

**СЕКЦІЯ 2**  
**ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ.**  
**ФОТОНІКА**

**TWO-STAGE MODEL OF NANOCONES FORMATION ON A SURFACE OF  
ELEMENTARY SEMICONDUCTORS AND THEIR SOLID SOLUTIONS**

*Artur Medvid’*

*Institute of Technical Physics, Riga Technical University, Riga, Latvia*

*E-mail: [medvids@latnet.lv](mailto:medvids@latnet.lv)*

A new elaborated laser method for nanocones formation in elementary semiconductors Si and Ge and their solid solutions is reported. A cone possesses unique properties: a small cone is a quantum dot and a long one is a quantum wire with the gradually decreasing diameter from the base till the top of the cone. Everywhere radius of cone is equal or less than Bohr’ radius of electron, exciton or phonon Quantum confinement effect (QCE) takes place. Properties of nanocones using AFM, SEM, photoluminescence (PL) and Raman spectroscopy were studied. Unique visible PL from the surfaces with nanocones was found and is explained by QCE. A “red” shift of Raman spectra in Ge is a good evidence of this suggestion. Asymmetry of PL spectra of the irradiated SiO<sub>2</sub>/Si structure is explained by formation graded band gap structure due to QCE in nanocones-nanowires with a graded decrease of diameter toward the top of nanocone.

Two-stage model of nanocones formation is proposed [1]: Laser Redistribution of Atoms and Selective Laser Annealing. The first stage is characterized by formation of heterostructures such as Ge/Si due to drift of Ge atoms toward the irradiated surface of the sample in the gradient of temperature, the so-called thermogradient effect [2]. New Ge phase is formed at the end of the process. Ge atoms are localized at the surface of Si like a thin film. The second stage is characterized by formation of nanocones on the irradiated surface of a semiconductor by selective laser heating of the top layer with following mechanical plastic deformation of the layer as a result of relaxation of the mechanical compressive stress arising between these layers due to mismatch of their crystal lattices and selective laser heating. It occurs due to higher absorption of the LR by the top layer than the buried layer. For the first time the possibility of graded band gap 1D structure formation in elementary semiconductors was shown.

*Key words:* elementary semiconductors, nanocones formation.

**References**

- [1] A. Medvid’, “The Formation of Nanocones on The Surface of Semiconductors by Lasr-induced Self-assembly” in “Laser Growth and Processing of Photonic Devices” Ed. by Nikolas A.Vainos, WoodHead publ. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, 2012.
- [2] A.Medvid, P.Onufrijevs, A.Mychko, Nanoscale Research Letters, 6, 582 (2011).

УДК 681.78: 681.7.01: 621.391.8: 519.21

## СТОХАСТИЧНІ МОДЕЛІ ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

*Стрількова Т. О., Лутюга О. П.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

*E-mail: [strelkova\\_t@ukr.net](mailto:strelkova_t@ukr.net), [alex\\_lyt@ukr.net](mailto:alex_lyt@ukr.net)*

Стохастико-детермінована теорія приймання та оброблення сигналів в оптико-електронних системах включає питання які пов’язані з вивченням та врахуванням процесів перетворення стохастичних сигналів основними елементами системи, а також оптимізацію процесів виявлення сигналів на фоні шуму. Стохастичний процес формування вихідного сигналу в оптико-електронних системах можна розглядати з урахуванням фотонної природи електромагнітного випромінювання та пов’язати із законом Пуассона [1]. Однак стохастичні процеси поглинання і пропускання можуть впливати на моменти часу і просторові координати формування відклику фотоприймача, та не відповідати вхідному потоку [2]. При цьому детермінований зв’язок між стохастичним вхідним потоком і стохастичним вихідним потоком порушується. Змінювана статистика фотонів може істотно впливати під час виконання прикладних завдань [3].

В докладі розглядаються проблемні питання, які виникають при реєстрації малокоонтрасних та малорозмірних об’єктів, та можуть бути пов’язані зі змінами статистичної поведінки, як сигналів так й завод. Запропоновано підхід до опису статистичних характеристик вихідних сигналів з урахуванням наявності групованих статистичних властивостей оптичного випромінювання. Стохастичні моделі вихідних сигналів оптико-електронних систем засновані на аналізі пуассонівських потоків зі зміненою дисперсією. Для аналізу таких стохастичних процесів прийнято за основу процес формування випадкової величини в умовах застосовності узагальнених граничних теорем, які використовують у якості граничних розподілів сім’ю стійких законів розподілення.

*Ключові слова:* оптико-електронні системи, фотодетектор, Пуассонівська модель, негауссові статистики, загальні граничні теореми, виявлення сигналів.

### **Література**

- [1] T. Strelkova, V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. Strelkov, “Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems”, in *Developing and Applying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, pp. 181-206, 2016.
- [2] T. A. Strelkova, “Studies on the Optical Fluxes Attenuation Process in Optical-electronic Systems”, *Semiconductor physics, quantum electronics & optoelectronics (SPQEO)*, no. 4, pp. 421 – 424, 2014.
- [3] Т. А. Стрелкова, “Использование устойчивых законов распределения при оценке эффективности обработки сигналов в оптико-электронных системах”, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (74), с. 4 – 9, 2015.

УДК 537.26

## КОРРЕКЦІЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

*Бендеберя Г. Н., Бондаренко И. Н., Маковская Е. Г.  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина  
E-mail: [d\\_meda@nure.ua](mailto:d_meda@nure.ua)*

По степени биологической безопасности искусственные источники света разделены на 4 группы: от нулевой до третьей. Галогенные лампы – это источники света со сплошным спектром излучения, безопасные для зрения человека (0 группа). Лампы накаливания имеют спектр с меньшим содержанием синего и фиолетового и большим – красного и желтого излучения. В психофизическом отношении их излучение теплое и приятное и относятся к 1 группе безопасности. Люминесцентные и светодиодные лампы являются источником повышенной опасности (соответственно 2 и 3 группа). Степень опасности зависит от мощности излучения и продолжительности воздействия на зрение человека. Классический на сегодня белый светодиод – это излучающий синий цвет кристалл, покрытый люминофором, переизлучающим часть энергии синего света в желтой области. Вредное влияние на органы зрения оказывает синяя и фиолетовая составляющая спектра, деструктивно воздействующая на ткани глаз [1]; в двугорбой спектральной характеристике светодиода белого свечения коротковолновая (максимум излучения вблизи 455 нм) и длинноволновая части разделены провалом именно на длине волны 480 нм. Интенсивность пика 455 нм может превосходить интенсивность на 480 нм в 7...10 раз для белых светодиодов с высокой цветовой температурой (5500 К...6500 К). При таком освещении зрачок полностью открыт и сетчатка подвергается воздействию деструктивного коротковолнового излучения. Европейский стандарт по биологической безопасности освещения [2] регламентирует производство и применение светодиодных осветителей, в которых интенсивность излучения на 480 нм по отношению к излучению на 460 нм составляет 40%.

Аналогичная ситуация связана с использованием энергосберегающих компактных люминесцентных ламп (КЛЛ), где источником излучения, возбуждающим свечение люминофора, служит дуговой разряд в парах ртути. На рынке массово представлены низкотехнологичные образцы КЛЛ с неконтролируемой толщиной люминофора, сквозь который проходит линейчатый спектр излучения ртутного разряда с интенсивной коротковолновой частью.

В данной работе проводилась отработка технологии формирования пленок монооксида кремния как защитного оптического покрытия на стеклянных и полимерных подложках.

Нанесение пленок проводилось на вакуумной установке ВУП-5М из молибденового испарителя при токе 125 А и давлении в камере  $4 \times 10^{-4}$  Па. Пленки наносились толщиной от 0,5 до 1,5 мкм. Спектрометрические измерения прозрачности пленок проведены на спектрофотометре RL1. Были также измерены

спектры излучения компактной люминесцентной лампы (КЛЛ) и светодиодной лампы (СДЛ) с изготовленными фильтрами. Они показали, что спектр СДЛ ( $T_{\text{цв}} = 4500 \text{ К}$ ) с фильтром  $0,5 \text{ мкм}$  близок к спектру СДЛ с  $T_{\text{цв}} = 3000 \text{ К}$  при общем снижении световой мощности около 20%. Пленка  $\text{SiO}$  толщиной  $0,5 \text{ мкм}$  существенно снижает интенсивность излучения КЛЛ в коротковолновой части спектра и полностью отсекает его на длинах волн меньше  $400 \text{ нм}$ . При этом, поглощение пленкой света в зелено-красном диапазоне не существенно и составляет 10%.

*Ключевые слова:* люминесцентный, светодиодный, спектр излучения, пленки  $\text{SiO}$ .

#### **Литература**

- [1] <http://nature-time.ru/2014/08/vred-svetodiodnyih-lamp/#i-2>  
[2] ИЕС 62471:2006 «Photobiological safety of lamps and lamp systems».

УДК 681.07

### **СПЕКТРАЛЬНАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ БРЕГГОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ**

*Карлов В. Д., Вдовёнков В. Ю., Слабунов С. О.*

*Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба,  
Харьков, Украина*

*E-mail: [karlovvd@ukr.net](mailto:karlovvd@ukr.net), [v.dovenkov@gmail.com](mailto:v.dovenkov@gmail.com), [sergey.slabunov@gmail.com](mailto:sergey.slabunov@gmail.com)*

В наше время активно развиваются вопросы спектральной селекции, на основе которых построена работа видеоспектрометров, позволяющих решить ряд вопросов в самых различных областях, от дистанционного зондирования Земли, до систем анализа объектов микроскопии [1]. Обычно, в таких системах используется селектирующее устройство, основанное на дифракционных решетках. Настоящая работа посвящена анализу высоких селективных свойств дифракционных решеток для новых приборов на основе высших порядков дифракции.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса дифракции света на голографических решетках позволили получить соотношения для дифракционной эффективности ( $\eta$ ) первого, второго и третьего порядка [2]. Было установлено, что  $\eta$  при выполнении условий брэгговского синхронизма зависит не только от величины относительного изменения коэффициента преломления, но и от условий взаимодействия излучения с дифракционной решеткой. Одними из главных параметров голографического фильтра являются спектральная и угловая селективность.

Как показали исследования, спектральная селективность во втором порядке в 4 раза выше, чем в первом, а селективность в третьем порядке выше в 18 раз. Экспериментальные исследования [2] подтверждают получение соотношения. После нормировки и оценки зависимости сделан вывод, что условия брэггов-

ского синхронизма для второго и третьего порядков выполняются в меньшем угловом диапазоне, чем для первого, что говорит о большей угловой селективности высших порядков. Кроме того, дифракционная эффективность при более высоких порядках может достигать 100 % [3]. Таким образом, использование высших порядков дифракции позволит существенно увеличить количество анализируемых спектральных каналов.

#### **Литература**

- [1] A. Thomas Harris, “Spectral Mapping Tools from the Earth Sciences Applied to Spectral Microscopy Data”, *International Society for Analytical Cytology*, с. 872–879, 2006.
- [2] Акустооптические эффекты при сильном взаимодействии. Теория и эксперимент (Метод непрерывных дробей при решении акустооптических задач) Под ред. Л.Ф. Купченко: Харьков, Украина: ООО «ЭДЕНА», 2009.
- [3] Л. Ф. Купченко, М. Б. Космына, В. Ю. Вдовёнков та др., “Брэгговский резонанс второго и третьего порядков на объемных голографических решетках”, *Украинский физический журнал*, с. 1469–1474, 1988.

УДК 681.7

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ГАБАРИТНО-ВАГОВИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ДЗЗ НАДВИСОКОЇ ПРОСТОРОВОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ**

*Тягур В. М.*

*Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ, Україна*

Розробка, запуск і експлуатація космічних оптико-електронних систем (ОЕС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) пов'язана зі значними фінансовими витратами, тому застосування різних математичних моделей для оптимального вибору параметрів ОЕС допоможе значно скоротити час і витрати при проектуванні таких систем. У доповіді представлена розроблена модель визначення оптимальних габаритно-вагових параметрів ОЕС для отримання необхідної просторової роздільної здатності. Особливо це стосується ОЕС ДЗЗ надвисокої просторової роздільної здатності.

Геометрично просторове розрізнення (величина кроку проекції пікселя на Землі GSD) залежить від величини розміру пікселя фотоприймача  $p$ , величини фокусної відстані об'єктива  $f'_o$  і висоти орбіти  $h_o$

$$GSD = \frac{p \cdot h_o}{f'_o}.$$

Для одержання зображення на просторовій частоті, що відповідає частоті Найквіста  $\nu_H = 1/2p$ , необхідно, щоб сумарна МПФ сканера на цій частоті була більше нуля. Залежно від необхідного геометричного просторового розрізнення GSD, висоти орбіти  $h_o$  і необхідної величини коефіцієнту передачі контрасту об'єктива він повинен мати певний діаметр вхідної апертури, при цьому величина розміру пікселя  $p$  на розмір діаметра світлової апертури не впливає.

Другим обмеженням для підвищення просторового розрізнення є вага сканера, яка, в основному, визначається габаритами головного дзеркала й, в-другу чергу, довжиною його об'єктива, яка залежить від фокусної відстані.

Третім чинником для оптимізації параметрів сканеру є величина лінійного розрізнення на місцевості (LPM), при різних діаметрах світлової апертури. В якості критерію для порівняння якості зображення можна обрати відношення середнього значення LPM в заданому діапазоні різниць альbedo між об'єктом та фоном до величини GSD ( $LPM_{CP} / GSD$ ).

В доповіді наведено формули для розрахунку необхідного діаметру вхідної апертури, показана залежність ваги та коефіцієнту передачі контрасту на частоті Найквіста від обраного діаметру, наведено залежність ( $LPM_{CP} / GSD$ ), що дозволяє вибрати оптимальний діаметр вхідної апертури.

*Ключові слова:* системи ДЗЗ, просторова роздільна здатність, оптимізація параметрів.

УДК 681.78

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ КІЛЬКОСТІ КАНАЛІВ АКУСТООПТИЧНОГО ПРОЦЕСОРА В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ ВИЯВЛЕННЯ З ДИНАМІЧНОЮ СПЕКТРАЛЬНОЮ ФІЛЬТРАЦІЄЮ

*Купченко Л. Ф., Слабунова Н. В.*

*Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна  
E-mail: [kupch@meta.ua](mailto:kupch@meta.ua), [slabunovanv@gmail.com](mailto:slabunovanv@gmail.com)*

Динамічна спектральна фільтрація являє собою узгоджену фільтрацію в оптичному діапазоні в інтересах підвищення контрасту зображення або відношення сигнал-шум для підвищення ймовірності виявлення об'єктів [1]. Відомо, що акустооптичні світлофільтри мають високі динамічні властивості та здатні змінювати апаратну функцію в досить широких межах, як по спектру, так і за величиною коефіцієнта пропускання шляхом зміни амплітуди звукової хвилі для кожного з спектральних каналів [2]. Однак число спектральних каналів в робочому діапазоні акустооптичного процесора обмежена інтермодуляційними спотвореннями, величина яких зростає зі збільшенням потужності звуку та зі зменшенням інтервалу між спектральними каналами.

В роботі [3] показано, що в оптико-електронних системах виявлення об'єктів, що засновані на основі принципів узгодженої фільтрації, ймовірність виявлення збільшується зі збільшенням числа спектральних каналів. Тому розробка методів підвищення кількості спектральних каналів акустооптичного процесора є актуальним завданням.

Метод збільшення числа спектральних каналів акустооптичного процесора з динамічною спектральною фільтрацією включає переддетекторну і післядетекторну обробку оптичних сигналів. В процесі переддетекторної обробки обчис-

люється апаратна функція і формується два амплітудно-частотних ультразвукових сигналу які складаються, наприклад, з парних і непарних спектральних складових, інтервал між якими виключає їх взаємний вплив. В процесі післядетекторної обробки послідовно здійснюється вплив на вхідне випромінювання кожного з ультразвукових сигналів, а результати селекції реєструється фотоприймачем і проводиться їх комп'ютерне підсумовування.

#### **Література**

- [1] Л. Ф. Купченко, А. С. Рыбьяк, “Динамическая спектральная фильтрация оптического излучения в оптоэлектронных системах”, *Электромагнитные волны и электронные системы. –Межд. научно-технический журнал*, с. 32–43, 2011.
- [2] Л. Ф. Купченко, Н. В. Слабунова, О. А. Гурін, “Акустооптический процессор в оптоэлектронной системе, обеспечивающий динамическую спектральную фильтрацию”, *Формирование и обработка сигналов. Прикладная радиоэлектроника*, Т.15, № 4, с. 359 – 361, 2016.
- [3] D. Manolakis, D. Marden, G. Shaw, “Hyperspectral Image Processing for Automatic Target Detection Applications”, *Lincoln Laboratory Journal*, с. 79–116, 2003.

УДК 621.378.5:525.:535.8

## **ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НЕУЗГОДЖЕНОСТІ РОЗСІЯНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА СТАНОМ ПОЛЯРИЗАЦІЇ НА СИГНАЛ ЛАЗЕРНОГО ДОППЛЕРІВСЬКОГО АНЕМОМЕТРА**

*Дивнич В. М.*

*Національний авіаційний університет, Київ, Україна*

*E-mail: [divnym@gmail.com](mailto:divnym@gmail.com)*

Лазерні доплерівські анемометри (ЛДА) є безконтактними приладами, які дозволяють вимірювати швидкість аерогідродинамічних потоків в локальній області. Найбільше розповсюдження отримали ЛДА диференціального типу на сигнал яких, як показано в роботі [1], впливає ступінь узгодження розсіяного мікрочастинками випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації.

В роботі [2] показано, що зменшити вплив неузгодженості розсіяного випромінювання за інтенсивністю на глибину модуляції сигналу ЛДА можна за рахунок застосування фільтра. Цей фільтр встановлюється замість апертурної діафрагми.

Але в ЛДА диференціального типу під час розсіяння лазерного випромінювання в кожному напрямку розповсюджуються дві розсіяні хвилі, які відрізняються не тільки інтенсивністю, а також мають різний стан поляризації. Тому ступінь узгодження цих променів за станом поляризації також впливає на коефіцієнт глибини модуляції сигналу ЛДА. Так, коли розсіяні хвилі взаємно ортогональні, то вони не інтерферують на поверхні фотоприймача і змінна складова сигналу на його виході буде дорівнювати нулю. Ступінь узгодження розсіяних хвиль за станом поляризації можна оцінити за допомогою коефіцієнта, що приймає значення від 0 до 1.

Пропонується проводити підвищення коефіцієнта глибини модуляції сигналу ЛДА за рахунок того, що на фотоприймач будуть потрапляти тільки ті розсіяні хвилі ступінь узгодження яких за станом поляризації перевищує певне значення. Для цього замість апертурної діафрагми пропонується встановлювати фільтр. Для визначення форми такого фільтру написана програма за допомогою якої на основі теорії розсіяння Лоренца-Мі можна розрахувати складові розсіяних хвиль від двох зондуючих лазерних променів та коефіцієнт їх узгодження за станом поляризації. Представлені форми фільтрів для ЛДА з прийманням розсіяного випромінювання вперед та назад.

*Ключові слова:* лазер, доплерівський, поляризація, фільтр.

#### **Література**

- [1] В. М. Землянський, *Измерение скорости потока лазерным доплеровским методом*. Киев, Украина: Вища школа, 1987.
- [2] В. М. Дивнич, “Підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра узгодженням розсіяних хвиль за інтенсивністю”, *Вісник НТТУ “КПІ”. Серія приладобудування*. Вип. 54(2), с. 40-44, 2017.

УДК 535.42

## **МЕТОД РОЗРАХУНКУ ХРОМАТИЧНОЇ АБЕРАЦІЇ БАГАТОПОРЯДКОВИХ ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ**

*Васильковська І. О.*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

*E-mail: [inna\\_kuchugura@ukr.net](mailto:inna_kuchugura@ukr.net)*

Багатопорядкові дифракційні лінзи (БПДЛ) останнім часом набули широкого застосування в сучасних оптичних системах різного призначення: в голографічних дисплеях, в інфрачервоних зображувальних системах, для формування лазерних пучків та інших.

БПДЛ у порівнянні зі звичайними дифракційними лінзами (ДЛ) мають ряд особливостей, зокрема, працюють у вищих дифракційних порядках. При цьому звичайна ДЛ забезпечує ідеальне фокусування світлового пучка лише для розрахункової довжини хвилі, а дифракційна структура БПДЛ – для набору довжин хвиль, фазова затримка  $p$  яких дорівнює цілому числу довжин хвиль при заданій висоті профілю. Тому розрахунок хроматичної аберації БПДЛ відрізняється від розрахунку звичайної ДЛ.

Зазвичай для визначення хроматичної аберації ДЛ використовується визначення коефіцієнта дисперсії, заданого виразом  $V = \phi / \Delta\phi$ , де  $\phi$  - оптична сила елемента для центральної довжини хвилі;  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ ,  $\phi_1$  - оптична сила елемента для короткої довжини хвилі, а  $\phi_2$  - для довгої. Для визначення коефіцієнта дисперсії БПДЛ, можна визначити оптичну силу через визначення центральної  $\lambda_s$ , короткої  $\lambda_c$  та довгої  $\lambda_d$  довжин хвиль заданого спектрального діапазону. Встановлено, що у такому випадку коефіцієнт дисперсії БПДЛ розрахову-



ється за формулою:

$$V = \frac{N_3 \lambda_3}{N_c \lambda_c - N_4 \lambda_4},$$

де  $N_c, N_3, N_4$  – порядки дифракції для довжин хвиль  $\lambda_c, \lambda_3, \lambda_4$  відповідно.

Був розроблений метод, за яким проводилась оцінка хроматизму БПДЛ із наступними параметрами: стрибок фази  $p=6$ , розрахункова довжина хвилі  $\lambda_0 = 0,525$  мкм, в спектральному діапазоні  $\lambda = 0,4...0,7$  мкм, фокусна відстань  $f = 75$  мм. У заданому діапазоні робочими дифракційними порядками виявилися  $N_c = 7, N_3 = 6, N_4 = 5$ . Розглядалося зображення, сформоване та кою лінзою, у формі відрізка із дифракційною ефективністю більше 40%. Визначено, що для ближньої точки відрізка дисперсія становить  $V_{\text{бл}} = -32,74$ , а для дальньої –  $V_{\text{д}} = 38,8$ . Як відомо, для видимого діапазону коефіцієнт дисперсії звичайної ДЛ складає приблизно  $-3,5$ . Таким чином, хроматизм даної БПДЛ на порядок менший, ніж у звичайної ДЛ.

*Ключові слова:* багатопорядкова дифракційна лінза, хроматична аберація.

УДК 535.317

## АФОКАЛЬНАЯ ТРЕХЗЕРКАЛЬНАЯ СИСТЕМА С МНОГОКРАТНЫМ ОТРАЖЕНИЕМ ОТ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗЕРКАЛ

*Артюхина Н. К.<sup>1)</sup>, Пероса Лаура<sup>1,2)</sup>, Марчик В. А.<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,

<sup>2)</sup>Universidad Yacambú, Barquisimeto, Venezuela

*E-mail:* [art49@mail.ru](mailto:art49@mail.ru), [lauravictorup3@gmail.com](mailto:lauravictorup3@gmail.com), [baletta38@gmail.com](mailto:baletta38@gmail.com)

К достоинствам зеркальных систем отнесем высокое разрешение в широком спектральном диапазоне; отсутствие селективной непрозрачности и ограниченный на апертуры, связанные с размерами заготовок; небольшая осевая длина, выигрыш по весу; а также экономичность материалов. Все это подтверждает актуальность проблемы разработки систем из различного числа зеркал, включая афокальные системы. В последнее время найдены и продолжают совершенствоваться некоторые пути решения проблемы оптимизации габаритных размеров зеркальных телескопических систем [1, 2].

В настоящей работе предложена методика расчета афокальной схемы с многократным отражением от первичного зеркала с высоким относительным отверстием, за счет которого обеспечивается компактность схемы. В алгоритм расчета введены модифицированные условия нормировки:  $\Phi_1 = \alpha_2 = 1/f'_1 = -1,0$ , где  $\Phi_1$  – оптическая сила первичного зеркала.

Процесс выбора схемы выполнен с помощью пробного габаритного моделирования. Система имеет отличные коррекционные возможности для заданных оптических характеристик (рис. 1).



Рис. 1. Афокальная зеркальная система: а – схема хода лучей; б – суммы Зейделя.

**Ключевые слова:** зеркальные системы, афокальная схема, коррекция aberrаций.

**Литература**

- [1] D. T. Puryayev, A. V. Gontcharov, “Concept for a telescope optical system with a 10-m-diam spherical primary mirror”, *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 7, pp. 2017 – 2020, 2000.
- [2] Afocal catoptric optical concentrator: pat. 0378140 USA, МКИ G02B 17/00 / J. Hutson [et al.] // United States Patent. – 31/12.2015/.

УДК 535.317

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОЦЕНКИ АБЕРРАЦИЙ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЦЕЛОВ**

Альмахмуд Шуаиб Хассан<sup>1,3</sup>, Пероса Лаура<sup>1</sup>, Шкадаревич А.П.<sup>2</sup>, Артюхина Н. К<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Научно-производственное унитарное предприятие «Научно-технический центр "ЛЭМТ" БелОМО», Минск, Республика Беларусь,

<sup>3</sup>Al-Baath University, Homs, Syria

<sup>4</sup>Universidad Yacambú, Barquisimeto, Venezuela

E-mail: shoaeb8888@gmail.com, lauravictorup3@gmail.com, sale@lemt.by, art49@mail.ru

Развитие приборостроения наиболее полно соответствует инфраструктуре и потребностям белорусской промышленности. Особой гордостью Беларуси сегодня является лазерное и оптическое приборостроение. Одним из конкурентоспособных и востребованных направлений является разработка оптических приборов для бронетанковой техники. Прицелы и приборы управления огнем функционируют в любых погодных условиях, позволяют обнаруживать цели на расстояниях до 6 км и поражать их с точностью до 0,5 м.

В работе представлены результаты исследования и разработки критериев компьютерной оценки aberrаций систем оптических прицелов. Отметим, что при их оценке качества изображения таких систем имеет место некоторый компромисс между качеством, сложностью компонентов оптической системы и ее назначением.

Известны определенные критерии (Релей, Штрель, Г. Г. Слюсарев, А. И. Тудоровский, С. В. Елисеев), установлены допустимые значения аберраций в телескопических системах [1]. Для панкратических систем допускается ухудшение качества изображения на 20... 30%.

При проведении анализа различных способов оценки качества изображения на этапе компьютерного моделирования установлены критерии функциональных возможностей пакетов прикладных программ в отношении анализа волновых и геометрических аберраций афокальных систем, а также ограничения, которые варьируются в зависимости от доступной версии. В программной среде Oral результаты расчета поперечных аберраций при моделировании афокальных систем оценивают в угловой мере. Для работы в старых версиях пакетов Zemax и Code V, которые дают результаты расчета в линейной мере, предложены определенные методики, использующие другие критерии, такие, как форма кружка рассеяния, анализ волнового фронта, а также применение элемента «раxial» или дополнительной фокусирующей системы.

*Ключевые слова:* прицел, разрешающая способность, афокальная схема, аберрации

#### **Литература**

- [1] Г. Н. Репинский, “Новые панкратические наблюдательные системы”, *Оптический журнал*, №3, с. 69-76, 1994.

УДК 681.758

## **ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРА**

*Колобродов В. Г.*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

*E-mail: [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net)*

Оптичні методи і пристрої обробки інформації займають значне місце в інформаційних системах різного призначення. Головним елементом таких пристроїв є когерентний оптичний спектроаналізатор (КОС), який призначений для просторово-частотного аналізу двовимірних сигналів (зображень). Узагальнена схема КОС складається із чотирьох компонентів: освітлювальної лазерної системи, пристрою вводу сигналу, фур'є-об'єктива і реєстратора вихідного сигналу. Оптичні спектроаналізатори, в яких пристрої вводу і виводу сигналів мають матричну структуру називаються цифровими.

Метою представленого дослідження є розробка фізико-математичної моделі цифрового оптико-електронного спектроаналізатора, в якому вхідний сигнал модулюється просторово-часовим модулятором світла, а вихідний сигнал реєструється матричним приймачем випромінювання з подальшою комп'ютерною обробкою. На основі цієї моделі отримані вирази для розрахунку імпульсного відгуку і передавальної функції спектроаналізатора, які дозволяють аналізувати і оп-

тимізувати його основні характеристики.

Дослідження розробленої моделі КОС показало, що

1. Використання в якості пристрою вводу сигналу просторово-часового модулятора світла дозволяє істотно розширити можливості таких приладів для вимірювання спектрів динамічних просторових сигналів.

2. Модель спектроаналізатора дозволила з'ясувати особливості використання матричних модуляторів світла в спектроаналізаторах, а саме:

2.1. Розподіл амплітуди світлового поля в площині спектрального аналізу КОС є сума дифракційних максимумів, які залежать від спектру досліджуваного сигналу, що спотворений імпульсним відгуком спектроаналізатора. Положення максимумів визначається періодом матричної структури модулятора, а їх ширина – розміром модулятора.

2.2. Мінімальні спотворення при вимірюванні спектра сигналу будуть в тому випадку, коли в формуванні розподілу амплітуди поля в площині аналізу приймає участь тільки максимум нульового порядку.

2.3. Дифракційна ефективність кожного максимуму визначається відношенням площі прозорої частини пікселя до його повної площі.

*Ключові слова:* когерентний оптичний спектроаналізатор, просторовий модулятор світла.

UDC 535.31

## MATHEMATICAL DESCRIPTION OF SAMPLED IMAGING SYSTEM

*Volodymyr Borovytsky*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)*

The paper presents the mathematical description of a digital camera as an analog-digital-analog imaging system. This description considers its channel as a sequence of the linear spatial filters of two-dimensional (2D) signals. The channel contains an optical system as a low frequency analog filter, a focal plane array as a low frequency analog filter with spatial and amplitude discretization and noise generation, a digital linear filter which has to amplify the high frequency harmonics and a restoration unit that plays a role of a 2D interpolator. The proposed mathematical apparatus is useful for proper selection of a digital camera that guarantees the maximal field of view with absence of image distortions. The terms like optimal, non-sufficient and non-useful (void) linear magnification are expanded from a visual microscopy to digital cameras. This mathematical description is also useful for selection of a microscan driver and a digital filter.

The signal transformations of deterministic and random signals can be described in a space of spatial frequencies in the following form:

$$U(u_X, u_Y) = k_M \cdot L(u_X, u_Y) \cdot H_O(u_X, u_Y, u_O) \cdot H_{FPA}(u_X, u_Y, x_E, y_E) \cdot H_F(u_X, u_Y, k_{FPA} \cdot \Delta x, k_{FPA} \cdot \Delta y) \cdot H_R(u_X, u_Y, k_{FPA} \cdot \Delta x, k_{FPA} \cdot \Delta y)$$

where  $u_X, u_Y$  - the spatial frequencies recalculated to the image plane;  $L, U(u_X, u_Y)$  – the spatial spectrums of the input signal as the 2D distribution of radiance and the analog (restored) version of the output signal, respectively;  $k_{FPA}$  – the coefficient that takes into account microscanning (subpixel shifts) during an image capture;  $H_O, H_{FPA}, H_F, H_R$  – the complex transfer functions of the optical system, the focal plane array, the digital filter and the restoration unit, respectively;  $x_E, y_E, \Delta x, \Delta y$  – the dimensions and the spatial period of photosensitive cells along axes X and Y, respectively;  $u_O, u_{NX}, u_{NY}$  – the optical cutoff frequency and the Nyquist frequencies along axes X and Y, respectively:  $u_O = 2(NA/\lambda)$ ,  $u_{NX} = 1/(k_{FPA} \Delta x)$ ,  $u_{NY} = 1/(k_{FPA} \Delta y)$ ;  $\lambda, NA$  – the wavelength and the numerical aperture of the microscope optics in an object space, respectively. The optical cutoff frequency is calculated based on Abbe theory. The Nyquist frequencies in an object plane specify the spatial bandwidths of the focal plane array as a 2D periodical structure of photosensitive cells. They depend on the spatial periods and the microscan driver.

*Keywords:* sampled imaging system, digital camera, optical transfer function, modulation transfer function, optical system, focal plane array, microscan, digital filter.

УДК 535.31 681.7

## МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ

*Кравченко І. В.*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

*E-mail: [ooep@kpi.ua](mailto:ooep@kpi.ua)*

В багатьох випадках інформація про стан об'єкта вимірювання витягується посереднім методом. Первинним параметром при цьому виступають координати зображення точкового об'єкту. Зображення приймається багатоелементним фотоприймачем або одноелементним фотоприймачем зі скануванням та дискретизацією відліків для цифрової обробки. На такому принципі побудовані оптико-електронні системи визначення положення, орієнтації та параметрів руху, визначення стану речовин в хімічній, фармацевтичній та інших галузях.

Розроблені робочі алгоритми та проведено комп'ютерне моделювання визначення координат зображення точкового джерела пороговим, спектральним методами та методом Пауелла з метою оцінки методичних похибок та швидкості обчислювальних алгоритмів обробки.

Методична похибка досліджених методів є систематичною та періодичною з періодом, який дорівнює кроку дискретизації  $\Delta x$ .

Пороговий метод має пікове значення методичної похибки  $0,8\Delta x$  та є найшвидшим. Швидкість обчислень є більшою за швидкість спектральних методи в (3-5) разів та більшою за швидкість методу Пауелла в (6-7) разів.

Метод Пауелла має пікове значення методичної похибки  $0.03\Delta x$ . Швидкість обчислень є найменшою серед досліджених методів. Час обчислення є більшим за час спектральних методів в (1,2 – 1,6) разів, більшим за час порогового методу майже в 6 разів. Оптимальним значенням порогу ітераційного циклу є 0,1. Зменшення порогу не призводить до збільшення точності знаходження координат зображення.

Спектральні методи забезпечують найбільшу точність з піковим значенням методичної похибки  $0,0004\Delta x$ . Вважається, що метод Герцеля потребує меншої кількості математичних операцій по відношенню до класичного методу дискретного перетворення Фур'є. Експеримент показав, що за умови використання однієї основної гармоніки спектра, метод Герцеля не є швидшим. Час обробки є більшим за час перетворення Фур'є в (1,2 – 1,6) разів. Координати зображення розраховуються через фазу основної гармоніки. Стандартні вбудовані можливості мов програмування для розрахунку зворотного тангенсу не є достатніми для розрахунку координат положення зображення. Розроблений алгоритм дозволяє проводити обчислення координат на всьому діапазоні вибірки сигналу.

*Ключові слова:* координати зображення, методична похибка, цифрова обробка зображень.

УДК 623.4.012

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОПРИЁМНИКА НА ОСНОВЕ АНТИМОНИДА ИНДИЯ В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

*Кузнецов М. С., Колобродов В. Г.  
КПИ им. Игоря Сикорского, Киев, Украина*

В оптико-электронных системах поиска и автосопровождения цели по её ИК-излучению приёмник выступает звеном, определяющим тактические характеристики изделия в целом. В частности, таковыми выступают пространственная разрешающая способность и дальность обнаружения объекта.

Разрешающая способность определяется геометрическими размерами пикселя приёмника и фокусным расстоянием объектива, а дальность обнаружения ограничена собственными шумами полупроводника.

Современные приёмники на основе антимолибдита индия (InSb) являются многоэлементными с пикселями малых размеров, что позволило достичь компромисса между размерами фокусирующей оптики и мгновенным полем зрения. При охлаждении таких приёмников до температуры жидкого азота они имеют высокую обнаружительную способность в диапазоне (3 – 5) мкм, что прекрасно сочетается с полосой пропускания атмосферы.

Фокусирующая оптика проектируется таким образом, что диаметр пятна рассеивания должен оптимально вписаться в геометрический размер пикселя. При превышении размера пятна снижается уровень электрического сигнала,



поскольку некоторая часть световой энергии не попадает на фоточувствительную плоскость. При меньшем значении диаметра часть площади фотодетектора остаётся незасвеченной, что является источником шума.

Угловая скорость рамки сканирующей системы в большей степени определяет длительность импульса фототока детектора, а яркость пятна рассеивания – амплитуду.

Следующим очень важным звеном системы обработки видеосигнала является оптимальный селективный усилитель-фильтр, выбор параметров которого заключается в определении полосы пропускания.

Нами была разработан метод расчета максимальной дальности обнаружения объекта оптико-электронной системой, установленной на летательном аппарате.

*Ключевые слова:* оптико-электронной системой наблюдения, антимонид индия, максимальная дальность обнаружения.

UDC 534.42

## DIFFRACTION EFFICIENCY OF POLYCHROMATIC DIFFRACTIVE LENS

*Ievgenii Siryi*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [jump.to.sun@gmail.com](mailto:jump.to.sun@gmail.com)*

The thesis presents the diffraction efficiency investigation of the polychromatic diffractive lens (DL). Such element can form an image like a refractive lens. Also DL can be used for an aberration correction of refractive optical systems. It can perform a color correction, athermalization and spherical aberration correction. But the diffraction efficiency of DL in a wide spectral range strongly depends on a wavelength. Therefore, it is very important to design such elements with maximum polychromatic diffraction efficiency.

The diffraction efficiency  $\eta$  of DL in the  $n$ -th diffraction order can be calculated as:

$$\eta = \sin^2(\alpha - n),$$

where  $\alpha = \lambda_0/\lambda$  is the phase delay coefficient,  $\lambda_0$  is the design wavelength,  $\lambda$  is the specific wavelength for which the diffraction efficiency is calculated. Thus, the polychromatic diffraction efficiency  $\eta_{\text{poly}}$  in the spectral range  $\lambda_2 \dots \lambda_1$  can be calculated as:

$$\eta_{\text{poly}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sin^2\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - n\right) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

Using a simplified approach, it was obtained that in case when  $\lambda_0 = 2n\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$  the polychromatic diffraction tends to a maximum.

In the table below design wavelengths and polychromatic diffraction efficiencies in the first diffraction order for several spectral ranges are shown.

№	Spectral range, microns	$\lambda_0$ , microns	$\eta_{\text{poly}}$ , %
1	0,39..0,7	0,5	91
2	3..5	3,75	93
3	8..12	9,6	95,5

The obtained data shows that the diffraction efficiency is sufficiently high. Therefore, the theoretical DL image quality isn't strongly impaired by the background from non-working diffractive orders. But it is necessary to take into account that the diffraction efficiency of non-working diffractive orders will be higher due to manufacturing errors.

*Keywords:* diffractive lens, diffraction efficiency.

УДК 535.6, 535.41

## ПОНЯТТЯ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ СИНГУЛЯРНОЇ ОПТИКИ

*Богатирьова Г. В.*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

*E-mail: [hhal@i.ua](mailto:hhal@i.ua)*

Розглянуто передумови та історію становлення кореляційної сингулярної оптики. Визначено перспективні області застосувань сингулярної оптики у науці та техніці.

Центральним об'єктом дослідження сингулярної оптики у 80-90ті роки ХХ сторіччя були скалярні світлові поля з точками чи лініями нульової амплітуди, фаза в околі яких є невизначеною (сингулярностями хвильового фронту), і поляризаційні сингулярності в векторних (псевдо деполаризованих) світлових полях.

Основні засади когерентної сингулярної оптики (як скалярної [1], так і векторної [2]) дали поштовх для наступних досліджень фазових сингулярностей у частково когерентних (у просторі та часі) та поліхроматичних світлових полях [3,4], що призвело до становлення кореляційної сингулярної оптики. Показано, що кореляційна сингулярна оптика має набагато глибше коріння, піднімаючись до "до-сингулярної" і навіть до-лазерної епохи і пов'язана з концепцією часткової когерентності та поляризації. Кореляційна сингулярна оптика в сучасній інтерпретації містить в собі стандартну когерентну сингулярну оптику, а отже засновниками сучасної кореляційної сингулярної оптики можна вважати Е. Вольфа та Б.Томпсона [5].

В полях з гвинтовими фазовими сингулярностями відбувається циркуляція потоку світла, що створює оптичний вихор. Властивості таких вихорів знаходять застосування в малоінвазивній техніці переносу мікрочасток ("оптичний пінцет") [6]. Знаючи локалізацію та ознаки гвинтових дислокацій, можна передбачити поведінку параметрів поля у всіх інших областях, що забезпечує зменшення необхідного інформаційного вмісту [7] сингулярно-оптичної систе-



ми, в якій відбувається кодування сигнального пучка.

*Ключові слова:* сингулярність, фотоніка, кореляційна оптика.

#### **References**

- [1] I. Freund and N. Shwartsman, “Wave-field singularities: the sign principle”, *Phys. Rev.* 50, pp. 5164-5172, 1994.
- [2] I. I. Mokhun, “Introduction to Linear Singular Optics”, in *Optical Correlation: Techniques and Applications*, ed. O. Angelsky, SPIE Press, Bellingham, 2007, pp. 1-131.
- [3] P. V. Polyanskii, Ch. V. Felde and A. A. Chernyshov, “Polarization degree singularities”, *Proc. SPIE*, 2009, 7388 0A, pp. 1-13.
- [4] M. S. Soskin and P. V. Polyanskii, “New polarization singularities of partially coherent light beams” in *Proc. SPIE*, 2010, 7613 0G, pp. 1-11.
- [5] E. Wolf and B. Thompson, “Two-beam interference with partially coherent light”, *J. Opt. Soc. Am.* 47, pp. 895-902, 1957.
- [6] A. Popiołek-Masajada, J. Masajada, M. Szatkowski, “Optical vortex microscope with the simple phase object”. *Proc. SPIE 10612*, in *Thirteenth International Conference on Correlation Optics*, 1061204 (18 January 2018). 2018.
- [7] O. V. Angelsky, M. P. Gorsky, S. G. Hanson, V. P. Lukin, I. I. Mokhun, P. V. Polyanskii, and P. A. Ryabiy, “Optical correlation algorithm for reconstructing phase skeleton of complex optical fields for solving the phase problem”, *Opt. Expr.* 22, pp. 6186-6193, 2014.

УДК 519.6

## **РЕАЛІЗАЦІЯ БАГАТОПОТОЧНОСТІ ПІД ЧАС АВТОМАТИЗОВАННОГО РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ**

*Сокурєнко В. М., Сокурєнко О. М.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

Розробка складних багатокomпонентних оптичних систем (ОС) особливо зі змінними параметрами засобами глобальної оптимізації та автоматизований розрахунок допусків на їх параметри потребують значних обчислювальних ресурсів та часу, який може перевищувати десятки годин. Враховуючи сталу тенденцію до збільшення кількості ядер (та й відповідно потоків) в сучасних комп'ютерних процесорах, раціонально було б максимально задіяти можливості паралельних обчислень під час зазначених розрахунків.

Програмна реалізація багатопоточності вимагає чіткої синхронізації окремих потоків, уникнення зайвої паралелізації та виклику підпрограм, небезпечних для потоків, а також максимального обмеження звертань до спільних даних. В свою чергу, під час проектування ОС ця задача ускладнена ще й тим, що:

- тривалість розрахунку променів та оцінки системи є, в загальному випадку, різною для різних потоків;
- зміна конструктивних параметрів системи потребує перерахунку всіх інших параметрів системи;
- частина внутрішніх параметрів глобального оптимізатора повинна бути спільною для всіх потоків.

В даній роботі удосконалено сучасний алгоритм диференційної еволюції Коші в напрямку підтримки багатопоточності під час глобальної оптимізації довільних ОС. Розроблена авторами доповіді комп'ютерна програма дозволяє провести в автоматизованому режимі параметричний синтез практично довільної ОС з урахуванням кількості потоків, апаратно доступній в комп'ютерній системі. Задача вибору оптимальної кількості потоків вирішується програмою автоматично без участі користувача.

Для забезпечення багатопоточності використано засоби бібліотеки паралельних задач Microsoft TPL (Task Parallel Library) та малу кількість блокувальників потоків для коректного доступу до спільних даних і належної синхронізації потоків. Розроблений пул оптичних систем дозволив зменшити часові втрати завдяки уникненню необхідності частого копіювання даних.

Перевагами розробленого алгоритму є його універсальність, незалежність від кількості та типу пошукових параметрів, можливість розрахунку асферичних ОС зі складними оціночними функціями з урахуванням заданих користувачем граничних обмежень на конструктивні параметри, габаритні розміри, значення аберацій тощо.

В доповіді розглянуто особливості програмної реалізації багатопоточності та продемонстровано ефективність паралельних обчислень на приладах розрахунку довільних ОС.

*Ключові слова:* оптична система, багатопоточність, багатоядерний процесор.

UDC 534.42

## OPTICAL PERFORMANCE OF MULTI-ORDER POLYCHROMATIC DIFFRACTIVE LENSES

*Ievgenii Siryi*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [jump.to.sun@gmail.com](mailto:jump.to.sun@gmail.com)*

The thesis presents the investigation of optical performance of multi-order diffractive (MOD) lenses in a wide spectral range. As it is well known, a MOD lens in contrast to a one-order diffractive lens introduces a phase delay of  $2\pi p$  for light with a design wavelength, where  $p$  is an integer and  $p > 1$ . This leads to the fact that several wavelengths from a given spectral range are focused to a single focal point.

The modeling of MOD lens with the design wavelength  $\lambda_0$  of  $10\mu\text{m}$ , the design focal length  $f_0$  of  $50\text{mm}$  and  $p = 12$  is carried out. Using the equation  $\lambda = p\lambda_0/n$ , where  $n$  is the diffraction order, specific wavelengths can be calculated. These wavelengths can be focused to a single focal point with theoretical diffraction efficiency of 100% ( $8\mu\text{m}$ ,  $8,571\mu\text{m}$ ,  $9,231\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ,  $10,909\mu\text{m}$ ,  $12\mu\text{m}$ ). And other wavelengths from a given spectral range are distributed almost between two diffraction orders. Using the equation of the diffraction efficiency:

$$\eta = \sin^2(\alpha p - n),$$

where  $\alpha = \lambda_0/\lambda$  is the phase delay coefficient, the diffraction efficiency of the specific wavelength  $\lambda$  can be calculated in the  $n$ -th diffractive order. Thus, by changing the parameter  $p$ , both the number of focal points (one or two) and the diffraction efficiency in these points for each wavelengths can be controlled.

The equation for calculation the wavelengths  $\lambda$  which MOD lens focuses to two diffraction orders  $(n_k, n_{k-1})$  with the same diffraction efficiency is suggested:

$$\lambda = \frac{2\lambda_0 p}{n_k + n_{k-1}}.$$

In the table below calculated wavelengths and suitable diffraction orders for modeled MOD lens are shown. Each wavelength is focused to two diffraction orders with a theoretical diffraction efficiency of 40,5%.

Wave-length, $\mu\text{m}$	8,276	8,889	9,600	10,435	11,429
Diffraction orders	15 and 14	14 and 13	13 and 12	12 and 11	11 and 12

Therefore, the MOD lens can be used as an achromatic bifocal element. The axial position of the focal points is individual for each wavelength. Thus, such lens focuses all wavelengths to an axial line. Each point of line has a unique set of several wavelengths.

*Keywords:* multi-order diffractive lens, diffraction efficiency.

UDC 621.382

## INFRARED SURVEILLANCE IMAGERS APPLICATION

*Mykytenko V. I.*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua](mailto:v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua)*

One of the urgent problems of optoelectronic systems design for remote monitoring in the infrared (IR) spectral range is to provide variable magnification. Typically, the magnification value is determined by the best size of the field of view when objects are detected and recognized. The wide field of view is usually  $4^\circ - 8^\circ$ , and the narrow field is  $1^\circ - 2^\circ$ . That is, the required variable magnification is within  $4^x$ . Design of an IR optical system with a zoom factor of 4 is possible in several variants: the use of a lens with variable focal length, the use of a lens and a replaceable afocal attachment, the use of two lenses operating alternately.

The second version of the solution of this problem is analyzed in the report. Namely, the design of the telescopic attachment, which is installed before the IR transmitting camera. The possibilities of two telescopic systems - Kepler and Galileo - are analyzed. In principle, these systems can provide not two, but three fields of

view. The third field is obtained with the vertical position of the attachment relative to the optical axis of the main lens. Two aspects of the technical solution quality were considered: the energy sensitivity and the dimensions of the system. Since a radiation detector is supposed to use a microbolometer matrix with a wide spectral range of sensitivity, the threshold irradiation of the entrance pupil was calculated using the simplified formula

$$E_{th} = \frac{1}{4} \left( \frac{D_p}{f'_{OS}} \right)^2 \tau_{OS} \sigma T^4,$$

where  $D_p$  - diameter of the entrance pupil,  $f'_{OS}$  - focal length,  $\tau_{OS}$  - the transmittance of the optical system with regard to vignetting,  $\sigma$  - the Stefan-Boltzmann constant and  $T$  is the temperature of an object.

As it was expected, greatest impact on the magnitude  $E_{th}$  had  $D_p$  and  $\tau_{OS}$ . For Galileo systems, the permissible values of these parameters substantially increase the transverse dimensions of the optical system. However, in general, for use in terrestrial technology, taking into account the need to rotate the attachment 180°, such a system may be preferable.

*Keywords:* optical-electronic surveillance, infrared optical system, detection and recognition of objects.

УДК 617.741-077.21

## МЕТОД ТА АПАРАТНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ПРИОПЕРАЦІЙНОЇ БІОМЕТРІЇ ОКА

*Чиж І. Г.*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

*E-mail: [i.g.chizh@gmail.com](mailto:i.g.chizh@gmail.com)*

Передопераційна біометрія ока – процедура підготовки пацієнта до хірургії катаракти. Мета біометрії – збір інформації про геометричні параметри оптичної системи ока, враженого катарактою. На її основі визначають потрібну оптичну силу інтраокулярної лінзи (ІОЛ), що підлягає імплантації в око на заміну патологічного кришталіка. Головними даними біометрії є кривизна поверхні рогівки, глибина передньої камери та осьова довжина ока. Якщо перші два параметри сучасними засобами вимірюються достатньо точно, то вимірювання осьової довжини супроводжується похибками, які можуть суттєво вплинути на точність визначення оптичної сили ІОЛ. Наслідком є суттєве відхилення післяопераційної рефракції ока від планової, що є для пацієнта кращою. Через це йому доводиться використовувати не одну пару додаткових окулярів, що вважається негативним результатом імплантації.

В доповіді міститься аналіз сучасних методів та принципів дії апаратних засобів для доопераційної біометрії ока з викриттям їх переваг та недоліків. Особлива увага приділена методу та новітній апаратурі, що дозволяє здійснювати

приопераційну додаткову біометрію ока після видалення кришталика з метою досягнення найкращого післяопераційного результату. Вказано на те, що аберометричний метод біометрії, закладений у принцип дії такої апаратури, не можна вважати оптимальним через великий вплив на результати вимірювань оптичних та геометричних змін у ока з видаленим кришталиком в порівнянні з його доопераційним станом. В першу чергу це стосується оптичної неоднорідності оптичних середовищ ока та можливої деформації рогівки під дією штучного тиску, який використовується при операції для утримання геометричної форми очного яблука.

Пропонується новий метод приопераційної біометрії ока, заснований на використанні тривимірної мікрофотометрії зображення освітленої мікрозони макули, сформованого афакічним оком у зворотному від сітківки напрямку. Наводяться дані про апаратний засіб, що дозволяє реалізувати цей метод. Викладено порядок реалізації приопераційної біометрії вказаним методом з метою уточнення даних про значення оптичної сили та сфероциліндричності ІОЛ, що підлягає імплантації в око конкретного пацієнта.

Теоретичне обґрунтування методу та попередні результати експериментальних досліджень апаратного засобу, що реалізує метод, дозволяють стверджувати про його ефективність та перспективність.

*Ключові слова:* приопераційна біометрія ока, біометрія афакічного ока, оптична сила інтраокулярної лінзи

УДК 621.384.3

## ВИКОРИСТАННЯ ПІРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ КОНТАКТНОГО ДРОТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

*Кучеренко О. К., Томашевська А.*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

*E-mail: [oleg.k.kucherenko@gmail.com](mailto:oleg.k.kucherenko@gmail.com), [devineska96@gmail.com](mailto:devineska96@gmail.com)*

При експлуатації залізничного транспорту внаслідок тертя відбувається знос контактного дроту. Якщо не проводити постійний моніторинг контактних мереж то це може привести до обриву контактного дроту, спричинити аварії і навіть більш тяжкі наслідки, оскільки дріт знаходиться під напругою до 30 кв.

Для оцінки стану контактного дроту використовуються тіньові, проєкційні, лазерні, тепловізійні, пірометричні методи. Можливість використання двох останніх методів пов'язана з тим, що в місцях зносу зменшується поперечний переріз контактного дроту і, як наслідок, провід перегрівається. Допустимі температури перегріву приведені в [1]. Тепловізійний метод контролю ґрунтується на аналізі теплового зображення контактного дроту і розглянутий в роботі [1]. Недолік цього методу полягає в тому, що при можливих пересуваннях контактного дроту вздовж вісі контролюючої оптичної системи тепловізора

змінюється вихідний сигнал тепловізора, а це впливатиме на результати моніторингу. Практика показує, що ці пересування можуть бути значними особливо в місцях де залізнична колія змінює напрямок руху.

Пірометричний метод контролю температури перегріву контактного дроту може проводитися двома типами пірометрів: радіаційним або пірометром спектрального співвідношення. В доповіді розглянуті результати дослідження що до використання пірометра спектрального співвідношення для моніторингу стану контактної дроту залізничного транспорту. Основна перевага такого пірометра полягає в тому, що при контролі температури він нечутливий до зміни положення джерела теплового випромінювання, інших шкідливих факторів супроводжуючих процес вимірювання, наприклад стану атмосфери. Принцип вимірювання такого пірометра полягає в визначенні співвідношення сигналів, що сформовані двома приймачами працюючими в різних спектральних діапазонах. Оскільки обидва приймачі працюють в однакових умовах то співвідношення сигналів при зміні зовнішніх факторів майже не змінюється.

В доповіді приведена методика розрахунку вихідного сигналу пірометра спектрального співвідношення для реальних умов роботи датчика при можливих температурах перегріву, випромінюючої здатності об'єкта дослідження, його положення по відношенню до вхідної зони об'єктива, стану атмосфери. Результати дослідження підтвердили переваги використання пірометра спектрального співвідношення для вирішення поставленого завдання.

*Ключові слова:* знос дроту контактної мережі; допустима температура перегріву; метод контролю пірометром спектрального співвідношення.

#### **Література**

- [1] О. К. Кучеренко, Н. А. Рыжков, “Определение выходного сигнала тепловизора при контроле перегрева провода контактных сетей железных дорог”, *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування*, Вип. 53 (1), с.11–15, 2017.

УДК 681.78

## **ВПЛИВ КУТІВ ВІЗУВАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ТА ТЕЛЕВІЗІЙНИХ КОСМІЧНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА ЛІНІЙНЕ РОЗДІЛЕННЯ НА МІСЦЕВОСТІ**

<sup>1)</sup>Колобродов В. Г., <sup>1,2)</sup>Пінчук Б. Ю.

<sup>1)</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

<sup>2)</sup>Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ, Україна  
E-mail: [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net), [pinchuk.brus@gmail.com](mailto:pinchuk.brus@gmail.com)

Світовий ринок даних супутникової зйомки з високою роздільною здатністю постійно розширюється, що в свою чергу говорить про актуальність в необхідності оперативного моніторингу Землі з космосу, тобто застосування дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1]. На сьогодні, однією із основних характеристик, за якою у всьому світі оцінюють ефективність сканера для ДЗЗ, явля-

ється лінійне розділення на місцевості (ЛРМ). Іншими словами, ЛРМ це здатність сканера космічного апарату (КА) виявляти і розпізнавати об’єкти, які знаходяться на земній поверхні (ЗП). Отже, якість отриманого зображення оцінюється модуляційною передавальною функцією (МПФ) оптико-електронного каналу ДЗЗ.

Головна проблема полягає в тому, що при відхиленні осі візування сканера КА від надиру, проекція матричного приймача випромінювання (МПВ) на ЗП може суттєво деформуватися [2]. Окрім деформації проекції МПВ, важливим фактором, від якого залежить якість формування зображення, є швидкість і вектор напрямку переміщення підспутникової точки КА.

Мета нашого дослідження полягала в розробці фізико-математичних моделей для розрахунку МПФ телевізійних та тепловізійних систем спостереження, за допомогою яких визначатиметься ЛРМ при відхиленні сканера КА від надиру. Дані фізико-математичні моделі враховують такі параметри як: орбітальну висоту і траєкторію орбіти; кількість пікселів МПВ; період та коефіцієнт заповнення пікселів; зміщення МПВ в фокальній площині; фокусну відстань об’єктива; кривизну Землі та розташування КА; кути візування (тангаж, крен, рискання); послідовність відхилення за кутами візування «тангаж-крен» і «крен-тангаж»; швидкість КА на орбіті і обертання Землі; частота МПВ і т.д. Оцінюючи МПФ і ЛРМ, можна детально проаналізувати і виявити негативні фактори впливу та запропонувати методи, які б дозволили підвищити якість зображення.

*Ключові слова:* телевізійні та тепловізійні системи спостереження, кути візування, модуляційна передавальна функція, лінійна роздільна здатність на місцевості.

#### **Література**

- [1] Dowman, I., et al., «High Resolution Optical Satellite Imagery». – Whittles Publishing, 2012, 230 pp., ISBN 978-184995-046-6.
- [2] V.G. Kolobrodov *et al.*, «Spatial resolution of the remote sensing system when changing the angle of sighting», *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 1, pp. 54-64, 2018, doi: 10.20535/1810-0546.2018.1.111880 (in Ukrainian).

УДК 501.508

## **МНОГОЧАСТОТНОЕ ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

*Хомич В. В., Лысенко С. А., Кугейко М. М.  
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
E-mail: [kugeiko@bsu.by](mailto:kugeiko@bsu.by)*

Для количественной оценки степени влияния аэрозоля на изменение климата создаются и успешно функционируют глобальные и региональные сети дистанционного зондирования атмосферы. Настоящая работа посвящена решению задачи восстановления оптических и микрофизических параметров аэрозоля в атмосфере из сигналов многочастотного лидара. Задача решается в рамках



предположений об атмосферном аэрозоле, используемых в современных наземных сетях его мониторинга, но без привлечения дополнительных средств оптического зондирования.

Предложен метод решения обратной задачи многочастотного лидарного зондирования атмосферного аэрозоля, позволяющий восстанавливать пространственные распределения объемных концентраций аэрозольных компонентов, интегральное по трассе зондирования распределение аэрозольных частиц по размерам и комплексный показатель преломления частиц, без каких-либо дополнительных данных для калибровки лидара и для доопределения обратной задачи. Метод основан на предположении, что средние размеры, дисперсии размеров и комплексные показатели преломления частиц каждой аэрозольной компоненты не меняются вдоль трассы зондирования, а количество спектральных каналов лидара больше количества аэрозольных компонентов. В этом случае система уравнений для спектрально-пространственных отсчетов лидарного сигнала оказывается переобусловленной и ее численное решение позволяет определять не только микрофизические параметры аэрозоля, но и калибровочные константы лидара на его рабочих длинах волн. Приведены примеры обработки лидарных сигналов упругого и комбинационного рассеяния модельной аэродисперсной среды на длинах волн  $\lambda_0 = 0,355, 0,532, 1,064$  мкм и  $\lambda_R = 0,387, 0,607$  мкм соответственно. Показано, что микрофизические параметры мелкодисперсной компоненты аэрозоля (с размерами до 1–2 мкм) восстанавливаются из сигналов с погрешностями  $< 10\%$ , а погрешности определения микрофизических параметров грубодисперсных частиц существенно зависят от величины их вклада в оптическое пропускание среды. Коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния, рассчитываемые по восстановленным микрофизическим параметрам аэрозоля, отличаются от их фактических значений на единицы процентов.

*Ключевые слова:* аэрозоль, оптические параметры, микрофизические параметры, многочастотное зондирование, обратная задача, бескалибровочный метод.

#### **Литература**

- [1] А. П. Чайковский, А. П. Иванов, Ю. С. Балин и др., *Оптика атмосферы и океана*, Т. 18, № 12, с. 1066–1072, 2005.

УДК 621.384.3

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФАЗИ СУБДИСКРЕТНОГО ТЕПЛОВІЗОРА**

*Луцюк М. М., Колобродов В. Г.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
E-mail: [thermo@ukr.net](mailto:thermo@ukr.net)*

Для визначення мінімальної сприймаючої різниці температур MTDP (Minimum Temperature Difference Perceived) всі вимірювання проводяться за оптимальною фазою, а для розрахунку використовується середня модуляція при опти-



мальній фазі АМОР (average modulation in optimum phase) – середня різниця сигналу в зображенні тест-об’єкта та тестового шаблону, який розташований також в оптимальній фазі. Оптимальна фаза – це положення зображення міри, коли кількість штрихів у дискретному зображенні є максимальною.

Для визначення середньої модуляції при оптимальній фазі  $AMOP(v_x)$  спільно з КП СПБ «Арсенал» були проведені лабораторні дослідження. Була розглянута штрихова міра ПР5-121-1-02, при температурі фону 35,69°C та температурі об’єкта 21,76 °C. Розмір пікселя 25 мкм, ширина зображення штриха міри Фуко на матриці 25 мкм.

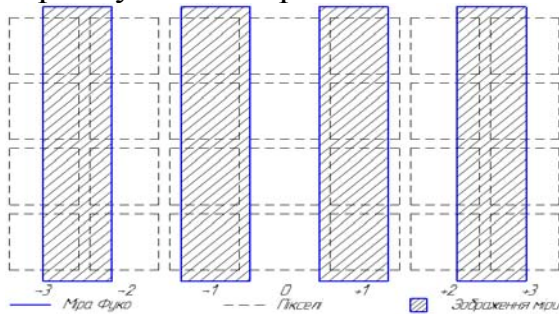


Рис. 1. Відносне розташування зображення штрихової міри та матриці в оптимальній фазі

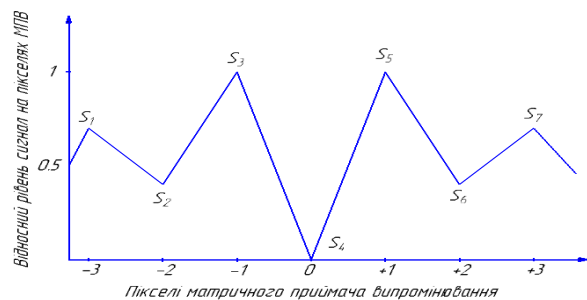


Рис. 2. Відносний рівень сигналу на пікселях МПВ:

$S_1, S_3, S_5, S_7$  – максимуми сигналу

$S_2, S_4, S_6$  – мінімуми сигналу

Положення зображення міри на поверхні матричного приймача випромінювання при оптимальній фазі представлено на рис.1. Сигнал на виході МПВ наведено на рис.2.

За середню модуляцію при оптимальній фазі слід брати не середню різницю сигналів, а контраст, тобто:

$$AMOP \equiv \frac{\bar{S}_{\max} - \bar{S}_{\min}}{\bar{S}_{\max} + \bar{S}_{\min}},$$

де  $\bar{S}_{\max}, \bar{S}_{\min}$  - середнє значення максимумів та мінімумів сигналу відповідно в оптимальній фазі.

*Ключові слова:* субдискретний тепловізор, мінімальна сприймаюча різниця температур, оптимальна фаза, середня модуляція при оптимальній фазі.