

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

УДК 535.317

**ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЕ АФОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ИЗ ВНЕОСЕВЫХ ЗЕРКАЛ**

<sup>1)</sup>Артюхина Н. К., <sup>1,2)</sup>Пероса Лаура

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

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

E-mail: art49@mail.ru, lauravictorup3@gmail.com

В целом ряде аспектов зеркальные системы обеспечивают превосходную производительность по сравнению с линзовыми системами и более низкие дефекты изображения, возникающие из-за хроматических аберраций. Существенный их недостаток – центральное экранирование входного зрачка – приводит к снижению качества изображения.

В настоящей работе проведено исследование по использованию внеосевых частей зеркал в афокальных схемах с целью устранения центрального экранирования (рис. 1). Базовыми схемами для данных композиций приняты канонические системы Грегори и Кассегрена [1].

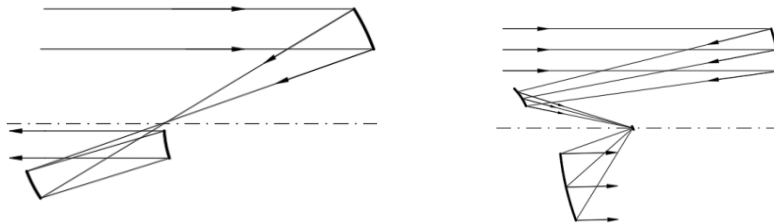


Рис 1. Афокальные системы из трех внеосевых зеркал

Составлены алгоритмы расчета афокальных систем с анастигматической коррекцией аберраций, обладающих удовлетворительными габаритными соотношениями. Созданы схемы без экранирования, в которых входной зрачок  $D$  децентрирован на расстояние  $\tilde{N}m$ , соизмеримое с его размером.

Рассчитаны варианты с различными конструктивными параметрами ( $2\omega = 1^\circ$ ,  $D = 500\text{мм}$  и  $250\text{мм}$ ). Проведено компьютерное моделирование в программных средах *Opal* и *Zemax*.

В разработанных системах аберрации децентрировки малы; виньетирование наклонных пучков для используемых угловых полей можно устранить за счет увеличения расстояния  $\tilde{N}m$  и диаметров зеркал. Виньетирование в системах различно в зависимости от типа базовой схемы.

*Ключевые слова:* зеркальные системы, афокальная схема, коррекция аберраций

### **Литература**

- [1] Н. К. Артюхина, Л. Пероса, «Новые конфигурации афокальных анастигматических систем на основе классических зеркальных модулей Грегори и Кассегрена», *Метрология и приборостроение*. № 2, с. 25–30, 2018.

УДК 681.787

## **ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КПП ОБЪЕКТИВА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ**

<sup>1)</sup>Артюхина Н. К., <sup>2)</sup>Черных И.В., <sup>2)</sup>Самусенко А.А.

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

Минск, Республика Беларусь,

<sup>2)</sup>Открытое акционерное общество “Пеленг”,

Минск, Республика Беларусь

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

В данной работе проводится анализ погрешностей, влияющих на величину точности определения коэффициента передачи модуляции (КПП) объектива путём измерения и анализа волновых aberrаций с помощью интерферометра.

На точность и величину погрешности измерения КПП объектива влияют различные факторы. К неопределённым и неустранимым относятся ошибки, связанные с шумами, вибрациями и воздушными потоками [1]. К определённым – величина aberrаций интерферометра и автоколлимационного зеркала, определения волновых aberrаций, срезания зрачка, расчёта функции размытия точки и КПП. Таким образом, суммарная погрешность измерения выглядит следующим образом:

$$\Delta T_{\text{и}} = \Delta T_{\text{абerr. инт-ра}} + \Delta T_{\text{абerr. зеркала}} + \Delta T_{\text{опред. волн. абerr.}} + \Delta T_{\text{срез. зрачка}} + \Delta T_{\text{расч. ФРТ}} + \Delta T_{\text{расч. КПП}}. \quad (1)$$

После определения величин и суммирования всех составляющих было получено значение:

$$\Delta T_{\text{и}} = 0,031. \quad (2)$$

Установлено, что первые два слагаемых равенства (1) зависят от величин среднеквадратического отклонения (СКО) интерферометра и автоколлимационного зеркала, которые можно получить при их аттестации и контроле; две последние составляющие (1) определяются погрешностью процедуры численного интегрирования и составляют менее, чем 0,1%.

Наибольший вклад в суммарную погрешность вносит погрешность срезания зрачка, которая обусловлена тем, что величина зрачка из-за краевых эффектов при обработке интерферограммы может уменьшаться на величину до 5%.

Таким образом, при измерении КПМ объектива с помощью штатного интерферометра типа Zygo Verifire XPZ снижение измеренного КПМ по сравнению с действительным может достигать величины 0,031.

*Ключевые слова: интерферометр, коэффициент передачи модуляции, волновые аберрации*

#### **Литература**

[1] Г.В. Креопалова, Д.Т. Пуряев, *Исследование и контроль оптических систем*. М.: Машиностроение, 1978.

УДК537.26

## **ЗАХІСТНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ФОТОБІОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ШТУЧНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА**

*Бендеберя Г.М., Маковська О.Г.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна  
E-mail: hennadii.bendeberia@nure.ua, elena.makovskaya@gmail.com*

Відомо, що випромінювання з  $\lambda < 450$  нм шкідливо впливає на сітківку. Особливо небезпечними є спектри випромінювання штучних джерел світла, що використовуються для освітлення та у якості фонового підсвічування в сучасних приладах відображення інформації (дисплеї, медіа проектори), в котрих інтенсивність на базової для захисту зорової системи  $\lambda = 480$  нм суттєво знижено, що призводить до неадекватного регулювання діаметру зіниць для захисту сітківки від надлишку синьої частини спектру.

Найпростіший спосіб індивідуального захисту очей – окуляри із фільтрами, що відрізають короткохвильове випромінювання, і повноцінно захищають очі від ультрафіолетової і синьої частини спектру.

В роботі вирішувалось завдання інженерії плівкової системи на підкладці з метою захисту очей від впливу випромінювання з  $\lambda < 450$  нм.

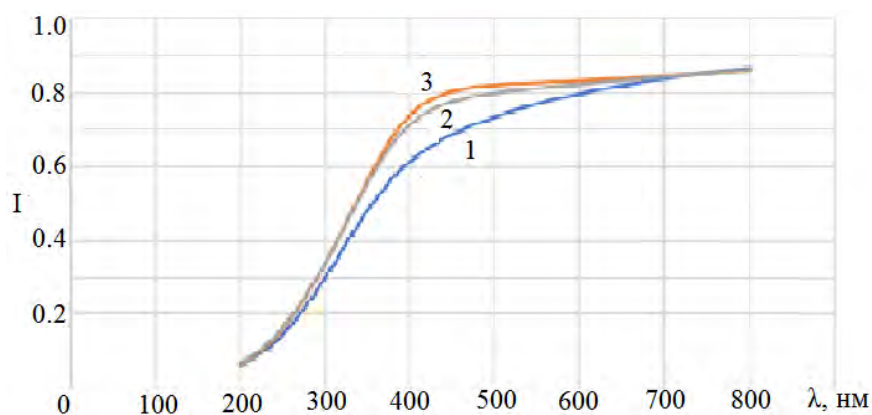


Рисунок 1 – Спектральний коефіцієнт прозорості плівкових систем: SiO (1), SiO та SiO<sub>2</sub> (2), SiO та MgF<sub>2</sub> (3) на скляній підкладці.

Для розрахунку параметрів світлофільтрів було задіяно онлайн ресурс [www.filmetrics.com](http://www.filmetrics.com) та програму OpenFilters, що поширюється за ліцензією GNU. Програма дозволяє користувачу розрахувати фотометричні, фазові, еліпсоїдні, кольорові параметри плівкових систем.

Принагідним основним матеріалом виглядає SiO<sub>2</sub>, адже максимум його коефіцієнту заломлення припадає на УФ-хвилі, та має крутий спад у синьій частині спектру. В якості антивідбиваючих шарів доцільно використовувати MgF<sub>2</sub> або SiO<sub>2</sub>, адже показники заломлення цих матеріалів максимально наближенні до оптимального значення на  $\lambda = 480$  нм

*Ключові слова:* спектр, безпека, фільтр, покриття

УДК 681.37; 520.876

## ДЕННЕ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ’ЄКТІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМИ СИСТЕМАМИ

*Стрількова Т.О., Литюга О.П.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

*E-mail: strelkova\_t@ukr.net, alex\_lyt@ukr.net*

Зростаюча активність людства в освоєнні космосу призвела до утворення на навколосемних орбітах великої кількості так званого космічного сміття, яке є об’єктами штучного походження та їх фрагментами. Астрономічні оптико-електронні системи є одними з основних засобів контролю космічного простору завдяки високій точності визначення кутових координат об’єктів, високим чутливості та пропускну здатності, можливості отримання некоординатної інформації (блиску). Необхідність підвищення ефективності контролю навколосемного простору вимагає збільшення тривалості сеансу спостереження за рахунок використання денного часу. Для досягнення цього необхідно підвищити надійність виявлення сигналів від об’єктів в астрономічних оптико-електронних системах у сутінковий час та забезпечити виявлення в денних умовах.

В докладі наведено аналіз сигналів від космічних об’єктів, денних умов спостереження та процесів формування, реєстрації та виявлення сигналів в астрономічних оптико-електронних системах.

Запропоновано математичну модель сигналів в астрономічних оптико-електронних системах, засновану на сумісному використанні корпускулярних та хвильових властивостей оптичних сигналів [1]. Модель враховує статистичні властивості оптичних сигналів від космічних об’єктів. Наведено аналітичні вирази для середнього значення, дисперсії сигнальної та завадової складових, відношення сигнал/шум та умовних імовірностей правильного виявлення та хибної тривоги.

Обговорюються оптимальні та квазіоптимальні алгоритми виявлення оптичних сигналів від низькоорбітальних космічних об’єктів в астрономічних оптико-електронних системах. Алгоритми побудовані з урахуванням статистич-

них властивостей оптичних сигналів та впливу завадової обстановки сутінкового та денного часу на процес виявлення.

*Ключові слова:* астрономічна оптико-електронна система, космічний об'єкт, денні умови спостереження космічних об'єктів, оптичний сигнал, виявлення оптичних сигналів.

#### **Література**

- [1] T. Strelkova, V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. Strelkov, “Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems”, *Developing and Applying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, pp. 181-206, 2016.

УДК 681.37; 520.876

### **СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ СИГНАЛІВ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ ПРИ РЕЄСТРАЦІЇ НАДСЛАБКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

*Стрількова Т.О., Калмиков О.С., Литюга О.П.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки,*

*Харків, Україна*

*E-mail: strelkova\_t@ukr.net, als1kalmykov@gmail, alex\_lyt@ukr.net*

Метою роботи є побудова статистичної моделі вихідних сигналів в оптико-електронних системах при реєстрації надслабкого випромінювання, яке виникає в біологічних об'єктах в процесі хемілюмінесценції та флюоресценції. Проведення порівняльного аналізу існуючих оптико-електронних методів та систем реєстрації випромінювання з урахуванням інтенсивності та спектру.

Досліди біологічних матеріалів основою яких є реєстрація власного в процесі хемілюмінесценції та вимушеного в процесах флюоресценції випромінювання є досить інформативними. Об'єктами таких дослідів можуть бути однорідні суспензії, такі як кров так і неоднорідні, з довільним групуванням клітинних ліній, тканини внутрішніх органів. Власне випромінювання клітин та тканин обумовлено наступним: реакціями активних форм кисню (довжина хвилі 1270 нм), реакції ланцюгового окислення ліпідів (420-520 нм), реакцій за участю окису азоту (640 нм). Вимушене випромінювання, як слідство поглинанням фотонів світла маркером з подальшим повторним випромінюванням на більшій довжині хвилі.

Реакції хемілюмінесценції реєструюся хемілюмінометами, в основі яких знаходиться фотоелектронний перетворювач, що дозволяє реєструвати випромінювання інтенсивністю 200 фотонів/сек. При дослідженні неоднорідної суспензії, наприклад, фрагменту біологічної тканини, важливими є не тільки часові, а також і просторові характеристики випромінювання.

В докладі обговорюється розроблена статистична модель слабкого оптичного випромінювання на тлі завад. В основі статистичного опису вихідних сигналів лежить закон розподілу дискретних подій, якому притаманні властивості наявності кореляцій між подіями. Стохастичний вихідний сигнал схарактеризо-

вано як нестационарний потік подій, що не має властивостей пуассонівського потоку [1]. Формування випадкової величини – вихідного сигналу оптико-електронних систем – подано у вигляді адитивної суміші сигнальної та шумової складової у різних співвідношеннях.

*Ключові слова:* хемілюмінісценція, слабе випромінювання, оптичний сигнал, виявлення оптичних сигналів.

#### **Література.**

- [1] Т. Стрілкова, «Розвиток стохастико-детермінованої теорії прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах», дис. доктор., наук, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2017.

УДК 538.975

### **OPTIMIZATION OF LAYERS DEPOSITION PARAMETERS IN CuO AND Cu<sub>2</sub>O BASED SOLAR CELLS**

<sup>1</sup>Ivashchenko M.M., <sup>2</sup>Opanasyuk A.S., <sup>2</sup>Diachenko O.V., <sup>1</sup>Buryk I.P., <sup>1</sup>Kuzmin D.V., <sup>3</sup>Čerškus A.,  
<sup>2</sup>Kurinskiy B.

<sup>1</sup>Konotop Institute of Sumy State University, Konotop, Ukraine, <sup>2</sup>Sumy State University, Sumy, Ukraine, <sup>3</sup>Center for Physical Sciences and Technology (CPST), Vilnius, Lithuania  
E-mail: m.ivashchenko@ki.sumdu.edu.ua, opanasyuk\_sumdu@ukr.net, alexey.dyachenko@ukr.net, i.buryk@ki.sumdu.edu.ua, d.kuzmin@ki.sumdu.edu.ua, a\_cerskus@yahoo.com, b.kurinskiy@ukr.net

A numerical simulation of working characteristics of solar cells (SC) such as: open-circuit voltage ( $U_{oc}$ ), short-circuit current density ( $J_{sc}$ ), fill-factor ( $FF$ ) and photo-conversion efficiency ( $\eta$ ) allows determining the optimal physical and technological conditions of SCs layers obtaining. These conditions were absorber layer thickness, window layer thickness, buffer (conduction) layer thickness, operational temperature, impurity concentration, etc. SCs based on the structures ZnO:Al/Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O/CuO and ZnO:Al/Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O/Cu<sub>2</sub>O are chosen by us due to their perspective in optoelectronics and solar energy applications usage.

For numerical simulation the working characteristics of SCs is used SCAPS-3207 programming package. The simulation procedure carried out using the following conditions: four out of five simulation parameters (Cu<sub>x</sub>O absorber layer thickness, Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O layer thickness, magnesium concentration in solid solution, ZnO:Al front charge-carrier contact thickness, operation temperature of device) had a fixed value while one of them was changed. Simulation measurements performed in AM 1.5 light irradiation conditions.

Before the simulation processing it needs to choose the basis simulation parameters such as the absorber, window and conduction layers thicknesses ( $d$ ); layers optical band gap ( $E_g$ ) and electron affinity ( $\chi$ ) values; their dielectric constants ( $\epsilon/\epsilon_0$ ); electron ( $\mu_n$ ) and hole ( $\mu_p$ ) mobility and effective masses ( $m_n / m_0$  and  $m_p / m_0$ , respectively); state densities in conduction ( $N_C$ ) and valence ( $N_V$ ) gap, etc.

Analysis of simulated  $J$ - $V$  curves shown the following:

- It is estimated that SC with CuO absorber layer is more preferential due to its efficiency values ( $\eta = 18.21-23.89\%$ ), while the most effective structure has a device with following physical and technological conditions of structure obtaining: thickness of absorber layer  $d_{CuO} = 9\ \mu\text{m}$ ; thickness of window layer  $d_{ZMO} = 25\ \text{nm}$ ; thickness of conduction layer  $d_{ZnO:Al} = 25\ \text{nm}$ ; operation temperature  $T = 290\ \text{K}$ ; Mg concentration in  $Zn_{1-x}Mg_xO$  compound  $x = 0.3$ .

- It is determined that in case of photo-converter with  $Cu_2O$  absorber layer the values of short-circuit current densities  $J_{sc} = (13.11-13.85)\ \text{mA/cm}^2$  are much lower than analogue in structure with CuO absorber layer -  $J_{sc} = (21.54-22.85)\ \text{mA/cm}^2$ .

- It is estimated that SC's with  $Cu_2O$  absorber layer have a lower efficiency values ( $\eta = 8.29-9.63\%$ ) due to  $Cu_2O$  layer's optical band gap value ( $E_g(Cu_2O) = 2.17\ \text{eV}$ ) compare to CuO absorber layer's band gap ( $E_g(CuO) = 1.51\ \text{eV}$ ).

*Keywords:* solar cell; current density; voltage;  $J$ - $V$  curves; simulation; SCAPS.

УДК 621.315.592

## ЦЕНТРИ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ, ЗУМОВЛЕНІ РАДІАЦІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ У КУБІЧНОМУ КАРБІДІ КРЕМНІЮ

<sup>1)</sup>Братусь В.Я., <sup>1)</sup>Коломис О.Ф., <sup>1)</sup>Стрельчук В.В., <sup>2)</sup>Родіонов В.М.

<sup>1)</sup>Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова, Київ, Україна,

<sup>2)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*E-mail:* v\_bratus@isp.kiev.ua, v.rodionov@kpi.ua

Унікальні властивості політипів карбїду кремнію дозволяють розглядати їх як один з найбільш перспективних матеріалів для високоефективної, високочастотної та високотемпературної електроніки. Останніми роками глибокі дефекти у SiC показали свою привабливість при їх використанні у якості елементів квантової інформатики та квантової метрології. Зараз багато уваги приділяється пошуку оптично активних дефектів із властивостями, які не поступаються NV-центрам в алмазі. У даній роботі наведено результати дослідження спектрів фотолюмінесценції (ФЛ) у ближній інфрачервоній області, які пов'язані із дефектами, індукованими опроміненням швидкими нейтронами та подальшою термічною обробкою кристалів 3C-SiC. Походження нових спектрів обговорюється у поєднанні з результатами вимірювань спектрів електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) для цих зразків.

Якість вихідних зразків контролювалася методами мас-спектрометрії вторинних іонів та комбінаційного розсіювання світла.

У спектрах низькотемпературної ФЛ ( $T = 12\ \text{K}$ ) опромінених нейтронами і відпалених зразків при збудженні лазером з  $\lambda = 488\ \text{nm}$  з'являються два нових спектри: спектр  $IR1$  реєструється після відпалу при температурі  $1000^\circ\text{C}$  і складається з двох вузьких безфононних ліній при  $1.566\ \text{eV}$  і  $1.578\ \text{eV}$  та їх фононних повторень, а з підвищенням температури відпалу до  $1100^\circ\text{C}$  виникає смуга

$IR2$  з безфононою лінією при 1.597 еВ. Збудження ФЛ з  $\lambda = 647,1$  нм дозволяє відокремити спектри  $IR1$  і  $IR2$  від інших смуг дефектного походження. У спектрі  $IR1$  зареєстровано фононні репліки, віднесені до локальних коливань з енергією 146.5 меВ, які можуть бути пов'язаними з міжвузловими атомами вуглецю. Несиметричність форми та температурна залежність спектра  $IR2$  вказує на його складну структуру. У широкому інтервалі 12К – 100К спектр  $IR2$  може бути описаний сумою двох зсунутих по енергії на 10 меВ лоренцових компонент, відносна інтенсивність яких змінюється з температурою. Подібна ситуація може відповідати прояву ефекту Яна - Теллера для дефекту  $IR2$ .

*Ключові слова:* карбід кремнію, нейтронне опромінення, радіаційні дефекти, фотолюмінесценція.

УДК 681.758

## ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА ПРИ ПАДІННІ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ПІД КУТОМ НА МОДУЛЯТОР КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧНОГО СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРА

*Колобродов М.С.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
E-mail: kolobrodov\_n@ukr.net*

Сучасні оптичні пристрої обробки інформації для введення і виведення сигналів використовують матричні модулятори світла і приймачі випромінювання, що дозволяє застосовувати їх в гібридних оптико-електронних процесорах з широкими функціональними можливостями. Однак матричні структури модулятора і приймача значно спотворюють сигнали, які обробляє процесор.

Для розширення робочого спектрального діапазону когерентного оптичного спектроаналізатора (КОС) автором пропонується освітлювати модулятор паралельним пучком світла, який падає на модулятор під кутом  $\varepsilon$  (рис. 1).

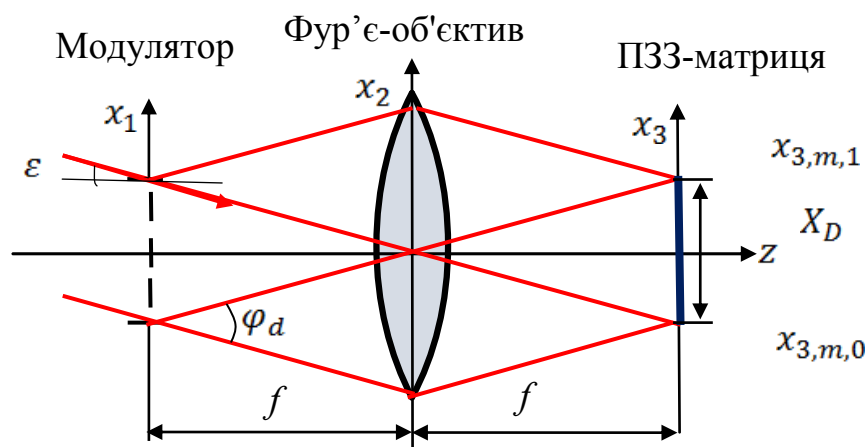


Рис. 1. Формування дифракційних максимумів в КОС



В цьому випадку нульовий дифракційний максимум матиме в задній фокальній площині фур'є-об'єктива координату  $x_{3,m0}$ , яка визначається:

$$x_{3,m0} = -f \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (1)$$

Аналогічно визначається положення першого дифракційного максимуму:

$$x_{3,m1} = f \operatorname{tg} \frac{\varphi_{d,m1}}{2} \approx f \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (2)$$

Величина кута падіння  $\varepsilon$  лазерного пучка на модулятор обмежена величиною, при якій дифрагований в першому порядку дифракції паралельний пучок світла повністю надходить у вхідну зіницю фур'є-об'єктива, тобто в оптичній системі КОС повністю відсутнє віньєтування. Тому при освітленні модулятора похилою плоскою хвилею роздільна здатність спектроаналізатора може бути збільшена в два рази.

*Ключові слова:* дифракція світла, когерентний оптичний спектроаналізатор, робочий спектральний діапазон.

UDC 681.5

## UNUNDERSAMPLING CONCEPT

*Lutsiuk Mykola M., Kolobrodov Valentin G.*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

*E-mail: thermo@ukr.net*

The principal result of sampling theorem is to establish an upper limit for frequencies that can be faithfully transmitted and reconstructed from the original signal. This limit is often called the Nyquist frequency which is given by  $f_N = 1/2b$ , where  $b$  is the sampling distance [1].

Mathematically, in sampling systems, the spectrum of the original signal is replicated at intervals  $f_s$ , where  $f_s$  is the sampling frequency, see Fig. 1 [2].

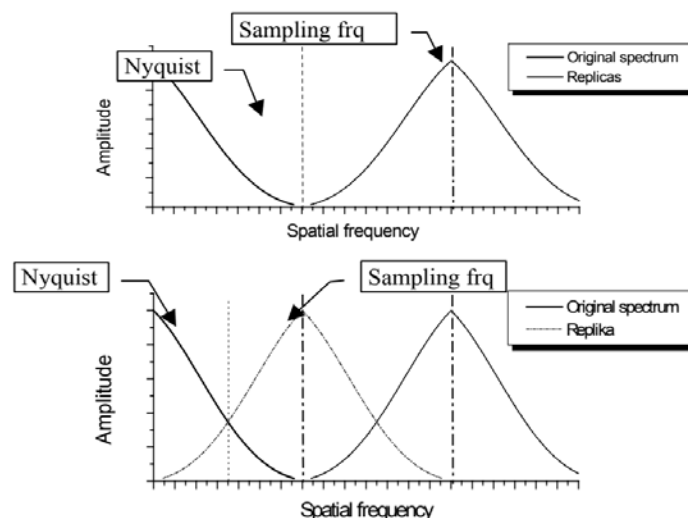


Fig. 1. The spectrum of a discrete signal: the output spectrum is repeated with the frequency of sampling frequency  $f_s$

A signal at frequency  $f$  re-appears as a pseudo-signal at the frequencies  $nf_s + f$  and  $nf_s - f$ , with  $n$  any integer number. If the spectrum of the original signal contains frequencies higher than the Nyquist frequency, the original spectrum and the replicated spectra overlap. In such a case, the original signal can by no means be reconstructed faithfully. An imager who allows that the original spectrum overlaps with the back-folded spectrum is called undersampled. The imager is undersampled if the prefilter MTF is not equal to zero at Nyquist frequency.

If the prefilter MTF of the imager is band-limited at a frequency lower than the Nyquist frequency (top figure) the image is properly sampled. If this is not the case (bottom figure) the imager is undersampled.

*Keywords:* undersampling, Nyquist frequency.

#### References

- [1] Fiete R., *Modeling the imaging chain of digital cameras*. Bellingham: SPIE Press, 2010.
- [2] Vollmerhausen R., Reago D. and Driggers R., *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. Bellingham, Wash., USA: SPIE Press, 2010.

UDC 681.5

## ARTIFICIAL COMPAUND EYE

*Borovytsky V., Antonenko V.*

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: vborovytsky@yahoo.com*



Fig 1. The photograph of the biologically-inspired vision system

The biologically-inspired imaging vision system has been designed, assembled and tested (Fig. 1). It makes possible investigation and comparison of the various image processing algorithms in an artificial compound eye. This system contains 19 imaging channels with a lens, set of photodetectors, pre-amplifiers and signal processing circuits attached to a computer. The number of imaging channels may be increased due to their modular structure. The computer control allows reading-out output signals from the channels and implementation of the neural network and deep learning algorithms for its processing.

The principal advantage of this system is possibility to simulate and to study various neural networks for efficient detection of small objects, detection and selection of moving objects, object tracking and navigation. This system differs from the well-

known artificial compound eyes based on CMOS image sensors or miniature camera arrays [1-3].

*Keywords:* imaging system, artificial compound eye, neural networks, object detection, object tracking, navigation.

#### **References**

[1] K.-H. Jeong, J. Kim, L. P. Lee, “Biologically Inspired Artificial Compound Eyes”, *Science*, 312, 557, 2006.

[2] Y. Cheng<sup>1</sup>, J. Cao<sup>1</sup>, Y. Zhang, Q. Hao<sup>1</sup>, “Review of state-of-the-art artificial compound eye imaging systems”, *Bioinspiration & Biomimetics*, 14, 031002, 2019.

[3] Y. Wang, B. Cai, Y. Lu, X. Chen, K. Wang, “Optical system design of artificial compound eye based of field stitching”, *Microware and optical technology letters*, Vol. 59, No. 6, 2017.

УДК 623.004.67

## **ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ОХОРОННОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ**

*Кучеренко О.К.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

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

Волоконно-оптичні кабелі, які використовуються для передачі інформації, можуть застосовуватися в якості датчиків для вимірювання деформацій, вібрацій та інших механічних впливів. Все більш широке застосування такі датчики знаходять в сучасних системах безпеки, зокрема з метою створення сигнальних рубежів для охорони периметральних огорож. Привабливість волоконно-оптичних технологій визначається декількома факторами. Ці сенсори несприйнятливі до електромагнітних випромінювань і електробезпечні. Крім того, в якості сенсорів в більшості випадків можна використовувати промислові комунікаційні кабелі, які випускаються в широкому асортименті, а їх вартість нижче вартості спеціально розроблених кабельних датчиків. Зовнішні впливи, такі як механічний тиск, деформації або вібрації, змінюють параметри оптичного волокна і, як наслідок, характеристики випромінювання, що проходить через волокно. У волоконно-оптичних охоронних системах використовуються кілька методів реєстрації сигналів вторгнення:

- метод реєстрації міжмодової інтерференції;
- метод реєстрації спекл-структури;
- інтерференційний метод.

Аналіз наявної інформації дозволив розділити всі існуючі на зарубіжному ринку волоконно-оптичні охоронні системи на підгрупи за способом їх застосування:

- системи для захисту металевих огорож;
- системи для захисту важких огорож і стін;
- підземні системи з волоконно-оптичними кабелями;
- системи для захисту водних рубежів.

Австралійська компанія Future Fibre Technologies (FFT) використовує дві основні технології детектування з використанням волоконно-оптичних датчиків. Перша технологія, що отримала назву M / V, дозволяє виявляти рух і вібрації кабелю (Movement & Vibration - M / V). Друга технологія побудована на принципі виявлення мікронапруг в оптичному волокні і отримала скорочену назву MSL (від MicroStrain Locator - Локатор мікродеформацій).

Англійська компанія Remsdaq випускає кілька систем серії Sabre з волоконно-оптичними датчиками. Система SabreFonic призначена для захисту периметрів з сітчастих або ґратчастих металевих огорож.

Датчиком периметральної системи F-5000 Fibernet ізраїльської фірми TRANS Security Systems and Technology (TSS) є мережа, спаяна з одножильного багатомодового оптичного волокна, захищеного пластиковою оболонкою, зміцненої кевларом.

Американська компанія Fiber SenSys Inc. випускає кілька волоконно-оптичних периметральних систем серії Fiber Defender (FD). Модель FD-205 призначена як для охорони огорож і стін, так і для підземної установки.

Канадська компанія Senstar-Stellar випускає волоконно-оптичну охоронну систему IntelliFIBER, призначену для захисту сітчастих периметральних огорож. Процесор Intelli-FLEX налаштовується на виявлення двох основних типів вторгнення - перелази через огорожу або руйнування її.

В доповіді розглянуті елементна база волоконно-оптичних систем охорони, їх технічні характеристики і можливості використання.

*Ключові слова:* волоконно-оптичні системи охорони; інтерференція, спекл-структура.

УДК 621.384.3

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВІЗОРІВ НА БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ

*Сокол Б.В., Колобродов В.Г.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
E-mail: sokolbohdan@ukr.net, thermo@ukr.net*

Стрімкий науково-технічний прогрес дав потужний поштовх розвитку робототехніки, одним із напрямків – є розвиток безпілотних літальних апаратів, Безпілотники частіше за все використовуються у військовій сфері, але сьогодні ці рамки значно розширилися, починаючи від звичайних перевізників і закінчуючи дронами-розвідниками та дронами-архіологами, які дистанційно виконують роботу під пильним контролем професіоналів.

Розвиток безпілотних літальних апаратів розширює сфери їх застосування, в тому числі у сільському господарстві, наприклад, фермери почали використо-

увати безпілотні літаки для моніторингу своїх полів, а також в програмах точного землеробства. Використовуючи тепловізор можна розпізнати ділянки де плоди вже дозріли, а де необхідно обробити ділянки від шкідників. У будівництві дані про температуру від портативних тепловізорів можуть, виявити недоліки в тепловій оболонці будівель, проблеми з електрикою або допомогти у виявленні підземних структурних недоліків. У роботі [1] було розроблено і випробувано метод використання ІЧ-термографії для виявлення слабких точок у стародавніх стінових структурах. Таким чином, термографія надає широкий спектр застосувань від визначення теплових втрат до неруйнівного контролю конструкцій, а при використанні тепловізорів на безпілотних літальних апаратах, ще і збільшує сфери використання.

У всіх вищезазначених сферах, а особливо у військових та інших рятувальних операціях, де є загроза життю людини, важливим є отримати максимально якісне і неспотворене зображення. Основними характеристиками тепловізорів є просторова та температурна роздільна здатність. Співвідношення між цими характеристиками встановлюється мінімальною роздільною різницею температур (MRTD) [2]. Одним з важливих елементів обчислювальної моделі MRTD є модуляційно передавальна функція зорової системи оператора.

Отже, сфера використання тепловізора на безпілотному літальному апараті обмежується лише технічними та конструкторськими можливостями.

*Ключові слова:* безпілотні літальні апарати, тепловізор, просторова і температурна роздільна здатність.

#### **Література**

- [1] Bisegna, Fabio, et al. “A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, pp. 199-202, March–April 2014.
- [2] Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., *Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження*, Київ: НТУУ «КПІ», 2007.

УДК 681.7.015.2

## **ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ЛІНЗОВИХ ЗУМ-АФОКАЛЬНИХ СИСТЕМ**

*Чиж І.Г., Лісняк К.С.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
E-mail: i.g.chizh@gmail.com, karinalisnak97@gmail.com*

Найпростішим способом перетворення стаціонарного об’єктива із фіксованою фокусною відстанню у зум-об’єктив є додавання до стаціонарного об’єктива афокальної насадки зі змінним кутовим збільшенням. Таке перетворення оптики фотокамер, відеокамер, приладів нічного бачення, тепловізорів є доцільним у випадках, коли штатний стаціонарний об’єктив не може бути заміненим позаштатним панкратичним.

Зум-афокальна насадка, яка перетворює стаціонарний об'єктив у зум-трансфокатор, повинна забезпечити потрібну зміну кута поля зору, збереження світлосили у заданих межах, усунення недопустимого він'єтування пучків променів, що надходять від периферійних ділянок поля зору, збереження потрібної якості зображення по всьому полю зору. До того ж конструкція зум-афокальної насадки повинна мати найбільш просту механічну систему переміщень її оптичних компонентів.

Забезпечення перелічених вимог в значній мірі залежить від результатів габаритного розрахунку зум-афокальної системи. В даній роботі пропонується метод габаритного розрахунку трьох та чотирьох компонентних лінзових афокальних систем, які повинні мати три задані фіксовані значення кутового збільшення. Метод передбачає представлення лінзових компонентів їх параксіальними аналогами з відповідними оптичними силами.

Пошук значень оптичних сил та взаємного розташування компонентів здійснюється через складання та розв'язання системи рівнянь, які забезпечують телескопічність системи, задані значення її кутового збільшення, допустиме обмеження осьових та поперечних габаритів, задане положення вихідної зіниці та допустиме він'єтування нахилених пучків променів.

Системи таких рівнянь не є лінійними. Для їх розв'язання можна використовувати математичні редактори типу Mathcad, що дозволяють чисельними методами здійснювати пошук рішень і знаходити умови мінімізації відносних отворів компонентів та зменшення дії фактору він'єтування нахилених пучків променів. Показано, що трикомпонентні системи не забезпечують незмінну осьову довжину афокальної системи, але введення в систему додаткового четвертого компонента надає можливість вказану осьову довжину зробити незмінною.

*Ключові слова:* зум-афокальна система, трансфокатор, габаритний розрахунок афокальних систем.

UDC 534.42

## DIFFRACTIVE LENS IMAGIN

*Ievgenii Siryi*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine  
E-mail: jump.to.sun@gmail.com*

The thesis presents the forming of a set of images by the diffractive lens (DL) in different orders of diffractions. Usually DL is considered as an optical element with low optical power which performs either color correction or an athermalization. In these cases DL is calculated in the first order of diffraction. But in case when DL builds an image it is important to consider the presence of other orders of diffraction which reduce image quality.

Therefore, it is necessary to evaluate the image intensity in different orders of diffraction.

The transition coefficient of DL can be presented as:

$$t(r) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp[-i\pi(\alpha - n)] \sin c(\alpha - n) \exp\left[\frac{-i\pi r^2}{\lambda f_n}\right],$$

where  $r$  is the radial coordinate;  $\alpha = \lambda_0/\lambda$  is the phase delay coefficient;  $\lambda_0$  is the design wavelength;  $\lambda$  is the specific wavelength for which the transition coefficient is calculated;  $f_n = f_0\lambda_0/n\lambda$  is the focal length in the  $n$ -th order of diffraction;  $f_0$  is the design focal length.

The point spread function (PSF) of DL in the  $n$ -th order of diffraction was determined by using the theory of Fresnel diffraction:

$$I_n(r_0) = \eta \cdot \left[ 2 \frac{J_1\left(2\pi \frac{R}{\lambda f_n} r_0\right)}{2\pi \frac{R}{\lambda f_n} r_0} \right]^2,$$

where  $\eta = \sin^2(\alpha - n)$  is the diffraction efficiency;  $R$  is the radius.

As we can see the PSF of DL is equal to the PSF of the thin refractive lens which is multiplied by  $\eta$ . Obtained expression performs to calculate the light distribution for any focal plane of DL and then to evaluate the image contrast, which is reduced by other orders of diffraction.

The DL with  $\lambda_0 = 10\mu\text{m}$ ,  $f_0 = 100\text{mm}$ ,  $R = 12,5\text{mm}$  was considered in the first order of diffraction for  $\lambda = 8\mu\text{m}$  with  $\eta = 0,81$ ,  $f_1 = 125\text{mm}$ . By using expression of  $I_n(r_0)$  the background from orders of diffraction for current  $\lambda$  was modeled from other. It was obtained, that the image contrast in the first order of diffraction for low spatial frequency is equal to the diffraction efficiency 0,81. This result confirms the correctness of the presented imaging model of DL.

*Keywords:* diffractive lens, order of diffraction, diffraction efficiency, point spread function, image contrast.

УДК 621.384.3

## АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПІРОМЕТРОМ СПЕКТРАЛЬНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ

*Кучеренко О.К., Томашевська А.Е.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: oleg.k.kucherenko@gmail.com., devineska96@gmail.com*

Пірометри спектрального співвідношення визначають температуру об'єкта по відношенню сигналів від двох приймачів, що працюють на різних довжинах хвиль, або одного приймача в сукупності з смуговими світлофільтрами. Другий

метод передбачає використання модулятора і підсилювачів змінного струму, які з точки зору підвищення точності вимірювань є кращими. Такий принцип вимірювання температури дозволяє позбутися недоліків властивих радіаційним пірометрам.

Залежність сигналу від відстані однакова для обох приймачів пірометра спектрального співвідношення, тому на відношення сигналів вона не впливає. Форма вимірюваного об'єкта, запиленість та загазованість проміжного середовища однаково впливають на сигнали приймачів, залишаючи незмінним їхнє співвідношення. Пірометри спектрального співвідношення нечутливі до бічного засвічення від великорозмірних об'єктів, наявності невеликих непрозорих об'єктів в полі зору пірометра, до наявності захисних стекол в приладі.

Результат вимірювання пірометром спектрального співвідношення залежить не стільки від величини випромінювальної здатності, або від її зміни від об'єкта до об'єкта, скільки від спектральної залежності  $\varepsilon = f(\lambda)$ .

З ростом довжини хвилі спектральна випромінювальна здатність деяких матеріалів  $\varepsilon(\lambda)$  знижується. Це призводить до того, що сигнал довгохвильового приймача пірометра спектрального співвідношення виявляється зниженням у порівнянні з короткохвильовим. З цієї причини показання пірометра спектрального співвідношення виявляються завищеними нерідко більш ніж на 10%.

Корекція показань пірометра ручним введенням поправок можлива для якоїсь сталої температури. В інших випадках похибка вимірювання може сягати 25%. Більш раціональним і ефективним є аналітичний облік величини похибки викликаної залежністю  $\varepsilon = f(\lambda)$ , коли розрахунки можуть бути проведені тільки чисельними методами.

Завдяки розвитку комп'ютерної техніки і програмного забезпечення чисельні методи інтегрування давно вже перестали бути проблемою. Тому чисельний розрахунок коригуючого сигналу для приймача з відомої спектральної характеристикою і матеріалу з відомою залежністю випромінювальної здатності  $\varepsilon(\lambda)$  не складний і може бути здійснений в ході вимірювань.

Спочатку доцільно визначити значення коригуючого коефіцієнта для макета чорного тіла а потім аналітично уточнити його значення для реальних матеріалів, спектральних діапазонів і температур. Такий підхід дає можливість знизити похибку вимірювання температури об'єктів до 1.5–2%.

*Ключові слова:* контроль температури пірометром спектрального співвідношення, похибка вимірювань, чисельні методи корекції.



УДК 519.6

## СЕМИЛІНЗОВІ ФОТООБ'ЄКТИВИ ДЛЯ ПОВНОКАДРОВИХ БЕЗЗЕРКАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ КАМЕР

*Сокурєнко В. М., Сокурєнко О. М.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
E-mail: sokurenko2@meta.ua*

Завдяки зменшеній відстані до зображення беззеркальні цифрові камери дозволяють застосовувати більш компактні схеми фотооб'єктивів, потенційно з поліпшеною якістю зображення. Проте розробка фотооб'єктивів з високою якістю зображення для формату кадра 36 мм × 24 мм (full-frame) є нетривіальною задачею, особливо якщо для цього використовуються лише «стандартні» марки скла, а кількість лінз обмежена (в даній роботі 7). Задача розрахунку таких оптичних систем ще більше ускладнюється у разі необхідності ахроматизації в розширеному спектральному діапазоні.

В даній роботі представлено спосіб автоматизованого параметричного синтезу повнокадрових фотооб'єктивів, який базується на використанні сучасних алгоритмів глобальної оптимізації.

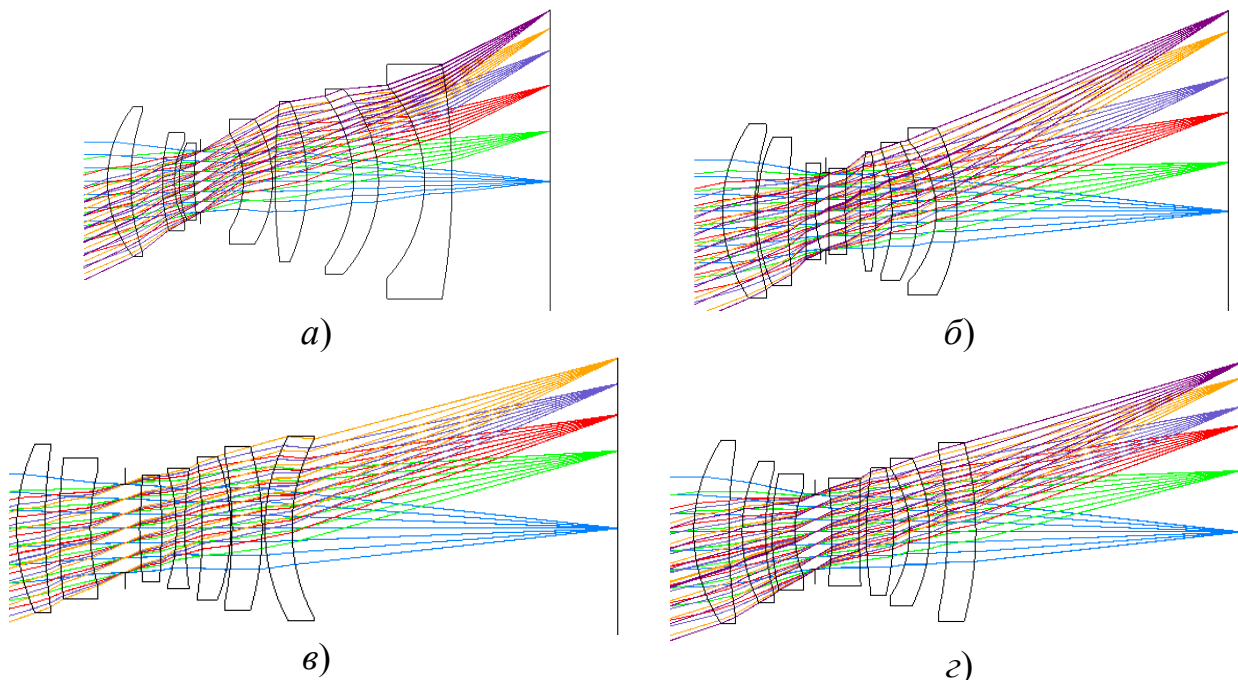


Рис. 1. Оптичні схеми розрахованих фотооб'єктивів з ходом променів:  
 $a - f' = 45,6$  мм,  $2\omega = 50,8^\circ$ ,  $\lambda = 0,4 \dots 0,7$  мкм,  $\Delta_{\max} = 0,8\%$ ,  $K_{\min} = 0,38$ ;  
 $b - f' = 50,6$  мм,  $2\omega = 46,8^\circ$ ,  $\lambda = 0,4 \dots 0,9$  мкм,  $\Delta_{\max} = 1\%$ ,  $K_{\min} = 0,16$ ;  
 $v - f' = 63,2$  мм,  $2\omega = 37,8^\circ$ ,  $\lambda = 0,4 \dots 0,7$  мкм,  $\Delta_{\max} = 1,7\%$ ,  $K_{\min} = 0,25$ ;  
 $z - f' = 64,5$  мм,  $2\omega = 37,1^\circ$ ,  $\lambda = 0,4 \dots 0,9$  мкм,  $\Delta_{\max} = 1\%$ ,  $K_{\min} = 0,16$ .

Розроблена авторами комп'ютерна програма «ПОДІЛ» дозволяє здійснити розрахунок подібних оптичних систем в автоматизованому режимі. При цьому враховуються задані користувачем граничні обмеження на конструктивні параметри, габаритні розміри, значення дисторсії та інші аберації.

Приклади розрахованих семилінзових фотооб'єктивів з відносним отвором 1:4,5 представлені на рис. 1, де  $\Delta_{\max}$  – максимальне значення відносної дисторсії,  $K_{\min}$  – мінімальне значення поліхроматичної дифракційної модуляційної передавальної функції для просторової частоти 70 ліній/мм по всьому полю.

В доповіді представлено результати проведених досліджень та наведено практичні рекомендації, які можуть бути корисними для розробників оптичних систем.

*Ключові слова:* оптична система, фотооб'єктив, модуляційна передавальна функція, ахроматизація, дисторсія.

УДК 535.6, 535.41

## АСОЦІАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕЛІНІЙНИХ ГОЛОГРАМ

*Богатирьова Г.В.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна  
E-mail: hhal@i.ua*

В рамках кореляційно-оптичного підходу розглянуто питання голографічної асоціативної пам'яті нелінійно зареєстрованих голограм. Визначено перспективи неінтерференційного механізму асоціативного відновлення у плюс-першому порядку дифракції на структурі такої голограми.

Нещодавно [1] обговорювалась проблема голографічної асоціативної пам'яті в рамках кореляційного підходу. Наголошувалось, що корисні асоціативні властивості притаманні не лише об'ємним середовищам [2], а й тонким лінійно зареєстрованим голограмам [3]. Окрім того нелінійно зареєстрована тонка голограма [4] відкрила нові можливості голографічної асоціативної пам'яті та обертання хвильового фронту. Дослідження властивостей нелінійних голограм виявили корисні особливості спряженого асоціативного відгуку. Для відновлення такого відгуку необхідно, щоб голограма була тонкою, інакше діє заборона внаслідок Брегівської селективності.

Показано, що за об'ємною голограмою можна зв'язувати та відновлювати асоціативно сигнали довільної форми, такі що не інтерферують (або взаємно не когерентні, тощо). Проте таке відновлення реалізується не в спряженому, а в основному зображенні. У відновленні беруть участь різницеві комбінаційні ґратки, зобов'язані своїм існуванням нелінійності голографічного запису, аналогічно просторово-частотному гетеродинуванню. Побудова векторних діаграм до-

водить, що обмежений набір нелінійних ґраток в точності задовольняє умові Бреґа. Таким чином, можна реалізувати асоціативне відновлення довільних (таких що не інтерферують) сигналів на об’ємній голограмі, де брегівською селективністю додатково компенсуються шуми декореляції та шуми, обумовлені нелінійностями вищих порядків.

Розроблено дві схеми реалізації даного методу – на пропускній та відбиваючій голограмі.

*Ключові слова:* асоціативна пам’ять, тонка нелінійна голограма, фантомне зображення, інтермодуляційні ґратки

#### **Література**

- [1] Г.В. Богатирьова, П.В. Полянський, Х.В. Фельде, Є.В. Зелінський, «Кореляційно-оптичний підхід до проблеми голографічної асоціативної пам’яті», *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 56(2), с.24-37, 2018.
- [2] G. W. Stroke, *An introduction to coherent optics and holography*. Academic press, NY, 1966.
- [3] V. K. Polyanskii, p. V. Polyanskii, “Holographic associative memories with a true brightness tone rendering”, *Optical Engineering*, 34(4), pp. 1079-1087, 1995.
- [4] P. V. Polyanskii, “On conjugate imaging in generalized holographic filtering arrangement”, *Optics and spectroscopy*, 65 (2), pp. 345-348, 1988.

УДК 53.082.52 621.383

## **МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

*Кравченко І.В.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
E-mail: ooer@kpi.ua.*

В більшості сучасних інформаційно-вимірювальних оптико-електронних систем (ОЕС) для обробки використовуються цифрові мікропроцесорні засоби.

Розроблено цифрову модель однопараметричного аналізу сигналів ОЕС, які використовують гармонійну модуляцію.

Проведено комп’ютерний експеримент оцінки фази сигналу спектральним методом та методом синхронного детектування. Метою моделювання було дослідження:

- граничної методичної похибки оцінки фази гармонійних сигналів цифровими методами;
- впливу щільності вибірок та їхнього розташування на точність визначення фази сигналів;
- впливу довжини вибірки, щільності вибірки на часові параметри та похибку вимірювань;
- впливу фонового освітлення на похибку визначення фази;
- залежності показників точності від відношення «сигнал/шум».

Результати комп’ютерного моделювання показали високий ступінь кореляції з експериментальними даними [1].

Моделювання виявило, що:

- значення щільності вибірок за теоремою Котельникова є недостатніми.
- гранична мінімаксна абсолютна методична похибка знаходиться в межах  $2 \cdot 10^{-15}$ .
- наявність фонові складові не впливає на похибку визначення фази.
- поява шумові складові призводить до скорочення діапазону вимірювань за рахунок того, що в околі нульового значення та значення  $2 \cdot \pi$  фази з'являється зона невизначеності.
- за показниками точності спектральний метод та метод синхронного цифрового детектування є тотожними, при цьому спектральний метод є менш витратним.
- витрати реалізації синхронного детектування на проміжній частоті є меншими за витрати спектрального методу майже вдвічі.
- цифрові методи для значень відношення «сигнал/шум» 60дБ – 100дБ дозволяють визначати фазу з наведеною похибкою до  $10^{-7}$ .

*Ключові слова:* цифрова обробка, вимірювання фази, гармонійна модуляція  
**Література**

- [1] Б.О. Берников, В. Б. Бокшанский, М. В. Вязовых, С. В. Федоров, «Методы повышения точности измерения дальности в лазерных фазовых дальномерах», *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. №.8 с.131-141, 2012.

UDC 681.78 681.2

## DIGITAL SYNCHRONOUS DETECTION IN LIDAR APPLICATION

*Kravchenko I. V.*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine  
E-mail:ooep@kpi.ua.*

Digital synchronous detection is most widely used method to measure the phase of harmonic signals in optical-electronic systems. Under - sampling technique allows reducing the sampling rate to values

$$f_d = \frac{4f_0}{4p+1},$$

where  $p$  – natural number,  $f_d$  - sampling frequency,  $f_0$  - modulation frequency of the signal.

Pourjouly in [1] proposed the implementation of phase measurement, at which synchronous detection is carried out not at the signal frequency  $f_0$ , but at the difference frequency  $f_0 - f_d$ .

The results of computer simulation shows that:

- In case of “direct” calculations without adaptation of the calculated expressions, the speed of phase determination by the “difference” implementation is lower by 5% - 28% than “traditional”. Adaptation of dependencies to under-sampling increases the speed of phase detection up to 3 times.

- The absolute error of determining the phase of the signal (Fig. 1) for all calculations is in the range of  $10^{-15}$  radians for the full range of a phase change of  $(0 - 2\pi)$ . The error of “direct” calculations is two times higher than the error of the “adapted” implementation.

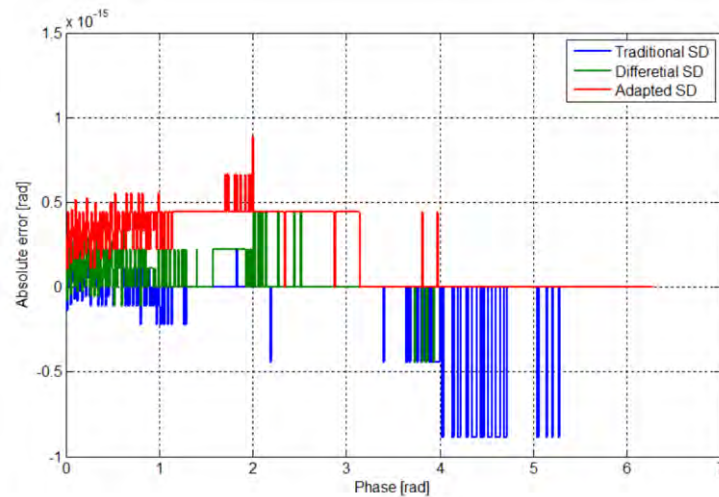


Fig. 1

*Keywords:* numerical synchronous detection, under-sampling.

**References**

- [1] St'ephane Poujouly, Bernard Journet, “A twofoldmodulation frequency laser range finder“, *Journal of optics: Pure and applied optics*, 4, pp. 356–363, 2002.

UDC 621.382

DUAL-BAND SURVEILLANCE IMAGERS EVALUATION

*Mykytenko V.I.*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine  
Email: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua*

The prediction of the effectiveness is an important part of the design of optoelectronic systems (OES). In remote sensing OES, it is customary to assess the probability of detection and the probability of recognizing an object at a given distance.

To improve the efficiency of remote sensing, many modern OES contain two spectral channels - television (TV) and thermal imaging (THI) [1]. These channels can operate simultaneously or alternately. In the first case, TV and THI images are fused. Evaluation of the quality of the resulting fused image is a non-trivial task. Many researches are devoted to this task [2]. In the second case, it is logical to use a single quality criterion and estimation method for both channels.

One of the most adequate quality criteria to date is the targeting task performance (TTP) image quality metric [3]. On its basis the Night Vision Integrated Performance Model was created. It is used by the US Army. TTP can either take or not take into account the characteristics of the object. There are two modifications of this metric. In the first case TTP is calculated using the specific object model which is the Fourier transform of the spatial differences of the objects in the set. In the second

case TTP is calculated using constant target contrast. The simplified equations for both models are

$$TTP_1 = \int_0^\infty \int_0^\infty \left( \frac{C_{obj}(\xi_x, \xi_y) \cdot MTF_{sys}(\xi_x, \xi_y)}{CTF_{eye}(\xi_x, \xi_y)} d\xi_x d\xi_y \right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$TTP_2 = \int_0^\infty \int_0^\infty \left( \frac{C_{obj} \cdot MTF_{sys}(\xi_x, \xi_y)}{CTF_{eye}(\xi_x, \xi_y)} d\xi_x d\xi_y \right)^{1/2}, \quad (2)$$

where  $C_{obj}(\xi_x, \xi_y)$  is Fourier transform of spatial differences of the object set,  $MTF_{sys}(\xi_x, \xi_y)$  is modulation transfer function of the OES,  $CTF_{eye}(\xi_x, \xi_y)$  is contrast threshold function of the eye,  $C_{obj}$  is constant contrast of the object and  $d\xi_x d\xi_y$  are spatial frequencies.

Which model is preferable to predict efficiency in dual-band surveillance OES, which operates successively? Comparison of the spatial spectra of TV and THI images shows a significantly larger proportion of high-frequency components in television images.

Consequently, the differences between TV images will be larger than between THI images. Numerical simulation showed that, in estimating the probability of detection, good agreement with experimental results is obtained by calculating the TTP with a constant contrast of the object (formula (2)) for both TV and THI channels. When assessing the probability of identification, formula (2) is preferable for THI channel. For a TV channel, it is necessary to take into account the spatial spectrum of the object, i.e. use formula (1).

*Keywords:* optoelectronic surveillance system, dual-band sensor, image evaluation.

#### References

- [1] В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, *Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія*. Київ, Поліграфічний центр «Аверс», 2013.
- [2] G.C. Holst, *Electro-Optical Imaging System Performance, Fifth Edition*. JCD Publishing, 2008.
- [3] R.H. Vollmerhausen, E. Jacobs, “The targeting task performance (TTP) metric. A new model for predicting target acquisition performance”. Technical report AMSEL-NV-TR-230, 2004.

УДК 535.42

### РОЗРАХУНОК ФАЗОВОЇ ФУНКЦІЇ ДИФРАКЦІЙНОЇ ЛІНЗИ

*Васильковська І.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*Email: inna\_kuchugura@ukr.net*

Задача проектування фазового оптичного елемента, який формує заданий розподіл інтенсивності в деякій площині, перпендикулярній до оптичної осі і

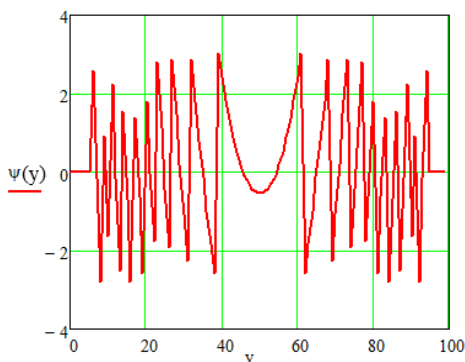
розміщеній на заданій відстані від елемента, дуже актуальна. Її розв’язання широко використовується в дифракційній оптиці, наприклад, для розрахунку інтраокулярних лінз. Проектування дифракційних лінз (ДЛ) зводиться до розв’язання нелінійного інтегрального рівняння скалярної дифракції світла в наближенні Френеля. Поставлена задача розрахунку фазової функції ДЛ, що фокусуватиме світло в дві точки вздовж оптичної осі на заданій відстані від ДЛ.

У рамках параксіальної скалярної теорії дифракції комплексна амплітуда в площині оптичного елемента  $V(x, y)$  пов’язана з комплексною амплітудою хвилі  $V(x_0, y_0)$  в площині спостереження, де формується необхідний розподіл інтенсивності  $I_0(x_0, y_0)$ , інтегралом згортки:

$$V(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int V(x, y) \cdot h_F(x - x_0, y - y_0) dx dy,$$

де  $h_F(x - x_0, y - y_0) = \frac{\exp(jkz)}{jkz} \cdot \exp\left[j \cdot \frac{\pi}{\lambda z} \cdot ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)\right]$  – імпульсний відгук вільного простору в наближенні Френеля.

Розв’язання нелінійного інтегрального рівняння здійснюється методом послідовних наближень – згідно з алгоритмом Герчберга-Секстона. Обчислена фазова функція ДЛ, яка формує на відстанях  $z_1 = 67$  мм та  $z_2 = 82$  мм розподіли інтенсивності, що задана функцією Гауса  $I(x_0, y_0) = (1/2\pi) \exp[-(x_0^2 + y_0^2)/2]$ . Отримана фазова функція ДЛ, що розрахована за 12 ітерацій, представлена на рис. 1. Ефективність відтворення складає 73%, а середньоквадратичне відхилення від заданої інтенсивності – 11%.



*Ключові слова:* дифракційна лінза, фазова функція дифракційної лінзи.

ційної лінзи.

Рис.1. Результат розрахунку фазової функції ДЛ

УДК 004.35

## АПАРАТНИЙ БЛОК ЗАХОПЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ВІДЕОСЕНСОРА РЕАЛІЗОВАНИЙ НА ПЛІС

*Карачок Б.П., Варфоломєєв А.Ю.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.*

*E-mail: stave127@gmail.com, a.varfolomieiev@kpi.ua*

В багатьох задачах обробки та передачі відеоінформації критичним є її отримання від оптичного сенсора із мінімальною затримкою. Для забезпечення

цієї вимоги, запропоновано власний апаратний блок захоплення зображень із відеосенсора, реалізований на ПЛІС.

Особливість даної реалізації полягає у застосуванні так званої SoC системи, в якій наявні ПЛІС (на основі технології FPGA) та апаратний ARM-процесор. Зокрема, у FPGA частині створено тракт низькорівневої обробки відеоданих (див. рис. 1), модулі якого реалізовано на мові Verilog. В якості джерела відео використовується 5-мегапіксельний CMOS сенсор, налаштування якого здійснюється через шину I2C за допомогою відповідного блоку розміщеного у FPGA частині. Серед основних налаштувань відеосенсора використовуються: формат кодування відеоданих, роздільна здатність, частота кадрів та експозиція. Блок захоплення виконує синхронізацію та початкове отримання відеоданих від сенсора у форматі Bayer RGB та передає отриману інформацію на модуль, що здійснює перетворення сирого Bayer у повноцінний RGB формат. Перетворені дані, далі за допомогою інтерфейсу FPGA2SDRAM надходять до спільного з ARM-процесором буферу кадру, розміщеного у DDR3 пам'яті. Для забезпечення більшої зручності та гнучкості, подальша обробка відеоданих здійснюється програмно за допомогою бібліотеки OpenCV на ARM-процесорі, що працює під управлінням ОС Angstrom Linux. Відображення оброблених відеоданих виконується на звичайному моніторі, для чого у FPGA реалізовано HDMI інтерфейс.

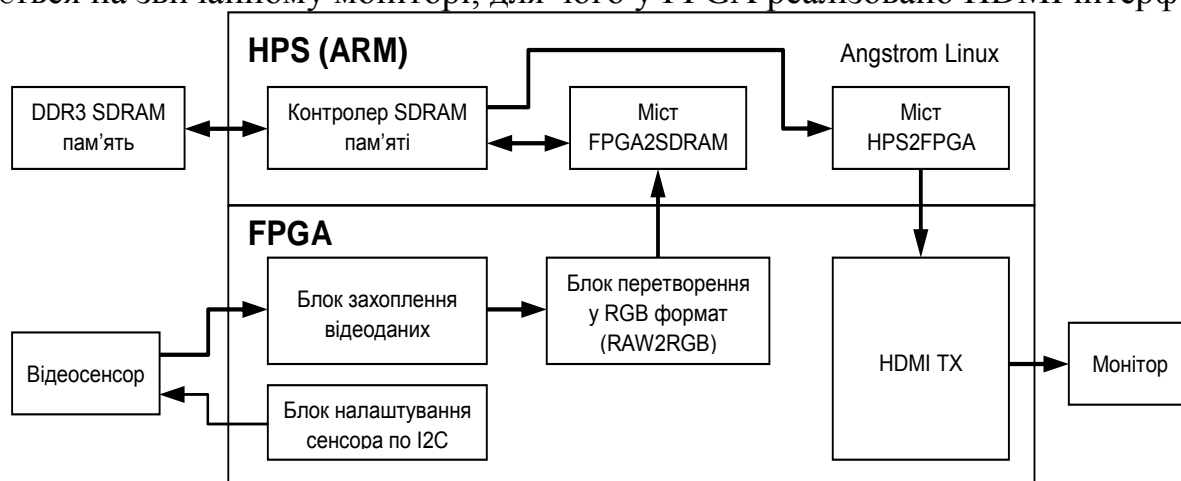


Рис. 1 Структурна схема блоку захоплення зображень із відеосенсора

*Ключові слова:* відеосенсор, ПЛІС, захоплення відеоданих, ARM, FPGA.

УДК 621.384

## КУТОВЕ ЗБІЛЬШЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО МОНОКУЛЯРА

*Балінський С. Г., Колобродов В. Г.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

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

Тепловізійні системи спостереження знаходять широке застосування в охо-



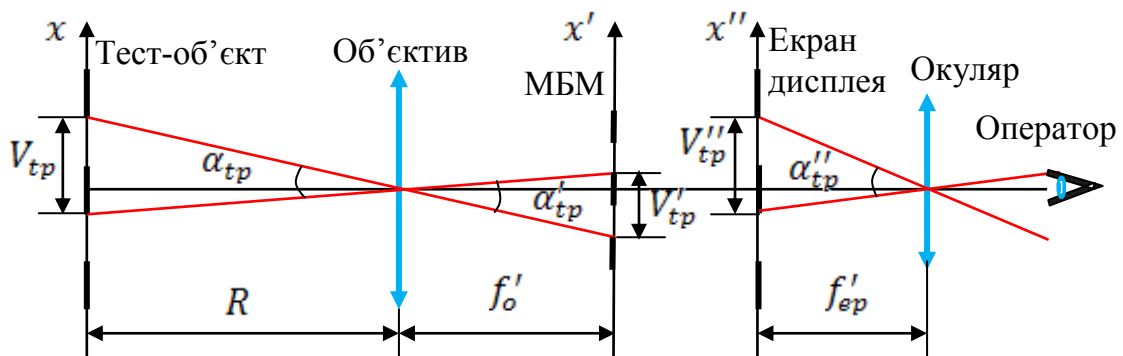
ронних системах, медичній термічній діагностиці, військовій справі. В багатьох випадках такі системи є малогабаритні тепловізійні монокуляри (ТПМ), в яких теплоконтрастне зображення об’єкта спостерігається оператором на екрані дисплея за допомогою окуляра. Основними характеристиками ТПМ є максимальні дальності виявлення і розпізнавання, які залежать від кутового збільшення монокуляра. Метою доповіді є розробка методу розрахунку кутового збільшення ТПМ, що дозволить оптимізувати характеристики монокуляра для вирішення конкретної задачі спостереження.

Нами була розроблена фізико-математична модель ТПМ, яка була досліджена в області частот (просторових і часових), вважаючи при цьому, що кожен елемент ТПК має свою модуляційну передавальну функцію (МПФ). МПФ окремих складових визначаються, як правило, в різних місцях ТПК: об’єктива і матричного приймача випромінювання – в задній фокальній площині об’єктива; дисплея і окуляра – в площині екрана дисплея. При визначенні результуючої МПФ ТПК необхідно, щоб усі МПФ складових каналу розглядались в певній площині або просторі. Для зручності практичного застосування пропонується МПФ усіх складових розглядати в просторі «об’єкт спостереження – ТПМ» як функції кутової просторової частоти.

Було встановлено зв’язок між кутовою просторовою частотою у просторі спостереження  $\nu''_{xa}$  і просторі предметів  $\nu_{xa}$ . Використовуючи рисунок маємо:

$$\nu''_{xa} = \frac{f'_{ep}}{\nu''_{tp}} = \frac{f'_{ep}}{\nu'_{tp} \beta_{el}} = \frac{f'_{ep}}{f'_o \beta_{el}} \nu_{xa}, \quad (1)$$

де  $\beta_{el} = V''_{tp}/V'_{tp}$  – електронне збільшення ТПК.



Кутове збільшення системи «ТПК – оператор» визначають як

$$\Gamma_s = \frac{\text{tg} \alpha''_{tp}}{\text{tg} \alpha_{tp}} \approx \frac{\alpha''_{tp}}{\alpha_{tp}} = \frac{V''_{tp} R}{f'_{ep} V'_{tp}} = \frac{V''_{tp} f'_o}{f'_{ep} V'_{tp}} = \frac{f'_o \beta_{el}}{f'_{ep}}. \quad (2)$$

*Ключові слова:* тепловізійний монокуляр, кутове збільшення, просторова частота.