение двумерного тест-объекта позволяет определить соотношение между значением измеряемой величины и координатой пятна на матрице без наличия информации о геометрических соотношениях внутри системы. В работе [3] показано, что за счёт калибровки системы с камерой линейного сканирования, имеющей размер пикселя 10 мкм, и объективом с фокусным расстоянием 16 мм при рабочем расстоянии 150 мм можно достичь погрешность измерения порядка 0,044 мм. Экспериментальные результаты работы [4] указывают на возможность получения с помощью этого метода погрешности измерения 0,026 мм. Такой результат был получен при использовании матричной камеры с размером пикселя 8 мкм, при фокусном расстоянии объектива 8 мм и рабочем расстоянием 500 мм.

Известны работы, в которых производится определение внутренних параметров системы для дальнейшего применения результатов в вычислениях [5 - 7]. В работе [8] для матричной камеры с размером пикселя 5,5 мкм для расстояния 2,5 м до тест-объекта в виде шахматной доски достигнута погрешность 0,546 мм.

В настоящей статье предлагается определять параметры системы по тест-объекту с известной топологией, который перемещается в рабочем диапазоне дальностей системы.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование погрешности системы оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов, которая откалибрована по предложенной методике.

Метод калибровки триангуляционной системы с линейной камерой

Методы калибровки линейных камер аналогичны методам, которые используются для систем с матричными камерами [9], когда используют тест-объекты с известной топологией. Это позволяет установить соответствие между координатами точек в пространствах предметов и изображений.

В работе [10] приведено описание метода калибровки линейной камеры, в котором тест-объект представляет собой две параллельные пластины, отстоящие друг

от друга на известном расстоянии, на которых нанесен паттерн с известной геометрией. В [11] калибровочный тест-объект представляет собой две взаимно перпендикулярные плоскости с узором в виде черных треугольников. В данной работе предлагается использовать аналогичный тест-объект, состоящий из двух ортогональных полуплоскостей. На каждой плоскости напечатано десять черных треугольников, что позволяет однозначно определить положение тест-объекта при его перемещениях.

Известно [12], что для линейных камер связь между координатами пространства предметов и изображений определяется выражением:

$$s \begin{bmatrix} 0 \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Пусть r_{ij} – элемент матрицы поворота R , находящийся в i -ой строке и j -ом столбце, а t_i – i -й элемент матрицы t переноса. Тогда система уравнений для определения внутренних и внешних параметров системы имеет вид:

$$\begin{cases} 0 = f_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_1}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_3} \\ v = f_y \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_2}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_3} + v_0 \end{cases}.$$

С учетом радиальной дисторсии объектива эту систему можно представить, как

$$\begin{cases} 0 = f_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_1}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_3} \\ v = f_y \left(\frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_2}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_3} + k_1 \left[\frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_2}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_3} \right]^2 \right) + v_0 \end{cases},$$

где k_1 – коэффициент радиальной дисторсии.

Алгоритм калибровки состоит из регистрации изображений треугольников и пятна проектора при варьировании положения шаблона относительно системы. Пересечение плоскости подсветки и с поверхностью тест-объекта, позволяет получить координаты треугольников на линейке чувствительных элементов.

На рисунке 2 приведена схема проведения калибровки. При перемещении тест-объекта 3 в рабочем пространстве осуществляется регистрация изображений линейной камерой 2. Каждое изображение дает информацию о положении главной точки

объектива O' в системе координат XYZ за счет определения значений матриц внутренних и внешних параметров. Затем проводится оптимизация параметров по всем положениям для учета коэффициента дисторсии. Полученный результат позволяет вычислять координаты лазерных пятен в пространстве, проецируемых проектором 1, для каждого нового положения. Таким образом, можно получить информацию, позволяющую определять относительное перемещение пятна в рабочей области.

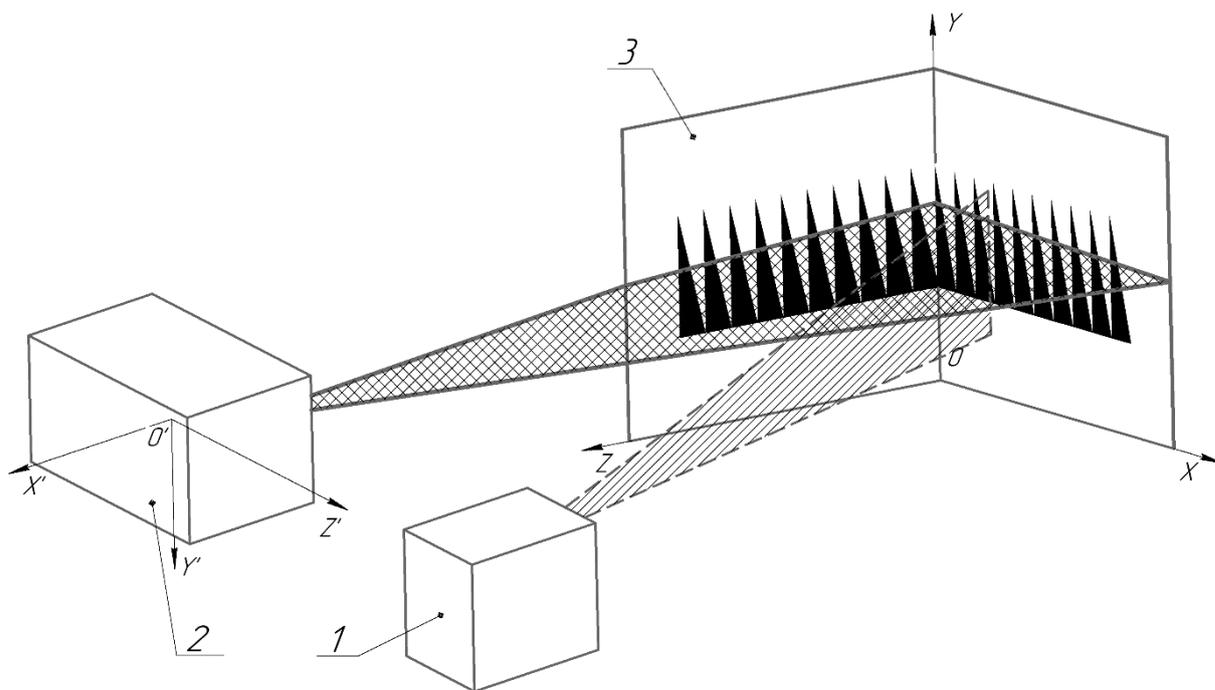


Рисунок 2 – схема калибровки. 1 – проектор; 2 – линейная камера; 3 – тест-объект

Для повышения пороговой чувствительности измерения координат предлагается использовать метод субпиксельного уточнения, основанный на оценке положения пика по нескольким зарегистрированным значениям сигнала в окрестности этого пика. Это позволяет производить оценку координат изображения объектов с погрешностью, составляющей доли от размера одного пикселя. Дополнительным источником погрешности может являться погрешность изготовления калибровочного объекта, связанная с неперпендикулярностью полуплоскостей.

Экспериментальные исследования

На рисунке 3 представлена установка, на которой производились экспериментальные исследования. Был изготовлен калибровочный тест-объект с нанесенным узором в виде треугольников 1 для оценки погрешности определения

координат. Тест-объект устанавливался на моторизованном линейном трансляторе 2 STANDA 8MT160-300 с диапазоном перемещений 300 мм и разрешением на полном шаге 2,5 мкм. В качестве приемника излучения установлена камера линейного сканирования 3 Teledyne DALSA Linea 2K LA-GM-02K08A с линейкой чувствительных элементов 1x2048 пикселей, размером пикселя 7,04 мкм. Объектив имел фокусное расстояние 35 мм. На тест-объект проецировалась полоса при помощи лазера 4.

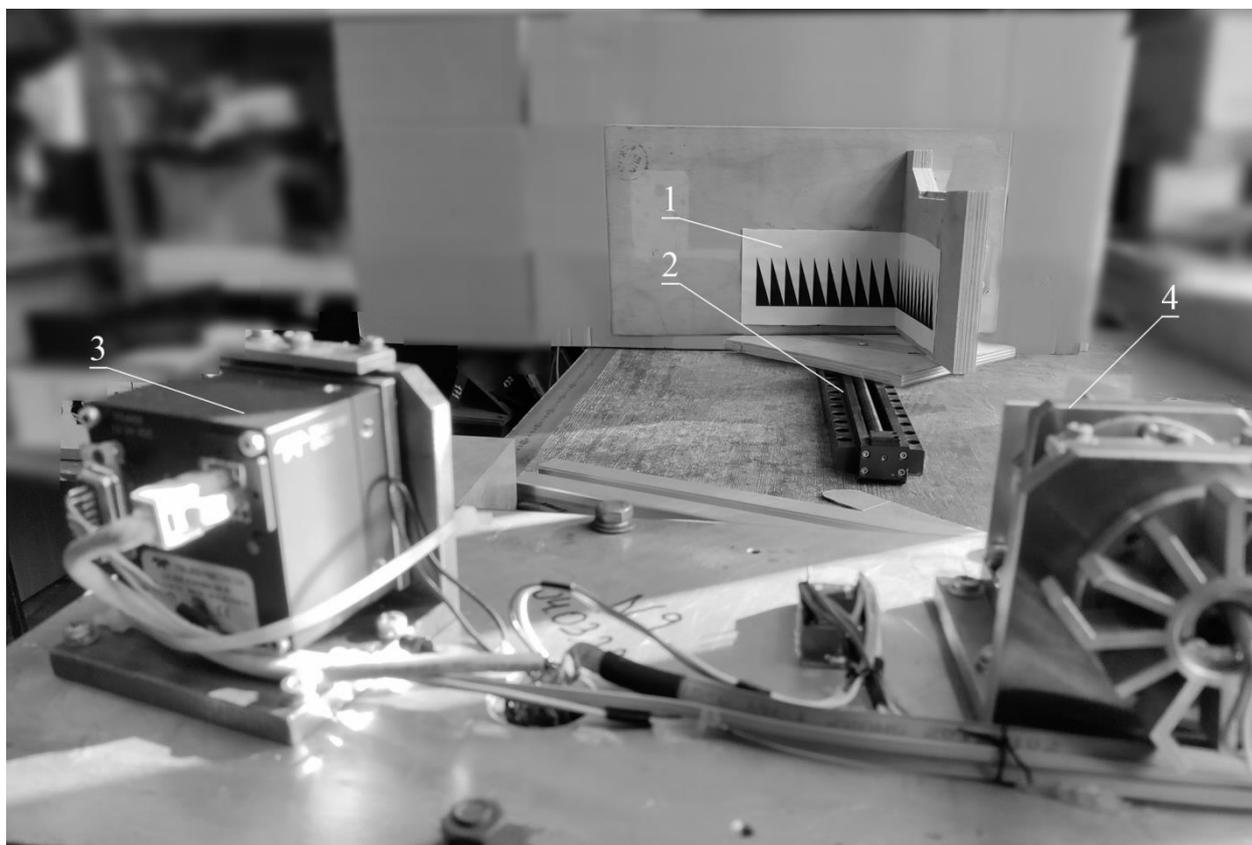


Рисунок 3 – Экспериментальная установка. 1 – тест-объект; 2 – моторизованный линейный транслятор; 3 – камера; 4 – лазер

Тест-объект перемещался в диапазоне от 650 до 850 мм от переднего края системы. Было зарегистрировано 40 изображений пятна во всем рабочем диапазоне. В результате калибровки были определены параметры триангуляционной системы: $f_y = 5310,3$ пикс., $v_0 = 1162,2$ пикс., коэффициент радиальной дисторсии $k_I = 0,000169$, линейный параллакс $b = 274,9$ мм. На рисунке 4 представлены графики значений погрешности измерений дальности при различных положениях тест-объекта в рабочем пространстве.

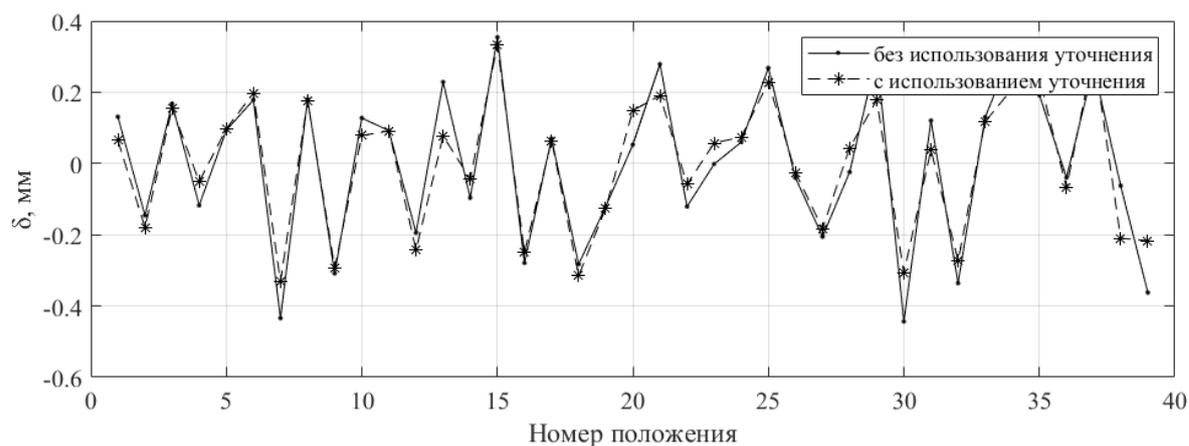


Рисунок 4 – График значений погрешности измерений дальности при различных положениях тест-объекта

Среднеквадратическое отклонение (СКО) определения относительного перемещения положения пятна от перемещения транслятора составило 0,227 мм, а при использовании методов субпиксельного уточнения СКО составило 0,192 мм. Из полученных результатов следует, что оптико-электронная система оперативного контроля за счет применения методов субпиксельного уточнения положения пика позволяет достигнуть точности измерения прямолинейности, которая удовлетворяет современным требованиям к аппаратуре контроля железнодорожных рельсов.

Заключение

Произведена калибровка параметров оптико-электронной системы оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов с использованием тест-объекта с нанесенным узором в виде треугольников, который перемещали в рабочем диапазоне дальностей системы. Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенная методика калибровки проста в реализации в условиях реального использования и обеспечивает компенсацию погрешности вызванной неопределенностью параметров системы. Кроме этого, использование алгоритма методы субпиксельного уточнения позволяет достигнуть точности контроля прямолинейности железнодорожных рельсов, которая удовлетворяет современным требованиям к аппаратуре оперативного контроля.

Литература

1. Колючкин В.Я., Маренов Н.Е., Егоров А.О. Оптико-электронная система для оперативного контроля прямолинейности железнодорожных рельсов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2023, № 3 (144), с. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-33-48>.
2. Liu S., Wang Q., Luo Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry //Transportation Safety and Environment. – 2019. – Т. 1. – №. 3. – С. 185-204. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdz007>.
3. Zhang J. et al. A flexible calibration method for laser displacement sensors based on a stereo-target //Measurement Science and Technology. – 2014. – Т. 25. – №. 10. – С. 105103. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/105103>.
4. Sun J. et al. A vision measurement model of laser displacement sensor and its calibration method //Optics and Lasers in Engineering. – 2013. – Т. 51. – №. 12. – С. 1344-1352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.05.009>.
5. Wang G. et al. Modelling and calibration of the laser beam-scanning triangulation measurement system //Robotics and autonomous systems. – 2002. – Т. 40. – №. 4. – С. 267-277.
6. Santolaria J. et al. A one-step intrinsic and extrinsic calibration method for laser line scanner operation in coordinate measuring machines //Measurement science and technology. – 2009. – Т. 20. – №. 4. – С. 045107. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/4/045107>.
7. Xie Z., Wang X., Chi S. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of structured-light sensors //Optics and Lasers in Engineering. – 2014. – Т. 58. – С. 9-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.01.001>.
8. Tu Y. et al. An Accurate and Stable Extrinsic Calibration for a Camera and a 1D Laser Range Finder //IEEE Sensors Journal. – 2022. – Т. 22. – №. 10. – С. 9832-9842. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3166243>.
9. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration //IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2000. – Т. 22. – №. 11. – С. 1330-1334. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.888718>.
10. Luna C. A. et al. Calibration of line-scan cameras //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Т. 59. – №. 8. – С. 2185-2190. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2031344>.

11. Li D. et al. Cross-ratio invariant based line scan camera geometric calibration with static linear data //Optics and Lasers in Engineering. – 2014. – Т. 62. – С. 119-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.03.004>.
12. Su D., Bender A., Sukkarieh S. Improved cross-ratio invariant-based intrinsic calibration of a hyperspectral line-scan camera //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 6. – С. 1885. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18061885>.

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ ОБЪЕКТИВ С ДВУМЯ УГЛОВЫМИ ПОЛЯМИ ЗРЕНИЯ

А.А. Аникьев, Д.С. Губанова

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск

E-mail: aaanikyev@mail.ru

Аннотация: Предложена оптическая схема малогабаритного тепловизионного объектива с двумя угловыми полями. Проведен габаритный расчет системы при учете асферических поверхностей двух главных формирующих изображение линз. Использование асферических поверхностей позволило существенно уменьшить aberrации оптической системы и добиться размеров пятна рассеяния, достаточных для использования чувствительных приемников излучения.

Ключевые слова: тепловизионный объектив, инфракрасное излучение, габаритный расчет, aberrации.

THERMAL IMAGING LENS WITH TWO ANGULAR FIELD OF VIEW

A.A. Anikiev, D.S. Gubanova

PJSC Krasnogorsky Zavod named after S. A. Zverev, Krasnogorsk

E-mail: aaanikyev@mail.ru

Abstract: An optical design of a small-sized thermal imaging lens with two fields of view is proposed. A dimensional calculation of the system was carried out taking into account the aspherical surfaces of the two main image-forming lenses. The use of aspherical surfaces made it possible to significantly reduce the aberrations of the optical system and achieve scattering spot sizes sufficient for the use of sensitive radiation receivers.

Keywords: thermal imaging lens, infrared radiation, dimensional calculation, aberrations.

Введение

Построение и выбор оптической схемы приемного канала тепловизионных систем наблюдения и обнаружения в среднем ИК диапазоне в значительной степени зависит от постановки задач обнаружения: дальности до объекта, минимальной величины искажений при формировании изображения, чувствительности и разрешения приемника в рабочем спектральном диапазоне, условий эффективной работы приемника, габаритов и надежности самого прибора в полевых условиях эксплуатации, стоимость процесса изготовления. Каждая из этих составляющих вносит свой вклад в обоснование выбора оптической системы. Выполнение технических требований к прибору часто приводит к необходимости согласовать между собой ряд противоречивых параметров конструкции. Так например, повышение пространственного разрешения обзорного и прицельного блоков прибора приводит к необходимости выбирать более коротковолновый участок ИК диапазона и, соответственно, приемник излучения с малыми размерами пикселя и расстоянием между пикселями. В этом случае наиболее эффективное формирование изображения на приемнике достигается использованием объектива с большим фокусным расстоянием. С другой стороны, ограничение на габаритные размеры прибора не позволяет построить оптическую схему объектива необходимых линейных размеров, и естественным выходом будет использование плоских зеркал для излома оптической оси, предположим на 180° , удовлетворив при этом как условию сохранения высокого разрешения, так и габаритам системы.

В настоящей работе рассмотрены подходы к модернизации прицельно – наблюдательного тепловизионного модуля, работающего в среднем ИК диапазоне 3 – 5 мкм. Оптическая система модуля работает в двух угловых полях – широком и узком. Аналогом тепловизионного модуля является модуль комплекса Агат-М, производства ПАО КМЗ им. С.А. Зверева.

Постановка задачи и обоснование оптической схемы

Модернизацию тепловизионного модуля будем проводить двумя путями: выбором приемника излучения с повышенной разрешающей способностью и высокой чувствительностью на основе охлаждаемой фотодиодной матрицы и построение оптической системы объектива на основе асферических оптических элементов,

обеспечивающих высокое качество формирования изображения на матрице приемника за счет значительного уменьшения aberrаций.

Оптическая схема тепловизионного канала на основе матричного фотоприёмного устройства имеет два дискретно переключаемых поля зрения – узкое и широкое, кратность изменения фокусного расстояния f' равна 2,8. Переключение полей зрения (изменение фокусного расстояния) осуществляется введением (выведением) в оптическую схему (из оптической схемы) блока двух линз. На рисунке 1 представлена оптическая схема для широкого (ШУП). В узком поле зрения (УПЗ) выводятся линзы 2 и 3, а линза 5 смещается в новое положение. Оптическая система состоит из двух частей – объектива (позиции 1 - 6 на рисунке 1) и проекционной части (позиции 7 - 10 на рисунке 1). Такая конструкция позволяет согласовать положение апертурной диафрагмы системы с холодной диафрагмой приёмника.

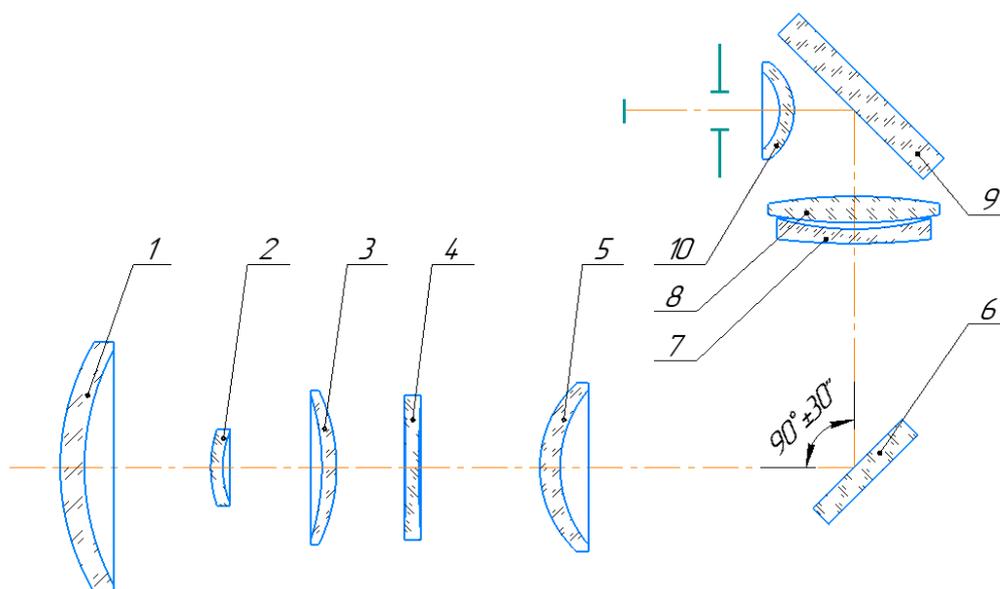


Рисунок 1 – Оптическая схема модуля прицельно-наблюдательного комплекса. В узком угловом поле из оптической схемы выводятся линзы 2 и 3, а линза 5 смещается в новое положение

Одним из недостатков тепловизионных модулей, работающих в ИК области спектра является проблема воздействия температуры на оптическую систему. Изменение температуры приводит к изменению оптических свойств линз, поскольку в ИК области спектра в качестве материала линз применяются германий и кремний, обладающие полупроводниковыми свойствами. Если в оптической системе применяются зеркала, то воздействие температуры приводит также к проявлению так

называемого эффекта Нарцисса. Он состоит в следующем. Нагрев окружающих оптическую систему конструктивных элементов приводит к испусканию дополнительного паразитного ИК излучения. Часть этого излучения переотражается на приемник зеркалами в составе оптической системы и последней из оптических компонент, выступающей в качестве зеркала. В результате на изображении могут возникать кольца или пятна, т.е. возникают случайные неоднородности изображения.

Оптические силы линз и радиусы кривизны оптических поверхностей подобраны таким образом, чтобы максимально уменьшить эффект «Нарцисса», однако полностью устранить эффект Нарцисса можно только программным путем [1, 2].

Выбор приемника излучения

Третье поколение приемников излучения в среднем ИК диапазоне (3 - 5 мкм) можно разделить на две большие группы – охлаждаемые фотодиодные и неохлаждаемые болометрические. Каждая из технологий имеет свои достоинства и недостатки. Лучшим выбором для нашей задачи являются матрицы с высокими показателями чувствительности и разрешающей способности, а именно эти характеристики являются главным достоинством охлаждаемых фотодиодных матриц. Несмотря на большое энергопотребление и невысокий срок службы, достоинства таких матриц перекрывают их недостатки. Из имеющихся на рынке матричных приемников нами выбран фотоприемный модуль ФЭМ16М-02 компании Орион. Модуль выполнен на основе охлаждаемой матрицы фотодиодов из антимонида индия, в него входят интегральная микрокриогенная система Стирлинга и электронный блок сопряжения. Приемник обладает следующими параметрами:

- формат матрицы - 640×480;
- шаг матрицы – 17 мкм;
- диапазон спектральной чувствительности – 3 - 5 мкм;
- удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной характеристики – $1,3 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$;
- чувствительность – $1 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$;
- время накопления 0 - 2000 мкс;
- максимальная частота кадров – 400 гц;
- динамический диапазон сигналов – 60 дБ.

Характеристики приемника излучения в значительной степени превосходят параметры аналога, что является основным условием модернизации комплекса.

Габаритный расчет объектива

Удовлетворение требований к параметрам инфракрасных систем, во многом зависит от их пространственного и температурного разрешения (пространственной и температурной разрешающей способности). [3]

Пространственное разрешение инфракрасной системы (ИКС) оценивается пространственной частотой, разрешаемой системой. Поскольку процессы обнаружения, распознавания, классификации и идентификации являются вероятностными, т.е. их успешная реализация зависит от ряда случайных факторов, удобно представлять вероятность их выполнения в виде функции пространственной частоты. Обычно в качестве этой частоты берут число периодов N пространственной структуры (миры), приходящихся на так называемый критический размер обнаруживаемого или распознаваемого объекта (рисунок 2).

Вероятность решения задачи	Обнаружение		Распознавание		Идентификация	
	N	N_p	N	N_p	N	N_p
1,00	6,0	3,00	18,0...24,0	9,0...12,0	36	18,0
0,95	4,0	2,00	12,0...16,0	6,0...8,0	24	12,0
0,80	3,0	1,50	9,0...12,0	4,5...6,0	18	9,0
0,50	2,0	1,00	6,0...8,0	3,0...4,0	12	6,0
0,30	1,5	0,75	4,5...6,0	2,25...3,0	9	4,5
0,10	1,0	0,50	3,0...4,0	1,5...2,0	6	3,0
0,02	0,5	0,25	1,5...2,0	0,75...1,0	3	1,5
0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 2 – Значения N и N_p в зависимости от заданной вероятности решения задач, стоящих перед ИКС

Проведем габаритный расчет для выбранного матричного модуля, в результате которого получим фокусное расстояние объектива $f'_{об}$, угловое поле 2ω .

Число разрешаемых штрихов, соответствующих критическому размеру объекта, можно определить, зная требуемую вероятность решения поставленной перед оператором оптико-электронного прибора задачи: обнаружения, распознавания, идентификации.[4]

Найдем угловое разрешение и необходимое для него фокусное расстояние оптической системы, с учетом вероятности обнаружения объектов 90% по таблице на рисунке 2 (число периодов эквивалентной пространственной миры $N_M = 4$):

$$\varphi_{\text{ТПВ}} = \frac{a_0}{N_M \cdot l_0}, \quad (1)$$

$$f'_{\text{об}} = \frac{2 \cdot p \cdot N_M \cdot l_0}{a_0}, \quad (2)$$

где p – размер элемента изображения матрицы приемника излучения (ПИ), мм; a_0 – размер объекта наблюдения, примем размер объекта во фронтальной проекции 3,2 м; l_0 – дальность до него, 4000 м.

Подставляя значения в формулы (1) и (2), получим:

$$\varphi_{\text{ТПВ}} = \frac{3,2}{4 \cdot 4000} = 0,2 \text{ мрад.}$$

$$f'_{\text{об}} = \frac{2 \cdot 0,017 \text{ мм} \cdot 4 \cdot 4000 \text{ м}}{3,2 \text{ м}} = 170 \text{ мм.}$$

Таким образом, фокусное расстояние объектива для успешного решения задачи обнаружения с вероятностью 90% должно быть больше, чем $f'_{\text{об}} = 170$ мм. Определим дальность обнаружения объекта при фокусном расстоянии $f'_{\text{об}} = 185$ мм, выразив l_0 из формулы (2). Для обнаружения объекта с вероятностью 90% необходимо, чтобы в его определяющий размер вписывалось 4 периода эквивалентной пространственной миры, а угловое разрешение тепловизора (ТПВ) было не хуже:

$$\varphi_{\text{ТПВ}} = \frac{2 \cdot a}{f'_{\text{об}}} = \frac{2 \cdot 0,017 \text{ мм}}{185 \text{ мм}} = 0,18 \text{ мрад}$$

Дальность обнаружения:

$$l_0 = \frac{a_0 \cdot f'_{\text{об}}}{2 \cdot a \cdot N_M} = \frac{3,2 \text{ м} \cdot 185 \text{ мм}}{2 \cdot 0,017 \text{ мм} \cdot 4} = 4352 \text{ м}$$

Таким образом, прибор решает задачу обнаружения объекта с вероятностью 90 процентов на дальности $l_0 = 4352$ м.

Определим размер углового поля с фокусным расстоянием $f'_{\text{об}} = 185$ мм для выбранной матрицы.

Расчет размеров чувствительной площадки осуществляется из простейших геометрических соображений, согласно формулам:

$$a = n_a \cdot p, \quad (3)$$

$$b = n_b \cdot p, \quad (4)$$

где p – размер элемента изображения матрицы ПИ; n_a – число пикселей по горизонтали; n_b – число пикселей по вертикали; a и b – размер чувствительной площадки по горизонтали и вертикали соответственно, мм.

Подставим численные значения в формулы (3) и (4):

$$a = 640 \cdot 0,017 = 10,88 \text{ мм.}$$

$$b = 480 \cdot 0,017 = 8,16 \text{ мм.}$$

Расчет диагонали одного пикселя ведется по формуле:

$$d = \sqrt{2 \cdot p^2}, \quad (5)$$

Подставим значение размера пикселя в формулу (5), получим:

$$d = \sqrt{2 \cdot 0,017^2} = 0,024 \text{ мм.}$$

Расчет угловых полей объектива прицельно-наблюдательного комплекса выполним согласно следующим формулам:

$$2\omega_{\text{мгн}} = \frac{d}{f'}, \quad (6)$$

$$2\omega_{\text{гор}} = \frac{a}{f'_{\text{об}}}, \quad (7)$$

$$2\omega_{\text{верт}} = \frac{b}{f'_{\text{об}}}, \quad (8)$$

Подставим найденные значения в формулы (6), (7) и (8):

$$2\omega_{\text{мгн}} = \frac{0,024}{185} = 0,00012^\circ$$

Тогда угловое поле в пространстве предметов:

$$2\omega_{\text{гор}} = \frac{10,88}{185} = 2,97^\circ$$

$$2\omega_{\text{верт}} = \frac{8,16}{185} = 2,37^\circ$$

Таким образом, угловое поле прибора в УУП с фокусным расстоянием $f'_{\text{об}} = 185$ мм: $2\omega = 2,37^\circ \times 2,97^\circ$.

В приборе реализована возможность переключения углового поля с помощью введения линзового блока, который содержит в себе линзы, обозначенные позициями 2 и 3 на рисунке 1. В ШУП фокусное расстояние объектива равно $f'_{\text{об}} = 66,5$ мм.

Определим размер широкого углового поля с фокусным расстоянием $f'_{\text{об}} = 66,5$ мм:

$$2\omega_{\text{мгн}} = \frac{d}{f'} = \frac{0,024}{66,5} = 0,00036$$

Тогда угловое поле в пространстве предметов:

$$2\omega_{\text{гор}} = \frac{a}{f'_{\text{об}}} = \frac{10,88}{66,5} = 8,25^\circ$$

$$2\omega_{\text{верт}} = \frac{b}{f'_{\text{об}}} = \frac{8,16}{66,5} = 6,6^\circ$$

Таким образом, угловое поле прибора с фокусным расстоянием $f'_{\text{об}} = 66,5$ мм – $2\omega = 6,6^\circ \times 8,25^\circ$.

Аберрационный расчет объектива

В целях повышения качества изображения, формируемого оптической системой, были введены линзы, обозначенные 1 и 5 на рисунке 1, с асферическими поверхностями и выполнен аберрационный расчет оптической системы с узким и широким угловыми полями.

1. Расчет объектива в узком угловом поле.

Аберрационный анализ оптической системы выполнен при помощи программы «Zemax». Были рассчитаны следующие аберрации для данной системы до использования асферических линз:

- хроматизм положения для точки в центре зрачка $\Delta s'_{\lambda_1\lambda_2} = -0,1418$ мм;
- продольная сферическая аберрация на краю зрачка для основной длины волны $\Delta s' = -7,7190$ мм;
- меридиональная кома на краю поля для края зрачка $\Delta y'_k = 0,0108$ мм;
- дисторсия для основной длины волны на краю поля = $-3,1403$ %;
- астигматизм (на краю поля) $(L'_s - L'_m) \cos\omega' = 3,8139$ мм;
- хроматизм увеличения на краю зрачка = $-0,0082$ мм.

Левую асферическую поверхность линзы 1 (рисунок 1) зададим с помощью формулы:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + a_2y^4 + a_3y^6,$$

где $c=1/56,105$, $k=0$, $a_2 = -4,015 \cdot 10^{-8}$, $a_3 = -2,016 \cdot 10^{-11}$.

Уравнение асферической поверхности для линзы 5:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + a_2y^4 + a_3y^6 + a_4y^8,$$

где $c=1/26,805$, $k=0$, $a_2 = -2,09 \cdot 10^{-6}$, $a_3 = -2,93 \cdot 10^{-9}$, $a_4 = -7,76 \cdot 10^{-6}$.

Рассчитанные aberrации для системы с узким угловым полем (УУП) после задания асферических поверхностей линз:

- хроматизм положения для точки в центре зрачка $\Delta s'_{\lambda_1\lambda_2} = -0,0087$ мм;
- продольная сферическая aberrация на краю зрачка для основной длины волны $\Delta s' = -0,3483$ мм;
- меридиональная кома на краю поля для края зрачка $\Delta y'_k = 0,0082$ мм;
- дисторсия для основной длины волны на краю поля = 1,5099 %;
- астигматизм (на краю поля) $(L'_s - L'_m) \cos\omega' = 0,1614$ мм;
- хроматизм увеличения на краю зрачка = -0,0047 мм.

Рассмотрим один из важнейших параметров, характеризующих согласованность системы с приемным устройством – модуляционную передаточную функцию (МПФ). Соответствующий график приведен на рисунке 3.

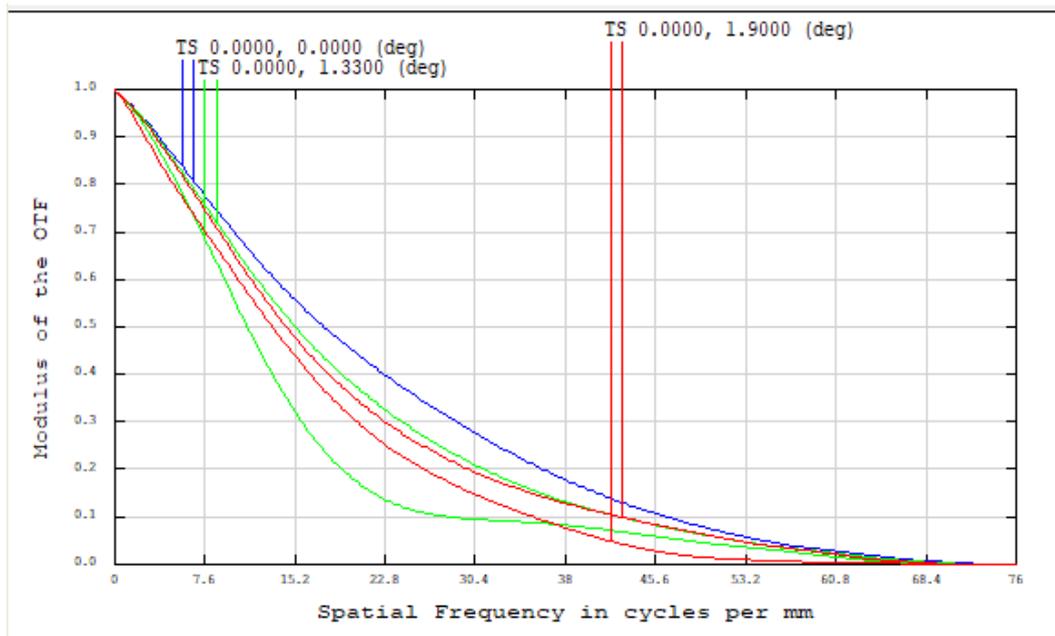


Рисунок 3 – Модуляционная передаточная функция в УУП

В УУП диаметр кружка рассеяния изменяется от $d = 0,012$ мм в центре поля до $d = 0,016$ мм на краю поля, что соответствует размеру пикселя приемного устройства (17 мкм).

2. Расчет объектива в широком угловом поле.

Рассчитаем теперь aberrации для системы с широким угловым полем (ШУП) до использования асферических линз:

- хроматизм положения для точки в центре зрачка $\Delta s'_{\lambda_1\lambda_2} = 0,0353$ мм;
- продольная сферическая aberrация на краю зрачка для основной длины волны $\Delta s' = -5,711$ мм;
- меридиональная кома на краю поля для края зрачка $\Delta y'_k = 0,0052$ мм;
- дисторсия для основной длины волны на краю поля = $-3,4970$ %;
- астигматизм (на краю поля) $(L'_s - L'_m) \cos\omega' = 3,9699$ мм;
- хроматизм увеличения на краю зрачка = $-0,0069$ мм.

В широком угловом поле используются те же асферические линзы, что и в узком, заданные с помощью формул 18 и 19. Отличие лишь в том, что система с широким угловым полем содержит в себе еще 2 линзы, обозначенные позициями 2 и 3 на рисунке 1.

Рассчитанные aberrации для системы с широким угловым полем после задания асферических поверхностей линз:

- хроматизм положения для точки в центре зрачка $\Delta s'_{\lambda_1\lambda_2} = 0,0352$ мм;
- продольная сферическая aberrация на краю зрачка для основной длины волны $\Delta s' = -0,3017$ мм;
- меридиональная кома на краю поля для края зрачка $\Delta y'_k = 0,0027$ мм;
- дисторсия для основной длины волны на краю поля = $0,3899$ %;
- астигматизм (на краю поля) $(L'_s - L'_m) \cos\omega' = 0,3025$ мм;
- хроматизм увеличения на краю зрачка = $-0,0043$ мм.

Сравнивая aberrации, можем сделать вывод, что введение асферических линз уменьшило их значения, а, следовательно, повысилась четкость изображения и его качество.

На рисунке 4 приведен график модуляционной передаточной функции в ШУП, а на рисунке 5 – распределение энергии в пятне рассеяния.

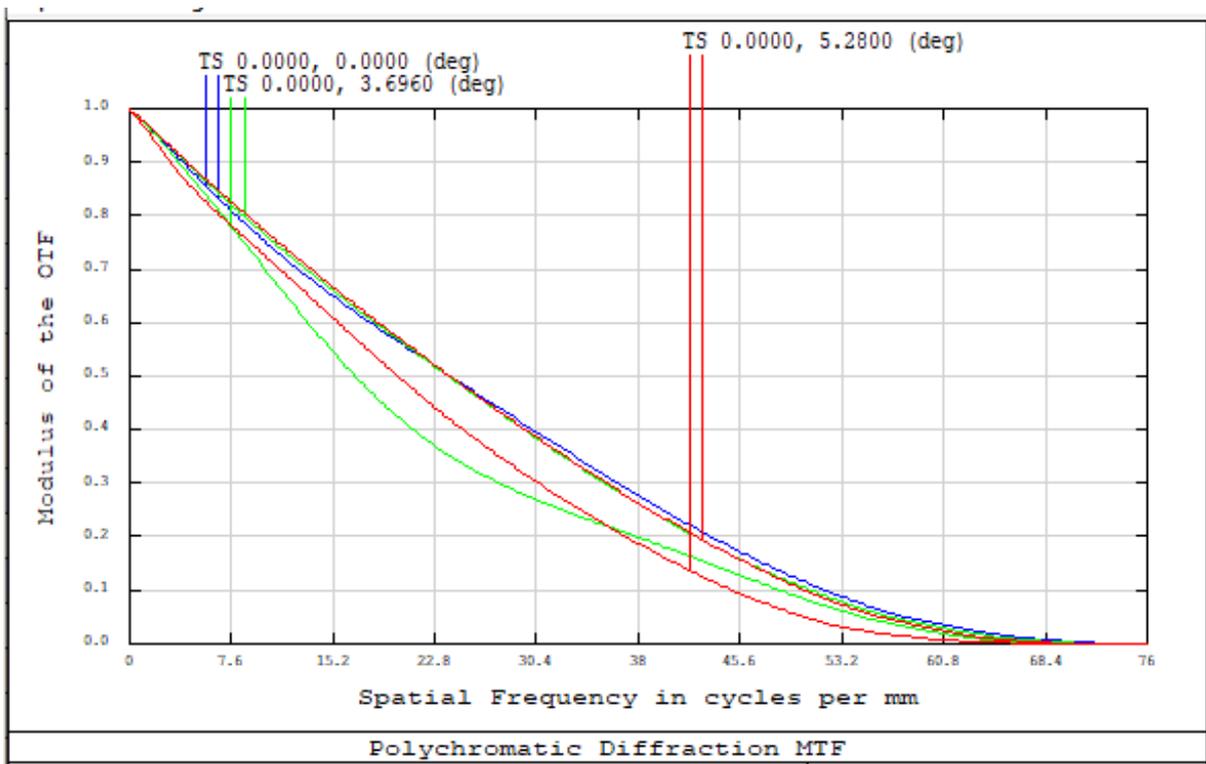


Рисунок 4 – Модуляционная передаточная функция в ШУП

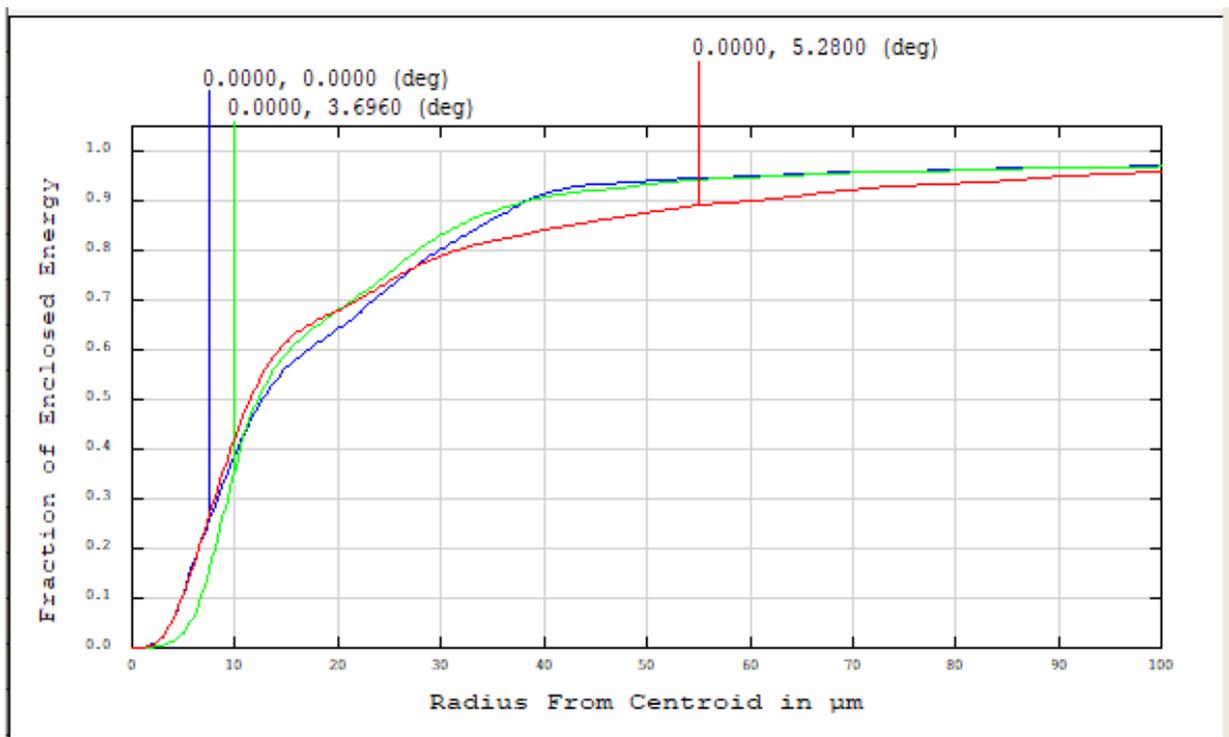


Рисунок 5 – Распределение энергии в пятне рассеяния для ШУП

Заключение

Выбран приемник излучения на основе охлаждаемой фотодиодной матрицы, чувствительность и разрешение которого, а также спектральный диапазон удовлетворяют условиям поставленной задачи. Проведены габаритные и абберационные расчеты прибора наблюдения в средней ИК области спектра с двумя угловыми полями. Введение асферических оптических элементов существенно улучшило разрешение исходной оптической системы и качество увеличенного изображения в широком и узком угловых полях.

Литература

1. Ерофеев И.В. Автоколлимационная фокусировка оптико-электронных систем инфракрасного спектра. // Изв. Вузов. Приборостроение. 2013, Т. 56, №7, с. 31 – 35.
2. Соболев П.С., Черняк Б.В., Петров М.Н. Коррекция температуры окружающей среды на оптическую систему тепловизионного канала. Вестник НГУ. 2019, №2 (114), с. 27 – 30. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.2\(114\).27-30](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.2(114).27-30).
3. Тарасов, А.В., Якушенков Ю.Г. ИК-системы смотрящего типа / А.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – Москва: Дрофа, 2004. – 257 с.
4. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
5. Заказнов, Н. П. Теория оптических систем. / Н.П. Заказнов, С. И. Кирюшин. – Москва: Машиностроение, 1992. – 448 с.
6. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение. / Ж. Госсорг. – Москва: Мир, 1988. – 416 с.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФАЗЫ ПРИ РАСШИФРОВКЕ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ МЕТОДОМ ФУРЬЕ

Столяров А.В., Гладышева Я.В.

МГТУ им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005

E-mail: sstolyarov25@gmail.com

Аннотация: Извлечение фазы из одиночной интерферограммы с полосами равного наклона имеет большое значение и вызывает все больший интерес в оптической метрологии. В данной работе исследуются ключевые факторы, которые влияют на точность расшифровки одиночной интерферограммы с полосами равного наклона при использовании метода Фурье. Результаты исследований показывают, как влияет качество и конечные размеры интерферограммы, типы фильтров и их параметры, алгоритмы разворачивания фазы на корректность результатов и величину погрешностей при расшифровке интерферограммы. Результаты этой работы могут быть использованы для улучшения точности и надежности расшифровки интерферограммы с полосами равного наклона методом Фурье.

Ключевые слова: расшифровка интерферограммы, метод Фурье, извлечение фазы, измерение формы поверхности.

ANALYSIS OF PHASE EXTRACTION PECULIARITIES IN INTERFEROGRAM PROCESSING USING FOURIER METHOD

A.V. Stolyarov, J.V. Gladysheva

Bauman Moscow State Technical University, 5 bld. 1,

2-nd Baumanskaya str., Moscow, Russia, 105005

E-mail: sstolyarov25@gmail.com

Abstract: Phase extraction from a single interferogram with linear carrier has significant importance and is increasingly attracting attention in optical metrology. This work investigates the key factors influencing the accuracy of processing a single interferogram with a linear carrier using the Fourier method. The research results demonstrate how the quality

and final dimensions of the interferogram, types of filters and their parameters, phase unwrapping algorithms affect the correctness of the results and the magnitude of errors in interferogram processing. The results of this work can be used to improve the accuracy and reliability of Fourier processing of the interferogram with a linear carrier.

Keywords: interferogram processing, Fourier method, phase extraction, surface shape measurement.

Введение

Интерферометрия применяется во многих областях науки и техники. Особенно актуальны интерференционные методы измерения при контроле формы поверхностей астрономических и космических оптических деталей, где ключевыми требованиями является очень высокая точность измерений и бесконтактность.

После регистрации интерферограммы на интерферометре, появляется необходимость ее расшифровки – извлечения фазовой информации.

Существует несколько методов извлечения фазовой составляющей из интерферограммы. Одними из основных являются: метод выделения координат экстремумов интерференционных полос, метод гетеродинамирования, фазофиксирующий метод, фазосдвигающий метод (PSI) и Фурье метод [1].

Последний метод был предложен впервые М. Такеда и другими (1982) [2]. И получил большое распространение благодаря простоте, легкости реализации в техническом плане. К преимуществам можно и отнести то, что для реализации требуется только одна интерферограмма, а не серия снимков, что позволяет избежать проблем с вибрацией и турбулентностью во время проведения измерений.

Методы

Фурье метод расшифровки основан на анализе и фильтрации интерферограммы в частотной области. И относится к методам с линейной пространственной несущей [3], требующим большое количество интерференционных полос.

Извлечение фазовой составляющей интерферограммы методом Фурье включает следующую последовательность операций:

- преобразование Фурье (FT) над интерферограммой;

- фильтрация области с несущими частотами;
- сдвиг отфильтрованной области с несущими частотами в начало частотных координат Фурье плоскости;
- обратное преобразование Фурье (IFT) отфильтрованной области;
- вычисление обратного тангенса от отношения мнимой к реальной части функции;
- разворачивание фазы (удаление фазовых разрывов).

Изображение интерферограммы записывается в комплексной форме в виде уравнения функции $I(x, y)$:

$$I(x, y) = G(x, y) + H(x, y) \exp[i2\pi\nu x] + H^*(x, y) \exp[-i2\pi\nu x],$$

где: $I(x, y)$ – функция распределения интенсивности по полю интерферограммы; $G(x, y)$ – функция постоянной составляющей интенсивности; $H(x, y)$ – функция пространственной несущей; ν – несущая пространственная частота; «*» – символ комплексного сопряжения.

$$H(x, y) = 0.5B(x, y) \exp[i\varphi(x, y)].$$

Функция распределения интенсивности интерферограммы $I(x, y)$ переносится из пространственной в частотную область, используя преобразование Фурье и ряд его свойств:

$$\tilde{I}(\nu_x, \nu_y) = \tilde{G}(\nu_x, \nu_y) + \tilde{H}(\nu_x - \nu_0, \nu_y) + \tilde{H}^*(\nu_x + \nu_0, \nu_y),$$

где: $\tilde{I}(\nu_x, \nu_y)$ – функция распределения интенсивности интерферограммы в частотной области; $\tilde{G}(\nu_x, \nu_y)$ – область частот постоянной составляющей интенсивности; $\tilde{H}(\nu_x - \nu_0, \nu_y)$ – область несущих частот.

После этого производится фильтрация области с несущими частотами. Обычно для этого используется полосовая фильтрация различными функциями. Другими словами, обеспечивается резкое или плавное обнуление всех значений функции за пределами границ фильтра.

Также важным отмечается, что область выделения с несущими частотами должна быть расположена в зоне положительного лепестка частот, в противоположном случае, при вычислении, фазовая составляющая будет инвертирована.

$$\tilde{I}(\nu_x, \nu_y) = \tilde{H}(\nu_x - \nu_0, \nu_y).$$

Далее сдвигается отфильтрованная область несущих частот в начало частотных координат Фурье плоскости (на место нулевой частоты ν_0):

$$\tilde{I}(v_x, v_y) = \tilde{H}(v_x, v_y).$$

Затем переносится функция обратно в пространственную область, используя обратное преобразование Фурье, получается следующее уравнение:

$$H(x, y) = 0.5B(x, y)\exp[i\varphi(x, y)].$$

Следующим шагом вычисляется обратный тангенс от отношения мнимой и реальной части полученной функции для нахождения фазы волнового фронта:

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{H(x, y)\}}{\text{Re}\{H(x, y)\}}.$$

После нахождения выполняется разворачивание фазы для того, чтобы устранить 2π -неоднозначности (фазовые разрывы). В основном для этого применяются встроенные инструменты или готовые алгоритмы используемых программных сред.

Численный эксперимент

На каждом этапе операций есть факторы и параметры, которые в большей или меньшей степени влияют на корректность результатов измерений и погрешности при извлечении фазовой составляющей из интерферограммы.

Для анализа факторов было написано два алгоритма в программной среде Matlab. Первый алгоритм позволяет через набор полиномов Цернике смоделировать фазу волнового фронта (Рисунок 1а) и интерферограмму, вычислить ключевые параметры – Peak-to-Value (PV) и Root-Mean-Square (RMS) фазовой поверхности. Второй производит обратные операции – извлекает фазовую составляющую из изображения интерферограммы и на основе расшифровки вычисляет ключевые параметры (рисунок 1б). Погрешность восстановления, в случае синтезированной интерферограммы, для PV составила 11,46 %, для RMS - 7,63 %.

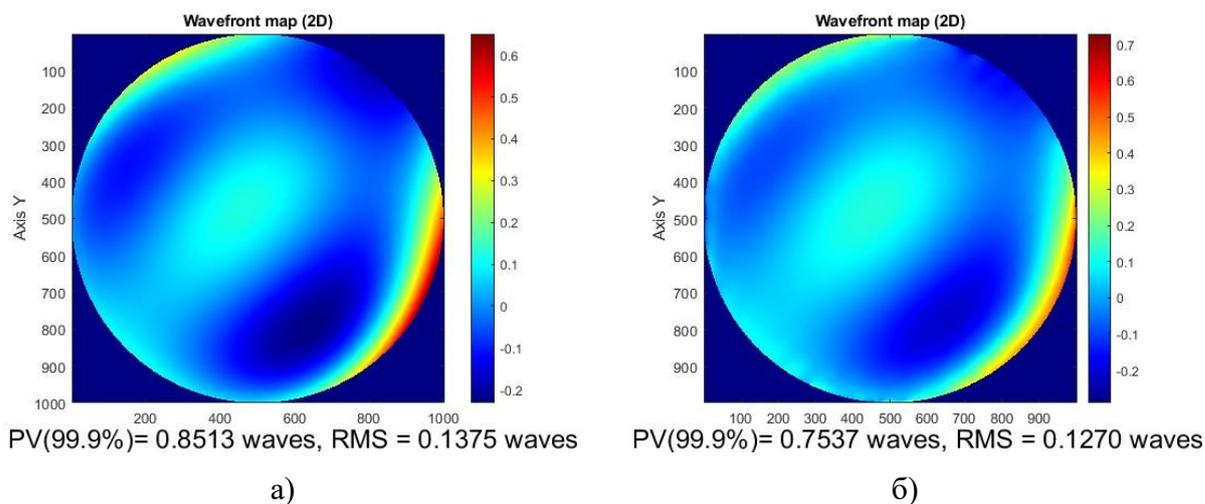


Рисунок 1 – Фаза волнового фронта: *а)* – смоделированная фаза волнового фронта; *б)* – восстановленная фаза волнового фронта из интерферограммы

И путем изменений различных условий: качественной и количественной информации интерферограммы (количество полос, величину модуляции фазы, наличие шумов), типов фильтров и их параметров, последовательности действий при обработке и других особенностей, будут сделаны выводы о том, какие факторы и параметры в наибольшей степени влияют на корректность полученных результатов и величину погрешностей при расшифровке интерферограмм.

На Рисунке 2 показан пример (*а)*) синтезированной интерферограммы и ее Фурье спектр, (*б)*) реальной интерферограммы и ее спектр. Изображение реальной интерферограммы было получено по результату контроля крупногабаритной оптической детали в условиях производства.

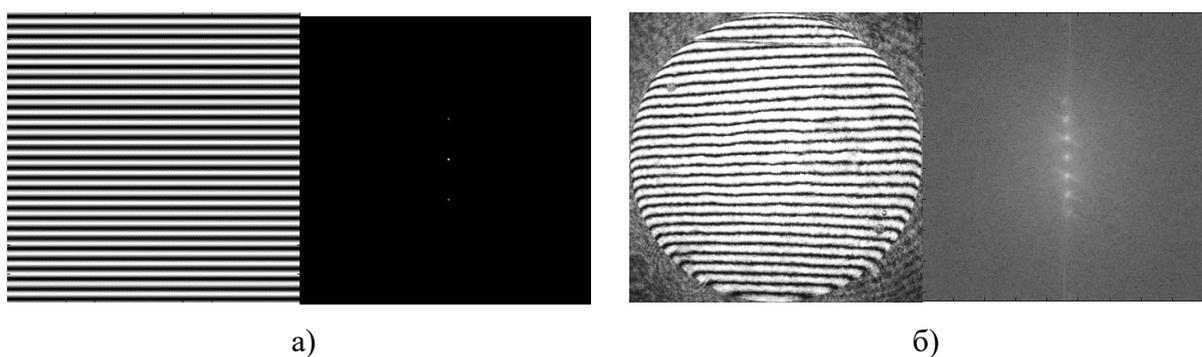


Рисунок 2 – Интерферограммы: *а)* – синтезированная интерферограмма и ее спектр; *б)* – реальная интерферограмма и ее спектр

Как можно заметить, зашумленность исходного изображения интерферограммы после дальнейшего преобразования перенесется в спектральную область, что дает

небольшие дополнительные ошибки при извлечении фазы. Для минимизации шумов матричного приемника излучения после используется цифровая обработка над изображением – сглаживающая фильтрация (Гауссову, медианную фильтрацию).

Важным на изображении остается количество интерференционных полос, так как при малой линейной частоте будет происходить наложение спектров, областей несущих частот на область частот постоянной составляющей интенсивности.

Из-за особенностей работы компьютерных алгоритмов с матричными массивами данных на корректность расшифровки повлияет и ориентация интерференционных полос, наибольшую точность дает горизонтальная и вертикальная ориентация полос.

Наибольшая погрешность на начальном этапе расшифровки вносится конечным размером приемной апертуры. Причина заключается в дифракционных эффектах из-за которых уширяются пики в Фурье пространстве, и в случае круговой апертуры, возникают расходящиеся круговые структуры вокруг областей частот необходимых для извлечения фазовой составляющей. Этот эффект, обусловленный конечной границей интерферограммы, существенно уменьшается несколькими способами. Первый способ – использование оконного преобразование Фурье (WFT) с фильтрацией функциями Хэмминга или Ханна.

На рисунке 3 показаны результаты вычисления фазы волнового фронта с применением различных фильтров над интерферограммой. В случае применения фильтрации функцией Ханна улучшается качество фазовой поверхности, устраняется гармоническая модуляция, точность вычисления параметра PV возрастает на 5,16 %, RMS на 2,61 % по сравнению с круговой функцией фильтрации.

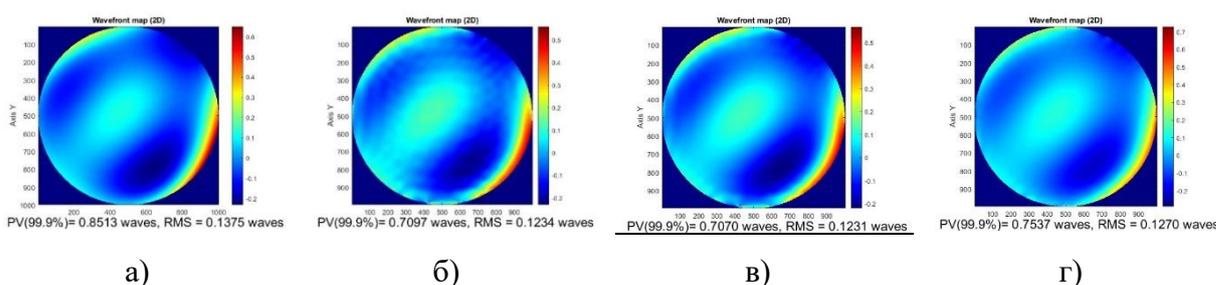


Рисунок 3 – Фаза волнового фронта: а) – смоделированная фаза волнового фронта; б) – восстановленная фаза волнового фронта, полученная после расшифровки интерферограммы с фильтрацией круговой функцией; в) – с фильтрацией функцией Хэмминга; г) – с фильтрацией функцией Ханна

Общие погрешности расшифровки интерферограммы при использовании разных функций фильтров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Общие погрешности расшифровки интерферограммы при использовании разных функций фильтров

Погрешности ключевых параметров	Функция фильтра		
	Круговая (circ)	Хэмминга	Ханна
δPV	0,1416 λ (16,63 %)	0,1443 λ (16,95 %)	0,0976 λ (11,46 %)
δRMS	0,0141 λ (10,25 %)	0,0144 λ (10,47 %)	0,0105 λ (7,63 %)

Второй способ заключается в экстраполяции интерференционных полос за пределы конечных границ, это возможно реализовать с помощью метода Герчберга (1974) [4] или метода Роддье и Роддье (1987) [5]. Третий способ представляет грубую экстраполяцию – дорисовка интерференционных полос с помощью алгоритма и его программной реализации. Похожим образом влияет на качество расшифровки наличие внутреннего отверстия у оптической детали, где проходит внутренняя граница интерференционных полос. Данная особенность также сводится к минимуму путем применения методов экстраполяции или грубой экстраполяции, о которых было представлено ранее.

Следующей операцией в расшифровке является фильтрация области несущих частот и дальнейший сдвиг на начало частотных координат. Существует несколько важных моментов касательно применения различных типов фильтров. Возможно применение как резкой, так и более плавной фильтрации. К резкой относится фильтрация двумерными функциями, которым свойственен дискретный спад кривой (например, прямоугольная функция или круговая). Плавная фильтрация более предпочтительная для фазовой характеристики, это фильтрация функцией Хэмминга или функцией Ханна. От размера фильтрующей функции зависит то, каким количеством частот будет описана фазовая поверхность, другими словами, чем больше размер фильтра, тем более подробно будет восстановлена поверхность. Необходимо выбирать оптимальный размер фильтра, так в случае слишком большой ширины фильтрующей функции могут возникать гармонические искажения (рисунок 4в).

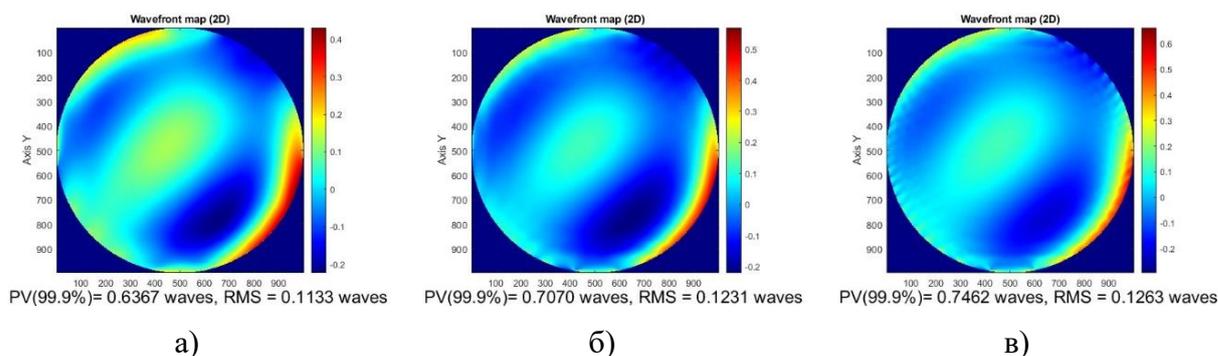


Рисунок 4 – Фаза волнового фронта: а) – восстановленная фаза волнового фронта с шириной фильтра 12 пикселей; б) – с шириной фильтра 24 пикселя; в) – с шириной фильтра 48 пикселей

Середина или пиковое значение функции маски фильтра, в большинстве случаев, должно накладываться на несущую частоту с максимальной интенсивностью. Существуют такого порядка aberrations (формы волновых фронтов) у которых несущие частоты в Фурье пространстве представляют собой не область с явно выраженным пиком интенсивности, а область с набором симметричных или несимметричных пиков интенсивности. В таком случае наложение середины или пикового значения функции фильтра будет приводить к некорректным результатам.

Основные проблемы возникают при разворачивании фазовой составляющей, именно на этом шаге обработки вносится наибольшая величина погрешности. На это оказывают влияние многие факторы, от изначального качества изображения интерферограммы и обработок до алгоритмов разворачивания фазы. Современные встроенные алгоритмы в различных программных средах достаточно простые и требовательные к выраженности фазовых разрывов. В основном они разворачивают фазу с определенной горизонтальной или вертикальной разверткой (только по столбцам или только по строкам матричного массива данных), что приводит к дополнительным фазовым выбросам (рисунок 5б) и увеличению погрешности, в большей степени параметра PV.

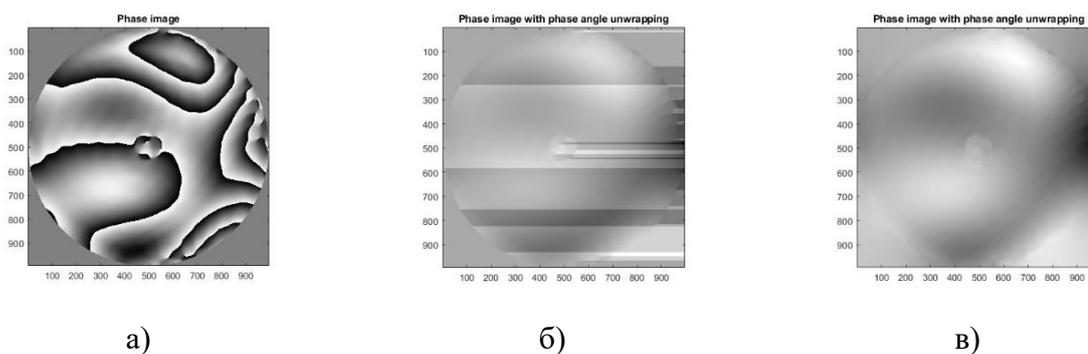


Рисунок 5 – Фаза: *а)* – исходная фаза; *б)* – фаза, развернутая встроенной функцией Matlab; *в)* – фаза, развернутая специальной функцией, основанной на уравнении переноса интенсивности

Из-за особенностей формы поверхности оптических деталей и aberrаций волнового фронта, в большинстве случаев, требуется разворачивание фазовой составляющей от центра к краям во все стороны по расходящейся траектории. В связи с этим появляется необходимость в разработке более сложных алгоритмов разворачивания, поиску новых подходов и методов для решения этой задачи.

Отдельно стоит отметить об эффективности алгоритмов двумерного разворачивания фазы, основанных на уравнении переноса интенсивности, в задачах расшифровки интерферограммы Фурье методом [6].

Заключение

В данной статье были исследованы и проанализированы ключевые факторы, влияющие на корректность результатов расшифровки одиночных интерферограмм с полосами равного наклона методом Фурье. Полученные экспериментальным путем результаты позволяют сделать выводы о том, какие особенности и в какой степени влияют на величину погрешностей при расшифровке.

Результаты исследований показали, как происходит влияние качества интерферограммы, размера ограничивающей приемной апертуры, типов фильтраций и их параметры, алгоритмов разворачивания фазы на корректность результатов расшифровки интерферограммы методом Фурье.

Предложенные инструменты и методы в этой работе дают возможность компенсировать некоторые аппаратные и методические погрешности, минимизировать

величину ошибок, позволяют в дальнейшем учитывать важные условия и параметры при расшифровке интерферограмм.

Литература

1. Романова Г. Э., Парпин М. А., Серегин Д. А. Конспект лекций по курсу «Компьютерные методы контроля оптики» //СПб: СПбГУ ИТМО. – 2011.
2. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry //JOSA. – 1982. – Т.
3. Malacara Z., Servin M. Interferogram analysis for optical testing. – CRC press, 2018.
4. Gerchberg R. W. Super-resolution through error energy reduction //Optica Acta: International Journal of Optics. – 1974. – Т. 21. – №. 9. – С. 709-720.
5. Roddier C., Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques //Applied optics. – 1987. – Т. 26. – №. 9. – С. 1668-1673.
6. Zhao Z. et al. Robust 2D phase unwrapping algorithm based on the transport of intensity equation //Measurement Science and Technology. – 2018. – Т. 30. – №. 1. – С. 015201.
7. Goodwin E. P., Wyant J. C. Field guide to interferometric optical testing. – Bellingham, WA: SPIE, 2006
8. Malacara D. (ed.). Optical shop testing. – John Wiley & Sons, 2007. – Т. 59.72. – №. 1. – С. 156-160.
9. Masy W. W. Two-dimensional fringe-pattern analysis //Applied Optics. – 1983. – Т. 22. – №. 23. – С. 3898-3901.
10. Novák J. Computer analysis of interference fields using Matlab //MATLAB conference. – 2002. – С. 406-410.
11. ГОСТ 25142-82 Изделия оптические. Методы контроля и классификации. Общие положения. Москва: Стандартинформ, 1982
12. ISO 10110-5:2010 Оптика и фотоника - Подготовка оптических элементов и сборок - Часть 5: Методы испытания для оптических элементов. Международная организация по стандартизации, 2010.