



*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

| | |
|--|----|
| Тимашова Л.Н., Сауд Алаа Двухканальная инфракрасная видеокамера с охлаждаемыми матрицами и дискретным изменением фокусного расстояния | 2 |
| Бабкин В.А., Андреев Д.С., Игнатов А.В., Гулюкин М.Н., Белоусова В.С. Волоконная оптика. Диэлектрический слой – полиэтилен. Механизм инициирования этилена в присутствии аквакомплекса хлорида алюминия в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1 на квантовом уровне | 9 |
| Соломашенко А.Б., Тимашова Л.Н., Афанасьева О.Л., Вальщиков Е.Ю., Сапцова О.А. Компонент с поверхностями свободной формы для устройства дополненной реальности | 18 |
| Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А., Сенник Б.Н. Подводные дроны и телевизионные камеры для них | 27 |
| А.С. Кузнецов Исследование магнитных носителей информации с помощью магнитоплазмонных наноструктур | 61 |
| Цю Ливэнь, Пиотровская И.Н. Анализ влияния шероховатости поверхности на точность оптических измерений в автоматическом рефрактометре и методы её моделирования | 70 |

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
Сенник 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 29.02.2024
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 608.4

ДВУХКАНАЛЬНАЯ ИНФРАКРАСНАЯ ВИДЕОКАМЕРА С ОХЛАЖДАЕМЫМИ МАТРИЦАМИ И ДИСКРЕТНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Тимашова Л.Н., Сауд Алаа

Аннотация: Статья посвящена актуальной проблеме – проектированию двухканальной видеокамеры с дискретным изменением фокусного расстояния, регистрирующей изображение объектов на большой дальности в среднем инфракрасном диапазоне при использовании охлаждаемых приемников излучения. Предложено синтезировать оптическую систему на базе объектива Кассегрена и широкоугольного объектива. Широкоугольный объектив разделяется на две части – телескопическую систему Галилея и фокусирующий объектив. Разделение на два канала предложено осуществлять с помощью установки телескопической системы Галилея и отводного плоского зеркала в мертвой зоне малого зеркала объектива Кассегрена. Приведена методика синтеза и габаритного расчета оптической системы двухканальной видеокамеры на основе параметров пространства объектов и параметров используемых матричных приемников излучения.

Ключевые слова: двухканальная видеокамера, дискретное изменение фокусного расстояния, ИК спектральный диапазон.

TWO-CHANNEL INFRARED VIDEO CAMERA WITH COOLED MATRIX AND DISCRETE FOCAL LENGTH VARIATION

L.N. Timashova, Alaa Saood

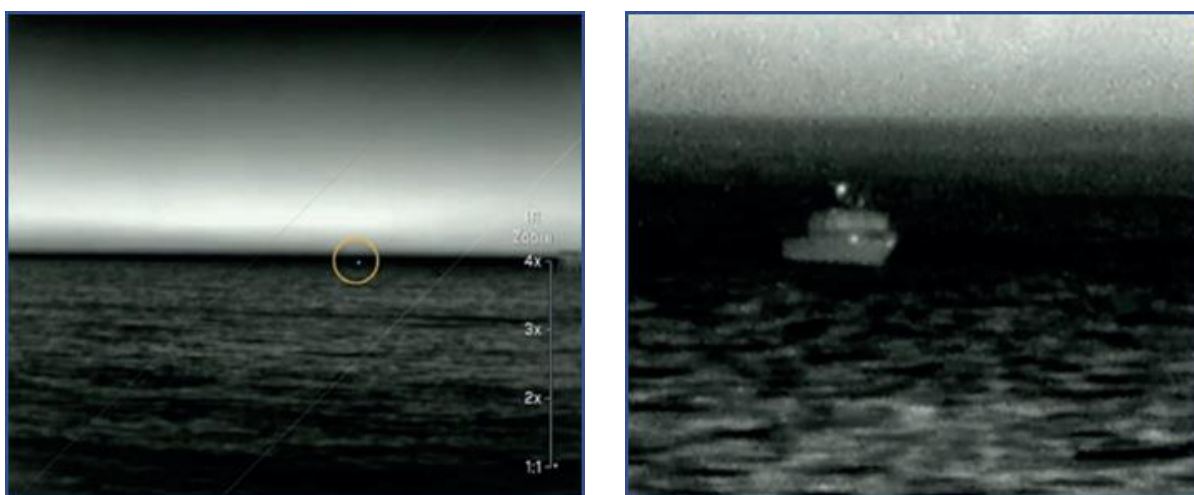
Abstract: This article presents a solution to the design of a two-channel video camera that registers images in the middle infrared range with discrete changes in focal length. The proposed method involves synthesizing an optical system using a Cassegrain objective and a wide angle lens, and separating the channels by placing a wide angle lens and flat mirror to divert rays to the focusing objective in front of the secondary mirror of the Cassegrain objective. The article also outlines a method for calculating the dimensions of the optical system parameters based on the parameters of the object space and Mid-Infrared matrix sensors.

Keywords: two-channel video camera, discrete focal length change, IR spectral range.

Введение

В настоящее время возрастает потребность в использовании тепловизионных систем переменного увеличения для среднего и дальнего инфракрасных диапазонов. Тепловизоры необходимы, например, в охранных системах наблюдения и опознавании объектов.

Изображения, полученные при разных увеличениях, показаны на рисунке 1. Изображение получено тепловизионной камерой с переменным увеличением (FLIR_M500_Cooled MWIR InSb 640x512 Focal Plane Array).



а)

б)

Рисунок 1 – Изображения морского катера, полученные при разных увеличениях видеокамеры: *a* – $28^\circ \times 21^\circ$, *б* – $1.5^\circ \times 2^\circ$

Актуальной проблемой является разработка малогабаритной двухканальной тепловизионной камеры с двойным угловым полем. Известен метод регистрации изображений с разными увеличениями с помощью отдельных видеокамер [1, 2]. Недостатком метода является параллакс изображений, что приводит к погрешности определения координат объектов.

Известна двухкамерная система регистрации с полупрозрачным зеркалом, разделяющим излучение от объекта на два канала с разными фокусными расстояниями. При большом угловом поле одного из каналов зеркало имеет большие габариты и, кроме этого, потери энергии оптического излучения на пластине (более 50 %).

В настоящей статье предложено синтезировать оптическую систему на базе объектива Кассегрена и широкоугольного объективов. Для обнаружения и распознавания изображений объектов на большой дальности используются

высокочувствительные охлаждаемые матричные приемники излучения на основе полупроводниковых соединений InSb и KPT.

Разделение на два канала предложено осуществлять с помощью установки системы Галилея широкоугольного объектива и плоского зеркала перед малым зеркалом объектива Кассегрена. Плоское зеркало направляет излучение из системы Галилея на фокусирующий объектив и МПИ 1 (InSb)

На рисунке 2 показана функциональная схема двухканальной видеокамеры.

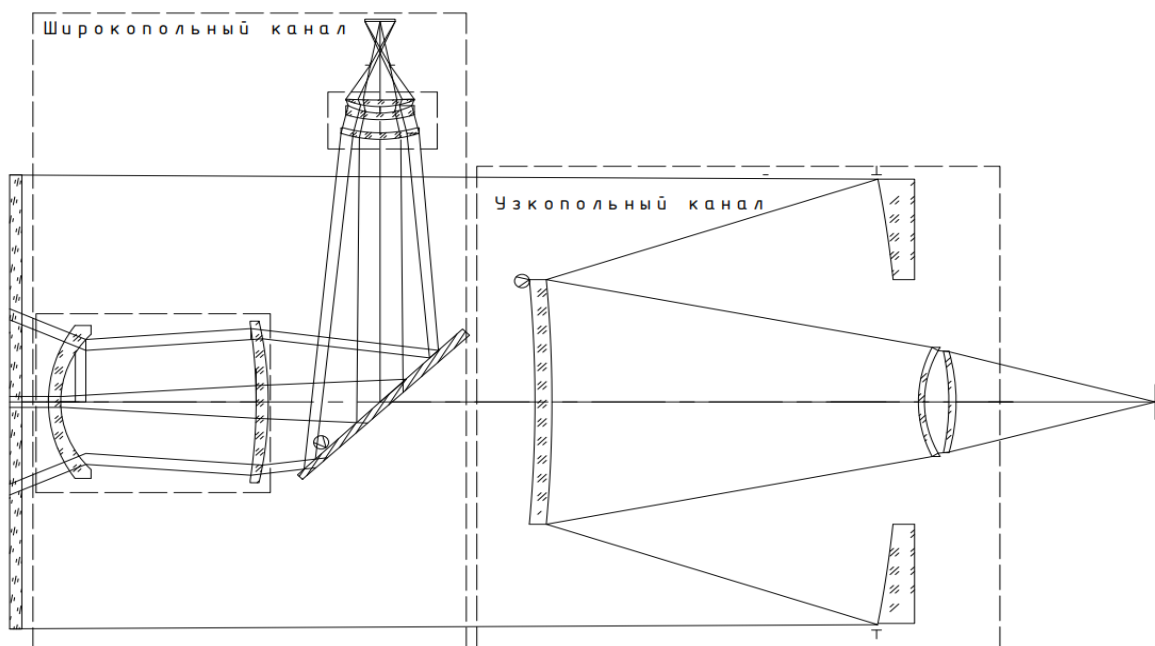


Рисунок 2 – Функциональная схема двухканальной ОЭС

Регистрация изображения объекта осуществляется следующим образом.

Наблюдение ведется в широкопольном режиме камеры – в большом угловом поле. При пеленгации объекта камера разворачивается и изображение объекта выводится на оптическую ось – в центр матрицы. Затем камеру переключают на узкопольный режим работы и наблюдают увеличенное изображение объекта (рисунок 3).

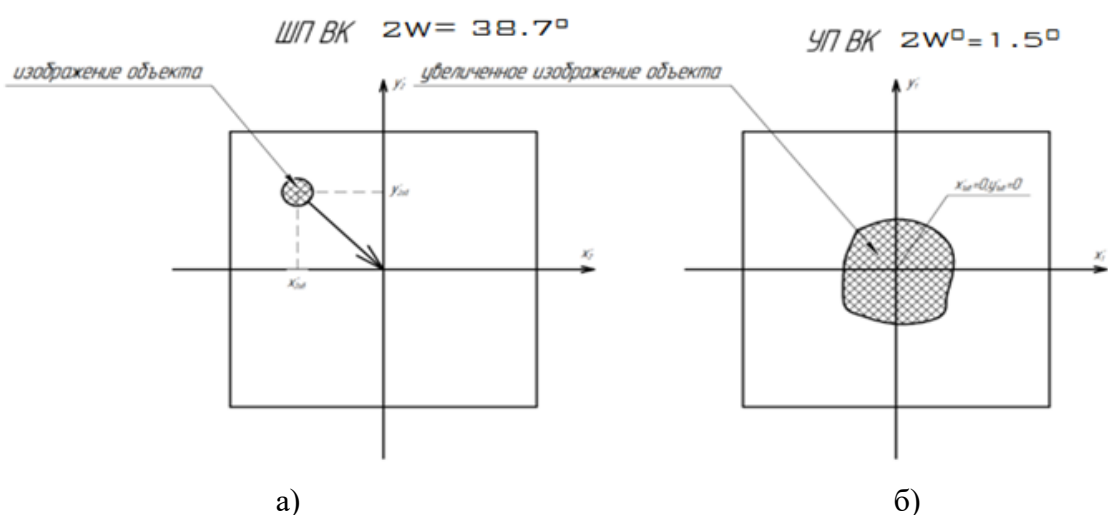


Рисунок 3 – Изображения объектов в двухкамерной ОЭС: *а* – изображение объекта на матрице широкопольной видеокамеры, *б* – увеличенное изображение объекта на матрице узкопольной видеокамеры

Особенностью более чувствительной матрицы на InSb является то, что фоточувствительные элементы удалены от входного окна на расстояние 20 мм, а диаметр входного окна равен 8 мм. Поэтому у объективов, работающих с такой матрицей, апертурной диафрагмой является входное окно матрицы.

В широкоугольном объективе, состоящем из телескопической системы и фокусирующего объектива [3], легко реализуется схема с апертурной диафрагмой на входном окне матрицы. Поэтому матрица на InSb используется в широкопольной камере.

В зеркальном объективе Кассегрена невозможно реализовать схему с вынесенной апертурной диафрагмой в плоскость фоточувствительных элементов. Поэтому в узкопольной камере используется матрица на КРТ, у которой диаметр входного окна достаточно большой и не ограничивает наклонные пучки лучей. Меньшая чувствительность этой матрицы компенсируется большим диаметром входного зрачка объектива Кассегрена.

Ниже приводится методика габаритного расчета оптической системы двухканальной видеокамеры с перепадом увеличений 25 крат и оцениваются функциональные возможности широкопольного и узкопольного каналов на примере объекта в виде пассажирского самолета с размером $2x_{об}=3500$ мм.

Габаритный расчет широкопольной видеокамеры

Параметры матрицы InSb MWIR:

- число эффективных элементов $M \times N = 640 \times 512$;
- размеры матрицы $a_M \times b_M = 9.6 \times 7.68 \text{ мм}^2$;
- размеры элемента $a_э \times b_э = 15 \times 15 \text{ мкм}^2$;
- пространственная частота элементов $\nu_M = \frac{1}{2 \cdot a_э} = 33 \text{ мм}^{-1}$.

Расчет параметров объектива широкопольной видеокамеры:

- угловое поле $2W_x \times 2W_y = 32.6^0 \times 27.65^0$;
- диагональ углового поля $2W = 38.70^0$;
- фокусное расстояние $f' = d_M / 2W = 15,8 \text{ мм}$;
- угловой размер элемента матрицы

$$W_э = \frac{a_э}{f'} = 0.001 \text{ рад.} = 3 \text{ угл. мин.}$$

Дальность объекта в режиме обнаружения определяется из условия равенства размера объекта и размера проекции элемента матрицы в плоскость объекта

$$2x_{об} = a'_э = a_э \cdot \beta = a_э \cdot \frac{s_{об}}{f'};$$

$$s_{об} = 2x_{об} \cdot \frac{f'}{a_э} = 3,68 \cdot 10^6 \text{ мм} = 3,68 \text{ км.}$$

Таким образом, начиная с дальности объекта 3,68 км широкопольная видеокамера работает в режиме обнаружения.

Габаритный расчет узкопольной видеокамеры

Параметры матрицы C615M MWIR:

- число эффективных элементов $M \times N = 640 \times 512$;
- размеры матрицы $a_M \times b_M = 9.6 \times 7.68 \text{ мм}^2$;
- размеры элемента $a_э \times b_э = 15 \times 15 \text{ мкм}^2$;
- пространственная частота элементов $\nu_M = \frac{1}{2 \cdot a_э} = 33 \text{ мм}^{-1}$.

Расчет параметров объектива узкопольной видеокамеры:

- угловое поле $2W_x \times 2W_y = 1,1^0 \times 0,9^0$;
- диагональ углового поля $2W = 1.5^0$;
- фокусное расстояние $f' = \frac{d_M}{2W} = 485 \text{ мм}$;
- угловой размер элемента матрицы

$$W_3 = \frac{a_3}{f'} = \frac{15 \cdot 10^{-3} \text{ мм}}{485} = 3 \times 10^{-5} \text{ рад.} = 6 \text{ угл. сек.}$$

Для распознавания объекта необходимо иметь на изображении около 22-х элементов матрицы или 11 периодов (критерий Джонсона). Исходя из этого критерия определяется дальность распознавания объекта:

- размер изображения $a'_{об} = 2x'_{об} = 22a_3 = 0,33 \text{ мм};$

- угловой размер объекта $2W_{об} = \frac{a'_{об}}{f} = \frac{0,33}{485} = 0,00066 \text{ рад};$

- предельная дальность распознавания объекта размером $2x_{об} = 3500 \text{ мм}$

$$S_{об} = \frac{2x_{об}}{2W_{об}} = 5,3 \cdot 10^3 \text{ мм} = 5,3 \text{ км.}$$

Заключение

Представлена методика проектирования оптической системы с двумя отдельными каналами – для обнаружения объекта используется канал с широким полем зрения, а для распознавания и идентификации объекта используется канал с узким полем зрения. Оба канала расположены на одной оптической оси за счет использования в узкопольном канале зеркального объектива Кассегрена. Регистрация изображений осуществляется охлаждаемыми приемниками излучения, обеспечивающими высокие отношения сигнал/шум изображения при больших дальностях объекта.

Данная конструкция оптической системы минимизирует габариты двухканальной видеокамеры, позволяет быстро переключаться с одного канала на другой, обеспечивая автоматическое попадание объекта в поле зрения узкопольной камеры, что существенно уменьшает время наводки на объект в узкопольном канале.

Приведен пример габаритного расчета двухканальной видеокамеры с 25 кратным дискретным изменением увеличения, обеспечивающем распознавание самолёта на дальности не менее 5,3 км.

Литература

1. Патент РФ 2697940: Инфракрасный объектив с дискретным изменением фокусного расстояния. Алимов А.Е., Толочков Д.В., 2018.
2. Патент РФ 127949: Зеркально-линзовый вариообъектив. Ермолаева Е.В. Лившиц И.Л. Васильев В.Н. Миморов И.В., 2012.
3. Патент РФ 2347251: Объектив «Рыбий глаз» для видеокамеры. Колючкин В.Я., Тимашова Л.Н., Колобов К. В., Князев А.А.

4. High Performance Thermal Night Vision Cameras. Flir M400-M500.

**ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЛОЙ – ПОЛИЭТИЛЕН.
МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЭТИЛЕНА В ПРИСУТСТВИИ
АКВАКОМПЛЕКСА ХЛОРИДА АЛЮМИНИЯ В ГЕПТАНЕ
СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА 1:1:1:1 НА КВАНТОВОМ УРОВНЕ**

Бабкин В.А.¹, Андреев Д.С.¹, Игнатов А.В.¹,

Гулюкин М.Н.², Белоусова В.С.³

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

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

³Первый 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 этилена 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 полиэтилена с заданными физикохимическими свойствами, которые необходимы для волоконной оптики.

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

**FIBER OPTICS. POLYETHYLENE DIELECTRIC LAYER. THE MECHANISM OF
ETHYLENE 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 paper, the mechanism of ethylene initiation in the presence of an aluminum chloride – water catalyst in a solvent heptane of stoichiometric composition 1:1:1:1 was studied by the 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 of polyethylene with specified physicochemical properties characteristic of fiber optics.

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

Введение

Этилен - один из самых важных органических соединений, который имеет широкий спектр применений в различных отраслях промышленности, в частности, в медицине и волоконной оптике. Волоконная оптика – это передовая технология передачи света посредством тонких стеклянных или пластиковых волокон. Она нашла применение в различных областях, включая телекоммуникации, медицину, научные исследования и промышленность. Одним из ключевых компонентов волоконной оптики является оптическое волокно, которое обеспечивает передачу световых сигналов на большие расстояния. Этилен используется для создания пластиковых материалов, которые являются основой волокон, обеспечивая их прочность, гибкость и стабильность. Применение этилена в процессе производства оптических волокон позволяет улучшить их качество и производительность. Свойства этилена делают его хорошим материалом для создания оптических волокон. Он обладает высокой прозрачностью для света, что позволяет сигналам передаваться на большие расстояния без потерь качества. Кроме того, этилен обладает высокой механической прочностью, что делает волокна устойчивыми к повреждениям и износу. Это особенно важно при

прокладке волоконных кабелей на большие расстояния, например, подводных коммуникационных линий.

Полиэтилен является важным материалом в производстве оптических кабелей (телекоммуникационных, передачи данных, мониторинга окружающей среды и др.) и применяется для создания диэлектрического слоя, оболочки кабеля, а также других элементов. Диэлектрический слой оптического волокна представляет собой покрытие, которое защищает волокно от внешних воздействий. Он может быть однослойным или многослойным. В многослойных диэлектрических слоях используются материалы с различными показателями преломления, что позволяет создавать конструкции с заданными свойствами. Оболочка оптического кабеля защищает диэлектрический слой и волокно от механических повреждений, а также от воздействия окружающей среды [1]. Из полиэтилена также изготавливаются другие элементы оптических кабелей, такие как сердечник, кордели (заполнители) и т.д. Сердечник представляет собой несущую конструкцию кабеля, которая обеспечивает его прочность и жесткость. Кордели используются для заполнения пространства между сердцевиной и оболочкой. Кроме того, полиэтилен может использоваться для производства оптических кабелей, которые не содержат металлических элементов. В этом случае армирующие элементы выполняются из неорганических или полимерных материалов. Такие кабели имеют ряд преимуществ, в том числе: меньший вес, повышенную стойкость к механическим воздействиям и увеличенный срок службы [1].

Применение этилена в волоконной оптике и медицине 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 полиэтилена в данном случае имеет огромное значение. Для того, чтобы получать полиэтилен с заданными физико-химическими свойствами и параметрами, необходимо этим процессом получения полиэтилена – полимеризацией – управлять. Такая возможность в процессе производства полиэтилена 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_2H_4) : 1 (гептан), можно получать полиэтилен с заранее заданными свойствами [2, 3]. 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, так как в рамках известных каталитических систем этилен трудно полимеризуется по катионному механизму. В связи с этим, изучение механизма инициирования этилена 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 полиэтилена с новыми, уникальными свойствами, направленными на улучшение физикохимических свойств полиэтилена, применяемого в волоконной оптике. Кроме того, несомненный интерес представляет внедрение в практику новых, более эффективных каталитических систем катионной полимеризации этилена, так как в рамках известных катализаторов этилен трудно полимеризуемый по катионному механизму.

В связи с этим, целью настоящей работы является расчёт на электронном уровне механизма инициирования этилена 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 $\text{AlCl}_3\text{-H}_2\text{O}$ – этилен – гептан стехиометрического состава 1:1:1:1 был выбран классический квантовохимический метод *ab initio* RHF, который используется для расчета электронной структуры молекул, основанный на самосогласованном решении уравнений Хартри-Фока. В этом методе спины всех электронов в молекуле считаются спаренными. Метод RHF является наиболее распространенным методом *ab initio*, поскольку он относительно прост в реализации и даёт достаточно точные результаты [4-6]. 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 [7], основанная на исходном коде PC GAMESS [8]. Моделирование молекулы производилось в программе MacMolPlt [9]. Нами было проведено

исследование механизма инициирования, используя методику, которая ранее была применена в работах [10-12]. Методика состоит в следующем. Чтобы начать моделирование, нужно иметь предварительно оптимизированную модель этилена. 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 завершенным (см. рисунок 1).

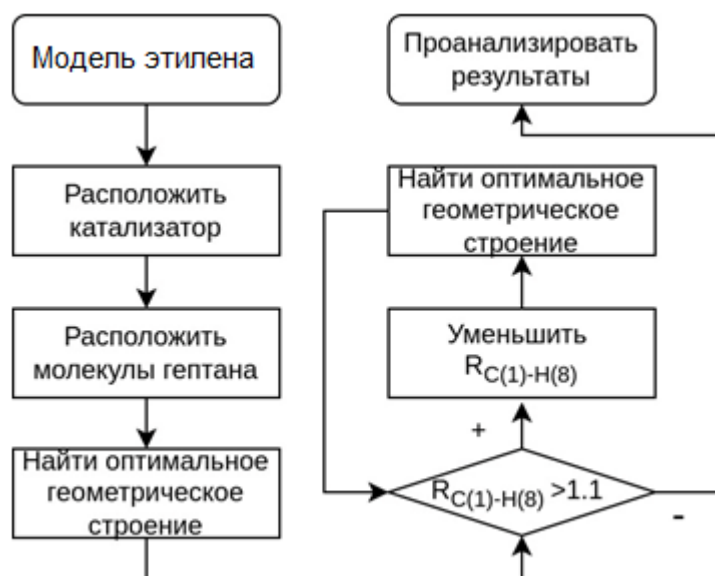


Рисунок 1 – Блок-схема квантовохимического моделирования механизма инициирования

В качестве координаты реакции нами была выбрана связь $R_{C(1)-H(8)}$. Мультиплетность M была равна 1, так как $M=2S+1$, где S - суммарный спин, который в данном случае равен 0, поскольку все электроны спарены. Важно отметить, что на каждом шаге взаимодействия катализатора и этилена выполнялся закон сохранения заряда.

Результаты расчетов

Результаты расчетов позволяют нам получить более подробное представление о механизме инициирования катионной полимеризации этилена в присутствии катализатора $AlCl_3-H_2O$ в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1. На рисунке 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.

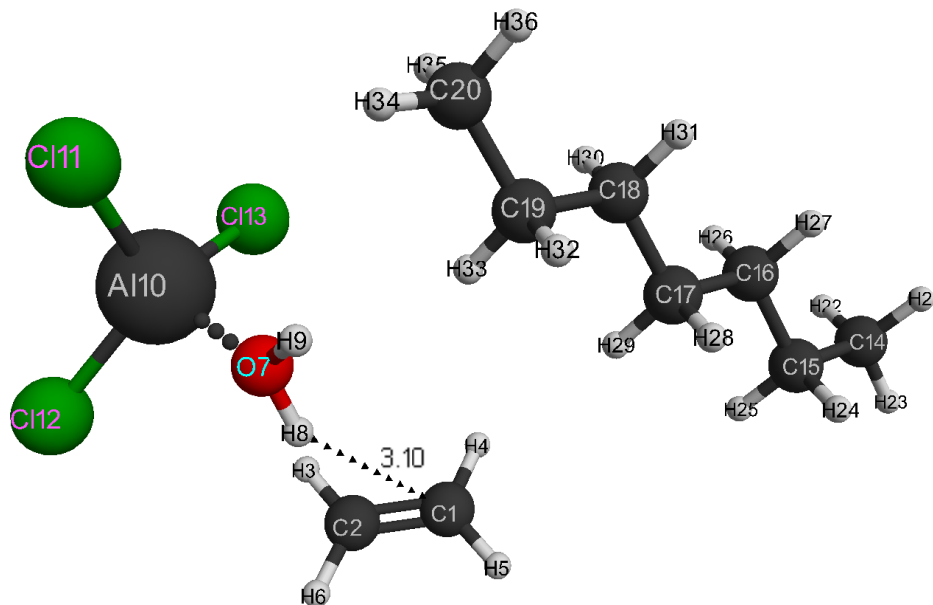


Рисунок 2 – Структура исходной модели в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1

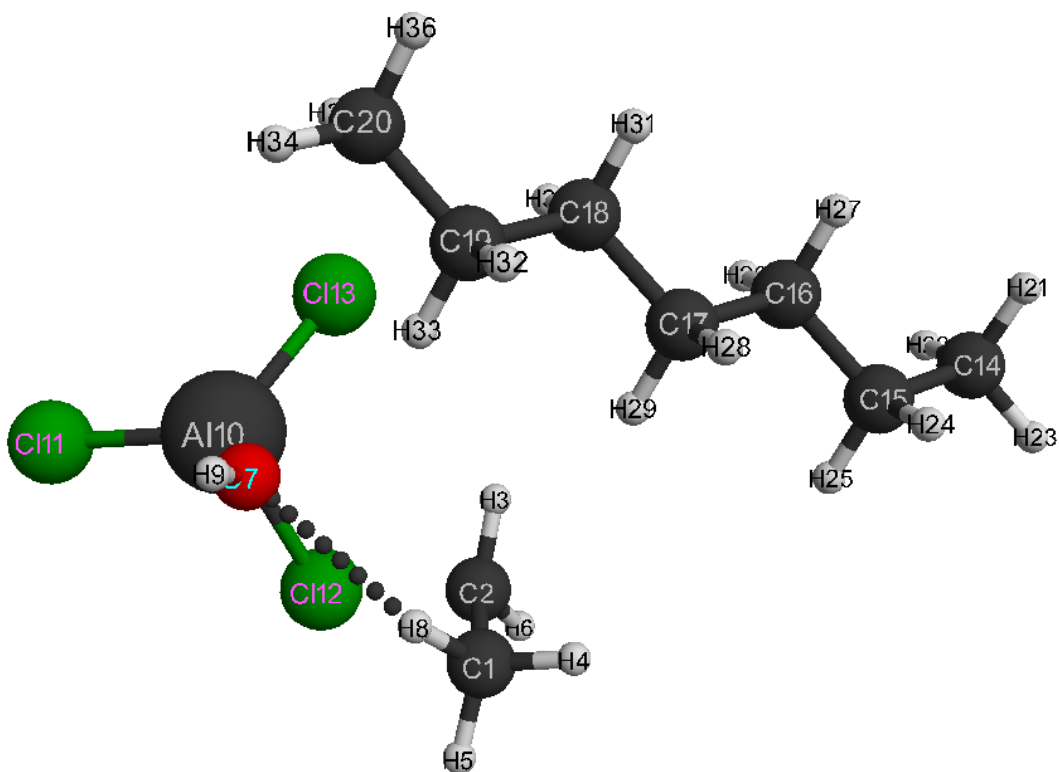


Рисунок 3 – Конечная структура взаимодействия

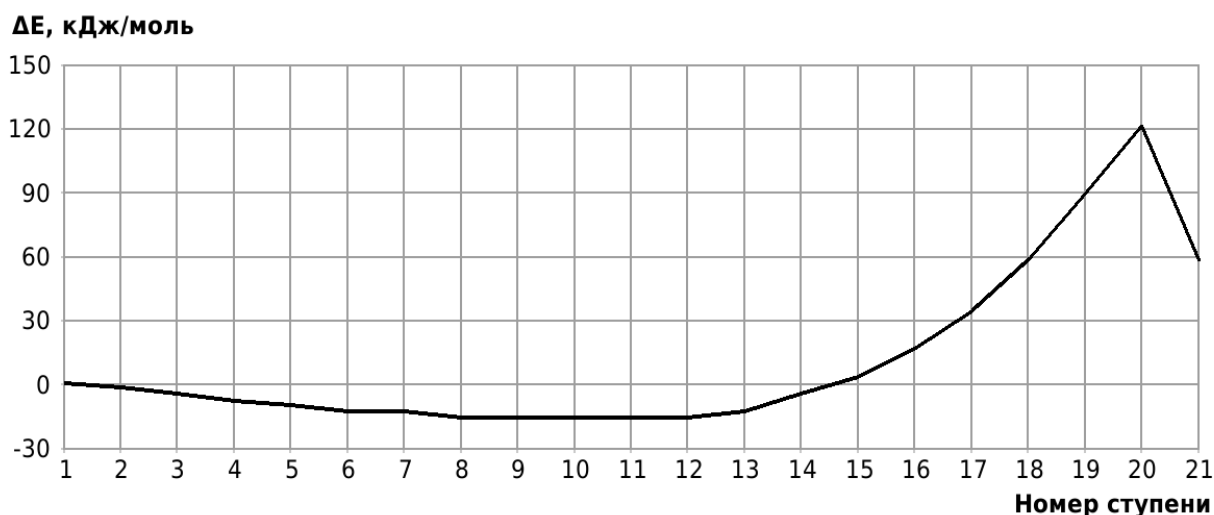


Рисунок 4 – Изменение общей энергии (ΔE) вдоль направления реакции (I)

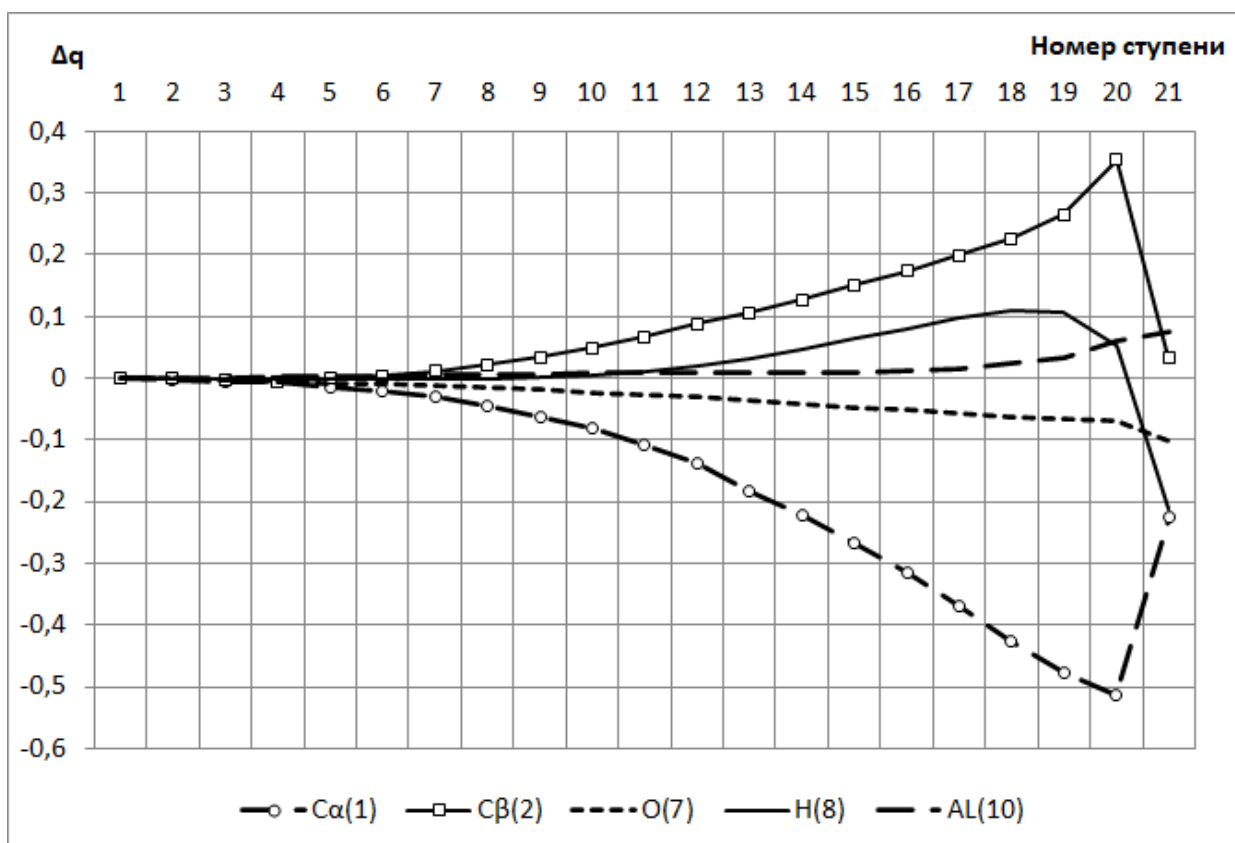


Рисунок 5 – Изменение зарядов вдоль координаты реакции на атомах, непосредственно участвующих в реакции ($C_{\alpha}(1)$, $C_{\beta}(2)$, $O(7)$, $H(8)$, $Al(10)$)

В процессе реакции происходит одновременный разрыв связей $O(7)-H(8)$ и превращение двойной $C(1)=C(2)$ связи в одинарную и формирование новой связи – $C(1)-H(8)$ и противоиона $[AlCl_3 - OH]^-$ (см. рисунок 2). Энергетический барьер реакции равен 137 кДж/моль, а энтальпия равна 74 кДж/моль. Реакция носит эндотермический характер.

Заключение

Таким образом, нами была изучена стадия инициирования катионной полимеризации этилена под действием комплексного катализатора $\text{AlCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ в гептане стехиометрического состава 1:1:1:1. Получена электронная структура образовавшегося активного центра. Расчитаны значения E_A и Q этой реакции. Установлено, что реакция эндотермична и носит черты согласованных взаимодействий. Полученные данные квантовохимических расчётов ($E_A = 137$ кДж/моль и $Q = 74$ 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 полиэтилена с заданными физикохимическими свойствами, которые необходимы для волоконной оптики.

Литература

1. Оптические волокна и кабели. Классификация, характеристики и материалы : сайт / – Банк лекций Siblec.ru. – 2023. – URL: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/volonno-opticheskie-kabeli-i-linii-svyazi/3-opticheskie-volokna-i-kabeli-klassifikatsiya-kharakteristiki-i-materialy> (дата обращения: 18.09.2023). – Текст : электронный.
2. Кеннеди Дж. Катионная полимеризация олефинов // М.: Мир, – 1978. – 431 с.
3. Бабкин В.А., Заиков Г.Е., Минскер К.С. Квантовохимические аспекты катионной полимеризации олефинов // Уфа: Гилем, – 1996. – 188 с.
4. Froese Fischer, C. General Hartree-Fock program // Computer Physics Communications, 1987. – Vol. 43 (3). – pp. 355–365.
5. Ермаков А.И. Квантовая механика и квантовая химия. // М: Юрайт, - 2016. - 555 с.
6. Цирельсон, В.Г. Квантовая химия. Молекулы, молекулярные системы и твердые тела. // М: Бином, –2010. – 422 с.
7. 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.
8. Schmidt M.W., Baldridge 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.

9. Bode B.M., Gordon M.S. MacMolPlt: A Graphical User Interface for GAMESS // Journal of Molecular Graphics. –1998. –№16. – pp. 133-138.

10. 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.

11. 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. Bakholdin, A.P. Knyazev, V.S. Belousova, V.T. Fomichev, M.I. Artsis, G.E. Zaikov // Oxidation Communications. - 2019. - Vol. 42, № 4. - pp. 437-442.

12. Babkin, V.A. On the mechanism of cationic polymerisation of p-isopropylstyrene in the presence of a complex catalyst boron fluoride-water / V.A. Babkin, D.S. Andreev, A.V. Ignatov, L.M. Lisina, V.S. Belousova, V.T. Fomichev, K.Yu. Prochukhan, M.I. Artsis, G.E. Zaikov // Oxidation Communications. - 2019. - Vol. 42, № 1. - pp. 56-62.

КОМПОНЕНТ С ПОВЕРХНОСТЯМИ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Соломашенко А.Б.¹, Тимашова Л.Н.¹, Афанасьева О.Л.¹, Вальщикова Е.Ю.¹,
Сапцова О.А.²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

²МФТИ (ГУ) Долгопрудный, Россия

Аннотация: В данной статье описан компонент для устройства дополненной реальности на основе двух линз свободной формы. Первая линза состоит из двух асферических (до 10 порядка) и одной плоской полированной под углом поверхности для ввода излучения от микродисплея, его последующего увеличения и вывода наблюдателю, а вторая линза является компенсатором для неискаженного наблюдения окружающего пространства. Преимуществом такой реализации является большой для такого типа элементов размер выходного зрачка (до 8 мм) и невысокое значение дисторсии (до 5 %) при толщине основной линзы всего 15 мм.

Ключевые слова: линза свободной формы, выходной зрачок, рабочее угловое поле.

COMPONENT WITH FREE FORM SURFACES FOR AUGMENTED REALITY DISPLAY

Solomashenko A.B.¹, Timashova L.N.¹, Afanaseva O.L.¹, Valshchikov E. Y.¹,
Sapsova O.A.²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

Abstract: The article describes a component for an augmented reality device based on two free-form lenses. The first lens consists of two aspherical (up to 10 orders) and one flat surface polished at an angle for the input of radiation from the microdisplay, its subsequent magnification and output to the observer, and the second lens is a compensator for undistorted observation of the surrounding space. The advantage of this implementation is the large size of the exit pupil for this type of element (up to 8 mm) and a low distortion value (up to 5%) with a thickness of the main lens of only 15 mm.

Keywords: free-form lens, exit pupil, field of view.

Введение

В настоящее время активно развивается направление, связанное с расчётом и изготовлением оптических компонентов для систем дополненной реальности [1, 2], которые позволяют накладывать знако-графическую, текстовую и другую дополнительную информацию, а также виртуальные изображения на сцену реального мира [3]. Благодаря этому подобные системы находят применение в таких сферах, как обучение, медицина, ремонт и техническое обслуживание изделий и т.п. Для вывода дополнительной информации существует несколько типов оптических элементов, к которым относятся: плоские полупрозрачные зеркала и светоделительные кубы, сферические и асферические «комбинеры», призмы свободной формы, голографические и призмные волноводы, метаповерхности и др.

Основными параметрами системы дополненной реальности являются размер рабочего углового поля, размер выходного зрачка, а также различные параметры качества изображения, в т.ч. и абберационные. Размер рабочего углового поля определяет размер той части поля зрения пользователя, в которой можно выводить дополнительную информацию и виртуальные изображения. Размер выходного зрачка определяет линейную область пространства, перемещаясь внутри которой глаз пользователя продолжает наблюдать все представляемое ему изображение. Соответственно, чем больше два этих параметра, тем лучше.

Призмы и «комбинеры» обладают наиболее простой конструкцией и обеспечивают высокое качество изображения, хотя рабочее угловое поле систем уступает волноводным. Компоненты волноводного типа являются более сложными с точки зрения технологии изготовления, но за счет очень тонкой (от 1 до 4 мм) пластины волновода позволяют иметь форм-фактор, подобный традиционным очкам, что является одним из важнейших факторов их популярности на потребительском рынке. Кроме того, благодаря методам расширения выходного зрачка решается проблема юстировки бинокулярной системы под индивидуальную базу глаз пользователя. Тем не менее существует проблема низкой эффективности и качества изображения систем на основе волноводов [4].

При использовании призм свободной формы можно достичь приемлемого рабочего поля зрения при сохранении компактности за счёт использования в качестве оптической системы склейки (или сборки) только из двух компонентов. Для призм свободной формы проблематично реализовать зрачок большого размера, она имеет значительную толщину по оси, а также присутствуют большие aberrации

(преимущественно дисторсия). В то же время усовершенствования методов расчёта оптических систем и производственных возможностей позволили частично преодолеть эти проблемы.

Другим важным параметром оптических элементов для систем дополненной реальности являются их масса и габаритные размеры, т.к. разработка компактных и легких элементов, позволит обеспечить комфорт при ношении. По этой причине многие компании пытаются разрабатывать пластиковые оптические элементы, которые ориентированы на массовый рынок и обеспечивают возможность снизить цену продукции. Пластиковые оптические элементы ориентированы на массовое производство и могут быть получены литьем или литьем под давлением. Они имеют более узкий диапазон показателя преломления (около 1,49–1,58), но имеют меньшую плотность по сравнению со стеклом, т.е. весят почти вдвое меньше стеклянных линз или других элементов при идентичных объемах.

Из рассмотренных выше элементов, которые с одной стороны, могут обеспечить высокие оптические параметры (рабочее угловое поле и выходной зрачок) и компактность, а с другой, могут быть получены не только из стекла, но и из оптического пластика, такого как акрил (ПММА) или поликарбонат (ПК), можно выделить элементы свободной формы. Они содержат одну или несколько поверхностей свободной формы, к которым относятся любые обладающие оптическим действием поверхности, кроме сферических и плоских поверхностей, а именно асферические поверхности. Наиболее распространены для систем отображения информации, так называемые призмы свободной формы [5], которые объединяют в себе одновременно функцию светоделительного куба для возможности одновременного наблюдения окружающего пространства и объектива для коллимирования излучения.

Предлагаемая в рамках статьи система основана на линзах свободной формы. В данном элементе изменение асферических поверхностей происходит сразу по двум координатам, поэтому он является линзой [6]. Оптический элемент в виде линзы свободной формы с асферическими поверхностями, выполняет функцию окуляра с вынесенным выходным зрачком. В данном случае изображение с дисплея передается в бесконечность за счет полного внутреннего отражения излучения от первой поверхности и отражения от второй полупрозрачной поверхности. Для дополнительного реального наблюдения на полупрозрачную поверхность предусмотрен компенсатор, который также представляет собой линзу свободной формы с двумя асферическими поверхностями. Компенсатор может быть наклеен на основную линзу или располагаться с небольшим воздушным зазором. Такие системы

предназначены для наблюдения человеком как виртуального динамического изображения на дисплее (при отсутствии компенсатора), так и изображения дополненной реальности на фоне окружающей среды. Преимуществом такой реализации является достижение сравнительно большого для таких систем размера выходного зрачка при общей толщине основной линзы, не превышающей 15 мм, т.е. при сохранении компактности.

При моделировании линзы свободной формы за основу была взята известная схема объектива Авангард [7]. Система как правило состоит из трёх зеркал. Конструктивно первое и последнее по ходу лучей зеркала могут быть выполнены в виде одной детали. Центры поверхностей зеркал совмещены в одной точке, лежащей в общей плоскости предмета и изображения.

Поскольку радиусы кривизны связаны соотношением, обеспечивающим исправление меридиональной составляющей астигматизма,

$$R_1 = R_3 = 2 \cdot R_2,$$

то фокальные плоскости первого и последнего зеркал примерно совпадают с вершиной второго зеркала (рисунок 1а), чем обеспечивается с достаточной точностью телецентрический ход главных лучей в пространствах предметов и изображений [7].

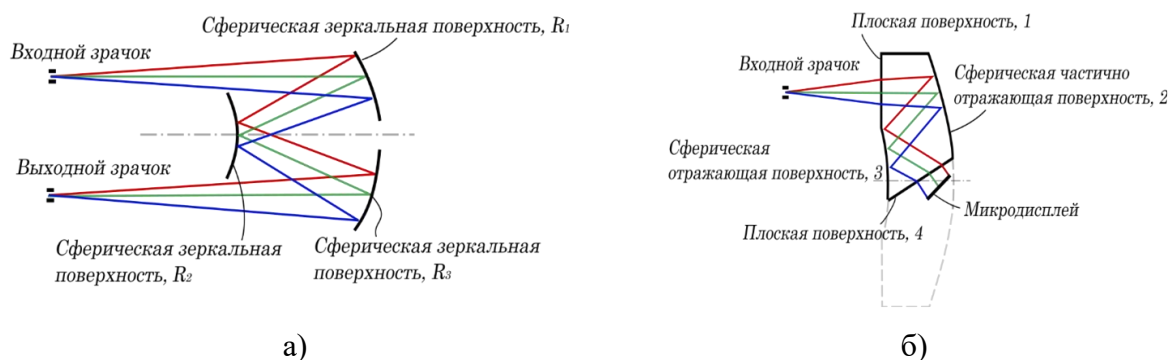


Рисунок 1 – Схема зеркальной системы: а – ход лучей в зеркальной системе, б – трассировка лучей в асферической линзе в обратном ходе

Преимуществом данной схемы является её симметрия, благодаря чему расчётная дисторсия отсутствует. Система, построенная по такому принципу, была взята в качестве отправной точки для дальнейшей оптимизации. Оптический элемент получен путем замены в данной схеме воздушного промежутка стеклом и ограничением диаметра линзы наклонной плоской поверхностью, за которой располагается дисплей как показано на рисунок 1б. Излучение от дисплея через первую плоскую наклонную поверхность вводится в линзу, направляется на первую зеркальную асферическую поверхность, отражается и попадает на вторую частично отражающую асферическую

поверхность, снова отражается и через вторую плоскую поверхность выводится из линзы в зрачок глаза.

Система описывается в обратном ходе лучей, поэтому область расположения глаза соответствует обозначению входной зрачок. На первом этапе задавались следующие параметры: диаметр входного зрачка принимался равным 0,1 мм, угловое поле равным одному градусу, поверхность 1 задавалась плоской, 2 и 3 сферическими с зеркальными покрытиями, 4 плоской, наклоненной по отношению к оптической оси линзы. На каждом этапе оптимизации, параметры постепенно увеличивались. Радиуса линз подбирались под требуемое фокусное расстояние 30 мм, соответствующее дисплею диагональю 0,5 дюйма и рабочему угловому полю элемента 20 градусов, а также максимальной толщине линзы не более 15 мм и удаление зрачка порядка 20 мм. Выбрано стекло с высоким показателем преломления 1,81 (марка ТФ10). В качестве дисплея в данной системе моделировался монохромный зеленый OLED дисплей SVGA050 диагональю 0,5 дюйма, разрешением $800 (\times 3) \times 600$ и размером пикселя 12,6 мкм.

На втором этапе оптимизации, когда aberrации и качество системы стали удовлетворительным, сферические поверхности были заменены на асферические, после чего проводилась оптимизация по коэффициентам 2–8 порядков (2) с учётом заданных ограничений.

$$y = A_2x^2 + A_4x^4 + A_6x^6 + A_8x^8,$$

где A_i коэффициенты асферических поверхностей.

Коэффициенты поверхностей линзы свободной формы приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1 – Коэффициенты асферических поверхностей

| Коэффициент | Поверхность 2 | Поверхность 3 |
|-------------|------------------------|-----------------------|
| A_2 | $-1,116 \cdot 10^{-3}$ | $8,115 \cdot 10^{-8}$ |
| A_4 | 0,015 | $1,745 \cdot 10^{-5}$ |
| A_6 | $-1,116 \cdot 10^{-3}$ | $8,115 \cdot 10^{-8}$ |
| A_8 | 0,015 | $1,745 \cdot 10^{-5}$ |

Таким образом была синтезирована миниатюрная линза свободной формы с двумя асферическими поверхностями (рисунок 2). Выпуклая асферическая поверхность 2 выполняется полупрозрачной для того, чтобы при использовании компенсатора, расположенного за полупрозрачной поверхностью, было возможно наблюдение реальной окружающей среды.

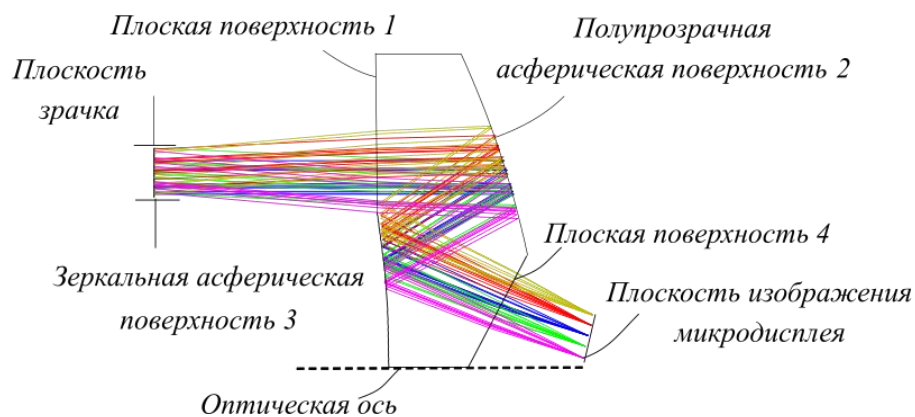


Рисунок 2 – Меридиональное сечение зеркальной асферической линзы

Количественная оценка параметров линзы проводилась по двум основным параметрам, характерным для оптических элементов систем дополненной реальности, а именно: модуляционной передаточной функции (МПФ) и дисторсии. Как показано на рисунок 3б, максимальное значение дисторсии не превышает 4.33%. Графики модуляционной передаточной функции системы приведены на рисунке 3а. По уровню модуляции 0.5 значение составляет 18 л/мм, а по уровню 0.3 – порядка 25 л/мм. Таким образом, при небольшой толщине линзы и применении асферических поверхностей не высокого порядка (только 8 порядка, что более выгодно с точки зрения технологического процесса изготовления и контроля детали) достигнуто приемлемое для таких систем качество изображения.

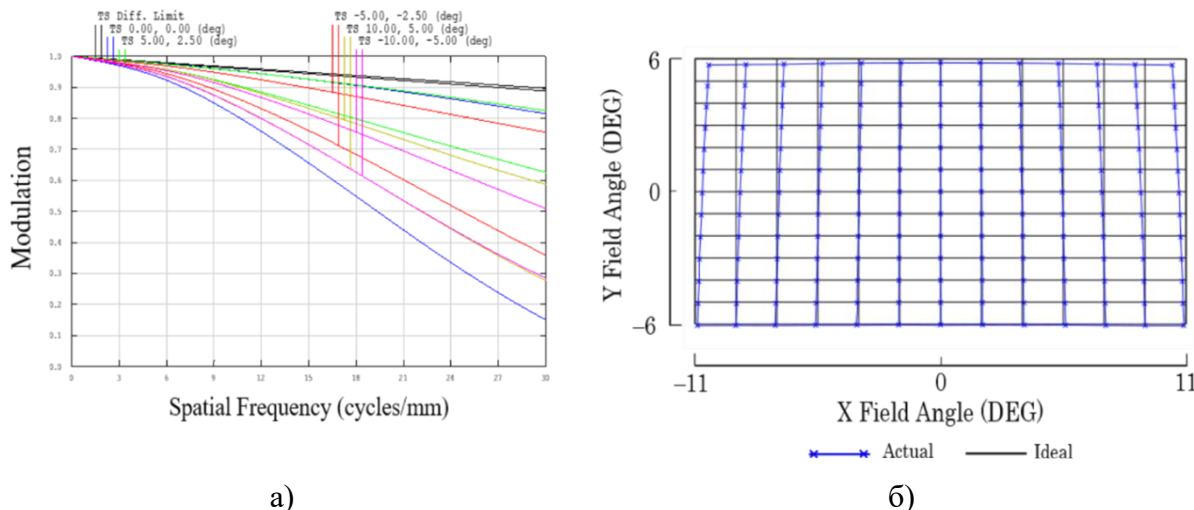


Рисунок 3 – Оценка параметров линзы: а – графики МПФ, б – сетка дисторсии

При этом, в отличие от некоторых известных реализаций, никаких дополнительных оптических элементов для коррекции aberrаций между асферической линзой свободной формы и дисплеем не устанавливается, что упрощает процесс сборки и делает конструкцию более компактной. Одновременное наблюдение объектов

реального мира через асферическую линзу осуществляется через полупрозрачную поверхность с помощью вспомогательной линзы (рис.4), которая сделана из такого же стекла, что и асферическая линза и которая накладывается на нее. Фокусное расстояние линзы свободной формы с вспомогательной линзой равняется бесконечности. Наблюдение реальной среды осуществляется в видимом диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 0.48 - 0.65$ мкм.

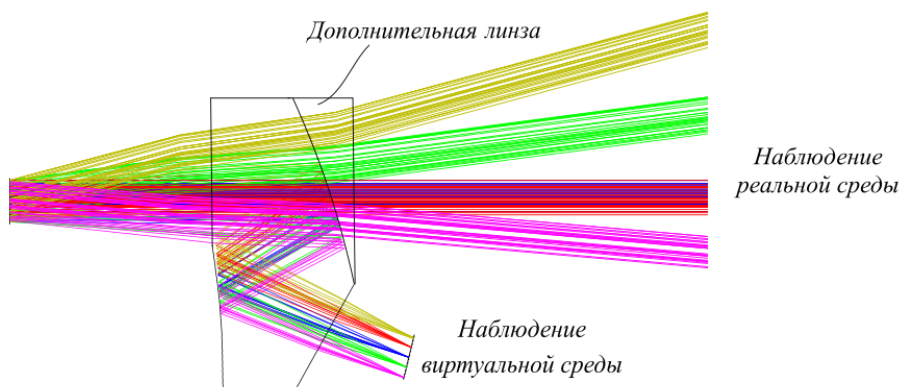


Рисунок 4 – Склеенная линза для виртуального и реального наблюдения

Система на основе асферической линзы свободной формы обеспечивает высокое значение размера зрачка (для элементов свободной формы обычно не превышает 4-6 мм) и его выноса, что удобно как с точки зрения удобства компоновки и размещения такой в конструкции с форм-фактором, приближенным к традиционным очкам, чтобы не пересекаться с бровью пользователя, так и с точки зрения менее жестких требований к необходимости индивидуальной подстройки под базу глаз конкретного пользователя. Параметры компонента указаны на таблице 2.

Т а б л и ц а 2 – Параметры синтезированного компонента

| | |
|-------------------------|------------------|
| Рабочее поле зрения | 20° по диагонали |
| Толщина линзы | 15 мм |
| Вынос зрачка | 24 мм |
| Фокальное расстояние | 30 мм |
| Диаметр входного зрачка | 8 мм |

Дальнейшая оптимизация параметров такой линзы, а также поиск компромиссных решений между значением рабочего углового поля и размером выходного зрачка может позволить перейти к более низким значениям показателя преломления материала, а значит и применению оптического пластика, что существенно снизит ее массу.

Выводы

В данном исследовании предложен подход к реализации компонента для устройств дополненной реальности на основе двух линз свободной формы, одна из которых является компенсатором для наблюдения окружающего пространства. В результате моделирования получены следующие параметры компонента: размер выходного зрачка 8 мм, удаление 24 мм, толщина основной линзы 15 мм, общая толщина 17 мм, рабочее угловое поле 20 градусов по диагонали.

Преимуществом такого подхода является получение высокого размера выходного зрачка 8 мм и малое значение дисторсии 4,33% для такого типа оптических элементов, обеспечиваемые, кроме того, без применения дополнительных (кроме линзы свободной формы) оптических компонентов. Следует отметить, что данный элемент оптимизировался для оптического материала с высоким показателем преломления, а значение рабочего углового поля уступает аналогичным системам. Тем не менее, мы считаем, что при дальнейшей оптимизации параметров данный подход к проектированию и синтезу оптических элементов свободной формы может применяться в устройствах отображения информации и дополненной реальности.

Литература

1. D. Cheng, Q. Wang, Y. Liu, H. Chen, D. Ni, X. Wang, C. Yao, Q. Hou, W. Hou, G. Luo, and Y. Wang, "Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook," *Light: Adv. Manuf.* 2021. 2, P. 24.
2. T. Zhan, Y. Kun, J. Xiong, Z. He, and S. Wu, "Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges," *iScience.* 2020. 23(8), P. 101397.
3. H. Hua and B. Javidi, "Augmented reality: easy on the eyes," *Opt. Photon. News.* 2015. 26(2), P. 26–33.
4. A. Solomashenko, D. Lushnikov, M. Shishova, O. Afanaseva, and E. Zlokazov, "Image Quality for Near-Eye Display Based on Holographic Waveguides," *Applied Sciences.* 2022. 12(21), P. 11136.
5. J.P. Rolland, M. A. Davies, T.J. Suleski, C. Evans, A. Bauer, J.C. Lambropoulos, and K. Falaggis, "Freeform optics for imaging," *Optica.* 2021. 8, P. 161–176.
6. Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д., Андреев Л.Н., Агальцова Н.А., Ишанин Г.Г., Василевский О.Н., Родионов С.А. Вычислительная оптика: справочник. – Машиностроение, 1984.

7. L. Wei, Y. Li, J. Jing, L. Feng, and J. Zhou, “Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface,” *Opt. Express*. 2018. 26, P. 8550–8565.

ПОДВОДНЫЕ ДРОНЫ И ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ НИХ

Волков В.Г.¹, Гиндин П.Д.¹, Карпов В.В.¹, Кузнецов С.А.¹, Сеник Б.Н.^{2,3}

¹Акционерное общество «Московский завод «Сапфир» (АО «МЗ «Сапфир»), г. Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва

³Московский институт радиотехники, электроники и автоматики – Российский технологический университет (РТУ – МИРЭА), г. Москва

E-mail: volkvik2009@yandex.ru, bogdan_senik@mail.ru

Аннотация: Рассматриваются подводные дроны и телевизионные камеры для них. Приведены основные параметры устройств, внешний вид, оценены их возможности, показан характер изображения.

Ключевые слова: подводный дрон, телевизионная камера, разрешение, глубина погружения.

UNDERWATER DRONES AND TV CAMERAS FOR THEM

Volkov V.G.¹, Gindin P.D.¹, Karpov V.V.¹, Kuznetsov S.A.¹, Sennik B.N.^{2,3}

¹Joint-stock company "Moscow plant "Saphir" (J-sc "MP "Saphir"), Moscow

²Bauman Moscow State Technical University, (Bauman Moscow State Technical University), Moscow

³Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation – Russian Technological University (MIREA-RTU), Moscow

E-mail: volkvik2009@yandex.ru, bogdan_senik@mail.ru

Abstract: Underwater drones and television cameras for them are being considered. The main parameters of the devices and their appearance are given, their capabilities are evaluated, and the nature of the image is shown.

Keywords: underwater drone, TV camera, resolution, depth of immersion.

Общие сведения о подводных дронах

Подводные дроны нашли широкое применение в гражданской и военной технике [1 - 3]. Они сокращают дорогостоящее время работы водолазов, используются для поисковых и спасательных работ под водой, научных исследований, подводного позиционирования и мониторинга, подводной фото- и видеосъемки, инспекции плотин, нефтяных вышек, нефтегазовых разработок на шельфе, добывающих платформ, буровых установок, дамб, труб и оборудования под водой, обслуживания подводных сооружений и судов, промеров глубины, обследования затонувших кораблей, обнаружения рыбы и их ловли, подводной охоты. В военной технике подводные дроны используются для разведки, обнаружения подводных лодок, боевых пловцов, минных заграждений и для уничтожения указанных объектов. В данной статье речь пойдет о подводных дронах гражданского применения.

Подводный дрон – это герметичная электронно-механическая система, способная стать эффективным инструментом при исследовании морских глубин. Океанологи считают, что человечество знакомо с мировым океаном и его обитателями довольно поверхностно, а до 95% морских пространств все еще ждут своих исследователей [1, 2].

В последние годы появилась целая плеяда относительно небольших необитаемых подводных аппаратов, обладающих высокой автономностью и живучестью. По-английски они именуется ROV (Remotely operated underwater vehicle). Эти машины обычно комплектуются одним или несколькими электродвигателями, системой подводного ориентирования, прожекторами и видеокамерой. Некоторые из них могут использоваться как дрон для рыбалки [1].

Все подводные дроны можно разделить на 3 большие категории [3]:

- уже упоминавшиеся военные дроны служат для обезвреживания морских мин, патрулирования территории стоянки военных кораблей, для следовательских и спасательных целей при затоплении кораблей и иных объектов, представляющих ценность для военных;
- исследовательские дроны применяются научными экспедициями для исследования морских глубин, пещер, и иных геологических подводных образований, так же применяется для взятия образцов грунта и наблюдение за подводной биосферой;
- промышленные дроны используется в основном для обслуживания подводных элементов сооружений и коммуникаций. Прокладка оптоволоконных сетей на дне океана, по которым проходит 90% интернет-трафика в мире, осуществляется с

помощью специальных механизмов. По сути, это автономные роботы, выполняющие заранее заложенные в них задачи. Подводные дроны оснащены манипуляторами, которые имеют 6 степеней свободы и заканчиваются либо захватами, либо насадкой для конкретной операции, такой как сварочный электрод или отрезные ножницы.

Для управления дронами приходится учитывать тот факт, что вода не способствует распространению радиоволн. Эта проблема имеет два решения [1, 2]. Первое заключается в том, что антенна помещается в специальный буй, плавающий на поверхности воды. Она связана с аппаратурой подводного дрона особым кабелем, обладающим нейтральной плавучестью. Для связи с оператором используется Wi-Fi. Пилот находится на берегу, в катере или в лодке и управляет машиной совершенно стандартным образом – через ПДУ, планшет или мобильный телефон. Второе решение значительно проще – в нем используется только длинный кабель, непосредственно связывающий пульт оператора и подводный дрон. Самые последние модели подводных дронов обладают частичной автономностью и способны самостоятельно всплывать при потере связи. [1, 2].

На борту любого дрона имеется видеокамера и глубиномер. Все машины оснащаются мощными источниками света. На дрон для рыбалки всегда устанавливается сонар. [1].

Глубина погружения должна учитывать то, что давление воды зависит от глубины погружения – каждые 10 м увеличивают этот показатель на 1 атмосферу [1]. Подводные аппараты, рассчитанные на применение только в пресных водоемах, ни в коем случае нельзя погружать в агрессивную морскую среду [1]. Наибольшее распространение получили обычные подводные дроны, глубина погружения которых достигает 100 м, длительность работы на автономном заряде - до 8 часов. Устройство имеет высокочувствительную ТВ камеру и достаточно мощную многофункциональную подсветку, а также пульт дистанционного управления с жидкокристаллическим дисплеем и кабель управления длиной 50 м [2]. Прожекторы позволяют осуществлять видеосъемку на большой глубине и в ночное время. Для поиска рыбы неподалеку от поверхности воды в дневное время прожектор не потребуется. Чаще всего подводные дроны оснащены кабелями для управления. Если же дрон нужен только для отслеживания рыбы, то можно воспользоваться беспроводными системами [2]. Одной из важнейших характеристик для любого подводного дрона является скорость его передвижения. Для перемещения дрона под водой используют винты — именно от их работы зависит эффективность работы устройства [2].

Метод расчета дальности действия ТВ системы для подводного дрона

Рассмотрим теперь методику расчета дальности действия подводной ТВ системы (ТВС) без электронно-оптического преобразователя (ЭОП) при ее работе в пассивном режиме (без подсвета) [4, 5].

Дальность действия ТВС определяется по формуле:

$$D = a / \alpha_{\Sigma},$$

где a – размер эквивалентного тест-объекта, м; α_{Σ} – суммарное предельное угловое разрешение системы прибор-глаз, рад..

В качестве эквивалентного тест-объекта используется круг с колоколоидальным распределением яркости.

$$a = 2 (A (\pi m)^{-1})^{0,5},$$

где A – площадь фронтальной проекции наблюдаемого объекта, м²; $m = 48 - 50$ – число элементов разложения, укладываемых в пределах контура фронтальной проекции объекта и необходимых для его опознавания.

Если ставится задача не опознавания, но обнаружения, то для нее величина a увеличивается в 1,5 раза.

$$\alpha_{\Sigma} = (\alpha_{\text{стр.}}^2 + \alpha_{\text{гл. прив.}}^2 + \alpha_{\text{эл.}}^2)^{0,5},$$

где $\alpha_{\text{стр.}}$ – предельное угловое разрешение ТВ системы, определяемое его структурными несовершенствами, рад.; $\alpha_{\text{гл. прив.}}$ – предельное угловое разрешение ТВ системы, определяемое несовершенством глаза и приведенное к светочувствительной площадке ПЗС матрицы, рад.; $\alpha_{\text{эл.}}$ – предельное угловое разрешение ТВ системы, определяемое его шумами, рад.

$$\alpha_{\text{стр.}}^2 = 0,26 (\Gamma_{\text{ТВ}} f_{\text{об.}})^{-2} (\Gamma_{\text{ТВ}} N_{\text{об.п.}}^{-2} + N_{\text{ТВК.п.}}^{-2} + N_{\text{ТВМ.п.}}^{-2} + N_{\text{ок.}}^{-2}),$$

где $\Gamma_{\text{ТВ}}$ – увеличение ТВ системы, крат; $f_{\text{об.}}$ – фокусное расстояние объектива ТВ системы, м; $N_{\text{об.п.}}$, $N_{\text{ТВК.п.}}$, $N_{\text{ТВМ.п.}}$, $N_{\text{ок.}}$ – приведенные к светочувствительной площадке ПЗС матрицы разрешающие способности объектива, ТВ камеры, ТВ монитора и окулярной системы соответственно, штр/мм.

$$N_{\text{об.п.}} = 1,73 N_{\text{об.}} (-\ln T_{\text{об.}}(N))^{-0,5},$$

$$N_{\text{ТВК.п.}} = 1,73 N_{\text{ТВК.}} (-\ln T_{\text{ТВК.}}(N))^{-0,5},$$

$$N_{\text{ТВМ.п.}} = 1,73 N_{\text{ТВМ.}} (-\ln T_{\text{ТВМ.}}(N))^{-0,5},$$

$$N_{\text{ок.п.}} = 1,73 N_{\text{ок.}} (-\ln T_{\text{ок.}}(N))^{-0,5},$$

$$\alpha_{\text{гл.прив.}}^2 = (\alpha_{\text{гл.фл.}}^2 + \alpha_{\text{гл.пор.}}^2) \Gamma_{\Sigma}^{-2},$$

где $\alpha_{\text{гл.фл.}}$ – предельное угловое разрешение глаза, определяемое флуктуационными ограничениями, рад.; $\alpha_{\text{гл.пор.}}$ – предельное угловое разрешение глаза, обусловленное его

собственными пороговыми свойствами, собственными шумами, рад., Γ_{Σ} – суммарное увеличение ТВ системы, крат.

$$\Gamma_{\Sigma} = (f_{об.} / f_{ок.}) \Gamma_{ТВ.},$$

$$\Gamma_{ок.} = 250 / f_{ок.},$$

где $f_{ок.}$ – фокусное расстояние окулярной системы, м; $\Gamma_{ок.}$ – увеличение окулярной системы, крат.

$$\Gamma_{ТВ.} = d_{Э.} D_{ПЗС.}^{-1},$$

где $d_{Э.}$, $d_{ПЗС.}$ – диагональ экрана ТВ монитора и светочувствительного элемента ПЗС матрицы, мм.

$$d_{гл.фл.}^2 = 8 k^2 H_0 A_{зр.мах.} (\pi L_{ЭК.} \theta_{Г.} A_{зр.})^{-1} (K_{ТВ.} + 2) K_{ТВ.}^{-2},$$

где k – отношение сигнал/шум, определяемое из заданных вероятностей пропусков и ложных тревог; H_0 – пороговая экспозиция для глаза, лк с, соответствующая единичному полезному импульсу в зрительном анализаторе, для монокулярного зрения $H_0 = 8 \times 10^{-10}$ лк с, для бинокулярного зрения $H_0 = 4 \times 10^{-10}$ лк с; $\theta_{Г.}$ – время инерции глаза, с; $A_{зр.}$, $A_{зр.мах.}$ – площадь зрачка глаза, соответствующая данному конкретному значению яркости и площадь зрачка глаза максимальная соответственно, мм; $L_{ЭК.}$ – яркость экрана ТВ монитора, кд/м; $K_{ТВ.}$ – контраст на выходе ТВ монитора.

Значения $\theta_{Г.}$ и $A_{зр.}$ могут быть определены по величине $L_{ЭК.}$ по таблице работы [4] но вместо этого можно представить $L_{ЭК.} \theta_{Г.} A_{зр.}$ как функцию $L_{ЭК.} \theta_{Г.} (L_{ЭК.}) A_{зр.} (L_{ЭК.}) = f(L_{ЭК.}) = 1,8 L_{ЭК.}^{0,806}$. Это вполне корректно, но только при выполнении условия $10^2 \geq L \geq 10^{-3}$ кд/м.

$$K_{ТВ.} = K K_{п.},$$

где K – контраст объекта с фоном на входном зрачке объектива ТВ системы.

$$K = (L_{об.эф.} - L_{ф.эф.}) L_{ф.эф.}^{-1},$$

где $L_{об.эф.}$, $L_{ф.эф.}$ – яркость объекта и соответственно фона эффективные (т. е. приведенные к спектральной чувствительности ПЗС матрицы) на входном зрачке объектива, Вт/м² Ср.

$$K_{п.} = K_{п.стр.} (1 - \delta_{об.}) (1 - \delta_{ТВК.}) (1 - \delta_{ТВМ.}) (1 - \delta_{ок.}),$$

где $K_{п.стр.}$ – структурная составляющая потери контраста; $\delta_{об.}$, $\delta_{ТВК.}$, $\delta_{ТВМ.}$, $\delta_{ок.}$ – засветочные коэффициенты соответственно для объектива, ТВ камеры, ТВ монитора, окулярной системы. Они учитывают рассеяние света в соответствующих элементах ТВ системы.

$$K_{п.стр.} = (1 + 4 D^2 \Gamma_{ТВ.} \alpha_{стр.}^2 a^{-2})^{-1},$$

$$\alpha_{гл.пор.}^2 = (1,03 \cdot 10^{-4} | K_{ТВ.} |^{-1,45})^2,$$

$$\alpha_{\text{эл.}}^2 = 16 k^2 e \pi^{-2} (2 + K) K^{-2} F (L_{\text{ф.эф.}} d_{\text{вх.зр.}}^2 \tau_{\text{об.}} \theta S_{\Sigma})^{-1} K_a,$$

где $e=1,6 \times 10^{-19}$ кул. – заряд электрона; $d_{\text{вх.зр.}}$ – диаметр входного зрачка объектива, м; $\tau_{\text{об.}}$ – пропускание объектива; θ – время инерции системы прибор-глаз.

$$\theta = \theta_{\Gamma} (1 + 1,14 \theta_{\Gamma} \Gamma_{\Sigma} \theta_{\text{ТВ}}),$$

где $\theta_{\text{ТВ}}$ – время инерции ТВ системы, с; S_{Σ} – интегральная чувствительность ПЗС матрицы, А/Вт; F – шум-фактор ТВ камеры, учитывающий влияние ее шумов.

$$F = (1 - \delta_{\text{э.равн.}})^2 (1 - \delta_{\text{об.}})^{-1},$$

где $\delta_{\text{э.равн.}}$ – засветочный коэффициент ТВ камеры при интегральной равномерной засветке ПЗС матрицы; K_a – коэффициент потери контраста в воде за счет влияния дымки.

$$K_b = K_d \tau_{\text{в}}^D = K \exp(-\alpha_E D),$$

где K_d – коэффициент дымки, D – дальность, км.

$$K_d = \tau_{\text{в}}^D (1 - (b \rho_{\text{ф.}})^{-1}) + (b \rho_{\text{ф.}})^{-1},$$

где $\tau_{\text{в}}^D$ – пропускание подводной среды на данной дальности D ; b – коэффициент светлоты, зависящий от положения Солнца за горизонтом (например, для уровня естественной ночной освещенности $E=3 \times 10^{-3}$ лк $b=2$); α_E – коэффициент ослабления излучения в водной среде в спектральном диапазоне ЕНО, 1/км; $\rho_{\text{ф.}}$ – коэффициент яркости фона.

Расчет ведется методом последовательных приближений. Сначала полагаем $\tau_{\text{в}}^D = K_d = K_b = K_{\text{п.стр.}} = 1$. Затем результаты расчета по первому приближению используем для расчета по второму приближению, результаты последнего – для расчета по третьему приближению и т. д. до тех пор, пока результаты последующего расчета не будут отличаться от результатов предыдущего менее чем на 10%.

Определение дальности действия ТВ системы в активном режиме, для реализации которого используется подсвет прожекторами в белом или в ИК свете, светодиодными или лазерными осветителями связано с изменениями расчетных формул $\alpha_{\text{эл.}}$ и K [4, 5]:

$$\alpha_{\text{эл.}}^2 = 16 k^2 e \pi^{-2} (2 + K) K^{-2} F (L_{\text{ф.эф.}} d_{\text{вх.зр.}}^2 \tau_{\text{об.}} \theta S_{\text{осв.}})^{-1},$$

где $S_{\text{осв.}}$ – чувствительность ПЗС матрицы в рабочей области спектра прожектора или осветителя (если последний излучает на одной длине волны, то спектральная чувствительность ПЗС - S_{λ}), А/Вт.

При работе ТВ системы в активном режиме подсвечивается наблюдаемый объект и окружающий его фон. Соответственно на входном зрачке объектива ТВ системы присутствуют эффективные яркости подсвечиваемого объекта $L_{\text{об.п.эф.}}$ и

подсвечиваемого фона $L_{\text{ф.п.эф.}}$. Также подсвечивается дымка, создающая обратное рассеяние излучения подсвета. что дает эффективную яркость подсвечиваемой дымки $L_{\text{д.п.эф.}}$. Кроме того, на ТВ систему оказывает влияние естественная ночная освещенность (ЕНО), подсвечивающая наблюдаемый объект. фон и дымку. Соответственно на входном зрачке объектива ТВ системы имеем $L_{\text{об.эф.}}^{\text{ЕНО}}$, $L_{\text{ф.эф.}}^{\text{ЕНО}}$, $L_{\text{д.эф.}}^{\text{ЕНО}}$. На основании изложенного:

$$\begin{aligned} L_{\text{об.эф.}} &= L_{\text{об.п.эф.}} + L_{\text{д.п.эф.}} + L_{\text{об.эф.}}^{\text{ЕНО}} + L_{\text{д.эф.}}^{\text{ЕНО}}, \\ L_{\text{ф.эф.}} &= L_{\text{ф.п.эф.}} + L_{\text{д.п.эф.}} + L_{\text{ф.эф.}}^{\text{ЕНО}} + L_{\text{д.эф.}}^{\text{ЕНО}}, \\ K &= (L_{\text{об.п.эф.}} + L_{\text{об.эф.}}^{\text{ЕНО}} - L_{\text{ф.п.эф.}} - L_{\text{ф.эф.}}^{\text{ЕНО}}) (L_{\text{ф.п.эф.}} + L_{\text{д.п.эф.}} + L_{\text{ф.эф.}}^{\text{ЕНО}} + L_{\text{д.эф.}}^{\text{ЕНО}}), \\ L_{\text{об.п.эф.}} &= (\pi D_{\text{об.}}^2)^{-1} \rho_{\text{об.}} I \exp(-2\alpha_{\text{п.}} D_{\text{об.}}) \text{Cos}\gamma, \\ L_{\text{ф.п.эф.}} &= (\pi D_{\text{ф.}}^2)^{-1} \rho_{\text{ф.}} I \exp(-2\alpha_{\text{п.}} D_{\text{ф.}}) \text{Sin}\gamma, \end{aligned}$$

где $\rho_{\text{об.}}$, $\rho_{\text{ф.}}$ – коэффициенты яркости соответственно объекта и фона; $D_{\text{об.}}$, $D_{\text{ф.}}$ – дальность до объекта и фона соответственно, м; $\alpha_{\text{п.}}$ – коэффициент ослабления излучения в водной среде в спектральном диапазоне излучения подсвета (если излучение подсвета монохроматическое – то на длине волны этого излучения), 1/км; γ – угол между направлением оптической оси осветителя и нормалью к освещаемой поверхности объекта, град; I – энергетическая сила света осветителя, Вт/Ср.

Если осветитель импульсный, то средняя энергетическая сила света осветителя, определяется по формуле:

$$I_{\text{ср.}} = P_{\text{ср.}} (\omega)^{-1} = P_{\text{и.}} F_{\text{и.}} t_{\text{и.}} (\omega)^{-1},$$

где $P_{\text{ср.}}$ – мощность излучения в импульсе, Вт; $F_{\text{и.}}$ – частота импульсов подсвета, Гц; $t_{\text{и.}}$ – длительность импульса излучения, с; ω – телесный угол подсвета, Ср.

$$\begin{aligned} L_{\text{д.п.эф.}} &= 2 \pi^{-1} \alpha_{\text{п.}}^2 f(\omega)_{180} I 10^{-6} \int_{D_1}^{D_2} D^2 \exp(-2\alpha_{\text{п.}} D) dD = 2 \pi^{-1} \alpha_{\text{п.}} f(\omega)_{180} I 10^{-6} \cdot \\ &\cdot (f(2\alpha_{\text{п.}} D_2) - f(2\alpha_{\text{п.}} D_1)), \end{aligned}$$

где $f(2\alpha D) = f(x)$ - функция А. А. Гершуна [4],

где $f(\omega)_{180}$ - коэффициент обратного рассеяния, показывающий, какая доля излучения подсвета рассеивается в обратном направлении. Для водной среды $f(\omega)_{180} = 0,1$, [4], D_1 , D_2 - пределы по дальности, м, определяющие толщину атмосферы, создающую яркость первичного рассеяния, которой можно ограничиваться при практических расчетах:

$$D_1 = D G (G + D \text{tg } 0,5\beta_{\text{г.}})^{-1},$$

$$D_2 = D,$$

где G – расстояние по фронту между осями осветителя и ТВ ПНВ, м; $\beta_{\text{г.}}$ – угол подсвета в горизонтальной плоскости, град.

$$L_{об.эф.}^{ЕНО} = E \pi^{-1} \rho_{об.}^{ЕНО} S_{ое} \exp(-\alpha_{п.} D_{об.}),$$

$$L_{ф.эф.}^{ЕНО} = E \pi^{-1} \rho_{ф.}^{ЕНО} S_{ое} \exp(-\alpha_{п.} D_{ф.}),$$

$$L_{д.эф.}^{ЕНО} = (1 - \exp(-\alpha_{п.} D)) E S_{ое} (\pi b)^{-1},$$

где $S_{ое}$ – относительная спектральная чувствительность ПЗС матрицы, о/е; E – ЕНО, Вт/м²

$$S_{ое.} = S_{\lambda \max} S_{\lambda}^{-1},$$

где $S_{\lambda \max}$ – максимальное значение спектральной чувствительности ПЗС матрицы, А/Вт; S_{λ} – чувствительность ПЗС матрицы на рабочей длине волны; b – коэффициент светлоты – отношение яркости ночного неба у горизонта к яркости слоя дымки бесконечно большой толщины,

Расчет ведется методом последовательных приближений, как описано выше.

Если сила света осветителя задана в кд, то для ее перевода в эффективное значение Вт/Ср пользуются формулой:

$$I_{эф.} |Вт/Ср| = (I |кд| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i(\lambda) S_{ое}(\lambda) \tau_{ф.осв.}(\lambda) \tau_{ф.тв.}(\lambda) d\lambda) (683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i(\lambda) V(\lambda) d\lambda)^{-1},$$

где $i(\lambda)$ – спектральное значение силы света, кд; $S_{ое}(\lambda)$ – относительное значение спектральной чувствительности; $\tau_{ф.осв.}(\lambda)$, $\tau_{ф.тв.}(\lambda)$ – спектральное пропускание фильтра осветителя и фильтра ТВ ПНВ соответственно; $V(\lambda)$ – коэффициент относительной видности глаза, о/е; λ_1 , λ_2 – спектральный диапазон работы ТВК с учетом пропускания фильтров, мкм.

Предложенная методика позволяет рассчитывать дальности действия как современных, так и перспективных ТВС. Рассмотрим пример расчета дальности действия ТВС подводного дрона по данному методу.

Исходные данные для расчета: $a = 0,5$ м, $\Gamma_{ТВ} = 20^x$, $f_{об} = 100$ мм, $f_{ок} = 50$ мм, $d_{Э} = 120$ мм, $D_{ПЗС.} = 6$ мм, $N_{об} = 350$ штр/мм, $N_{ТВК} = 480$ штр/мм, $N_{ТВМ.} = 480$ ТВ линий, $N_{ок.} = 500$ штр/мм, $T_{об.}(N) = 0,7$, $T_{ТВК.}(N) = 0,5$, $T_{ТВМ.}(N) = 0,5$, $T_{ок.}(N) = 0,95$, $k^2 = 2,2$, $A_{зр.маx} = 24$ мм², $K = 0,5$, $\theta_{Г} = 0,2$ с, $\theta_{ТВ} = 0,1$ с, $\delta_{об} = 0,02$, $\delta_{ТВК} = 0,3$, $\delta_{ТВМ.} = 0,3$, $\delta_{ок} = 0,05$, $\delta_{э.равн} = 0,1$, $d_{вх.зр} = 67$ мм, $\alpha = \alpha_{п} = 10^4$ 1/км, $\rho_{об} = 0,1$, $\rho_{ф} = 0,2$, $\rho_{ЕНО} = 0,3$, $\tau_{об.} = 0,8$, $S_{осв} = 30$ мА/Вт, $\gamma = 5^\circ$, $I = 500$ Вт/Ср, $\beta_{Г} = 100^\circ$, $f(\omega)_{180} = 3$ (для длины волны 9,5 мкм), $G = 0,5$ м, $S_{ое} = 0,85$, $S_{\lambda \max} = 50$ мА/Вт, $V(\lambda) = 0,3$, $\tau_{ф.осв.}(\lambda) = 0,95$, $\tau_{ф.тв.}(\lambda) = 0,8$, $E = 10^{-9}$ Вт/м².

Результат расчета: дальность действия равна 150 м при погружении на 100 м.

Особо следует остановиться на гидрообъективах для ТВС. Это – светосильные объективы, рассчитанные для работы по объектам, находящимся в водной среде [6].

При погружении в воду ТВС с иллюминатором он вызовет изменение угла поля зрения и фокусного расстояния (а, значит, и масштаба изображения) гидрообъектива в соответствии с формулами [6]:

$$\operatorname{tg} \beta_a = n_w \operatorname{tg} \beta_w (1 - \operatorname{tg}^2 \beta_w (n_w^2 - 1))^{-0.5}, \quad (35)$$

$$f_w = f_a n_w (1 - \operatorname{tg}^2 \beta_w (n_w^2 - 1))^{-0.5}, \quad (36)$$

где β_a, β_w – угол поля зрения гидрообъектива в воздухе и в воде соответственно, град.; f_a, f_w – фокусное расстояние гидрообъектива в воздухе и в воде соответственно, мм; n_w – показатель преломления воды.

При малых углах β_w значение $\operatorname{tg} \beta_w \ll 1$, поэтому $f_w = f_a \times n_w$, т.е. масштаб изображения увеличивается в $n_w \sim 1,33$ раза. Кроме того, он еще и изменяется по полю зрения в соответствии с законом $(1 - \operatorname{tg}^2 \beta_w (n_w^2 - 1))^{-0.5}$. Это приводит к дополнительной дисторсии, которая при $\beta_w > 30^\circ$ превышает 15%. Легко также показать, что в воде угол поля зрения уменьшается в $\sim 1,33$ раза, т.е. на $\sim 25\%$, а светосила – в $\sim n_w^2$ раз. В воде уменьшается фокусировка гидрообъектива для объектов, находящихся на конечном расстоянии. Они воспринимаются как расположенные на расстоянии в $\sim 1,33$ раз ближе к гидрообъективу, чем на самом деле [6].

Для сохранения практически неизменным угла поля зрения гидрообъектива при перемещении ТВС из воздуха в воду может быть использован сферический иллюминатор. В случае его применения оптический центр гидрообъектива должен быть точно установлен в центре кривизны сферической поверхности иллюминатора. При этом лучи света идут практически нормально к оптической поверхности гидрообъектива, и возникают незначительные аберрации.

Технические возможности конкретных подводных дронов

Существенный интерес представляю подводные дроны серии GLADIUS [7]. Эти радиоуправляемые дроны предназначены для широкой области применения, - подводная рыбалка, фото- и видеосъемка, спасение дайверов. Материал обтекаемого корпуса дрона: АБС. Встроенная литий-полимерная батарея аккумуляторов имеет емкость 5000 мАч, Срок службы батареи: 2 часа. ТВ камера 4К HD имеет 12 МП. Датчик изображения: матрица 1/2,3 дюйма CMOS. Относительное отверстие гидрообъектива 1:3. Используются 2 светодиодных (СД) светильника, каждый из которых имеет световой поток 1200 лм. Скорость: 2 м/с. Рабочая глубина: 50 м/100 м (опция). Интерфейс: HDMI, два встроенных крепления для экшн-камеры и платформы для подводной фотографии. Габариты: 385x226x138 мм, масса: 2,5 кг. Подводная фотография 4К HD-Мини может снимать кадры UHD при разрешении 1080p или 4К и

разрешении 12 МП для фотографий. Мини-подводный дрон поставляется с пультом дистанционного управления, который может точно управлять подводным дроном для перемещения, наклона вверх, вниз, блокировки глубины, ускорения регулировки СД яркости. Регулируемая блокировка наклона и блокировка глубины достигается с помощью управления и регулируемым режимом наклона $\pm 45^\circ$. Дрон плавно перемещается во всех направлениях со скоростью до 3,89 узлов (2 м/с). Интеллектуальные алгоритмы управления и режим блокировки глубины в одно касание кнопки помогут свободно перемещать и направлять курсором дрон на нужную глубину. VR оборудование обеспечивает режим виртуальной реальности. Можно также просматривать и обмениваться мультимедийными данными, обеспечивать прямую трансляцию через социальные сети в реальном масштабе времени на 3 беспроводных устройствах, при этом используется телевизор/монитор с большим экраном (с портом HDMI). Погружение вниз, подъем вверх, наведение, наклон и поворот с высокой точностью обеспечивается тремя вертикальными пропеллерами и двумя двигателями в сочетании с интеллектуальными алгоритмами управления обеспечивают стабильность перемещения дрона во всех направлениях. Алгоритм восстановления изображения в мини-приложении исправляет искажение цвета и делает изображение более четким, ярким и чистым.

Подводный дрон GLADIUS MINI (рисунок 1) [8 - 10] имеет глубину погружения 100 м, массу 2,5 кг, габариты 385x226x138 мм, 4 К UHD ТВ камеру с разрешением 12 МП (720 p,) формат MP4 удержание заданного угла в диапазоне $\pm 45^\circ$. Фокусное расстояние гидрообъектива 3 мм, угол поля зрения 95° . В дополнение к ТВ камере на носу дрона установлена пара СД прожекторов мощностью 10 Вт, позволяющих снимать при очень низком уровне света, как это бывает на больших глубинах, а также при выполнении задач в темное время суток или в полной темноте. Мощность подсветки регулируется вручную. Дрон может работать как в пресной, так и в морской воде. Режим стабилизации и движения отвечают 5 винтов - 2 основных маршевых винта и 3 дополнительных для стабилизации, регулируется угол наклон носа, возможна фиксации наклона и глубины, возможна запись на SD карту объемом до 64 Гб и связь с соцсетями. Скорость движения 2 узла (2 м/с), длина кабеля 100 м. Дрон позволяет устанавливать ISO вручную или оставить автоматический режим, отрегулировать баланс белого, цветовой тон.



Рисунок 1 – Подводный дрон GLADIUS MINI

Подводный дрон GLADIUS MINI S (рис.1) [8] – компактный, легкий, надежный. Обладает возможностью установки роботизированной руки или экшн камеры на компактный корпус. Съемка фото и видеоматериалов может записываться на внутреннюю память и карту памяти. Дрон может погружаться на глубину до 100 м. Он комплектуется 100-метровым кабелем, по которому и происходит управление. Именно на эти 100 метров аппарат может опускаться вглубь водоема и отплывать от оператора. Благодаря подключению кабеля длиной 200 м дрон может осуществлять съемку с берега. Скорость движения в воде развивает до 2 м/с. Максимальная скорость погружения 1 м/с. Благодаря мощным 5-и моторам GLADIUS MINI S имеет возможность стабилизировать нужную глубину погружения. Режим Tilt-Lock позволяет регулировать угол наклона $\pm 45^\circ$. Благодаря двум СД мощностью 5Вт каждый подводный дрон способен снимать видео и фото в тяжелых подводных условиях. Дрон оснащен системой защиты моторов от песка и посторонних предметов. Дрон оснащен обновленным пультом управления с возможностью подключения телефона по технологии WiFi или через кабель для более стабильного соединения. Дрон имеет батарею из 2-х литий-ионных аккумуляторов с емкостью 4800 мАч каждый. Время

работы 4 часа. ТВ камера 4 К с датчиком SONY CMOS формата 1/2,3 дюйма имеет функцию EIS (электронная стабилизация). Гидорообъектив имеет относительное отверстие 1:1,8, фокусное расстояние 1 мм и угол поля зрения 152°. Имеются 2 СД лампы с цветовой температурой 5000 – 5500 К, со световым потоком 1200 каждая лм. Приложение для дрона полностью русифицировано и позволяет оператору дрона не только наблюдать изображение, но и отслеживать глубину, температуру воды и положение дрона. Имеется карта памяти на 64 Гб. Макс. разрешение фото: 12 Мп (4000 x 3000 пикселей). Формат изображения: JPEG/DNG. Разрешение видео: FHD:1920x1080p частота кадров 30 Гц, FHD:1920x1080p, частота кадров 60 Гц, FHD:1920x1080p, частота кадров 120 Гц, FHD:3840x2160p, 4 К, частота кадров 30 Гц. Формат видео: MP4. Габариты 400x1226x145 мм, масса 3 кг. Рабочая температура: (-10) – (45)°С. Имеется выход HDMI и Wi-Fi. Режимы управления: удержание глубины, стабилизация, регулируемый угол наклона $\pm 45^\circ$ Подводный дрон GLADIUS MINI S используется в марикультуре (для сокращения занятости водолазов), для обследования труб, инспекции инженерных сооружений, для поисковых работ и обслуживания судов.

Подводные дроны класса CHASING M2 (рисунок 2) [8] обладают также обширными функциональными возможностями. В частности, подводный дрон CHASING DORY обладает ТВ камерой (рисунок 3) с разрешением 1080p. Объектив имеет относительное отверстие 1:1,6. На рис.4 представлены СД прожекторы для подводного дрона CHASING M2, а на рис.5 – пульт управления подводными дронами GLADIUS MINI и CHASING M2 Подводный дрон CHASING DORY оснащен встроенной батареей аккумуляторов емкостью 4800 мАч, Она обеспечивает до одного часа исследования при полной зарядке. В отличие от других подводных дронов здесь не нужен обычный пульт управления. Пультом является смартфон или планшет. Для подсвета используются 2 СД. Световой потока каждого СД равен 250 лм при цветовой температуре 4000 – 5000 К. Подводный дрон DORY оснащен 5-ю моторами, которые позволяют стабильно удерживать глубину погружения и наклонять дрон под углом $\pm 45^\circ$. Благодаря этому режиму управлять дроном могут несколько операторов со своего смартфона или планшета. Благодаря встроенному алгоритму восстановления истинного цвета в DORY фотографии и видеоролики демонстрируют настоящий динамический цвет в любых условиях. Настраиваются визуальные эффекты с 19 фильтрами для создания изображений и простого редактирования видео. Можно быстро и легко обмениваться подводными фотографиями и видео на Facebook, Instagram, Youtube или в другой социальной сети. Габариты: 247x188x92 мм Масса: 1,3 кг. Диапазон рабочих температур -10°С~40°С. Макс. Глубина погружения: 15м. Макс. скорость движения: 1,5

м/с. Макс. скорость погружения: 1 м/с. Встроенная память 16 Гб. ТВ камера имеет CMOS-матрица формата 1/2,3 дюйма. Гидрообъектив имеет относительное отверстие 1:1,6 при фокусном расстоянии 4 мм и углом поля зрения 100°. Макс. разрешение фото: 2 Мп (1920 x 1080). Формат изображения: JPEG/DNG Разрешение видео: FHD:1920x1080 при частоте кадров 30 Гц. Формат видео: MP4. Длина кабеля дрона 15 м при прочности на разрыв 100 кг.



Рисунок 2 – Подводный дрон CHASING M2

Подводный дрон CHASING F1 [8] для рыбалки имеет глубину погружения до 28 м, максимальное расстояние от оператора 30 м. Съемная батарея аккумуляторов емкостью 4800 мАч обеспечивает работы дрона до 6 часов. Дрон имеет 4 векторных движителя и оснащен 5-ю моторами, которые позволяют стабильно удерживать глубину погружения. Предусмотрены антенны GPS, съемная карта памяти SD 64Гб (увеличение до 512Гб), приложение на нескольких языках, онлайн трансляция и редактирование. Габариты 278x154x215 мм, масса 2 кг, диапазон рабочих температур: (-10) – (45)°С. ТВ камера имеет датчик - CMOS-матрицу формата 1/2.8". Формат изображения JPEG. Гидрообъектив имеет относительное отверстие 1:2, диапазон фокусировки 0,5 м, угол поля зрения 164,6°. Разрешение фото 2 МП (1920x1080 пикселей), разрешение видео 1080р или 720 р при частоте кадров 30 Гц. Напряжение питания = 12,6 В, ток потребления 3 А. Имеются 7 ИК датчиков. Наличие

GPS позволяет задавать дрону маршрут для осмотра определенной территории, а также использовать функцию "Возврат домой".

Подводный дрон CHASING M2 (рисунок 2) [8] используется для поисковых работ, научных исследований, в марикультуре, для исследования плотин, дамб, труб и прочего подводного оборудования, обслуживания судов, промеров глубины, инспекции гидроэнергетики. Глубина погружения 100 м. CHASING M2 оснащен ТВ камерой 12 МП с матрицей 1/2.3" SONY CMOS (рисунок 3).



Рисунок 3 – ТВ камера для дрона CHASING M2

Гидрообъектив имеет относительное отверстие 1:1,8 и угол поля зрения 152°. Функция EIS (стабилизация) значительно улучшает производительность камеры при слабом освещении и динамический диапазон. Chasing M2 оснащен 8-ми мощными моторам, способными регулировать угол наклона $\pm 90^\circ$, вращаться 360° и удерживать глубину погружения. Стандартная литиевая батарея емкостью 97,68 Вт/ч (до 2 часов), 200Вт/ч (до 4 часов). CHASING M2 дополнительно оснащается роботизированной рукой с силой сжатия 3кг, силой сопротивления 12кг. Запатентованная технология Anti-Stuck Motor используется для значительного снижения вероятности отказа двигателя из-за его застревания в песке и может безопасно и надежно работать в любых сложных подводных условиях. Для подсветки используются 2 СД с цветовой температурой 5000 – 5500 К, со световым потоком 2000 лм каждый (рисунок 4а). Дополнительно можно установить СД прожектор со световым потоком 12000 лм (рисунок 4б).



Рисунок 4 – Светодиодные прожекторы для подводного дрона CHASING M2: *а* – LED со световым потоком 2000 лм, *б* – со световым потоком 12000 лм

Дрон комплектуется кабелем 100м и 200м, по которому и происходит управление. Могут быть использованы также кабели длиной 300 м и 400 м. Пульт управления подводным дронами GLADIUS MINI, CHASING M2 показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Пульт управления подводным дронами GLADIUS MINI, CHASING M2

Благодаря съемной карты памяти ваше видео и фото можно скачать за считанные минуты. CHASING M2 отображает и записывает точные данные температуры воды и глубины на экране вашего гаджета. Электрическая катушка

облегчит сматывание кабеля длиной до 200м. Консоль управления с 13-и дюймовым экраном для подводных дронов CHASING M2 и CHASING M2 Pro. Дополнительный СД прожектор 12000 люмен для подводного дрона Chasing M2 и M2 Pro облегчит поиски и обследование в мутной воде. Предусмотрен блок управления (Adapter Box) системой питания дрона и подводным позиционированием. Имеется лазерный измеритель длины подводного объекта. Система позиционирования USBL использует принцип определения местоположения на основе триангуляции и использует передатчик и приемник для отправки и приема сигналов гидролокатора для расчета координат ROV. Сонар блокировки и фиксирования дистанции CHASING M2 служит для предотвращения столкновений подводного дрона и фиксирования расстояния от дрона до осматриваемого объекта. Предусмотрен источник внешнего питания. Дрон имеет 8 векторных моторов, которые позволяют двигаться во всех направлениях. При любой позиции дрона глубину можно установить с помощью одной клавиши, которая может гарантировать точное наведение дрона для достижения любых задач: движение вперед и назад, всплытие и погружение, движение боком, повороты влево/вправо, изменение угла наклона в пределах $\pm 90^\circ$, вращение на 360° . макс. разрешение фото: 12 Мп (4000 x 3000), формат изображения: JPEG/DNG, Разрешение видео при медленном движении: 1080p при частоте кадров 30 Гц/120 Гц, 720p при частоте кадров 30 Гц/240 Гц, 4K при частоте кадров 30 Гц. Формат видео MP4. Взаимное расположение моторов уравнивает противоток, с какой бы стороны он не поступал и какой бы силы он не был. Шесть из 8-ми моторов обеспечивают быстрые движения вперед/назад. Однако боковое движение ведется на низкой скорости. Благодаря особой открытой конструкции аппарат лучше противостоит течению и хорошо маневрирует в толще воды, обладает обширными монтажными возможностями, проще извлекается батарея питания, невозможно проникновение песка внутрь дрона.

Профессиональный подводный дрон CHASING M2 PRO имеет глубину погружения до 150 м, а подводный дрон CHASING M2 PRO 200 м (рисунок 6) – 200 м [8]. Все остальные параметры те же, что и у дрона CHASING M2. Габариты 480x267x165 мм, масса 5,7 кг. Время работы до 5 часов [8].



Рисунок 6 – Профессиональный подводный дрон CHASING M2 PRO 200 м

Лазерный измеритель CHASING специально разработан для пользователей, которым необходимо выполнять подводное определение размеров объекта. Он использует пару красных лазерных лучей с интервалом 10 см для оценки размеров продукции аквакультуры, длины трещин в лодках и плотинах и т. д. [8]. Лазерный измеритель может быстро измерять размер подводных объектов, трещин и т. д., тем самым снижая риск и стоимость ручных операций. Габариты 132x70x35,5 мм, масса 200 г, лазерная база $10 \pm 0,5$ см.

Профессиональный компактный подводный дрон CHASING Dory Combo [9] имеет глубину погружения 15 м, возможность регулировки угла наклона $\pm 45^\circ$, время работы до 1 часа, ТВ камеру 2 МП с разрешением 1080p и частотой кадров 30 Гц с форматом MP4, гидрообъектив с относительным отверстием 1:1,6 и углом поля зрения 100° , визуальные эффекты, встроенный GPS, погружение до 15 м, быстрый постинг в соцсети, кабель длиной 15 м, буй-передатчик. Масса дрона 1,3 кг, габариты 247x188x192 мм, скорость до 0,77 м/с, имеется 5 моторов, время работы 1 час, два СД светильника имеют световой поток 250 лм каждый, память 16 Гб,

Подводный дрон QYSEA FIFISH V65 (рисунок 7) [11] содержит механическую роботизированную руку, ТВ камеру, кабель длиной 100 м и очки ZEISS VR ONE Plus. Сила сжатия руки 100 н, ее тянущее усилие 100 н Дрон способный плавать в любом

направлении во время съемки 4К-видео или 12 МП фото, имеет приложения для создания контента, морской инспекции, аквакультуры, археологических наблюдений и многого другого. Дрон оснащен двумя СД лампами со световым потоком 2000 лм, цветовой температурой 5500 К и углом подсвета 120°, Скорость движения до 3 узлов (1,5 м/с) в течение 6 часов. Шесть подруливающих моторов обеспечивают движение в 6 степеней свободы. Технология Qysea Posture Lock позволяет поддерживать изменять угол перемещения в пределах 0,1°. ТВ камера дрона оснащена 1/2,3-дюймовым CMOS датчиком SONY, гидрообъективом с относительным отверстием 1:2,5, углом поля зрения 166°, высочайшим рейтингом ISO 6400, 4К UHD-видео с частотой кадров 25/30 Гц, 1080p-видео с частотой кадров до 120 Гц и возможностью снимать в формате DNG. Устройство дистанционного управления использует джойстики в стиле игровой консоли и может записывать изображения на карты microSD объемом до 32 ГБ или транслировать контент через Wi-Fi. Бесплатное приложение Fifish позволяет редактирование, восстановление цвета, звуковая дорожка и мгновенный обмен. Предусмотрена фиксация положения и глубины. Масса дрона 2,24 кг, габариты 381x330,2x142,2 мм. Очки ZEISS VR ONE Plus позволяют контролировать эффект погружения под воду. Можно наблюдать за процессом через виртуальную реальность и контролировать движения гаджета наклонами головы. Кроме этого, на смартфон хозяина поступит оповещение о приближении рыбы.



Рисунок 7 – Подводный дрон фирмы Copter Time модель QYSEA FIFISH V65

Подводный дрон RoboSea VIKI V1.0 красный (рисунок 8) [12] приводится в движение хвостом сзади. Имеет значительное улучшение качества изображения/видео благодаря встроенному подвесу для защиты от дрожания. Осуществляется надводное управление с помощью мобильного приложения и подводное управление

дистанционное звуковое. Глубина погружения 100 м. Дрон способен с помощью ИК датчика обнаруживать препятствия в радиусе 30 см и избегать их. После потери контакта возможно автоматическое возвращение на базу по данным встроенного GPS-навигатора. 16 МП ТВ камера 4K Video HD имеет угол поля зрения 150°. Объем видеопамяти 1,5 – 2 часа. Подвес и корпус ВІКІ работают вместе. Имеются две СД лампы со световым потоком 114 лм. Высокоточный двигатель стабилизирует каждое, самое легчайшее движение и тонко регулирует угол съемки камеры. Глубина погружения 59 м. Имеется функция прокладывания маршрута и встроенная память 32 Гб, встроенный GPS. Скорость движения 1,8 км/ч. Масса дрона 1,1 кг, габариты 265x105x148 мм. Время работы 2 часа. Дистанция управления 50 м, дистанция передачи 25 м. В мобильном приложении содержится информация о появлении и размещении рыбы, температуре воды, глубине погружения, подводном ландшафте.

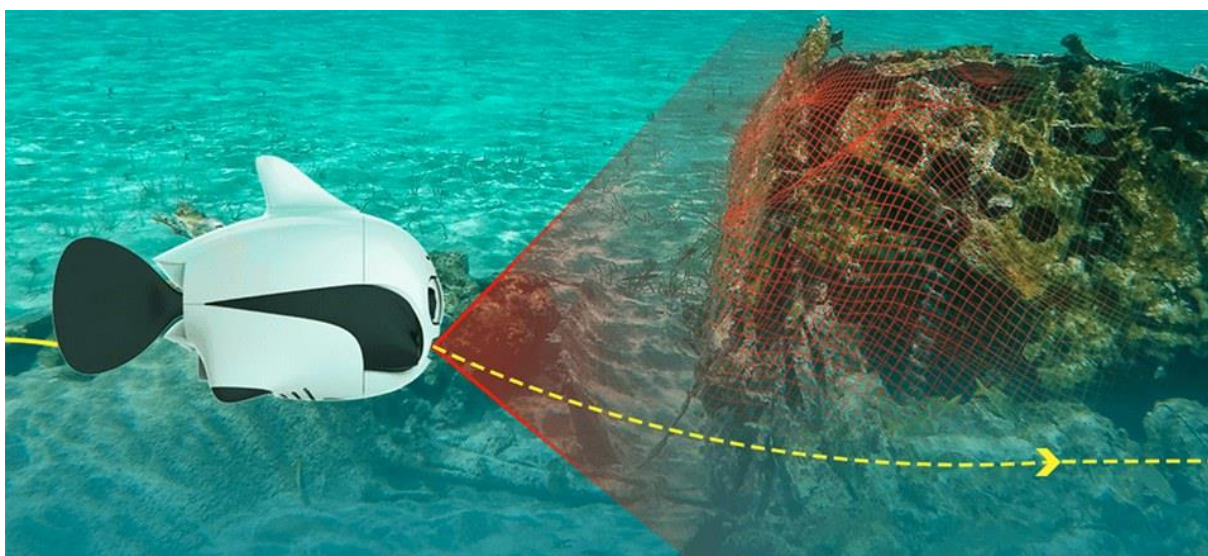


Рисунок 8 – Применения подводного дрона RoboSEA VIKI V.1.0 для поиска затонувших кораблей

Подводный дрон PowerVision PowerRay (рисунок 9) [13, 14] имеет сходные параметры и глубину погружения 30 м. Он содержит Очки ZEISS VR ONE Plus. Скорость движения 3 – 4 узла, время работы 4 часа. Дальность обнаружения рыбы 40 м. Информация передается оператору в реальном масштабе времени.



Рисунок 9 – Применения подводного дрона PowerRay для ловли рыбы

Подводный дрон PowerRay с ТВ подводной камерой PowerVision Power Ray Explorer (рисунок 10) [15] для исследования подводной флоры и фауны, рыбной ловли. Время работы до 4 часов. Дрон погружается на глубину до 30 метров как в соленой, так и в пресной воде. Точность определения глубины ± 10 см. Оператор имеет возможность выбора направления движения робота и постоянную глубину работы. Кроме приложения дрон управляется посредством очков виртуальной реальности и пультом дистанционного управления. Через приложение возможна трансляция снимаемых видеок кадров в реальном времени. Наземный блок представляет собой головное устройство для связи робота и систем управления дроном – пультом д/у, очками и смартфоном. Скорость 3 – 4 узла. Имеется SD-карта 64 Гб. Рабочая температура 0 – 40°C, имеется интерфейс Wi-Fi. Масса 3,8 кг, габариты 465x270x126 мм. ТВ камера 1/2.3 дюйма CMOS, 12 Мп. Разрешение фото 4000×3000 пикселей, формат 4:3 (по умолчанию), разрешение 8Мп: 3840×2160 пикселей, формат 16:9, разрешение 5Мп: 2560×1920 пикселей, формат 4:3, разрешение видео 4К: 3840×2160 пикселей, частота кадров 25 Гц(по умолчанию), разрешение 1440 п: 2560×1440 пикселей, частота кадров 50 Гц, разрешение FHD: 1920×1080 пикселей, частота кадров 30/60 Гц, серийная съемка с частотой кадров 1/35 Гц, хранение 32G/64G; Имеются СД светильники с мощностью 3 Вт каждый, световой поток 450 лм (с регулировкой яркости), цветовая температура 6500 К; Относительное отверстие гидрообъектива 1:2,8, угол поля зрения 95°. Длина кабеля 50/70 м.



Рисунок 10 – Подводный дрон Power Vision Power Ray Explorer

Подводный дрон Geneinno Poseidon [14] имеет массу 3,4 кг, габариты 378x210x88 мм, скорость до 2 м/с, глубину погружения до 120 м, 3 электродвигателя с винтами (2 горизонтальные, 1 вертикальный, ТВ камера 1/2,9", CMOS, угол поля зрения 120°, разрешение UHD 1080p (для онлайн), формат FLV H.264.

Подводный дрон Geneinno Titan (рисунок 11) в 2 раза мощнее дрона Geneinno Poseidon [14]. Он имеет глубину погружения 150 м, кабель длиной 100 м, скорость 2 м/с, время работы 4 часа, масса 4,4 кг, габариты 390x347x165 мм, 6 электродвигателей с винтами (4 горизонтальные, 2 вертикальные), ТВ камера 4 К 1/2,5", CMOS), 12 МП, разрешение 1080 p, частота кадров 30 Гц, формат FLV H.264, MP4, JPEG, угол поля зрения 160°, 2 СД светильника со световым потоком 1500 лм каждый, SD-карта 32 Гб. Имеются датчики: гироскоп, акселерометр, компас, измеритель температуры. Рабочая температура (-10) – (+50)°С.



Рисунок 11 – Подводный дрон Geneinno Titan 200 м

Подводный дрон GLADIUS CHASING DORY Underwater Yellow Combo [16] имеет глубину погружения 15 м. ТВ камера 4 К имеет разрешение 1920x1080 p, формат MP4 и JPEG. Угол поля зрения 100°. Для управления необходимо подключить мобильное устройство к Wi-Fi бую от Dory. Используются 2 СД фонаря со световым потоком 250 лм для каждого и с цветовой температурой 5000 К. Дрон имеет 5 гребных винтов, допустимый уровень наклона 45°, а скорость движения под водой – 0,77 - 1, 5 м/с. Для безопасного использования устройства и предотвращения столкновений с подводными объектами, дрон оснащен трехосевым гироскопом и компасом.

Подводный дрон iBubble [1] для дайверов имеет глубину погружения 60 м, скорость 2 узла (около 3,5 км/ч), массу 5 кг, габариты 500x350x250 мм, время работы 1 час, имеется бортовой гидролокатор, семь двигателей. Система безопасности автоматически возвращает машину дайверу в случае низкого заряда батареи. Дрон способен следовать за аквалангистом, вооруженным специальным браслетом управления, или удаляться от него на дистанцию до 25 м. Браслет позволяет пловцу изменять режим работы камеры и отдавать некоторые команды.

Подводный дрон OpenROV Trident [1] содержит гироскоп, магнитометр, акселерометр и датчик глубины. Масса 3,4 кг, габариты 410x205x86 мм. Глубина погружения 100 м, скорость 2 м/с, время работы 3 – 4 часа, связь с оператором через подводный кабель и канал Wi-Fi; кабель управления: 25 и 100 м. ТВ камера Full HD снимает с разрешением 1080 p при частоте кадров 30 Гц. При этом используются 6 СД фар. Trident не только снимает фото и видео, но и способен создавать 3D модели и карты морского дна.

Подводный дрон CCROV [1] служит для обследования подводной части кораблей и судов, до поиска точек утечки в подводных трубопроводах. Дрон имеет

массу 5,5 кг, габариты: 208x204x158 мм, глубину погружения до 100 м, скорость 1 м/с, время работы 1 час, длина кабелей управления 25, 50, 74 и 95 мм. ТВ камера 4 К поддерживает видеорежимы 2,7 К, Full HD и HD. Фотосъемку она выполняет с разрешением 12 Мп. Для освещения подводных объектов применяются 4 СД прожектора. В движение SCROV приводят 4 горизонтальных и 2 вертикальных электродвигателя, чья совместная работа позволяет машине зависать или разворачиваться практически на месте.

Подводный дрон Aquabotix Endura 100 [1] имеет массу 6,8 кг, габариты 700x370x300 мм, глубину погружения до 100 м, крейсерскую скорость 2,8 км/ч, максимальную скорость 5,6 км/ч, время работы 3 – 4 часа, кабель управления длиной 60, 80 и 100 м. Имеются 5 двигателей, система датчиков и зондов способных, кроме прочего, измерять глубину погружения и температуру окружающей среды, обнаруживать утечки и брать пробы воды. Для управления используются ПДУ и мобильные устройства. Допускается применять и VR гарнитуру. ТВ камера имеет разрешение 1080 p с возможностью панорамной съемки и углом поля зрения 120°. Рабочий материал может записываться в 32 ГБ внутренней памяти. Для непосредственной связи с оператором используется бесплатное приложение Aquabotix ROV и сигнал Wi-Fi. Пилот получает возможность просматривать видео в реальном масштабе времени и дистанционно управлять перемещением и функциями подводного аппарата.

Подводный дрон Qysea Fifish P3 [3] имеет глубину погружения 100 м, массу 3,9 кг, габариты 331x143x393 мм. Угол поля зрения равен 166°. 6 независимых мотора, позволяют дрону свободно перемещаться в толще воды, выполнять вращения и зависать над объектом. Скорость 5,5 км/ч. Модель дополнительно комплектуется HDMI-блоком, обеспечивающим высококачественную передачу видеосигнала, а также VR-очками. Дрон оснащен 2 СД фонарями с цветовой температурой 5500 К, углом обзора 120° и световым потоком 2200 лм каждый. Управление дроном осуществляется при помощи эргономичного пульта ДУ с универсальным креплением для смартфона. Передача сигнала осуществляется по Wi-Fi связи на базовую станцию, которая соединяется с дроном посредством 100-метрового кабеля, выдерживающего до 80 кг на разрыв. Размер встроенной памяти 65536 Мб. ТВ камера 1/2.3” SONY CMOS 4 К 12 Мп имеет разрешение 4K UHD: частоту кадров 25/30 Гц, 1080P FHD: частоту кадров 25/30/50/60/100/120 Гц, 720P HD: частоту кадров 25/30/50/60/100/120/200/240 Гц. Чувствительность ISO 100-6400 для условий слабой освещенности. Формат изображения JPEG/DNG.

Подводный дрон МТПА [17] с манипулятором имеет назначения: поиск и осмотр затонувших объектов, спасательные операции, обследование подводной части судов, обследование подводных конструкций и сооружений, обследование трубопроводов и кабелей, подледные обзорные работы, оценка запасов морских биоресурсов, взятия проб грунта или небольших предметов, экологические исследования. Его информационно-измерительный комплекс (ИИК) состоит из навигационной высокочувствительной ЧБ камеры, цветной поворотной видеокамеры, цветной обзорной видеокамеры, датчика температуры, гидролокатора секторного обзора (опция) и дополнительных датчиков (опция) (датчик растворенного метана, электропроводности и пр.). В манипуляционный комплекс (МК) входят манипулятор-захват, электропривод поворота и лоток для образцов. Глубина погружения 200 м, скорость 0,7 м/с (горизонтальный ход), 0,3 м/с (вертикальный ход), скорость рыскания 75°, масса 26 кг, габариты 640x450x450 мм, напряжение питания 220 В, энергопотребление 450 Вт.

Подводный дрон «Обзор» МТПА [18] служит для [18] поиска подводных объектов, выполнения осмотровых и обследовательских работ под водой в прибрежных морских или внутренних водах, для установки гидроакустических маркеров и подъема предметов, захваченных манипулятором. Масса – 14 кг. Четыре двигателя HPDC 1502 (2 горизонтальных, 1 лаговый, 1 вертикальный). Дрон содержит цветную ТВ камеру (560 ТВЛ, 0,3 люкс) с углом обзора 270°, установленную на наклонной платформе с изменяемым углом наклона $\pm 90^\circ$ и датчиком обратной связи. Дополнительно может быть установлена выносная ТВ камера. Имеется СД светильник.

Подводный дрон AC-ROV [19] фирмы AC-CSS имеет глубину погружения до 75 м, массу 3 кг, габариты 203x152x146 мм, цветную видеокамеру (480 ТВЛ, 0,1 лк), 4 СД светильника с регулируемой яркостью. Гидрообъектив имеет фокусное расстояние 100 мм. Имеются 4 горизонтальных и 2 вертикальных двигателя. Оператор наблюдает изображение с экрана ЖК ТВ монитора диагональю экрана 5,6 дюймов. Напряжение питания 90/260 В или 124/370 В, энергопотребление 300 Вт.

Подводный дрон ТНПА ГНОМ (рисунок 12) [20] имеет глубину погружения 200 м, массу от 5 до 10 кг, габариты от 420...470x380...400 мм x270...300 мм, передняя ТВ камера FullHD,, разрешение 1080 p/720 p, чувствительность 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 70^\circ$, передний гидрообъектив имеет фокусное расстояние 3,3 - 10 мм, угол поля зрения 75 - 20°, задняя ТВ камера FullHD,, разрешение 1080 p/720 p, чувствительность 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 70^\circ$, задний гидрообъектив имеет фокусное расстояние 3,3 -

10 мм, угол поля зрения 75 - 20°, осветители от 2 до 6 ультра ярких СД белого света (2 передних верхних, два передних нижних, 2 задних), мощность каждого СД 10 Вт, полный световой поток 1800 лм, угол подсвета 105° для каждого СД, цветовая температура 4500 – 5600 К, есть регулируемое управление яркостью, имеется компас, бесплатформенная система ориентации и датчик глубины, ТВ ЖК монитор с сенсорным пультом управления на береговой станции имеет диагональ экрана 15 дюймов, напряжение питания 220 В.



Рисунок 12 – Подводный дрон ТНПА ГНОМ

Панорамная видеокамера для подводных дронов класса ГНОМ (рисунок 13) [20] относится к привязным ТВ системам с углом обзора 360°. Система состоит из 4-х видеокамер со встроенными СД осветителями, размещенные в общем герметичном корпусе. Видеокамеры расположены в горизонтальной плоскости. Одна из них может быть направлена вертикально вниз. Кроме того, подводный модуль оснащен датчиком глубины и компасом с выводом информации на ТВ монитор. Глубина погружения 300 м, кабель также имеет длину до 300 м. Видеокамера: 4 цветных (ч/б) ТВ камер Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 480 ТВЛ, 0,5 лк. Осветители 60 сверх ярких СД белого цвета свечения с плавной регулировкой яркости. Питание от 220 В, энергопотребление

30 Вт, масса подводного модуля 0,7 кг (всей системы с кабелем 50 м – 7 кг, габариты Ø90x190 мм.



Рисунок 13 – Панорамная видеокамера

Подводная привязная видеосистема для подводных дронов класса ГНОМ (рисунок 14) [20] предназначена для дистанционного осмотра подводных трубопроводов, скважин, контроля подводных работ, исследования подводной фауны и флоры, инспекций потенциально опасных объектов. Глубина погружения 400 м, кабель длиной до 600 м, ТВ камера Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 700 ТВЛ, 0,1 лк (цветной режим), угол поля зрения гидрообъектива 70°, 90° или 120°, осветители – до 45 ультра ярких СД белого света, световой поток 100 лм, есть регулируемое управление яркостью, масса подводного модуля 0,4 кг, всей системы 3 кг, габариты Ø82x125 мм, напряжение питания 220 В, энергопотребление 10 Вт.



Рисунок 14 – Подводная привязная видеосистема

Подводная привязная видеосистема для подводных дронов класса ГНОМ [20] имеет то же назначение. Глубина погружения 300 м, кабель длиной до 300 м, ТВ камера Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 480 ТВЛ, 0,5 лк (цветной режим), угол поля зрения

гидрообъектива 70°, 90° или 120°, осветители – до 45 ультра ярких СД белого света, световой поток 100 лм, есть регулируемое управление яркостью, масса подводного модуля 0,4 кг, всей системы 6,7 кг, габариты Ø82x125 мм, напряжение питания 220 В, энергопотребление 30 Вт, есть датчик глубины.

Подводный дрон ТНПА ГНОМ ПРО [20] имеет глубину погружения 150 м (опционально 300 м), массу подводного модуля 25 кг (всей системы 100 кг), габариты 600x389x400 мм, 4 двигателя, крейсерская скорость до 3 узлов, лаговая скорость до 0,5 узлов, грузоподъемность 5 кг, длина кабеля 150 м (до 400 м), Две ТВ камеры FullHD (передняя и задняя), чувствительность 0,1 лк (цветной режим), 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 50^\circ$, гидрообъектив имеет фокусное расстояние 3,6 мм, относительное отверстие 1:2, угол поля зрения 66°, осветители – 6 ультра ярких СД белого света (2 передних верхних, два передних нижних, 2 задних), мощность каждого СД 10 Вт, полный световой поток 6000 лм, угол подсвета 105° для каждого СД, цветовая температура 5600 – 6000 К, есть регулируемое управление яркостью, имеется компас и датчик глубины, ТВ ЖК монитор с сенсорным пультом управления на береговой станции имеет диагональ экрана 15 дюймов, напряжение питания 220 В, энергопотребление 2000 Вт.

Подводный дрон ТНПА ГНОМ ПРО Вектор [20] имеет глубину погружения 300 м (опционально 500 м), массу подводного модуля 35 кг (всей системы 100 кг), габариты 660x550x400 мм, 4 двигателя, крейсерская скорость до 3 узлов, лаговая скорость до 0,5 узлов, грузоподъемность 7 кг, длина кабеля 400 м (до 1000 м), передняя ТВ камера FullHD, разрешение 1080 p/720 p, чувствительность 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 70^\circ$, гидрообъектив имеет фокусное расстояние 3,3 - 10 мм, угол поля зрения 75 - 20°, передний СД осветитель имеет мощность 4 Вт, задняя ТВ камера FullHD, разрешение 1080 p/720 p, чувствительность 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 60^\circ$, гидрообъектив имеет фокусное расстояние 3,6 мм, угол поля зрения 66°, задний СД осветитель имеет мощность 4 Вт, осветители – 6 ультра ярких СД белого света (2 передних верхних, два передних нижних, 2 задних), мощность каждого СД 10 Вт, полный световой поток 6000 лм, угол подсвета 105° для каждого СД, цветовая температура 5600 – 6000 К, есть регулируемое управление яркостью, имеется компас, бесплатформенная система ориентации и датчик глубины, ТВ ЖК монитор с сенсорным пультом управления на береговой станции имеет диагональ экрана 15 дюймов, напряжение питания 220 В, энергопотребление 2000 Вт.

Подводный дрон ТНПА Супер-4-150 [20] имеет глубину погружения 100 м, длину кабеля до 200 м, ТВ камера - цветная PAL CCD480 ТВЛ, 0,5 лк, осветители – 35 СД белого цвета свечения, диапазон рабочих температур (-5) – (+45)°С, масса модуля 3 кг, всей системы 18 кг, есть компас и датчик глубины с режимом автоматической ее стабилизацией.

Подводный дрон ТНПА Супер ГНОМ [20] имеет глубину погружения 150 м, массу 5 кг (всей системы 30 кг), габариты 360x220x200 мм, 4, 6 или 8 двигателей, крейсерская скорость до 4 узлов, лаговая скорость до 2 узлов, грузоподъемность до 3 кг, длина кабеля до 400 м, передняя ТВ камера Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 700 ТВЛ 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 70^\circ$.

Подводный дрон ТНПА Супер ГНОМ 2 [20] имеет глубину погружения 150 м (предельно допустимую 250 м), масса модуля 4 кг, всей системы 25 кг, габариты 330x200x190 мм, 4 двигателя, крейсерская скорость до 3 узлов, длина кабеля до 300 м, цветная ТВ камера Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 520 ТВЛ 0,01 лк наклон камеры регулируется в пределах $\pm 50^\circ$, есть СД осветители, напряжение питания 220 В, энергопотребление 200 Вт, имеются цифровой компас, датчик глубины с функцией удержания глубины, гидролокатор кругового обзора, гидроакустическая навигационная система, манипулятор.

Подводный дрон ТНПА Супер ГНОМ Про [20] имеет глубину погружения 150 м (предельно допустимую 300 м), масса модуля 10 кг, всей системы 45 кг 330x200x190 мм, 3 - 5 двигателей, крейсерская скорость до 3 узлов, длина кабеля до 300 м, цветная ТВ камера Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 520 ТВЛ 0,01 лк наклон камеры регулируется в пределах $\pm 50^\circ$, есть СД осветители с сервоприводом их наклона в пределах $\pm 50^\circ$, напряжение питания 220 В, энергопотребление 1200 Вт, имеются цифровой компас, датчик глубины с функцией удержания глубины, гидролокатор кругового обзора, гидроакустическая навигационная система, манипулятор одно- или двухступенной, многолучевой сонар высокого разрешения, доковая станция (для работы на глубине 500 м), цифровое устройство видеозаписи.

Подводный дрон ТНПА ГНОМ Стандарт [20] имеет глубину погружения 150 м, массу 4 кг (всей системы 25 кг), габариты 350x200x200 мм, 4 двигателя, крейсерская скорость до 3 узлов, грузоподъемность 0,3 кг, длина кабеля 250 м, ТВ камера Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 700 ТВЛ, 0,1 лк (цветной режим), 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 50^\circ$, гидрообъектив имеет фокусное расстояние 3,6 мм, относительное отверстие 1:2, угол поля зрения 66° , осветители – 8 ультра ярких СД белого света, количество осветителей 2, количество СД 4, мощность 1

Вт каждый, световой поток 400 лм, угол подсвета 105° для каждого СД, цветовая температура 5600 – 6000 К, есть регулируемое управление яркостью, ТВ ЖК монитор с сенсорным пультом управления на береговой станции имеет диагональ экрана 15 дюймов, напряжение питания 100 - 240 В, 60 – 50 Гц, энергопотребление 300 Вт.

Подводный дрон ТНПА ГНОМ Микро [20] имеет глубину погружения 150 м, массу 3 кг (всей системы 15 кг), габариты 350x200x200 мм, 3 двигателя, крейсерская скорость до 2 узлов, длина кабеля 250 м, ТВ камера Sony Super HAD CCD 1/3 дюйма, 700 ТВЛ, 0,1 лк (цветной режим), 0,01 лк (ч/б режим), наклон камеры регулируется в пределах $\pm 50^\circ$, гидрообъектив имеет фокусное расстояние 3,6 мм, относительное отверстие 1:2, угол поля зрения 66°, осветители – 12 ультра ярких СД белого света, количество осветителей 2, количество СД 6, мощность 0,5 Вт каждый, световой поток 150 лм, угол подсвета 105° для каждого СД, цветовая температура 5600 – 6000 К, есть регулируемое управление яркостью, ТВ ЖК монитор с сенсорным пультом управления на береговой станции имеет диагональ экрана 15 дюймов, напряжение питания 100 - 240 В, 60 – 50 Гц, энергопотребление 200 Вт.

Устройство видеокоррекции LYYN T38 (рисунок 15) [20] автоматически решает проблему плохой видимости под водой (замутнение, недостаточная освещенность и др.) и имеет массу 0,925 кг, габариты 54x172x184 мм, напряжение питания = 12 В, энергопотребление 30 Вт, задержку сигнала 1/25 с (PAL), 1/30 с (NTSC). Видеосигнал ТВ камеры обрабатывается в реальном масштабе времени. Изображение улучшается при его трансляции в данный момент или записанного ранее. В изображении на экране ТВ монитора можно увеличить и приблизить конкретный интересующий оператора объект.



Рисунок 15 – Устройство видеокоррекции LYYN T38

На рисунке 16 наглядно показана эффективность применения устройства видеокоррекции LYYN T38. На рисунке 16 слева в замутненной воде без применения устройства видеокоррекции ничего не видно, только слегка просматривается кабель. На рисунке 16 справа в тех же условиях с применением устройства видеокоррекции отчетливо наблюдается водный ландшафт и проплывающая рыба.



Рисунок 16 – Эффективность работы устройства видеокоррекции LYYN T38 в ухудшенных условиях видения в замутненной воде: вид слева – без коррекции, вид справа – с коррекцией

Плата коррекции видео LYYN HAWK Board (рисунок 17) [20] осуществляет коррекцию подводного видеоматериала. Масса 150 г, габариты 96x80x30 мм, размер панели управления 80x50 мм, рабочая температура 0 - 50°C, напряжение питания 12 В, энергопотребление 1,2 Вт, память 8 Мб, имеется прямой аналоговый вход и два контрольных порта – один для пульта управления, другой для программного обеспечения через RS интерфейс, параметры видеовхода: видеостандарт NTSC (525 ТВЛ, частота кадров 30 Гц) или PAL (625 ТВЛ, частота кадров 30 Гц), параметры видеовыхода: те же, что и для видеовхода, предусмотрена автонастройка видеостандарта, настраиваются конфигурации входа и выхода, 10 ступеней коррекции для каждого доступного параметра видеоизображения, в том числе и параметры цвета: яркость, насыщенность, контрастность, параметры Iuup и Sync.

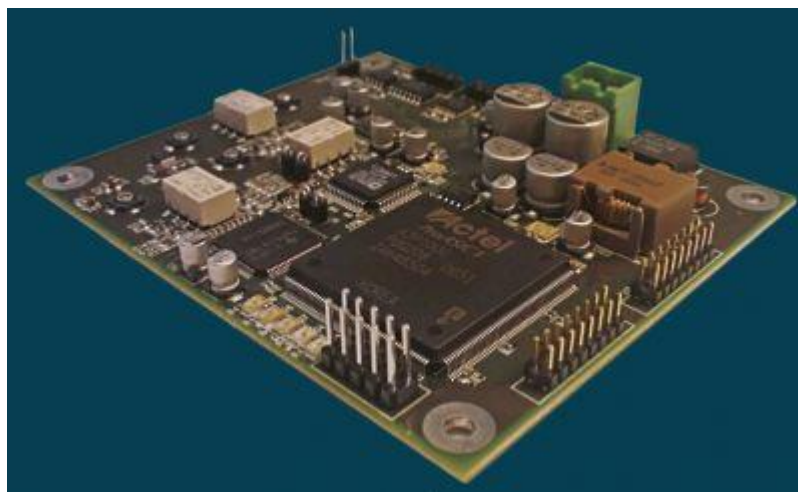
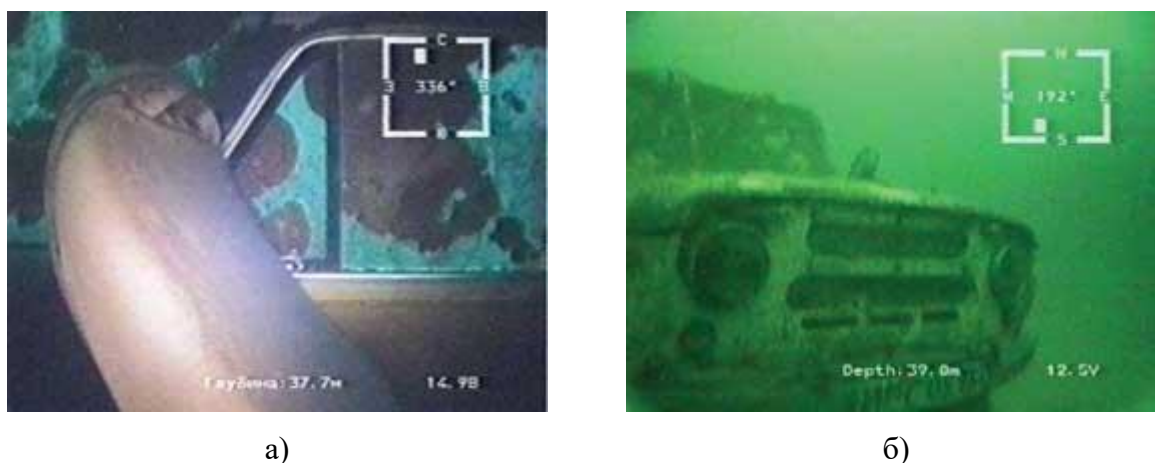


Рисунок 17 – Плата видеокоррекции видеоматериала LTTN Hawk Board

На рисунках 18а, б показан характер наблюдения затонувшей автомашины в замутненной воде при условии использования платы коррекции видео LYUN HAWK Board. Как видно из рисунка 18, изображение имеет достаточно высокое качество.



а)

б)

Рисунок 18 – Осмотр затонувшей автомашины: а – вид изнутри, б – вид снаружи

Подводный дрон ТПА VIDEORAY DEEP BLUE [21] имеет глубину погружения 305 м, длина троса 335 м, скорость 4,1 узла, ТВ камера носовая цветная, закрепленная в 2-х степенном подвесе, 570 ТВЛ, 0,3 лк, стандарт NTSC, PAL, ТВ камера кормовая – 430 ТВЛ, 0,1 лк, освещение носовое – 2 галогенных фонаря мощностью по 20 Вт, кормовое – СД высокой яркости, ТВ ЖК монитор с сенсорным пультом управления на береговой станции имеет диагональ экрана 15 дюймов, напряжение питания = 12 В, энергопотребление 800 Вт.

Подводный дрон ТПА Scout компании VideoRay (США) [22] имеет глубину погружения 76 м, скорость 1,9 узла, кабель длиной 40 м, передняя цветная ТВ камера 620 ТВЛ, 0,3 лк, стандарт NTSC, освещение: 2 галогенных фонаря по 20 Вт, 2

двигателя, ЖК дисплей с размером диагонали экрана 5 дюймов, напряжение питания = 48 В.

Перспективы развития подводных дронов

Подводные дроны будут продолжать свое совершенствование. Оно связано с увеличением глубины погружения, скорости перемещения, расширения функциональных возможностей и прежде всего с повышением качества изображения и чувствительности ТВС. Для создания таких ТВС наиболее подходят МССД камеры, обладающие настолько высокой чувствительностью, что их применение в сумерках и ночью возможно без установки на их входе ЭОП. При этом для ТВ камеры должны быть использованы светосильные широкоугольные гидрообъективы с асферическими оптическими поверхностями с киноформной и градиентной оптикой. Это позволит существенно повысить качество изображения и светосилу объектива, а, значит, увеличить дальность подводной фото- и видеосъемки. Дальнейшие перспективы развития подводных дронов связаны с объединением их ТВ камер с гидролокаторами-звуковизорами. Это позволит существенно расширить поисковые возможности подводных дронов, причем в неблагоприятных условиях видения под водой (замутнение, турбулентность и др.).

Выводы

1. Описан метод расчета дальности действия ТВ системы для подводного дрона.
2. В настоящее время существует достаточно широкая номенклатура подводных дронов с многообразным применением.
3. В состав подводного дрона входит одна или несколько ТВ камер. В последнем случае ТВ камеры располагаются как спереди, так и сзади дрона.
4. Для эффективной работы ТВ камеры используются установленные на подводном дроне один или несколько сверх ярких СД или галогенных светильников белого цвета свечения с регулировкой яркости для подсвета впереди или сзади расположенных объектов.
5. ТВ камеры с использованием гидрообъективов могут работать на глубине погружения от 100 и более метров.
6. Существует возможность обработки видеоизображения в реальном масштабе времени с использованием соответствующих встроенных устройств видеокоррекции.
7. При достаточно высоких уровнях освещенности (0,1 лк и выше) подводная ТВ камера может работать в цветном режиме, а при низких уровнях освещенности (0,01 лк и ниже) – в черно-белом (ч/б) режиме.

В зависимости от используемого гидрообъектива ТВ камера имеет угол поля зрения от 70° до 166° а угол подсвета осветителя может составлять от 105° до 120°. При этом регулируемые углы наклона ТВ камер и осветителей составляют не менее ±50°.

Литература

1. Подводные дроны. Подборка топ моделей, применение, характеристики, нюансы управления. [Электронный ресурс] URL: <http://Mykvadrocopter.ru> (дата обращения 28.07.2023).
2. Подводные дроны – выбор квадрокоптера с камерой для рыбалки, водонепроницаемый дрон для подводной съемки и другие модели. [Электронный ресурс] URL: <http://Story-podskazka.ru> (дата обращения 28.07.2023).
3. Лучшие подводные дроны 2019 года – рассмотри их поближе. [Электронный ресурс] URL: <http://Wife.ru> (дата обращения 28.07.2023).
4. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях. М., Недра, 1999, 286 с.
5. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Достижения в технике видения. М., Техносфера, 2019, книга 1, 579 с.
6. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М., Новости, 2009, 840 с.
7. Подводный мини дрон CHASING M2 4K HD, время работы 2 часа, удержание глубины. [Электронный ресурс] URL: <http://Aliexpress.ru> (дата обращения 28.07.2023).
8. Подводный дрон CHASING – официальный сайт дистрибьютора. [Электронный ресурс] URL: <http://Chasing-russia.ru> (дата обращения 28.07.2023).
9. Подводный дрон CHASING Day Combo. DJI. [Электронный ресурс] URL: <http://Copter.time.ru> (дата обращения 28.07.2023).
10. Подводный дрон GLADIUS Mini Premium Combo + очки Goggles. DJI. [Электронный ресурс] URL: <http://Copter.time.ru> (дата обращения 28.07.2023).
11. Подводный дрон QUSEA FIFISH V65. DJI. [Электронный ресурс] URL: <http://Copter.time.ru> (дата обращения 28.07.2023).
12. Подводный дрон Robo Sea VIKI V1.0. красный. DJI. [Электронный ресурс] URL: <http://Copter.time.ru> (дата обращения 28.07.2023).
13. Подводный дрон PowerVision Power Ray (комплектация Anfer). DJI. [Электронный ресурс] URL: <http://Copter.time.ru> (дата обращения 28.07.2023).
14. Подводный беспилотник – рейтинг лучших подводных дронов. [Электронный ресурс] URL: <http://Future2.day.ru> (дата обращения 28.07.2023).

15. Подводная камера PowerVision Power Ray Explorer. [Электронный ресурс] URL: <http://Market.yandex.ru> (дата обращения 28.07.2023).
16. Подводный дрон GLADIUS CHASING DORY Underwater Yellow Combo. [Электронный ресурс] URL: <http://Market.yandex.ru> (дата обращения 28.07.2023).
17. Малогабаритный телеуправляемый подводный аппарат (МТПА). Проспект Института проблем морских технологий. РФ, М., 2023.
18. «Обзор». Малогабаритные телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. Проспект фирмы ОАО «Тетис ПРО», РФ., М., 2023.
19. Телеуправляемый подводный аппарат AC-ROV. Проспект фирмы AC-CESS (Великобритания), 2020.
20. Панорамная видеокамера – Подводные роботы и дроны – телеуправляемые подводные аппараты ГНОМ. Каталог фирмы ООО «Индэл-партнер» и ООО «Подводная робототехника». РФ., М., 2022.
21. Телеуправляемые подводные аппараты. Каталог фирмы VideoRay, (США), 2021.
22. Автономное водолазное снаряжение/Телеуправляемые подводные аппараты. Каталог ЗАО «Средства спасения». РФ., М., 2021.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУР

А.С. Кузнецов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва
E-mail: askuznetsov@bmstu.ru

Аннотация: Магнитооптические устройства активно используются для идентификации и верификации магнитных изображений на различных носителях (банкноты, ценные бумаги и т.п.). В работе рассматриваются и исследуются магнитооптические плазмонные наноструктуры в качестве чувствительного материала для обнаружения магнитной информации. Результаты исследований магнитоплазмонных структур показали, что в таких структурах наблюдается увеличение магнитооптического отклика по сравнению с обычными магнитными пленками на основе висмут-замещенного иттриевого феррит-граната. Результаты данных исследований позволят сформировать основные технические требования для проектирования портативных устройств считывания магнитной информации.

Ключевые слова: плазмонный резонанс, магнитооптика, эффект Фарадея, усиление эффекта, наноструктуры, благородный металл, магнитоплазмоника, детектирование.

INVESTIGATION OF MAGNETIC DATA CARRIERS USING MAGNETO- PLASMONIC NANOSTRUCTURES

A.S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: askuznetsov@bmstu.ru

Abstract: Magneto-optical devices are actively used to identify and verify magnetic images on various media (banknotes, securities, etc.). Magneto-optical plasmon nanostructures are considered and investigated as a sensitive material for detecting magnetic information. The results of the research of magneto-plasmonic structures have shown that in such structures there is an increase in the magneto-optical response compared with conventional magnetic films based on bismuth-substituted yttrium iron garnet. The results of these studies will allow

us to form the basic technical requirements for the design of portable magnetic information reading devices.

Keywords: plasmon resonance, magneto-optics, Faraday effect, effect enhancement, nanostructures, noble metal, magneto-plasmonic, detection.

Введение

Методы регистрации и визуализации магнитной информации существуют уже много десятилетий и занимают устоявшуюся нишу в промышленности. Считывающие устройства используют неоптические механизмы для получения данных с носителя (магнитные головки). Однако структура носителя информации представляет собой массив данных переменной намагниченности [1-3]. Это позволяет использовать магнитооптические материалы, которые представляют собой магнитомягкие прозрачные носители (например, перламаллои Fe-Ni, чистое железо, Fe-Co-Ni, альсиферы) и способны «копировать» структуру намагниченности носителя информации, располагая его на некотором близком расстоянии [2]. В настоящее время устройства, которые используются для идентификации и верификации магнитной информации, не могут работать со сложными скрытыми магнитными изображениями. Возможность магнитооптической визуализации, копирования и считывания записи с магнитных носителей (лент, дисков и т.п.) была продемонстрирована в работах [4, 5], где, в частности, было показано, что визуализирующей магнитооптической пленке, сопряженной с магнитным носителем, формируется упорядоченная доменная структура, однозначно воспроизводящая структуру полей рассеяния от магнитных носителей источников. Однако, чувствительность данного метода зависит от качества используемых поляризаторов, оптики и используемой пленки феррит-граната. Получение высококонтрастного изображения магнитных структур с периодом порядка 1 мкм является актуальной задачей.

Таким образом, целью работы является оценка возможности использования плазмонных дифракционных структур в сочетании с магнитооптическим слоем феррит-граната (далее магнитоплазмонная структура) для повышения чувствительности данной структуры к внешним магнитным полям. Главной особенностью этих структур является резонансное усиление эффекта Фарадея за счет локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) [6-8].

1. Материалы и методы

Для проведения теоретических и экспериментальных исследований магнитоплазмонных структур для регистрации информации с магнитных носителей была использована схема [9], представленной на рисунке 1.

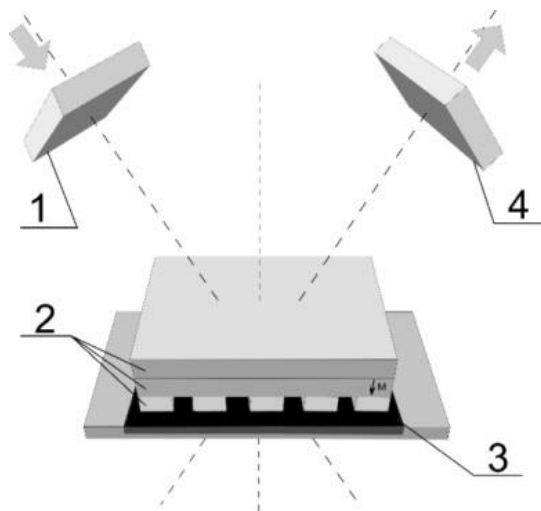


Рисунок 1 – Схема визуализации магнитной информации на основе магнитоплазмонной структуры: 1 – поляризатор, 2 – магнитоплазмонная структура, 3 – носитель с магнитной информацией, 4 – анализатор

Схема работает следующим образом: свет от источника излучения проходит через поляризатор 1, становясь *P*-поляризованным. Такая поляризация необходима для возбуждения плазмонного резонанса. Далее плоскость поляризации подвергается вращению из-за эффекта Фарадея, совместно с эффектом Керра, и усиление магнитооптических (МО) эффектов в магнитооптическом слое структуры 2. В качестве магнитооптического материала используется намагниченный висмутзамещенный железоиттриевый феррит-гранат. Поскольку материал прозрачен в видимом диапазоне, вкладом эффекта Керра можно пренебречь. Излучение, отраженное от магнитоплазмонной структуры 2 после воздействия на него магнитного поля от носителя магнитной информации 3, проходит через анализатор 4. Регистрируя уменьшение интенсивности излучения после анализатора, можно судить о состоянии намагниченности магнитоплазмонной структуры. Это позволит определить наличие внешних источников магнитного поля, приложенного к магнитоплазмонной структуре 2. Использование дифракционной решетки, выполненной из благородного металла (золото или серебро), позволит усилить эффект Фарадея за счет возникновения локализованного поверхностного плазмонного резонанса в магнитооптическом слое структуры [10 -11].

2. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования магнитоплазмонных структур были проведены на образце с тремя дифракционными решетками и магнитооптическим слоем Vi:YIG, нанесенным на кварцевую подложку (рисунок 2). Решетка была сформирована методом электронной литографии из золотых нанодисков с периодами 200, 300 и 400 нм. Высота дисков составляла 30 нм, диаметр – 100 нм. Толщина Vi:YIG слоя составляла 90 нм [9].

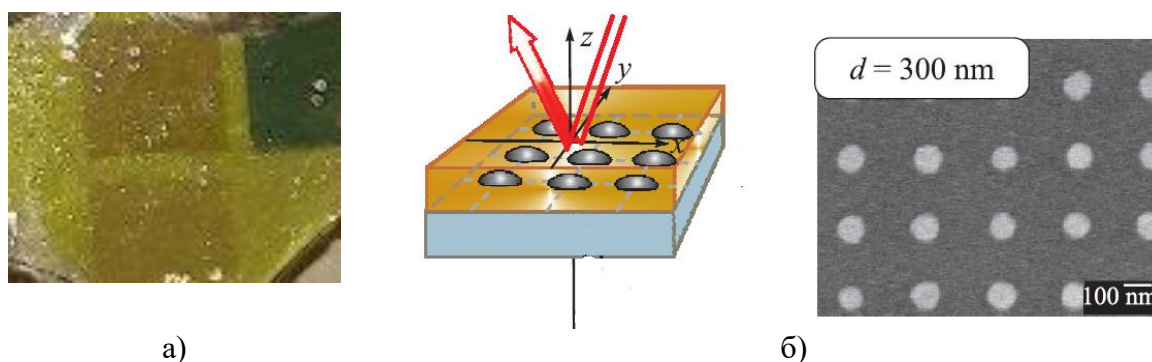


Рисунок 2 – Магнитоплазмонный образец: *a* – внешний вид, *б* – геометрия образца и фрагмент изображения структуры с периодом 300 нм, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

Исследование плазмонного усиления магнитооптического отклика и определение зависимости МО отклика от расстояния между магнитоплазмонным образцом и носителем магнитной информации проводились на спектроскопическом эллипсометре SENresearch 4.0. При данных измерениях определяются не сами коэффициенты отражения, а их отношение по следующей зависимости:

$$\rho = \operatorname{tg} \Psi \exp(i\Delta) = \frac{R_p}{R_s},$$

где параметры Ψ и Δ – эллипсометрические параметры, физический смысл которых заключается в следующем:

- $\operatorname{tg} \Psi$ показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения R для p - и s - волн;
- Δ равен разности между фазовыми скачками p - и s - волн при отражении.

В ходе эксперимента магнитоплазмонный образец закреплялся на постоянном магните таким образом, чтобы данный образец подвергалась влиянию быстро спадающего магнитного поля, удаляясь от магнита (рисунок 3).

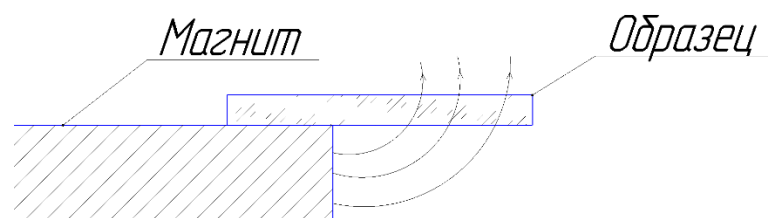


Рисунок 3 – Взаимное расположение магнитоплазмонного образца относительно источника магнитного поля

На рисунке 4 представлены спектры вращения плоскости поляризации отраженного от магнитоплазмонного образца света для структуры с 2D плазмонной дифракционной решеткой с периодом 300 нм, с слоем магнитооптического вещества и золотыми нанодисками (структура Vi:YIG-Au) (рисунок 4б), и для структуры чистого феррит-граната Vi:YIG (без золотых нанодисков) (рисунок 4а). Анализ графиков показывает, как на МО отклик влияет расстояния от источника магнитного поля. Изменение во вращении плоскости поляризации для чистого граната Vi:YIG на длине волны 517 нм составляет примерно 1 град. на расстоянии 1 мм от магнита, а для структуры с решеткой из благородного металла порядка 12 град. на длине волны близкой к 540 нм, и 43 град. на длине волны около 850 нм. Результаты получены при падении света на образец под углом 70 град. Перемещение образца осуществлялось движением площадки эллипсометра с шагом 100 мкм.

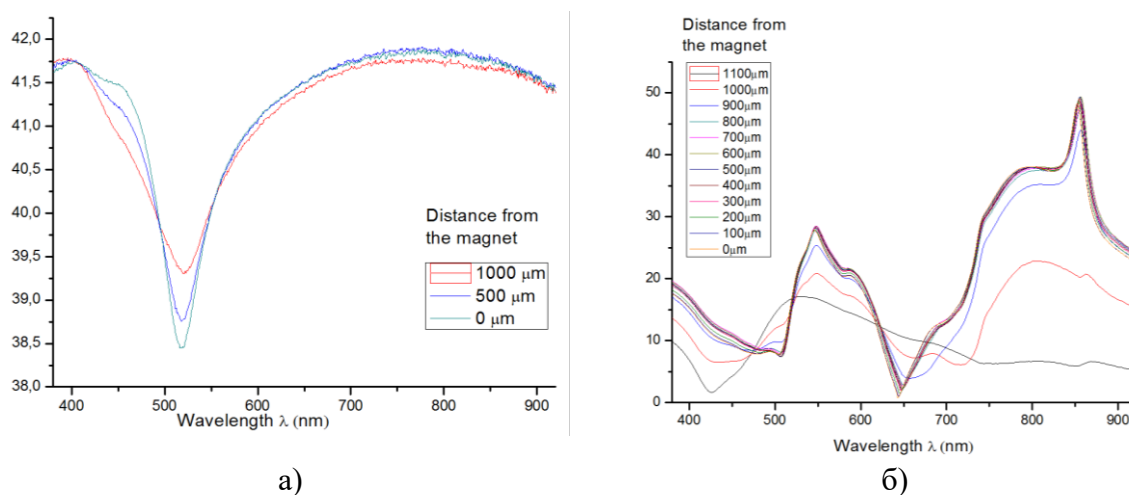


Рисунок 4 – Спектры вращения плоскости поляризации отраженного излучения от структур на разных расстояниях от магнита: а – Vi:YIG, б – Vi:YIG-Au

Одной из важных задач исследований было определение возможности регистрации магнитной информации с ее физического носителя. Для этого была выбрана пластиковая карта с записанной на магнитной полосе информацией (рисунок 5а), на которой располагался магнитоплазмонный образец. Информация на магнитной

полосе представляется в виде чередующихся намагниченных и ненамагниченных участков, визуализированное изображение которых представлено на рисунке 5б.



Рисунок 5 – Иллюстрация: *а* – фотография магнитоплазмонного образца, расположенного на пластиковой карте с намагниченным слоем, *б* – магнитооптическое изображение магнитной информации в магнитной слое, полученное с помощью визуализатора «Маг-Видео»

Сканирование структуры, расположенной над магнитным носителем, проводилось вдоль магнитной полосы с шагом 50 мкм. Спектры вращения плоскости поляризации излучения в зависимости от координаты на структуре представлены на рисунке 6. Наблюдаемое отличие в спектрах заключается в попадании на намагниченные участки, стенки раздела доменов.

На рисунке 7 представлена наиболее яркая разница в спектрах вращения плоскости поляризации. Это сравнение спектра вращения плоскости поляризации света, отраженного от участка, который в меньшей степени подвергался влиянию магнитного носителя информации и участка находящегося непосредственно над намагниченной частью магнитной полосы. Магнитоплазмонный образец располагался на носителе магнитной информации, как показано на рисунке 1.

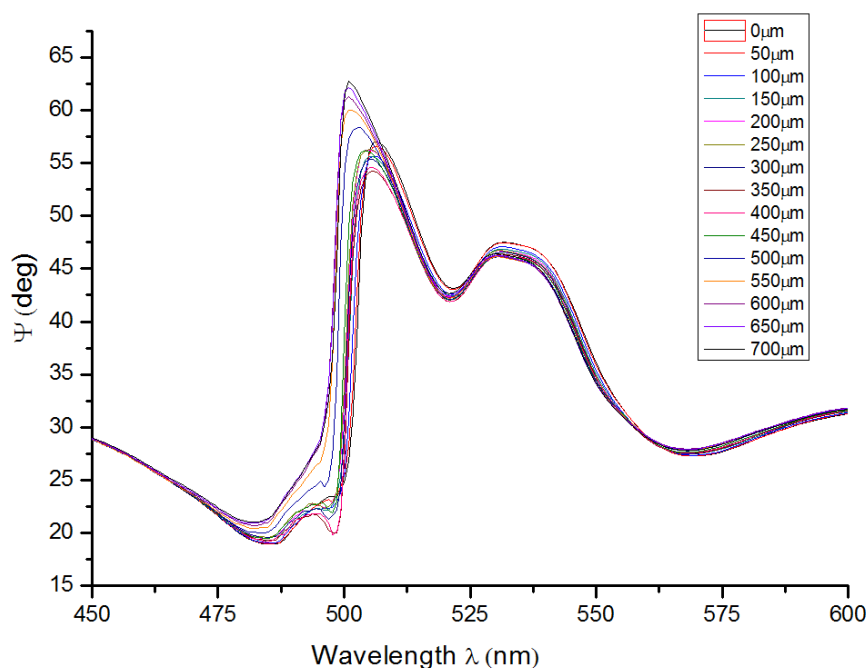


Рисунок 6 – Спектры вращения плоскости поляризации в зависимости от координаты на исследуемой структуре

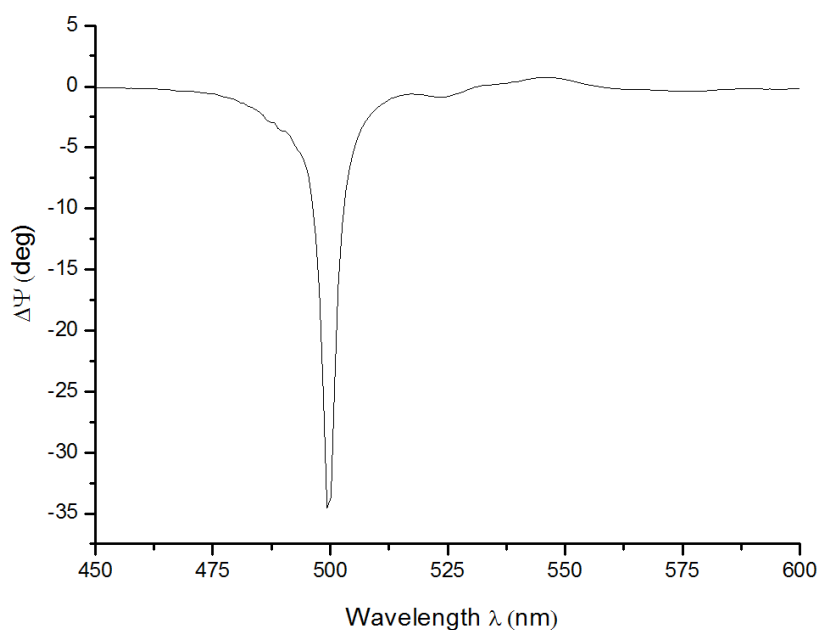


Рисунок 7 – Разность спектров вращения плоскости поляризации

Заключение

В данной работе впервые продемонстрирована практическая возможность реализации усиления магнитооптического эффекта Фарадея при регистрации магнитных изображений с физического носителя, типа пластиковой банковской карты. Носителями магнитной информации при этом могут быть ценные документы (банкноты, денежные купюры), аудио-видеозапись, а также защитные голограммы, исследование которых предполагает использование магнитооптического эффекта

Фарадея [12]. Использование плазмонных эффектов в предложенной в работе структуры Vi:YIG-Au позволяет увеличить чувствительность оптико-электронных приборов для обнаружения более слабых магнитных полей, или магнитных изображений с периодами порядка 1 мкм. Получены спектры отражения и пропускания магнитоплазмонного образца при различных условиях воздействия магнитного поля, показывающее влияние удаления источника магнитного поля от исследуемой магнитоплазмонной структуры на магнитооптический отклик.

Благодарность

Автор выражает благодарность Барышеву Степану Александровичу за помощь в подготовке и обсуждению результатов экспериментальных исследований.

Литература

1. Odinson, S. V. Optoelectronic Device for Reading of Hidden Magnetic Information from the Holograms / S. V. Odinson, A. P. Gubarev, A. S. Kuznetsov // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2008. – Vol. 17, No. 1. – P. 15-22. – DOI 10.3103/S1060992X08010037.
2. Одиноков, С. Б. Исследование возможности магнитооптической регистрации магнитных сигналов формата записи типа VHS / С. Б. Одиноков, А. С. Кузнецов, А. В. Карев // *Естественные и технические науки*. – 2014. – № 4(72). – С. 122-124.
3. Губарев, А. П. Магнитооптическая визуализация двухслойных магнитных структур / А. П. Губарев, А. С. Кузнецов, С. Б. Одиноков // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*. – 2005. – № 3(60). – С. 25-40.
4. Matsuda H., Yamata T. High frequency response of a magneto-optical readout head // *IEEE Trans. Magn.* – 1984. Vol. MAG – 17. – N 6. – P. 3238-3240.
5. Komada O., Minemoto H., Ishizuka S. Application of bismuth-substituted iron garnet films to magnetic field sensors // *J. Magn. Soc. Jap.* 1987. – Vol. 11. – Suppl. NS1. – P. 1001-1004.
6. Armelles, G. Magnetoplasmonics: combining magnetic and plasmonic functionalities / G. Armelles G [et al.] // *Advanced Optical Materials*. – 2013. – Vol. 1. – №. 1. – P. 10-35.
7. Belotelov, V. I. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals / V. I. Belotelov [et al.] // *Nature Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 6. – №. 6. – P. 370.
8. Chin, J. Y. Nonreciprocal plasmonics enables giant enhancement of thin-film Faraday rotation / J. Y. Chin [et al.] // *Nature communications*. – 2013. – Vol. 4. – P. 1599.

9. Baryshev, S. A. Increase of the magnetic information sensing performance of magneto-optical plasmonic structures / S. A. Baryshev, S. B. Odinsonov, A. S. Kuznetsov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Munich, 24–26 июня 2019 года. – Munich, 2019. – P. 110621. – DOI 10.1117/12.2526000.
10. R. Fujikawa, A. V. Baryshev, J. Kim, H. Uchida, M. Inoue, Contribution of the surface plasmon resonance to optical and magneto-optical properties of a Bi:YIG-Au nanostructure// J. Appl. Phys. – 2008. – V. 103. – P. 07D301.
11. A.V. Baryshev, H. Uchida, M. Inoue, Peculiarities of plasmon-modified magneto-optical response of gold–garnet structures// J. Opt. Soc. Am. B – 2013. – V. 30. – I. 9. – P. 2371–2376.
12. Губарев А.П., Шалыгин А.Н., Сарычев А.К., Иванов А.В., Быков И.В., Кузнецов А.С., Одиноков С.Б., Смык А.Ф. Использование молекулярной маркировки в защитных голограммах // Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – № 3. – С. 47–55. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03- 47-55.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕФРАКТОМЕТРЕ И МЕТОДЫ ЕЁ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цю Ливэнь, Пиотровская И.Н.

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

E-mail: 980686518@qq.com; Piotrovski-in@bmstu.ru

Аннотация: В статье рассматривается влияние шероховатости поверхности на точность оптических измерений. Предлагается математическая модель и ее программные реализации в COMSOL и Python для моделирования шероховатых поверхностей и анализа их влияния на процессы отражения и преломления света. Показано, на примере автоматического рефрактометра, влияние шероховатости рабочей грани призмы на точность измерений. Особое внимание уделено оценке погрешности измерения показателей преломления.

Ключевые слова: рефрактометр, полное внутреннее отражение, шероховатость поверхности, моделирование, точность измерений.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS ON THE ACCURACY OF OPTICAL MEASUREMENTS IN AN AUTOMATIC REFRACTOMETER AND METHODS OF ITS MODELING

Qiu Liwen, Piotrovskaya I.N.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: 980686518@qq.com; Piotrovski-in@bmstu.ru

Abstract: The article discusses the impact of surface roughness on the accuracy of optical measurements. It proposes a mathematical model and its software implementations in COMSOL and Python for simulating rough surfaces and analyzing their impact on the processes of reflection and refraction of light. The effect of roughness on the working face of a prism in an automatic refractometer on measurement accuracy is demonstrated. Particular attention is paid to the assessment of the measurement error of refractive indices.

Keywords: refractometer, total internal reflection, surface roughness, simulation, measurement accuracy.

Введение

В процессе взаимодействия предметов со световыми волнами окружающей среды, падающее излучение после отражения от предмета может изменить как своё направление, так и свои характеристики. Исследование отраженного излучения можно проводить, используя откалиброванные камеры и источники света или же с помощью аналитических методов. Модели на основе аналитических методов, благодаря более простым математическим формам, более удобны в использовании, чем физические модели. Однако, аналитические модели применимы только в случаях, когда размеры дефектов поверхности малы по сравнению длиной волны падающего излучения [1].

С оптической точки зрения, характеристики отраженного от поверхности предмета света хорошо описываются двулучевой функцией отражательной способности (BRDF - bidirectional reflectance distribution function) [19]. Концепцию BRDF впервые в 1970 году предложил Никодемус [2]. Она описывает отношение яркости и освещенности поверхности при заданном направлении падающего и отраженного излучения определенной длины волны. Так как BRDF является внутренним свойством поверхности, путем моделирования отражательных характеристик различных поверхностей можно получить модели BRDF для этих поверхностей и оценить оптическую информацию отраженного (или падающего) света при заданном падающем (или отраженном) свете. В настоящее время создано множество моделей BRDF для однослойных поверхностей. Эти модели BRDF нашли важное применение в области оптического обнаружения и идентификации объектов [3], а также в технологиях высокореалистичной визуализации в компьютерной графике [4], показав хорошие результаты в симуляциях.

Представление шероховатой поверхности: BRDF описывает распределение отражения света от поверхности, поэтому модель шероховатости должна быть адекватно описана микроструктурой самой поверхности. Микрохарактеристики шероховатой поверхности могут быть представлены двумя методами: использование статистических методов для описания их свойств или использование метода генерации поверхности для создания реалистичности.

1. Принцип работы рефрактометра

Рассмотрим принцип работы рефрактометра основанного на эффекте полного внутреннего отражения, используемый в наиболее распространённых типах промышленных рефрактометров [5-9]. На рисунке 1 представлена схема рефрактометра. Излучение светодиода 1 с помощью линзы 2 фокусируется на границе раздела двух сред (измерительная призма 3 и измеряемое вещество 4). При углах падения φ , превышающих некий предельный угол $\varphi_{\text{пре}}$, происходит полное внутреннее отражение, и отраженный от границы раздела двух сред пучок, формирует светлое поле в плоскости ФПУ 5 (фотоприемного устройства). В случае $\varphi < \varphi_{\text{пре}}$ наблюдается темное поле. Граница между этими областями, обозначаемая как граница «свет-тень» 6, соответствует предельному углу отражения $\varphi_{\text{пре}}$.

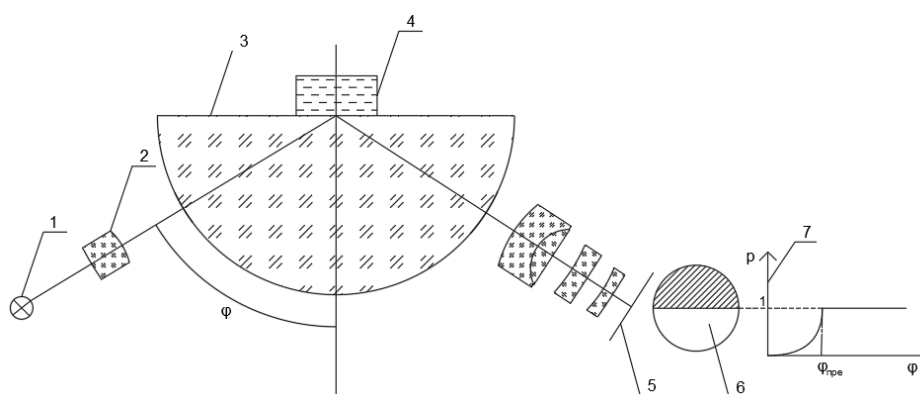


Рисунок 1 – Схема рефрактометра и распределение коэффициента отражения: 1 – источник света - светодиод; 2 – фокусирующая линза; 3 – измерительная полусфера; 4 – исследуемое вещество; 5 – ФПУ фотоприемное устройство; 6 – распределение освещённости в плоскости ФПУ, граница «свет-тень»; 7 – график углового распределения коэффициента отражения

Согласно формуле Френеля (1), мы можем получить зависимость $\rho(\varphi)$ коэффициента отражения от угла падения в плоскости ФПУ:

$$\rho(\varphi, n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\varphi - \arcsin[\frac{N}{n} \sin \varphi])}{\sin^2(\varphi + \arcsin[\frac{N}{n} \sin \varphi])} + \frac{tg^2(\varphi - \arcsin[\frac{N}{n} \sin \varphi])}{tg^2(\varphi + \arcsin[\frac{N}{n} \sin \varphi])} \right], & \text{если } \varphi \leq \arcsin\left(\frac{n}{N}\right), \\ 1, & \text{если } \varphi > \arcsin\left(\frac{n}{N}\right). \end{cases} \quad (1)$$

где φ – угол падения на границу раздела двух сред, n – показатель преломления измеряемого вещества, N - показатель преломления измерительной призмы.

Оптический сигнал в плоскости ФПУ преобразуется в дискретный видеосигнал. Значение предельного угла $\varphi_{\text{пре}}$ измеряется по положению границы «свет-тень» на многоэлементном приемнике – линейке фотоприемного устройства (ФПУ) [10].

После получения значения предельного угла можно получить значение показателя преломления измеряемого вещества по формуле (2)

$$n = N \sin(\varphi_{\text{пре}}), \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{пре}}$ – предельный угол падения на границу раздела двух сред.

Ошибки определения показателя преломления исследуемого вещества связаны с погрешностью определения положения границы "свет-тень". Современные автоматические рефрактометры, используемые для измерения показателя преломления различных сред, подвергаются высоким метрологическим требованиям. Например, необходимо измерять показатель преломления химически чистых растворов, продуктов питания и фармацевтических средств, а также различных видов топлива с погрешностью $\Delta n \leq 10^{-5}$ [11, 18]. Для уменьшения ошибки измерения показателя преломления исследуемого вещества при проектировании автоматического рефрактометра обращают внимание на множество факторов, таких как: спектральный диапазон источника излучения, температура окружающей среды и исследуемого вещества, а также качество рабочей поверхности преломляющей призмы.

2. Дефекты поверхности рабочей грани призмы

В процессе изготовления и эксплуатации оптических компонентов могут возникать определенные дефекты поверхности, такие как шероховатость. В данной статье рассмотрим влияние шероховатости рабочей поверхности призмы на точность измерений показателя преломления автоматическим рефрактометром.

Шероховатость поверхности оценивается на основе неровностей профиля, как показано на рисунке 2, который получается путем срезки реальной поверхности плоскостью (обычно нормальной к поверхности) [12, 13]. Параметры шероховатости поверхности определяются через среднюю линию, линии выступов и впадин, расположенные симметрично относительно неё, и анализируются в рамках ограниченной области, длина которой известна как базовая длина l .

Требования к шероховатости поверхности устанавливаются исходя из её функционального назначения, конструкции и возможностей обработки. Выбор параметров шероховатости зависит от их влияния на эксплуатационные характеристики. Основное внимание уделяется параметрам высоты, среди которых R_a является предпочтительным.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a — это среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где l – базовая длина, n – число выбранных точек профиля на базовой длине, y – отклонение профиля от средней линии.

Высота неровностей по десяти точкам R_z – это сумма средних абсолютных значений высот пяти самых высоких выступов профиля и пяти самых глубоких впадин профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5},$$

где y_{pi} – высота i -го наибольшего выступа профиля, y_{vi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля.

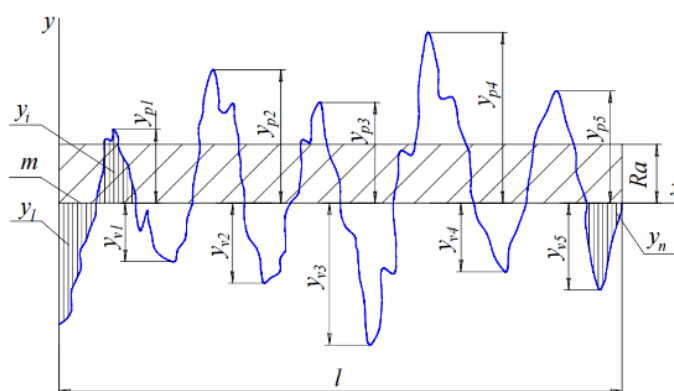


Рисунок 2 – Профиль поверхности

3. Создание модели шероховатости в COMSOL и Python

В COMSOL для характеристики шероховатости поверхности можно использовать пространственные частоты. Это создает конструктивный метод для синтеза данных о поверхности, путем использования суммы тригонометрических функций. Каждый член этой суммы представляет собой определенную частоту колебаний в пространстве.

Для представления шероховатой поверхности используем следующее двойное суммирование:

$$f(x, y) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N a(m, n) \cos(2\pi(mx + ny) + \varphi(m, n)),$$

где x и y – пространственные координаты; m и n – пространственные частоты; $a(m, n)$ – амплитуда; $\varphi(m, n)$ – фазовый угол. Это выражение – усеченный ряд Фурье.

Различные процессы, такие как износ и эрозия, делают более медленные колебания более вероятными для получения большей амплитуды по сравнению с

быстрыми колебаниями. В дискретном случае это соответствует постепенно уменьшающейся амплитуде в соответствии с некоторым распределением [20]:

$$A_{mn} = a(m, n) \sim h(m, n) = \frac{1}{|m^2+n^2|^b} = \frac{1}{|m^2+n^2|^{\frac{b}{2}}},$$

где спектральный индекс b обозначает скорость затухания на более высоких частотах. Спектральный индекс связан с фрактальной размерностью поверхности, но применим только к бесконечным сериям волн, покрывающим произвольно высокие частоты, и только для некоторых диапазонов индекса. На практике, амплитуды синтезированной поверхности $a(m, n)$ будут создаваться с использованием ограниченного числа частот, умноженных на случайную функцию $g(m, n)$ с гауссовским распределением:

$$a(m, n) = g(m, n) \cdot h(m, n).$$

Выбор гауссовского распределения обеспечивает гладкие, но случайные изменения амплитуды без ограничений. Фазовый угол φ будет выбираться из функции u , которая имеет равномерное случайное распределение между $-\pi/2$ и $\pi/2$:

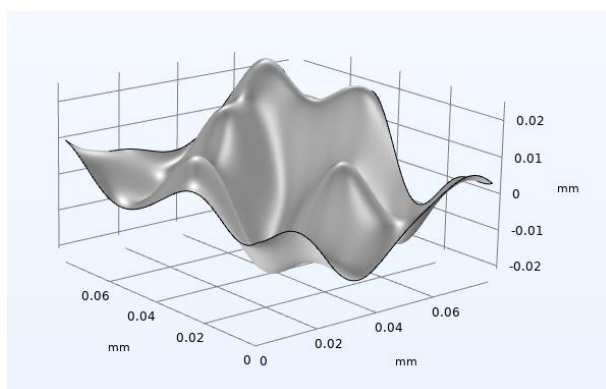
$$\varphi(m, n) \in u(m, n) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}, & \text{если } -\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

В COMSOL можно определить гауссову случайную функцию и равномерную случайную функцию в глобальных переменных и сгенерировать шероховатую поверхность, используя эти функции в параметризованной кривой. Функция, определяющая параметризованную поверхность [15]:

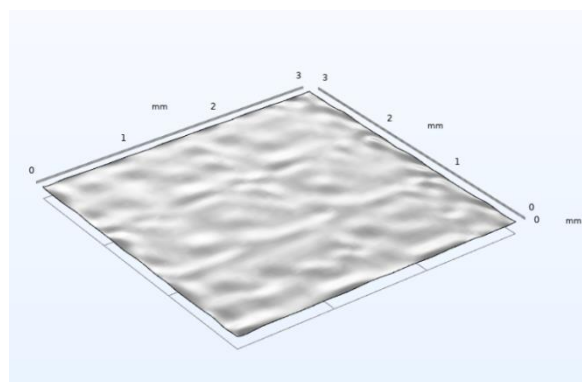
$$0,01 \cdot \text{sum}(\text{sum}(\text{if}((m \neq 0) \parallel (n \neq 0)), ((m^2 + n^2)^{-b/2}) * g_1(m, n) \cdot \cos(2 \cdot \pi i \cdot (m \cdot s_1 + n \cdot s_2) + u_1(m, n)), 0), m, -N, N), n, -N, N),$$

где u_1 – равномерная случайная функция, g_1 – гауссова случайная функция, m и n – пространственные частоты, N – разрешение пространственной частоты, b – спектральный-индекс, s_1 и s_2 – параметры параметризованной кривой, соответственно представляющие оси x и y поверхности.

Таким образом, созданы шероховатые поверхности с размерами 3×3 мм и $0,08$ мм \times $0,08$ мм с использованием параметров $N = 30$, $b = 0,5$ и коэффициента параметризованной поверхности $0,001$ (как показано на рисунке 3).



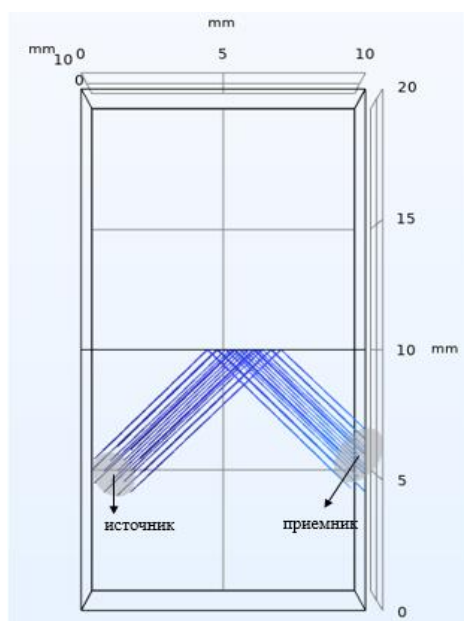
а)



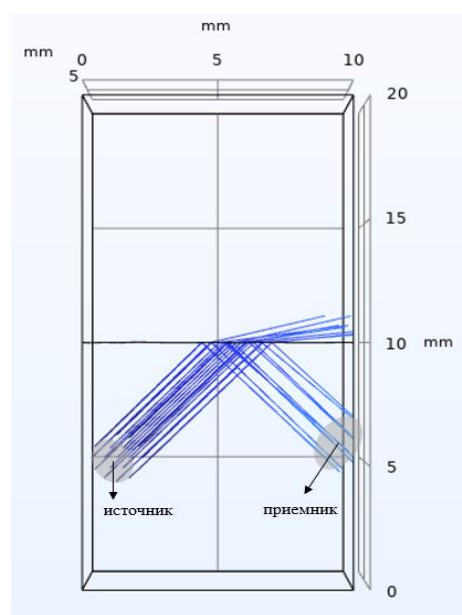
б)

Рисунок 3 – Модель шероховатой поверхности размером: *a* – 0,08×0,08 мм, *б* – 3×3 мм

После создания модели шероховатой поверхности приступим к моделированию явления полного внутреннего отражения света на этой поверхности в COMSOL с помощью модуля лучевой оптики. Этот модуль позволяет эффективно и точно моделировать взаимодействие световых лучей с шероховатой поверхностью (как показано на рисунке 4).



а)



б)

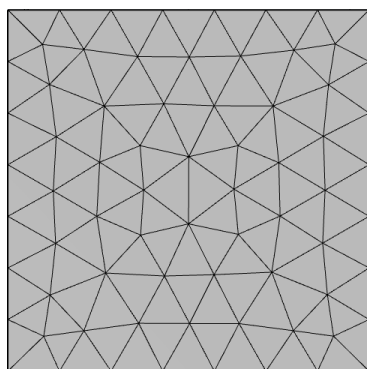
Рисунок 4 – Падение излучения на границу раздела 2х сред, полное внутреннее отражения света на: *a* – идеальной поверхности, *б* – шероховатой поверхности

В созданной программе ключевым аспектом является реализация явления полного внутреннего отражения света от шероховатой поверхности и численная оценка отраженного излучения, а не только фактическое моделирование этой поверхности. Мы исходим из предположения, что микрофасетная модель BRDF основана на том, что шероховатая поверхность состоит из множества микроскопических элементов, каждый

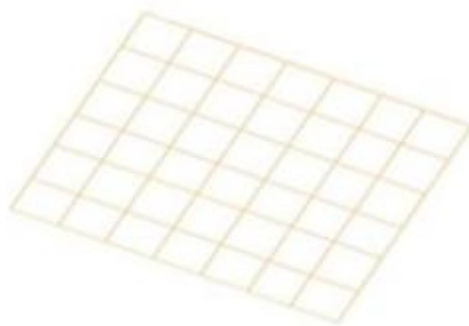
из которых является абсолютно гладким. Это означает, что свет отражается от каждого микроэлемента как от зеркальной поверхности или проходит через него [16]. Основным объектом этой модели является дискретная сетка шероховатости поверхности. Для каждого луча предполагается наличие разных граничных ориентаций, основанных на точках, с которыми он пересекается. В идеальном случае поверхности, нормаль, перпендикулярная границе, может быть получена аналитически из уравнения поверхности. В предложенной модели нормаль формируется на основе теоретической нормали и данных о волновой активности поверхности или случайных значений шероховатости, выбранных в точке падения луча. Наклон поверхности приводит к изменению угла падения, вызывая отражение или преломление.

Эта модель хорошо работает на неровных поверхностях с разбросом шероховатости, значительно превышающим длину волны излучения. Для ее реализации можно использовать два типа сетки: реальную или программную.

В реальной сетке заданы координаты узловых точек. Узловые точки определяют треугольные поверхности (как показано на рисунке 5а), имитирующие шероховатость. Такое представление наиболее близко к экспериментальным данным, но для формирования алгоритмов расчета оно довольно сложно. Основная проблема – большое время на поиск нужного треугольника [17].



а)



б)

Рисунок 5 – Модель поверхности: а – приближенная к реальной; б – программная, выбранная для упрощения расчетов

В программной сетке (рисунок 5б) стеклянная поверхность разделена на равномерные квадратные элементы. Каждому элементу сетки присваивается вектор смещения нормали $\vec{\Delta s}$. Направление этого вектора случайно, его размер определяется степенью шероховатости. Нормаль луча в каждой точке суммируется с этим вектором, который представляет наличие конкретной шероховатости в локальной области.

При учете шероховатости к обычной схеме добавляются оператор смещения нормали, действие которого моделирует учет шероховатости (как показано на рисунке 6).

$$\vec{n}_{\text{шер}} = \|\vec{n}_o + \vec{\Delta s}\|,$$

где $\vec{n}_{\text{шер}}$ – вектор нормали для шероховатой поверхности, \vec{n}_o – вектор нормали для гладкой поверхности, $\vec{\Delta s}$ – вектор смещения для нормали.

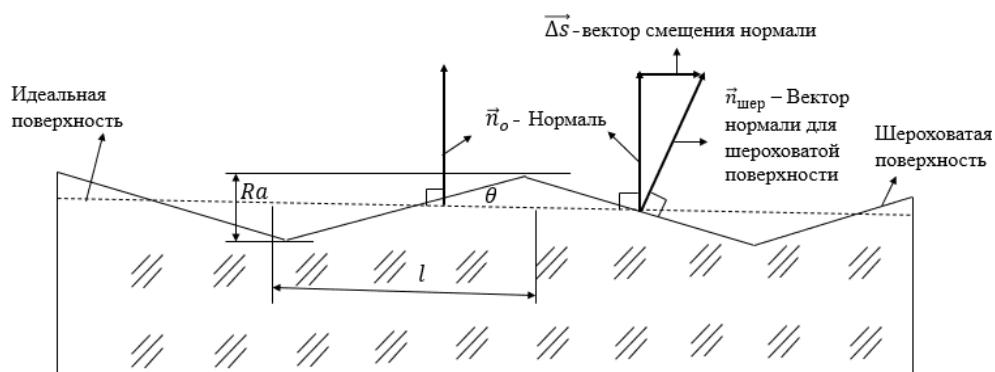


Рисунок 6 – Связь между модулем вектора смещения нормали и средним арифметическим отклонением профиля на поверхности

В программе не нужно с самого начала назначать векторы смещения нормалей каждой прямоугольной ячейке шероховатой поверхности. Вместо этого мы назначаем векторы смещения нормалей ячейкам, с которыми взаимодействует луч света, только когда это взаимодействие происходит, и эти векторы смещения участвуют в расчете пути света. Если другие лучи света также взаимодействуют с этой прямоугольной ячейкой, мы продолжаем использовать ранее созданные векторы смещения нормалей (как показано на рисунке 7).

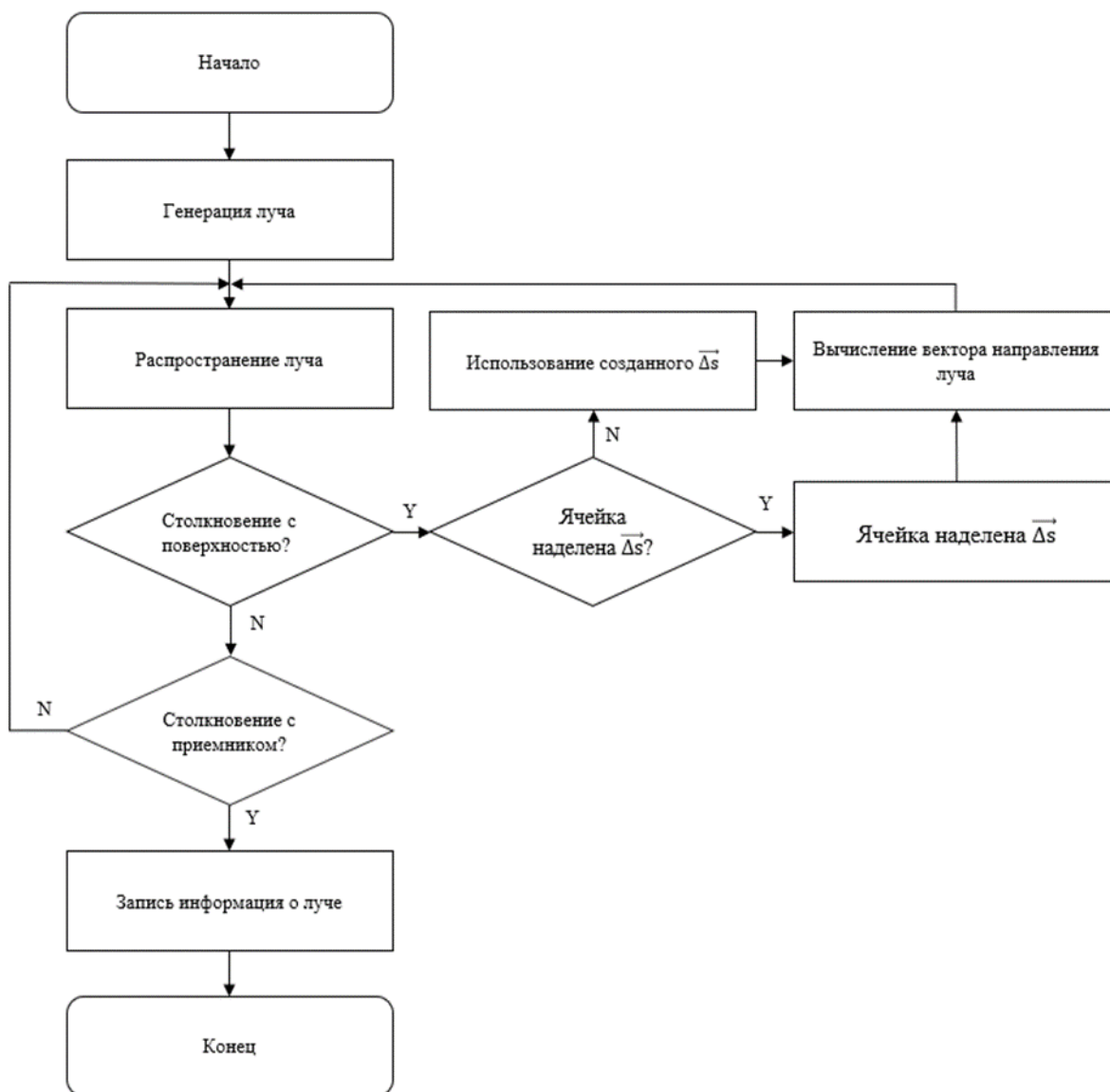


Рисунок 7 – Блок-схема программы расчета светового пути луча

4. Описание зависимость высоты шероховатости от вектора смещения нормали

В COMSOL, благодаря параметризованной поверхности, амплитуда которой может быть изменена с помощью спектрального индекса b , можно моделировать поверхности с различной шероховатостью, выбирая соответствующее значение b . Однако в Python будем описывать влияние шероховатой поверхности на отражение света через смещение вектора нормали. Для этого устанавливаем геометрическую связь между смещением вектора нормали $\vec{\Delta s}$ и средним арифметическим отклонением профиля R_a .

Разделяем шероховатую поверхность на элементы длиной l , для каждого элемента модуль вектора смещения нормали $|\vec{\Delta s}|$, каждый элемент этой поверхности отклоняется на произвольный угол θ (как показано на рисунке 6) согласно следующей формуле:

$$\theta = \arctan(|\vec{\Delta s}|),$$

$$Ra = \sin(\theta) \cdot l,$$

где l - размер элемента микрорельефа, $|\vec{\Delta s}|$ - модуль вектора смещения нормали, θ - угол отклонения микрорельефа.

Если размер элемента шероховатой поверхности составляет 1 мм и вектор смещения равен 0,001, то среднее арифметическое отклонение профиля Ra составляет 1 мкм.

5. Численная оценка

Чтобы вычислить общее влияние шероховатой поверхности, на которой происходит полное внутреннее отражение, на лучи, отраженные от нее (как показано на рисунке 8 и рисунке 9), нужно сравнить углы расходимости лучей, падающих на эту поверхность, и лучей, отраженных от нее. Определив влияние шероховатой поверхности на угол расходимости лучей $\Delta\varphi$ можно оценить ошибку измерения показателя преломления вещества, в рефрактометрах работающих по принципу полного внутреннего отражения.

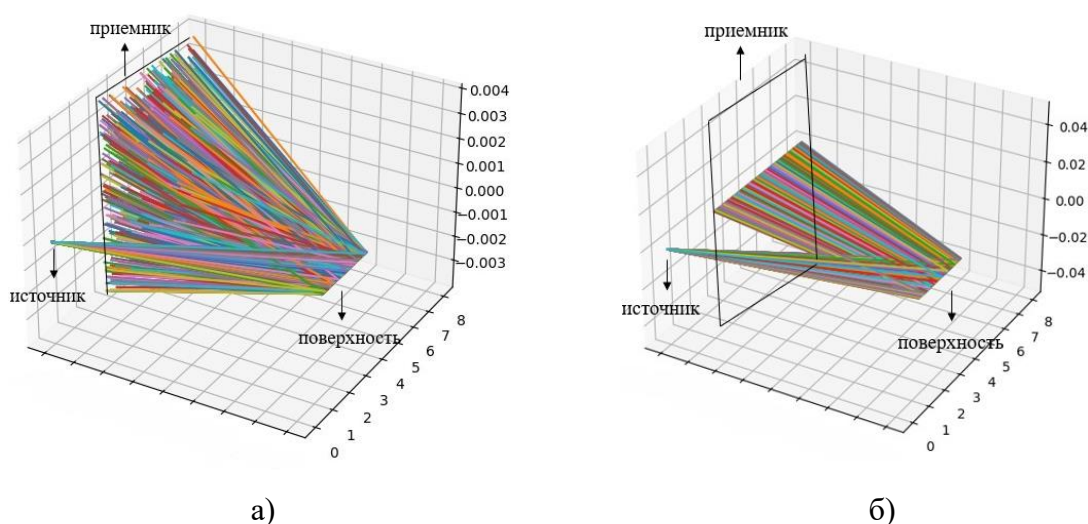


Рисунок 8 – Графическое представление пути лучей, отраженных от: *а* – идеальной, *б* – шероховатой поверхности

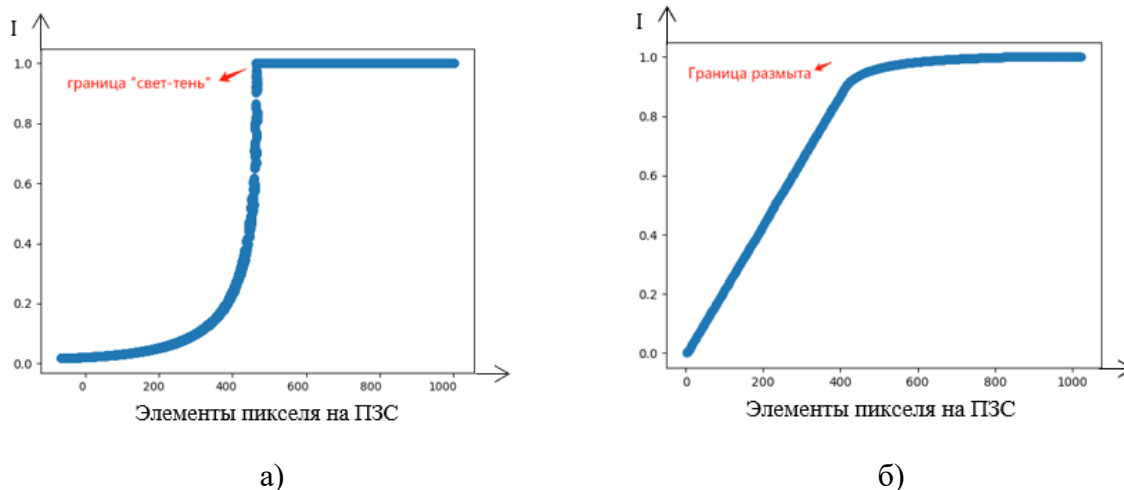


Рисунок 9 – Распределение интенсивности света после полного внутреннего отражения от: *a* – идеальной, *б* – шероховатой поверхности

Для лучей, падающих на рабочую поверхность призмы, с углом расходимости $19^{\circ}07'05,77''$ относительно нормали источника излучения, после отражения от шероховатой поверхности с шероховатостью $R_a = 1$ мкм, мы получаем распределение лучей после отражения.

Из-за наличия шероховатой поверхности линейный источник света после отражения создает световое пятно с компонентой в направлении *y* (как показано на рисунке 10б).

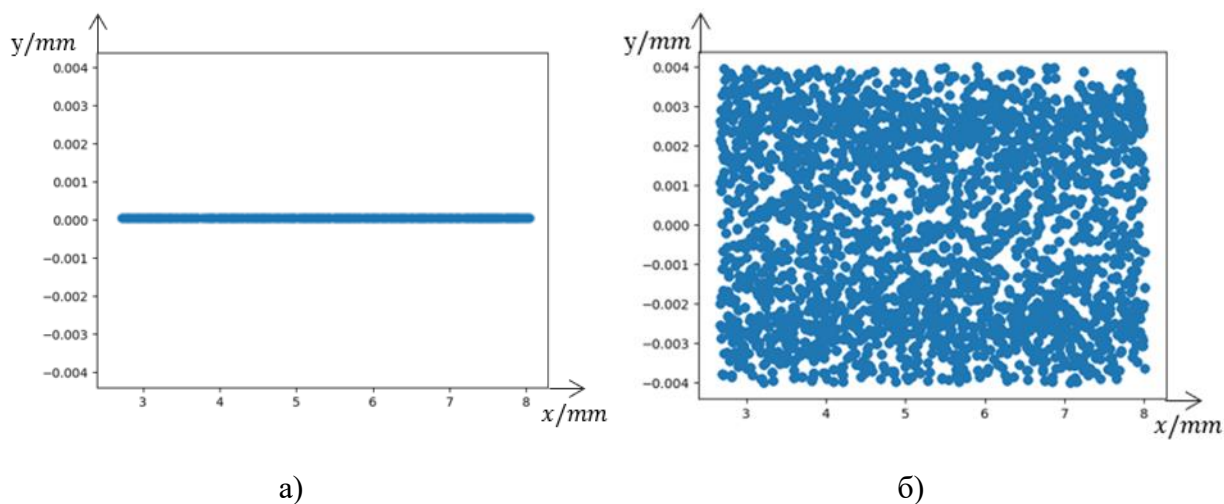


Рисунок 10 – Распределение лучей от линейного источника света в плоскости ФПУ после отражения от: *a* – идеальной, *б* – шероховатой поверхности

Путем вычисления размера диффузионного пятна в направлении *x* и *y* можем определить угол расходимости пучка света после отражения от шероховатой поверхности. Для вычисления погрешности измерения показателя преломления

объекта под воздействием шероховатости поверхности, сначала нужно вычислить расходимость $\Delta\varphi$, обусловленную шероховатой поверхностью:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1,$$

где $\Delta\varphi$ – это расходимость при наличии шероховатости, φ_1 – угол диффузии падающего пучка света, φ_2 – угол диффузии отраженного пучка света.

Используя следующую формулу (3):

$$\Delta n = N \cdot \cos\varphi_{\text{пре}} \cdot \Delta\varphi, \quad (3)$$

где N — показатель преломления рабочей полусферы, $\varphi_{\text{пре}}$ – предельный угол полного внутреннего отражения.

Также можно непосредственно вычислить расходимость $\Delta\varphi$, используя масштаб на оси y на диаграмме рассеяния.

Результаты моделирования шероховатой поверхности были применены для оценки погрешности измерения показателя преломления на автоматическом рефрактометре. В качестве материала преломляющей призмы было использовано стекло СТК19, измерения проводилось для 10% раствора сахарозы. В результате было получено, что наличие дефектов рабочей поверхности призмы в виде шероховатости в диапазоне до $R_a = 1$ мкм вносит погрешность в измерения показателя преломления в размере $\Delta n = 1,8 \cdot 10^{-3}$.

Заключение

Была разработана математическая модель шероховатости поверхности в COMSOL и Python и проведены численные эксперименты, позволяющие оценить влияние дефекта рабочей поверхности преломляющей призмы автоматического рефрактометра на точность измерения показателя преломления.

Исследование показало, что даже небольшая шероховатость может существенно исказить результаты измерений. Использование стекла СТК19 для измерений 10% раствора сахарозы выявило, что шероховатость до 1 мкм вносит погрешность в измерения показателя преломления на уровне $\Delta n = 1,8 \cdot 10^{-3}$, требующую коррекции при анализе данных.

Результаты исследования могут улучшить методики измерения показателя преломления и способствовать разработке более точных и надежных оптических измерительных устройств. В будущем, данные могут быть использованы для создания усовершенствованных моделей BRDF, улучшая визуализацию и компьютерную графику.

Литература

1. Nayar S. K. et al. Surface reflection: physical and geometrical perspectives. – 1991.
2. United States. National Bureau of Standards, Nicodemus F. E. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. – Washington, DC, USA: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977. – Т. 160. – С. 52.
3. Chen H., Wolff L. B. Polarization phase-based method for material classification and object recognition in computer vision //Proceedings CVPR IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 1996. – С. 128-135.
4. Bagher M. M., Snyder J., Nowrouzezahrai D. A non-parametric factor microfacet model for isotropic BRDFs //ACM Transactions on Graphics (TOG). – 2016. – Т. 35. – №. 5. – С. 1-16.
5. Пиотровская И.Н., Алехнович В.И., Тюрин В.Д. Программа анализа влияния микродефектов поверхности на работу автоматического рефрактометра //7-я Международная научно-практическая конференция Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments – 2008: Сборник трудов. – Москва, 2007. – С. 60–63.
6. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. 3-е изд., перераб. И доп. - Л.: Химия, 1983. - 352 с.
7. Chiu M. -H., Lee J.-Y., Su D.-C. Refractive-index measurement based on the effects of total internal reflection and the uses of heterodyne interferometry // Appl. Opt.- 1997. -36. P.2936-2939.
8. Meeten G.H. Refractive index errors in the critical-angle and Brewster-angle methods applied to absorbing and heterogeneous of biotissue by total internal reflection // Appl. Opt. - 1996. -№35. -P.1793-1795.
9. Rheims J., Koser J., Wriedt T. Refractive index measurements in the near -IR using an Abbe refractometer // Meas. Sci. Tech. -1997. -№8. -P.601-605.
10. Пресс Ф.П. фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь. 1991. – 192с.
11. Абденов А. Ж. Повышение информативности измерений для стохастических динамических систем на основе спектральной плотности мощности входного сигнала // Автометрия. - 1999. - № 1. - 74с.

12. Марков Н. Н., Осипов В. В., Шабалина М. Б. Нормирование точности в машиностроении: Учебник для машиностроит. спец. вузов. – Высшая школа: Изд. центр." Академия", 2001.
13. Жуков Э. Л. Технология машиностроения. – 2008.
14. ГОСТ 2789—73 (СТ СЭВ 638—77) Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. Госстандарт СССР. Взамен ГОСТ 2789-59. Введен с 01.01.75, переизд. (сентябрь 1990) с Изменением № 1, утвержд. в мае 1980 г. М. : Изд-во стандартов, 1990. 8 с.
15. COMSOL Multiphysics. [Электронный ресурс] URL: <http://cn.comsol.com/blogs/how-to-generate-random-surfaces-in-comsol-multiphysics/> (дата обращения 29.02.2024).
16. Torrance K. E., Sparrow E. M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces //Josa. – 1967. – Т. 57. – №. 9. – С. 1105-1114.
17. Westin S. H., Arvo J. R., Torrance K. E. Predicting reflectance functions from complex surfaces //Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1992. – С. 255-264. Путилин А.Б. Вычислительная техника в информационно-измерительных системах. – М.: Дрофа, 2006. - 447 с.
18. Алехнович В.И., Пиотровская И.Н. Оценка погрешности измерения показателя преломления на автоматическом рефрактометре с квазимонохроматическим источником // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2009. – №1(74). – С. 20–27.
19. da Silva Nunes M. et al. Techniques for BRDF evaluation //The Visual Computer. – 2022. – Т. 38. – №. 2. – С. 573-589.
20. Lu Hui. Surface Topography Modeling and Optical Performance Analysis of Microstructures. – 2021. – Режим доступа: Surface Topography Modeling and Optical Performance Analysis of Microstructures - CNKI