

## **МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 621.384.3

### **ВИБІР ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ БОРТОВИХ ОГЛЯДОВО-ПОШУКОВИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

*Микитенко В.І., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*Досліджено питання створення механізму адекватної оцінки якості зображення в багатоканальних бортових оглядово-пошукових ОЕС*

#### **Вступ**

Сучасні оглядово-пошукові оптико-електронні системи (ОПОЕС), що встановлюються на борту літального апарату, морського судна, наземного об'єкту, є лише частиною бортової інформаційної системи. Але фактично їх характеристики є одними з визначальних чинників при формуванні показника ефективності функціонування всього носія. Переважна більшість ОПОЕС відноситься до неавтоматичних іконічних систем і їх адекватне оцінювання обов'язково має враховувати зорове сприйняття оператора. Практично це означає, що якість ОПОЕС визначається якістю вихідного зображення в полі зору оператора.

Існують два способи оцінювання якості зображення – суб'єктивний і об'єктивний. Перший є універсальним, дає найнадійніші результати, але пов'язаний зі значними витратами часу і коштів. Крім того, за цим способом можна оцінювати тільки вже виготовлені ОПОЕС. Другий спосіб не має вказаних недоліків, але потребує подальших доопрацювань в частині моделювання зорової діяльності людини та процесів перетворення інформації в ОПОЕС.

За багато років досліджень розроблені десятки об'єктивних показників якості зображень. Деякі з них є описовими (наприклад, шкали NIIRS для монохромних зображень і MS IRS для кольорових зображень[1, 2]). Але більшість ґрунтуються на аналітичних залежностях, що дає змогу використовувати їх на етапі проектування систем. Розробка об'єктивного критерію якості зображення є нетривіальною задачею і останнім часом суттєво ускладнилась. Причиною цього є витіснення одноканальних ОПОЕС багатоканальними системами. Тому до звичних вже так званих "споживчих" (ймовірність виявлення та розпізнавання, дальність виявлення, час пошуку цілі тощо) і технічних (різних для видимої та інфрачервоної областей спектру) показників якості додалися оцінки ефективності комплексування зображень в багатоканальних ОПОЕС. Також потрібно зважати на підвищення вимог до

ОПОЕС і відповідного зміщення акцентів при аналізі системи "ОПОЕС – оператор".

### **Постановка задачі**

Актуальність показника якості зображень безпосередньо залежать від його користувачів. Умовно можна виділити три групи таких користувачів: замовники ОПОЕС, розробники апаратної частини, розробники програмної частини ОПОЕС. Перших цікавлять здебільшого узагальнені показники ефективності системи в складі всього комплексу обладнання, що встановлене на носії; другі зацікавлені в аналізі конструктивних та інженерних аспектів впливу кожної ланки системи на вихідне зображення; треті переважну увагу приділяють математичним алгоритмам обробки сигналів і дуже незначну - перетворенням сигналів в оптичному тракті ОПОЕС.

У даній статті зроблена спроба проаналізувати найбільш вживані показники якості зображень і виділити з них найперспективніші для створення інструментарію аналізу і синтезу багатоканальних бортових ОПОЕС, виходячи з того, що споживачем інформації є людина-оператор, яка виконує завдання в реальному масштабі часу.

### **Основна частина**

Методики оцінювання якості зображень як основа інженерного інструментарію аналізу багатоканальних ОПОЕС мають враховувати процеси перетворення інформації в вхідних оптичних блоках, в блоках цифрової обробки інформації та процес зорового сприйняття зображення, що створене пристроєм відображення. В цьому сенсі показник якості має бути комплексним. Очевидно, що з огляду на велику кількість значимих чинників необхідно конкретизувати та обмежувати область досліджень. Насамперед можна розділити етапи зорової діяльності оператора. Робота системи "бортова ОПОЕС – оператор" складається з послідовного виконання кількох типових завдань: пошук та виявлення заданого об'єкту, розпізнавання та ідентифікація об'єкту, усвідомлення ситуації (situation awareness). На кожному з цих етапів використовується інформація з різних каналів і їх комбінацій. Ймовірно, що методи комплексування інформації в каналах будуть різними.

В той же час відображення інформації здійснюється, зазвичай, одним пристроєм. Отже можна припустити, що для одної системи "бортова ОПОЕС – оператор" показник якості зображення буде змінюватись в залежності від поточної задачі, процесів перетворення інформації в вхідному оптичному блоці та в блоці цифрової обробки.

Зорове сприйняття зображення, яке формується бортовою ОПОЕС, залежить від контексту виконуваної задачі. Пошук та виявлення об'єкту в реальній ситуації зазвичай об'єднуються в одну задачу. Моделі механізмів зорового сприйняття при виконанні цієї задачі є найпростішими серед інших. Слушно було б чекати також відносної простоти і ефективності алгоритмів

комплексування інформації на цьому етапі. Але отримані експериментальні результати є неоднозначними. Так, наприклад, виявлення пішохода в нічних зображеннях дороги, сформованих телевізійною та короткохвильовою ПЧ камерами, було кращим при наявності комплексування, ніж без нього [3]. Такі ж результати дали психофізіологічні дослідження зорового пошуку на природних фонах [4, 5] при використанні зображень окремих каналів та комплексованого зображення. В той же час встановлено, що не завжди традиційні алгоритми комплексування, наприклад, такі, як метод головних компонент (РСА), покращують виявлювальну здатність системи "ОПОЕС – оператор" [6].

Задачі розпізнавання та ідентифікації об'єкту на комплексованих кольорових зображеннях вирішуються операторами зазвичай швидше, ніж на зображеннях з окремих каналів, або на комплексованих монохромних зображеннях [7, 8]. В деяких випадках монохромні методи комплексування дають гірші результати, ніж окремі канали [8].

Situation awareness - усвідомлення ситуації, є досить новою концепцією змістовного аналізу навколишньої обстановки оператором. Ця концепція останнім часом набуває широкої популярності в інтерпретації М.Р. Ендслі [9] і ґрунтується на ідеї усвідомлення оператором елементів навколишнього середовища, їх розуміння в контексті змісту поточного завдання і прогнозування майбутнього стану навколишньої обстановки. Цілком ймовірно, що з огляду на значне підвищення вимог до ефективності ОПОЕС, задача усвідомлення ситуації стане стандартною в методиках розрахунків цих систем. Дослідження впливу комплексування зображень на усвідомлення ситуації оператором виявили позитивний ефект для тих методів, що використовувались [6, 10].

Показники якості, що зазвичай використовуються при оцінці комплексування зображень, можна розділити на три групи в залежності від параметрів, які входять до складу показника:

- параметри тільки вихідного комплексного зображення;
- параметри вихідного та референтного ідеального зображень;
- параметри вихідного зображення та зображень окремих каналів.

До першої групи можна віднести середньоквадратичну похибку, ентропію зображення, показники, що базуються на відношенні сигнал/шум або контрасту зображення тощо.

Прикладом другої групи показників є різницеве пікове відношення сигнал/шум, розраховане на основі розподілення Вігнера [11]. Очевидно, що походження вихідного зображення, в тому числі – попереднє комплексування, не впливає на оцінювання якості за першими двома групами показників. Тому тут можна використовувати також і показники, які широко розповсюджені в дослідженнях ефективності зорового сприйняття, наприклад, критерії на основі порогових контрастів [12, 13], алгоритми оцінювання різниці енергій спотвореного та ідеального зображень [14].

Серед показників третьої групи використовуються взаємна ентропія [15], інформаційна схожість [16], якість передачі контурів [17, 18], показник структурної схожості [19].

Була досліджена поведінка трьох типів показників якості – імовірнісного на основі порогових контрастів, різницевої енергії зображень та структурної схожості при оцінці виявлення та розпізнавання зображення людини на слабо структурованому фоні в видимому та середньому інфрачервоних діапазонах у різних умовах освітлення.

Перехід від задачі виявлення до задачі розпізнавання моделювався збільшенням масштабу зображення в 2 рази і зміщенням об'єкта в центр поля зору. Розглядалися тільки чорно-білі зображення в кожному окремому каналі та комплексоване адитивне зображення з різними ваговими коефіцієнтами. Розраховані показники якості порівнювались з суб'єктивною оцінкою. Встановлено, що на етапі виявлення об'єкта комплексовані зображення здебільшого забезпечують кращі суб'єктивну та імовірнісну оцінки. При розпізнаванні частіше кращі результати показував канал видимого діапазону. Явної відповідності між змінами суб'єктивної та об'єктивних не імовірнісних показників якості при переході від однієї задачі до іншої не встановлено.

### **Обговорення результатів досліджень**

Аналіз перелічених показників якості свідчить про те, що жоден з них не перекриває всіх етапів роботи системи "ОПОЕС – оператор". На наш погляд це суттєво зменшує адекватність оцінювання перетворення інформації в усьому тракті її проходження в різні проміжки часу. Тобто за умови багатоканальності ОПОЕС середовище комплексування [20] не може бути відображене в рамках єдиної моделі. Найбільш узагальненим показником якості зображення залишається ймовірність виконання поточної задачі системою "ОПОЕС – оператор". Алгоритм обчислення такого показника має включати всі основні чинники формування вихідного зображення, але в першу чергу – давати можливість аналізу технічних параметрів ОПОЕС. Єдиний алгоритм оцінки якості зображення ні протязі всього функціонування системи "ОПОЕС – оператор" дасть змогу визначити збалансованість системи на різних етапах виконання візуального завдання. Таким показником на наш погляд може бути величина відхилення ймовірність виконання різних етапів візуальної задачі при незмінній фоноцільовій обстановці, або ймовірність виконання однієї візуальної задачі при зміні фоноцільової обстановки.

### **Висновки**

В ході дослідження встановлено, що для об'єктивної оцінки якості зображень в бортових багатоканальних ОПОЕС потрібен єдиний для всіх етапів роботи показник, який окрім інших значимих чинників перетворення інформації від об'єкта до оператора враховував би комплексування інформаційних каналів. Таким узагальненим показником може бути

ймовірність виконання візуальної задачі. Єдиний показник якості дозволить оцінювати збалансованість системи "ОПОЕС – оператор" в різних умовах функціонування.

Подальшим завданням дослідження є розробка вивіреного алгоритму розрахунку імовірнісного показника якості для типових візуальних задач і різницевого імовірнісного показника збалансованість системи.

### **Література**

1. Leachtenauer J. C., Malila W., Irvine J., Colburn L., Salvaggio N. General Image-Quality Equation // *Applied Optics*. – 1997. - Vol. 36, No. 32, P. 8322 – 8328.
2. Image Resolution Assessment and Reporting Standards (IRARS) Committee, 1995, "Multispectral Imagery Interpretability Rating Scale, Reference Guide" // [http://www.fas.org/irp/imint/niirs\\_ms](http://www.fas.org/irp/imint/niirs_ms)
3. Krebs W.K., McCarley J.M., Kozek T, Miller G.M., Sinai M.S., Werblin F.S. An evaluation of a sensor fusion system to improve drivers' nighttime detection of road hazards // *Proceedings of the 43rd Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society*. – 1999. - №43. – P.1333-1337.
4. Krebs W.K., Scribner D.A., McCarley J.S. Comparing behavioral receiver operating characteristic curves to multidimensional matched filters // *Opt. Eng.* – 2001. V.40. - №9. – P.1818-1826.
5. Waxman, A.M, Gove A.N., Seibert M.C., Fay D.A., Carrick J.E., Racamato J.P., Savoye E.D., Burke B.E., Riech R.K., McGonagle W.H., Craig D.M. Progress on color night vision: visible/IR fusion, perception and search, and low-light CCD imaging // *Proceedings of SPIE*. – 1996. - V.2736. – P. 96-107.
6. Krebs W.K, Sinai M.J. Psychophysical Assessments of Image-Sensor Fused Imagery // *Human Factors*. – 2002. - V.44. - №2. – P. 257-271.
7. Steele P.M., Perconti P., (1997). Part task investigation of multispectral image fusion using gray scale and synthetic color night vision sensor imagery for helicopter pilotage // *Proceedings of SPIE*. – 1997. - V. 3062. - P. 88-100.
8. Essock E. A., Sinai M. J., DeFord J. K., Hansen B. C., Srinivasan N. Human Perceptual Performance With Nonliteral Imagery: Region Recognition and Texture-Based Segmentation // *Journal of Experimental Psychology*. – 2004. - V. 10, №. 2. – P. 97–110.
9. Endsley M. R. Situation awareness global assessment technique (SAGAT) // *Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*. (New York: IEEE). – 1988. – P. 789-795.
10. Sinai M.J, McCarley J.S., Krebs W.K, Essock E.A. (1999). Psychophysical comparisons of single and dual-band fused imagery // *Proceedings of the SPIE-Synthetic Advanced Vision*.- 1999.- V. 3691. – P. 1-8.
11. Beghdadi A., Iordache R. Image quality assessment using the Joint Space/Spatial-Frequency Representation // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. - 2006. – V. 2006. - Article ID 80537. – P. 1–8.
12. Аксютов Л.Н. Операционные пороги пространственного разрешения зрительной системы и восприятия контрастов объектов // *Оптический журнал*. – 2002. - №8. – С. 36-42.
13. Matchko R.M., Gerhart G.R. ABCt of foveal vision // *Optical Engineering*. - 2001. – V.45. – №12. – P. 2735 – 2745.
14. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь. – 1986. - 247 с.
15. Wang Y., Lohmann B. Multisensor image fusion: concept, method and applications. Technical report, University of Bremen. – 2000. - 11 p.

16. Qu G., Zhang D., Yan P. Information measure for performance of image fusion // Electronics Letters. - 2002. - V.38. - №.7. - P. 313–315.
17. Piella G. New quality measures for image fusion // Proceeding of the 7th International Conference on Information Fusion. – Stockholm. - July 2004. – P. 1559–1564.
18. Xydeas C.S., Petrovic V. Objective image fusion performance measure // Electronic Letters. - 2000. - V.36. - № 4. - P. 308-309.
19. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. - 2004. - V.13, P. 600–612.
20. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних системах керування рухомих об'єктів / Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування.- 2005. – Вип. 30. – С. 36 - 41.

<p>Микитенко В.І. <b>Выбор показателя качества в многоканальных бортовых обзорно-поисковых ОЭС.</b></p> <p>Рассмотрены разные подходы к оцениванию качества изображений в многоканальных бортовых иконических ОЭС. Показано, что для определения эффективности функционирования системы "обзорно-поисковая ОЭС - оператор" в рамках единой модели в ходе выполнения всех типичных заданий предпочтительными являются вероятностные показатели.</p>	<p>Mykytenko V.I. <b>Index of quality assessment for a multichannel airborne surveillance OES.</b></p> <p>Different approaches are considered to the evaluation of image quality for a multichannel airborne imaging OES. It is shown that probabilistic indexes are preferable for determination of efficiency of the "surveillance OES - operator" system within unified framework during fulfilment of all typical tasks.</p>
--	--

*Надійшла до редакції  
10 червня 2006 року*

УДК 535.3 (681.784)

## МОДЕЛИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИБОРАХ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

*Булавин А.В., Колобродов В.Г., Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*Произведен сравнительный анализ двух моделей обнаружения объектов. Выявлены особенности и возможности использования этих моделей в многоканальных приборах ночного видения с учетом особенностей работы различных каналов и влияния параметров, используемых в этих моделях*

### **Вступление**

Многоканальные приборы ночного видения (МПНВ) широко применяются для поиска пострадавших во время стихийных бедствий, обеспечения разведки, добычи и транспортировки полезных ископаемых, строительно-монтажных, ремонтных работ, вождения всех типов транспорта в сложных условиях

видимости, экологического контроля, обеспечения работы правоохранительных органов, наблюдения, прицеливания и прочее [1].

Под моделью обнаружения подразумевается набор входных величин, параметров и методика, алгоритм их обработки для расчета вероятности обнаружения объекта. В работе [2] произведен анализ двух моделей обнаружения объектов с целью выявления особенностей работы моделей, сравнения результатов их работы в одинаковых условиях и оценки их точности.

В данной статье представлен сравнительный анализ двух моделей с учетом особенности их использования в различных каналах МПНВ, указаны их ограничения при изменении значений входных параметров.

### **Постановка задачи**

МПНВ делятся на комплексированные, комбинированные и интегрированные.

Комплексированные системы состоят из двух или нескольких каналов, работающих в различных спектральных диапазонах и объединенных в единой конструкции. Эти каналы имеют одно общее или несколько различных входных окон для различных областей спектра. Отсутствует совместная обработка изображений для разных спектральных диапазонов, которые выводятся на отдельные дисплеи или на один попеременно.

Комбинированные состоят из двух или нескольких каналов, работающих в различных спектральных диапазонах и объединенных как конструктивно, так и на основе совмещения оптических осей. Имеется одно общее входное окно, изображение выводится на один либо несколько дисплеев.

Интегральные МПНВ имеют каналы, объединенные на основе общей оптической оси, систему совместной обработки изображений и вывод интегрированного изображения на единый дисплей.

Преимуществом МПНВ, относительно своих предшественников, является обеспечение круглосуточной и всепогодной работы при наличии световых и пыледымовых помех, точного измерения дальности и координат объекта в сочетании со сравнительно малыми массой, габаритами и энергопотреблением. В этих приборах реализуется высокая адаптивность, модульный принцип построения и автоматизированный контроль параметров.

В МПНВ подбор каналов работы осуществляется таким образом, чтобы недостатки одних каналов компенсировались достоинствами других. В качестве отдельных каналов могут быть использованы:

1. Пассивно-активные и пассивные приборы ночного видения (ПНВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП).
2. Низкоуровневые телевизионные системы (НТВС).
3. Тепловизионные приборы (ТПВ-приборы).
4. Теплопеленгаторы (ТП).
5. Дневные телевизионные системы и дневные оптические приборы (ДТВС и ДОП).

6. Активно-импульсные ПНВ.

7. Радиолокационные станции (РЛС).

Вышеуказанные каналы имеют различные спектральные диапазоны работы, в каждом из них используются различные входные параметры. В связи с этим возникает необходимость в анализе различных моделей обнаружения объектов, с целью выявления возможности их применения в различных каналах для повышения их информативности, точности получаемых результатов.

### **Анализ моделей обнаружения**

Наиболее перспективными комбинациями каналов для МПНВ, в зависимости от задачи применения, являются следующие комбинации, согласно статьи [1]:

1. ПНВ на базе ЭОП + ДОП или лазерный дальномер (ЛД).
2. ТП + ПНВ на базе ЭОП.
3. НТВС + ТПВ-прибор (+ ЛД).
4. ДТВС + ТПВ-прибор (+ ЛД).
5. АИ ПНВ (АИ НТВС) + ТПВ-прибор.
6. РЛС + ТПВ-прибор + АИ ПНВ (АИ НТВС).

Из всех этих сочетаний наиболее удачным является МПНВ на базе комбинации 5. Он гарантирует круглосуточную и всепогодную работу при наличии световых и пыледымовых помех, точное измерение дальности и координат объекта в сочетании со сравнительно малыми массой, габаритами и энергопотреблением. Вывод изображений АИ- и ТПВ-каналов на единый телевизионный дисплей позволяет перейти к интегрированному МНПВ, а применение встроенной микро-ЭВМ – автоматизировать систему. Применение комбинации 6 еще больше повысит эффективность МПНВ, но это приведет к резкому увеличению массы, габаритов, энергопотребления и стоимости.

Далее, в качестве отдельных каналов, входящих в состав МПНВ, будем рассматривать только 1 и 3 варианты. В соответствии с этим, комбинация 5 может быть такой:

ПНВ на базе ЭОП + ТПВ-прибор.

Рассмотрим кратко недостатки каждого из указанных выше каналов, входящих в комбинацию 5.

Пассивно-активные ПНВ на основе ЭОП сравнительно просты и дешевы, обеспечивают видимость как объекта наблюдения, так и окружающего его фона (местности) независимо от температурных контрастов объекта и фона. Но эти приборы не могут работать при пониженном уровне естественной ночной освещенности (ЕНО) в пассивном режиме, несмотря на существенные достижения в разработке ЭОП (ЭОП 4 и 4+ поколений). При этом используется активный режим – подсвета объекта излучением инфракрасного осветителя встроенного в ПНВ, что демаскирует прибор. Они не могут работать при ухудшенной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад и пр.),



при воздействии световых помех и при низких природных контрастах объекта с фоном. К тому же эти ПНВ не могут точно измерять дальность до объекта.

Тепловизионные приборы могут работать во многих случаях при пониженной прозрачности атмосферы, в пыли и в дыму и при воздействии световых помех, если их спектр не совпадает со спектральным диапазоном работы ТПВ-прибора. ТПВ-прибор функционирует независимо от уровня ЕНО и светотехнических контрастов объекта и фона, способен обнаруживать даже скрытые объекты по их тепловому излучению. Но в этих приборах качество изображения сильно зависит от температурных контрастов объекта и фона, имеет слабую детализацию и специфический характер. ТПВ-приборы не могут работать в некоторых видах туманов. В них трудно увидеть линию горизонта, а иногда и фон. Приборы сложны, дороги, в ряде случаев используют низкотемпературное (криогенное) охлаждение до 77-80 К, не способны точно измерять дальность до объекта.

Основными (преимущественными) информационными параметрами или характеристиками наблюдаемых объектов или ограничениями для перечисленных выше каналов являются:

для пассивно-активных ПНВ на основе ЭОП – это уровень естественной ночной освещенности (ЕНО) и коэффициент отражения поверхности объекта;

для тепловизионных приборов – температурный контраст объекта и фона.

Далее кратко рассмотрим особенности некоторых моделей обнаружения объекта.

Следует отметить, что все модели, рассматриваемые ниже, имеют два начальных существенных ограничения: они используют упрощенное описание объекта и фона, которое не соответствует в большинстве случаев действительности, и эмпирическую модель описания характеристик человека-оператора для задачи обнаружения.

Приведем краткое описание модели Bailey-Rand (BR), которая является контрастной и основана на данных по визуальному обнаружению – Blackwell и Blackwell-McCreedy. При выборе данных объект демонстрируется на время менее 1/3 секунды, затем поисковая модель считает вероятность обнаружения, собирая одиночные значения вероятностей, которые были приняты независимо. Наблюдателем является человек. Объекты, которые демонстрируются, имеют круглую форму с различными размерами и наблюдаются на однородном фоне. В этой модели вероятность обнаружения объекта – явная функция относительного контраста и неявно – функция углового размера объекта [2].

Следующая модель – это поисковая модель Night Vision Electronic Systems Directorate (NVESD).

Наблюдателям демонстрируются 8-ми зонные объекты на однородном фоне. Время представления более длительное, чем в модели BR. Вероятность обнаружения рассчитывается исходя из количества пар линий на критический размер объекта.

В этой модели вероятность обнаружения объекта – явная функция количества пар линий на критический размер объекта.

Таким образом, первая из рассмотренных модель BR – более чувствительна к относительному контрасту объекта и фона и имеет сравнительно небольшую чувствительность к размеру объекта.

Вторая – поисковая модель NVESD – имеет низкую чувствительность к относительному контрасту объекта и фона, существенное влияние на расчетное значение вероятности обнаружения оказывает размер наблюдаемого объекта, в частности количество пар линий, укладывающихся на его критический размер.

Указанная выше модель обнаружения Bailey-Rand дает методологию для вычисления вероятности визуального обнаружения [2]:

$$P_d = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ -4.2 \cdot \left( \frac{C_R}{C_T} - 1 \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

«+» когда  $\frac{C_R}{C_T} \geq 1$  и «-» когда  $\frac{C_R}{C_T} < 1$ ,

$$C_T = 10^{-2} \cdot 10^{\left[ \frac{1}{\log(3440(\frac{L}{R})) + 0.5} \right]} \text{ и } C_R = \frac{C_0}{1 + SGR \cdot \left[ \exp \left( 3.912 \cdot \frac{R}{V} \right) - 1 \right]}, \quad (2)$$

где  $C_T$  - порог обнаружения для человека при среднем значении окружающего освещения между 30 и 100 фут-люмен;  $C_R$  - явный контраст, как функция физического контраста объекта  $C_0$ ; SGR – коэффициент небо-земля;  $V$  - метеорологическая дальность видимости;  $L$  - диаметр круга с такой же площадью, как и площадь объекта;  $R$  - максимальная дальность обнаружения объекта.

Вероятность того, что объект будет обнаружен группой наблюдателей в течение процедуры поиска изображения для модели NVESD согласно [2], равна:

$$P(t) = P_\infty \cdot \left[ 1 - \exp \left( \frac{-t}{n \cdot \tau_{FOV}} \right) \right], \quad (3)$$

где  $t$  – время наблюдения в секундах;  $n$  – коэффициент отношения площади области наблюдения (FOR) и поля зрения (FOV):  $n = FOR/FOV$ ;  $\tau_{FOV}$  - среднее время захвата, которое рассчитывается из уравнения:

$$\tau_{FOV} = \frac{t_f}{P_0} \approx \frac{3.4}{P_\infty} \approx 6.8 \cdot \left[ \frac{N}{(N_{50})_D} \right]^{-1},$$

где  $t_f$  - среднее время фиксации ( $t_f \approx 0.3c$  для типичных задач наблюдения);  $P_0$  - вероятность обнаружения при одноразовом проблеске объекта для каждого наблюдателя;  $N$  - количество пар линий на критический размер объекта;  $N_{50}$  - количество пар линий для 50% вероятности обнаружения объекта.

Величина  $P_\infty$  является частью множества экспериментов с одним наблюдателем, который может обнаружить объект при неограниченном времени наблюдения с учетом фоновых помех:

$$P_\infty = \frac{\left[ \frac{N}{(N_{50})_D} \right]^E}{1 + \left[ \frac{N}{(N_{50})_D} \right]^E}, \quad E = 2.7 + 0.7 \cdot \left[ \frac{N}{(N_{50})_D} \right]. \quad (4)$$

Для сравнения моделей введем начальные условия:

1. Коэффициент небо-земля  $SGR = -0,1$ ;
2. Дальность обнаружения  $R = 3$  км;
3. Температура объекта  $T_t = 305$  К;
4. Температура фона  $T_b = 300$  К;
5. Метеорологическая дальность видимости  $V = 15$  км;
6. Диаметр круга с площадью эквивалентной площади объекта  $L = 2,3$  м;
7. Коэффициент  $n = 0,05$ ;
8. Отношение  $N/N_{50} = 1,0$ ;
9. Время наблюдения  $t = 1$  с.

При таких начальных данных первая и вторая модель дают вероятность обнаружения 0,81 и 0,47, соответственно.

Проведем расчет каждого из параметров (кроме метеорологической дальности видимости), необходимого для обнаружения с 50% вероятностью, при неизменных остальных параметрах.

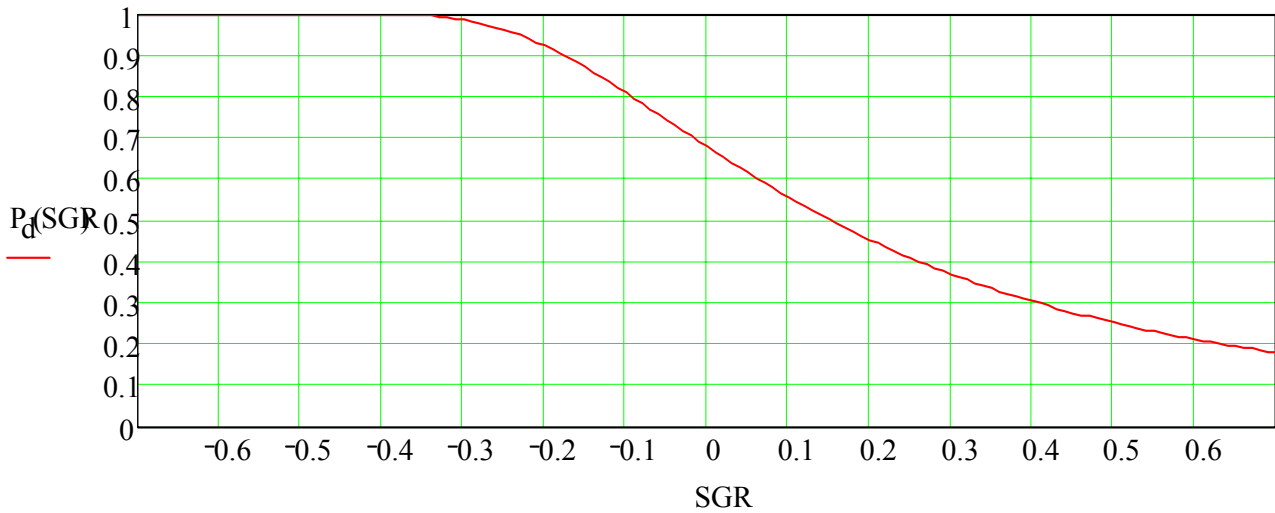
В результате расчета получаем следующие значения параметров:

1.  $P_d = 50\%$  при  $SGR = 0,151$ ;
2.  $P_d = 50\%$  при  $R = 3,921$  км;
3.  $P_d = 50\%$  при  $T_t = 299$  К;
4.  $P_d = 50\%$  при  $T_b = 305$  К;
5.  $P_d = 50\%$  при  $L = 1,8$  м;
6.  $P(t) = 50\%$  при  $n = 0,01$ ;
7.  $P(t) = 50\%$  при  $N/N_{50} = 1$ ;
8.  $P(t) = 50\%$  при  $t = [3, \infty)$  с.

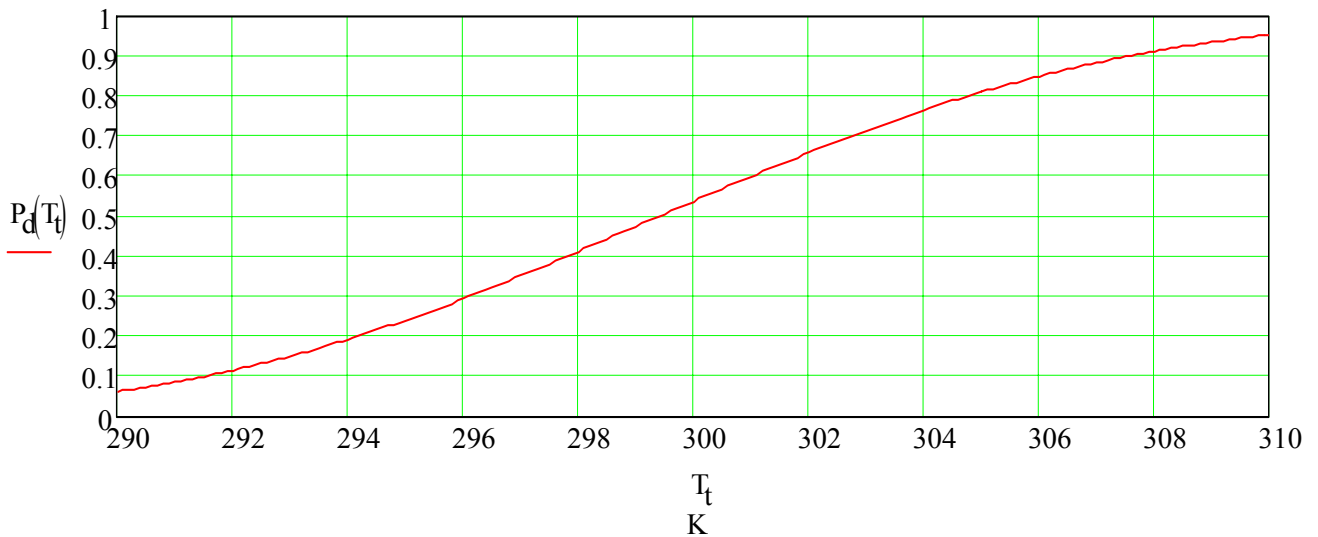
Таким образом, выбранные ранее начальные условия существенно не отличаются от данных, полученных в результате расчета обнаружения с 50% вероятностью и являются в большинстве случаев приближенными к реальным.

Результаты указанных выше расчетов вероятности обнаружения представлены на графиках.

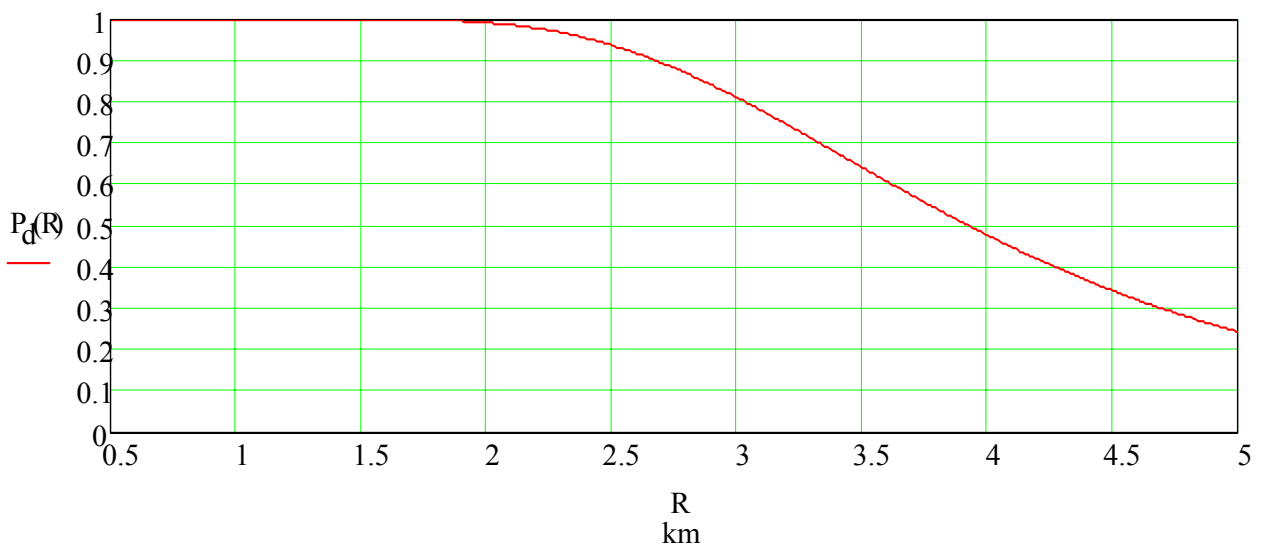
1. При изменении коэффициента небо-земля в пределах  $[-0,7; 0,7]$ .



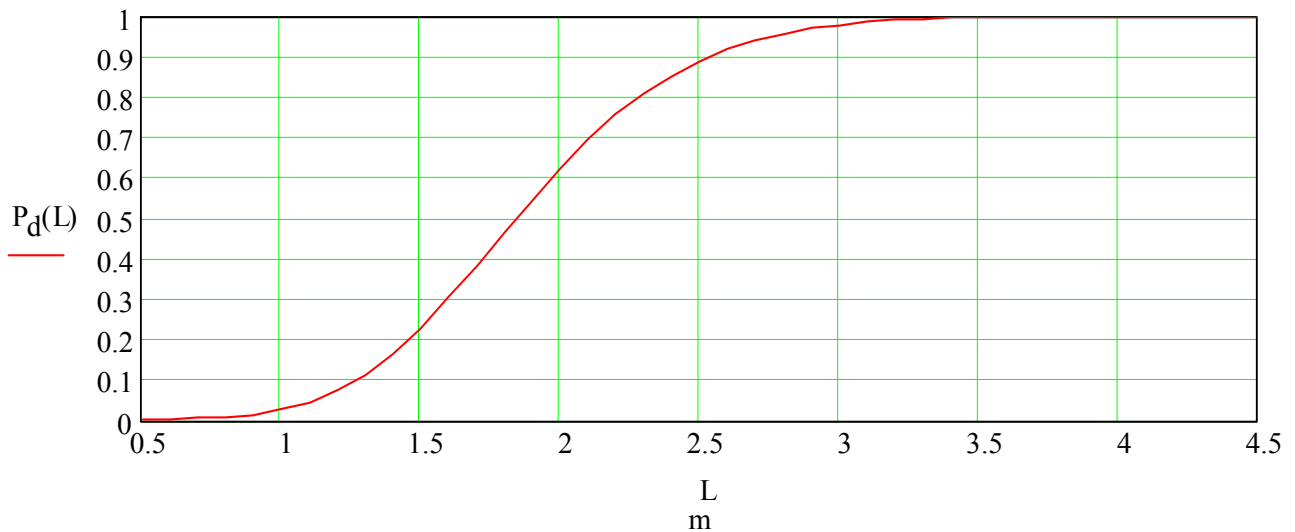
2. При изменении температуры объекта в пределах [290;310] К.



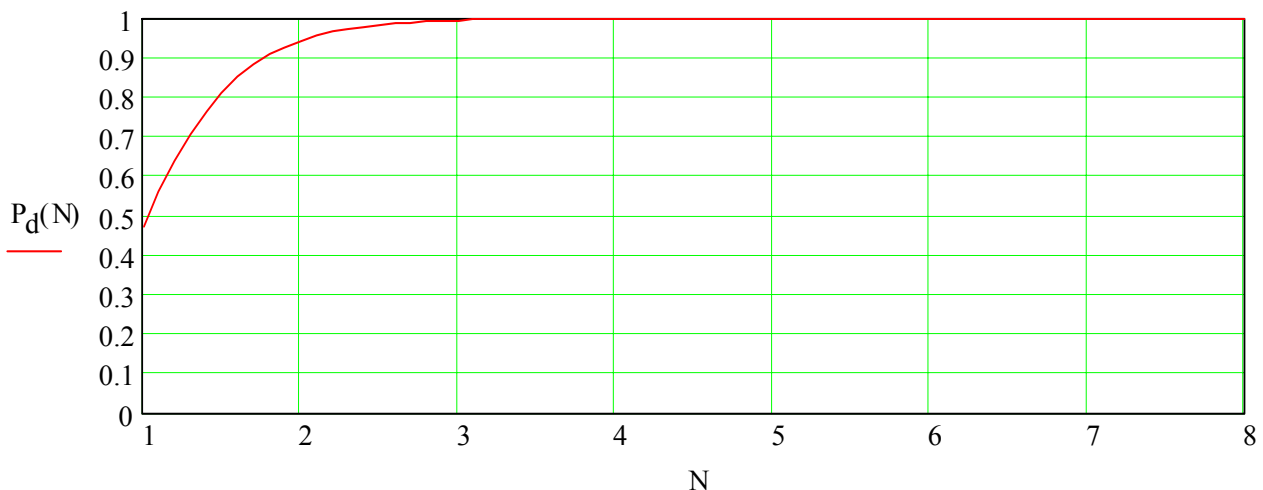
3. При изменении дальности обнаружения в пределах [0,5;5] км.



4. Для различных размеров объекта в пределах  $[0,5;5]$  м (диаметр круга с площадью эквивалентной площади объекта).



5. Зависимость вероятности обнаружения от количества пар линий на критический размер наблюдаемого объекта:



Из анализа полученных результатов следует, что:

1. Для контрастной модели **Bailey-Rand** наблюдается четкая зависимость вероятности обнаружения от контраста небо-земля и контраста объект-фон. Увеличение вероятности обнаружения происходит при уменьшении первого и увеличении второго. Преимущество этой модели над моделью **NVESD** является то, что она учитывает контрастные перепады в наблюдаемых картинах. Если перепад небо-земля значителен, то ее использование является нецелесообразным ( $SGR < -0.8$ ,  $SGR > 0.5$ ).

2. Для модели **Bailey-Rand** вероятность обнаружения имеет опосредствованную (неявную) зависимость от дальности обнаружения. При средних дальностях и определенных начальных условиях использование модели целесообразно.

3. Для моделі **NVESD** спостерігається чітка залежність ймовірності виявлення від кількості пар ліній на критичний розмір об'єкта, т.е. від куткового розміру спостережуваного об'єкта. Для моделі **Bailey-Rand** спостерігається чітка залежність ймовірності виявлення від діаметра круга з площею еквівалентної площі об'єкта.

### **Висновки**

Таким чином, при великих відстанях спостереження (малому кутковому розмірі спостережуваного об'єкта) модель **NVESD** дає занижені значення ймовірності виявлення і її використання неінформативно. Модель **Bailey-Rand** при певних значеннях контрасту небо-земля дає хороший результат. Для цієї моделі існує відстань, на якій спостерігається різке збільшення ймовірності виявлення, а потім різкий спад, що свідчить про непридатність її використання (при обраних нами початкових умовах пік ( $P_d = 1$ ) спостерігається на відстані в 9,1 км).

При малих відстанях спостереження і великих контрастних перепадах модель **Bailey-Rand**, практично незалежно від розміру об'єкта, дає хороший результат. В цьому випадку модель **NVESD** можна використовувати при малих перепадах контрасту. Якщо перепад  $\Delta T < 1\text{K}$  модель втрачає чутливість, як зазначено в [2].

Перспективним напрямком подальших досліджень є розгляд ймовірності розпізнавання об'єктів, спостережуваних багатоканальними пристроями.

### **Література**

1. Волков В.Г. Багатоканальні пристрої нічного бачення наземного застосування. // Спеціальна Техніка. – 2002. – Вип. 4. – С. 56–62.
2. Grant R., Edwina L., Thomas J. Target acquisition methodology for visual and infrared imaging sensors. // Optical Engineering. – 1996. – Vol. 35. - Issue 10. - pp. 2773-3052

Булавін О.В., Колобродов В.Г. <b>Моделі виявлення об'єктів у багатоканальних пристроях нічного бачення.</b> Проведено порівняльний аналіз двох моделей виявлення об'єктів. Виявлені особливості та можливості використання цих моделей у багатоканальних пристроях нічного бачення з врахуванням особливостей роботи різних каналів та впливу параметрів, що використовуються у цих моделях.	Bulavin O.V., Kolobrodov V.G. <b>Models of targets acquisition in multichannel night vision devices.</b> The benchmark analysis for two models of target acquisition is done. Particularities and possibility of the use of these models in multichannel night vision devices had been discovered with provision for particularities of the work different channel and influences parameters, used in these models.
---	--

*Надійшла до редакції  
10 червня 2007 року*

УДК 681.787:621.373

## О ПРИМЕНЕНИИ СВЕТОДИОДА В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ БЕЛОГО СВЕТА

*<sup>1)</sup>Овчар Н.И., <sup>1)</sup>Гураль Т.И., <sup>2)</sup>Кучеренко О.К., <sup>2)</sup>Чуча А.М.; <sup>1)</sup>Казенное предприятие «ЦКБ» Арсенал», г. Киев, Украина; <sup>2)</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*Рассмотрена возможность применения светодиода в интерферометре белого света на основе сравнения спектрофотометрических характеристик этого излучателя с галогенной лампой накаливания и анализа выходного сигнала интерферометра для рассматриваемых типов излучателей*

### **Вступление**

Современные интерферометры белого света оснащаются высоко-скоростными камерами и компьютерами, что позволяет проводить контроль профиля поверхности в реальном масштабе времени, и получать трехмерную картину с разрешением до  $1 \text{ \AA}$ .

Необходимость создания новых приборов обусловлена высокими требованиями по точности контроля зеркал интерферометров, лазерных гироскопов, элементов микросхем и т. п. Сущность работы интерферометра белого света заключается в сканировании поверхности в направлении нормали к ней и определения положения экстремума контраста интерференционной картины. Особенностью получения интерференционной картины в белом свете является требование минимизации разности оптической длины хода лучей в опорном и измерительном каналах интерферометра. Если эта разность превышает 3 мкм, то интерференция в белом свете не наблюдается.

### **Постановка задачи**

При разработке интерферометров белого света важное значение имеет выбор элементной базы прибора. К таким элементам относятся источники излучения. Традиционно для создания интерферометров в качестве источника излучения применялись галогенные лампы накаливания. Однако эти лампы имеют ряд недостатков влияющих на технические и эксплуатационные характеристики прибора. Спектр излучения лампы накаливания выходит за видимую область и несет в себе большую долю теплового излучения. Значительная тепловая мощность выделяется в цепях питания лампы. Все это негативно влияет на температурный режим работы интерферометра и в конечном итоге на его разрешающую способность.

Для уменьшения влияния этих факторов приходится усложнять конструкцию осветительной части прибора вводя в нее осветительный световод, позволивший расположить галогенную лампу на значительном расстоянии от измерительного блока интерферометра белого света. Кроме этого, спектрофотометрические характеристики лампы накаливания меняются с

течением времени и зависят от стабильности питающих напряжений. Срок работы лампы накаливания невелик. Вместе с тем в настоящее время промышленностью выпускаются яркие, долговечные и дешевые светодиоды, имеющие непрерывный спектр излучения в видимой области спектра. В тоже время следует отметить, что спектральная характеристика излучения не в полной мере соответствует спектру излучения лампы накаливания, а это может повлиять на вид выходного сигнала интерферометра реализующего Фурье преобразование интерференционной картины белого света [1].

Задача настоящей статьи заключается в сравнении спектрофотометрических характеристик галогенной лампы накаливания и светодиода белого света, а также сравнение путем математического моделирования сигналов на выходе интерферометра при применении в качестве источника излучения ламп накаливания и светодиодов белого света.

**Целью исследования** является подтверждение возможности использования светодиодов при разработке приборов.

### **Экспериментальные исследования спектрофотометрических характеристик галогенной лампы накаливания и светодиода белого света**

Нами было проведено экспериментальное сравнение спектрофотометрических характеристик блока излучателя при применении двух типов излучателей.

Измерения проводились на аттестованном фотометре-радиометре ФР2. При определении характеристик узла излучателя с галогенной лампой КГМ 12-50 в состав узла входили эллиптический отражатель, осветительный световод длиной 1,5м и дихроичный светофильтр на базе стекол СЗС21-ЖС17. Результаты измерения освещенности создаваемой этим узлом на входном окне фотометра при изменении питающего напряжения приведены в табл.1.

Таблица 1

U, В	12	11	10	9	8
E, лк	$4,27 \cdot 10^3$	$3,66 \cdot 10^3$	$2,65 \cdot 10^3$	$1,83 \cdot 10^3$	$1,34 \cdot 10^3$

Применение в узле излучателя светодиода белого света позволило исключить из конструкции осветителя световод.

В состав узла излучателя кроме светодиода LXHL-LW6C входила линзовая конусная насадка формирующая индикатрису излучения в диапазоне телесных углов  $\pm 10^\circ$  на уровне  $1/e$  и диафрагмой диаметром 4мм.

В ходе измерений изменялось расстояние L от насадки до входного окна фотометра, а также изменялся ток питания I светодиода.

Результаты измерений приведены в табл. 2.



Таблиця 2

L, мм	0	10	20	30	40
E, лк					
I=300мА	$96 \cdot 10^3$	$82,9 \cdot 10^3$	$72,3 \cdot 10^3$	$61,2 \cdot 10^3$	$50,8 \cdot 10^3$
E, лк					
I=700мА	$174 \cdot 10^3$	$148 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$110 \cdot 10^3$	$90,4 \cdot 10^3$

Сравнение полученных результатов показывает, что по световому потоку и создаваемой освещенности узел излучателя со светодиодом белого света более чем на порядок превосходит узел излучателя на базе галогенной лампы накаливания.

Особенностью спектральной характеристики светодиода белого света является наличие двух максимумов в спектре излучения один из которых находится в фиолетовой области спектра. На практике спектральная характеристика светодиода корректируется дихроичным светофильтром на базе стекол ЖС17. Скорректированная спектральная характеристика узла излучателя на базе светодиода приведена на рис.1.

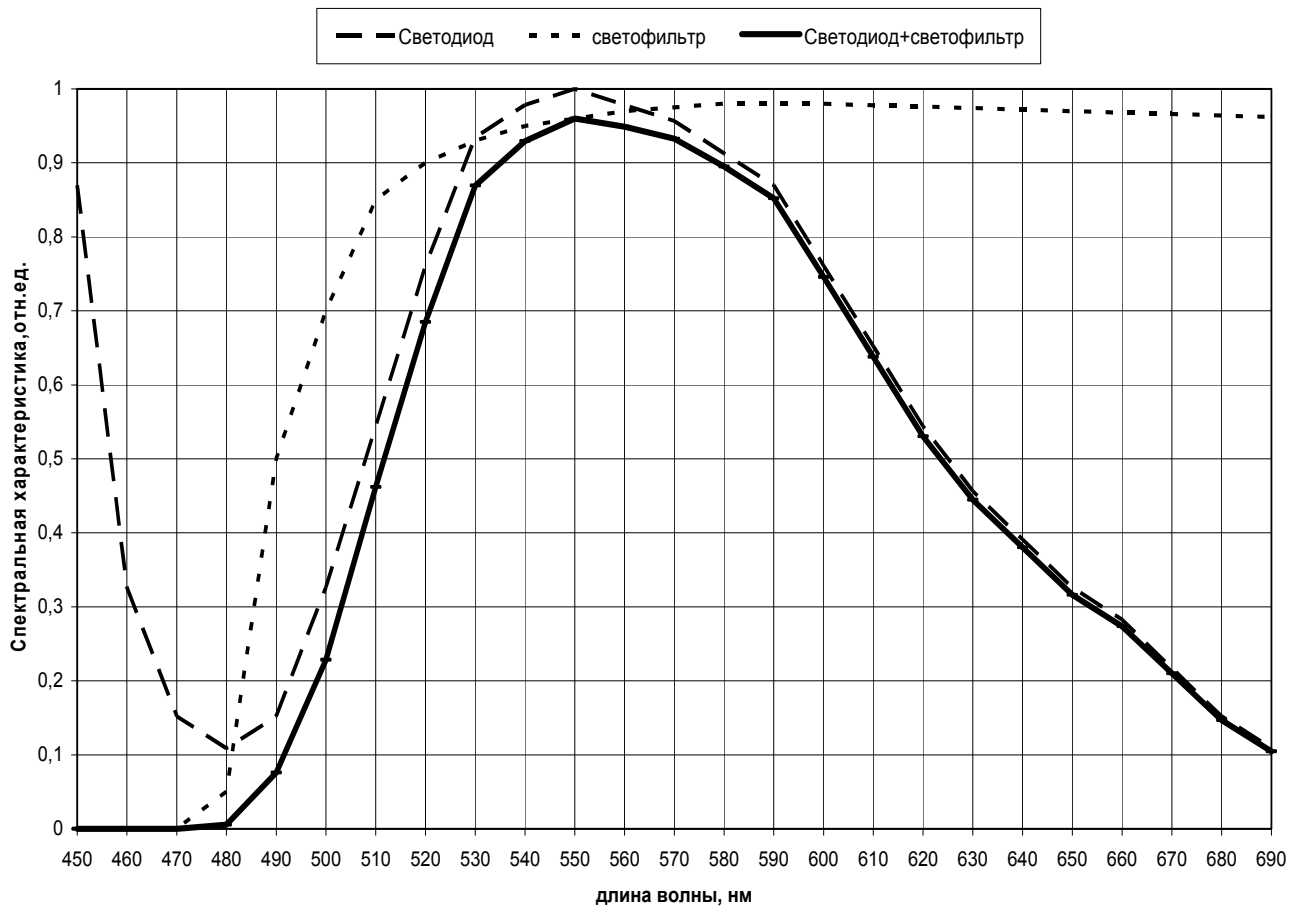


Рис. 1. Спектральная характеристика узла излучателя на базе светодиода белого света

Характеристика спектральной излучательной способности узла излучателя на базе галогенной лампы КГМ 12-50 с эллиптическим отражателем, световодом и светофильтром на базе стекол СЗС21-ЖС17 приведена на рис.2.

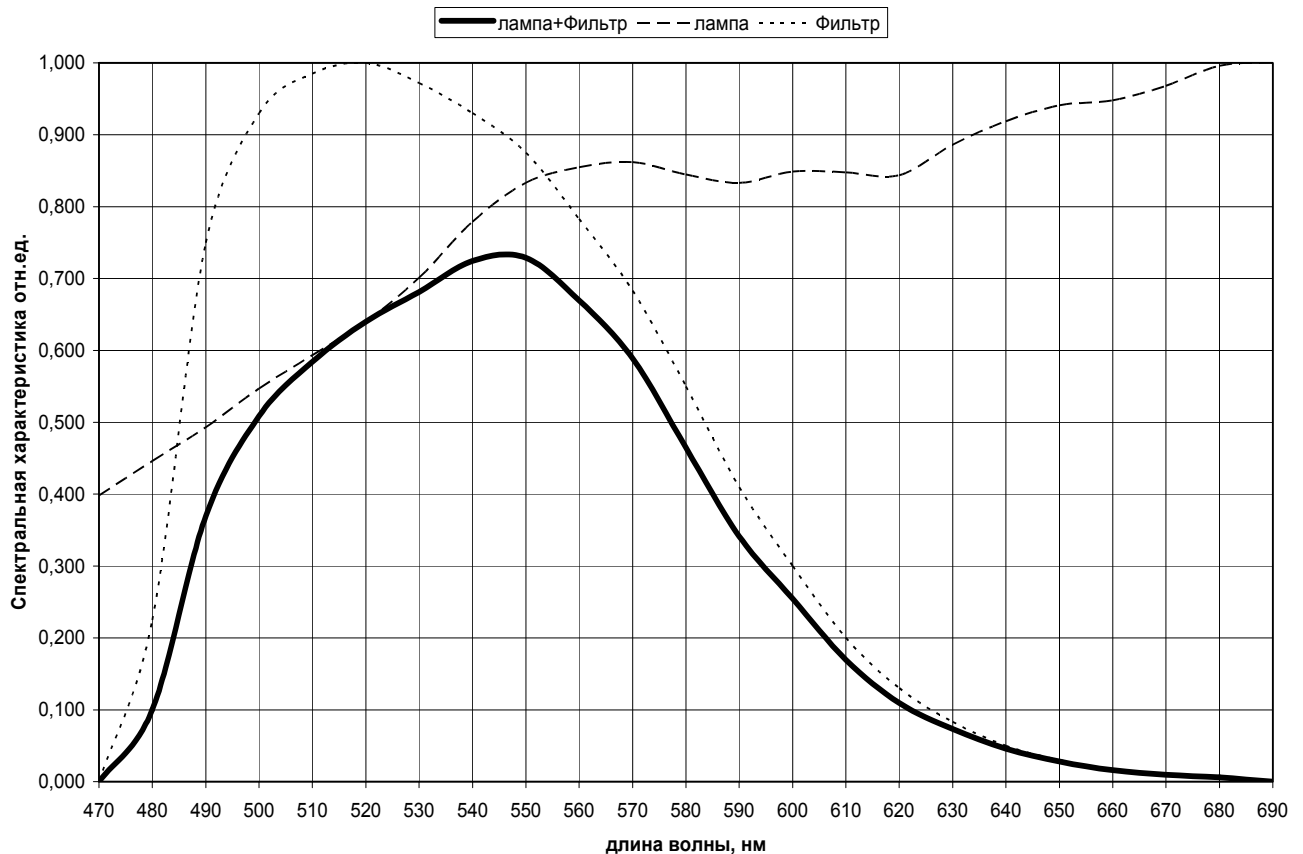


Рис. 2. Спектральная характеристика узла излучателя на базе галогенной лампы

Анализ приведенных кривых показывает, что спектральные характеристики излучательной способности двух типов осветителей отличаются. В таблице 3 приведены данные по спектральной излучательной способности рассматриваемых типов осветителей в области спектра 470-670нм с шагом 10 нм.

### Математическое моделирование выходного сигнала интерферометра

В ходе контроля микродефектов поверхности компьютер регистрирует данные о интенсивностях  $I(x)$  в последовательных кадрах камеры во время непрерывного механического сканирования  $\xi$  интерференционной системой много раз через несколько десятков микрометров.  $\xi=0$  – положение сканирования соответствующее нулевой оптической разности хода в начале отсчета. Таким образом, обрабатывается массив интерференционных картин белого света как функция положения сканирования для множества пикселей в кадре. Выбранная нами модель изменения во времени модулированной интенсивности для отдельного пикселя представляет собой совокупность интерференционных картин образованных несвязным наложением монохроматических длин волн выбранных с шагом 10 мкм в спектральной области 470-690 мкм соответствующей видимой части спектра.

Таблиця 3

Длина волны, мкм	Лампа, отн. ед.	Светодиод, отн. ед.	Длина волны, мкм	Лампа, отн. ед.	Светодиод, отн. ед.
$\lambda_i$	$P_{Mi}$	$P_{Di}$	$\lambda_i$	$P_{Mi}$	$P_{Di}$
470	0,000	0,000	590	0,342	0,852
480	0,100	0,005	600	0,255	0,746
490	0,370	0,076	610	0,170	0,638
500	0,509	0,228	620	0,110	0,530
510	0,584	0,462	630	0,074	0,445
520	0,640	0,685	640	0,046	0,380
530	0,681	0,869	650	0,028	0,316
540	0,724	0,929	660	0,016	0,274
550	0,729	0,960	670	0,010	0,210
560	0,669	0,949	680	0,006	0,147
570	0,589	0,933	690	0,000	0,105
580	0,465	0,895			

Амплитудные значения каждой гармоники были взяты из таблицы 3. Такой подход соответствует реальной функции преобразования интерферометра представляющей собой Фурье преобразование вида [1]:

$$p(k, x) = |FT[I(\xi, x)]|^2, \quad (1)$$

$$\varphi(k, x) = \arg\{FT[I(\xi, x)]\}, \quad (2)$$

где  $P$  и  $\varphi$  – величина и фаза каждого слагаемого интерференционной картины;  $k$  – волновое число;  $x$  – текущая координата или номер кадрового пикселя.

Моделирование процесса наложения волн производилось в соответствии с соотношениями:

$$S_M(t) = \sum_{i=1}^n P_{Mi} \cos\left(\frac{2\pi \cdot t \cdot 10^{-6}}{\lambda_i \cdot 10^{-9}}\right), \quad (3)$$

$$S_D(t) = \sum_{i=1}^n P_{Di} \cos\left(\frac{2\pi \cdot t \cdot 10^{-6}}{\lambda_i \cdot 10^{-9}}\right), \quad (4)$$

где  $S_M$  – результат суммирования интерферирующих длин волн для галогенной лампы;  $S_D$  – результат суммирования интерферирующих длин волн светодиода;  $P_{Mi}$ ,  $P_{Di}$  – амплитуды гармоник спектральных составляющих для галогенной лампы и светодиода соответственно;  $n$  – количество гармоник.

Результат моделирования в графическом виде представлен на рис. 3. Из рисунка следует, что вид интерференционной картины при замене лампы

накалювання світодиодом практично не змінюється. Відхилення амплітуд в інформаційних максимумах інтерференційної картини не перевищує 2%.

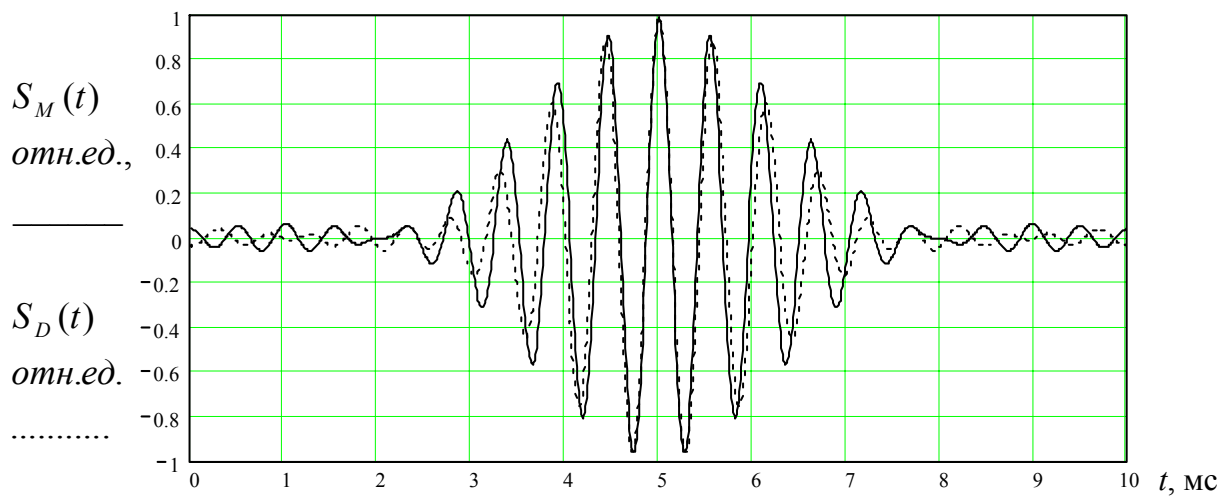


Рис. 3. Вид інтерференційної картини отриманої в результаті моделювання.

### Висновки

Проведені експериментальні дослідження і математичне моделювання доводять, що потік випромінювання і освітленість, створювані вузлом випромінювача інтерферометра білого світла на основі світодиода, на порядок перевищують аналогічні характеристики для вузла випромінювача на основі галогенної лампи накалювання. Відмінності спектральної характеристики вузлів випромінювача двох типів практично не впливають на вигляд інтерференційної картини інтерферометра білого світла. Відхилення інформативних амплітуд не перевищують 2%. Ураховуючи відзначені в статті переваги вузла випромінювача на основі світодиода, саме це конструктивне рішення може бути рекомендовано при проектуванні інтерферометрів білого світла. Дальніші дослідження по розглянутій проблемі будуть присвячені удосконаленню схеми і конструкції інтерферометра білого світла з метою підвищення точності і надійності проводимих на приладі вимірювань.

### Література

1. Лазерна дальнометрія. / Під ред. В.П. Васильєва. - М.: Радио і зв'язь, 1995. - 257 с.
2. Карих Е.Д., Манак І.С. Полупровідникові лазери. - Мн.: БГУ, 1999. - 199 с.
3. U.S. Bialiauski, I.S. Manak Influence Laser Diode Radiation Phase Non-Uniformity Account for Improvement Phototachymeter Accuracy Characteristics // Electronics and Electrical Engineering. – 2006. – №3(67). - С. 5-8.

Овчар Н.И., Гураль Т.И., Кучеренко О.К., Чуча А.М. Про використання світлодіода в інтерферометрі білого світла.

Розглянута можливість використання світло-

Ovchar N.I., Gural T.I., Kucherenko O.K., Chucha A.M. About application light diode in white light interferometer.

The opportunity of application light diode in

діода в інтерферометрі білого світла на основі порівняння спектрофотометричних характеристик цього випромінювача з галогенною лампою накаливання і аналізу вихідного сигналу інтерферометра для типів випромінювачів, що розглядаються.	white light interferometer is considered on the basis of comparison spectrophotometric of the characteristics irradiator with halogen incandescent lamp and analysis of a target signal interferometer for considered types излучателей.
---	--

*Надійшла до редакції  
12 червня 2007 року*

УДК 528.7, 629.78

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФFUЗНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ

*Михеенко Л.А., Боровицкий В.Н., Гордиенко Ю.А., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*В работе представлены методика и аппаратура для измерения распределения яркости в плоскости выходной апертуры диффузного излучателя на основе интегрирующей сферы. Выполнен анализ экспериментальных данных о распределении яркости и сформулированы рекомендации по выбору оптимальных параметров диффузного излучателя*

### **Введение**

Диффузные излучатели (ДИ) на основе интегрирующей сферы (ИС) нашли широкое применение при измерении энергетических характеристик многоэлементных приемников излучения и устройств на их основе: цифровых фотоаппаратов, цифровых видеокамер, цифровых оптических микроскопов, обзорно-поисковых и следящих систем, многоспектральных сканирующих устройств космического базирования и др.[1-2]. Одной из основных характеристик ДИ является неравномерность распределения яркости в плоскости выходной апертуры. В большинстве практических случаях эта неоднородность не должна превышать величин порядка 1 – 3% [3].

Достаточно полная теория ДИ представлена в работах [4-5]. Однако получение аналитических выражений, описывающих распределение яркостного поля в выходной апертуре ДИ связано со значительными математическими трудностями. Это обусловлено сложным характером формирования яркостного поля в реальной ИС при произвольном расположении источников излучения, формы и направленности их индикатрис, влияния технологических факторов (элементы крепления источников излучения и т.п.) .

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование факторов, определяющих формирование яркостного поля выходной апертуры ДИ и разработка практических рекомендаций по обеспечению максимальной однородности яркости в проектируемых ДИ для прецизионной фотометрии.

### **Экспериментальная установка**

Экспериментальная установка, предназначенная для исследования ДИ, показана на Рис.1. Она состоит из макета ДИ на основе ИС диаметром 260 мм с круглой выходной апертурой диаметром 50 мм и фотоэлектрического микроскопа (ФЭМ). Внутренняя поверхность ИС покрыта краской на основе  $BaSO_4$  с поливиниловым спиртом [5]. Конструкция ИС позволяла устанавливать источники излучения на различных расстояниях и в различных плоскостях по отношению к выходной апертуре. Схема расположения источников излучения показана на Рис. 2. В качестве источников излучения использовались галогенные лампы Capsuleline Pro фирмы Philips 100Вт на 12 В.

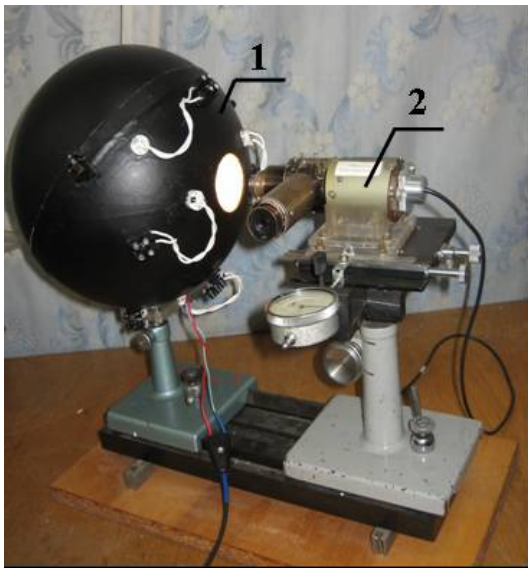


Рис. 1. Установка для исследования диффузного излучателя, где:  
1 - диффузный излучатель;  
2 - фотоэлектрический микроскоп.

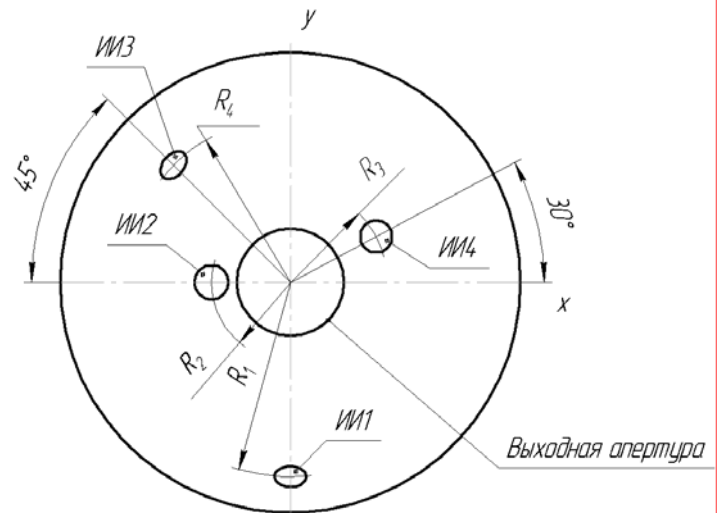


Рис. 2. Схема расположения источников излучения (ИИ) внутри диффузного излучателя (вид со стороны выходной апертуры).

Для обеспечения неизменных условий эксперимента питание галогенных ламп осуществлялось от блока питания ВСЛ-5К, подключенного к стабилизатору Б2-3. Перед источниками излучения устанавливались экраны для предотвращения попадания прямых лучей от галогенных ламп в выходную апертуру. Перед источниками излучения устанавливались экраны для предотвращения попадания прямых лучей от галогенных ламп в выходную апертуру.

С такой же целью в выходном отверстии ИС могла быть установлена цилиндрическая бленда переменной линзы.

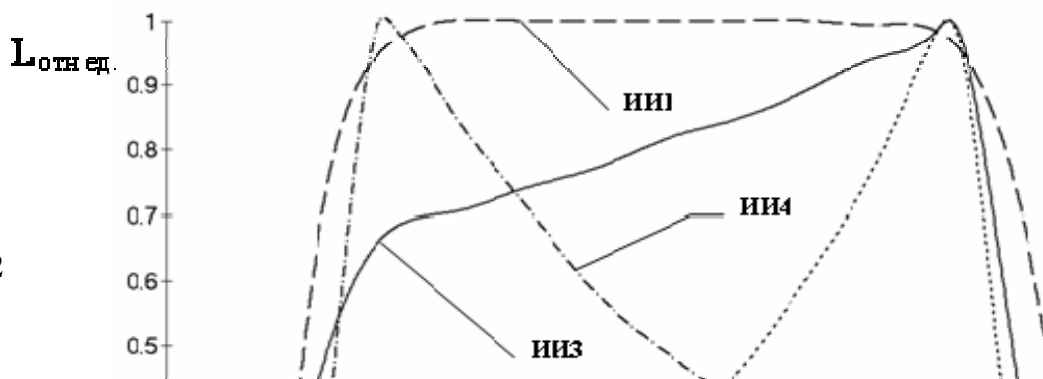


Рис. 3.- Распределение яркости в сечении выходной апертуры при различных положениях источников излучения.

Рис. 4. Распределение яркости в сечении выходной апертуры при установке бленды и различном расположении источников излучения, длина бленды – 60мм, диаметр – 50мм.



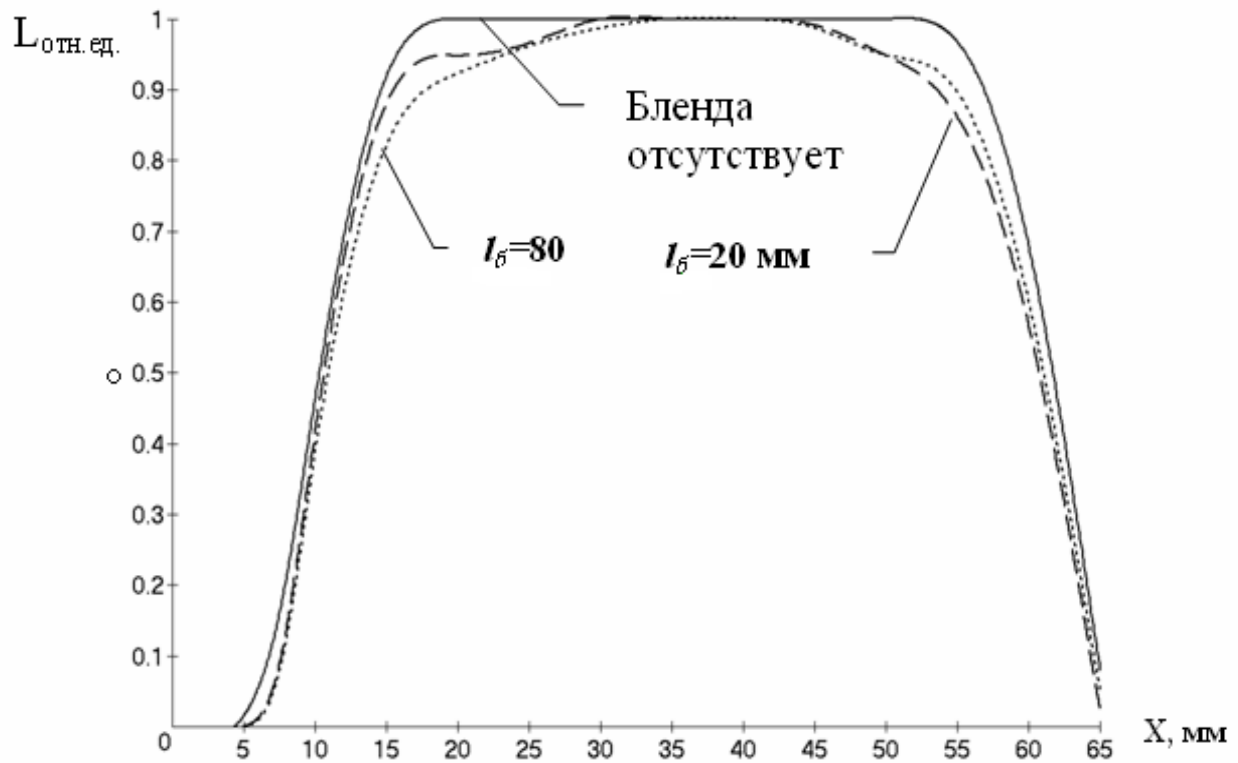


Рис. 5. Распределение яркости в сечении выходной апертуры в зависимости от длины бленды  $l_b$  при использовании источника излучения ИИ1 с экраном.

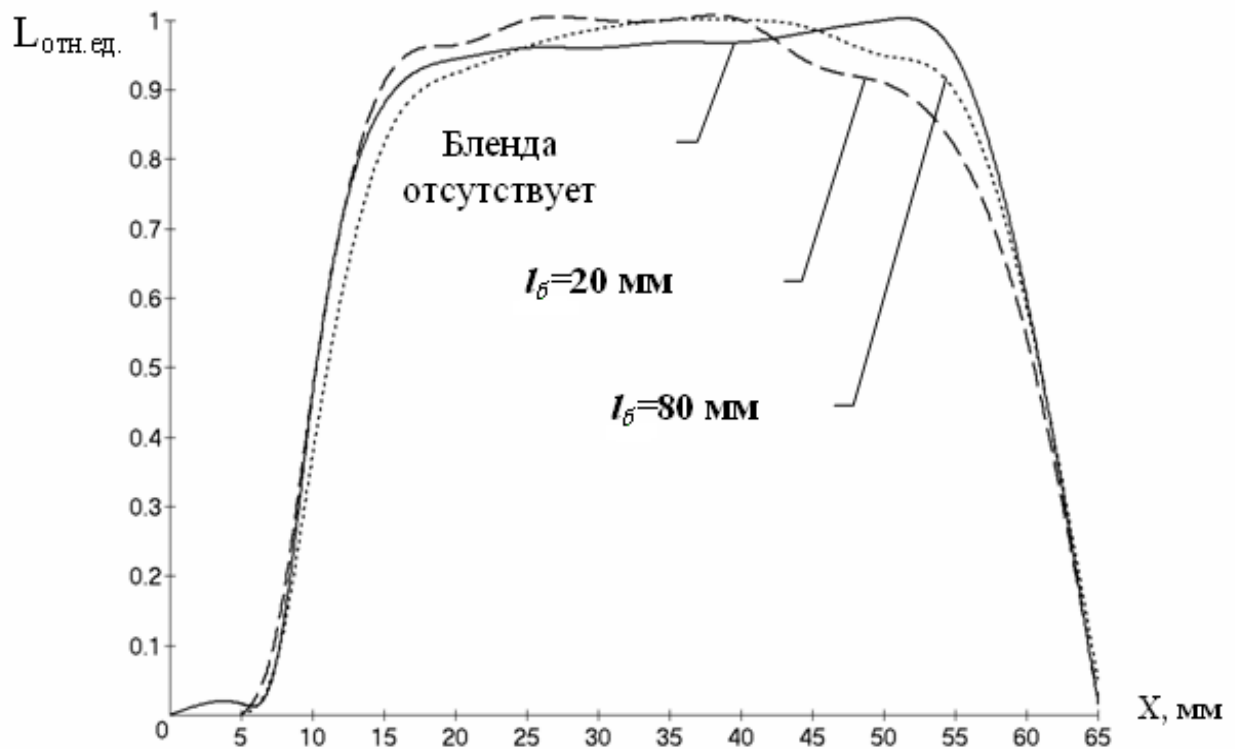


Рис. 6. Распределение яркости в сечении выходной апертуры в зависимости от длины бленды  $l_b$  при использовании источника излучения ИИ3 с экраном.

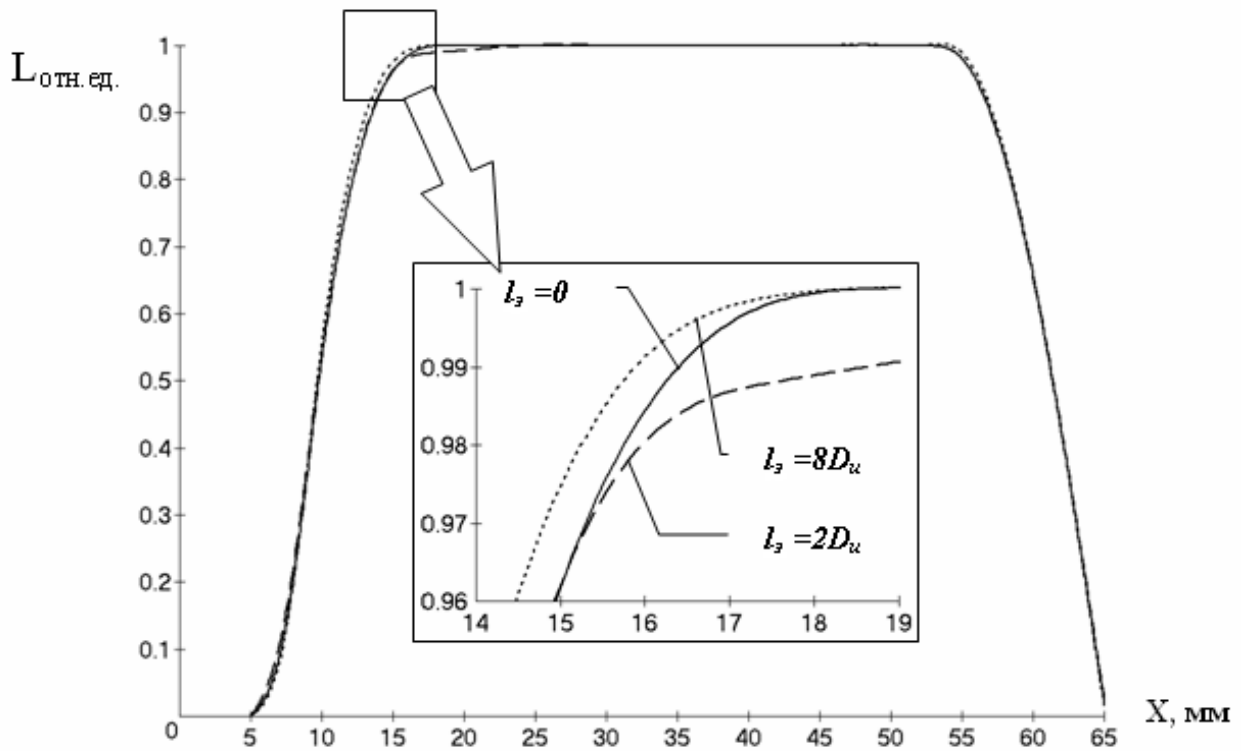


Рис. 7. Распределение яркости в выходной апертуре в зависимости расстояния от экрана до источника излучения  $l_3$  при использовании источника излучения ИИ1 и диаметра выходной апертуры  $D_u$ .

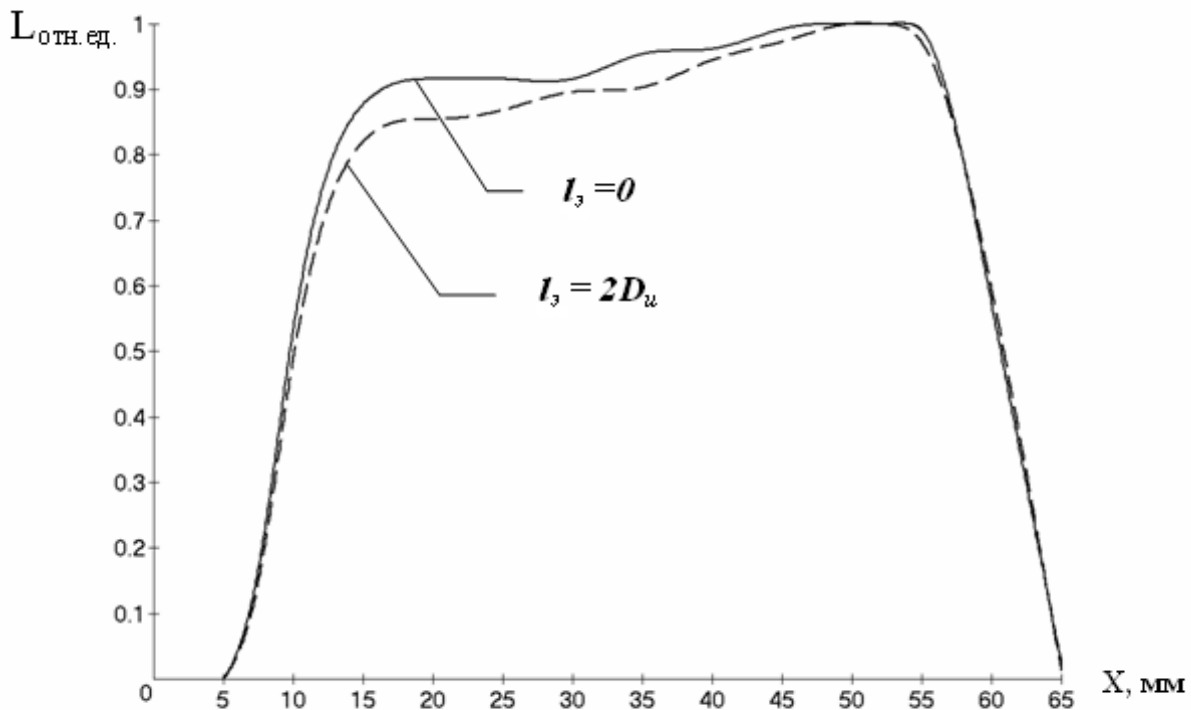


Рис. 8. Распределение яркости в выходной апертуре в зависимости от положения экрана относительно источника излучения  $l_3$  при использовании источника излучения ИИ2 и диаметра выходной апертуры  $D_u$ .

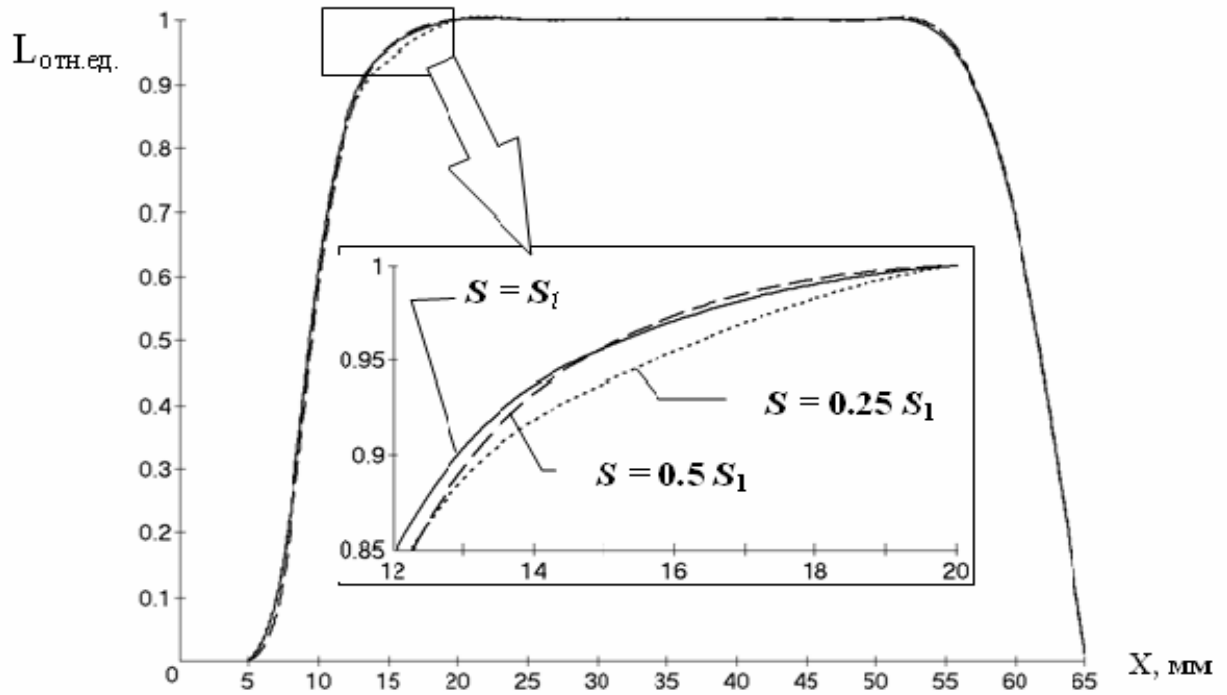


Рис. 9. Распределение яркости в выходной апертуре в зависимости от площади зеркальной наклейки  $S$ , установленной на поверхности интегрирующей сферы, площадь наклейки  $S_1 = 14400 \text{ мм}^2$ , используемый излучатель - ИИ1.

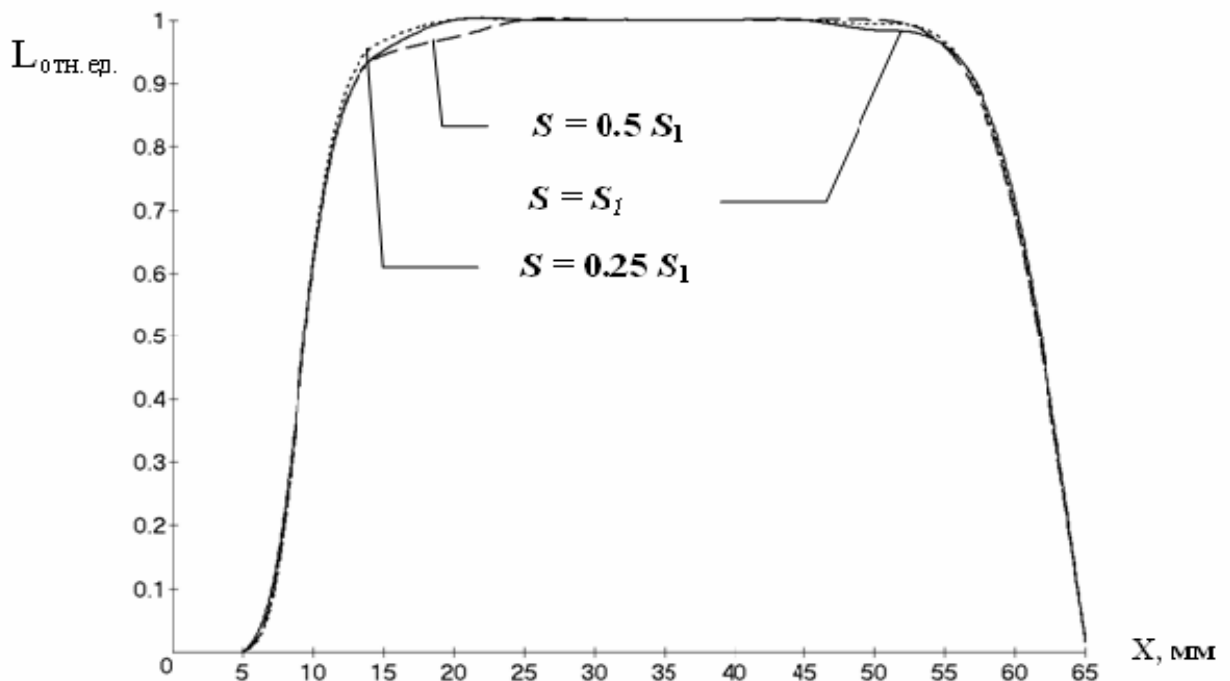


Рис.10. Распределение яркости в выходной апертуре в зависимости от площади поглощающей наклейки  $S$ , установленной на поверхности интегрирующей сферы, площадь наклейки  $S_1 = 14400 \text{ мм}^2$ , используемый излучатель ИИ1. Узлы крепления источников излучения, экраны и бленды покрывались тем же составом, что и поверхность сферы.

Для измерения распределения яркости в плоскости выходной апертуры использовался ФЭМ, который перемещался на направляющих с отклонением не более 0.05 мм в плоскости перпендикулярной оптической оси ДИ. Координата ФЭМ считывалась при помощи индикатора часового типа с ценой деления 10 мкм.

Линейное увеличение фотоэлектрического канала составляло 21х, а приведенное к плоскости предмета поле зрения могло изменяться в диапазоне от 0.1 до 1.0 мм при помощи сменных полевых диафрагм, которые устанавливались перед приемником излучения.

В качестве приемника излучения был применен измерительный фотодиод ФД-24К с большим динамическим диапазоном: предел линейности равен 20 мА при темновом токе 0.01 мА. ФЭМ был оснащен визуальным каналом с видимым увеличением 147х, который существенно упрощал процесс наведения ФЭМ на плоскость выходной апертуры ДИ.

Регистрация фототока производилась цифровым микроамперметром с ценой деления 0.1 мкА при линейном диапазоне 20 мА. В экспериментах величина фототока не превышала 200 мкА, а суммарная погрешность была в пределах 7 %.

Данная конструкция экспериментальной установки позволяла исследовать влияние следующих факторов на распределение яркости по диаметральному сечению выходной апертуры ДИ:

- характера расположения источников излучения относительно выходной апертуры;
- формы и размеров экранов, расположенными перед источниками излучения;
- установки бленды различной длины в выходной апертуре;
- локальное изменение характеристик внутреннего покрытия ИС.

### **Экспериментальные результаты и их обсуждение**

Проведенные в работе экспериментальные данные представлены на Рис. 3 – 10. Так как основной задачей исследования ДИ являлось осуществление сравнительного анализа факторов, которые влияют на формирование яркостного поля выходной апертуры, то измерения проводились в относительных величинах.

### **Выводы**

1. Частичное попадание в выходную апертуру ДИ первичного излучения от галогенных ламп, приводит к значительной неравномерности яркостного поля. Особенно заметно эта неравномерность проявляется в плоскости, перпендикулярной той, в которой установлены источники излучения. В этом случае ДИ становится практически непригодным для прецизионных измерений (Рис. 3).

2. Установка бленды в выходной апертуре ДИ практически полностью исключает зависимость распределения яркости от расположения источников излучения, но само распределение яркости при этом становится неравномерным и приближается по форме к косинусоидальной кривой (Рис. 4 – 6).

3. Если первичная засветка выходной апертуры ДИ отсутствует, то равномерность распределения яркости, особенно при большом количестве источников излучения, симметрично расположенных относительно выходной апертуры, существенно повышается. В этом случае установка бленды является нецелесообразной и приводит только к уменьшению яркости (Рис. 7).

4. Наиболее эффективной мерой повышения равномерности яркостного поля является установка экранов перед источниками излучения. Размер экрана должен быть таким, чтобы его тень перекрывала примерно на 5 – 10 % площадь выходной апертуры (Рис. 7 – 8).

5. Увеличение расстояния между источником излучения и экраном требует пропорционального увеличения размеров экрана. При этом яркость ДИ снижается при неизменной равномерности ее распределения (Рис. 7).

6. Локальное увеличение коэффициента отражения внутреннего покрытия ИС практически не изменяет ни выходной яркости, ни равномерности ее распределения. Это подтверждено многочисленными экспериментами, когда внутри ИС закреплялись наклейки из алюминиевой фольги т.п. Это объясняется, во-первых, эффективным интегрированием оптического потока, которое осуществляет ИС и, как следствие, нивелированием локальных неоднородностей. А во-вторых, тем, что коэффициент отражения основного покрытия, как и алюминиевой фольги, близок к единице (Рис. 9).

7. Введение локальных областей с малым коэффициентом отражения также мало изменяет распределение яркости, которое остается достаточно равномерным. Такие области, например, в виде наклеек из черного бархата на внутренней поверхности ИС, только уменьшают выходную яркость пропорционально суммарной площади этих областей. Это объясняется поглощением оптического излучения и, по сути, выводом его части из объема ИС (Рис. 10).

Дальнейшим направлением работы является экспериментальное исследование диффузных излучателей переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер.

### **Литература**

1. Колобродов В. Г., Микитенко В. И., Михеенко Л. А. Стендовая аппаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. — 2003. - №3. — с. 98- 104.
2. Воропай Е. С., Торпачев П. А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. — Минск: Университетское, — 1988.

3. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006. - №6(66). – с. 61-64.
4. Сахновский М. Ю., Гуминецкий С. Г., Кравцов В. Е. и др. Об особенностях измерения потока излучения светодиодов с помощью фотометрического шара.// Оптика и спектроскопия.— 1979.- т.46, вып.3.— с. 515- 523.
5. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Осветительный канал цифрового микроскопа на базе диффузного излучателя.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006. – с. 20- 27.

<p>Міхеєнко Л.А., Боровицький В.М., Гордієнко Ю.О. <b>Експериментальне дослідження дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери.</b></p> <p>У роботі представлені методика та апаратура для вимірювання розподілу яскравості у площині вихідної апертури дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери. Виконаний аналіз експериментальних даних про розподіл яскравості та сформульовані рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів дифузного випромінювача.</p>	<p>Mikheenko L., Borovytsky V., Gordienko Y. <b>Experimental studying of diffusive light source based on integration sphere.</b></p> <p>The paper represents the technique and instrumentation for measurement of brightness distribution throughout an output aperture of the diffusive light source based on an integration sphere. The analysis of experimental data of brightness distribution is done and recommendations for optimal parameters selection are formulated for the diffusive light source are formulated.</p>
---	---

*Надійшла до редакції  
10 червня 2006 року*

УДК 535.317.6

## **АНАСТИГМАТЫ С ДВОЙНЫМ ЗЕРКАЛОМ, ИМЕЮЩИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ**

*Артюхина Н.К., Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Рассмотрены четырехзеркальные анастигматы с плоским полем, в которых два зеркала объединены в моноблок. Приведен расчет конструктивных параметров, исследован вопрос защиты плоскости изображения от постороннего света. Объективы могут использоваться в космической оптике и оптических приборах, работающих в УФ и ИК областях спектра*

### **Введение. Схемные решения**

Зеркальные оптические системы находят самое широкое применение в различных областях народного хозяйства. Достаточным числом коррекционных параметров обладают четырехзеркальные схемы, которые позволяют не только исправить четыре основных аберрации: сферическую, кому, астигматизм, кривизну изображения, но и получить удобное положение плоскости приемника изображения в отличие от двух- и трехзеркальных. При

проектировании зеркальных систем, работающих в широкой области спектра, в последнее время повысился интерес к схемным решениям, имеющим промежуточное изображение. Концепция построения двухступенчатой зеркальной оптики привлекает внимание ученых в странах СНГ и за рубежом [1–2]. В таких системах зеркала с несферическими поверхностями обычно более технологичны, а также проще решается задача защиты плоскости изображения от постороннего света.

В работе проводится исследование зеркальных анастигматов с плоским полем, имеющих промежуточное изображение после системы из двух зеркал. Объективы состоят из трех компонентов с четырьмя отражениями. Их схемные решения описаны ранее [3], и отличительной особенностью является наличие двойного зеркала, что делает конструкцию компактной. По предложенной классификации рассматриваемые анастигматы относятся к I классу, в котором первое зеркало всегда выпуклое, второе вогнутое, а третье и четвертое зеркала могут иметь поверхности любой формы.

В работах [4–5] описаны рассчитанные практически реализуемые варианты I и II типа из этого класса систем (с учетом экранирования, виньетирования и защиты плоскости изображения от постороннего света). В объективах с промежуточным изображением (III и IV тип) третье зеркало расположено на оптической оси после эквивалентного фокуса системы из первых двух зеркал, т.е. для них выполняется условие  $h_3 < 0$ . Угол  $\alpha_3$  в этих объективах всегда положителен, а  $\alpha_4$  либо отрицателен (объектив 43-2Б-IV), либо равен нулю (объектив 43-2Б-III).

### **Аберрационный расчет**

Используем коэффициенты аберраций третьего порядка  $B_0, K_0, C_0, D_0, E_0$  для составления системы уравнений относительно величин  $Q_s$ , определяющих деформации  $\sigma_s$  зеркальных асферических поверхностей:

$$\sigma_s = \frac{Q_s - P_s}{T_s}, \quad (1)$$

при  $s=1,2,3,4$ , где  $T_s = \frac{(v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s)^3}{v_s v_{s+1} (v_{s+1} - v_s)^2}$ ;  $P_s = \left( \frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} \right)^2 (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s)$ ;  $v_s = \frac{1}{n_s}$ ;

$h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1} d_s$  (все обозначения даны в работе [6]).

Коррекционные параметры  $\sigma_s = -e^2$  определяют квадрат эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка, а остальные конструктивные параметры нельзя считать полноценными, так как их использование может привести к конструктивно неосуществимой системе, дающей или мнимое изображение, или вообще не пропускающей свет на плоскость изображения. Для исправления четырех основных монохроматических аберраций: сферической, комы, астигматизма и кривизны изображения необходимо решить

систему уравнений, связывающих эти коэффициенты с конструктивными параметрами.

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} h_s Q_s = 0 \\ K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} h_s Q_s S_s = 0 \\ C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} \frac{v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s}{h_s} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} W_s S_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} h_s Q_s S_s^2 = 0 \\ D_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} \frac{v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s}{h_s} + C_0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В формулах (2)  $W_s = \left( \frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} \right) (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s)$ ;  $S_s = \sum_{k=1}^{k=s-1} \frac{v_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}}$ ;  $S_1 = 0$ .

### Объектив 43-2Б-III

На рис.1 представлена схема оптики зеркального объектива: промежуточное изображение после второго зеркала формируется в фокальной плоскости третьего, сопряженной с приемником изображения, который может быть вынесен за габариты. В данной схеме  $h_1 = -h_3 = -h_4$ ,  $\alpha_4 = 0$ , поэтому третье и четвертое зеркала будут вогнутыми.

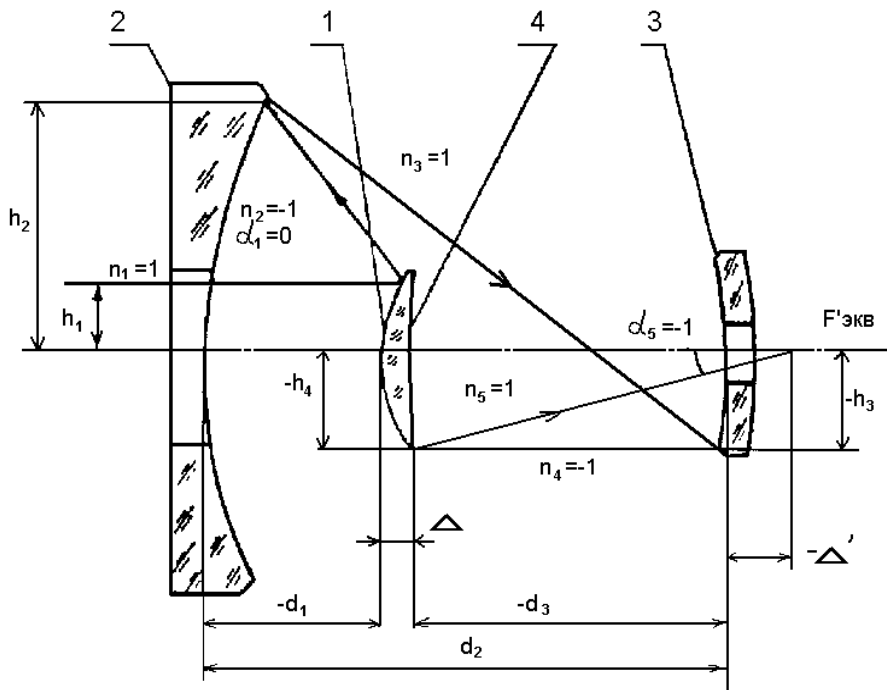


Рис.1. Принципиальная схема оптики объектива 43-2Б-III



Определим условия нормировки для первого параксиального луча, идущего из осевой точки предмета на край входного зрачка:

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_5 = -1; \quad h_1 = 1; \quad f' = -1. \quad (3)$$

В результате расчета углов  $\alpha_s$  и высот  $h_s$  получим сводки формул для расчета радиусов зеркальных поверхностей  $r_s$ :

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}; \quad r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}; \quad r_4 = \frac{2h_4}{\alpha_4 + 1}; \quad (4)$$

а также осевых расстояний  $d_s$  объектива:

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\alpha_2}; \quad d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\alpha_3}; \quad d_3 = \frac{h_3 - h_4}{\alpha_4}. \quad (5)$$

Учитывая расстояние  $\Delta$  между первым и четвертым зеркалом, которое выбирают из конструкторских соображений, и величину выноса фокальной плоскости относительно вершины третьего зеркала  $\Delta'$ , имеем:

$$d_2 = -(d_1 + d_3) + \Delta; \quad d_3 = -(1 + \Delta'). \quad (6)$$

Для зеркального анастигмата с планкоррекцией ( $D_0 = 0$ ) приходим к условию Петцваля, которое в нашем случае имеет вид:

$$\alpha_2 - \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} - (\alpha_4 + \alpha_3) - 1 + \alpha_4 = 0.$$

Учитывая (1), а также формулы (4-6), получим уравнения для определения углов  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  при заданной высоте  $h_2$ :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{h_2 + \alpha_3(1 + h_2)}{h_2 - 1} \\ \frac{1 - h_2}{\alpha_2} &= \Delta + \Delta' + 1 - \frac{1 + h_2}{\alpha_3} \end{aligned} \right\} \frac{1}{2} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) представлено графически на рис. 2 для различных значений  $\Delta'$  и  $h_2$  при конструктивной толщине моноблока  $\Delta = 0,05$  (в относительных единицах). Уменьшение  $\alpha_2$  приводит к увеличению радиусов двух зеркал, а увеличение  $\alpha_3$  к уменьшению коэффициента центрального экранирования  $\eta$ , поэтому целесообразнее рассчитывать объективы с большими поперечными габаритами ( $h_2 = 4 \div 5$ ).

Схемное решение при  $\alpha_3 = 3,3761$  дает следующие численные относительные значения параметров:  $r_1 = 0,2874$ ,  $r_2 = 0,7740$ ,  $r_3 = -0,5924$ ,  $r_4 = 2,00$ ,  $d_1 = -0,4810$ ,  $d_2 = 1,4810$ ,  $d_3 = -1$ ,  $h_1 = 1$ ,  $h_2 = 4,0$ ,  $h_3 = -1$ ,  $h_4 = -1$ .

### **Объектив типа 43-2Б-IV**

Отличительной особенностью схемы является то, что формируются два промежуточных изображения: после второго и после третьего зеркал (рис. 3).

Для определения конструктивных величин  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  преобразуем систему

уравнений (7) с учетом, что  $f' = 1,0$ ,  $\alpha_5 = 1,0$ ,  $h_1 = h_4 = -h_3$ .

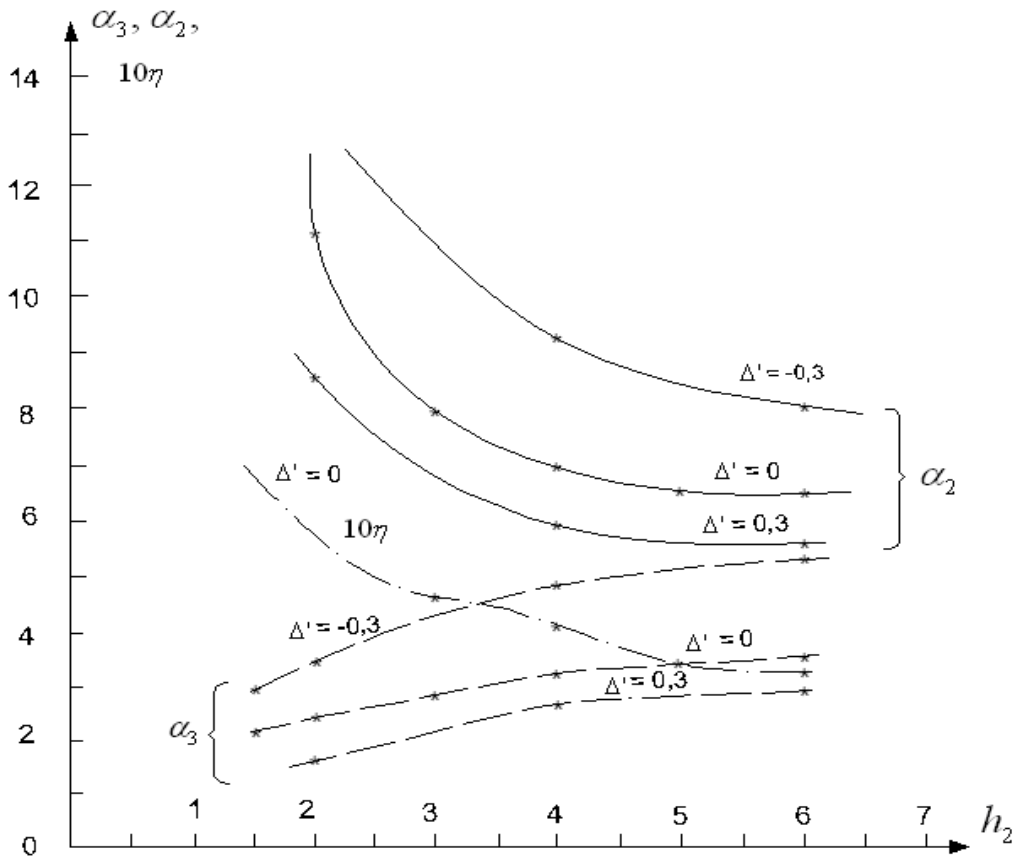


Рис. 2. Графики изменения угловых параметров  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и коэффициента центрального экранирования  $\eta$

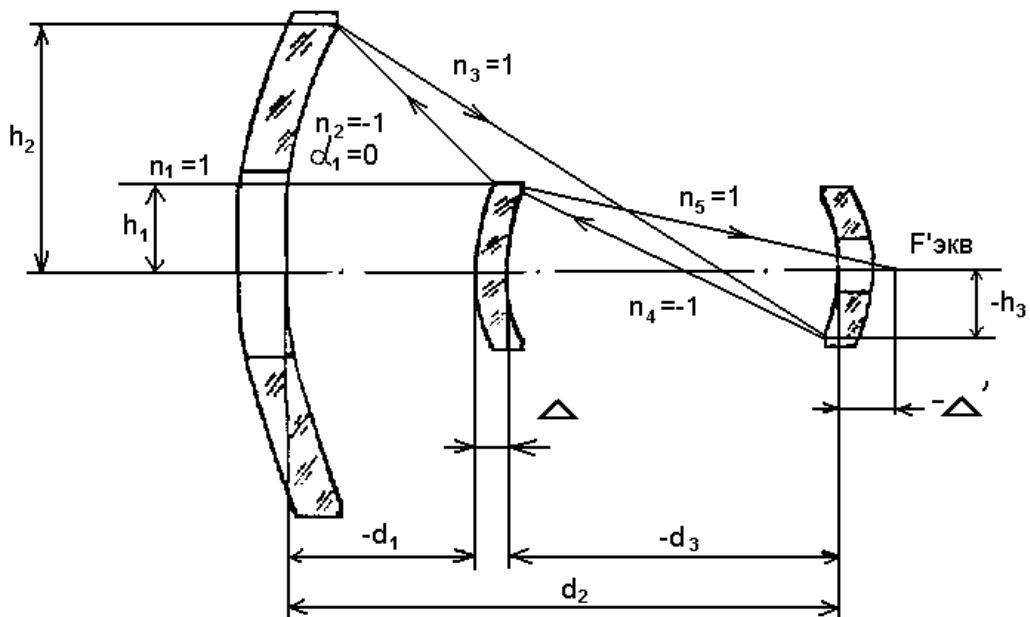


Рис.3. Объектив с двумя промежуточными изображениями 43-2Б-IV

Тогда

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2(h_2 - 1) &= \alpha_3(1 + h_2) + h_2 \left( 1 + \frac{4}{1 + \Delta'} \right) \\ \frac{1 + h_2}{\alpha_3} + \frac{1 - h_2}{\alpha_2} &= \Delta + \Delta' + 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Графическое решение системы уравнений (8) аналогично (7), величина  $h_2$  выбирается из соображений получения максимальной светосилы в системе.

Схемное решение объектива с  $\alpha_3 = 3,9142$  дает следующие численные относительные значения параметров:  $r_1 = 0,1516$ ,  $r_2 = 0,4677$ ,  $r_3 = -0,3382$ ,  $r_4 = 0,6667$ ,  $d_1 = -0,2274$ ,  $d_2 = 1,2774$ ,  $d_3 = -1$ ,  $h_1 = 1$ ,  $h_2 = 4,0$ ,  $h_3 = -1$ ,  $h_4 = 1$ .

### Анализ конструктивных параметров. Оценка виньетирования

Результаты расчета деформаций зеркал  $\sigma_s$  с использованием формул (1) и (2) приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Расчетные значения деформаций  $\sigma_s$  зеркальных поверхностей

Деформации	43-2Б-III				43-2Б-IV			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
$\sigma_1$	0	0,8632	-0,366	-1,1537	0	2,2693	-0,9925	-1,2235
$\sigma_2$	0,1411	0	-0,0781	-0,1273	-0,2046	0	-0,2947	-0,3280
$\sigma_3$	-13,4832	-0,2358	0	-1,5579	2,4889	8,1473	0	-0,9213
$\sigma_4$	-337,948	-30,4168	-11,7562	0	-1,3147	-3,4963	0,1329	0

Из приведенных значений следует, что в объективах двух типов наиболее целесообразным с точки зрения технологии является IV вариант расчета с четвертым зеркалом.

В табл. 2 приведены конструктивные данные двух расчетных вариантов зеркальных анастигматов. Объектив III типа рассчитан для относительного отверстия  $D/f' = 1:3$ , углового поля  $2\omega = 7^\circ$ , а для IV типа –  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 4^\circ$ .

Коэффициент центрального экранирования определяется по формуле:

$$\eta = \frac{h_1}{h_3 - \alpha_3 d_3} \quad (9)$$

и равен  $\eta = 0,42$  для рассчитанного варианта 43-2Б-III.

Зависимость коэффициента экранирования от величины  $h_2$  представлена на рис. 2; с увеличением  $h_2$  коэффициент  $\eta$  несколько уменьшается. В объективе IV типа коэффициент  $\eta$  несколько меньше и равен  $\eta = 0,3431$ . В рассчитанных

об'єктивах рассмотрены меры по защите плоскости изображения от постороннего света введением специальных защитных бленд в конструкцию оптики. Первая защитная бленда  $M$  устанавливается в центральной отверстии второго зеркала, а вторая бленда  $N$  крепится на оправе третьего зеркала.

Таблица 2 - Конструктивные параметры двух типов объективов ( $f' = 200$  мм)

НОМЕР ПОВЕРХНОСТ И	ТИП ОБЪЕКТИВА	$R$ , мм	$D$ , мм	ФОРМА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗЕРКАЛ
1	43-2Б-III	57,48	-86,20	ГИПЕРБОЛОИД
	43-2Б-IV	30,32	-45,49	
2	43-2Б-III	154,8	294,2	ЭЛЛИПСОИД
	43-2Б-IV	93,55	255,49	
3	43-2Б-III	-118,48	-200	ГИПЕРБОЛОИД
	43-2Б-IV	-67,64	-200	ЭЛЛИПСОИД
4	43-2Б-III	400,0	-	СФЕРА
	43-2Б-IV	133,33	-	

Размеры бленд (мм) в рассчитанных вариантах следующие:

- 43-2Б-III ( $h_M = 34,0, l_M = 48,0, h_N = 35,7, l_N = 135,0$ );
- 43-2Б-IV ( $h_M = 20,0, l_M = 17,32, h_N = 21,18, l_N = 101,18$ ).

Максимальное виньетирование не превышает 40 % по всему полю изображения.

### Выводы

1. Окончательные варианты объективов, которые могут быть в дальнейшем адаптированы к промышленному применению, получены в результате коррекции аберраций высших порядков при учете срезания наклонных пучков оправками и отверстиями в зеркалах, а также блендами.

2. В объективе 43-2Б-III кружок рассеяния для осевой точки изображения составляет величину порядка 0,02 мм, максимальный размер фигуры рассеяния на краю поля около 0,04 мм. Система обладает малыми остаточными аберрациями астигматизма и кривизны изображения  $Z'_M = Z'_S = -0,0002$  мм для края поля изображения. Максимальная величина волновой аберрации составляет величину  $N = -0,16\lambda$ .

3. Для объектива IV типа максимальный размер фигуры рассеяния по полю изображения с учетом срезания крайних лучей наклонных пучков составляет величину порядка 0,045 мм. Волновые аберрации в объективе имеют значения порядка  $0,05\lambda$  для осевой точки изображения.

4. Малые остаточные аберрации и наличие высокой разрешающей способности открывают широкие возможности по применению объективов.

Они могут использоваться в оптических приборах, работающих в широкой области спектра: в системах спутникового сканирования (фотографирования) земной поверхности и в системах теплового сканирования. Спектральный диапазон применения ограничивается областью спектральной чувствительности фотоприемника и областью работы отражающих покрытий.

#### **Литература**

1. Meinel A., Meinel M. Two-stage optics.//Optical Engineering – 1992. -Vol.31.N.11. – P.2271–2279.
2. Подоба В.И., Лебедева Г.И., Еськов Д.Н. Особенности приемного оптического телескопа для лидара космического базирования. // Известия вузов. Приборостроение. – 2002. – Т. 45, №2. – С.28-23.
3. Артюхина Н.К., Шкадаревич А.П. Классификация четырехзеркальных анастигматов с двойным зеркалом.//Доклады НАН РБ. 2005, т.49, №1, С.43-46.
4. Артюхина Н.К., Василенок К.К., Крумач В.И. Зеркальный объектив с планастигматической коррекцией // Известия Белорусской инженерной академии. - 2005. - №1(19). - С. 30-34.
5. Артюхина Н.К., Шкадаревич А.П. Зеркальная регистрирующая система с увеличенным полем зрения // Инженерно-физический журнал. - 2005. - Т.78, № 6. - С.178-183.
6. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. – Л.: Наука, 1968.- 310 с.

<p><b>Артюхина Н.К. Анастигмати з подвійним дзеркалом, які мають дійсне проміжне зображення.</b> Розглянуті чотиридзеркальні анастигмати з плоским полем, в котрих два дзеркала поєднані у моноблок. Надан розрахунок конструктивних параметрів, досліджене питання захисту площини зображення від стороннього світла. Об'єктиви можуть використовуватись у космічній оптиці та оптичних приладах, які працюють в УФ та ІЧ діапазонах спектру</p>	<p><b>Artioukhina N. The anastigmats with catoptric lens forming intermediate image.</b> The four mirrors plane - anastigmats consisting the first and fourth surfaces be combined are considered. The calculation of design factors has been done, the problem of image plane protection was investigated. The objectives are useful for space optics and optical devices using UV and IR spectral range research.</p>
---	---

*Надійшла до редакції  
25 липня 2007 року*