

DOI: 10.35681/1560-9189.2022.24.1.262693

УДК 617.751

**Є. Є. Антонов, В. М. Зенін, А. С. Лапчук,**

**В. В. Петров, О. О. Токалін**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## **Формування оптимального сигналу фотодетектора в оптичних системах автоматичного керування**

*Розроблено алгоритм моделювання форми сигналу чотирьохплощинного фотодетектора при переміщенні осесиметричної світлової плями по його поверхні. Розраховано форму пеленгаційних характеристик фотодетектора для деяких схем освітлення чутливої поверхні детектора, які використовуються для створення оптичних систем автоматичного керування, зокрема систем контролю руху та позиціонування різних об'єктів. Експериментально досліджено деякі зразки спеціалізованих фокуруючих мікропризмових пристроїв з розподілом освітлення світлової плями у формі кола з кільцем на периферії, які виготовлено методом алмазного мікроточіння за результатами моделювання.*

**Ключові слова:** чотирьохплощинний фотодетектор, мікрорельєфна структура, пеленгаційна характеристика, моделювання фокуруючої оптики.

### **Вступ**

Оптичні дифузори та спеціалізовані гомогенізатори пройдених світлових потоків є надзвичайно важливими елементами в системах автоматичного керування та в пристроях слідкування за рухомими об'єктами [1], оскільки забезпечують при створенні таких систем гомогенізацію індикатриси світла, відбитого від об'єкта, що, в свою чергу, гарантує необхідну точність роботи зазначених систем.

Сьогодні на ринку існує багато пропозицій щодо таких оптичних пристроїв. Широко відомий дифузор типу EDC-15-15132-A виробництва компанії «Rochester Photonics Corporation» (RPC, США), який створює світлову пляму у формі світлового кола з рівномірною освітленістю в куті розсіювання променів  $\beta = 16,3$  град. для діапазону довжин хвиль  $\lambda = 0,4\text{--}2,0$  мкм [2]. Дію такого дифузора проілюстровано на рис. 1,а, його індикатрису розсіювання зображено на рис. 1,б.

© Є. Є. Антонов, В. М. Зенін, А. С. Лапчук, В. В. Петров, О. О. Токалін

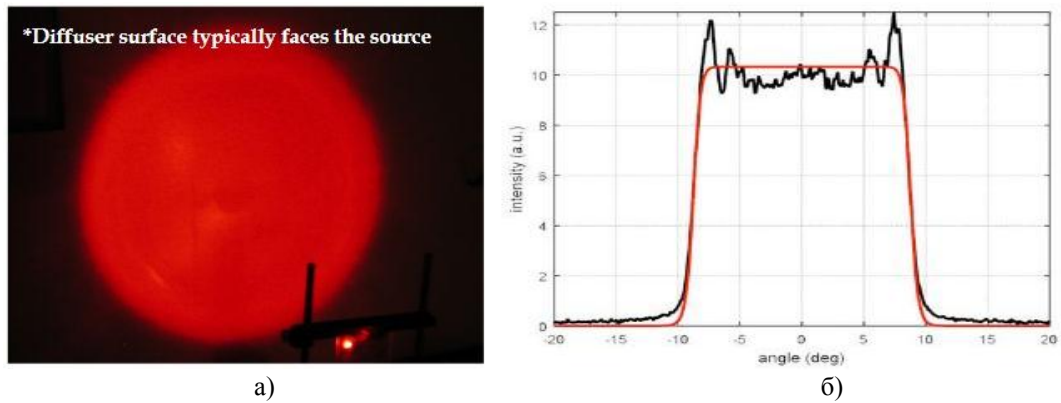


Рис. 1. Дія оптичного дифузора типу EDC-15-115132-A для  $\lambda = 0,633$  мкм (а) та його індикатриса розсіювання (б)

Для деяких застосувань необхідні дифузори, які формують у просторі світлове кільце заданого кутового розміру та діаметра. Так, оптичний дифузор типу EDRG-10-10 цієї ж компанії RPC (США), параметри якого зображено на рис. 2, має саме кільцеву індикатрису розсіювання з кутом розсіювання променів  $\beta = 10$  град.

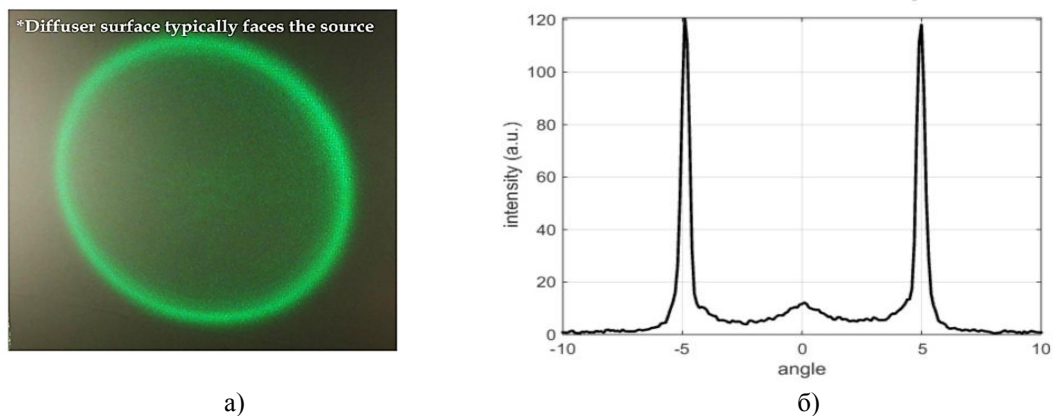


Рис. 2. Дія оптичного дифузора типу EDRG-10-10 (а) для  $\lambda = 0,633$  мкм і схема його індикатриса розсіювання (б)

Інститутом проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України в останні роки запропоновано принципово нову конструкцію оптичних дифузорів [3] на основі двомірного мікрорельєфу конусної форми, який сформовано на плоскій жорсткій утворюючій поверхні. Такі оптичні системи є набагато ефективнішими за аналоги, оскільки забезпечують високу ступінь гомогенізації розсіяного променя, дозволяють формувати в широкому діапазоні заданий кут індикатриса розсіювання, можуть використовуватись у широкому діапазоні температур і довжин хвиль оптичного випромінювання. Розроблено плоско-фокусуєчу мікропризмову оптику [4], яка на відміну від традиційних лінзових систем, дозволяє формувати у фокусі рівномірно освітлене світлове коло необхідного розміру, а не точкове зображення джерела освітлення. Використання такої трансформуючої оптики замість традиційної пари оптичних елементів «дифузор – фокусуєча лінза» у відповідних

пристроях автоматичного керування дозволяє зменшувати ваго-габаритні параметри оптичного блоку і таким чином підвищувати точність і надійність систем керування та спостереження за рухомими об'єктами.

На першому етапі спостереження для пошуку рухомих об'єктів необхідно здійснювати сканування простору досить широким пучком світла для визначення самого факту наявності такого об'єкта. Відбите від рухомого об'єкта світло фокусується певною лінзовою системою на відповідну матрицю фотодіодів для визначення напрямку на об'єкт. Найчастіше використовується конструкція з чотирьох фотодіодів, зображена на рис. 3,а, яка розміщується в площині фокуса оптичного блоку. Типова схема оптичного блоку системи керування традиційно складається з дифузора та системи лінз для формування на матриці розмитого зображення об'єкта у формі кола, яке найбільш зручне для обробки. Така схема наведена на рис. 3,б. Для точного визначення напрямку в такій конструкції зазвичай використовують дифузори, подібні показаному на рис. 1,а, з широкою рівномірно розподіленою по простору індикатрисою освітлення.

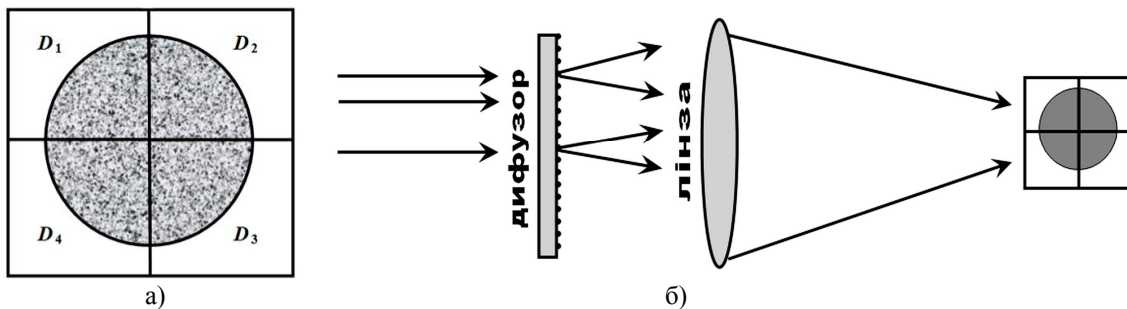


Рис. 3. Матриця фотодетекторів (а) та типова оптична схема освітлення (б) чотирьохплощинної матриці фотодіодів

На другому етапі необхідно вирішувати питання автоматичного відстеження положення виявленого об'єкта. Для цього відбитий від об'єкта світловий промінь, який сфокусовано на матрицю фотодетекторів, певним чином обробляється і аналізується відповідною системою керування. Сфокусована пляма повинна бути достатньо великою, щоб захватити центр фотодетекторної матриці, і достатньо малою, щоб повністю залишитися в області матриці в необхідному діапазоні кутів відстеження. Окрім того, важливо знати розподіл інтенсивності у сфокусованій плямі, що забезпечує максимально точне визначення напрямку. Саме це і є задачею, аналіз якої проводиться в даній роботі.

Оскільки в реальних умовах рухомий об'єкт зазвичай знаходиться щонайменше на відстані сотень метрів, а фокусна відстань лінзи і її діаметр не перевищує декількох десятків міліметрів, то відбиту від об'єкта хвилю світла без вагомих для точності розрахунку втрат можна вважати плоскою хвилею, що спрощує розрахунки.

### Алгоритм розрахунку сигналу фотодетектора

На рис. 3,а показана світлова пляма на матриці фотодіодів квадратної форми, які розміщені у фокальній площині скануючого пристрою. Напрямок і вели-

чину зміщення світлової плями від центру матриці можна розрахувати за амплітудами сигналів ( $D_1$ – $D_4$ ) кожного з чотирьох фотодіодів за умови, що світлова пляма одночасно попадає на всі фотодіоди. Вочевидь, сумарний сигнал  $J$  з матриці детекторів від освітленого об'єкта у вертикальній і горизонтальній площинах розраховується відповідно за формулами:

$$\begin{aligned} J_V &= \{D_1 + D_2 - (D_3 + D_4)\}, \\ J_H &= \{D_2 + D_3 - (D_1 + D_4)\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Сигнали кожного з фотодіодів  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  та  $D_4$  є пропорційними до потоку світлової енергії, що протікає через відповідний фотодіод і обчислюються як інтеграл від потоку потужності по площі кожного фотодіода.

Треба сказати, що обчислений таким чином сигнал (1) буде залежати від відстані до рухомого об'єкта, оскільки інтенсивність світла падає при зростанні відстані. Тому для розрахунку сигналу відхилення доцільно використовувати нормовані сигнали, а саме:

$$\begin{aligned} J_{V0} &= \{D_1 + D_2 - (D_3 + D_4)\} / (D_1 + D_2 + D_3 + D_4) = J_V / (D_1 + D_2 + D_3 + D_4), \\ J_{H0} &= \{D_2 + D_3 - (D_1 + D_4)\} / (D_1 + D_2 + D_3 + D_4) = J_H / (D_1 + D_2 + D_3 + D_4). \end{aligned} \quad (2)$$

Такі нормовані сигнали  $J_{V0}$  та  $J_{H0}$  (2) не залежатимуть від відстані до об'єкта, а тільки від кута відхилення (зміщення)  $\theta$  променя відносно нормалі до поверхні матриці.

Для спрощення задачі формування сигналу фотодетектора  $J(\theta)$  залежно від кута зміщення  $\theta$  розглянемо варіант переміщення світлової плями по поверхні чотирьохплощинного фотоприймача лише в одному горизонтальному напрямку, а кут зміщення  $\theta$  світлової плями від центру чутливої площини матриці фотодетекторів замінімо на відстань зміщення  $x$ . Зрозуміло (рис. 4), що величина різницевого сигналу фотодетектора  $J(x)$  у цьому випадку буде залежати від такого зміщення  $x$ :  $J(x) = S_{rest}^i - S_c^i$ , де  $S_{rest}^i$  та  $S_c^i$  — площі світлової плями зліва та справа від хорди з координатою  $x$ .

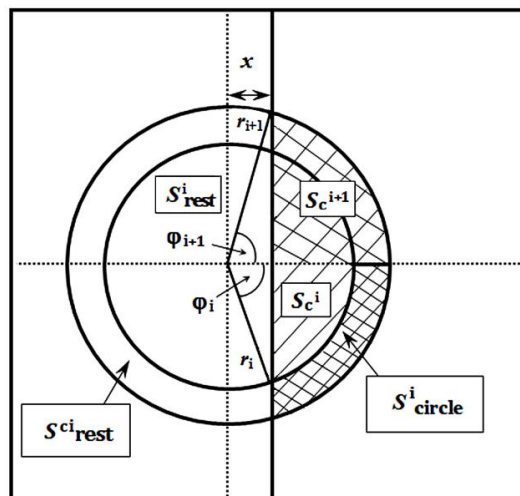


Рис. 4. Схема переміщення світлової плями по поверхні чотирьохплощинного фотодетектора

Для випадку світлової плями круглої форми радіусом  $r_i = r$  (випадок «А») площу частини кола  $S_c^i = S_c$  для значення хорди  $x = r \cos\varphi$  можна розрахувати як подвійну різницю площі сектора з кутом  $\varphi_i = \varphi$  та відповідного трикутника, утвореного хордою на відстані  $x$  від центра та радіусом  $r$ . Тобто:

$$\begin{aligned} S_c &= r^2 (\varphi - \sin\varphi \cos\varphi), \\ S_{\text{rest}} &= \pi r^2 - S_c = r^2 (\pi - \varphi + \sin\varphi \cos\varphi). \end{aligned}$$

Відповідно, сигнал

$$J_A(x) = S_{\text{rest}} - S_c = \pi r^2 - 2r^2\varphi + 2r^2 \sin\varphi \cos\varphi. \quad (3)$$

При нормуванні співвідношення (3) на  $\pi r^2$  отримуємо остаточний вираз для розрахунку сигналу з фотодетектора  $J_{A0}(x)$ , нормованого на одиницю:

$$J_{A0}(x) = 1 - 2\varphi/\pi + 2(\sin\varphi \cos\varphi)/\pi. \quad (4)$$

Графік залежності (4) наведено на рис. 5 (крива 1).

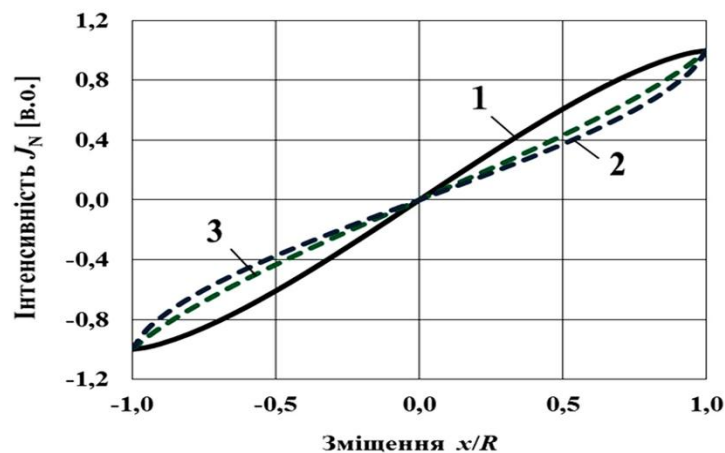


Рис. 5. Розрахункова пеленгаційна характеристика для випадку переміщення світлового кола (крива 1) та світлового кільця (криві 2–3)

Для світлової плями у формі кільця з радіусами  $r_1$  та  $r_2$  ( $i = 1$ , випадок «Б») площу частини кільця  $S_{\text{cicle1}}$  для  $x = r_1 \cos\varphi_1 = r_2 \cos\varphi_2$  (див. рис. 4) можна розрахувати як різницю подвійної площі двох сегментів, а площу сегмента — як різницю відповідного сектора та трикутника, утвореного відповідною хордою з координатою  $x$  та радіусами  $r_1$  та  $r_2$ . Тобто:

$$\begin{aligned} S_{c1} &= r_1^2 (\varphi_1 - \sin\varphi_1 \cos\varphi_1), \\ S_{c2} &= r_2^2 (\varphi_2 - \sin\varphi_2 \cos\varphi_2), \\ S_{\text{cicle1}} &= S_{c2} - S_{c1} = r_2^2 (\varphi_2 - \sin\varphi_2 \cos\varphi_2) - r_1^2 (\varphi_1 - \sin\varphi_1 \cos\varphi_1), \\ S_{\text{rest1}} &= \pi(r_2^2 - r_1^2) - S_{\text{cicle1}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Відповідно:  $J_B(x) = S_{\text{rest1}} - S_{\text{cicle1}} = \pi(r_2^2 - r_1^2) - 2 S_{\text{cicle1}}$ .

Після нормування співвідношення (5) шляхом множення на  $1/\pi r_1^2$  отримуємо наступний вираз для нормованих значень  $J_{B0}(x)$ :

$$\begin{aligned} J_{B0}(x) &= \{(r_2/r_1)^2 - 1\} - 2(r_2/r_1)^2 (\varphi_2/\pi) + 2(r_2/r_1)^2 \sin\varphi_2 \cos\varphi_2 / \pi + \\ &+ 2\varphi_1/\pi - 2\sin\varphi_1 \cos\varphi_1 / \pi. \end{aligned} \quad (6)$$

Будемо називати таку залежність  $J(x)$ , отриману при переміщенні світлової плями перпендикулярно границі контакту площин  $(D_1 + D_4)$  та  $(D_2 + D_3)$ , пеленгаційною характеристикою системи керування в нульовій фазі (фаза  $\phi = 0$  град.). Переміщення світлової плями уздовж діагоналі матриці фотодетекторів відповідає фазі  $\phi = 45$  град.

Результати, аналогічні розрахованим за виразом (6) для фази  $\phi = 0$  град., можна отримати також при моделюванні процесу переміщення осесиметричної світлової плями по поверхні чотирьохплощинного фотодетектора для фази  $\phi = 45$  град.

Конкретні розрахунки характеристик зручно виконувати одразу для певного співвідношення двох радіусів кільця  $r_2/r_1$  (рис. 4), таким чином можна отримати аналітичну залежність нормованого сигналу з фотодетектора  $J_{\text{Б0}}(x)$  від лінійного зміщення  $x$ , тобто розрахункову пеленгаційну характеристику  $J_{\text{Б0}}(x)$ .

Параметри  $(r_2/r_1)^2 - 1$  та  $2(r_2/r_1)^2$  для різних співвідношень двох радіусів  $r_2/r_1$ , які необхідні для розрахунку значень  $J_{\text{Б0}}(x)$  для фази  $\phi = 0$  град., наведено в таблиці.

Параметри для розрахунку пеленгаційних характеристик

$r_2/r_1$	1,05	1,10	1,15	1,30	1,50	2,0
$(r_2/r_1)^2 - 1$	0,103	0,21	0,323	0,68	1,25	3,00
$2(r_2/r_1)^2$	2,205	2,42	2,645	3,38	4,50	8,00

На рис. 6 наведено графіки функцій (6) для деяких співвідношень радіусів  $r_2/r_1$ , які отримані для фази  $\phi = 0$  град. і ілюструють можливість варіювання характером пеленгаційних характеристик шляхом зміни ширини світлового кільця  $\Delta r = r_2 - r_1$ .

Так, характеристику для співвідношення  $r_2/r_1 = 1,05$  наведено на рис. 5 (крива 2) і на рис. 6 (крива 1); характеристику для  $r_2/r_1 = 1,15$  наведено на рис. 6 (крива 2); для співвідношення  $r_2/r_1 = 1,5$  значення  $J_{\text{Б0}}(x)$  наведено на рис. 5 (крива 3) і на рис. 6 (крива 3); для  $r_2/r_1 = 2,0$  графік функції (6) наведено на рис. 6 (крива 4).

Для порівняння розрахункових даних, отриманих для випадків «А» і «Б», на рис. 6 (крива 5) наведено також пеленгаційну характеристику для випадку переміщення по поверхні матриці світлового кола радіусом  $r$ .

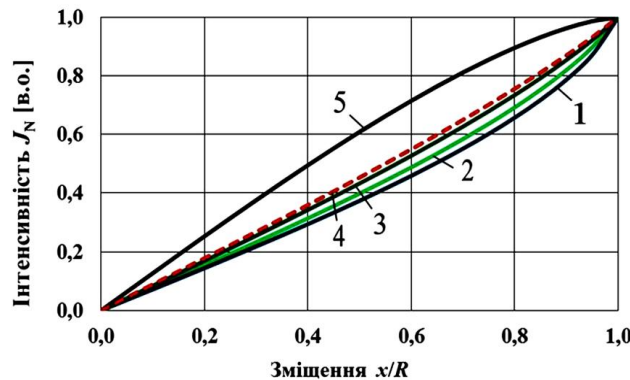


Рис. 6. Розрахункова пеленгаційна характеристика для різних співвідношень радіусів світлового кільця  $r_2/r_1$ : 1 — 1,05; 2 — 1,15; 3 — 1,5; 4 — 2,0; 5 — круг

Отримані для випадку «Б» (переміщення кільця) пеленгаційні характеристики (1–4) на рис. 6 мають нахил, протилежний нахилу кривої (5). Вочевидь, комбінування кривої (5) та кривої (1), тобто переміщення по поверхні фотодетектора світлового кола з яскравим світловим кільцем на периферії зі співвідношенням радіусів  $r_2/r_1 = 1,05$  певної інтенсивності, дає можливість отримати практично лінійну пеленгаційну характеристику, що є оптимальним варіантом для використання в реальних оптичних системах автоматичного керування.

## Створення та експериментальне дослідження фокуруючої оптики

Раніше авторами [4] було запропоновано алгоритм моделювання параметрів трансформуючої мікропризмової плоскої оптики, яка дозволяє формувати у фокусі світлове коло необхідного радіуса  $r$  з практично гомогенним розподілом освітленості. Для досягнення такого ефекту в центрі зображення створюється неосвітлена «темна» зона радіусом  $r_{0k}$  та враховується звуження світлових потоків лінзою шляхом застосування відповідної корекції ширини призматичних зон лінзи  $\Delta R_k$  світловим діаметром  $D_L = 2R_L$ . Також проводиться певна оптимізація процесу фокусування, яка полягає в тому, що відповідні зони лінзи з радіусами  $R_k$  спрямовують заломлені світлові потоки в певні кільцеві області зображення шириною  $r_{0k+1} - r_{0k}$ . Окрім того, для можливості застосування методу алмазного мікроточіння [5, 6] при практичному виготовленні мікропризмової оптики, рефракційні зони лінзи шириною  $\Delta R_k$  створюються з декількох окремих призматичних елементів, ідентичних за кутом заломлення  $\alpha_k$  і за глибиною рельєфу  $h_k$ , з лінійним розміром 1,2–1,5 мм [4], що визначається розміром ріжучої кромки наявного алмазного інструменту.

У даному випадку для створення лінзового дифузора радіусом  $R_L = 20$  мм, який одночасно формує у фокусі світлове коло радіусом  $r$  та світлове кільце радіусами  $r_2$  та  $r_1$  за умови  $r_2/r_1 = 1,05$ , необхідно змоделювати лінзу, яка формує у фокусі рівномірно освітлене коло радіусом  $r = r_{0k+1} = 4,5$  мм з додатковим світловим кільцем на периферії радіусом  $r_{0k} = 4,3$  мм і шириною  $r_{0k+1} - r_{0k} = 0,2$  мм.

Оскільки зміна ширини кільця в діапазоні  $r_2/r_1 = 1,05-1,15$  незначно впливає на пеленгаційні характеристики (див. рис. 6, криві 1, 2), а практичне виготовлення та дослідження лінзи простіше для  $r_2/r_1 > (1,1-1,2)$ , було розроблено лінзу, яка формує у фокусі «темну» область радіусом  $r_0 = 0,75$  мм та освітлену область радіусом  $r = 4,5$  мм зі світловим кільцем на периферії із зовнішнім радіусом  $r_{0k} = 4,0$  мм і шириною світлового кільця  $r_{0k+1} - r_{0k} = 0,5$  мм, тобто реалізовано випадок  $r_2/r_1 \approx 1,15$ .

Схему оптимізації фокусування для такої лінзи наведено на рис. 7,а: мікропризмові зони модельовано таким чином, що перші 3 зони лінзи # 1–3 формують області зображення радіусом  $r = 4,5$  мм з радіусами «темних» областей  $r_{0k} = 0,75, 1,5$  та  $2,5$  мм відповідно. Внаслідок процесу дифракції [7, 8] та дифузного розсіювання заломлених променів на дефектах рельєфу для реально виготовленої лінзи, за такої схеми оптимізації у фокусі формується практично рівномірно освітлена область зображення з радіусом  $r = 4,5$  мм.

Наступні зони лінзи # 4–12 фокусують заломлені промені в додаткове світлове кільце радіусом  $r = r_{0k+1} = 4,5$  мм з шириною  $r_{0k+1} - r_{0k} = 0,5$  мм. Таким чином, можна створити лінзовий концентратор, який формує у фокусі рівномірно освіт-



лене коло зі світловим кільцем на периферії. При переміщенні такої світлової плями по поверхні чотирьохплощинного фотодетектора можна очікувати лінійної залежності сигналу від величини зміщення плями від центру світлочутливої зони матриці детекторів.

Для порівняння на рис. 7,б наведено також схему оптимізації фокусування для створення традиційного лінзового концентратора # 9 з темною зоною радіусом  $r_0 = 1,0$  мм. Така лінза формує у фокусі рівномірно освітлену область радіусом  $r = 4,5$  мм [4].

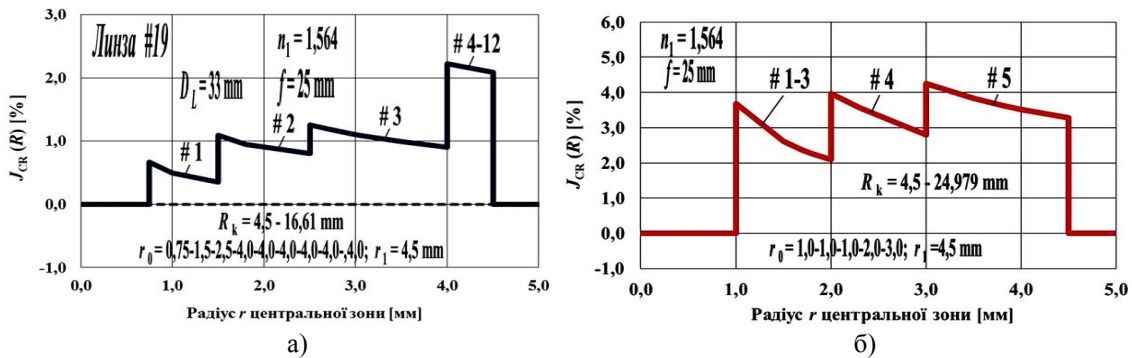


Рис. 7. Схема оптимізації фокусування лінзи-концентратора #19 з фокусом  $f = 25$  мм, яка формує світлове коло з додатковим кільцем на периферії з  $r_2/r_1 \approx 1,15$  (а) та схема для традиційної лінзи #9, яка формує тільки коло

Фрагмент розрахунків геометричних параметрів такого лінзового концентратора #19 наведено на рис. 8. Моделювання параметрів виконано для полікарбонату ( $n_1 = 1,564$ ) для довжини хвилі  $\lambda = 1,064$  мкм, яка найчастіше використовується для підсвічування рухомих об'єктів у реальних системах спостереження. Алгоритм розрахунку кутів заломлення  $\alpha_k$  та радіусів  $R_k$  призматичних зон лінзи, а також світлопропускання  $\tau_s$  аналогічний запропонованому в роботі [9]. Коефіцієнти заломлення променів  $n_1(\lambda)$  використано з роботи [10].

Розраховану структуру рельєфу зазначеного концентратора #19 для  $R_k < 16,6$  мм наведено на рис. 9.

Для лінзового концентратора #19 отримано досить високе світлопропускання  $\tau_s$  навіть до світлового діаметра лінзи  $D_L \approx 40$  мм; розраховані значення  $\tau_s$  та внеску (%) у пройдений потік світла для кожної зони лінзи з радіусами  $R_k$  наведено на рис. 10.

Загальний вигляд реального лінзового концентратора #19, виготовленого методом алмазного мікроточіння, ілюструє рис. 11,а. На рис. 11,б наведено типове зображення у фокусі пройденого трансформованого світлового променя, яке отримано при експериментальному дослідженні лінзи за допомогою колімованого лазерного променя з довжиною хвилі  $\lambda = 0,532$  мкм з діаметром пучка  $D_S = 60$  мм; оптична схема стенду детально розглянута в роботі [4].

На наступному рис. 12 наведено профіль світлової плями у фокусі виготовленого лінзового концентратора #19, який отримано за допомогою програми Jimage J 1.53. Профілограма свідчить про повну відповідність реально отриманих параметрів світлової плями розрахунковим характеристикам (рис. 7,а).



Расчет линзы Френеля ЧКЗ без центральной зоны  $r_0 = 0,75-1,5-2,5-4,0-4,0-4,0-4,0-4,0$  мм

$h = 140-640$  мкм,  $f = 25$  мм,  $D = 33$  мм для  $\lambda = 1,064$  мкм ( $n_1 = 1,564$ ),  $r_1 = 4,5$  мм, #19

Толщина пластины  $b = 6,0$  мм, предугол  $= 39,746^\circ$ ,  $\tau_{np} = 0,9516$

$\Delta R_k = W_k \operatorname{tg} \alpha_k \operatorname{tg} \gamma_k / (1 - \operatorname{tg} \alpha_k \operatorname{tg} \gamma_k)$        $h_k = W_k \operatorname{tg} \alpha_k \{1 + \operatorname{tg} \alpha_k \operatorname{tg} \gamma_k / (1 - \operatorname{tg} \alpha_k \operatorname{tg} \gamma_k)\}$

n		$R_k = R_k + \Delta R_k$		$\gamma_k = \operatorname{tg}^{-1}(R_k/f)$	$\alpha_k = \operatorname{tg}^{-1}(\sin \gamma_k / (1,564 - \cos \gamma_k))$	$\Delta R_k / W_k$	$\Delta R_k = h \operatorname{tg} \alpha_k$	$\beta = 90 - \alpha$	h	$\gamma + \alpha$	$\tau(fr_2)$	$\pi(r_2^2 - r_1^2)$	$\pi(r_2^2 - r_1^2) \tau(fr)$	N	$\tau_\Sigma$	$\tau_N$	$\tau_N / \tau_\Sigma$		
	N	$r_0$	$R_k = 4,5$ мм	рад	град	рад	град	град	мм	мм	град	%	мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>	N	$\Sigma$ зон 1-N	зон N	зон N	
0			0,000	0,000	0,00	0,000009	0,000												
1	#0		4,500	0,149	8,53	0,252451	14,464	0,000											
2	#1	$r_0 = 0,75$	5,043	0,149	8,53	0,252451	14,464	1,050	0,54273	75,536	0	23,00	0,906	63,6173	57,6081	#0	90,554 %	57,6081	4,64
3			5,585	0,149	8,53	0,252451	14,464		0,54273	75,536	140	23,00	0,905	16,2707	14,7261	#1	90,521 %	138,2588	11,13
4			6,128	0,149	8,53	0,252451	14,464		0,54273	75,536	140	23,00	0,905	18,1215	16,4011				
5			6,671	0,149	8,53	0,252451	14,464		0,54273	75,536	140	23,00	0,905	19,9722	18,0762				
6			7,214	0,149	8,53	0,252451	14,464		0,54273	75,536	140	23,00	0,905	21,8230	19,7513				
7			7,756	0,149	8,53	0,252451	14,464		0,54273	75,536	140	23,00	0,905	23,6737	21,4263				
8		$r_0 = 1,5$	8,299	0,266	15,21	0,412898	23,657	1,150	0,41088	66,343	140	38,87	0,905	25,5245	23,1014				
9	#2		8,710	0,266	15,21	0,412898	23,657	1,150	0,41088	66,343	180	38,87	0,900	27,3752	24,7764	#2	90,310 %	158,4577	12,75
10			9,121	0,266	15,21	0,412898	23,657		0,41088	66,343	180	38,87	0,900	29,2260	26,5472				
11			9,532	0,266	15,21	0,412898	23,657		0,41088	66,343	180	38,87	0,900	31,0768	28,3180				
12			9,943	0,266	15,21	0,412898	23,657		0,41088	66,343	180	38,87	0,900	32,9276	30,0888				
13			10,354	0,266	15,21	0,412898	23,657		0,41088	66,343	180	38,87	0,900	34,7784	31,8596				
14			10,764	0,266	15,21	0,412898	23,657		0,41088	66,343	180	38,87	0,900	36,6292	33,6304				
15		$r_0 = 2,5$	11,175	0,334	19,14	0,486884	27,896	1,240	0,41557	62,104	180	47,03	0,893	38,4800	35,4012				
16	#3		11,591	0,334	19,14	0,486884	27,896	1,240	0,41557	62,104	220	47,03	0,893	40,3308	37,1720	#3	90,011 %	142,3369	11,45
17		$r_0 = 4,0$	12,006	0,334	19,14	0,486884	27,896	1,240	0,41557	62,104	220	47,03	0,893	42,1816	38,9428				
18			12,422	0,334	19,14	0,486884	27,896		0,41557	62,104	220	47,03	0,893	44,0324	40,7136				
19			12,838	0,334	19,14	0,486884	27,896		0,41557	62,104	220	47,03	0,893	45,8832	42,4844				
20			13,250	0,354	20,31	0,506167	29,001	1,258	0,63139	60,999	220	49,31	0,893	47,7340	44,2552				
21	#4		13,879	0,377	21,57	0,525509	30,109	1,258	0,63804	59,891	350	51,68	0,889	49,5848	46,0260	#4	89,932 %	47,8686	3,85
22	#5		14,528	0,398	22,83	0,543334	31,131	1,297	0,67884	58,869	370	53,96	0,885	51,4356	47,7968	#5	89,862 %	50,3651	4,05
23	#6		15,198	0,421	24,14	0,560534	32,116	1,341	0,68505	57,884	410	56,25	0,879	53,2864	49,5676	#6	89,739 %	55,7018	4,48
24	#7		15,894	0,444	25,43	0,576184	33,013	1,391	0,72338	56,987	430	58,44	0,872	55,1372	51,3384	#7	89,606 %	58,3384	4,69
25	#8		16,617	0,467	26,77	0,591006	33,862	1,448	0,76004	56,138	470	60,63	0,864	56,9880	53,1092	#8	89,457 %	63,8032	5,13
26	#9		17,374	0,491	28,14	0,604862	34,656	1,512	0,79560	55,344	510	62,79	0,854	58,8388	54,8800	#9	89,282 %	69,2711	5,57
27	#10		18,167	0,516	29,54	0,617664	35,390	1,587	0,84461	54,610	550	64,93	0,842	60,6896	56,6508	#10	89,079 %	74,7585	6,02
28	#11		19,004	0,541	30,98	0,629551	36,071	1,674	0,87861	53,929	600	67,05	0,827	62,5404	58,4216	#11	89,079 %	81,5806	6,56
29	#12		19,892	0,541	30,98	0,629551	36,071	1,777	0,87861	53,929	640	67,05	0,809	64,3912	60,1924	#12	89,079 %	86,8978	6,99

Рис. 8. Фрагмент розрахунків геометричних параметрів лінзи-концентратора #19 з фокусом  $f = 25$  мм для  $\lambda = 1,064$  мкм

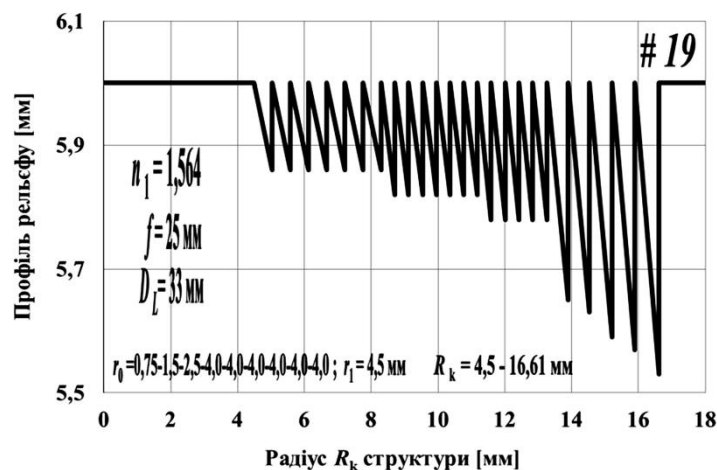


Рис. 9. Структура мікрорельєфу лінзи-концентратора #19 з фокусом  $f = 25$  мм, яка формує світлове коло з кільцем на периферії зображення для  $r_2/r_1 = 1,15$

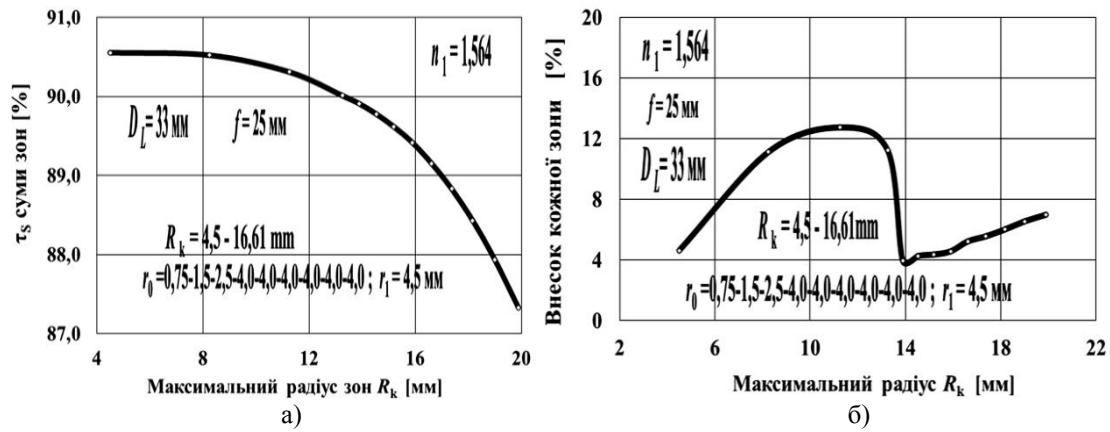


Рис. 10. Пропускання  $\tau_s$  зон (а) та внесок кожної зони (б) з радіусами  $R_k$  лінзи-концентратора #19 з фокусом  $f = 25 \text{ mm}$

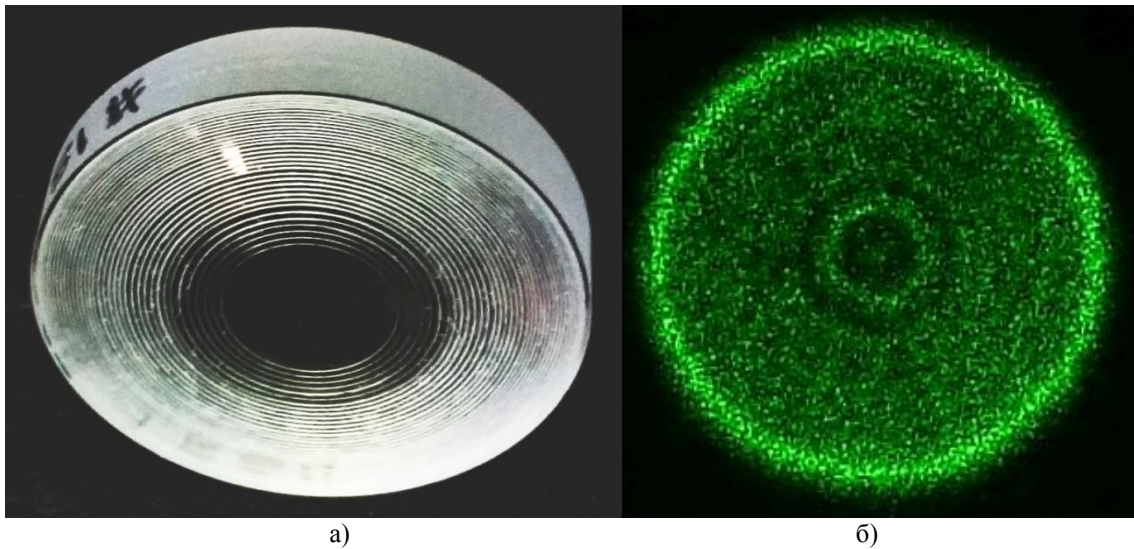


Рис. 11. Загальний вигляд (а) та світлове зображення у фокусі (б) лінзи-концентратора #19 з фокусом  $f = 25 \text{ mm}$

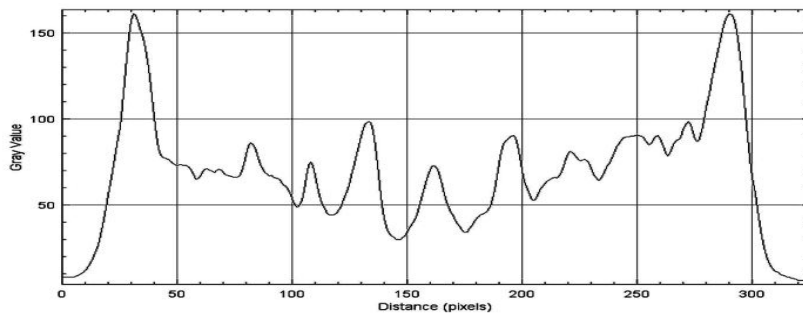


Рис. 12. Профіль світлового зображення у фокусі лінзи-концентратора #19 з фокусом  $f = 25 \text{ mm}$

Пеленгаційні характеристики  $J(\theta)$  чотирьохплощинного фотоприймача для певного кута  $\theta$  повороту концентратора до напрямку світлового потоку було дос-

ліджено на спеціальному стенді з оптичним блоком, який можна повертати в потоці світла на необхідний кут  $\theta$ . Використовувався детектор типу ФД14М круглої форми з діаметром fotocутливої поверхні  $D_D = 16$  мм. Контрольно-вимірвальний блок стенду дозволяє розраховувати модуль величини  $J(\theta)$  за сигналами ( $D_1 - D_4$ ) фотодетектора з використанням виразу (2). Схему експериментального стенду наведено на рис. 13, на якому пунктиром позначено оптичний блок.

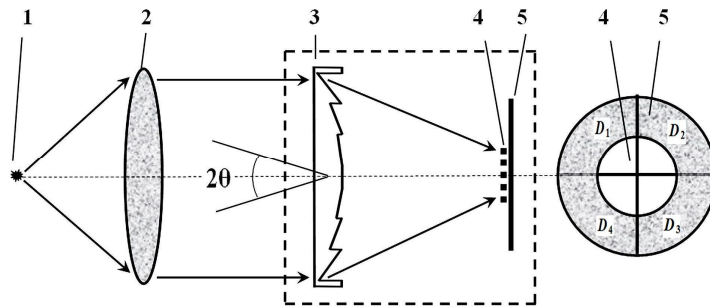


Рис. 13. Оптична схема стенду для дослідження пеленгаційних характеристик:  
 1 — джерело світла; 2 — колімаційна лінза; 3 — досліджувана лінза-концентратор;  
 4 — світлова пляма в площині чутливих елементів; 5 — квадрантний фотоприймач з елементами #1–4 в поворотному оптичному блоці;  $\theta$  — кут повороту лінзи до напрямку світлового потоку

Наступні рис. 14, 15 ілюструють деякі отримані пеленгаційні характеристики для розроблених і виготовлених концентраторів для інфрачервоної зони спектра з довжиною хвилі  $\lambda = 1,064$  мкм. Для наочності характеристики зображено при повороті лінзи-концентратора в потоці на кут  $\theta$  в обидві сторони від нульового положення, тобто для позитивних і негативних кутів пеленгу  $\theta$ , відповідно негативні значення модуля  $J(\theta)$  слід розуміти як значення, отримані за виразом (2) для негативних кутів  $\theta$ . Усі досліджені лінзові концентратори #8, #10, #13 формують у фокусі світлове коло однакового діаметру  $d_1 = 9,0$  мм.

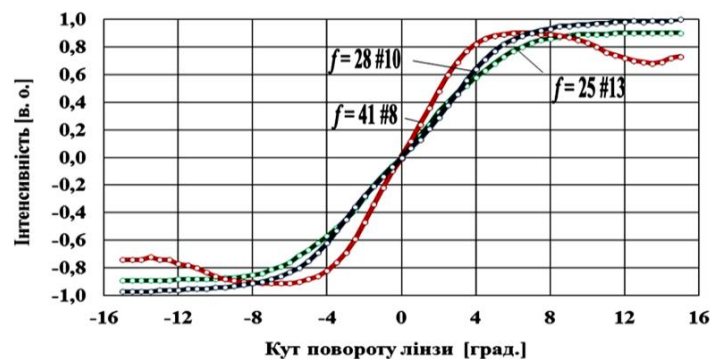


Рис. 14. Реальна пеленгаційна характеристика для лінз #10 ( $f = 27,5$  мм), #8 ( $f = 41$  мм та #13 ( $f = 25$  мм)

Вочевидь, при збільшенні фокусної відстані лінзи  $f$  максимальні кути пеленгу  $\theta_{\max}$  зменшуються, оскільки  $\theta_{\max} \approx \arctg(R_D - 0,5d_1 / f)$ . Розрахунки свідчать, що для фотодетектора радіусом  $R_D = 8,0$  мм і для світлової плями діаметром  $d_1 = 9,0$  мм, зона лінійного зростання сигналу  $J(\theta)$  для фокусної відстані  $f = 41$  мм



відповідає максимальному куту пеленгу  $\theta_{\max} \approx 4,88$  град. При подальшому зростанні кута  $\theta$  зона більш повільного зростання сигналу  $J(\theta)$  подовжується до значення  $\theta \approx 6,26$  град., для більших кутів повороту починається зона падіння сигналу фотодетектора  $J(\theta)$ . Для фокуса  $f = 28$  мм сигнал  $J(\theta)$  лінійно зростатиме в області кутів  $\theta < 7,12$  град. При подальшому зростанні кута  $\theta$  сигнал  $J(\theta)$  повільно зростає до  $\theta \approx 9,13$  град., після чого спостерігається падіння сигналу  $J(\theta)$ . Для фокуса  $f = 25$  мм сигнал  $J(\theta)$  лінійно зростатиме в області  $\theta < 7,96$  град. При подальшому зростанні кута  $\theta$  сигнал  $J(\theta)$  зростає до  $\theta \approx 10,21$  град., після чого значення  $J(\theta)$  зменшуються.

Максимальні кути пеленгу  $\theta_{\max}$  для реально отриманих пеленгаційних характеристик  $J(\theta)$  для різних фокусних відстаней  $f$  (рис. 14) практично співпадають з вищенаведеними теоретичними оцінками.

Пеленгаційні характеристики  $J(\theta)$  для спеціалізованої лінзи #19, яка формує у фокусі коло+кільце ( $r_2/r_1 = 1,15$ ) для  $f = 25$  мм і стандартної лінзи #10, яка формує коло для фокусної відстані  $f = 28$  мм, наведено на наступному рис. 15 для номінальних відстаней спостереження  $L = 25$  і 28 мм.

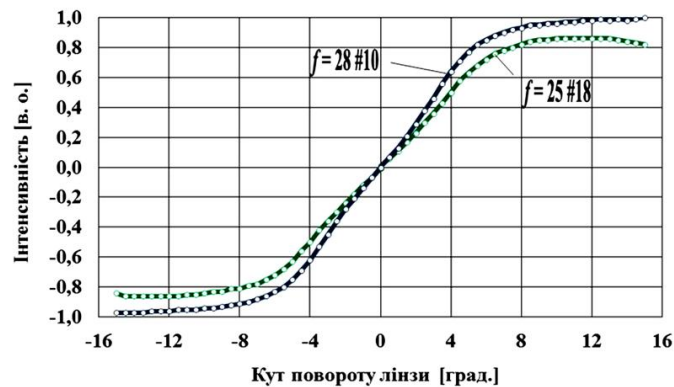


Рис. 15. Реальна пеленгаційна характеристика для лінзи #19 ( $f = 25$  мм,  $r_2/r_1 = 1,15$ ) та стандартної лінзи #10 (круг) з фокусом  $f = 28$  мм

Вочевидь, лінза #19 (коло+кільце,  $r_2/r_1 = 1,15$ ) з фокусом  $f = 25$  мм порівняно з традиційною мікропризмовою оптикою (коло) виявляє більш лінійну пеленгаційну характеристику, при тому має більший максимальний кут пеленгу, який становить  $\theta_{\max} \approx 10,0$  град., що повністю відповідає теоретичним очікуванням.

Отже, розрахункові та експериментальні дані підтверджують, що при отриманні пеленгаційних характеристик  $J(\theta)$  найбільш оптимальним варіантом фокусування зображення рухомого об'єкта на чутливу поверхню матриці фотодетекторів є використання лінзового концентратора, який формує у фокусі світлове коло з кільцем на периферії. Отримана пеленгаційна характеристика  $J(\theta)$  є практично лінійною.

Для розширення області лінійності пеленгу  $\theta$  доцільно використовувати лінзи з якомога меншою фокусною відстанню  $f = 15\text{--}25$  мм, при цьому область лінійності пеленгаційної характеристики  $J(\theta)$  в кутовому просторі збільшується до значень кутів  $\theta = 10,0\text{--}13,0$  град. Однак унаслідок наближення кутів заломлення мікропризм  $\alpha_k$  у такому лінзовому концентраторі до критичних значень  $\alpha_{k \max}$  [4] для лінз з малою фокусною відстанню  $f$  зменшується коефіцієнт світлопропускан-

ня  $\tau_s$ . Тому максимально можливий діаметр такої лінзи також зменшується до світлового діаметра  $D_L = 30\text{--}35$  мм.

## Висновки

Розроблено алгоритм математичного моделювання оптичного сигналу чотириплощинного фотодетектора при переміщенні по його поверхні світлової плями у формах кола та кільця.

Для отримання лінійної пеленгаційної характеристики пристрою запропоновано формувати осесиметричну світлову пляму у формі кола з кільцем на його периферії певних розмірів і інтенсивності. Створено метод моделювання та проведено комплекс розрахунків геометричних параметрів таких спеціалізованих мікропризмових концентраторів світлових потоків, які формують у фокусі рівномірно освітлене зображення у формі кола з кільцем.

Методом алмазного лезового мікроточіння виготовлено експериментальні зразки спеціалізованих лінзових концентраторів світла з оптичного полікарбонату. Проведено дослідження оптичних і світлотехнічних характеристик експериментальних зразків фокусуєчих елементів, результати яких показали повну відповідність експериментальних даних отриманим теоретичним характеристикам.

Розроблені спеціалізовані концентраторні лінзи, які трансформують необхідним чином пройдені потоки світла, можуть ефективно використовуватися в оптичних блоках систем стеження за рухомими об'єктами замість звичайної пари елементів «дифузор – фокусуєча лінза».

1. Дмитриев А.В., Иванов А.В., Хохлов А.Р. Численное моделирование распространения света через диффузор. *Фундаментальная и прикладная математика*. 2009. Т. 15, № 6. С. 33–41.
2. Engineered Diffusers. UPL: <http://www.rpcphotonics.com/engineered-diffusers-information/>
3. Петров В.В., Коростельов О.П., Смішко Г.П., Бріцький О.І., Шанойло С.М., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Косяк І.М., Христин В.М. Спосіб виготовлення оптичного дифузора. Патент України на винахід № 120022, Бюл. № 17 від 10.09.2019 р.
4. Antonov E.E., Fu M.L., Petrov V.V., Manko D.Yu., Rong K.H. Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*, 2021. Vol. 29, #24 / 22 Nov 2021 / 38958-38970; DOI: 10.1364/OE.438590 (Q1).
5. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Шанойло С.М. Микропризмы в офтальмологии. Киев: Наук. думка, 2019. 224 с. ISBN 978-9660-00-1639-2.
6. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. Москва: Машиностроение, 1979. 344 с.
7. Ландсберг Г.С. Оптика. Москва: Наука, 1976. 928 с.
8. Petrov V., Kryuchyn A., Antonov E., Lapchuk A., Shanoylo S. Optical Phenomena in Microprism Diagnostic Set KK-42. Proc. of SPIE, 2011. Vol. 8011, 80119A. 22 General Congress on Optics «ICO-22», 15–19 August, 2011, Puebla, Mexico. DOI: 10.1117/12.900751.
9. Антонов Є.Є. Роздільна здатність і призматична дія мікропризмових елементів Френеля. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*, 2013. Т. 15, № 2. С. 7–16. DOI: 10.35681/1560-9189.2013.15.2.103374.
10. N. Sultanova, S. Kasarova and I. Nikolov. Dispersion properties of optical polymers. *Acta Physica Polonica A*. 2009. **116**. P. 585–587. URL: <http://www.refractiveindexes.info>

Надійшла до редакції 08.04.2022