«KOHTEHAHT»

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 5, №3, 2023

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

Сагателян Г.Р., Бугорков К.Н., Кузнецов А.С. Производительность плазмохимического травления кварцевого стекла гексафторидом серы в высокочастотном разряде	2
Метод мониторинга состояния сельскохозяйственных растений в ближнем ИК диапазоне	13
И.М. Илюхин, А.Д. Соколов, А.С. Кузнецов	
Оценка и минимизация погрешности ориентации искусственного спутника	
земли по направлению местной вертикали	24
Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А., Сеник Б.Н.	
Телевизионные камеры для подводных аппаратов и водолазных комплексов	34
Башкатов Г.В., Животовский И.В.	
Оценка метрологических характеристик устройства для измерения показателя	
световозвращения оптико-электронных приборов	63
Н.В. Барышников, Нгуен Минь Бач, П.С. Давыдкина, М.Л. Белов	
Метод мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности в ближнем	
ИК диапазоне	76

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 Коротаев Валерий Викторович Лукин Анатолий Васильевич Сеник Богдан Николаевич Соколов Андрей Леонидович Торшина Ирина Павловна

Редакционная коллегия:

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

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

Подписано в печать 18.03.2024 Статьи, подготовленные к изданию, передаются редакции электронного научнотехнического журнала в издательство по электронной почте <u>nukrim@bmstu.ru</u> для последующего размещения на сайте Диссертационного рецензируемого научнотехнического журнала «Контенант» с последующей передачей по договору №727-11/2014 в Российский Индекс Научного Цитирования Научной Электронной Библиотеки.

Редакционная коллегия Диссертационного рецензируемого журнала «Контенант»

ЭЛ №ФС77-57961 ISSN:2313-8459

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ГЕКСАФТОРИДОМ СЕРЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ

Сагателян Г.Р., Бугорков К.Н., Кузнецов А.С.

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

Аннотация: В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан технологический процесс для мелкосерийного производства в лабораторных условиях пластины акселерометра, изготавливаемой из кварцевого стекла КВ с применением операций плазмохимического травления (ПХТ). Особенностью конструкции пластины является наличие на каждой из сторон пластины выступов - двух 2х2 мм и трёх 2х4 мм – высотой 30 мкм, выполненных в теле самой пластины.

Для получения глубокого рельефа на поверхностях оптических и других деталей из кварцевого стекла в настоящее время широко используется жидкостное травление плавиковой кислотой, причём для деталей космического приборостроения травление выполняют через маску, создаваемую вручную нанесением сургуча. Такая технология характеризуется неудовлетворительными санитарно-гигиеническими условиями труда и, в связи с ужесточением норм к обезвреживанию жидких ядовитых травителей, подлежит замене на сухое травление, наиболее эффективным методом которого является ПХТ.

При ПХТ оптического стекла удаление материала с поверхности заготовки происходит за счёт получения летучего химического соединения SiF4 в результате реакции стекла с химически активными частицами, образуемыми благодаря использованию протекающих в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда процессов. В представленной работе изложена методика экспериментально-аналитического определения производительности указанного процесса с применением газовой смеси, состоящей из SF6, Ar и O2. Показана технологическая возможность создания методом двухстороннего ПХТ глубокого рельефа высотой 30 мкм.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, высокочастотный разряд, плавленый кварц, глубокий рельеф, гексафторид серы, энергия ионизации, сродство к электрону.

PERFORMANCE OF PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF QUARTZ GLASS WITH SULFUR HEXAFLUORIDE IN A HIGH-FREQUENCY DISCHARGE

H.R. Sagatelyan, K.N. Bugorkov, A.S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: h_sagatelelyan@bmstu.ru, askuznetsov@bmstu.ru

Abstract: The technological process for small-scale production in laboratory conditions of an accelerometer plate made of quartz quartz glass using plasma-chemical etching (PCE) has been developed at BMSTU. The distinctive feature of the plate design is the presence on each side of the plate of 30 μ high protrusions made in the body of the plate itself with dimensions - two 2x2 mm and three 2x4 mm.

To obtain deep relief on the surfaces of optical and other parts made of quartz glass, liquid etching with hydrofluoric acid is currently widely used, and for parts of spaceship instrumentation, etching is performed through a mask created manually by applying sealing wax. This technology is characterized by unsatisfactory sanitary and hygienic working conditions and, due to the tightening of standards for the neutralization of liquid poisonous etchants, must be replaced by dry etching, the most effective method of which is PCE.

During PCE of optical glass, the removal of material from the surface of the workpiece occurs due to the production of the volatile chemical compound SiF4 as a result of the reaction of glass with chemically active particles formed due to the use of processes occurring in the plasma of high-frequency (RF) discharge. The presented work outlines a method for experimentally and analytically determining the productivity of this process using a gas mixture consisting of SF6, Ar and O2. The technological possibility of creating a deep relief with a height of 30 μ using double-sided PCT is shown.

Keywords: plasma chemical etching, high frequency discharge, fused silica, deep relief, sulfur hexaftoride, energy of ionization, affiliation to electron.

Введение

В современном космическом приборостроении интенсивно разрабатываются аппаратура, основанная на миниатюризации и повышении точности датчиков навигационных систем. В частности, актуальной является внедрение акселерометров, принцип действия которых основан на инерционных свойствах тонкой пластины из плавленого кварца (рисунок 1, *a*), которая содержит фигурные вырезы, а также

монолитные выступы высотой 30 мкм, и локальные углубления на обеих сторонах пластины [1]. В настоящее время эти элементы рельефа формируют, применяя метод жидкостного травления плавиковой кислотой [2]. В микроэлектронике жидкостное травление исчерпывающе разработано применительно к пластинам из кремния. Однако его реализация для рассматриваемой конструкции пластин сопряжена со сложностями поддержания целостности маскирующего покрытия (маски). Существующая технология не соответствует современным требованиям к технологическому оснащению производства в прецизионном приборостроении (рисунок 1, δ).



Рисунок 1 – Кварцевая пластина маятникового акселерометра: *а* – конструкция (упрощённо); *б* – нанесение маскирующего покрытия (сургуч) при жидкостном травлении

Устранить указанные недостатки жидкостного травления можно применением плазмохимического травления (ПХТ). Однако, имеющиеся к настоящему времени исследования ПХТ оксидов кремния недостаточны для разработки технологии серийного производства кварцевых пластин стекла указанной конструкции, при этом производительность ПХТ кварцевого стекла примерно в пятьдесят раз ниже производительности ПХТ монокристаллического кремния.

Целью проводимых исследований является установление и конкретизация сущности физических процессов, протекающих при ПХТ кварцевых пластин по схеме, обеспечивающей одновременное формирование требуемого рельефа одновременно на обеих сторонах пластины.

1. Теория

При выполнении операции ПХТ удаление обрабатываемого материала – кварцевого стекла происходит вследствие протекания реакции, которую можно схематически представить в следующем виде:

$$SiO_2 + 4F \rightarrow SiF_4 \uparrow + O + O$$
.

Молекулы фтора, являющегося одноатомным газом, формируются в плазме ВЧ разряда вследствие протекания множества процессов образования радикалов, диссоциации и ионизации отдельных атомов и молекул. Все эти процессы становятся возможны благодаря кинетической энергии, которую приобретают электроны в поле ВЧ разряда. При относительно малых энергиях электрона (медленные электроны) происходят процессы диссоциации, т.е. образования отрицательно заряженных ионов, благодаря сродству соединений к электрону. При относительно высоких энергиях электрона происходят процессы ионизации – образования положительно заряженных ионов.

В таблице 1 представлены все известные в настоящее время соединения [3], которые, формируясь из исходного активного газа SF₆ через последовательное уменьшение количества атомов фтора в составе молекулы, иона или радикала, приводят к образованию атомарного фтора в объёме плазмы или на поверхности образца.

Таблица	1 – Энергии и	ионизации и сре	одства к эле	ктрону сое	единений,	участвующих	В
образовани	и атомарного (фтора					

Соединение	Энергия ионизации/сродства к электрону, э-В	Примечания	
SF_5	2,7-3,7	Ион, диссоциация	
SF4	0,8 – 2,4	Ион в возбуждённом состоянии, диссоциация	
SF ³⁻	2,7-3,1	Ион, диссоциация	
SF ₂	10,08	Молекула, приведена энергия ионизации	
SF	10,09	Молекула, приведена энергия ионизации	
F	3,999 ±0,003	Ион, диссоциация	
F	17,422	Атом, приведена энергия ионизации	

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023

Однако, в соответствии с известными данными электронная температура газоразрядных плазм составляет не превышает 1 э-В. Поэтому необходимую для проведения технологических расчётов оценочную величину электронной температуры плазмы, достаточную для обеспечения приемлемой скорости удаления обрабатываемого материала, следует определять экспериментальными исследованиями на конкретной разновидности оборудования.

2. Эксперимент

Исследования проводили на установке RIE 300 производства фирмы Torr International, Inc. Установка содержит плоский индуктор в форме спиральной антенны, который создаёт плазму BЧ разряда на частоте 13,56 МГц. Обрабатываемый образец размещался в объёме плазмы в непосредственной близости от индуктора (рисунок 2), что обеспечивает реализацию двухсторонней схемы ПХТ [4, 5]. Данный метод выполнении процесса ПХТ обладает рядом особенностей протекания процесса удаления обрабатываемого материала – кварцевого стекла [6, 7].



a)



Рисунок 2 – Установка RIE 300: *а* – полость вакуумной камеры; *б* – схема расположения образца и потока газовой смеси. 1 – направление откачки вакуумной камеры; 2 – полка; 3 – подпорки; 4 – кварцевая пластина; 5 – индуктор; 6 – держатель образца; 7 – направление ввода газовой смеси; 8 – корпус вакуумной камеры

Операция ПХТ состояла из переходов собственно процесса ПХТ (технологические переходы) и переходов кислородной очистки (КО, вспомогательные переходы), выполняемых попеременно. Продолжительность каждого из переходов

составляла 10 мин. Каждая операция включала 9 переходов – 4 технологических перехода и 5 вспомогательных.

В качестве образцов применяли заготовки пластин маятникового акселерометра, изготовленные из кварцевого стекла марки КУ-1, диаметром 25,6 мм и толщиной 0,5 мм с уже выполненными на них методом лазерной резки фигурными вырезами. В местах формирования платиков методом магнетронного напыления создавали металлическую маску толщиной 3 мкм из разработанного в отрасли композиционного материала ТИАЛ [8]. Образцы закрепляли консольно, используя в качестве держателя поликоровые пластины с вырезом, обеспечивающим одновременно с удержанием образца и отсутствие экранирования областей образца, подлежащих травлению (рисунок 3).

На антенну подавались мощности: для ПХТ 285 Вт; для КО 200 Вт. Распределение величин магнитной индукции и напряжённости электромагнитного поля создаваемого ВЧ индуктором, описано в работах [9, 10].

Операции ПХТ выполнялись при подаче в вакуумную камеру смеси газов следующих составов: для ПХТ: $SF_6 - 200 \text{ scsm}$; $O_2 - 18 \text{ scsm}$; Ar - 10 scsm; для KO: $O_2 - 50 \text{ scsm}$, Ar - 50 scsm.

После каждой операции промывали в этиловом спирте и измеряли высоту образовавшихся платиков методом профилографирования. Измерения проводились на четырёх платиках размером 1x3 мм, расположенных симметрично по два на обеих сторонах пластины. В итоге были сформированы платики в соответствии с требованиями чертежа детали (см. рисунок 1), т.е. высотой 30 мкм.



a)



б)

Рисунок 3 – Размещение образца: *а* – схема; *б* – внешний вид. 1 – подпорка из фторопласта; 2 – образец; 3 – держатель пластины из поликора; 4 – полка

На рисунке 4 представлена последовательность возрастания высоты платиков при проведении каждого последующего опыта в рамках проведённого эксперимента.



Рисунок 4 – Возрастание высоты платиков пластины в процессе проведения эксперимента

Требуемая высота платиков была достигнута после 10-го опыта. Однако на их поверхностях находились остатки металлической маски, которые были удалены серной кислотой. Это отображено на рис. 4 ниспадающим участком графика.

Далее через маску на уже сформированные платики был нанесён слой материала ТИАЛ, был проведён ещё один опыт, и после удаления повторно нанесённой маски произведён замер высоты. В итоге установлено, что разработанная технология позволяет повторно наносить маску в случае её разрушения до достижения требуемых результатов травления.

3. Обсуждение

По результатам проведённых экспериментальных исследований, установлено, что слой кварца толщиной 30 мкм при выполнении операции ПХТ в соответствии с принятыми условиями обработки удалён за 400 мин. Таким образом, скорость съёма обрабатываемого материала составила q = 1,25 нм/с. Известно [11], что длина связи Si – О в аморфном кварце составляет от 152 до 169 пм. Примем усреднённую длину этой связи равной l = 160 пм. Также известно, что угол между связами Si – O – Si может меняться в диапазоне от 120 до 180⁰. Примем для дальнейших расчётов этой величины его среднее значение $j = 150^{\circ}$. Таким образом, расстояние между условными слоями Si в теле аморфного кварца составит $a_0 = 2l \sin j = 160$ пм. С другой стороны, очевидно, что, если на обрабатываемой поверхности выделить область в форме квадрата со стороной b = 1 нм, то в такой области будет расположено $v_{Si} = \left(\frac{b}{a_0}\right)^2 = 39$ атомов Si. Назовём эту область слоем. Поскольку аморфный кварц изотропен по своей структуре, то количество слоёв кварца, удаляемых за 1 с составит q/a_0 , т.е. поток атомов кремния составит:

$$N_{Si} = \frac{q}{a_0} v_{Si} = 304 \frac{1}{\mathrm{HM}^2 \cdot \mathrm{c}}.$$

Очевидно, что для образования трёх молекул SiF_4 необходимо две молекулы SF_6 , т.е. для образования N_{si} молекул SiF_4 необходим поток на обрабатываемую поверхность атомов фтора в количестве

$$N_F = 4N_{Si} = 1218 \frac{1}{_{\rm HM^2 \, c}}$$
 ,

для чего в поток на обрабатываемую поверхность молекул SF₆ должен составить по меньшей мере $N_{\text{SF6}} = (2/3)N_{\text{Si}} = 2030 (\text{Hm}^2\text{c})^{-1}$ Это, исходя из соотношения, связывающего число молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени с молекулярной концентрацией и средней арифметической скоростью молекул [12], соответствует концентрации молекул SF₆ в газовой смеси

$$n_{SF6} = \frac{4N_{SF6}}{v_{\rm ap.SF6}}.$$

Средняя арифметическая скорость молекул SF₆ определяется её массой $m_{\rm SF6} = 2,43^{\cdot}10^{-25}$ кг и ионной температурой плазмы, которая для условий проведённого эксперимента составила оценочно $T_{\mu} = 320$ К по формуле

$$v_{\rm ap.SF6} = \sqrt{\frac{8kT_{\rm H}}{\pi m_{SF6}}} = 215 \, {\rm m/c}.$$

Подставляя это значение в предыдущее уравнение находим значение парциальной концентрации той части молекул SF₆, которая за счёт диссоциации и ионизации участвовала в химических реакциях с образованием соединения SiF₄: [n_{SF6}] = 3,8[·]10¹⁸ м⁻³. Расчёт, соответствующий условиям проведённого эксперимента, показывает, что общая парциальная концентрация молекул SF₆ в составе газовой смеси составляла $n_{SF6} = 6^{·}10^{21}$ м⁻³. Таким образом, доля молекул SF₆, принявших участие в реакции образования летучего соединения SiF₄, обуславливающего удаления обрабатываемого материала в процессе ПХТ, для исследованных условий составляет:

$$\alpha = \frac{[n_{SF6}]}{n_{SF6}} = 0,0006$$

Поскольку рассматриваются только однозарядные тоны, то рассчитанная величина *α* может быть принята за степень ионизации плазмы. Тогда электронная

температура плазмы T_e может быть рассчитана по формуле Caxa [13], записанной в следующем виде:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha} = \frac{e^{-\frac{1}{T_e}}}{\lambda_B^3 n_{a0}}.$$

Здесь: I = 13,605 э-В – энергия Ридберга – фундаментальная константа, позволяющая определять энергетические уровни в атомах и молекулах и предсказывать спектральные линии и являющаяся энергией ионизации атома водорода; $l_B = 4,8^{\circ}10^{-9}$ м – длина волны де-Бройля электрона, имеющего по литературным данным для газоразрядной плазмы [14] энергию ориентировочно 1 э-В; $n_{a0} = 7n_{SF6} = 4,2^{\circ}10^{22}$ м⁻³ – исходная концентрация атомных ядер с учётом того, что одна молекула SF₆ содержит семь атомов.

Подставляя указанные численные значения в формулу Саха, получаем расчётное значение электронной температуры применявшейся плазмы: $T_{\rm e} = 0,55$ э-В.

Заключение

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что методом ПХТ, размещая заготовку в объём плазмы, можно сформировать одновременно на обеих поверхностях деталях в форме пластин из оптического стекла рельеф высотой 30 мкм.

2. В качестве материала маски для операции ПХТ может быть использован коррозионностойкий материал ТИАЛ, создаваемый магнетронным напылением алюминия и титана по дуальной схеме.

3. При разрушении маски до достижения рельефом заданной высоты она может быть повторно нанесена на участки, подлежащие экранированию.

4. Разработанная на основе анализа результатов экспериментальных исследований методика определения технологически значимой электронной температуры плазмы позволяет обосновывать направления совершенствования конструкции ВЧ установок ПХТ.

Результаты аналитических и экспериментальных исследований могут быть использованы для формирования баз данных по технологически возможностям выпускаемых установок ПХТ для обработки деталей из оптических стёкол.

Литература

1. Сагателян Г.Р., Новосёлов К.Л., Шишлов А.В., Щукин С.А. Совершенствование технологического процесса изготовления пластины маятникового акселерометра // Естественные и технические науки. – 2012. - № 6 (62). – С. 369 – 376.

 Ветрова Е.В., Смирнов И.П., Козлов Д.В., Запетляев В.М. Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. Т. 4, вып. 2. – С. 95 – 102.

3. Gas-Phase Ion and Neutral Thermochemistry / Ed. David R Lide Jr. Journal of Physical and Chemical Reference Data. Vol. 17, 1988. Supplement # 1. – P. 40 – 797.

 Бугорков К.Н., Сагателян Г.Р. Возможности плазмохимического травления стекла по диодной схеме // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. -№11. – С. 44 – 63.

5. Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р., Бугорков К.Н., Дроздова Е.А. Закономерности и особенности двухстороннего плазмохимического травления деталей из оптического стекла // Наноиндустрия. – 2018. - № 1. – С. 50 – 62.

6. Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалёв М.С., Бугорков К.Н. Особенности плазмохимического травления кварцевого стекла при формировании глубокого рельефа на прецизионных деталях приборов // Оптический журнал. – 2019. - № 5. – С. 70 – 77.

7. Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалёв М.С., Бугорков К.Н. Влияние скинэффекта на структуру рельефно-фазовых оптических элементов, получаемых методом плазмохимического травления // Оптический журнал. – 2019. - № 9. – С. 78 – 86.

8. Шишлов А. В., Сагателян Г. Р., Шашурин В. Д. Разработка и внедрение методов и средств для технологического обеспечения равнотолщинности функциональных покрытий / Шишлов А. В., Сагателян Г. Р., Шашурин В. Д. // Технология металлов. - 2017. - № 4. - С. 22-27.

 Сагателян Г.Р., Черемисин А.В. Расчёт электромагнитного поля плоского индуктора установки плазмохимического травления // РНТК ФТИ-2020. Секция 9. С. 33 − 37.

Сагателян Г.Р., Грачёв И.Ю., Бугорков К.Н., Федоркова Н.В. Расчёт электромагнитного поля плоского индуктора установки плазмохимического травления // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – Т. 12. – 2020. - № 1. – С. 29 – 42.

11. Таганцев Д.К. Стеклообразные материалы: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 204 с.

12. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высш.шк. 1990. – С. 12 – 16.

 Янин С.Н. Лекции по основам физики плазмы. Часть І. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 22 – 28.

Миронова Г.А., Брандт Н.Н., Салецкий А.М., Поляков О.П., Трубачев О.О.
 Введение в квантовую физику в вопросах и задачах. Уч. пособие. – М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 320 с.

МЕТОД МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

Белов М.Л., Родина А.М., Городничев В.А., Назаров В.В.

Аннотация: В статье проведен анализ возможностей метода мониторинга состояния сельскохозяйственных растений в ближнем ИК диапазоне в спектральной области длин волн более 1,4 мкм. С использованием спектральных библиотек экспериментально измеренных коэффициентов отражения для сельскохозяйственной растительности проведены оценки информационного индекса, равного отношению коэффициентов отражения на длинах волн 1,65 и 2,05 мкм. Показано, что значения информационного индекса для растений в нормальном состоянии всегда существенно больше значения информационного индекса для этих растений в стрессовом (из-за недостатка влаги, переувлажнения, болезни и т.п.) состоянии. Таким образом, мониторинг в ближнем ИК диапазоне на длинах волн более 1,4 мкм (с использованием гиперспектрального сенсора с узкими спектральными каналами или лазерного сенсора) является эффективным дистанционным методом обнаружения сельскохозяйственной растительности, находящейся в неблагоприятных условиях.

Ключевые слова: оптический метод, мониторинг сельскохозяйственной растительности, ближний ИК диапазон.

METHOD OF MONITORING THE CONDITION OF AGRICULTURAL VEGETATION IN THE NEAR IR RANGE

Belov M.L., Rodina A.M., Gorodnichev V.A., Nazarov V.V.

Abstract: The article analyzes the possibilities of the method of monitoring the state of agricul-tural vegetation in the near-infrared range in the spectral region of wavelengths greater than 1.4 μ m. Using spectral libraries of experimentally measured reflection coefficients for agricul-tural vegetation, estimates of an information index equal to the ratio of reflection coefficients at wavelengths of 1.65 and 2.05 μ m were carried out. It is shown that the values of the information index for plants in the normal state are always significantly higher than the value of the information index for these plants in the stressful (due to lack of moisture, overmoisture, disease, etc.) situation. Thus, monitoring in the near-IR range at

wavelengths greater than 1.4 μ m (using a hyperspectral sensor with narrow spectral channels or laser sensor) is an effective remote method for detecting agricultural vegetation, disadvantaged.

Keywords: optical method, agricultural vegetation monitoring, near infrared range.

Введение

Дистанционный контроль состояния растительного покрова является одним из наиболее эффективных практических приложений оптического зондирования (см., например, [1-8]).

Неблагоприятные внешние условия (засуха, заболачивание, заморозки), болезни растений, вредители, загрязнение окружающей среды и т.п. приводят к невозможности нормального развития растений. Поэтому актуальным является разработка аппаратуры для мониторинга состояния сельскохозяйственной растительности.

При аэрокосмическом мониторинге спектральный анализ отраженного излучения позволяет получать оперативную информацию о состоянии растительного покрова.

Для оценки состояния растительности по данным оптического мониторинга используются параметры, называемые индексами вегетации (см., например, [9-15]).

Большинство индексов вегетации основано на особенностях отражательной способности растительности в видимом (особенно в красном 0,6 – 0,75 мкм) и ближнем инфракрасном (в основном 0,75 – 1,3 мкм) спектральных диапазонах. [16,17]

Перспективным вариантом аппаратуры оптического диапазона, позволяющим эффективно проводить мониторинг состояния растительности является оптическая система (пассивная или активная), использующая для контроля состояния растительного покрова ближний ИК диапазон спектра более 1,4 мкм. Отметим, что для активной оптической (лазерной) системы этот спектральный диапазон является безопасным для зрения.

Статья посвящена анализу перспективного оптического метода мониторинга состояния сельскохозяйственных растений в ближнем ИК диапазоне на длинах волн более 1,4 мкм.

Постановка задачи

На сегодняшний день существуют доступные (хотя и немногочисленные) экспериментальные данные (см., например, [18-23]) о коэффициентах отражения

сельскохозяйственных растений в широком спектральном интервале порядка 0,4-2,4 мкм (подавляющее большинство спектральных данных о коэффициентах отражения сельскохозяйственных растений получено в ближнем ИК диапазоне до 1 мкм).

Это позволяет провести анализ возможностей оптических датчиков для мониторинга состояния сельскохозяйственных растений в ближнем ИК диапазоне более 1,4 мкм.

На рисунках 1-4 [15-20] для примера приведены спектры отражения растительности в широком спектральном интервале порядка 0,4-2,4 мкм.



Рисунок 1 – Спектры отражения луга в нормальном состоянии и заболоченного луга



Рисунок 2 – Спектры отражения травы в нормальном состоянии и сухой травы

На рисунке 1 показаны спектры отражения луга в нормальном состоянии (сплошная линия) и заболоченного луга (пунктирная линия). На рисунке 2 - спектры отражения травы в нормальном состоянии (сплошная линия) и сухой травы (пунктирная линия).

Из рисунков 1,2 хорошо видно, что спектры отражения растительности в нормальном состоянии отличаются от спектров отражения растительности в стрессовом состоянии (из-за недостатка влаги, переувлажнения, болезни растений) и сухой растительности как в спектральном диапазоне порядка 0,7-0,9 мкм, так и в спектральном диапазоне 1,5-2,4 мкм.

Наиболее эффективным информационным индексом для оценки состояния растительности в ближнем ИК диапазоне (на длинах волн более 1,4 мкм) представляется информационный индекс *R*, определяемый как отношение коэффициентов отражения на длинах волн 1,65 и 2,05 мкм (или коэффициентов отражения в узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 1,65 и 2,05 мкм):

$$R = \frac{A_{1,65}}{A_{2,05}}$$

где: *A*_{1,65}, *A*_{2,05} - коэффициенты отражения на длинах волн 1,65 и 2,05 мкм.

Длины волн 1,65 и 2,05 мкм были выбраны из-за отличия значений информационного параметра для растений в нормальном состоянии и в неблагоприятных для развития условий, из-за безопасности для глаз и высокого пропускания атмосферы (см. рисунок 3 [24]).



Рисунок 3 – Спектральная зависимость пропускания в вертикальном направлении всей земной атмосферы

В качестве примера гиперспектрального сенсора с узкими спектральными каналами (порядка 10 нм) можно указать сенсор Hyperion (EO-1) [25].

В статье на основе экспериментальных спектров отражения различных видов сельскохозяйственной растительности [18-23] проводится оценка информационного индекса *R* (ближнем ИК диапазоне на длинах волн более 1,4 мкм) для задачи обнаружения участков растительности, находящейся в неблагоприятных для развития

условиях (с аномальными спектрами отражения, не соответствующими периоду вегетации).

Оценка информационного индекса *R* для задачи обнаружения растительности, находящейся в неблагоприятных условиях

На рисунке 4 показаны значения информационного индекса *R* для ряда растений. Оценка информационного индекса *R* проводилась на основе экспериментальных спектров отражения [18-23].

На рисунке 4 по вертикальной оси отложены результаты расчетов информационного индекса *R*, а по горизонтальной оси – номер і спектра отражения растений в созданной базе данных.



Рисунок 4 – Значения информационного индекса *R* для растений из базы данных

Номера 1-10 - зеленые растения в нормальном состоянии (1-луг разнотравный, 2 – овес, 3 – рожь, 4 – 6 – трава зеленая, 7 - пастбище, покрытое зеленой растительностью на 84%, 8 – цитрусовое растение, 9 – пшеница, 10 – луг со свежей зеленой и сухой травой, преобладает свежая зеленая трава).

Номера 11-31 – растения, испытывающие недостаток влаги, переувлажнение, болезни; сухие растения; растения в осенний период (11 – цитрусовое растение, пораженное грибком Capnodium citri, 12 – сухие листья пшеницы, 13 - пастбище, покрытое зеленой растительностью на 50%, 14 – суходольный луг, 15 – заболоченный луг, 16, 21-23, 26 - 30 – сухая трава, 17 - собранный урожай, 18 - сухие листья, стебли, семена, 19, 20 - овес сухой, желтый, 24, 25 – сухие злаковые культуры, 31 – луг со свежей зеленой и сухой травой, преобладает сухая трава)

Из рисунка 4 видно, что значение информационного индекса *R* для зеленых растений в нормальном состоянии в подавляющем большинстве случаев больше, чем

значения индекса *R* для растений, испытывающих недостаток влаги, переувлажнение, болезни, сухих растении и растений в осенний период.

Эффективность метода мониторинга состояния сельскохозяйственных растений в ближнем ИК диапазоне на длинах волн более 1,4 мкм хорошо видна, если рассматривать информационный индекс *R* не для всех растений сразу, а для отдельных растений в нормальном и стрессовом (из-за недостатка влаги, переувлажнения, болезни и т.п.) состояниях.

На рисунках 5-11 показаны значения индекса R для отдельных растений. На рисунке 5 – для луга в нормальном состоянии, суходольного и заболоченного луга. На рисунке 6 - для пастбища с покрытием зеленой растительности 84% и 50%. На рисунке 7 - для овса в нормальном состоянии и сухого желтого овса. На рисунке 8 - для луга с преобладанием зеленой или сухой травы. На рисунке 9 - для зеленой и сухой травы. На рисунке 10 - для здорового и пораженного грибком цитрусового растения. На рисунке 11 - для пшеницы в нормальном состоянии и сухой пшеницы.

Рисунки 5-11 также иллюстрируют зависимость информационного индекса *R* от выбора длин волн. Здесь столбцы с горизонтальной штриховкой показывают значение *R* для длин волн 1,65 и 2,05 мкм, с наклонной штриховкой - для длин волн 1,6 и 2,05 мкм, с шахматной заливкой - для длин волн 1,55 и 2,05 мкм.



Рисунок 5 – Индекс *R* для луга в нормальном состоянии (1), суходольного (2) и заболоченного луга (3)



Рисунок 6 – Индекс *R* для пастбища с покрытием зеленой растительности 84% (1) и 50% (2)



Рисунок 7 – Индекс *R* для овса в нормальном состоянии (1) и сухого желтого овса (2,3)



Рисунок 8 – Индекс *R* для луга с преобладанием зеленой (1) и сухой (2) травы



Рисунок 9 – Индекс *R* для зеленой (1-3) и сухой (4-9) травы



Рисунок 10 – Индекс *R* для здорового (1) и пораженного грибком (2) цитрусового растения



Рисунок 11 – Индекс *R* для пшеницы в нормальном состоянии (1) и сухой пшеницы (2)

Результаты оценки информационного индекса R, приведенные на рисунках 5-11 показывают, что значения информационного индекса R для отдельных растений в нормальном состоянии всегда существенно больше значения индекса R для этих растений в стрессовом (из-за недостатка влаги, переувлажнения, болезни и т.п.) состоянии. Этот эффект является довольно устойчив к выбору длин волн, хотя выбор длин волн 1,65 и 2,05 мкм представляется все таки наилучшим.

Таким образом, мониторинг в ближнем ИК диапазоне на длинах волн более 1,4 мкм (с использованием гиперспектрального сенсора с узкими спектральными каналами или лазерного сенсора) является эффективным дистанционным методом обнаружения сельскохозяйственной растительности, находящейся в неблагоприятных условиях.

Выводы

Проведен анализ возможности оптического метода дистанционного контроля состояния сельскохозяйственной растительности в ближнем ИК диапазоне в области более 1,4 мкм. С использованием библиотек длин волн спектральных экспериментально измеренных коэффициентов отражения для сельскохозяйственной растительности приведены оценки информационного индекса, равного отношению коэффициентов отражения растительности на длинах волн 1,65 и 2,05 мкм. Показано, что значения информационного индекса для растений в нормальном состоянии всегда существенно больше значения информационного индекса для этих растений в стрессовом (из-за недостатка влаги, переувлажнения, болезни и т.п.) состоянии. Таким образом, мониторинг в ближнем ИК диапазоне на длинах волн более 1,4 мкм (с использованием гиперспектрального сенсора с узкими спектральными каналами или лазерного сенсора) является эффективным дистанционным методом обнаружения сельскохозяйственной растительности, находящейся в неблагоприятных условиях.

Литература

1. Gholizadeh A., Kopačková V. Detecting vegetation stress as a soil contamination proxy: a review of optical proximal and remote sensing techniques. // International Journal of Environmental Science and Technology. 2019. V.16. P.2511–2524.

 Belov M.L., Belov A.M., Gorodnichev V.A., Alkov S.V. Laser reflection method applicability for vegetation monitoring at eye-safe sensing wavelengths. // Proc. SPIE. 2018.
 V. 10833. P. 108333Q-1 - 108333Q-6. 3. Комарова А.Ф., Журавлева И.В., Яблоков В.М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Принципы экологии. 2016. Т. 5. № 1. С. 24–62.

4. Михайленко И.М., Воронков И.Н. Научно-методические и алгоритмические основы оценивания показателей продуктивности и фитосанитарного состояния посевов по данным дистанционного зондирования земли // Агрофизика. 2016. № 1. С.32-42.

5. Emangini E.J., Blackburn G.A., Theobald J.C. Detection and discimination of stress in bean (Phaseolus vulgaris Tendergreen) caused by oil pollution and waterlogging using specral and thermalremot sensing // Research Journal of Applied Sciences. 2013. V. 8. N. 6. P. 302-312.

6. Zygielbaum A.I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize // Geophysical research letters. 2009. V. 36. P. 1-4.

7. Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Stark R., Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 80. P. 76-87.

8. Zygielbaum A.I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize // Geophysical research letters. 2009. V. 36. P. 1-4.

9. Ahmad F. Spectral vegetation indices performance evaluated for Cholistan Desert // Journal of Geography and Regional Planning. 2012. V. 5(6). P. 165-172.

10. Vina A., Gitelson A. A., Nguy-Robertson A. L., Peng Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 3468-3478.

11. Вегетационные индексы. Режим доступа: https://gis-lab.info/qa/vi.html#pvi. (дата обращения 05.02.2024).

 Макаров Е.О. Обзор существующих вегетационных индексов при выполнении анализа земной поверхности // Современные научные исследования и инновации. 2023.
 № 6. Режим доступа: https://web.snauka.ru/issues/2023/06/100430 (дата обращения: 05.02.2024).

13 Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment . 2002. Vol. 83 . P. 195-213.

14. ЧерепановА.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. N 2. С. 98–102.

15. Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R. A review of vegetation indices // Remote Sensing Reviews. 1995. V. 13 (1). P. 95 – 120.

16. Использование вегетационных индексов для анализа растительности. Режим доступа: https://gisproxima.ru/ispolzovanie_vegetatsionnyh_indeksov (дата обращения 05.02.2024).

17. Vegetation Analysis: Using Vegetation Indices in ENVI. Режим доступа: https://www.nv5geospatialsoftware.com/Support/Self-Help-Tools/Help-Articles/Help-

Articles-Detail/ArtMID/10220/ArticleID/16162/Vegetation-Analysis-Using-Vegetation-Indices-in-ENVI (дата обращения 05.02.2024).

Алтынов А.Е., Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А.Ф.
 Спектрометрирование ландшафтов. // Учебное пособие для студентов М.: Изд.
 МИИГАиК. 2010. 120 с.

19. JohnsHopkinsUniversitySpectralLibrary.Режимдоступа:https://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc (дата обращения 05.02.2024).

20.USGSDigitalSpectralLibrary06.Режимдоступа:http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06 (дата обращения 05.02.2024).

21. Meerdink S. K., Hook S. J., Abbott E.A., Roberts, D.A. ECOSTRESS Spectral Library
Version 1.0. 2018. Режим доступа: https://speclib.jpl.nasa.gov (дата обращения 02.05.2022).

22. Roy P.S. Spectral reflectance characteristics of vegetation and their use in estimating productive potential. // Proc. Indian Acad. Sci. (Plant Sci.). 1989. V. 99. N. 1. P. 59-81.

23. Кравцов С.Л., Голубцов Д.В., Лисова Е.Н. Анализ спектральных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности (по зарубежным публикациям). // Исследование земли из космоса. 2013. № 1, С. 79–91.

24. Fenn R.W., Mill J.D., Clough S.A., Rothman L.S., Gallery W.O., Shettle E.P., Good R.E., Volz F.E., Kneizys F.X. 1985 Handbook of geophysics and the space environment / ed A.S. Jursa. chapter 18. pp 18-1–18-80.

25. Middleton E.M., Ungar S.G., Mandl D.J., Ong L., Frye S.W., Campbell P.E., Landis D.R., Young J.P., Pollack N.H. The Earth Observing One (EO-1) Satellite Mission: Over a Decade in Space. // IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. 2013. V. 6. N. 2. P. 243 -256.

ОЦЕНКА И МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ ПО НАПРАВЛЕНИЮ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ

И.М. Илюхин, А.Д. Соколов, А.С. Кузнецов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва E-mail: ilukhin@bmstu.ru, sokolovad1@student.bmstu.ru, askuznetsov@bmstu.ru

Аннотация: В статье проведен теоретический анализ погрешностей угловой ориентации искусственного спутника земли по направлению местной вертикали к Земле, реализуемой с помощью инфракрасного построителя вертикали. Практическая значимость работы заключается в разработке способа минимизации основных составляющих погрешностей за счет использования в составе системы управления формирователя системы коррекции и механизма высотной коррекции, обеспечивающих получение погрешности, ограниченной только пороговым углом рассогласования.

Ключевые слова: местная вертикаль, искусственный спутник Земли, инфракрасный построитель вертикали, погрешность угловой ориентации корабля.

ESTIMATION AND MINIMIZATION OF THE ERROR IN THE ORIENTATION OF THE ARTIFICIAL EARTH SATELLITE IN THE LOCAL VERTICAL DIRECTION

I.M. Ilyukhin, A.D. Sokolov, A.S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: ilukhin@bmstu.ru, sokolovad1@student.bmstu.ru, askuznetsov@bmstu.ru

Abstract: This article provides a theoretical analysis of errors in the angular orientation of an artificial earth satellite in the direction of the local vertical to the Earth, implemented using an infrared vertical builder. The practical significance of the work lies in the development of a method for minimizing the main components of errors by using a correction system shaper and an altitude correction mechanism as part of the control system, providing an error limited only by the threshold angle of misalignment.

Keywords: local vertical, artificial earth satellite, infrared vertical builder, ship angular orientation error.

Введение

В настоящее время для обеспечения требуемой угловой ориентации все пилотируемые космические корабли (ПКК), в том числе искусственные спутники Земли (ИСЗ) оснащаются бортовыми навигационными комплексами, значительное место в составе которых занимают визуальные и автоматические оптико-электронные приборы [1]. Для решения ряда практических задач по программному управлению ИСЗ, и ориентации его в орбитальной системе навигационных координат, одна из осей ИСЗ, а именно ось Y_K совмещается с направлением местной вертикали (MB) к поверхности планеты, вокруг которой происходит движение корабля, а ось X_{κ} – с плоскостью его орбиты, задаваемой вектором скорости последнего. Эта операция может выполняться в автоматическом режиме с помощью приборов, называемых построителями местной вертикали [2]. Чаще всего используются так называемые ИК вертикали (ИКВ), реализующие круговое сканирование ИК горизонта (ИКГ) планеты угловым полем прибора. Такие ИКВ определяют направление МВ как направление на геометрический или энергетический центр ИКГ планеты на основе анализа зависимости амплитуды управляющего сигнала U от величины и направления текущего угла рассогласования β . Под углом рассогласования понимается угол между ориентируемой осью ИСЗ, в данном случае Y_{K} , и местной вертикалью. Эта зависимость $U = f(\beta)$ называется угловая или пеленгационная характеристика и имеет линейный рабочий участок в пределах $0 \le \beta \le \omega$, где 2ω - угловое поле ИКВ (рисунок 1).

При разработке такого рода приборов в техническом задании (ТЗ) на этапе эскизного проектирования задают в качестве исходных данных максимально допустимую погрешность ориентации ИСЗ. В основном это прецизионные оптикоэлектронные приборы с погрешностью в пределах 10...15 угловых минут [3].

Известны ПМВ сканирующего типа [4, 5], использующиеся в настоящее время в составе активных космических аппаратов (КА). Данные устройства предназначены для ориентации двух осей КА (крена и тангажа) относительно местной вертикали и охватывают область среднеэллиптических орбит в диапазоне высот от 300 до 1200 км. Авторы в работах [6, 7] описали способ ориентации по планете с использованием ИКВ, учитывая знания на определенный момент времени взаимного положения Земли, Солнца, КА и последующих программных разворотов КА. В [8] авторы оценили суммарную погрешность ИКВ, возникающей при летно-конструкторских испытаниях малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Однако в этих

работах отсутствует информация о способах и технической реализации минимизации погрешностей ИКВ.

Таким образом, целью работы является теоретическая оценка погрешностей, возникающих при угловой ориентации ИСЗ по направлению местной вертикали и разработка способа их минимизации.

1. Методика расчёта угловой погрешности ориентации ИСЗ

На этапе проектирования ИКВ с круговым сканированием ИК горизонта Земли принимается идеализированная модель Земли – шарообразная по форме с равномерной яркостью *L* и высотой *h* излучающего слоя её атмосферы, называемым ИК ореолом Земли. Для такой модели Земли МВ совпадает с направлением на энергетический центр, просматриваемого угловым полем построителя, ИКГ планеты [8].

Надёжное функционирование ИКВ обеспечивается при выполнении условия:

$$U_{\min} \ge \mu_O \cdot U_{\Sigma \pi},\tag{1}$$

где U_{min} – минимальный полезный сигнал, определяющий начало и завершение работы системы управления, $U_{\Sigma n}$ – суммарный уровень внутренних шумов ИКВ, μ_o – требуемый коэффициент запаса (отношение сигнал-шум), обеспечивающий надёжную защиту ИКВ от внутренних случайных помех (достаточно $\mu_o \ge 7$)

Условие (1) является основополагающим при разработке любого ОЭП, т.е. необходимо, чтобы минимальный регистрируемый сигнал превышал внутренние шумы самого прибора в определенное количество раз.

ИКВ определяет направление MB с инструментальной погрешностью β_{μ} , называемой пороговым углом рассогласования, и определяемой из соотношения (в соответствии с рисунком 1):

$$\beta_{\mu} = \pm \omega \cdot \frac{U_{min}}{U_{max}},\tag{2}$$

где U_{max} – максимальный полезный сигнал, который достигается при попадании корабля в угловое поле ИКВ, $\frac{U_{max}}{U_{min}} = K_{\text{Д}}$ – динамический диапазон изменения управляющего сигнала в пределах рабочей зоны его угловой характеристики. Приняв угловое поле ИКВ $2\omega = 4^{\circ}$ и $K_{\text{Д}} = 12$, значение инструментальной погрешности будет составлять величину $\beta_{\mu} = 10$ угловых минут.

Соотношение (2) можно легко получить из анализа пеленгационной характеристики подобных ИКВ, представленной на рисунке 1. Данный график

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023

симметричен относительно начала координат и отрицательную часть обычно не изображают.



Рисунок 1 – График пеленгационной характеристики ИКВ

В реальности Земля представляет собой эллипсоид вращения (т.к. она сплюснута в направлении полюсов), а в силу климатических особенностей – яркость излучения фрагментов ИКГ планеты имеет местные и широтные вариации. Эти факторы обуславливают несовпадение MB с направлением на энергетический центр ИКГ, т.е. появление методической погрешности ориентации ИСЗ.

Местные вариации излучения ИКГ носят случайный характер и увеличивают общий уровень шума ИКВ, что учитывается на этапе проектирования ПМВ соответствующим увеличением сигнала U_{min} .

Широтные вариации излучения имеют детерминированный характер и проявляются в виде температурного $\Delta T = T_2 - T_1$ и высотного $\Delta h = h_2 - h_1$ градиентов в диаметрально противоположных участках ИКГ, где T_1, T_2 и h_1, h_2 – это значения температур и высот соответственно для диаметрально противоположных точек горизонта Земли Γ_1 и Γ_2 . Они имеют одинаковую направленность – вдоль местного меридиана в сторону экватора Земли и вызывают появление «ложного» сигнала U_n , по команде которого система управления будет разворачивать ИСЗ, пытаясь «совместить» его ось Y_K с направлением на энергетический центр ИКГ (рисунок 2*a*). В результате возникает методическая погрешность ориентации спутника δ_i (аналог смещения нуль пункта угловой характеристики (рисунок 2*b*)), значение которой можно оценить как:

$$\delta_{i} = \beta_{\Phi} - \beta_{\mathrm{H}} = \omega \cdot \frac{U_{\pi}}{U_{max}},$$

где β_{Φ} – фактическая погрешность ориентации ИСЗ.



Рисунок 2 – Схема, поясняющая принцип сканирования ИКГ и вид угловой характеристики ИКВ: *a* – принцип сканирования ИКГ, *б* – вид угловой характеристики ИКВ. *φ*_K - широта текущего географического места ИСЗ (геометрическое местоположение корабля ГМК) относительно плоскости экватора планеты, К – местонахождение корабля (ИСЗ) на средней высоте полета *H*_{ср} относительно ИКГ планеты, имеющего вектор скорости *V*_к, *h*_{ИКГ} – толщина излучающего слоя атмосферы планеты, *R*₃ – радиус Земли, С и Ю – север и юг соответственно, 2*a* и 2*b* – большая и малая оси Земли соответственно



Рисунок 3 – Схема, поясняющая процесс сканирования ИКГ Земли угловым полем ИКВ. n₀ – частота вращения сканирующей системы ИКВ, 2ω - угловое поле ИКВ

Значение «ложного» сигнала вследствие температурного градиента ΔT ИКГ пропорционально половине его яркостного контраста $\frac{\Delta L}{2L_3} \cong \frac{2\Delta T}{T_3}$, где T_3 - средняя радиационная температура вдоль ИКГ планеты. Поэтому температурную

составляющую погрешности ориентации ИСЗ $\delta(\Delta T)$ можно рассчитать из соотношения:

$$\delta(\Delta T) = \omega \cdot \frac{2\Delta T}{T_3},$$

где при $\Delta T = 10$ К и $T_3 = 250$ К получим $\delta(\Delta T) = 9.6' = 0.96\beta_{\rm H}$.

Аналогично, основываясь на [9], перепад Δh высоты излучающего слоя атмосферы Земли в противоположных участках ИКГ вызывает появление погрешности ориентации ИСЗ $\delta(\Delta h)$ (углового смещения оси Y_K в сторону геометрического центра ИКГ) согласно выражению

$$\delta(\Delta h) = \frac{0,5(h_2 - h_1)}{\left[(R_3 + H)^2 - (R_3 + h_{\rm cp})^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

где $h_{\rm cp}$ – средняя толщина излучающего слоя атмосферы Земли.

Принимая значение $\Delta h = 5$ км, $R_3 = 6400$ км, H = 500 км и $h_{cp} = 11$ км получим значение $\delta(\Delta h)$ равным 10 угловым минутам, т.е. $\delta(\Delta h) = \beta_{\rm H}$.

Эллиптичность формы Земли также приводит к смещению геометрического центра ИКГ относительно MB и появлению погрешности $\delta_{\rm e}$, определяемой как

$$\delta_{\rm e} = {\rm e}_3 \cdot \sin^2(\varphi_{\rm MK\Gamma}) \cdot \sin(2\varphi_K), \tag{3}$$

где $e_3 = \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298}$ - эксцентриситет Земли, a, b – большая и малая полуоси эллипсоида соответственно, $sin^2(\varphi_{\rm ИКГ}) = [(R_3 + h_{\rm cp})/(R_3 + +H)]^2 = 0,863.$

Максимальное значение этой погрешности возникает при $\varphi_K = \pm 45^{\circ}$ и при подстановке значений в (3) получим $\delta_e = 9,96' \approx \beta_{\rm H}$.

В случае движения ИСЗ по эллиптической орбите вследствие изменения высоты его полёта, т.е. $H_i = Var$ при постоянстве угла наклона сканирующего зеркала φ_{CK3} и определяемого из соотношения:

$$\varphi_{CK3} = 0.5 \cdot \arcsin\left[\frac{R_3 + h_{cp}}{R_3 + H_{cp}}\right]$$

в угловой характеристике ИКВ появляется зона нечувствительности $\delta_{3/H}$, а крутизна её рабочего участка уменьшается в 2 раза. Фактическая погрешность ориентации ИСЗ в этом случае определяется как

$$\delta_{\Phi}(\mathbf{H}_{i}) = \delta_{3/\mathbf{H}} + 2\beta_{\mathbf{H}} = (0.5\Delta\varphi - \omega) + 2\omega \cdot \frac{U_{min}}{U_{max}},$$

где $\Delta \varphi = \varphi_{\rm ИКГ}({\rm H}_{min}) - \varphi_{\rm ИКГ}({\rm H}_{var})$ – изменение углового размера текущего радиуса ИКГ. Так уже при $\Delta \varphi = 2\omega$ погрешность ориентации ИСЗ вследствие эллиптичности орбиты его движения будет определена как

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023

$$\delta(H_i) = \delta_{\Phi}(H_i) - \beta_{H} = (0.5 \cdot 2\omega - \omega) + 2\omega \cdot \frac{U_{min}}{U_{max}} - \omega \cdot \frac{U_{min}}{U_{max}} = \omega \cdot \frac{U_{min}}{U_{max}} = \beta_{H}$$

Все составляющие возникающих погрешностей ориентации ИСЗ имеют регулярный характер и изменяются во время одного периода T_{HC3} его обращения вокруг Земли в зависимости от значений текущей географической широты $\varphi_{\rm K}$ и высоты Н полёта ИСЗ. Поэтому, как это следует из приведённого выше анализа значение ожидаемой «суммарной» погрешности построения MB δ_{Σ} может составить величину порядка

$$\delta_{\Sigma} = \beta_{\mathrm{H}} + \sum_{1}^{4} \delta_{i} \approx 5\beta_{\mathrm{H}},$$

что существенно (примерно в 5 раз) превышает предельно-допустимое по ТЗ на разработку ИКВ значение погрешности ориентации ИСЗ, которую необходимо минимизировать.

2. Минимизация погрешности угловой ориентации ИСЗ

Из результата проведенного теоретического анализа суммарной погрешности, возникающей при угловой ориентации ИСЗ, выявлена необходимость ее минимизации. Для обеспечения минимизации погрешности предложен следующий технический способ, заключающийся введением в систему управления ИСЗ дополнительных функциональных блоков и узлов.

Возникновение первых трёх типов погрешностей в силу их единой направленности приводит к появлению «ложного» сигнала управления $U(\delta_{1-3})$, определяемого как

$$U(\delta_{1-3}) = U_{max} \cdot \frac{\delta_{1-3}}{\omega},$$

где $\delta_{1-3} = \delta(\Delta T) + \delta(\Delta h) + \delta_e.$

Влияние данных погрешностей можно минимизировать путём подачи в СУ корректирующего сигнала $U_K(t, \delta_{1-3})$. Этот сигнал может быть рассчитан и сформирован электронным устройством – формирователем сигнала коррекции (ФСК) на основе введённых в него известных и текущих параметров движения ИСЗ. Сигнал коррекции подаётся в амплитудный дискриминатор (АД), где «вычитается» из сигнала, поступающего из ИКВ. Эта операция «исключает» разворот ИСЗ на угол δ_{1-3} , обеспечивая прекращение работы системы управления при угле рассогласования между осью Y_K и направлением на МВ при $\beta = \beta_{\rm H}$ (рисунок 4).



Рисунок 4 – Функциональная схема ИКВ, обеспечивающей минимизацию погрешности угловой ориентации ИСЗ

Дестабилизирующее влияние изменения высоты полёта ИСЗ на процесс его ориентации можно полностью устранить за счёт функционального изменения угла наклона сканирующего зеркала ИКВ по команде механизма высотной коррекции (МВК). Он в течение $T_{\text{ИСЗ}}$ вырабатывает сигналы, обеспечивающие разворот сканирующего зеркала на угол $\alpha(H_i)$ относительно нормали \overline{N} , определяемый как

$$\alpha(H_i) = 0.5 \left[\arcsin\left(\frac{R_3 + h_{\rm cp}}{R_3 + H_i}\right) - \arcsin\left(\frac{R_3 + h_{\rm cp}}{R_3 + H_{\rm cp}}\right) \right].$$

Благодаря этому погрешность $\delta(H_i)$ будет минимальна.

Заключение

В ходе проведённых исследований в работе были теоретически проанализированы погрешности угловой ориентации ИСЗ, основными из которых являются инструментальная, методическая погрешности, а также погрешности, связанные с не идеальностью формы планеты, температурными, яркостными градиентами и изменением высоты полета ИСЗ. Предложен способ минимизации основных погрешностей за счёт введения в состав системы управления ИСЗ формирователя сигнала коррекции и механизма высотной коррекции, обеспечивая плавную подстройку угла наклона сканирующего зеркала ИКВ под высоту полета спутника.

Для практической реализации предложенного способа минимизации систематических погрешностей угловой ориентации ИСЗ необходимо в дальнейшем составить программу расчёта и формирования сигнала коррекции, а также разработать конструкцию следящего привода для обеспечения плавного, или с дискретным шагом разворота сканирующего зеркала ИКВ.

Литература

Илюхин, И. М. Проектирование оптико-электронных приборов астронавигации /
 И. М. Илюхин, А. С. Кузнецов. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021.
 – 68 с. – ISBN 978-5-7038-5742-7.

2. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие. — М.: Логос, 2007. — 248 с. .

3. Перспективные направления разработки устройств ориентации космических аппаратов по солнечному излучению и инфракрасному горизонту земли / А. В. Мельников, Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020. – Т. 177. – № 4. – С. 21.

4. Патент РФ № 185146 Российская Федерация, МПК В64G 1/24 (2006.1). Низкоорбитальный космический аппарат с устройством ориентации по Земле : № 2017130874 : заявл. 31.08.2017 ; опубл. 22.11.2018 / Михайлов Е.Н., Умов Р.Д., Гандлевский Ю.М. [и др.].

5. Оценка точности инфракрасных построителей местной вертикали по результатам летных испытаний / Ю. М. Гандлевский, Е. Н. Михайлов, Ю. С. Мосолова [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – Т. 141. – № 4. – С. 31 – 38.

6. Патент № 2021173 Российская Федерация МПК В64G 1/24 (2006.01) Способ ориентации космического аппарата на планету. Головное конструкторское бюро Научно-производственного объединения "Энергия" им. С.П.Королева : № 5007729 : заявл. 1991-07-22 : опубл. 15.10.1994 / Мельников В.Н., Казначеев Ю.В., Черток М.Б. – с. : ил.

7. Патент № 2021174 Российская Федерация МПК В64G 1/24 (2006.01) Способ ориентации космического аппарата по местной вертикали планеты. Головное

конструкторское бюро Научно-производственного объединения "Энергия" им. С.П.Королева : № 5007730 : заявл. 1991-07-22 : опубл. 15.10.1994 / Мельников В.Н., Казначеев Ю.В., Черток М.Б. – 6 с. : ил.

8. Е.В., Виленский В.В. Исследование Акимов методических ошибок инфракрасного построителя вертикали при летно-конструкторских испытаниях малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли : Молодежный научновестник 2016. № ФС77-51038. URL: технический _ extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://akf.

bmstu.ru/images/Акимов%20Е.В.%20Виленский%20ВВ.pdf (дата обращения: 05.02.2024)

9. Ивандиков Я.М. – Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов М.: Машиностроение 1979 г. – 208с.

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И ВОДОЛАЗНЫХ КОМПЛЕКСОВ

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 ² Московский 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 телевизионные камеры и их принадлежности для подводных аппаратов и водолазных комплексов. Приведены основные параметры устройств, внешний вид, оценены их возможности, показан характер изображения.

Ключевые слова: подводная телевизионная камера, чувствительность, разрешение, угол обзора, глубина погружения, светильник, угол подсвета, мощность, световой поток, масса, габариты.

TELEVISION CAMERAS FOR UNDERWATER VEHICLES AND DIVING COMPLEXES

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: Television cameras and their accessories for underwater vehicles and diving complexes are 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 television camera, sensitivity, resolution, viewing angle, depth of immersion, luminaire, illumination angle, power, luminous flux, weight, dimensions.

Общие сведения о телевизионных камерах для подводных аппаратов и водолазных комплексов

Подводных аппараты и водолазные комплексы предназначены для проведения осмотровых работ, контроля состояния подводных объектов, а также для проведения подводной видеосъёмки на глубинах до 100 м и более в условиях нормальной и пониженной прозрачности морской и пресной воды с передачей изображения по кабелю на поверхность и видео регистрации передаваемого изображения с возможностью записи всей информации на жесткий диск или USB носитель. Предусмотрена возможность обмена данными по WiFi. Существует возможность регулировки яркости светильника, подключения клавиатуры для сохранения комментариев. При указанные устройства этом оснащены подводными телевизионными (ТВ) камерами и подводными светильниками, выполненные на основе металлогалогенных ламп или светодиодов (СД). Электрическое питание на ТВ камеру и светильник осуществляется от внешнего источника питания (аккумуляторная батарея или сеть с напряжением ~ 220 В 50 Гц) с помощью ТВ кабеля, длина которого зависит от глубины погружения ТВ камеры и светильника. С помощью надводного блока управления (НБУ) осуществляется управление работой подводных аппаратов и водолазных комплексов. Подводный аккумуляторный блок (ПАБ) с зарядным устройством предназначен для совместного использования ТВ камеры и подводного светильника. Материалом их герметичного влагозащищенного корпуса чаще всего служит ударопрочный пластик или устойчивый к коррозии алюминиевый сплав с двойным антикоррозионным защитно-декоративным покрытием. Универсальность корпуса ТВ камеры и светильника позволяют устанавливать их как на водолазном шлеме и полнолицевой маске, так и на специальной рукоятке в руке водолаза. удобный интерфейс управления встроенного Предусмотрен вандалавлагозащищенного трекбола и влагозащищенной клавишной клавиатуры. Станция водолазной связи осуществляет при этом двустороннюю связь водолаза с наземным оператором и наложения на видеосъемку голоса (комментариев) оператора и водолаза. ТВ камеры могут быть черно-белыми или цветными. Они были выполнены на основе матриц ПЗС формата 1/3 или 1/4 дюйма.

Применение телевидения под водой связано с рядом трудностей, т.к. вода в значительно больше степени, чем воздух, поглощает свет. Прозрачность воды для различных водоемов колеблется от нескольких см до 50 м и более. Глубже 100 м свет не проникает. Поэтому для работы на больших глубинах нужны светильники, ярко и равномерно освещающие объект наблюдения. Поскольку радиоволны сильно затухают в воде, то для связи ТВ камеры с НБУ на малых глубинах используются гибкие наземные кабели в резиновой изоляции, а для больших глубин используются кабелитросы, в которые для прочности введены, кроме токопроводящих жил, стальные сердечники или оплетки из стальных проволок. Для намотки кабеля используются вьюшки с токопереходом либо кабельные катушки. При длине кабеля более чем на 1 км, а также в случае возможных перебоев или отсутствия промышленной сети ТВ камера со светильником переводится на автономное питание от батареи аккумуляторов, в том числе и автомобильной [1].

Метод расчета дальности действия ТВ системы для подводной аппаратуры и водолазных комплексов

Данный метод позволяет рассчитать дальность видения объектов наблюдения с различными коэффициентами яркости [2]. Работа ТВ камер для подводных дронов предполагает влияние Солнца, а ночью – звезд и Луны. Однако для глубоководной аппаратуры и водолазных комплексов освещенность от Солнца и тем более естественная ночная освещенность (ЕНО) не обеспечивают нормальную работу ТВ камеры в пассивном режиме (без полсвета). Поэтому дальность действия ТВ системы будем рассчитывать при ее работе только в активном режиме при подсвете объекта наблюдения и окружающего его фона светильником. При этом в отличие от метода расчета дальности действия для подводных дронов исключаются все формулы, связанные с влиянием Солнца и ЕНО. Дальность действия ТВС определяется по формуле:

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

где а – 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, укладывающихся в пределах контура фронтальной проекции объекта и необходимых для его опознавания.

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

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

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023
где α_{стр.} – предельное угловое разрешение ТВ системы, определяемое его структурными несовершенствами, рад.; α_{гл. прив.} – предельное угловое разрешение ТВ системы, определяемое несовершенством глаза и приведенное к светочувствительной площадке ПЗС матрицы, рад.; α_{эл.} – предельное угловое разрешение ТВ системы, определяемое его шумами, рад.

$$\alpha^{2}_{\text{ ctp.}} = 0,26 \ (\Gamma_{\text{TB}} \ f_{\text{ob.}})^{-2} \ (\Gamma_{\text{TB}} \ N_{\text{ob.II.}}^{-2} + N_{\text{TBK.II.}}^{-2} + N_{\text{TBM.II.}}^{-2} + N_{\text{ok}}^{-2})$$

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

$$\begin{split} N_{o 6.\pi.} &= 1,73 \ N_{o 6.} \ (-ln \ T_{o 6.} \ (N))^{-0.5}, \\ N_{TBK.\pi.} &= 1,73 \ N_{TBK.} \ (-ln \ T_{TBK.} \ (N))^{-0.5}, \\ N_{TBM.\pi.} &= 1,73 \ N_{TBM.} \ (-ln \ T_{TBM.} \ (N))^{-0.5}, \\ N_{o \kappa.\pi.} &= 1,73 \ N_{o \kappa.} \ (-ln \ T_{o \kappa.} \ (N))^{-0.5}, \end{split}$$

где $N_{ob.}$, $N_{TBK.}$, $N_{TBM.}$, $N_{ok.}$ – разрешающая способность объектива, TB камеры, TB монитора и окуляра соответственно, штр/мм; $T_{ob.}$ (N), $T_{TBK.}$ (N), $T_{TBM.}$ (N), $T_{ok.}$ (N) – коэффициент передачи контраста, о/е на характеристической пространственной частоте N = 15 штр/мм.

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

где α_{гл.фл.} – предельное угловое разрешение глаза, определяемое флуктуационными ограничениями, рад.; α_{гл.пор.} – предельное угловое разрешение глаза, обусловленное его собственными пороговыми свойствами, собственными шумами, рад.; Г_Σ – суммарное увеличение ТВ системы, крат.

$$\Gamma_{\Sigma} = (f_{ob.} / f_{ok.}) \Gamma_{TB.},$$
$$\Gamma_{ok.} = 250 / f_{ok},$$

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

$$\Gamma_{\mathrm{TB.}} = \mathbf{d}_{\mathcal{P}} \mathbf{D}_{\Pi \mathcal{C}}^{-1},$$

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

$$d^{2}_{\text{ гл.} \varphi \pi.} = 8 \text{ } k^{2} \text{ } H_{o} \text{ } A_{\text{3p.max.}} (\pi \text{ } L_{\text{3k.}} \theta_{\Gamma.} \text{ } A_{\text{3p.}})^{-1} (K_{\text{TB.}} + 2) \text{ } K^{-2}_{\text{ TB.}},$$

где k – отношение сигнал/шум, определяемое из заданных вероятностей пропусков и ложных тревог; H_o – пороговая экспозиция для глаза, лк с, соответствующая единичному полезному импульсу в зрительном анализаторе, для монокулярного зрения

H_o =8x10⁻¹⁰ лк с, для бинокулярного зрения H_o =4x10⁻¹⁰ лк с; θ_{Γ.} – время инерции глаза, с; A_{3p.}, A_{3p.max.} – площадь зрачка глаза, соответствующая данному конкретному значению яркости и площадь зрачка глаза максимальная соответственно, мм; L_{эк.} – яркость экрана ТВ монитора, кд/м; K_{TB.} – контраст на выходе ТВ монитора.

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

$$\mathbf{K}_{\mathrm{TB.}} = \mathbf{K} \, \mathbf{K}_{\mathrm{II.}},$$

где К – контраст объекта с фоном на входном зрачке объектива ТВ системы (формулы для его определения – см. ниже).

$$K_{II.} = K_{II.ctp.}$$
 (1 - δ_{ob.}) (1 - δ_{TBK.}) (1 - δ_{TBM.}) (1 - δ_{ok.}),

где К_{п.стр.} – структурная составляющая потери контраста; $\delta_{ob.}$, $\delta_{TBK.}$, $\delta_{TBM.}$, $\delta_{ok.}$ – засветочные коэффициенты соответственно для объектива, ТВ камеры, ТВ монитора, окулярной системы. Они учитывают рассеяние света в соответствующих элементах ТВ системы.

$$\begin{split} \mathbf{K}_{\text{п.стр.}} &= (1 + 4 \text{ } \text{D}^2 \, \Gamma_{\text{TB.}} \, \alpha^2_{\text{ crp.}} \, a^{-2})^{-1}, \\ \alpha^2_{\text{ гл.пор.}} &= (1,03 \, 10^{-4} \mid \text{K}_{\text{TB.}} \mid^{-1,45})^2 \, . \end{split}$$

Определение дальности действия ТВ системы в активном режиме связано также с расчетными формулами для α_{эл.} и К.

$$\alpha^{2}_{\text{эл.}} = 16 \text{ k}^{2} \text{ e } \pi^{-2} (2 + \text{ K}) \text{ K}^{-2} \text{ F } (L_{\varphi..п.э\varphi.} \text{ d}^{2}_{\text{BX..3p.}} \tau_{ob.} \theta \text{ S}_{ocb.})^{-1},$$

где е=1,6x10⁻¹⁹ кул. – заряд электрона; $d_{Bx,3p.}$ – диаметр входного зрачка объектива, м; $\tau_{ob.}$ – пропускание объектива; θ – время инерции системы прибор-глаз; $S_{ocb.}$ – чувствительность ПЗС матрицы в рабочей области спектра светильника (если последний излучает на одной длине волны - то спектральная чувствительность ПЗС - S_{λ}), A/Bт.

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

где θ_{тв.} – время инерции ТВ системы, с; S_Σ – интегральная чувствительность ПЗС матрицы, А/Вт; F - шум-фактор ТВ камеры, учитывающий влияние ее шумов.

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

где б_{э.равн} – засветочный коэффициент ТВ камеры при интегральной равномерной засветке ПЗС матрицы.

При работе ТВ системы в активном режиме подсвечивается наблюдаемый объект и окружающий его фон. Соответственно на входном зрачке объектива ТВ

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023

системы присутствуют эффективные яркости подсвечиваемого объекта L_{об.п.эф.} и подсвечиваемого фона L_{ф.п.эф.}. Также подсвечивается дымка, создающая обратное рассеяние излучения подсвета, что дает эффективную яркость подсвечиваемой дымки L_{д.п.эф.}. На основании изложенного:

$$\begin{split} \mathbf{K} &= (\mathbf{L}_{\mathrm{o}6.\pi.9\varphi.} - \mathbf{L}_{\varphi.\pi.9\varphi.}) \; (\mathbf{L}_{\varphi.\pi.9\varphi.} + \mathbf{L}_{\mathrm{d}.\pi.9\varphi.}), \\ \mathbf{L}_{\mathrm{o}6.\pi.9\varphi.} &= (\pi \; \mathbf{D}^2_{\;\mathrm{o}6.})^{-1} \; \rho_{\mathrm{o}6.} \; \mathbf{I} \; \exp \left(-2\alpha_{\pi.} \; \mathbf{D}_{\mathrm{o}6.}\right) \; \mathrm{Cos}\gamma, \\ \mathbf{L}_{\varphi.\pi.9\varphi.} &= (\pi \; \mathbf{D}^2_{\;\varphi.})^{-1} \; \rho_{\varphi.} \; \mathbf{I} \; \exp \left(-2\alpha_{\pi.} \; \mathbf{D}_{\varphi.}\right) \; \mathrm{Sin}\gamma, \end{split}$$

где ρ_{o6} , $\rho_{\phi.}$ – коэффициенты яркости соответственно объекта и фона; $D_{o6.}$, $D_{\phi.}$ – дальность до объекта и фона соответственно, м; $\alpha_{n.}$ – коэффициент ослабления излучения в атмосфере в спектральном диапазоне излучения подсвета 0,45 – 0,55 мкм (если излучение подсвета монохроматическое – то на длине волны этого излучения – чаще всего 0,5 мкм), 1/км; γ – угол между направлением оптической оси осветителя и нормалью к освещаемой поверхности объекта, град; I – энергетическая сила света осветителя, кд.

$$I_{cp.} = P(\omega)^{-1} (22)$$

где P – мощность излучения, Вт; ω – телесный угол подсвета, Ср.

$$L_{\text{д.п.}\phi.} = 2 \pi^{-1} \alpha_{\text{п.}}^2 f(\omega)_{180} I 10^{-6} \int_{D_1}^{D_2} D^2 \exp(-2\alpha_{\text{п.}} D) dD =$$

$$= 2 \pi^{-1} \alpha_{\pi} f(\omega)_{180} I 10^{-6} (f(2\alpha_{\pi} D_2) - f(2 \alpha_{\pi} D_1)),$$

где f(2 α D) =f(x) – функция А. А. Гершуна [2]; f(ω)₁₈₀ – коэффициент обратного рассеяния, показывающий, какая доля излучения подсвета рассеивается в обратном направлении. Для подводной среды f(ω)₁₈₀ = 3 [2]; D₁, D₂ - пределы по дальности, м, определяющие толщу подводной среды, создающую яркость первичного рассеяния, которой можно ограничиваться при практических расчетах:

$$D_1 = D G (G + D tg 0.5\beta_{r.})^{-1},$$

 $D_2 = D,$

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

$$\mathbf{S}_{\text{oe.}} = \mathbf{S}_{\lambda \max} \mathbf{S}_{\lambda}^{-1},$$

где $S_{\lambda max}$ – максимальное значение спектральной чувствительности ПЗС матрицы; A/Bt, S_{λ} – спектральная чувствительность ПЗС матрицы на длине волны излучения подсвета, A/Bt.

Расчет ведется методом последовательных приближений. Приведем пример расчета дальности действия. Исходные данные для расчета: a = 0.5 м, $\Gamma_{TB} = 50^{x}$, $f_{ob} = 6$ -

120 мм, $f_{ok} = 50$ мм, $d_{\Im} = 120$ мм, $D_{\Pi 3C} = 6$ мм, $N_{ob} = 2000$ штр/мм, $N_{TBK} = 800$ штр/мм, $N_{TBM} = 1500$ ТВ линий, $N_{ok} = 500$ штр/мм, T_{ob} . (N) = 0,7, T_{TBK} .(N) = 0,5, T_{TBM} . (N) = 0,5, T_{ok} . (N) = 0,95, $k^2 = 2,2$, $A_{3p,max} = 24$ мм², $\theta_{\Gamma} = 0,2$ с, $\theta_{TB} = 0,1$ с, $\delta_{ob} = 0,02$, $\delta_{TBK} = 0,3$, $\delta_{TBM} = 0,3$, $\delta_{ok} = 0,05$, $\delta_{3,pabh} = 0,1$, $d_{BX,3p} = 67$ мм, $\alpha_{\Pi} = 10^4$ 1/км, $\rho_{ob} = 0,1$, $\rho_{\Phi} = 0,2$, $\tau_{ob} = 0,8$, $S_{ocb} = 30$ мА/Вт, $\gamma = 5^{\circ}$, $I_{max} = 10000$ Вт/Ср, P = 100 Вт, $\beta_{\Gamma} = 95^{\circ}$, $f(\omega)_{180} = 3$ (для длины волны 0,5 мкм), G = 0,5 м, $S_{oe} = 0,85$, $S_{\lambda max} = 50$ мА/Вт, $V(\lambda) = 0,3$, $\tau_{\Phi ocb..}(\lambda) = 0,95$, $\tau_{\Phi TB}.(\lambda) = 0,8$.

Результат расчета: дальность действия равна 250 м при погружении на 4000 м.

Технические возможности конкретных подводных ТВ камер

Примером конкретного применения подводных ТВ камер в аудио- и видео станции может служить их использование в водолазном видео комплексе ВТК-ОПТИМА компании ООО «АКВАИРИ ИНЖИНИРИНГ» (рисунок 1a) [3]. Видео комплекс предназначен для проведения осмотровых работ, контроля состояния подводных объектов, а также для проведения подводной видеосъёмки на глубинах до 100 м в условиях нормальной и пониженной прозрачности морской и пресной воды с передачей изображения по кабелю на поверхность и видео регистрации передаваемого изображения с возможностью записи всей информации на жесткий диск или USB носитель. В ВТК-ОПТИМА используется подводная ТВ камера и светодиодный (СД) подводный светильник серии LUXUS компании MacArmey (Дания). Конструкция ТВ камеры и светильника универсальна и позволяет устанавливать их как на водолазном шлеме и полно лицевой маске (AGA или BM-6), так и на специальной рукоятке в руке водолаза. ТВ камера – цветная, формата 1/3 дюйма с чувствительностью 0,1 лк, углом обзора в горизонтальной плоскости 120° (на воздухе) и 90° (в воде), напряжение питания =12 В, диапазон рабочих температур ТВ камеры и светильника (-15) – (+70)°С. СД светильник LUXUS имеет угол подсвета в горизонтальной плоскости 47° (на воздухе) и 35° (в воде), мощность 7,5 Вт, световой поток не менее 780 лм напряжение питания =24 – 48 В. Глубина погружения от 75 м до 200 м. Разрешение экрана жидкокристаллического (ЖК) ТВ монитора составляет 1366х768 пикселей при диагонали экрана 15, 6 дюймов. Оперативная память не менее 8 Гб. НБУ имеет габариты 465х345х175 мм, массу 60 кг, кабель длиной 75 м с ТВ камерой, светильником и вьюшкой имеет габариты 480х390х275 мм, массу 35 кг. Корпус – ударопрочный и влагозащищенный Pelican с классом защиты IP 65.







б)



Рисунок 1 – Водолазные видео комплексы: *a* – ВТК-ОПТИМА, *б* – Nord Sea V1000, *в* – ВТК-МАЦ, *г* – компактный цифровой Bowtech BP-CVIS, д – его надводная панель управления, *е* - «Глаз Посейдона»

Водолазный видео комплекс Nord Sea V 1000 (рисунок 16) [4] имеет глубину погружения до 400 м и может быть установлен на полно лицевую маску. ТВ камера имеет разрешение 550 ТВ линий, чувствительность 0,2 лк. СД светильник имеет

световой поток 1500 лм (аналог галогенной лампы с мощностью 75 Вт). Напряжение питания ~ 220 В 50 Гц или =12 В, время записи не менее 100 часов, предусмотрено копирование на внешний USB-Flash. Масса комплекса 9,5 кг.

Водолазный телевизионный комплекс ВТК – МАЦ (рисунок 1е) [5] включает в себя: подводную передающую телевизионную камеру цветного изображения со диафрагмой широкоугольным объективом снабженным авто И встроенным светильником, генератор видеотекста, TV-тюнер, DVD рекордер, четырех головочный видеомагнитофон, жидкокристаллический монитор 15", наземный блок питания, специальный кабель длинной 75м, вьюшку кабельную с вращающимся токопереходом. Цветная ТВ камера формата 1/3 дюйма имеет чувствительность (на матрице ПЗС): 0,3лк при относительном отверстии объектива 1:1,2; разрешение: 480 ТВ линий; управление диафрагмой: автоматическое; угол зрения объектива: 96°; напряжение =12В; потребляемая мощность: 3,5Вт; диаметр: 86мм; длина: 284мм; высота (с ручкой и светильником): 302мм; масса ТВ камеры (в корпусе с двумя рукоятками): 2,9кг. Светильник выполнен на основе кварцевой галогенной лампы КГМ 24-100 с мощностью 100 Вт при напряжении питания =24 В. Глубина погружения до 150 м.

Компактный цифровой водолазный видео комплекс Bowtech BP-CVIS (рисунки 1г, д) [6] предназначен для видео документирования обследовательских и подводнотехнических работ, выполняемых водолазами в условиях нормальной и пониженной прозрачности волы. Комплекс может использоваться при бездоковом освидетельствовании подводных частей корпусов судов, обследовании трубопроводов, подводной части гидротехнических сооружений и т.п. По типу исполнения видео комплекс предназначен для работы как в переносном (полевом) варианте, так и для стационарной установки в водолазном посту судна. Питание комплекса осуществляется от судовой сети питания переменного тока или внешней аккумуляторной батареи =12 или =24В. Надводный блок видео комплекса выполнен в водонепроницаемом контейнере типа «Пеликан». В крышку контейнера встроен высококонтрастный ЖК ТВ монитор 1с диагональю 3,3 дюйма с антибликовым покрытием. В контейнере расположены блок питания, аппаратура защиты и управления, панель управления и цифровой видеомагнитофон стандарта Digital Hi8 или MiniDV. Данный стандарт позволяет записывать и воспроизводить высококачественное цифровое изображение с большим разрешением без помех, в том числе и в режиме «стоп-кадра». Специальная функция цифрового масштабирования позволяет увеличивать выбранный фрагмент «стоп-кадра». Видеомагнитофон снабжен счетчиком времени с градацией 1/100 сек для покадрового просмотра отснятой информации, а также имеет встроенную систему наложения текстовой информации на экран с возможностью указания даты и времени. В панели управления предусмотрено наличие аудиовхода для наложения на видеозапись звуковых комментариев оператора, а при наличии станции связи с водолазом переговоров «водолаз-оператор», а также цифрового видеовыхода стандарта Firewire (IEEE1394) и аудиовыхода. Стандарт передачи данных Firewire позволяет переносить видеоизображение на персональный компьютер или ноутбук без потери качества, а специальное программное обеспечение, входящее в комплект поставки, позволяет производить монтаж отснятой видеоинформации с наложением звуковых и текстовых комментариев. Непосредственно к надводному блоку подключается кабель передачи данных и питания цифровой подводной видеокамеры и светильника. Для более удобного хранения и работы кабель может размещаться на ручной вьюшке с токопереходом. В зависимости от требований заказчика и условий прозрачности воды в качестве подводной видеокамеры может использоваться либо цветная цифровая ТВ камера с повышенной разрешающей способностью, либо цифровая черно-белая ТВ камера с повышенной светочувствительностью. Обе ТВ камеры являются взаимозаменяемыми по формату передачи данных, типу разъема подключения и параметрам питания. Освещение подводных объектов съемки производится с помощью подводного светильника с регулируемой мощностью работы. Регулятор мощности светильника расположен на панели управления НБУ, который имеет массу 10 кг, габариты 490х400х190 мм, напряжение питания ~ 220 В 50 Гц или =12 В при энергопотреблении 300 Вт, рабочую температуру (-10) – (+40)°С. ТВ камера и светильник могут устанавливаться как на шлеме водолаза, так и на специальной рукоятке для размещения в руке водолаза. Максимальная глубина погружения ТВ камер 4000 м. Цветная ТВ камера с повышенным разрешением имеет формат 1/3 дюйма, чувствительность 1 лк, разрешение 400 ТВ линий, углом обзора120° (на воздухе) и 90° (в воде), габариты Ø31x133 мм, масса 0,3 кг (в воздухе), 0,12 кг (в воде). Черно-белая ТВ камера с повышенным разрешением имеет формат 1/4 дюйма, чувствительность 0,5 лк, разрешение 380 TB линий, углом обзора 84° (на воздухе) и 60° (в воде), габариты Ø31x100 мм, масса 0,266 кг (в воздухе), 0,149 кг (в воде). Максимальная глубина погружения подводного светильника 1000 м, габариты Ø50х121 мм, масса 0,275 кг (в воздухе), 0,175 кг (в воде).

Водолазный телевизионный комплекс Глаз Посейдона (рисунок 1*e*) (РЕ) (привязная видеокамера со светом) [9] обеспечивает высококачественную видеосъемку для водолазов, работающих на глубине до 100 м в мутных и чистых водах, передачу изображения по кабелю с возможностью сохранения записи. Разрешение ТВ монитора

1280х720 пикселей, чувствительность ТВ камеры 0,1 лк. Есть возможность крепления ТВ на шлем ТВ камеры и двух СД светильников с мощностью 5 Вт.

Универсальная передающая ТВ цветная или черно-белая камера РПТК-Н компании Тетис-Про (рисунок 2*a*) [10] предназначена для подводной видеосъемки в составе ТВ системы на глубинах до 100 м в условиях нормальной и пониженной прозрачности морской/пресной воды с передачей изображения по кабелю на поверхность. В состав ТВ системы входит шлемовая передающая ТВ камера ШПТК, СД светильник подводный СП-11-СД с мощностью 15 Вт. ТВ камера ШПТК имеет формат 1/4 дюйма, угол обзора 78°, напряжение питания =12 В, энергопотребление 1,2 Вт, чувствительность 0,2 лк. В целом РПТК-Н имеет массу 1,0 кг (воздух), габариты 174х125х180 мм.



a)



Рисунок 2 – Универсальные передающие подводные ТВ камеры: *а* – цветная или чернобелая РПТК-Н, *б* – цветная РПТК-М

Универсальная передающая ТВ цветная камера РПТК-М той же компании (рисунок 26) [10] имеет формат 1/4 дюйма, угол обзора 78°, разрешение 480 ТВ линий, напряжение питания =12 В, энергопотребление 1,2 Вт, чувствительность 0,2 лк. ТВ камера РПТК-М имеет массу с боксом 0,6 кг (воздух).

Видео транслятор сигнала подводной ТВ камеры со светодиодным светильником (рисунок 3*a*) [7] Предназначен для осмотра подводных блоков и контроля выполнения подводных работ. Осуществляет передачу сигнала от подводной камеры на видео выход бортового блока с функцией регулировки яркости света. Глубина погружения 100 м, напряжение питания ~ 220 В 50 Гц или =12 В, габариты 244x120x100 мм, масса 2 кг (воздух), предусмотрено крепление на рукоятке и регулировка яркости светильника.



Рисунок 3 – Подводные устройства записи, видеотрансляции и отображения ТВ изображения: *a* – видео транслятор сигнала подводной ТВ камеры со СД светильником; *б* – ABP-1U модуль записи и отображения видео, аудио, телеметрии 1U; *в* – автономное видеозаписывающее устройство Tritech Sea Corder

АВР-1U Модуль записи и отображения видео-, аудио-, телеметрии 1U для монтажа в 19" стойку (рисунок 36) - универсальное средство для сбора данных подводных осмотров и инспекций, выполняемых как с помощью телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА), так и водолазами [8]. Предусмотрено простое управление записью и воспроизведением, копирование файлов на внешний USB диск, масса 5 кг, габариты 482х43х353 мм.

Автономное видеозаписывающее устройство Tritech Sea Corder (рисунок 3*в*) этой же компании предназначено для наблюдения за забрасыванием и выборкой глубоководных рыболовных сетей [10]. Встроенное записывающее устройство формата MP4 и 30 Гб жесткий диск позволяют хранить до 30 часов видеозаписи высокого качества. Батарейный блок обеспечивает до 6 часов непрерывной работы. На SeaCorder устанавливается TB камера Tritech MD4000, которая идеально подходит для съемок на близких дистанциях. TB камера формата 1/3 дюйма имеет разрешение 752х582 пикселя, разрешение по горизонтали 520 TB линий, отношение сигнал/шум \geq 50 дБ, чувствительность 0,1 лк. Встроенные СД светильники имеют световой поток \geq 120 лм. Видеозаписывающее устройство MPEG-4, 640х480 при 30 кадрах/сек в AVI формате имеет интерфейс USB 2.0, емкость жесткого диска 30 Гб, напряжение питания =16,8 В при токе потребления 8,2 A, 6 часов работы. Глубина погружения – 2000 м.

Интегрированные подводные ТВ камера/светильник для РТПА Tritech ManipCam 4000 (рисунок 4*a*, *б*) [10] предназначены для установки на подводные манипуляторы НПА рабочего класса. Цветная ТВ камера выполнена в одном корпусе со СД светильником. Имеется регулировка фокусировки и яркости. ТВ камера и СД

светильники имеют те же параметры, что и в системе Tritech Sea Corder, только напряжение питания равно +12 – 24 В, масса 0,675 кг (воздух), 0,29 кг (вода).



Рисунок 4 – Подводные ТВ камеры: *a* – интегрированная со СД светильником для РТПА Tritech Manip Cam 4000, *б* – манипулятор с этой камерой, *в* – видео измерительная Tritech Typhoon VMS, *e* – высокой чувствительности Tritech Tornado, *д* – цветная высокого разрешения Tritech Osprey, *e* – цветная Tritech Typhoon, *ж* – цветная Tritech Super Seaspy Подводная видео измерительная система Tritech Typhoon VMS (рисунок 4*в*) [10] позволяет измерять размеры отснятых объектов и расстояние до них при постобработке видеоматериалов. ТВ камера оборудована пятью лазерами, которые дают хорошо видимые метки. Съемка производится с помощью цветной ТВ камеры высокого разрешения с зумом. Специальная программа VMS позволяет пересчитывать размеры объектов на изображении. Зум и фокусировка могут управляться по аналоговому каналу или через RS232.Специально подобранные материал иллюминатора и его конструкция компенсируют искажения размеров и хроматическую аберрацию. ТВ камера формата ¹/₄ дюйма имеет разрешение 752х582 пикселя, разрешение по горизонтали \geq 470 ТВ линий, чувствительность 0,1 лк (при 0,5 с) и 0,2 лк (при 0,25 с). Лазеры класса 3 R излучают на длине волны 635 нм. Точность линейных измерений 1 мм. Напряжение питания =12 – 28 В, энергопотребление 10 Вт, масса 3,9 кг (воздух), 1,4 кг (вода, глубина погружения 3000 м.

Подводная ТВ камера высокой чувствительности Tritech Tornado (рисунок 4*г*) [10] служит для получения высококонтрастного изображения в условиях слабой освещенности и плохой видимости за счет использования новейшей ССD матрицы размером $\frac{1}{2}$ дюйма и специального акрилового иллюминатора, уменьшающего отражения. Разрешение ТВ камеры 810х508 пикселей, разрешение по горизонту 570 ТВ линий, отношение сигнал/шум \geq 50 дБ, чувствительность $3x10^{-4}$ лк, угол обзора 63,5°, напряжение питания =12 – 39 В, габариты Ø78x172 мм, масса 2,8 кг (воздух), 1,75 кг (вода), глубина погружения 4000 м.

Подводная цветная ТВ камера высокого разрешения «Tritech Osprey» (рисунок 4*d*) [10] имеет формат 1/3 дюйма, горизонтальное разрешение 560 ТВ линий, чувствительность 1 лк, угол обзора 65°, напряжение питания =12 – 39 В, габариты Ø39,5x120,3 мм, масса 0,6 кг (воздух), 0,5 кг (вода), глубина погружения 4000 или 6000 м.

Цветная подводная ТВ камера с зумом «Tritech Typhoon» (рисунок 4*e*) [10] также имеет специальный акриловый плоско-вогнутый иллюминатор, систему зуммирования с отношением 22:1, формат ¼ дюйма, разрешение ≥ 470 ТВ линий, отношение сигнал/шум ≥ 50 дБ, чувствительность 0,1 лк, остальные параметры – как у ТВ камеры «Tritech Super Seaspy».

Цветная подводная ТВ камера «Tritech Super Seaspy» (рисунок 4*ж*) [10] имеет встроенный СД светильник, автоматическую регулировку яркости, специальный акриловый плоско-вогнутый иллюминатор уменьшает отражение и устраняет хроматическую аберрацию. Формат 1/3 дюйма, разрешение ≥ 500 ТВ линий, отношение сигнал/шум ≥ 50 дБ, длина передачи изображения по кабелю до 1500 м, светильник имеет кольцо из 12 СД (сила света 20,4 кд), энергопотребление 4,8 Вт, масса 0,65 кг (воздух), 0,45 кг (вода), глубина погружения 4000 м.

Основные параметры других подводных ТВ камер представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры АИ ТВ системы LYNX LSV-W

Разрешение		450 TB линий в воздухе					
Дальность видения в (E=0,04 м ⁻¹)	чистой воде	до 150 м					
Угол обзора		60° (F=14/2.3), 15° (F=37/1.1)					
Блок:	Камера	Монитор	Лазер				
Размеры, мм	170x160x105	310x215x215	380x90x275				
Вес, кг	3	7.5	12				
Питание	12 В (от монитора)	220 В, 50 Гц	220 В, 50 Гц				
Потребляемая мощность, Вт	-	50	300				

Подводный лазерный генератор линии «Tritech SeaStripe» (рисунки 5*a*, *б*) [10] предназначен для создания тонкой высококонтрастной линии, которая хорошо видна на экране монитора и четко показывает профиль видимого объекта. Лазер класса 3 R излучает на длине волны 635 нм при угле подсвета 64°, напряжение питания =11 – 26 В, габариты Ø76х292 мм, масса 1,7 кг (воздух), 0,9 кг (вода).



a)



б)

Рисунок 5 – Подводный лазерный генератор линии Tritech Sea Stripe: *a* – сам генератор, б – нанесенная им линия

Активно-импульсная (АИ) лазерная ТВ система подводного видения LYNX LSV-W (рисунок 6) [11] используется в качестве системы наблюдения на исследовательских подводных аппаратах, применяется для разведки полезных ископаемых, инспекции подводных трубопроводов, кабелей, скважин, поиска

затонувших объектов, рыболовных сетей, контроля за поголовьем рыбы и других морских обитателей. Электронно-оптический блок и лазер подсветки устанавливаются на подводной части судна. ТВ монитор и НБУ могут быть смонтированы на надводной части или на судне. Система обеспечивает наблюдение в мутной воде и допускает увеличение дальности видения до 6 раз по сравнению с обычными подводными ТВ камерами. Основные параметры ТВ системы приведены в таблице 2.



Рисунок 6 – АИ ТВ лазерная система подводного видения LSV-W

Рассмотрим теперь подводные светильники для ТВ камер (рисунки 7 – 9) [10, 12 - 20]. Основные параметры типичных подводных светильников приведены в таблице 3. Светильники подводные кабельные серии СП (рисунок 7) предназначены для использования в качестве источника света при проведении подводно-технических работ в условиях постоянного и переменного смачивания. Особенности светильников: возможность использования светильников в качестве двухсредных: возможность перевода светильников из воздуха в воду и обратно во включенном и разогретом состоянии; возможность использования в составе водолазных беседок и водолазных колоколов) в качестве стационарных и передвижных источников света в зоне проведения работ; конструкция и материал корпуса светильников – АМГ-6 с двойной антикоррозионной защитой или нержавеющая сталь, обеспечивают высокую механическую прочность и коррозионную стойкость корпуса; световой поток сфокусирован в угле 30° с равномерной боковой засветкой в угле до 90° ; ремонтопригодность в полевых условиях без использования специального инструмента.

№ п/п	Модель/ цвет изображе- ния	Н, м	Формат ТВ камеры, дюймы	N ТВ камеры, число пикселей /ТВЛ	Чувствительность ТВ камеры, лк	Диагональ ТВ монитора, дюймы/ N, пиксели	2ω, град	U, B	Р, Вт	Масса, кг	Габариты, мм	Тип подводного светильника	Примечания
1	ВТК- ОПТИМА/ ч-б	100	1/3		0,1	15,6/1366x7 68	120, воздух 90, вода	=12, ~ 220		10		LUXUS 7,5	Класс защиты IP65
2	БВТЦ/ц	100	1/3	720x576/ 600	0,1	17/1024x 768		=12, ~ 220	6	9,5	Ø35x177	СД ВСИ-100	$\Delta t_p = (-10) - (+40)^{\circ}C$
3	БВТБ-НD/ц	100	1/3	1920x 1080/ 1100	1,0	17/1024x 768		=12, ~ 220	19	0,8, воздух	Ø88x230	СД ВСИ- 100, ГС- 100	$\Delta t_p = (-10) - (+40)^{\circ}C$
4	БВТБ-М/ц	100	1/3	-/600	0,1	19/1280x 1024		=12		0,25, воздух	Ø37x134	СДВС-3, ГС-100	
5	БВТБ/ц	100	1/3	729x526/ -	0,1	17/1024x 768		=12, ~ 220	60			СДВС4- 100	
6	БЦР- ОСМОТР/ц	100	1/3	-/600		19/1280x 1024		=12 - 25	50	0,25, воздух	Ø35x180		$\Delta t_p = (-10) - (+40)^{\circ}C$

Таблица 2 – Основные параметры телевизионных (ТВ) камер для глубоководных аппаратов и водолазных комплексов

№ п/п	Модель/ цвет изображе- ния	Н, м	Формат ТВ камеры, дюймы	N ТВ камеры, число пикселей /ТВЛ	Чувствительность ТВ камеры, лк	Диагональ ТВ монитора, дюймы/ N, пиксели	2ω, град	U, B	Р, Вт	Масса, кг	Габариты, мм	Тип подводного светильника	Примечания
7	Tritech Seaspy/ц	4000	1/3	-/500	0,1			=4,8		0,65, воздух, 0,45, вода	Ø53x82		С/ш > 50 дБ
8	Tetis Pro с повышен- ной N/ц	4000	1/3	-/480	1,0		82, воздух, 65, вода			0,3, воздух, 0,12, вода	Ø31x153		
9	Tetis Pro c повышен- ной N/ч-б	4000	1/4	-/380	0,5		84, воздух, 60, вода			0,266, воздух, 0,149, вода	Ø31x100		
10	Paralenz Vagnita/ц	350	1/1,8	12 Мп/-		0,95 (OLED дисплей)/1 80x120	120			0,24, воздух, 0,1, вода	128x40x 43		

Примечания: H – глубина погружения, N – разрешающая способность, с/ш – отношение сигнал/шум, 2ω – угол обзора, U – напряжение питания, P – мощность, Δt_p – диапазон рабочих температур.

№ п/п	Модель/тип	Н, м	Ф _{св} ,	2ω, град	U, B	Р, Вт	Масса, кг	Габариты,	Режимы	Время работы	Примечания
1	СП-9/СД	1000	51191	30	=24/36, ~ 220	100	0,4, воздух, 0,15, вода	Ø100x170		риссты	$\Delta t_p = (-40) - (+50)^{\circ}C$
2	СП-5-С9/СД	1000	1000	60	=24/36, ~ 220	30	0,4, воздух, 0,15, вода	Ø100x170			$\Delta t_p = (-40) - (+50)^{\circ}C$
3	ПП2СД/СД	1000	5000	60	=24/36, ~ 220	100	2,4	Ø100x170			$\Delta t_p = (-40) - (+50)^{\circ}C$
4	СП-11-СД/СД	4000	500	60	=12	15	0,32	Ø50x185	5%, 30%, 100% мощности, проблеско- вый фонарь, SOS	100% - 4 ч, 5% - 24 ч	
5	LUXUS 7,5/СД	199	780	47, воздух; 35, вода							Память 3 Гб
6	СДВС-3/СД	100	2400		=24	24	0,15, воздух	Ø36x110			
7	СДВС-4/СД	100	1000		=24	45	0,275, воздух; 0,175, вода	Ø50x121			

Таблица 3 – Основные параметры средств подводного освещения для подводных ТВ камер

N⁰	Модель/тип	Н, м	Ф _{св} ,	2ω, град	U, B	P,	Масса, кг	Габариты,	Режимы	Время	Примечания
п/п	излучателя		ЛМ	_		Вт		ММ	работы	работы	
8	СДВСИ-	100	2400		-24	25	0,15,	Ø36v110			
0	100/СД	100	2400		-24	23	воздух	Ø30X110			
	ГС-										
9	100/галогенна	100	1300		=12	50	0,5	Ø75x120			
	я лампа										
10	TECHNISUB	1000				20	1 /31	Ø110x215		6 и	
10	VEGA-2/СД	1000				20	1,451	01107213		04	
11	TECHNISUB	1000				50	2 530	Ø100x275		1 2 п	
11	VEGA-100/СД	1000				50	2,339	Ø100X275		1,2 4	
	SOLA							101,6x	2500 лм	50 мин	
12		100	2500	60 или 12			0,254	53,34x	1250 лм	100 мин	Класс защиты IP68
	12005/F/ СД							53,34	625 лм	200 мин	
	ARCHON										
12	Dive/ СД	100	(50)	c 110	2.6		0.20	50	Макс/мин/ст	70 мин/	
15	CREE XM-	100	050	0 - 110	=3,0		0,20	30X23X148	роб	8 ч/2,5ч	
	LU2										
	ARCHON										
14	Hunt 5000/ СД	100	5000	<i>(</i>)	26		1 00	079-0125	Макс/мин/ст	2 ч/ 4 ч/	
14	6X CREE XM-	100	5000	οU	=3,0		1,22	W/8X213,3	роб	13 ч	
	L2U2										

N⁰	Модель/тип	п.	Ф _{св} ,	2	UD	Р,	Maaaa	Габариты,	Режимы	Время	Π
п/п	излучателя	п, м	ЛМ	20, град	О, В	Вт	Macca, Kr	ММ	работы	работы	примечания
	ARCHON									70	
15	Zoomer 680/	100)		2.6		0.24	45	Макс/мин/	мин/320	
15	CД CREE	0	080	00	-3,0		0,24	438208129	строб	мин/150	
	XM-L-U2									МИН	
	Light and									90	
	Motion Go Be							124 5x	Макс/средн/	мин/120	Герметизация по
16	S 500 Spot EC/	500	1120	20	=3,6	10	0,172	127,5X 48 3x48 3		мин/720	станцарту ЕГ -1
								10,5710,5		мин/2100	Стандартут Е-т
	СД									МИН	
										90	
	Light and Motion Go Be	120 00) 12	=3,6	10	0,178	134x48x 48	Макс/средн/ мин /эконом/SOS	мин/180	
17			000							мин/720	
1/	800/ CД Spot	120	800							мин/1440	
	FS									мин/2160	
										МИН	
										70	
	Light and					10			Marc/cpauu/	мин/180	
10	Motion Go Be	120	1000	0 80 или 12	=3,6		0.25	125x48x	маке/ередн/	мин/720	Герметизация по
10	2500/ СД	120	20 1000				0,25	48		мин/144	стандарту FL-1
	CREE								/ JKUHUM/ SUS	мин/2160	
										МИН	

N⁰	Модель/тип	Нм	Ф _{св} ,	20 град	UВ	P,	Масса кт	Габариты,	Режимы	Время	Примечания	
п/п	излучателя	11, M	ЛМ	2, ipud 0, D		Вт	Wideed, Ki	ММ	работы	работы	применания	
19	Light and Motion Go Be 1000 Wide/ СД CREE	90	2500	60 – 2500 лм/1250 лм/625 лм, 12 – 1200 лм/600 лм,300 лм	=3,6	10	0,265	Ø56x104	Макс/средн/ мин	50 мин/100 мин/200 мин	Герметизация по стандарту FL-1	
20	Geneinno T1- Pro/полупро- водниковый лазер	175		Фокусировка в точку Ø10 мм на расстоянии 10 м	=6	0,75	0,72	160x105x7 2			Δt _p = (-2) – (+36)°С, длина волны 510 – 530 нм, рабочая частота 667 Гц (низкая), 3 МГц (высокая)	
21	LED chasing M2/ СД CREE 10 BL LED	100	12000	110	=16,8 – 25,2		0,776	Ø70,2x 64,8			$\Delta t_{p} = (-10) - (+45)^{\circ}C, T_{IIB}$ $= 5000 - 5500 \text{ K}$	

Примечания: H – глубина погружения, Φ_{св}, - световой поток, 2ω – угол подсвета, U – напряжение питания, P – мощность, Δt_p – диапазон рабочих температур.



Рисунок 7 – Подводные СД светильники серии СП: *а* – СП-5М, *б* – СП-5-СД, *в* – СП-9, *г* - СП-11-СД, *д* – кабельные нашлемные



д)

0

Рисунок 8 – Подводные СД светильники разные: *a* - Tritech LED Lite, *б* – распределение яркости в этом светильнике, *в* - VEGA, *г* – LIC 343, *д* – универсальный «Сарган Комби»



Рисунок 9 – Подводные СД прожекторы: а – ПП-2, б – ПП-2-СД

Светильник идеально подходит для подводной видеосъемки. Например, подводный СД светильник Tritech LED Lite (рисунок 8a) создан специально для подводных видеокамер Tritech. Он выполнен в высокопрочном стальном корпусе и имеет возможность регулировки яркости. На рисунке 86 представлено характерное распределение яркости в излучении подводного светильника Tritech LED Lite. Светильники серии Tritech LED Lite могут крепиться к любым типам водолазных шлемов, полно лицевым маскам, а также использоваться с рукоятками или объединяться в прожекторы. Питание светильников производится с поверхности по кабелю от судовой сети напряжением 24 В/36 В от сети переменного тока ~220 В с использованием трансформаторных блоков ~220/24 В (~220/36 В) сети БПТ, рассчитанных на подключение одновременно одного, двух или четырех светильников. Подводный СД фонарь Vega (рисунок 86) может легко удерживаться в руке, крепиться на маске или подвешиваться к поясу. Подводный аккумуляторный фонарь LIC 343 (рис.8г) легко удерживается в руке, обладая повышенной мощностью излучения. Подводный универсальный фонарь «Сарган-Комби» (рисунок 8*д*) [10] предназначен для освещения рабочего места водолаза на поверхности и под водой при проведении работ в пресной и морской воде. Это - комбинированное устройство, которое может работать и как подводный фонарь, и как светильник. Аккумуляторный блок представляет собой энергоблок «Сарган-Э» мощностью 50 Вт.час. На энергоблок устанавливается светильник СП-5 «Комби», представляющий собой модификацию светильника СП-5м с узлом крепления непосредственно к энергоблоку. Кроме того, в комплект входит отдельный светильник СП-5м с кабелем для подключения к герметизированному разъёму энергоблока после демонтаже СП-5 «Комби». Включение фонаря и регулировка интенсивности свечения производится с помощью регулятора на задней торцевой крышке энергоблока. Принципиально новый механизм

включения/выключения и регулировки мощности работы светильников с применением магнитной схемы управления обеспечивает плавную регулировку и большее время жизни лампы светильника. Энергоблок защищен от возможного повреждения при коротком замыкании с помощью встроенных предохранителей многоразового действия. Зарядка энергоблока производится через разъём подключения светильников. Корпус фонаря изготовлен из коррозионностойкого алюминиевого сплава с двойной антикоррозионной защитой. Это обеспечивает сохранение работоспособности в самых тяжелых условиях эксплуатации. Представляет интерес также подводный СД аккумуляторный фонарь LIC 343 (рисунок 8г) для камер масок [10]. Источником света в нем является СД с мощностью 5,5 Вт и световым потоком 600 лм. Угол подсвета -60°, цветовая температура 6000 – 7000 К, глубина погружения 120 м, масса 0,191 кг, габариты Ø37,4x126 мм, время свечения 3 часа. На рисунке 9 представлены подводные СД прожекторы: $a - \Pi\Pi$ -2, $\delta - \Pi\Pi$ -2-СД. Прожектор серии ПП-2 (рисунок 9*a*) состоит из четырех светильников СП-5-СД со светодиодным модулем, смонтированных на кронштейне с рукояткой. Аналогичное конструктивное исполнение имеет СД прожектор ПП-2-СД (рисунок 9б). На рисунке 10 представлены в действии подводные аппараты и водолазные комплексы с ТВ камерой и со СД светильниками.

Перспективы развития подводных ТВ камер

Перспективы дальнейшего развития ТВ камер для подводных аппаратов и водолазных комплексов связаны с повышением чувствительности ТВ камер с 0,1 - 0,2 лк до 10^{-3} лк, Например, использование ТВ камер на основе ПЗС матриц с электронным умножением [2]. Перспективы развития ТВ камер связаны также с обеспечением активно-импульсного режима их работы, замены ламповых светильников на СД светильники. Повышение эффективности работы ТВ камер может быть достигнуто за счет их объединения с каналом гидролокатора и каналом подводного лидара. Это позволит повысить дальность действия ТВ камер и расширить их возможности поиска. Для обеспечения работы как под водой, так и на суше подводная ТВ камера может быть объединена с тепловизионным каналом [2]. Следующим шагом будет создание полностью роботизированного комплекса подводного и надводного наблюдения с автоматизированным поиском, обнаружением и распознаванием как подводных, так и наземных объектов.





б)

a)







д)

Рисунок 10 – Подводные аппараты и водолазные комплексы с ТВ камерой и со СД светильниками в действии: *a* – робот глубоководный робот, *б* – ROV, *в* – Howard Michelle Hall, *г* – Sea Wasp, *д* – робот Батискаф

Выводы

1. Описан метод расчета дальности действия ТВ системы для подводной аппаратуры и водолазных комплексов»;

2. Существует достаточно широкая номенклатура подводных ТВ камер и подводных светильников для решения многообразных задач, возникающих при подводных работах и видеосъемке.

3. Подводные ТВ камеры и светильники могут крепиться на водолазных шлемах, полно лицевых масках, на разнообразных кронштейнах, а также удерживаться в руке.

4. Существуют устройства, используемые для высокоточных подводных измерений.

5. Глубина погружения может составлять от 100 м до 6000 м.

6. Надежное электрическое питание и антикоррозионный высокопрочный корпус позволяют эксплуатировать все эти изделия в самых жестких подводных условиях.

Литература

1. Применение телевидения под водой. Радиотехника и электроника. [Электронный pecypc] URL: http://www.radteh.ru (дата обращения 01.03.2024).

2. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность, М.: Новости, 2009, 840 с.

3. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: Техносфера, 2014, 840 с.

4. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Достижения в технике видения. М.: Техносфера, 2019, т.1, 580 с.

5. Компактный водолазный видеокомплекс ВТК-ОПТИМА компании «АКВАИРИ ИНИЖИНИРИНГ». [Электронный ресурс] URL: http://www.aquary.ru (дата обращения 01.03.2024).

6. Водолазные видео комплексы в Санкт-Петербурге. [Электронный ресурс] URL: http://prodvingshop.com (дата обращения 01.03.2024).

7. Водолазный телевизионный комплекс ВТК – МАЦ. [Электронный ресурс] URL: http://www.korabel.ru (дата обращения 01.03.2024).

8. Компактный цифровой водолазный видео комплекс Bowtech BP-CVIS. [Электронный ресурс] URL: http://www.korabel.ru (дата обращения 01.03.2024).

9. Видео транслятор сигнала подводной ТВ камеры со светодиодным светильником. [Электронный ресурс] URL: http://www.mpkit.ru (дата обращения 01.03.2024).

10. ABP-1U Модуль записи и отображения видео-, аудио-, телеметрии 1U для монтажа в 19" стойку. [Электронный ресурс] URL: http://www.mpkit.ru (дата обращения 01.03.2024).

11. Водолазный телевизионный комплекс Глаз Посейдона (РЕ) (привязная видеокамера со светом). [Электронный ресурс] URL: http://www.rovbuilder.com (дата обращения 01.03.2024).

12. Телевизионные системы, профессиональное водолазное снаряжение и подводное оборудование компании Tetis-Pro. [Электронный ресурс] URL: http://www.tetis-pro.ru (дата обращения 01.03.2024).

Активно-импульсная лазерная ТВ система подводного видения LSV-W.
Проспект фирмы Турн, РФ, М., 2023.

14. Глубоководные комплексы. [Электронный ресурс] URL: http://www. Hydrasonars.ru (дата обращения 01.03.2024).

15. Телеуправляемые аппараты для подводно-технических работ. [Электронный pecypc] URL: http://magazine.neftegaz.ru (дата обращения 01.03.2024).

16. Основные элементы и системы подводных обитаемых аппаратов. [Электронный pecypc] URL: http://subboat.ru (дата обращения 01.03.2024).

17. Водолазный телевизионный комплекс унифицированный ВТК-У. [Электронный ресурс] URL: http://www.korabel.ru (дата обращения 01.03.2024).

18. Глубоководный водолазный комплекс ГВК-450. [Электронный ресурс] URL: http://topwar.ru (дата обращения 01.03.2024).

19. Средства подводного освещения. Кабельные светильники и прожекторы. [Электронный pecypc] URL: http://www. aquary.ru (дата обращения 01.03.2024).

20. Средства подводного освещения. [Электронный ресурс] URL: http://www. www.sinref.ru (дата обращения 01.03.2024).

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СВЕТОВОЗВРАЩЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Башкатов Г.В., Животовский И.В.

МГТУ им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005 E-mail: bashkatov@bmstu.ru, ivj@bmstu.ru

Аннотация: В статье предлагается способ проведения комплексного анализа погрешностей устройства для измерения показателя световозвращения. Приведена количественная оценка погрешностей косвенных измерений показателя световозвращения для двух вариантов эталонных световозвращателей. Предложен вариант реализации приемной части устройства в целях увеличения линейности показаний приемника излучения при исследовании оптико-электронных приборов с различными показателям световозвращения.

Ключевые слова: погрешность измерения показателя световозвращения, показатель световозвращения, световозвращатель.

A METROLOGICAL CHARACTERISTICS ESTIMATION OF THE OPTOELECTRONIC DEVICES RETROREFLECTION INDEX METER

Bashkatov G.V., Zhivotovsky I.V.

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

E-mail: bashkatov@bmstu.ru, ivj@bmstu.ru

Abstract: In this paper, a comprehensive method of an estimation of the retroreflection index meter measurements errors is proposed. A quantitative evaluation of indirect measurements errors of retroreflection index for the retroreflectors of two different types is given. The article also proposes a design of the receiving channel in order to improve the linearity of the receiver for the measurements of the objects with different retroreflection indexes.

Keywords: error of the retroreflection index measurement, retroreflection index, retroreflector.

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023

Введение

В настоящий момент актуальна проблема разработки лазерных локационных систем для обнаружения световозвращающих объектов для задач построения дальностных портретов и открытых оптических систем связи. В случае создания дальностных портретов сильно удаленных объектов необходима дополнительная информация для наведения на объект. Аналогичная информация требуется и в случае большого расстояния между адресатом и адресантом в системах открытой оптической связи. В связи с этим, разумно использовать световозвращатели (СВз), обеспечивающие высокие уровни световозвращенного излучения и позволяющие быстро обнаружить интересующий объект. При этом сам СВз должен обладать высоким показателем световозвращения (ПСВ), который представляет собой отношение силы световозвращенного излучения к освещенности, создаваемой зондирующим пучком лазерной локационной системы на входном зрачке СВз. Для измерения ПСВ в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработано устройство для измерения показателя световозвращения оптико-электронных приборов [1]. Методика измерения ПСВ на такой установке и порядок проведения вспомогательных расчетов описаны в работах [2, 3].

Так как данная установка используется в качестве измерительной, то возникает вопрос оценки погрешностей измерений, проводимых на ней. В диссертации [3] представлен анализ погрешностей определения ПСВ в исследуемой системе с использованием методики «виртуальных диафрагм». Аналогичный подход применяется в работе [5], где проведена оценка погрешностей для установки измерения ПСВ для оптико-электронных приборов (ОЭП), работающих в ИК-диапазоне. В настоящей работе данная методика не используется, вместо нее применяются физические диафрагмы.

В данной статье проведен комплексный анализ инструментальных погрешностей компонентов исследуемой установки, позволяющий оценить погрешность измерений ПСВ. Приведены расчет вносимых погрешностей и рекомендации по увеличению точности измерений.

Описание установки

Схема исследуемой установки представлена на рисунке 1. Излучение от источника 1 проходит через оптическую систему первого коллиматора из компонентов 2 и 3 и диафрагму 5, которая предназначена для ограничения диаметра пучка. Затем

излучение попадает на эталон 6 или 7. В качестве источника излучения обычно выступает лазер. Эталон 6 представляет собой выпуклую стеклянную сферическую поверхность от которой происходит отражение (на границе раздела воздуха и стекла), эталон 7 также является выпуклой стеклянной сферической поверхностью, но с зеркальным покрытием. Эти эталоны играют роль СВз с заранее известным ПСВ, что позволяет вычислить ПСВ контролируемого ОЭП 19 методом сравнения. Отраженное от эталона излучение после следующих отражений от светоделительной пластины 4 и зеркала 8 попадает в объектив второго коллиматора 10. В фокальной плоскости объектива коллиматора расположена диафрагма 10, определяющая угол усреднения для которого измеряется ПСВ. Светоделительный кубик 12 отводит часть излучения в конденсор 15, который собирает лучи на фотоприемном устройстве 16 (далее – ФПУ). Сигнал с ФПУ снимается вольтметром 17 и значение напряжения с вольтметра передается на устройство обработки 18. Прошедшее через светоделительный кубик излучение попадает на проекционную систему 13, собирающую лучи на камере 14, которая предназначена для визуализации пространственного распределения энергии. Сигнал с камеры также поступает на устройство обработки. В том случае, если падающий на ФПУ поток превышает допустимые значения, то его можно ослабить вводя фильтр 9.



Рисунок 1 – Функциональная схема установки для измерения ПСВ (адаптировано из [2])

Расчет показателя световозвращения ОЭП

В рассматриваемой установке измерение ПСВ интересующего ОЭП проводятся путем сравнения напряжений, снимаемых с ФПУ вольтметром, которые создаются световозвращенным от ОЭП и эталона излучением. ПСВ ОЭП тогда вычисляется по следующей формуле [3,4]:

$$\mathbf{R}^{\mathbf{O}\mathbf{\Im}\mathbf{\Pi}} = \mathbf{R}^{\mathbf{\Im}\mathbf{T}} \cdot \frac{\mathbf{U}^{\mathbf{O}\mathbf{\Im}\mathbf{\Pi}}}{\mathbf{U}^{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}},\tag{1}$$

где $R^{\Im T}$ – ПСВ эталона, $U^{O\Im \Pi}$ – напряжение, снимаемое с вольтметра, при измерении ПСВ объекта, $U^{\Im T}$ – напряжение, снимаемое с вольтметра, при измерении ПСВ эталона.

ПСВ эталона в виде сферической поверхности вычисляется по следующей формуле [2,6]:

$$R^{\Im T} = \frac{\rho \cdot r^2}{4}, \qquad (2)$$

где r – радиус эталона, р – коэффициент отражения эталона.

У рассматриваемых эталонов отличается коэффициент отражения.

В случае эталона 6 коэффициент можно определить из формул Френеля. Если принять, что излучение, падающее на эталон, монохроматично и не поляризовано, тогда коэффициент отражения можно вычислить из:

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\rho_{\parallel} + \rho_{\perp} \right) = \frac{1}{2} \left(r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2 \right) = \frac{1}{2} \left(\left[\frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 + \left[\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 \right), \quad (3)$$

где $\rho_{\parallel}, \rho_{\perp}$ – энергетические коэффициенты отражения для лучей, поляризованных параллельно и перпендикулярно плоскости падения, соответственно; r_{\parallel}, r_{\perp} – энергетические коэффициенты отражения для лучей, поляризованных параллельно и перпендикулярно плоскости падения, соответственно; θ_1 – угол падения; θ_2 – угол отражения; n – показатель преломления.

В случае эталона 7 необходимо проводить измерение коэффициента отражения по схеме, представленной на рисунке 2. Первым этапом измерения является измерение мощности источника излучения P_{ии} с использованием измерителя мощности оптического излучения. Второй этап проводится с использованием эталона. В этом случае при помощи измерителя мощности оценивается отраженный от эталона поток излучения P_{пи}.

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023



Рисунок 2 – Схема измерения коэффициента отражения. Э - эталон, ИИ - источник излучения, ИМ – измеритель мощности

Тогда коэффициент отражения можно найти по следующей формуле:

$$\rho = \frac{P_{\mu\mu}}{P_{\mu\mu}} \,. \tag{4}$$

Анализ погрешности измерения показателя световозвращения ОЭП

Согласно выражению (1) измерения ПСВ ОЭП являются косвенными, поэтому их погрешность можно вычислить по формуле [7]:

$$\Delta f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \cdot \Delta \mathbf{x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \cdot \Delta \mathbf{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{z}} \cdot \Delta \mathbf{z}\right)^2} . \tag{5}$$

Здесь и далее знаком Δg обозначается соответствующая погрешность произвольной переменной g.

Тогда применяя (5) для выражения (1) получим выражение для СКО:

$$\Delta \mathbf{R}^{O \ni \Pi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathbf{R}^{O \ni \Pi}}{\partial \mathbf{U}^{O \ni \Pi}} \cdot \Delta \mathbf{U}^{O \ni \Pi}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{R}^{O \ni \Pi}}{\partial \mathbf{U}^{\ni T}} \cdot \Delta \mathbf{U}^{\ni T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{R}^{O \ni \Pi}}{\partial \mathbf{R}^{\ni T}} \cdot \Delta \mathbf{R}^{\ni T}\right)^2 . \tag{6}$$

Расчет погрешности показателя световозвращения $\Delta R^{\Im T}$ эталона

Для эталона 6 (см. рисунок 1) со сферической отражающей поверхностью на основе Френелевского отражения $\Delta R^{\Im T}$ можно найти при помощи выражений (2), (5):

$$\Delta \mathbf{R}^{\mathbf{\Im}\mathbf{T}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathbf{R}^{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{R}^{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}}{\partial \mathbf{r}} \cdot \Delta \mathbf{r}\right)^2} \,. \tag{7}$$

Δр можно найти из (3), (5):

$$\Delta \rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial n} \cdot \Delta n\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta\right)^2} . \tag{8}$$

Погрешность угла падения Δθ можно найти из геометрического построения (рисунок 3). Тогда Δθ вычисляется по формуле:

$$\theta = \Delta \theta = \operatorname{atan}\left(\frac{\mathrm{D}}{2 \cdot \left(\mathrm{r} - |\Delta \mathbf{r}|\right)}\right),\tag{9}$$

где D – диаметр апертуры эталона, r – радиус кривизны сферической поверхности эталона, Δr – погрешность изготовления радиуса кривизны сферической поверхности эталона.



Рисунок 3 – Пояснительные геометрические построения к расчету $\Delta \theta$

Для эталона 7 (см. рисунок 1) со сферической отражающей поверхностью на основе зеркального отражения $\Delta R^{\Im T}$ выражение (7) остается справедливым, а (8) с учетом (4) и (5) меняется на:

$$\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial P_{\text{им}}} \cdot \Delta P_{\text{им}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial P_{\text{пи}}} \cdot \Delta P_{\text{пи}}\right)^2}$$

Погрешность определения мощности ΔP_{ии}, ΔP_{пи} складывается из двух составляющих: нестабильности мощности лазера ΔP_л и погрешности измерения измерителем мощности ΔP_и, тогда суммарная погрешность:

$$\Delta P_{\mu\mu} = \Delta P_{\mu\mu} = \sqrt{\Delta P_{\mu}^2 + \Delta P_{\mu}^2}$$

Расчет погрешности измерения напряжения $\Delta U^{O \supset \Pi}$, $\Delta U^{\supset T}$

ФПУ генерирует ток при падении на фоточувствительную площадку излучения. Величина тока связана с падающей мощностью следующим выражением:

$$\mathbf{I}(\lambda_0) = \mathbf{R}_{\mathbf{c}}(\lambda_0) \cdot \Phi(\lambda_0), \qquad (10)$$

где $R_c(\lambda_0)$ – спектральная чувствительность на длине волны λ_0 , $\Phi(\lambda_0)$ – энергетический поток на длине волны λ_0 .

Обычно в качестве источника излучения выступает лазер. В силу малости ширины полосы излучения лазера $\Delta\lambda$ можно считать, что $R_c(\lambda_0) = R_c\left(\lambda_0 \pm \frac{\Delta\lambda}{2}\right)$. Однако в случае использования светодиода в качестве источника излучения такое упрощение может вносить дополнительные ошибки.

Выбор оптимального подхода к съему напряжения с фотодиода, используемого в качестве ФПУ, значительно зависит от линейности выходной характеристики. Если напрямую снимать ток с фотодиода, то, хоть ватт-амперная характеристика и является практически линейной [8], но вольт-амперная является в значительной степени нелинейной характеристикой и это необходимо учитывать как дополнительный источник погрешностей. Другим подходом является использование трансимпедансного усилителя, который преобразует ток, снимаемый с фотодиода, в напряжение, сохраняя линейность ватт-амперной характеристики диода. Также могут быть применены схемы на основе токового зеркала [9]. Типовая нелинейность ватт-амперной характерстики диода $\Delta I_{\rm H} = 0.5-2\%$ [9, 10].

Преобразование тока в напряжение рассчитывается по формуле:

$$U=Gain \cdot I, \tag{11}$$

где Gain – величина усиления трансимпедансного усилителя [B/A].

Тогда можно найти погрешность измерения напряжения фотоприемным устройством согласно (5) и (11):

$$\Delta U_{\Phi\Pi Y} = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial Gain} \cdot \Delta Gain\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial I} \cdot \Delta I\right)^2} .$$
(12)

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023

Погрешность значения тока складывается из нелинейности ватт-амперной характеристики ΔI_н и ΔI_л, которую можно вычислить с учетом (10) и (5):

$$\Delta \mathbf{I}_{\Pi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial \mathbf{R}} \cdot \Delta \mathbf{R}_{c}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial \Phi} \cdot \Delta \Phi\right)^{2}} = \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial \Phi} \cdot \Delta \Phi = \mathbf{R}_{c}\left(\lambda\right) \cdot \Delta \Phi.$$
(13)

Суммарная погрешность значения тока тогда:

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{\rm H}^2 + \Delta I_{\rm J}^2} \,. \tag{14}$$

Проведем подстановку выражений (13), (14) в (12):

$$\Delta U_{\Phi\Pi Y} = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial Gain} \cdot \Delta Gain\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial I}\right)^2 \cdot \sqrt{\Delta I_H^2 + R_c(\lambda) \cdot \Delta \Phi}}.$$

Погрешность измерения напряжения складывается, помимо погрешности, создаваемой ΦПУ, также и погрешностью вольтметра ΔU_в, тогда:

$$\Delta U^{O \ni \Pi} = \Delta U^{\ni T} = \Delta U = \sqrt{\Delta U^2_{\Phi \Pi Y} + \Delta U^2_{B}}.$$

Пример расчета погрешности измерения показателя световозвращения ОЭП

Проведем расчет погрешности измерения ПСВ для конкретных выбранных компонентов измерительной системы.

Исходные параметры компонентов системы:

- 1. Рабочая длина волны: 800 нм
- 2. Мощность источника излучения: 200 мВт
- 3. Показатель преломления для стекла К8 на длине волны λ=800 нм: 1,5103443
- 4. Радиус кривизны сферических поверхностей эталонов 6 и 7: 20 м
- 5. Диаметр апертуры и измеряемого ОЭП: 0,1 м
- 6. Усиление ФПУ Gain: $1,51 \cdot 10^3$ B/A
- Чувствительность ФПУ на λ=800 нм: 0,7

Погрешности компонентов установки:

- 1. Нестабильность мощности лазера [11] ∆Р_л: 3%
- 2. Допустимое отклонение показателя преломления

(для стекла 2 категории) [12] ∆n: 3·10⁻⁴

- 3. Погрешность изготовления радиуса кривизны пробного стекла (для стекла 2 класса точности) [12] Δr: 10⁻⁵ м
- 4. Погрешность коэффициента усиления ФПУ [13] ΔGain: 2%
- 5. Нелинейность ватт-амперной характерстики ΦПУ ΔI_н: 1%

- 6. Шум ФПУ ΔU_ш: 258 мкВт
- 7. Погрешность измерителя мощности [14] ΔP_{μ} : 3%
- 8. Погрешность вольтметра $\Delta U_{\rm B}$ [15]:

$$0,02\% \cdot X + 0,5\%$$
,

где X={200 мB, 2 B, 20 B} – максимальное значение диапазона, в котором находится измеряемое значение.

Учет шума ФПУ

Преобразуем выражение (6) посчитав производные:

$$\Delta \mathbf{R}^{\mathbf{O}\mathbf{\Im}\mathbf{\Pi}} = \sqrt{\frac{\mathbf{U}_{\mathbf{O}\mathbf{\Im}\mathbf{\Pi}}^{2}}{\mathbf{U}_{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}^{2}}} \cdot \Delta \mathbf{R}_{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}^{2} + \frac{\mathbf{R}_{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}^{2}}{\mathbf{U}_{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}^{2}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{O}\mathbf{\Im}\mathbf{\Pi}}^{2} + \frac{\mathbf{R}_{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}^{2} \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{O}\mathbf{\Im}\mathbf{\Pi}}^{2}}{\mathbf{U}_{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}^{4}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{\Im}\mathbf{T}}^{2}$$
(15)

Видно, что выражение (15) зависит как от $U_{O \ni \Pi}$, так и от $U_{\ni T}$. Для того, чтобы провести учет шума ФПУ достаточно заменить $U_{O \ni \Pi}$ на $U_{O \ni \Pi} + \Delta U_{III}$, а $U_{\ni T}$ на $U_{\ni T} - \Delta U_{III}$. Но начиная с определенного значения величины напряжения, создаваемого световозвращенным излучением, шумом ФПУ можно пренебречь, в силу его малости. На рисунках 4-5 представлен графики зависимости погрешности измерения ПСВ от значения напряжения, создаваемого световозвращенным излучения, создаваемого световозвращенным излучением. Из графиков видно, что начиная со значения в 200 мВ в некоторых случаях (при измерениях ОЭП с большим ПСВ) можно пренебречь шумом ФПУ в расчетах (погрешность не более $2 \frac{M^2/cp}{cp}$).





Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023



Рисунок 5 – Влияние шума ФПУ на погрешность измерения ПСВ с эталоном 7

Результаты расчета

Для приведенных в предыдущем разделе исходных данных можно посчитать погрешность измерения ПСВ. Во время расчета мы предполагали, что излучение от обоих эталонов 6, 7 создают сигналы с напряжением в 0,08 В. Значение ПСВ для эталона 6 составляет 4,13 $M^2/_{cp}$, для эталона 7 - 100 $M^2/_{cp}$. В результате получены графики (рисунок 6) зависимости погрешности измерения ПСВ эталона $\Delta R_{OЭ\Pi}$ от значения ПСВ эталона $R_{OЭ\Pi}$ в диапазоне от 1 до 1000 $M^2/_{cp}$. Стоит отметить, что вид зависимости $\Delta R_{OЭ\Pi} (R_{OЭ\Pi})$ – практически линейный.

На рисунке 7 представлен график для относительной погрешности dR/R, на котором можно увидеть отклонение от линейного характера зависимости dR(R).


Рисунок 6 – График для погрешности dR и его аппроксимация линейной функцией: *a* – схема с эталоном 6, *б* – схема с эталоном 7



Рисунок 7 – График для погрешности dR/R от R

Отклонения от линейного характера в начале графика (величина ПСВ - $0-50 \text{ M}^2/\text{сp}$) вызваны шумом ФПУ и погрешностью вольтметра, так как световозвращенное излучение создает достаточно малый по амплитуде сигнал. На линейном участке погрешность составила 5,3% для схемы с эталоном 6 (работающим на основе Френелевского отражения) и 8,1% для схемы с эталоном 7 (работающим на основе зеркального отражения).

Заключение

В результате работы были найдены математические выражения, позволяющие описать погрешности установки измерения ПСВ описанной в [1]. Способ описания погрешностей можно применять и в других установках, предназначенных для измерения ПСВ. Описанный в работе подход к выбору ФПУ для обеспечения наименьшей погрешности измерений может найти свое применение и в любых других установках с измерением оптической мощности фотодиодным приемником.

Полученные погрешности измерения ПСВ в 5,3% и 8,1% для эталонов 6 и 7, соответственно хорошо согласуются с результатами расчетов, проведенных в [3,4].

Литература

1. Патент № 2202814 С1 Российская Федерация, МПК G02B 23/12. Устройство для измерения показателя световозвращения оптико-электронных приборов : № 2002113721/28 : заявл. 28.05.2002 : опубл. 20.04.2003 / Н. В. Барышников, В. Б. Бокшанский, М. В. Вязовых, И.В. Животовский, В.Е. Карасик, В.Б. Немтинов, Ю.В. Хомутский.

 Барышников Н. В., Бокшанский В. Б., Животовский И. В. Автоматизация измерений световозвращательных характеристик //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2004. – №. 2. – 9 с.

3. Животовский И.В. Разработка и исследование лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик оптико-электронных приборов: дис. канд. техн. наук наук: 05.11.07. - М., 2006. – 271 с.

4. Степанов Р.О. Разработка методов и аппаратуры для исследования световозвращательных характеристик оптико-электронных средств в ИК диапазоне: дис. канд. техн. наук наук: 05.11.07. - М., 2010. - 181 с.

5. Барышников Н. В., Степанов Р. О. Разработка метода и аппаратуры измерений световозвращательных характеристик оптико-электронных систем ИК-диапазона //Измерительная техника. – 2007. – №. 9. – 4 с.

6. Степанов Р. О., Лебедев В. А. Разработка методики измерения световозвращательных характеристик оптико-электронных систем в среднем и дальнем ИК диапазонах //Лазеры в науке, технике, медицине. – 2015. – С. 114-118.

Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий,
И.А. Зорграф. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

8. Jiang Z. Luminous Intensity Measurements for LED Traffic Signals and Signs. – 2004.

9. Steadman R. A high dynamic range, high linearity CMOS current-mode image sensor for computed tomography //Proceedings of the 31st ESSCC, 2005. IEEE, 2005. – C. 415-418.

10. Newport Power Meters and Detectors. Selection Guide.

11. Паспорт на лазер MDL-III-800R.

12. Паспорт на фотоприемное устройство PDA36A2.

13. Быков Б. З., Перов В. А. Оформление рабочих чертежей оптических деталей и выбор допусков на их характеристики //Часть 1. – 2007. – 64 с.

14. Паспорт на измеритель мощности 30(150)А-ВВ-18.

15. Паспорт на цифровой мультиметр Rigol DM3058.

МЕТОД МОНИТОРИНГА НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

Н.В. Барышников, Нгуен Минь Бач, П.С. Давыдкина, М.Л. Белов

Аннотация: В статье проведено исследование возможностей метода мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности в ближнем ИК диапазоне около длины волны 1,73 мкм при разных вариантах значений центральных длин волн и ширине спектральных каналов регистрации. Приведены результаты статистического моделирования эффективности метода обнаружения разливов нефтепродуктов в условиях шумов регистрирующей аппаратуры. При статистическом моделировании были использованы экспериментально измеренные спектры отражения поверхностей, загрязненных разными типами нефтепродуктов, и спектры отражения незагрязненных нефтепродуктами земных поверхностей, на фоне которых проводится обнаружение разливов нефтепродуктов. Показано, что приемлемую эффективность обнаружения нефтяных загрязнений обеспечивает вариант значений длин волн регистрации 1,699 мкм, 1,730 мкм, 1,749 мкм при спектральном разрешении аппаратуры порядка или меньше 10 нм. Для этого варианта значений длин волн при СКО шума 3% можно обеспечить вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности порядка 84% при вероятности ложных тревог порядка 13%.

Ключевые слова: оптический метод, мониторинг нефтяных загрязнений, ближний ИК диапазон.

METHOD OF MONITORING THE OIL CONTAMINATION ON THE EARTH'S SURFACE IN THE NEAR IR RANGE

N.V. Baryshnikov, Bach Nguyen Minh, P.S. Davydkina, M.L. Belov

Abstract: The article conducts a study of possibilities of the method of monitoring of oil contamination on the earth's surface in the near-infrared range about the wavelength of 1.73 μ m under different variants of values of central wavelengths and width of spectral recording channels. The results of statistical modelling of the efficiency of the method for detecting oil product spills under noise conditions of recording equipment are presented. In statistical model-ling, experimentally measured spectra of reflection of earth's surfaces contaminated by

different types of petroleum products and spectra of reflection of not contaminated earth's surfaces were used. It is shown that the acceptable efficiency of detection of oil pollutants provides a variant of the wavelengths of recording 1.699 μ m, 1.730 μ m, 1.749 μ m at spectral resolution of equipment of order or less than 10 nm. For this variant of wavelengths and 3% noise standard deviation the probability of correctly detecting of oil contamination on the earth's surface is about 84% at a probability of false alarms of about 13%.

Keywords: optical method, oil pollution monitoring, near infrared range.

Введение

В настоящее время нефть и нефтепродукты продолжают оставаться наиболее распространёнными загрязняющими веществами в окружающей среде (см., например, [1-7]).

Наибольшие потери нефти связаны с её транспортировкой из районов добычи. При этом, наиболее распространенным является трубопроводный транспорт. Существующие системы мониторинга на трубопроводах (см., например, [8]) имеют чувствительность от единиц до сотых долей процента от расхода нефтепровода и утечки меньшей интенсивности не регистрируют.

Для мониторинга утечек низкой интенсивности нефтепроводов перспективным является метод, основанный на дистанционном обнаружении нефтяных загрязнений земной поверхности около нитки трубопровода.

Эффективным дистанционным методом обнаружении нефтяных загрязнений земной поверхности около нитки трубопровода на сегодняшний день является лазерноиндуцированный флуоресцентный метод (см., например, [9-11]).

Лазерный флуоресцентный датчик позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения на земной поверхности, вызванные утечками трубопровода, на ранней стадии (при небольших размерах нефтяного загрязнения) и независимо от времени суток.

Однако, этот надежный метод имеет серьезный недостаток, связанный с большими (например, для установки на БПЛА) массогабаритными характеристиками аппаратуры.

Статья посвящена анализу потенциальных возможностей пассивной оптической аппаратуры для мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности в ближнем ИК диапазоне, имеющей небольшие массогабаритные характеристики.

Постановка задачи

Физической основой пассивного оптического метода мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности в ближнем ИК диапазоне является появление небольших провалов (вызванных поглощением углеводородами) в спектре отражения земной поверхности, загрязненной нефтепродуктами (см., например, [12-26]).

Такие провалы в спектрах отражения появляются в нескольких спектральных диапазонах.

Для примера на рисунке 1 приведены спектры отражения разных видов нефтяной эмульсии [21].



Рисунок 1 – Спектры отражения разных видов нефтяной эмульсии: *а* – пример №1, *б* – пример №2

На рисунках 1*a* и 1*б* видны характерные провалы в спектрах отражения (вызванные поглощением углеводородами) на длинах волн около 1,2 мкм, 1,73 мкм и 2,3 мкм.

На рисунках 2-4 показаны спектры отражения незагрязненных нефтепродуктами элементов земного ландшафта. Здесь на рисунке 2 приведены спектральные коэффициенты отражения для кустарничковой растительности и почв без растительности [27-31].



Рисунок 2 – Спектры отражения: а – кустарничковых растений, б – почв

На рисунке 2*a*: толстая сплошная линия - голубика, пунктирная линия брусника, штрихпунктирная линия - клюква, тонкая сплошная линия - черника. На рисунке 2*б*: толстая сплошная линия - светло-желтовато-коричневый суглинок, пунктирная линия - коричневый глинистый мелкий песок, штрихпунктирная линия серая илистая глина, тонкая сплошная линия - серый коричневый каменистый грубый песок.

На рисунке 3 показаны примеры спектральных коэффициентов отражения пастбищ (*a*) и болот (б).



Рисунок 3 – Спектры отражения: а – пастбищ, б – болот

На рисунке 3*a*: пастбища с покрытием растительностью 35 % (тонкая сплошная линия), 50 % (пунктирная линия), 100 % (толстая сплошная линия). На рисунке 36: болота с покрытием растительностью 95 % (толстая сплошная линия), 85 % (пунктирная линия), 80 % (тонкая сплошная линия).

На рисунке 4 показаны примеры спектральных коэффициентов отражения гарей (*a*) и сухостоя (б).

На рисунке 4*a* – разные гари. На рисунке 4*б*: толстая сплошная линия – сухие иглы пихты, пунктирная линия – сухой коричневый лишайник, штрихпунктирная линия – сухие листья ивы, тонкая сплошная линия – сухая кора пихты.



Рисунок 4 – Спектры отражения: а – гарей, б – сухостоя

На рисунках 2-4 видно отсутствие характерных провалов в спектрах отражения (вызванные поглощением углеводородами) на длинах волн около 1,2 мкм, 1,73 мкм и 2,3 мкм.

В данной статье проводится анализ потенциальных возможностей пассивной оптической аппаратуры для мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности в одном из наиболее перспективных спектральных диапазонов около 1730 нм.

В спектральном диапазоне около 1730 нм для мониторинга нефтяных загрязнений обычно используют три длины волны $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ (три узких спектральных диапазона с центральными длинами волн $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$). Данные измерений коэффициентов отражения R_A, R_B, R_C на этих длинах волн используют для определения так называемого углеводородного индекса НІ. Углеводородный индекс НІ определяется следующим выражением:

$$HI = (\lambda_B - \lambda_A) \frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B.$$

Для поверхности, загрязненной нефтепродуктами, углеводородный индекс HI>0. Для незагрязненной нефтепродуктами земной поверхности углеводородный индекс HI=0.

Значения длин волн λ_A , λ_B , λ_C различаются в разных работах (см., например, [16,17,21,25]): λ_A =1,705 мкм, λ_B =1,729 мкм, λ_C =1,741 мкм; λ_A =1,699 мкм, λ_B =1,730

мкм, $\lambda_C = 1,749$ мкм; или $\lambda_A = 1,668$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,789$ мкм.

При этом в разных работах используется аппаратура с разной шириной спектральных каналов.

Представляет интерес исследование эффективности использования углеводородного индекса НІ для обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности при разных вариантах значений длин волн $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ и разной ширине спектральных каналов регистрации.

Математическое моделирование эффективности метода обнаружения разливов нефтепродуктов в спектральном диапазоне около 1,73 мкм при разных вариантах значений длин волн $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ и разной ширине спектральных каналов

При математическом моделировании эффективности метода обнаружения разливов нефтепродуктов были использованы спектры отражения различных земных поверхностей, загрязненных нефтепродуктами [16-25] и спектры отражения чистых (незагрязненных нефтепродуктами) земных поверхностей, на фоне которых проводится обнаружение-утечек нефтепроводов [27-31].

Экспериментально измеренные спектры отражения (земных поверхностей, загрязненных и незагрязненных нефтепродуктами) служили исходной информацией для расчета индекса HI.

На рисунках 5-7 приведены значения углеводородного индекса HI для загрязненных нефтепродуктами и чистых земных поверхностей при разных вариантах значений длин волн $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ и разной ширине спектральных каналов для созданной базы данных спектров отражения.

На рисунках 5-7 по вертикальной оси приведено значение индекса HI, а по горизонтальной оси отложена величина n - номер спектра отражения (загрязненной нефтепродуктами или чистой земной поверхности) в базе данных спектров.

Спектры отражения 1-63 на рисунках относятся к земной поверхности, загрязненной нефтепродуктами (бензин, нефть, дизельное топливо). Здесь приведены данные для различных видов земной поверхности, загрязненной нефтепродуктами: песка (спектры 1-4, 13-16, 25-29, 37-42, 46-48), разных почв (спектры 5-8, 17-20, 29-32, 43, 49-58,61) и различных видов глины (9-12, 21-24, 33-36, 44, 45, 59,60, 62,63).

Спектры отражения 64-449 на рисунках относятся к незагрязненным нефтепродуктами типам земного ландшафта, на фоне которых проводится обнаружение утечек нефтепродуктов. Здесь приведены данные для различных видов песка (спектры 64, 351 – 365), разных почв (спектры 68, 71, 370 - 390), различных видов глины (спектры 366 -369), разных видов лишайника (спектры 134-230), различных видов мха (спектры 231-260), болот (спектры 69, 70, 72-109), пастбищ с разным содержанием растительности (спектры 261 – 350), разных видов лиственной и хвойной растительности (спектры 65, 67, 110-133, 423 – 449), различных видов сухой растительности (спектры 391 - 422) и бетона (спектр 66).

На рисунке 5 показаны значения индекса HI для длин волн $\lambda_A = 1,705$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,741$ мкм при ширине спектральных каналов 10 нм (рисунок 5*a*) и 30 нм (рисунок 5*b*).



Рисунок 5 – Значения индекса НІ для длин волн $\lambda_A = 1,705$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,741$ мкм: *а* – спектральное разрешении 10 нм, *б* – спектральное разрешении 30 нм

На рисунке 6 показаны значения индекса HI для длин волн $\lambda_A = 1,699$ мкм, $\lambda_B = 1,730$ мкм, $\lambda_C = 1,749$ мкм при ширине спектральных каналов 10 нм (рисунок 6*a*) и 30 нм (рисунок 6*б*).



Рисунок 6 – Значения индекса НІ для длин волн $\lambda_A = 1,699$ мкм, $\lambda_B = 1,730$ мкм, $\lambda_C = 1,749$ мкм: *а* – спектральное разрешении 10 нм, *б* – спектральное разрешении 30 нм

На рисунке 7 показаны значения индекса HI для длин волн $\lambda_A = 1,668$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,789$ мкм при ширине спектральных каналов 10 нм (рисунок 7*a*) и 30 нм (рисунок 7*б*).



Рисунок 7 – Значения индекса НІ для длин волн $\lambda_A = 1,668$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,789$ мкм: *а* – спектральное разрешении 10 нм, *б* – спектральное разрешении 30 нм

Из рисунков 5-7 трудно выбрать лучший вариант длин волн обнаружения разливов нефтепродуктов в спектральном диапазоне около 1,73 мкм.

Для количественной оценке эффективности метода обнаружения разливов нефтепродуктов в спектральном диапазоне около 1,73 мкм для разных вариантов значений длин волн $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ и разной ширине спектральных каналов проводилось математическое моделирование.

Экспериментально измеренные спектры отражения земных поверхностей использовались для формирования «данные гиперспектральных измерений» путем добавления к ним шума, имитирующего погрешности измерений. Принималось, что шум измерения распределен по гауссовскому закону с нулевым средним значением и относительным среднеквадратическим отклонением (СКО) δ =1–10 %. Статистическое моделирование проводилось по 10000 шумовых реализаций.

В работе для обнаружения земных поверхностей, загрязненных нефтепродуктами, использовался пороговый алгоритм. Определялось минимальное значение углеводородного индекса у загрязненных нефтепродуктами поверхностей и максимальное значение углеводородного индекса у незагрязненных нефтепродуктами земных поверхностей. Полу сумма этих величин принималась за пороговое значение (аномально низкие значения HI у загрязненных поверхностей и аномально большие значения HI у чистых поверхностей при определении порогового значения отбрасывались). Если для поверхности значение углеводородного индекса HI было больше (или равно) пороговому, то считалось, что это загрязненная нефтепродуктами поверхность. Если для поверхности значение углеводородного индекса НІ было меньше порогового, то считалось, что это чистая (незагрязненная нефтепродуктами) поверхность.

В результате математического моделирования находились вероятности правильного обнаружения (*P_d*) и вероятности ложных тревог (*P_a*). Вероятность правильного обнаружения определялась для загрязненных поверхностей как отношение числа шумовых реализаций, для которых пороговый алгоритм правильно определял поверхность как «загрязненную», к общему числу шумовых реализаций. Вероятность ложных тревог определялась для незагрязненных поверхностей как отношение числа шумовых реализаций, для которых пороговый алгоритм неправильно определял поверхность как «загрязненную», к общему числу шумовых реализаций.

В таблицах 1-3 приведены усредненные по всем спектрам для загрязненных и незагрязненных поверхностей вероятности правильного обнаружения (P_d) и ложных тревог (P_a), для разных значений СКО шума. В таблице 1 приведены результаты математического моделирования для $\lambda_A = 1,705$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,741$ мкм; в таблице 2 – для $\lambda_A = 1,699$ мкм, $\lambda_B = 1,730$ мкм, $\lambda_C = 1,749$ мкм; в таблице 3 – для $\lambda_A = 1,668$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,789$ мкм.

Таблица 1 – Результаты моделирования для $\lambda_A = 1,705$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,741$ мкм

Вероятности правильного	Среднеквадратическое значение шума, %						
обнаружения и вероятности							
ложных тревог	1	3	5	10			
Спектральное разрешение 1 нм							
P_d	0,95	0,79	0,70	0,61			
P_a	0,01	0,12	0,22	0,33			
Спектральное разрешение 10 нм							
P_d	0,94	0,78	0,69	0,61			
P_a	0,01	0,12	0,22	0,33			
Спектральное разрешение 30 нм							
P_d	0,74	0,6	0,56	0,53			
P _a	0,07	0,11	0,21	0,32			

Электронный научно-технический журнал «Контенант». Том 5, №3, 2023

Таблица	2 –	Результаты	моделирования	для	$\lambda_A = 1,699$	мкм,	$\lambda_B = 1,730$	мкм,	λ_C
---------	-----	------------	---------------	-----	---------------------	------	---------------------	------	-------------

=1,749 мкм

Вероятности правильного	Среднеквадратическое значение шума, %						
обнаружения и вероятности							
ложных тревог	1	3	5	10			
Спектральное разрешение 1 нм							
P_d	0,98	0,84	0,74	0,63			
P_a	0,02	0,13	0,22	0,33			
Спектральное разрешение 10 нм							
P_d	0,98	0,84	0,74	0,63			
P_a	0,02	0,13	0,22	0,33			
Спектральное разрешение 30 нм							
P_d	0,95	0,77	0,68	0,60			
P_a	0,01	0,12	0,21	0,32			

Таблица 3 – Результаты моделирования для $\lambda_A = 1,668$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, λ_C

=1,789 мкм

Вероятности правильного	Среднеквадратическое значение шума, %						
обнаружения и вероятности							
ложных тревог	1	3	5	10			
Спектральное разрешение 1 нм							
P_d	0,99	0,99	0,98	0,91			
P _a	0,11	0,19	0,26	0,35			
Спектральное разрешение 10 нм							
P_d	0,99	0,99	0,98	0,91			
P_a	0,11	0,19	0,26	0,35			
Спектральное разрешение 30 нм							
P_d	0,99	0,99	0,97	0,88			
P_a	0,09	0,17	0,25	0,34			

Результаты, приведенные в таблицах 1-3, показывают возможности метода мониторинга разливов нефтепродуктов на земной поверхности в ближнем ИК

диапазоне около длины волны 1,73 мкм при разных вариантах значений длин волн $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ и разной ширине спектральных каналов.

Видно, что наибольшие вероятности правильного обнаружения обеспечивает третий вариант значений длин волн: $\lambda_A = 1,668$ мкм, $\lambda_B = 1,729$ мкм, $\lambda_C = 1,789$ мкм. Однако, для этого варианта значений длин волн реализуются и наибольшие значения вероятности ложных тревог.

Приемлемые вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений и ложных тревог обеспечивает второй вариант значений длин волн: $\lambda_A = 1,699$ мкм, $\lambda_B = 1,730$ мкм, $\lambda_C = 1,749$ мкм при спектральном разрешении аппаратуры порядка или меньше 10 нм.

Для этого варианта значений длин волн при СКО шума 3% можно обеспечить вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности порядка 84% при вероятности ложных тревог порядка 13%.

Несколько худшие результаты дает первый вариант значений длин волн: λ_A =1,705 мкм, λ_B =1,729 мкм, λ_C =1,741 мкм тоже при спектральном разрешении аппаратуры порядка или меньше 10 нм.

Выводы

Проведено исследование возможностей метода мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности в ближнем ИК диапазоне около длины волны 1,73 мкм при разных вариантах значений центральных длин волн и ширине спектральных каналов регистрации. Приведены результаты статистического моделирования эффективности метода обнаружения разливов нефтепродуктов в условиях шумов регистрирующей аппаратуры. При статистическом моделировании были использованы экспериментально измеренные спектры отражения поверхностей, загрязненных нефтепродуктов, разными типами И спектры отражения незагрязненных нефтепродуктами земных поверхностей, на фоне которых проводится обнаружение разливов нефтепродуктов. Показано, что приемлемую эффективность обнаружения нефтяных загрязнений обеспечивает вариант значений длин волн регистрации 1,699 мкм, 1,730 мкм, 1,749 мкм при спектральном разрешении аппаратуры порядка или меньше 10 нм. Для этого варианта значений длин волн при СКО шума 3% можно обеспечить вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности порядка 84% при вероятности ложных тревог порядка 13%.

Литература

1. Nwakanma N. M. C., Ikegwu E., Osaigbovo E. J. Genotoxic Effects of Spent Engine Oil (SEO) - Polluted Soils on Vernonia Amygdalina Del. // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2018. V.6. N 12. P.564-570.

Yuniati M.D. Bioremediation of petroleum-contaminated soil: A Review // IOP Conf.
Ser.: Earth Environ. Sci. 2018.118 012063. P.1-7.

 Najoui Z., Amoussou N., Riazanoff S., Aure G., Frappartb F. Oil slicks in the Gulf of Guinea – 10 years of Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar observations // Earth Syst. Sci. Data. 2022. 14. P.4569–4588.

4. Ismailova N. M., Nadjafova S. I. Experience in Assessing Environmental Risks of Main Oil Pipelines in Azerbaijan through the Prism of Soil Biogeoresistance to Crude Oil Pollution // Moscow University Soil Science Bulletin. 2022. V. 77. No. 3. P. 196–202.

5. Roche B. H. R., King M. D. Quantifying the effects of background concentrations of crude oil pollution on sea ice albedo // The Cryosphere. 2022. 16. P.3949–3970.

Huettel M. Oil pollution of beaches // Current Opinion in Chemical Engineering.
2022. V. 36, 100803. P. 1-10.

7. Komene G.L., Remi C.O. Oil pollution crisis and relationship marketing approach of oil firms in Niger delta // British Journal of Management and Marketing Studies. Volume 5, Issue 1, 2022. P. 39-78.

8. Zhang J., Kane F. Leak detection and operations management in offshore pipelines. Engineering Environmental Science // 11th International Pipeline Conference. V. 3. Operations, Monitoring and Maintenance; Materials and Joining. Calgary, Alberta, Canada. 2016. P. 1–9.

9. Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K., Musayev A., Sadikhov I. Lidar for remote sensing of contaminations on water and earth surface taking place during oil-gas production. // Proc. SPIE. 2015. V. 9810. P. 981018-1–981018-7.

10. Hussein A.E., Marzouk A. Characterization of petroleum crude oils using laser induced fluorescence. // J. Petroleum & Environmental Biotechnol. 2015. V. 6. № 5. P. 1-6.

 Федотов Ю.В., Белов М.Л., Кравцов Д.А., Городничев В.А. Лазерный флуоресцентный метод обнаружения утечек нефтепроводов на длине волны излучения 355 нм. // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 2. С. 23–28.

12. Cloutis E.A. Spectral reflectance properties of hydrocarbons: remote-sensing implications. // Science. 1989. V. 245. P.165-168.

Horig B., Kuhn F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. // Int.
J. remote sensing. 2001, V. 22. N. 8. P. 1413–1422.

14. Van der Meer F., van Dijk P., van der Werff H., Yangà H. Remote sensing and petroleum seepage: a review and case study. // Terra Nova. 2002. V.14. P.1–17.

15. Kühn F., Oppermann K., Hörig B. Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. // International Journal of Remote Sensing. 2004. 25(12). P. 2467-2473.

16. Allen C.S., Satterwhite M.B. Reflectance spectra of three liquid hydrocarbons on a common sand type. // Proc. SPIE. 2006. V. 6233. P. 62331M-1 - 62331M-12.

17.Andreoli G., Bulgarelli B., Hosgood B., Tarchi D. Hyperspectral Analysis of Oil andOil-Impacted Soils for Remote Sensing Purposes. European commission joint Researchcentre.2007.Режимдоступа:https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-

HSI_for_Oil_and_Spills-2007.pdf (дата обращения 12.02.2024).

18. Allen C.S., Krekeler M.P.S. Reflectance spectra of crude oils and refined petroleum products on a variety of common substrates. // Proc. SPIE. 2010. V.7687. P. 76870L-1 - 76870L-13.

19. Tian Q. Study on oil-gas reservoir detecting methods using hyperspectral remote sensing // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B7. XXII ISPRS Congress. Melbourne, Australia, 2012. P. 157-162.

20. Smejkalová E., Bujok P. Remote sensing methods in the identification of oil contaminations. // GeoScience Engineering. 2012. V. LVIII. N.1. P. 24-33.

21. Oil spill detection and mapping in low visibility and ice: surface remote sensing. FinalReport5.1.2013.Режим доступа: www.arcticresponsetechnology.org/wp-
content/uploads/2013/10/Report%205.1%20-

%20SURFACE%20REMOTE%20SENSING.pdf (дата обращения 12.02.2024).

22. Keskin G., Teutsch C.D., Lenz A., Middelmann W. Concept of an advanced hyperspectral remote sensing system for pipeline monitoring. // Proc. SPIE. 2015. V.9644. P. 96440H-1 - 96440H-9.

23. Del'Papa R., Scafutto M., de Souza Filho C.R., de Oliveira. W.J. Hyperspectral remote sensing detection of petroleum hydrocarbons in mixtures with mineral substrates: Implications for onshore exploration and monitoring. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V.128. P. 146–157.

24. Pelta R., Ben-Dor E. An Exploratory Study on the Effect of Petroleum Hydrocarbon on Soils Using Hyperspectral Longwave Infrared Imagery. // Remote Sensing. 2019. V.11(569). P. 1-15.

25. Brum J., Schlegel C., Chappell C., Burke M., Krekeler M.P.S. Refective spectra of gasoline, diesel, and jet fuel A on sand substrates under ambient and cold conditions: Implications for detection using hyperspectral remote sensing and development of age estimation models. // Environmental Earth Sciences. 2020. V.79. 463. P.1-14.

26. Achard V., Foucher P.Y., Dubucq D. Hydrocarbon Pollution Detection and Mapping Based on the Combination of Various Hyperspectral Imaging Processing Tools. // Remote Sensing. 2021. V.13 (5). 1020. P. 1-28.

27. Johns Hopkins University Spectral Library [Электронный ресурс] URL: https://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc (дата обращения 12.02.2024).

28. USGS Digital Spectral Library 06 [Электронный ресурс] URL:http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06 (дата обращения 12.02.2024).

29. Forsström P., Peltoniemi J., Rautiainen M. Seasonal dynamics of lingonberry and blueberry spectra // Silva Fennica. 2019. V.53. N 2. 10150. P. 1-19.

30. Kuusk A., Lang M., Nilson T. Simulation of the reflectance of ground vegetation in sub-boreal forests // Agricultural and Forest Meteorology. 2004. 126. P. 33-46.

31. Schaepman-Strub G., Limpens J., Menken M., Bartholomeus H. M., Schaepman M. E. Towards spatial assessment of carbon sequestration in peatlands: spectroscopy based estimation of fractional cover of three plant functional types // Biogeosciences. 2009. V. 6. P. 275–284.