

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

УДК 621.383

### **ФЛУКТУАЦІЇ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТА В ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО СУПРОВОДЖЕННЯ**

*<sup>1)</sup>Колобродов В.Г., <sup>1)</sup>Молодик А.В., <sup>2)</sup>Русняк І.М., <sup>1)</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна; <sup>2)</sup> Державне підприємство "НДІ "Квант", м. Київ, Україна*

*Розглянуто вплив флуктуації кута приходу випромінювання та шуму в оптико-електронному тракту телевізійних систем автоматичного супроводження на флуктуації вимірюваних координат об'єкта. Отримано рівняння для розрахунку СКВ флуктуації*

#### **Вступ**

Телевізійні системи автоматичного супроводження (ТСАС) знаходять все більше застосування, зокрема в складі оптико-електронних систем автоматичного стеження за об'єктами та автоматичного керування положенням об'єктів в просторі [1]. До складу таких систем входять телевізійна камера та електронний блок обробки сигналів, до складу якого в свою чергу входять відеопідсилювач, пороговий пристрій виявлення сигналів від об'єкта та пристрій вимірювання координат об'єкта. Координати об'єкта є вхідним сигналом ТСАС як системи автоматичного регулювання і використовуються для автоматичного супроводження об'єктів в ТСАС та в інших системах, з якими ТСАС комплексується [2]. Флуктуації координат положення об'єкта впливають на точність його супроводження і в певній мірі визначають вибір параметрів регулювання, які необхідно реалізувати в ТСАС для досягнення заданої точності супроводження. Аналіз впливу флуктуацій координат об'єкта на точність супроводження досліджено і описано в значній кількості робіт, зокрема в [1, 3], при цьому акцент в аналізі зазвичай робиться на оптико-електронній системі, в тому числі і ТСАС, як системі автоматичного регулювання. Внаслідок цього факторам, які впливають на самі флуктуації координат об'єкта, приділено недостатню увагу. Зазвичай величини цих флуктуацій беруться гіпотетичними або як результат емпіричного досвіду [3]. Мета даної роботи – проаналізувати вплив таких факторів, як флуктуації кута приходу випромінювання та шуми в сигналі, на флуктуації вимірюваних в ТСАС координат об'єкта, для чого ТСАС розглядається саме як оптико-електронна система.

#### **Постановка задачі**

Вимірювання координат об'єкта в ТСАС відбувається наступним чином. Випромінювання (власне або відбите) від об'єкта спостереження проходить через атмосферу і потрапляє на об'єктив телевізійної камери, який формує зображення в площині приймача випромінювання, зазвичай ПЗЗ матриці. ПЗЗ матриця перетворює світловий потік в електричний сигнал, який після підсилення та необхідної обробки поступає на пороговий пристрій. В разі виявлення в пороговому

пристрої сигналу від об'єкта цей сигнал подається в пристрій вимірювання координат об'єкта. Таким чином, сигнал в процесі його поширення та перетворення зазнає впливу турбулентності атмосфери та шумів в оптико-електронному тракту ТСАС. Тому для аналізу та отримання формул для СКВ флуктуацій координат об'єкта необхідно проаналізувати цей вплив. В процесі аналізу необхідно також встановити залежність СКВ флуктуацій від класу об'єкта (об'єкт протяжний чи малорозмірний), а також встановити вплив конструктивних параметрів оптико-електронного тракту ТСАС на СКВ флуктуацій координат об'єкта, що дасть змогу врахувати відповідні вимоги до цих параметрів при конструюванні ТСАС. В аналізі будемо розглядати одномірний випадок впливу флуктуацій та шумів, наприклад, вздовж координати X. Вважатимемо, що вплив флуктуацій та шумів вздовж координати Y здійснюється аналогічно і незалежно.

### **Вплив турбулентності атмосфери**

Вплив турбулентності атмосфери призводить до флуктуацій потоку випромінювання, що поступає в оптичну систему ТСАС, кута його приходу та збільшення розміру зображення об'єкта [4]. Флуктуації потоку випромінювання призводять до загальної зміни рівня сигналу в зображенні об'єкта і тому на положення об'єкта в зображенні не впливають. Збільшення розміру зображення об'єкта також не впливає на його положення. До зміни координат об'єкта призводить зміна кута приходу випромінювання в оптичну систему ТСАС.

Дисперсію флуктуацій кута приходу випромінювання  $\sigma_\beta^2$ , викликаних турбулентністю атмосфери, можна розрахувати за наступною формулою [4]:

$$\sigma_\beta^2 = 1,46 \cdot D_{omn}^{-\frac{1}{3}} \cdot C_n^2 \cdot d_{ob}, \quad (1)$$

де  $D_{omn}$  – діаметр вхідної зіниці оптичної системи,  $C_n^2$  – структурна постійна показника заломлення повітря,  $d_{ob}$  – відстань до об'єкта.

З врахуванням розмірів миттєвого кута поля зору  $\delta\alpha_{omn}$  оптичної системи ТСАС дисперсія флуктуацій координат об'єкта, що обумовлена флуктуаціями кута приходу випромінювання, складає наступну величину:

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma_\beta^2}{(\delta\alpha_{omn})^2}. \quad (2)$$

Як слідує з формул (1) та (2), зі збільшенням діаметра  $D_{omn}$  вхідної зіниці оптичної системи ТСАС та розмірів миттєвого кута поля зору  $\delta\alpha_{omn}$  дисперсія флуктуацій  $\sigma_1^2$  зменшується.

### **Вплив шумів в оптико-електронному тракту ТСАС**

При аналізі впливу шумів в оптико-електронному тракту ТСАС скористаємося положеннями теорії статистичної радіотехніки, згідно з якими дисперсія координат об'єкта, обумовлена наявністю шуму в сигналі, визначається наступним чином [5]:

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{\beta_{ox}^2 \cdot SNR_{ob}^2}, \quad (3)$$



рових частот  $\Delta k_x$  складає наступну величину:

$$\Delta k_x = \frac{12 \cdot \pi}{X_{об}}. \quad (8)$$

Звідси знаходимо ширину просторового спектра:

$$\beta_{\omega x}^2 \approx \frac{\Delta k_x}{\pi \cdot X_{об}} = \frac{12}{X_{об}^2}. \quad (9)$$

З урахуванням (3) та (9) дисперсія положення центра протяжного об'єкта, що обумовлена впливом шумів в оптико-електронному тракті, складає наступну величину:

$$\sigma_2^2 = \frac{X_{об}^2}{12 \cdot SNR_{об}^2}. \quad (10)$$

Сигнал малорозмірного об'єкта з гаусовим розподілом амплітуди  $U(i)$  описується наступним чином [5, 7]:

$$U(i) = U_{об} \cdot \exp\left(-2,8 \cdot \frac{i^2}{X_{об}^2}\right), \quad (11)$$

де  $U_{об}$  – максимальне значення амплітуди сигналу об'єкта;  $X_{об}$  – розмір об'єкта по рівню амплітуди 0,5 від максимального значення  $U_{об}$ .

Спектр гаусового сигналу визначається за наступною формулою:

$$F(k) = U_{об} \cdot X_{об} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2,8}} \cdot \exp\left(-\frac{k^2 \cdot X_{об}^2}{11,2}\right). \quad (12)$$

Ширина просторового спектра у цьому випадку визначається наступним чином:

$$\beta_{\omega x}^2 = \frac{2,8}{X_{об}^2}. \quad (13)$$

З врахуванням (3) та (13) дисперсія положення центра малорозмірного об'єкта, що обумовлена впливом шумів в оптико-електронному тракті, складає наступну величину:

$$\sigma_2^2 = \frac{X_{об}^2}{2,8 \cdot SNR_{об}^2}. \quad (14)$$

Як випливає з виразів (10) та (14), наявність шумів в сигналі впливає на точність визначення положення центра об'єкта, при цьому СКВ вимірювань координат центра об'єкта прямо пропорційне розміру об'єкта і обернено пропорційне  $SNR_{об}$  його сигналу. Тому для зниження СКВ флуктуацій координат об'єкта необхідно підвищувати  $SNR_{об}$ , наприклад, шляхом застосування фільтрів, що сгладжують шуми в сигналі.

Сумарне СКВ флуктуацій координат об'єкта  $\sigma_0$ , що враховує вплив флуктуацій кута приходу випромінювання в оптичну систему та вплив шумів в оптико-електронному тракті ТСАС, розраховується за наступною формулою:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}; \quad (15)$$

## **Висновки**

1. Розглянуто вплив флуктуацій кута приходу випромінювання, обумовле-

них турбулентністю атмосфери, та шумів в оптико-електронному тракті ТСАС на флуктуації вимірюваних в ТСАС координат об'єкта. Отримано формули, що встановлюють аналітичну залежність між значеннями СКВ цих флуктуацій.

2. Встановлено, що для зменшення впливу флуктуацій кута приходу випромінювання необхідно збільшувати діаметр вхідної зіниці оптичної системи ТСАС та розмір миттєвого кута поля зору.

3. Вплив шумів в оптико-електронному тракті на флуктуації координат об'єкта здійснюється опосередковано через відношення сигнал/шум та розмір об'єкта. Для зменшення цього впливу необхідно підвищувати значення  $SNR_{об}$ , наприклад, застосуванням фільтрів, що сгладжують шуми в сигналі. Також до зменшення цього впливу призводить зменшення розміру зображення об'єкта, яке досягається збільшенням розміру миттєвого кута поля зору оптичної системи ТСАС.

4. Подальший уточнений аналіз впливу флуктуацій кута приходу випромінювання та шумів в оптико-електронному тракті ТСАС на флуктуації вимірюваних в ТСАС координат об'єкта пов'язаний з уточненням параметрів оптичної системи ТСАС та впливом застосування сгладжуючих фільтрів на значення корисного сигналу від об'єкта та СКВ шумів у сигналі.

#### Література

1. Астапов Ю.М., Васильев Д.В., Заложнев Ю.И. Теория оптико-электронных следящих систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 328 с.
2. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М., Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966. – 992 с.
3. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. Основы проектирования лазерных локационных систем. – М.: Высш. школа, 1983. – 207 с.
4. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966. – 680 с.
6. Цифровая обработка сигналов: Справочник / Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
7. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. – М.: Сов. радио, 1967. – 348 с.
8. Малышев И.А., Дивин Г.Д. Математическое моделирование неоднородных фоновых изображений. // Оптико-механическая промышленность, №4, 1991. – стр. 60-64.
9. Грязин Г.Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства: Системы телевидения. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с.

Колобродов В.Г., Молодык А.В., Русняк И.Н. <b>Флуктуации координат объекта в телевизионных системах автоматического сопровождения</b> Рассмотрено влияние флуктуаций угла прихода излучения и шума в оптико-электронном тракте телевизионных систем автоматического сопровождения на флуктуации измеренных координат объекта. Получено уравнения для расчета СКО флуктуаций	Kolobrodov V.G., Molodik A.V., Rusnyak I.N. <b>Fluctuation of object coordinates in TV automatic tracking systems</b> Effects of radiation hade and noise in optical-electronic chanell of TV automatic tracking systems are considered. Equations for calculation of fluctuation root-mean-square error were equated.
--	---

Надійшло до редакції  
2 грудня 2005 року

УДК 681.7.013.8

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОПОРОШКОВОГО И  
МАГНИТООПТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

*Агалиди Ю.С., Левый С.В., Мачнев А.М., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*Для численной оценки сравнительной эффективности двух методов наблюдения остаточных напряжений в поверхностных слоях ферромагнитных изделий были выполнены экспериментальные исследования отношения сигнал/шум по результатам визуализации магнитных полей рассеяния*

**Вступление**

Определение остаточных напряжений в материалах путём неразрушающих исследований является одной из наиболее актуальных и сложных задач экспериментальной механики. Решения данной задачи на основе ультразвуковых (акустических) и рентгеновских методов отличаются высокой сложностью оборудования и трудоёмкостью исследований, что ограничивает их практическое применение. В то же время, по отношению к исследованию остаточных напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов, очевидна перспективность магнитных методов [1].

В частности, для криминалистических исследований (восстановления уничтоженных знаков рельефной маркировки) номеров оружия, клейм боеприпасов, идентификационных номеров автомобилей и т.п. традиционно используется магнитопорошковый метод [2, 3]. Применение магнитопорошкового метода для исследований остаточных напряжений является нецелевым с точки зрения нормативной базы неразрушающего контроля (в частности, стандарт [4] регламентирует применение данного метода только для выявления поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности). Тем не менее, поскольку данный метод даёт практические результаты и до недавнего времени являлся единственным неразрушающим методом инструментальных криминалистических исследований данного класса объектов, то его применение широко распространено. Очевидно, что в данном случае речь идёт не об измерении остаточных напряжений или их допусковом контроле, – криминалистической информацией является пространственное распределение полей остаточных напряжений, а экспертной задачей – восстановление значения первичной маркировки объекта по данным наблюдения результатов визуализации этих полей.

Альтернативным подходом к визуализации магнитных полей рассеяния напряжённых объектов является новый для криминалистики метод магнитооптической визуализации [5], который, тем не менее, уже находит практическое применение и опирается на методическую [6] и правовую базу [7]. Бесспорными качественными преимуществами данного метода для обеспечения криминалистических исследований являются: нечувствительность к плоскостности и ориен-

тации исследуемых поверхностей, возможность селективного возбуждения полей рассеяния поверхностного слоя объекта, возможность исследования корродированных поверхностей.

При наличии альтернативных методов исследования неизбежно возникают вопросы о том, какие параметры улучшаются при использовании нового метода и о количественной оценке этих параметров, об их сравнении с параметрами традиционных методов исследований.

### **Постановка задачи**

В настоящей работе выполнено сравнение магнитопорошкового и магнитооптического методов визуализации пространственного распределения магнитных полей напряжённых объектов по показателю сигнал/шум. Отношение сигнал/шум не характеризует в полном объёме достоверность экспертного решения, поскольку последняя определяется не только качеством данных визуализации, но и экспертной базой знаний, правилами интерпретации, набором решающих правил. В то же время, отношение сигнал/шум может выступать в виде количественного показателя качества данных, представляемых для исследования.

### **Анализ сигнала и шума в результатах визуализации распределения магнитного поля напряженного образца**

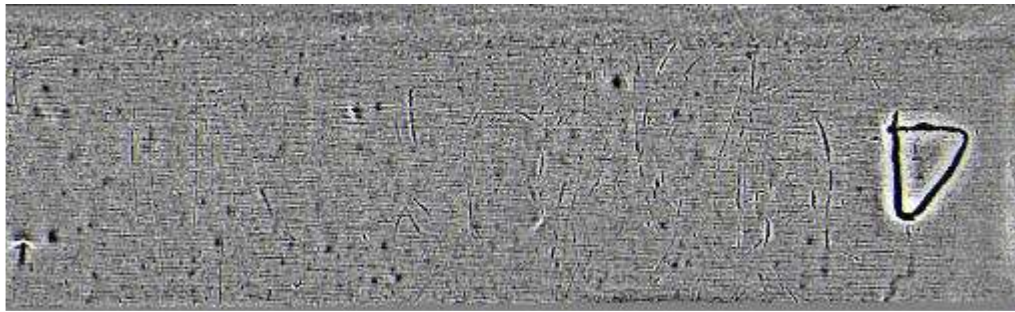
Экспериментальные исследования заключались в выполнении визуализации сравниваемыми методами полей рассеяния напряжённого тест-объекта. Тест-объект представляет собой пластину листового металла (Ст 45 толщиной 1,5мм) с первичной маркировкой рельефными знаками "865", выполненной методом механообработки давлением (холодной штамповки). Размер клейм "шрифт №6" (высота знаков 6 мм), глубина рельефа знаков порядка 0,3 - 0,4мм. Условия изменения первичного номера (удаления первичной маркировки): шлифовка на плоскошлифовальном станке со снятием слоя металла на глубину 0,5мм. Поверхность без покрытия – имитация зачищенной номерной площадки кузова автомобиля. Внешний вид поверхности тест-объекта приведен на рис. 1а, рельефная метка в правом верхнем углу служит для маркировки наклёпной поверхности (стороны) образца.

Магнитопорошковая визуализация (рис. 1б) выполнена в условиях полюсного намагничивания материала тест-объекта до состояния технического насыщения (индукция, порядка  $B_s \approx 1,5-1,8$  Тл). В виде индикаторной жидкости использована магнитопорошковая суспензия на основе концентрата «РОСАВА-1200» ТУ 13700348.23-97.

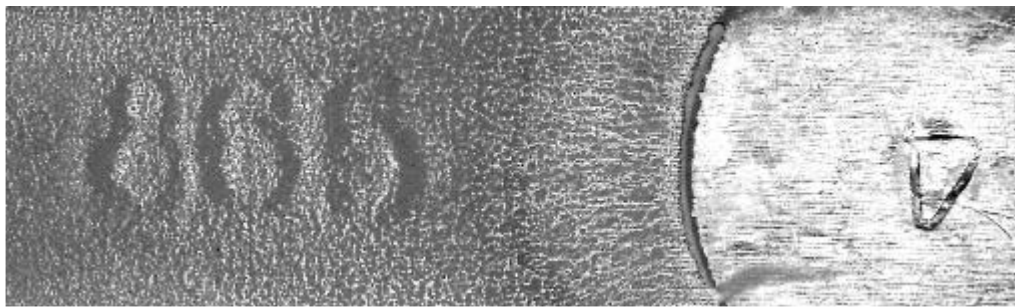
Магнитооптическая визуализация (рис. 1в) выполнена, в соответствии с принципами способа [5]: в результате копирования (запись с подмагничиванием) полей рассеяния объекта на промежуточный магнитный носитель и последующей визуализации полученной копии в поляризованном свете с использованием магнитооптического эффекта Фарадея. В виде датчика - визуализатора магнитного поля, использован тонкоплёночный кристалл висмутсодержащего ферритграната состава  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ .

Изображения результатов визуализации, полученных сравниваемыми мето-

дами, с целью сопоставимости, приблизительно уравнены по оптическим характеристикам (пространственное разрешение, диапазон яркостей).



а)



б)



в)

а) – внешний вид исследуемой поверхности; б) – результат визуализации полей рассеяния объекта магнитопорошковым методом; в) – результат визуализации полей рассеяния объекта магнитооптическим методом

Рисунок 1 – Тест-объект, содержащий остаточные напряжения материала в области удаленных рельефных знаков

Для оценки отношения сигнал/шум при анализе изображений, как правило, используют отношение мощности сигнала к мощности шума [8]:

$$SNR = 10 \log \frac{P_{signal}}{P_{noise}}, \quad (1)$$

где  $P_{signal}$  – мощность сигнала,  $P_{noise}$  – мощность шума.

Характер распределения амплитуд сигнала и шума может быть предварительно оценен по иллюстрациям рис. 2, где на поз. а) и в) приведены укрупнённые фрагменты результатов визуализации, полученных исследуемыми методами, а на поз. б) и г) – яркости изображений в указанных (пунктиром) сечениях.



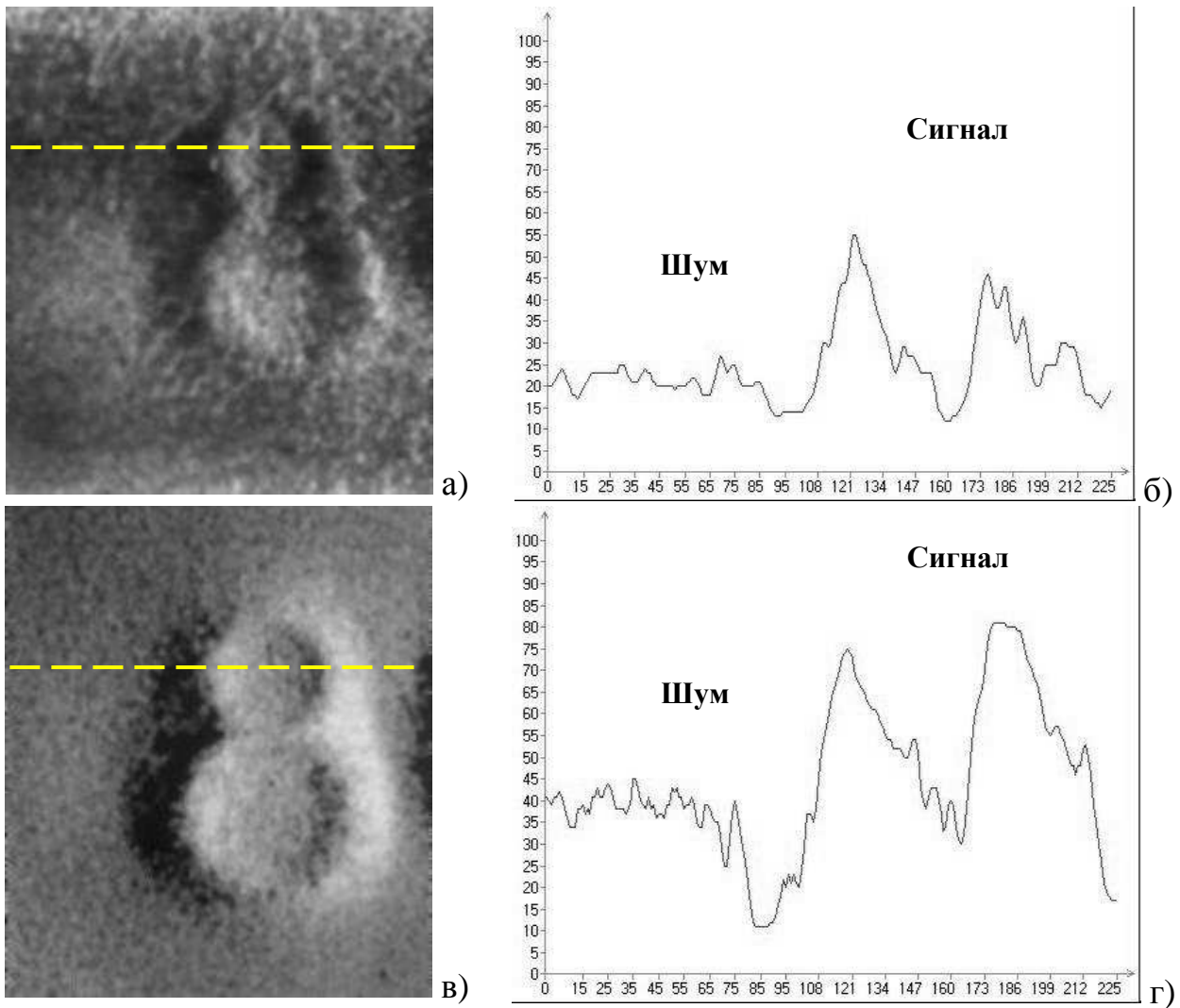


Рисунок 2 – Функции распределения амплитуд сигнала и шума: укрупнённые изображения результатов визуализации магнитопорошковым (а) и магнитооптическим (в) методами; б) и г) – яркости изображений в указанных (пунктиром) сечениях для соответствующих изображений.

И в области шума (где сигнал отсутствует), и в области сигнала наблюдаются отклонения амплитуды (яркости) изображения от некоторого среднего уровня (уровня «серого»), как в сторону малых амплитуд (уровень «черного») так и в сторону больших амплитуд (уровень «белого»). Однако, величина отклонения от среднего уровня в области сигнала больше, чем в области шума, что позволяет выделить сигнал на фоне шума. Кроме того, в области сигнала пространственная частота изменения амплитуды также отличается от области помехи, что является дополнительным фактором, повышающим достоверность выделения сигнала на фоне шума.

Таким образом, для практической оценки отношения сигнал/шум по полученному изображению – визуализации распределения магнитного поля надо выполнить сегментирование изображения на две непересекающиеся области – область сигнала  $S_{signal}$  и область помехи  $S_{noise}$ , оценить по каждой из областей мощность и выполнить вычисления по формуле (1). Мощность будем оцени-

вать как дисперсию амплитуд (яркостей) изображения:

$$P = \frac{1}{I_S J_S} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} (A_{ij} - \bar{A})^2, \quad (2)$$

$S$  – соответствующая область изображения (сигнала или шума),

$I_S, J_S$  – размеры области,

$\bar{A} = \frac{1}{I_S J_S} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} A_{ij}$  – среднее значение амплитуд (яркостей) изображения в

соответствующей области.

### Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментальной оценки были использованы два изображения – рисунок 1б – изображение, полученное магнитооптическим методом, рисунок 1в – изображение, полученное магнитопорошковым методом.

Результаты анализа изображений, приведены в таблице 1. Таким образом, по результатам анализа экспериментальных данных, магнитооптический метод обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум на 3÷6 дБ, по отношению к магнитопорошковому методу.

Таблица 1 - Результаты анализа изображений

№ измер.	Знак	Магнитооптический метод			Магнитопорошковый метод			Приращение отношения сигнал/шум, дБ
		$P_{signal}$	$P_{noise}$	$SNR$ , дБ	$P_{signal}$	$P_{noise}$	$SNR$ , дБ	
1	«8»	372,87	59,59	7,96	348,94	116,85	4,75	+3,21
2	«6»	426,83		8,55	290,36		3,95	+4,60
3	«5»	515,29		9,36	243,67		3,19	+6,17

Преимущественное соотношение сигнал/шум для магнитооптического метода, полученное в результате оценки экспериментальных данных, на наш взгляд, имеет объяснение в рамках физических основ процессов визуализации, и является прямым следствием бесконтактности данного метода визуализации. Так, магнитооптическая визуализация основана на движении доменных стенок исходно регулярной структуры (полосовой доменной структуры кристалла датчика) под воздействием поля рассеяния объекта (или магнитной копии объекта). При этом такие характеристики поверхности объекта, как шероховатость, адгезионная способность, смачиваемость, силы молекулярного притяжения не оказывают непосредственного влияния на перестройку доменной структуры магнитооптического кристалла. В то же время перечисленные характеристики объекта являются определяющими для шумов магнитопорошкового метода, поскольку они влияют на свободу перемещения и флуктуации концентрации магнитных частиц суспензии. Применение поверхностно активных веществ в составе индикаторных жидкостей решает эти проблемы лишь частично, – оче-

видно, что даже микрорельеф поверхности ограничивает свободу перемещения магнитных частиц под действием пондеромоторных сил. Кроме того, частицы магнитного порошка, вследствие их совместного с образцом намагничивания, принципиально склонны к образованию конгломератов, что также не может не влиять на уровень шумов визуализации.

В заключение следует отметить, что при экспертных исследованиях, когда решение об обнаружении сигнала выполняет оператор-эксперт, минимальное значение обнаруживаемого сигнала будет определяться не только отношением сигнал/шум полученного изображения, но и рядом других плохо формализуемых факторов, поскольку при обнаружении будут использованы свойства зрения и особенности психофизиологической обработки визуальной информации, опыт экспертной практики, интуиция.

### **Выводы**

1. По данным анализа экспериментальных результатов, магнитооптический метод более эффективен для криминалистических исследований остаточных напряжений, чем магнитопорошковый метод, поскольку он обеспечивает большее отношение сигнал/шум на 3÷6 дБ.

2. Приведенный анализ физических основ рассматриваемых процессов визуализации магнитных полей позволяет объяснить преимущественное соотношение сигнал/шум для магнитооптического метода, как следствие бесконтактности данного метода.

3. Полученные результаты позволяют считать магнитооптический метод перспективным для дальнейших исследований с целью определения его пригодности для измерения и контроля остаточных напряжений.

### **Литература**

1. Р. Роуландс. Остаточные напряжения // Экспериментальная механика. Под. ред. А. Кобыяси. Кн.2. – М.: Мир, 1990. – С. 285-335.
2. Методика криминалистического исследования легковых автомобилей в целях установления подлинности их идентификационных номеров, моделей и времени выпуска. Прохоров-Лукин Г.В. – руководитель авторского коллектива. К.: Киевский НИИ судебных экспертиз, 1998. - 344с.
3. Нагайцев А.А. Исследование маркировочных обозначений легковых автомобилей зарубежного производства: Учебное пособие – М.: ЭКЦ МВД России, ЗАО «Издательство БИНОМ», 1999. - 264 с.
4. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод; Введ. 01.01.1988 взамен ГОСТ 21105-75; Переизд. (апрель 1992 г.) с Изменением № 1, утвержденным в сентябре 1989 г. (ИУС 1-90) – М.: Изд-во стандартов. 1992 – 17с.
5. Патент на винахід (Україна) №42880 від 15. 11. 2001р., Бюл. №10, 7G 01N 27/82, 27/83: Спосіб магнітооптичного контролю виробу. Заявники патенту: Левий С.В., Агаліді Ю.С. По заявці № 99074257, від 22.07.1999. Приоритет від 05.10.2001. Автори винаходу: Левий С.В., Агаліді Ю.С.
6. Прохоров-Лукин Г.В. Установление фактических данных об автомобилях методами криминалистических экспертиз. – К.: типография журнала «Охрана труда», 2000. – 414с.
7. Про затвердження Інструкції про проведення огляду транспортних засобів та їх реєстраційних документів під час реєстрації, перереєстрації і зняття з обліку. Наказ Міністерства внутрішніх справ України № 987 від 10.11.2005. Зареєстровано в Міністерстві юстиції

України за № 1424/11704 від 24.11.2005.

8. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники. 2-х т. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – 600 с.

<p>Агаліді Ю.С., Левий С.В., Мачнев О.М. <b>Порівняльний аналіз магнітопорошкового та магнітооптичного методів візуалізації просторового розподілу магнітного поля при дослідженні залишкових напружень</b> Для чисельної оцінки порівняльної ефективності двох методів спостереження залишкових напружень у поверхневих шарах феромагнітних виробів було виконано експериментальні дослідження співвідношення сигнал/шум за результатами візуалізації магнітних полів розсіяння.</p>	<p>Agalidy U., Lyevyuy S., Machnyev A. <b>Comparative analysis of magnetic-powder and magnetic-optical methods for spatial distribution of magnetic field visualizing on investigation of residual stress</b> Experimental investigations were made for numerical comparison of two methods effectiveness. Signal to noise ratios (SNR) were evaluated for images that were got as result of magnetic-optical and magnetic-powder visualizations of ferro-magnetic surface. Comparative analysis shows advantage of magnetic-optical method application with respect to magnetic-powder method</p>
---	--

*Надійшло до редакції  
27 листопада 2005 року*

УДК 621.384.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕВАНТНИХ ОЗНАК ЗОБРАЖЕНЬ В ОЕП ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ТИПУ

*Микитенко В.І., Національний технічний університет України “Київський політехнічний університет”, м. Київ, Україна*

*Досліджено вплив характеристик зображень і зорової системи оператора на ефективність візуального пошуку і розпізнавання*

### **Вступ**

До складу сучасних оглядових оптико-електронних систем (ООЕС) входять зазвичай кілька оптико-електронних приладів (ОЕП), які формують телевізійний, низькорівневий, тепловізійний канали [1]. Для забезпечення ефективного функціонування таких систем з огляду на те, що оператором є одна людина, необхідно комплексувати зображення з різних каналів і відобразити його на одному екрані. Комплексуванню зображень в ООЕС присвячено багато досліджень. В більшості їх автори розробляють загальні математичні алгоритми комплексування [2 - 4] або вирішують задачі автоматичного пошуку та розпізнавання [1, 5, 6]. Для підвищення інформативності комплексованого зображення на екрані монітору пропонується використовувати стандартні для цифрової обробки зображень процедури підвищення контрасту та підсилення контурів [7, 8], виділення текстур в зображенні та його сегментація [9], псевдоколюрове кодування [10] та ін. Не заперечуючи доцільність таких рішень в конкретних випадках необхідно відзначити недостатню їх обґрунтованість виходячи з оцінки ефективності роботи системи "ООЕС – оператор" в цілому. Очевидно, що результат комплексування зображень має оцінюватись ефективністю

виконання оператором поточної задачі.

### **Постановка задачі**

Для створення ефективних алгоритмів комплексування зображення важливо оцінити які з його ознак для заданого класу ОЕП є релевантними (найважливішими) на етапі виявлення чи розпізнавання оператором об'єкта при наявності апріорної інформації про фоноцільову обстановку. В цьому сенсі діяльність всієї системи можна уявити як постійний перенос інформації від об'єкта до оператора, а функція ООЕС полягає в формуванні оптимальної конфігурації інформаційного каналу. Отже, встановивши релевантність ознак зображень можна оптимізувати технічні вимоги до ООЕС.

Оператор ООЕС аналізує зображення, яке формується різними ОЕП, і приймає рішення виходячи з контексту поточної задачі та апріорної інформації про фоноцільову обстановку. Робота оператора узагальнено описується в рамках кількох послідовних механізмів - від пошуку об'єкта до його ідентифікації. З метою підвищення ефективності роботи системи "ООЕС – оператор" на кожному етапі виконання поточної задачі комплексоване зображення в полі зору оператора має бути таким, щоб в ньому містилась тільки інформація яка є необхідною для прийняття правильного рішення саме в цей час.

Важливим є визначення категорії "поточна задача" для оператора ООЕС. Справа в тому, що трактування цього терміну розробниками приладів і психологами різне. Відомі критерії Джонсона [11], запропоновані ще в 1958 році, оперують поняттями виявлення, встановлення орієнтації, розпізнавання, ідентифікації. Лабораторія нічного бачення (NVL) розробила модель [12], в якій встановлення орієнтації і розпізнавання замінені відповідно попереднім та кінцевим розпізнаванням. Критерії NIIRS [13] задають 10-бальну шкалу ступенів зорового сприйняття зображень для оцінки якості ООЕС. З іншого боку, сучасна психологія при описі зорового сприйняття оперує поняттям "перцептивні дії" [14], які розділяються на пошукові та розпізнавальні. Звичайно, розпізнавання має декілька градацій детальності, але загальний механізм перцептивних дій залишається ймовірно мало змінним. Так як релевантність ознак визначається оператором, то при встановленні змісту етапів виконання поточної задачі доцільно керуватись психофізіологічним підходом до опису зорової діяльності і основними етапами поточної задачі прийняти пошук та розпізнавання об'єкта. Причому, результатом пошуку має стати виявлення об'єкта. Процес зорової діяльності оператора обмежимо найбільш поширеною ситуацією – бінокулярним спостереженням на плоскому екрані.

### **Пошук об'єкта**

Механізми візуального пошуку об'єктів досліджуються багато років і на сучасному етапі описуються досить адекватними моделями. В спрощеному вигляді більшість моделей враховують дві стадії пошуку – попередню, на якій зорова система автоматично фіксується на визначеній ділянці поля зору, і кінцеву, на якій відбувається цілеспрямований аналіз виділеної ділянки поля зору з участю еталонних образів, що знаходяться в пам'яті оператора [15]. Найтип-

вішими варіантами виконання пошукової задачі, які розглядаються психофізиками і психологами, є: пошук малого об'єкта на рівномірному фоні, пошук великого (продовженого) об'єкта на рівномірному фоні, пошук малого або великого об'єкта на нерівномірному (структурованому) фоні. Крім того окремо задаються умови пошуку - рухомість або нерухомість об'єкта, наявність апріорної інформації про присутність об'єкта в полі зору.

В найпростішому випадку зорового пошуку на рівномірному фоні час пошуку не залежить від форми об'єкта, а визначається його площею [16]. Пошук малих об'єктів (видимий кутовий розмір до 7') простої форми на рівномірному фоні з допомогою ОЕП телевізійного типу досліджувався в [17]. Показано, що ймовірність правильного виявлення залежить від контрасту та кількості строк телевізійного растру в зображенні об'єкта. Наведені також результати щодо оцінки впливу контрасту, поля зору, просторового розділення (в кількості строк телевізійного растру) і складності фону на час виявлення. Встановлено, що найбільший вплив на час виявлення мають складності фону і кількість строк телевізійного растру в зображенні. У роботі [18] вказані вище релевантні ознаки були доповнені відношенням сигнал/шум, який сприймається зоровою системою оператора (табл.1).

Таблиця 1 – Залежність порогових характеристик телевізійного зображення від поточної задачі

Поточна задача	Тип фону	Кількість строк телевізійного растру в зображенні об'єкта	Граничне відношення сигнал/шум для різної кількості строк телевізійного растру на екрані			
			100	300	500	700
Виявлення	Рівномірний	1	2,8	2,8	2,8	2,8
	Нерівномірний	2	4,8	2,9	2,5	2,5
Розпізнавання	Рівномірний	8	4,8	2,9	2,3	2,5
	Нерівномірний	8	6,4	3,9	3,4	3,4
Ідентифікація	Рівномірний	13	5,8	3,6	3,0	3,0

В [19] при дослідженнях впливу телевізійного растру на зорове виявлення встановлено, що при вертикально орієнтованому растрі час виявлення малого об'єкта з невеликим контрастом суттєво менший, ніж при горизонтально орієнтованому растрі. Ступінь впливу фону залежить від його схожості з об'єктом [20]: зі зближенням просторово-частотних характеристик об'єкта і фону зростає час пошуку. Крім того, час пошуку також залежить від розміру поля пошуку, кількості та просторового розподілу фонових утворень в полі зору [11].

Багато експериментальних досліджень [19, 21 - 23] присвячені виявленню рухомих об'єктів. В цілому автори роблять висновок, що при сталих умовах спостереження існують оптимальні виходячи з критерію максимальної ймовірності виявлення швидкості переміщення об'єкта в полі зору. Це справджується і на рівномірних і на нерівномірних фонах. Граничні значення контрасту зображення об'єкта при його виявленні залежать від знаку контрасту [24]: якщо на рівномірному фоні

знаходяться два об'єкта, один з яких світліший, а другий – темніший від фону на однакову величину, то ймовірність виявлення в другому випадку вища.

Значний вплив на ефективність зорового пошуку відіграють кольори на зображенні. Відомо, що людина краще сприймає зміни в кольорі, ніж в яскравості, розмірі, формі. Наприклад, в [25] показано, що час зорового пошуку об'єкта на екрані авіаційного бортового дисплея зменшується на 32%, якщо монохромне зображення замінити кольоровим. У випадку зменшення просторової роздільної здатності в зображенні різниця в часі збільшується. Орієнтація зображення як ознака для пошуку має більшу релевантність ніж розмір, але меншу, ніж колір [20].

Аналіз впливу умов спостереження на ймовірності виявлення об'єкта показує [16, 26], що головними факторами є досвідченість оператора, наявність апріорної інформації про об'єкт, стан світлової адаптації зорової системи оператора, кутовий розмір поля зору, час, що відведений на виконання задачі.

### **Розпізнавання об'єкта**

Психофізіологічні аспекти зорового розпізнавання на сьогодні вивчені значно гірше, ніж пошуку. Основними напрямками досліджень в цій галузі є визначення релевантних ознак зображень об'єктів на рівномірних фонах та встановлення закономірностей розпізнавання об'єктів на нерівномірних фонах. Вплив фону та просторового розділення в зображенні об'єкта на ймовірність його розпізнавання досліджувався в [17]. Показано, що, збільшення кількості строк в зображенні об'єкта від 5 до 10 супроводжується підвищенням ймовірності розпізнавання. Подальше збільшення просторового розділення не призводить до помітного впливу на розпізнавання. Кількість строк в зображенні об'єкта в сенсі зорового сприйняття пов'язана з контрастом та кількістю рівнів сірого. Експерименти з розпізнавання об'єктів складної форми показують [27, 28], що при зміні контрасту в межах від 0,2 до 0,6 при всіх значеннях просторового розділення відбувається значне підвищення ймовірності розпізнавання, але 100% розпізнавання відбувається тільки при 40 строках в розмірі зображення об'єкта. В той же час, в [17] показано, що в зображеннях з невеликим просторовим розділенням кількість градацій сірого практично не впливає на розпізнавання. Цей вплив посилюється зі збільшенням кількості строк, починаючи з 12.

Вплив шумів на розпізнавання вивчається найчастіше для об'єкта на рівномірному фоні в присутності адитивних шумів, або для об'єкта на нерівномірному фоні (який в цьому випадку ототожнюється з шумом). В табл. 2 наведені результати вимірювання ймовірності розпізнавання портретів та пейзажів за наявності адитивного квазібілого шуму в спектральному діапазоні від 0 до 1,1 кГц [29].

Помітна схожість результатів при різних типах об'єктів. Водночас, такі ж експерименти [30] при наявності корельованого гаусового шуму дали значно більші значення ймовірностей розпізнавання.

Найважливішою ознакою монохромного зображення при розпізнаванні є форма. Зважаючи на складність задачі, як правило, досліджується візуальне сприйняття різних типів об'єктів (як простих геометричних фігур, так і реальних зображень) на одному фоні, або одного об'єкта в різних ракурсах. Наприклад, в [31] показано, що для 50% розпізнавання квадрата просторове розділен-

ня в його зображенні може бути вдвічі меншим, ніж для шестикутника, але на 60% більшим, ніж для трикутника. В [32] на прикладі оцінки телевізійних зображень морських суден показано, що ефективність розпізнавання бокового зображення суттєво вища, ніж фронтального зображення. Нажаль, поняття форми на сьогодні не має усталеного формального опису [33]. Багато дослідників пропонують різні рішення цієї проблеми, але серед них є й загальновизнані факти. Одним з найважливіших є залежність інформативності форми від характеристик контурів [34]. Окрім складності форми на ефективність розпізнавання впливає також рухомість об'єкта, наприклад, при збільшенні кутової швидкості зображення в полі зору від 0 до 14 кут.град/с час розпізнавання форми збільшується в 1,5 – 4 рази [35].

Таблиця 2 – Залежність ймовірності розпізнавання від відношення сигнал/шум, що сприймається оператором

Відношення сигнал/шум	Ймовірність розпізнавання	
	Портрет	Пейзаж
1,0	0,33	0,25
1,5	0,53	0,42
2,0	0,70	0,74
3,0	0,94	0,90

### **Обговорення результатів досліджень**

З приведеного аналізу видно, що релевантні ознаки розділяються на часткові та узагальнені подібно до показників якості зображень. Перша група ознак співпадає з деякими технічними характеристиками ОЕП, друга складається з комплексних показників, які описують форму об'єкта і його взаємодію з неоднорідним фоном. До певної міри релевантні ознаки можна ототожнити з суб'єктивними показниками якості зображень і користуватися відповідними методиками розрахунків.

Виходячи з визначення релевантності як міри значимості тих чи інших ознак зображення при його аналізі зоровою системою, об'єктом дослідження в контексті задачі оцінки ефективності функціонування системи "ООЕС – оператор" в умовах заданої фоноцільової обстановки має бути сам процес візуального сприйняття зображення. Але для формування технічних вимог до ООЕС потрібно відобразити особливості зорового сприйняття в поняттях "найкращих" характеристик зображення. Тоді, знаючи механізми перетворення інформації від оптичного сигналу фоноцільової обстановки до оптичного сигналу в засобі відображення, можливо оцінити вплив кожної ланки тракту проходження сигналу на релевантність зображення і синтезувати ООЕС, яка б сформувала "найкраще" в даних умовах зображення.

Враховуючи фізичні механізми формування оптичного сигналу в різних діапазонах спектру та склад сучасних ООЕС, доцільно розглядати два типи ОЕП – видимого діапазону спектру (телевізійні та низькорівневі) й інфрачервоні. В першому випадку релевантні ознаки зображень зазвичай є відображенням зов-



нішніх формоутворюючих ознак об'єкта; у другому – відображенням суміші формоутворюючих ознак об'єкта, об'ємного температурного розподілу та специфічних демаскуючих ознак (наприклад, факел реактивного двигуна). Крім того, важливими є просторово-частотні характеристики фону та взаємне переміщення об'єкта і фону.

Перетворення оптичного сигналу в електричний у приймальному блоці ОЕП супроводжується модифікаціями характеру інформаційного потоку. Найсуттєвішу роль у цьому процесі відіграє просторова дискретизація квазіаналогового оптичного сигналу: переважна більшість телевізійних і тепловізійних ОЕП використовують дискретні приймачі випромінювання, а в приймачах відиконного типу відбувається електронне сканування. Аналогові низькорівневі ОЕП з окулярним виводом зображення в рамках задачі, що вирішується, розглядати недоцільно.

Важливі ознаки можуть бути створені в електронному тракті ОЕП. Але в загальному випадку вони не є первинними, тобто такими, що не залежать від розробника ОЕП - формування таких ознак спрямоване на оптимальне конфігурування інформаційного каналу, тобто є одним з основних засобів комплексування.

Зворотнє перетворення електричного сигналу в оптичний, враховуючи значний прогрес у засобах відображення інформації, практично не викликає безпосередньо виникнення додаткових релевантних ознак в зображенні. В той же час характеристики оптичного поля, яке спостерігає оператор, дуже сильно впливають на результат спостереження. Це ж можна сказати й про зорове сприйняття. Нормальна зорова система не створює у зображенні релевантних ознак, але умови спостереження й властивості оператора суттєво впливають на результати його роботи.

## **Висновки**

Незважаючи на численні дослідження візуальна діяльність оператора ООЕС потребує додаткового глибокого вивчення. Механізми зорового пошуку на рівномірних фонах вивчені в достатній мірі для адекватного моделювання відповідних алгоритмів роботи ООЕС, в тому числі – комплексування. У випадку нерівномірних фонів існує необхідність формалізації опису фоноцільової обстановки для класифікації її складності і внесення потрібних змін в алгоритми комплексування. Механізми розпізнавання вивчені недостатньо, але є кілька добре корельованих з ефективністю роботи ООЕС характеристик і складних ознак зображень, які можна вважати релевантними на етапі розпізнавання. До перших відносяться контраст, просторове розділення, відношення сигнал/шум, просторово-частотний склад шумів, динамічний діапазон; до других – форма об'єкта, ступінь схожості об'єкта і фонових утворень. Як і у випадку зорового пошуку для ефективного комплексування сигналів при розпізнаванні потрібно формалізувати опис складних ознак зображень та привести їх до набору характеристик, які піддаються математичному моделюванню.

Для розробки технічних вимог до ОЕП й алгоритмів комплексування інформації, які забезпечили б найвищу ефективність роботи системи "ООЕС – оператор" на етапах пошуку і розпізнавання, необхідно створити найбільш адекватну міру релевантності зображення в ООЕС, дослідити механізми її перетворення в блоках ООЕС і розробити заходи по забезпеченню її максимального значення.

**Література**

1. Borghys D., Verlinde P., Perneel C., etc. Multilevel Data Fusion for the Detection of Targets Using Multispectral Image Sequences // Opt.Eng. – 1998. -V.37, № 2. - P. 477-484.
2. Hall D.I. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion. Artech House, Boston, 1992.
3. Hall D.I., Llinas J. An Introduction to Multisensor Data Fusion // IEEE Proc. – 1997. -V.85. -№ 1. - P. 6-23.
4. Bosse E., Simard M.-A. Managing evidential Reasoning for Identity Information Fusion // Opt.Eng. – 1998. -V.37, № 2. - P. 391-400.
5. Bar-Shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced Applications. V.1. Artech House, Boston, 1990.
6. Bar-Shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances. V.2. Artech House, Boston, 1992.
7. Vaughn V.D., Wilkinson T.S. System Considerations for Multispectral Image compression Designs // IEEE Signal Proc. Mag. – 1995. - №15. - P. 19-31.
8. Richards J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, Berlin, 1986.
9. Kinser J.M. Pulse-coupled image fusion // Opt.Eng. – 1997. -V.36, № 3. - P.737-742.
10. Toet A., Walraven J. New false color mapping for image fusion // Opt.Eng. – 1996. - V.35, №3. - P. 650-658.
11. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
12. Ratches J.A. Static performance model for thermal imaging systems // Opt.Eng. – 1976. - V.15, № 3. – P. 525-530.
13. Leachtenauer J.C. National imagery interpretability rating scales: overview and product description // ASPRS/ASCM Annual Convention and Exhibition Technical Papers: Remote Sensing and Photogrammetry. – 1996. - №1. – P. 262-272.
14. Зинченко В.П., Мунипов В.М. Основы эргономики. – М: МГУ, 1979. – 344 с.
15. Грановская Р.М., Березная И.Я., Григорьева А.Н. Восприятие и признаки формы. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
16. Травникова Н.П.Эффективность визуального поиска. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
17. Erickson R. A. // Human factors. - 1978, v.20, №5. – P. 573 - 588.
18. Biberman L.M., Ed. Perception of Displayed Information. Plenum Press, N.York, 1973, 340 p.
19. Кошавцев Н. Ф., Короневская Т. И., Хальзов А. Х. // Труды МЭИ. – 1980. - Вып. 488. - С. 18 - 22.
20. Зинченко Т.П. Опознавание и кодирование. – Л.: ЛГУ, 1981. – 183 с.
21. Луизов А.В. Инерция зрения. – М.: Оборонгиз, 1961. – 247 с.
22. Гуторов М.М., Иванова В.П., Мурашов М.А. Исследование пороговой видимости подвижных объектов на равнором фоне // Труды МЭИ. – 1976. - Вып. 289. – С. 11-15.
23. Веселова Е.К. Экспериментальное исследование зрительного поиска объекта на движущемся изображении // Труды ГОИ им. С.И.Вавилова. – 1984. – Т. 57, вып. 191. – С. 158-165.
24. Романов Г.М., Туркина Н.В., Колпашиков Л.С. Человек и дисплей. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
25. Christie R.E. Review and analysis of color coding research for visual displays // Human factors.– 1975. - V.17, № 6. – P. 542-570.
26. Южно П.М., Огреб С.М., Марек Я.Л. Исследование особенностей визуального поиска в условиях временных ограничений и неопределенности относительно наличия объекта в зоне поиска // Оптический журнал. – Т.69, № 5. – С. 52-55.
27. Козюлина Н.Л., Романов С.С. // Техника кино и телевидения. – 1978. - № 10. – С. 60–61.
28. Козюлина Н.Л., Короневская Т.Н., Романов С.С. // Светотехника. – 1978. - № 8. – С. 7–9.
29. Красильников Н. Н. Статистическая теория передачи изображений. – М.: Связь, 1976. – 184 с.
30. Байданов М. П., Красильников Н.Н., Пастухов О.В. // Автометрия. – 1973. -№ 1. -С. 7–14.
31. Fairhurst A.M., Lettington A.H. Method of predicting the probability of human observers recognizing targets in simulated thermal images // Opt.Eng. – 1998. -V.37, № 3. – P. 744–751.
32. Mocharnuk J. B., Gaudio D. F., Suwe C. L. // Human factors. – 1981. -V.23, № 5. - P. 561–580.

33. Вифанский Ю.К., Мироненко И.А. Об опознавательных признаках объектов // Труды ГОИ им. С.И.Вавилова. – 1984. – Т. 57, вып. 191. – С. 153–158.
34. Завалишин Н.В., Мучник И.Б. Модели зрительного восприятия и алгоритмы анализа изображений. – М.: Наука, 1974. – 344 с.
35. Миракян А.И., Панов В.И. Восприятие скорости движения в процессе отражения формы объекта // Вопросы психологии. – 1985. - № 1. – С. 148–154.

<p>Микитенко В.И. <b>Исследование релевантных признаков изображений в ОЕП телевизионного типа.</b> Рассмотрены основные характеристики изображений, которые влияют на эффективность визуального поиска и распознавания оператором объектов на экране обзорных оптико-электронных систем (ООЭС). Сформулированы задачи, решение которых позволит оптимизировать алгоритмы комплексирования информации и технические требования к ОЕП, входящим в состав ООЭС, исходя из критерия максимальной эффективности функционирования системы «ООЭС – оператор».</p>	<p>Mykytenko V.I. <b>Relevant features of TV-type optoelectronic images.</b> Basic image features which affect the efficiency of visual search and recognition of objects in the screen of the survey optoelectronic systems are considered (SOES). The ways to optimize the algorithms of complexation information and technical requirements to SOES optoelectronic devices are formulated according to the criterion of maximal efficiency of the system «OOES – operator».</p>
--	--

*Надійшло до редакції  
8 грудня 2005 року*

УДК 681.7.013.8

## ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ МПФ ОБ'ЄКТИВІВ ФОТОПРИЙМАЛЬНИМ ПРИБРОЄМ З ЛППЗ

*Кучеренко О.К., Кучеров Є.В., Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

*Розглядається вплив дискретності фоточутливих елементів ЛППЗ на точність визначення МПФ об'єктивів. Запропонований засіб підвищення точності вимірювань шляхом мікро сканувань лінійним фотоприймачем в площині зображення*

### **Вступ**

Одним з найповніших критеріїв оцінки якості зображень, створюваних об'єктивами, є *оптична передатна функція* (ОПФ), котра наочно відображає спотворення, що створює об'єктив на різних просторових частотах. ОПФ є комплексною функцією і її можна представити двома дійсними функціями – модулем ОПФ, *модуляційною передатною функцією* (МПФ) та фазою, *функцією передачі фази* (ФПФ).

Для вимірювання МПФ на виробництві використовують стенд з неперіодичним тест-об'єктом та лінійним пристроєм з переносом заряду (ЛППЗ) [1]. Принцип дії такого стенду оснований на тому, що ЛППЗ вимірює функцію розсіювання (ФР) як імпульсний відгук об'єктиву, що досліджується, з наступним визначенням МПФ, як нормованого Фур'є перетворення від ФР.

Однак внаслідок кінцевих розмірів чутливих елементів ЛППЗ та їх кінцевої

кількості виникають певні спотворення при вимірюванні ФР. Метою цієї роботи є дослідження таких спотворень та запропонування методів їх усунення.

### Постановка завдання

Основна проблема полягає в тому, що при вимірюванні розподілу освітленості в ФР за допомогою ЛППЗ можна отримати лише дискретні значення розподілу освітленості, інтегровані по площі чутливого елементу. Як відомо [2], дискретизація у просторовій області спричиняє періодичність в області просторового спектру з періодом рівним частоті дискретизації. Внаслідок цього максимальна просторова частота, яка може бути присутня в спектрі (МПФ) об'єктиву, що досліджується, повинна бути меншою за частоту Найквіста, що визначається формулою:  $\nu_n = \frac{1}{2p}$ , де  $p$  – розмір чутливих елементів ЛППЗ. При наявності частот, більших за вказану частоту, виникає явище накладення спектрів, при якому неможливо однозначно визначити реальну МПФ. Приклад такого випадку показаний на рис. 1, де значення просторової частоти, що більші за частоту Найквіста, додаються до вихідної МПФ та викликають завищення кінцевих результатів.

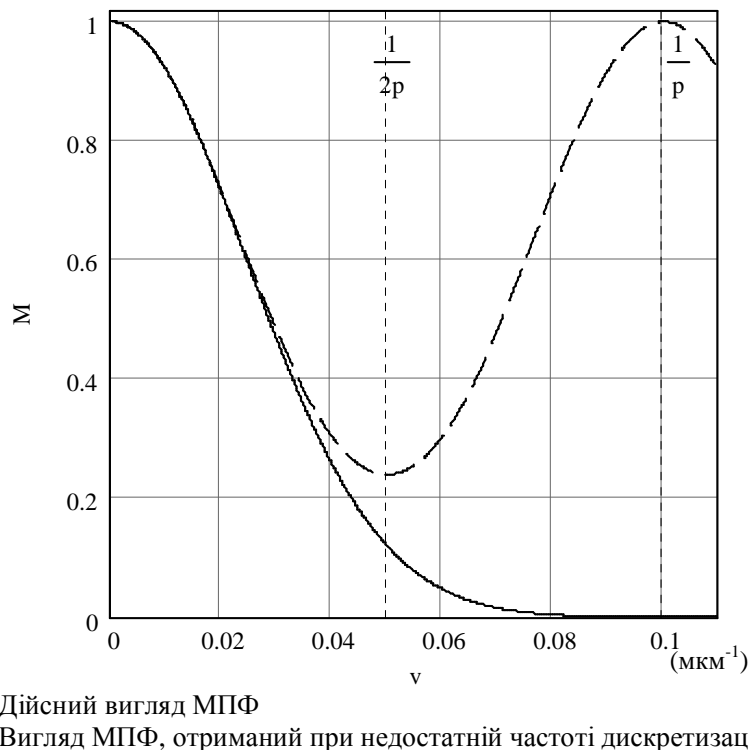


Рисунок 1 – Явище накладення просторового спектру при вимірюванні модуляційної передавальної функції

Одним з засобів зменшення впливу цього фактору на точність вимірювання стенду є використання мікрооб'єктиву, що “розтягує” зображення тест-об'єкту по більшій кількості чутливих елементів, і за певних умов не вносить власних похибок у вимірювану МПФ.

При збільшенні зображення мікрооб'єктивом частота дискретизації відповідно зростає в  $\beta$  разів, де  $\beta$  – збільшення мікрооб'єктиву. Тоді максимальна частота, яка може бути присутня в спектрі, становитиме [3]:  $\nu_n = \frac{\beta}{2p}$ . Але у деяких

випадках використання мікрооб'єктиву необхідного збільшення неможливе, наприклад у ближній інфрачервоній ділянці спектру, де номенклатура об'єктів або обмежена, або вони мають центральне екранування, що неприпустимо. Авторами запропоновано вирішення цієї проблеми методом мікросканування. Поставлена у статті задача розв'язується шляхом комп'ютерного моделювання.

### Основні теоретичні положення

Згідно запропонованого методу під час вимірювань ЛППЗ покроково зсувається на частину розміру чутливого елемента. Цей метод дозволяє збільшити частоту дискретизації у декілька разів. Тоді максимальна частота, яка може бути присутня в МПФ об'єктиву, що досліджується, така, котра не вносить похибок у вимірювання визначається формулою:

$$\nu_{\max} = \nu_n = \frac{\beta S}{2p}, \quad (1)$$

де  $S$  – кількість зсувів.

Покажемо, що це дійсно так. Дискретну вибірку значень освітленості в зображенні, котрі знімаються за допомогою ЛППЗ можна представити у вигляді ґратки  $\delta$ -функцій, вузли якої розташовані у центрах чутливих елементів і мають величину знятого з чутливого елемента сигналу  $q_n$ . Тоді послідовність, що описує сигнал ЛППЗ, запишеться як сума добутків значень сигналу та зсунутої  $\delta$ -функції. А для покрокового мікросканування ми будемо мати декілька таких сум:

$$Q(x) = \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta(x - np) + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta(x - np - \frac{p}{S}) + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta(x - np - 2\frac{p}{S}) + \dots + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta(x - np - (S-1)\frac{p}{S}) = \sum_{n=0}^{NS-1} q_n \delta(x - n\frac{p}{S}).$$

Тобто крок слідування  $\delta$ -функцій у ґратці зменшується і відповідно збільшується частота дискретизації.

Над такою вибіркою можна здійснити дискретне перетворення Фур'є, що описується виразом [4]:

$$F[m] = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} Q[n] \exp\left(-\frac{2\pi i n m}{N}\right), \quad m = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} - 1.$$

і, нормуючи таку послідовність відносно значення  $F[0]$ , отримати значення шуканої МПФ.

Однак, слід зазначити, що значення сигналу  $q_n$  для кожного чутливого елемента є інтегрованим по площі цього елемента. Це спричиняє додаткову похибку в результуючому виразі нормованого Фур'є перетворення окрім похибки дискретизації. Таке інтегрування можна описати за допомогою згортки функції

розподілу чутливості всередині одного елемента  $h(x)$  з функцією розсіювання лінії  $A(x)$ . Тоді значення сигналу в центрі чутливого елемента з номером  $n$  буде дорівнювати:

$$q_n = h(np) \otimes A(np).$$

Таким чином дискретне перетворення Фур'є цієї послідовності дорівнюватиме добутку Фур'є перетворень цих двох функцій:

$$\mathfrak{Z}\{q_n\} = \mathfrak{Z}\{h(x)\} \cdot \mathfrak{Z}\{A(x)\}.$$

Фур'є перетворення функції  $A(x)$  є шуканою МПФ об'єктиву, що досліджується, за яку можна прийняти отримані значення  $\mathfrak{Z}\{q_n\}$ , якщо вплив функції  $h(x)$  незначний, або ввести корегуючий коефіцієнт, що дорівнює

$$K = \frac{1}{\mathfrak{Z}\{h(x)\}}. \text{ Тоді добуток } \mathfrak{Z}\{q_n\} \cdot K \text{ і буде шуканою МПФ.}$$

Функція розподілу чутливості в середині одного елемента в найпростішому випадку з точністю до постійного коефіцієнту може бути представлена прямокутною функцією. А її Фур'є перетворення визначається *sinc*-функцією. Графік цієї функції приведено на рис. 2. Як видно з графіка в точках  $\nu = \frac{\beta}{p} \cdot k, k \in Z$

функція *sinc*( $\nu$ ) набуває нульового значення, що призводить до різкого наростання коефіцієнту  $K(\nu) = \frac{1}{\text{sinc}(\nu \cdot p / \beta)}$  в околі цих точок і, якщо вводиться корегуючий коефіцієнт, то слід виключити такі точки з корекції.

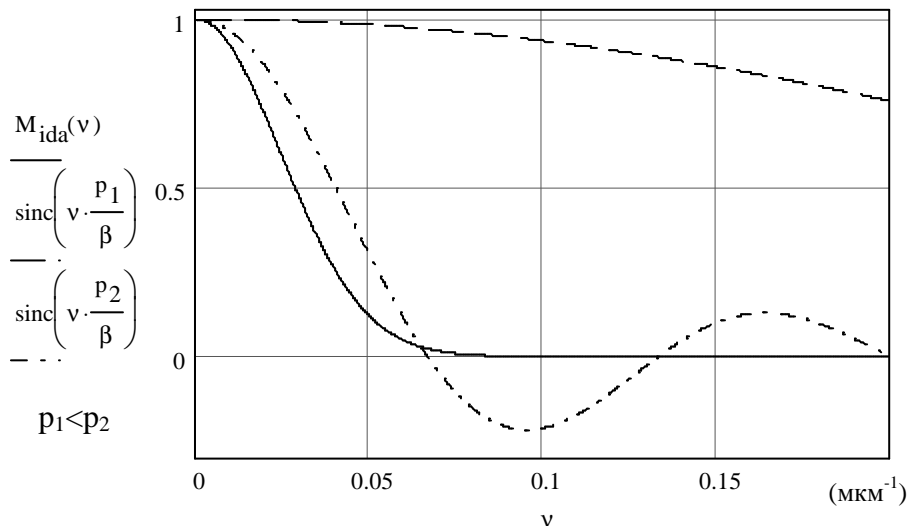


Рисунок 2 – Спектри функції чутливості одного елемента для двох різних розмірів чутливих елементів у порівнянні з МПФ об'єктиву, що досліджується

З формули (1) можна знайти кількість зсувів, котрі необхідно здійснити для того, щоб стэнд розділяв частоту  $\nu_{\max}$ :

$$S = \text{round}\left(\frac{\nu_{\max} \cdot 2p}{\beta}\right), \quad (2)$$

де  $round(x)$  – функція, що відкидає дробову частину  $x$ .

Як відомо МПФ абераційного об'єктиву не перевищує МПФ дифракційно-обмеженого. Для дифракційно-обмеженого об'єктиву ФР можна апроксимувати функцією Гауса з врахуванням радіусу кружка Ері, що можна врахувати і при одномірному моделюванні. Відповідно можна знайти й МПФ цієї апроксимації у аналітичному вигляді. Таким чином, врахувавши вирази для апроксимацій ФР та МПФ дифракційно-обмеженого об'єктиву, можна записати остаточний вираз для максимальної частоти, що може бути присутня в спектрі ФР:

$$\nu_{\max} = 1,1 \frac{D/f'}{\lambda}.$$

Підставляючи отримане значення у формулу (2) для визначення мінімально необхідної кількості кроків отримаємо:

$$S = round\left(1,1 \frac{D/f'}{\lambda} \cdot \frac{2p}{\beta}\right). \quad (3)$$

Обмеження по кількості елементів спричиняє дискретність відліків ОПФ з періодом  $1/Np$ . Однак при недостатньо великій виборці легко збільшити кількість елементів, доповнивши вибірку елементами з нульовими відліками, що дозволяє звести нанівець цей тип похибки.

### Методика та обговорення результатів комп'ютерного моделювання

Моделювання проводилось при наступних числових даних:

- робоча довжина хвилі:  $\lambda = 1,2$  мкм;
- відносний отвір об'єктиву, що досліджується:  $D/f' = 1:4$ ;
- радіус кружка розсіювання Ері:  $r_{er} = 5,856$  мкм;
- збільшення мікрооб'єктиву:  $\beta = 1$ ;
- параметри ЛППЗ:
- відстань між елементами:  $p = 20$  мкм;
- кількість елементів:  $N = 512$ ;
- розподіл чутливості всередині елемента:  $h(x) = rect(x/p)$ ;
- кількість кроків мікросканування:  $S = 4$ ;
- розмір кроку:  $sdv = p/S = 4$  мкм.

Значення сигналу, що знімається з ЛППЗ, з точністю до постійного множника приведені на рис. 3 у співвідношенні з апроксимованою ФР у площині ЛППЗ. У зв'язку з цим  $f(x)$  відображає апроксимовану функцію розсіювання, FRL – значення на виході ЛППЗ без здійснення мікросканування та FRLz – значення на виході ЛППЗ при здійсненні чотирьох крокового мікросканування.

Під час моделювання було досліджено можливість підвищення точності визначення МПФ при здійсненні мікросканування. Тобто, змінюючи кількість кроків мікросканування при сталих вихідних параметрах, були визначені відповідні МПФ. Таким чином внаслідок числового моделювання отримані чотири послідовності МПФ:  $M_{ida}(\nu)$  – значення МПФ, що отримані згідно з аналітичним виразом Фур'є перетворення апроксимації ФР;  $M(\nu)$  – значення МПФ без здійснення мікросканування;  $Mz(\nu)$  – значення МПФ при

мікроскануванні з відповідною кількістю кроків;  $M_{cor}(v)$  – значення МПФ при мікроскануванні та з введенням корегуючого коефіцієнту.

На рис. 4 приведені співвідношення цих МПФ при двокроковому мікроскануванні. При цьому видно, що така кількість кроків не забезпечує достатнього підвищення точності вимірювання МПФ.

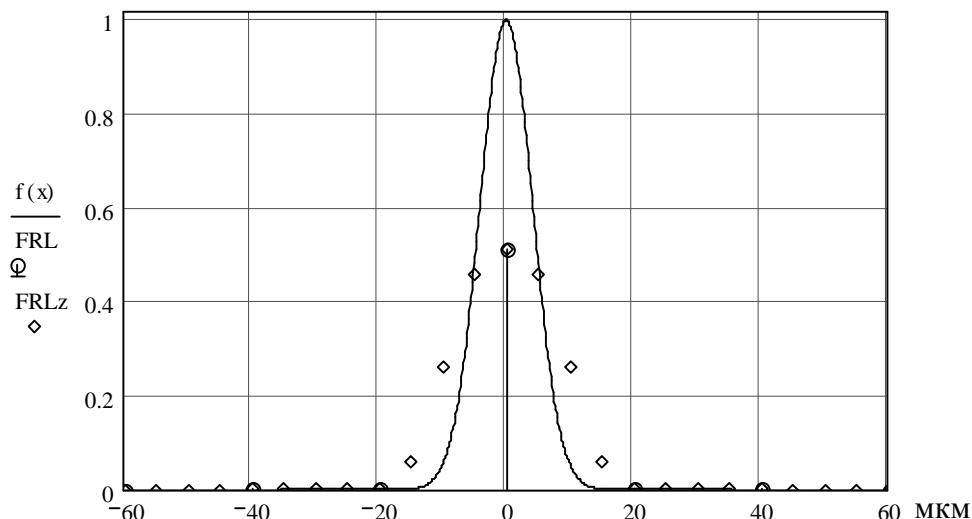


Рисунок 3 – ФР в площині ЛППЗ та значення на виході ЛППЗ без мікросканування та з мікроскануванням

На рис. 5 приведені результати, отримані при чотирьохкроковому мікроскануванні. Така кількість кроків розрахована за формулою (3) при числових даних прийнятих для моделювання і відповідає мінімально необхідній кількості кроків для даного випадку. На рис. 6 приведена похибка визначення МПФ відносно аналітичного виразу. З цих рисунків видно, що дана кількість кроків мікросканування є достатньою та значно підвищує точність визначення МПФ.

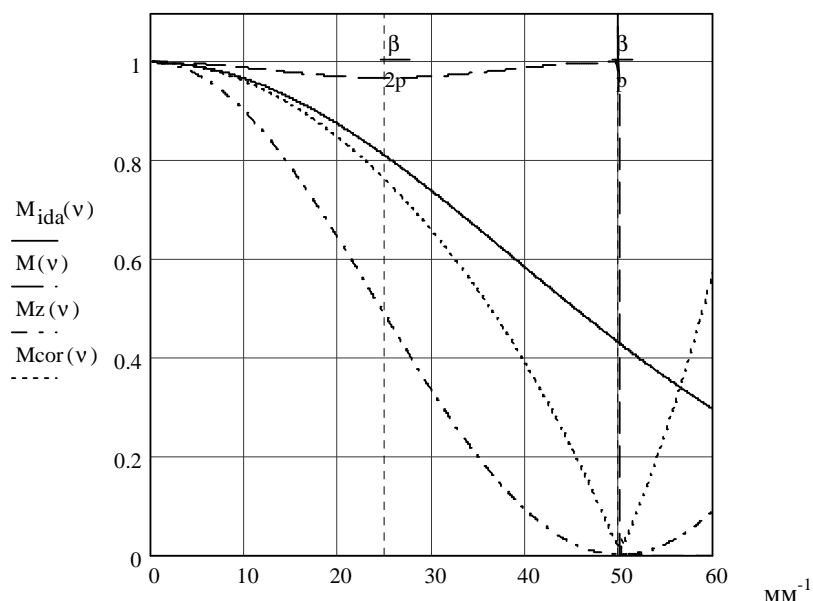


Рисунок 4 – Вигляд МПФ при двокроковому мікроскануванні у порівнянні з аналітичною МПФ

Аналіз залежностей, приведених на рис. 5,6, свідчить про те, що збільшення кількості кроків мікросканування до числа мінімально необхідної кількості зводить похибку визначення МПФ до нехтовно малої величини. Для порівняння слід відзначити, що похибка визначення МПФ при двокроковому мікроскануванні



складає, наприклад, 0,2 відн. од. на частоті  $\nu = 40 \text{ мм}^{-1}$  (див. рис. 4), а взагалі при відсутності мікросканування на тій самій частоті вона складає 0,45 відн. од.

Таким чином комп'ютерне моделювання підтвердило ефективність використання мікросканування для підвищення точності визначення МПФ. Визначення мінімально необхідної кількості кроків за формулою (3) дозволить зменшити час вимірювання, а в деяких випадках й спростити конструкцію пристрою високоточного позиціонування з використанням крокових або п'єзодвигунів.

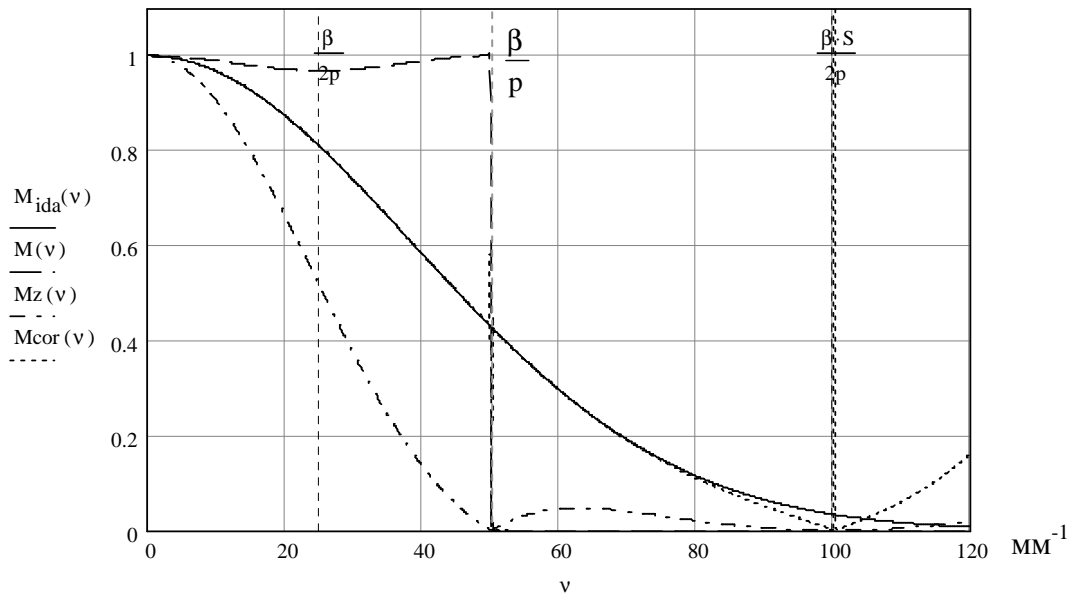


Рисунок 5 – Вигляд МПФ при чотирьох кроковому мікроскануванні у порівнянні з аналітичною МПФ

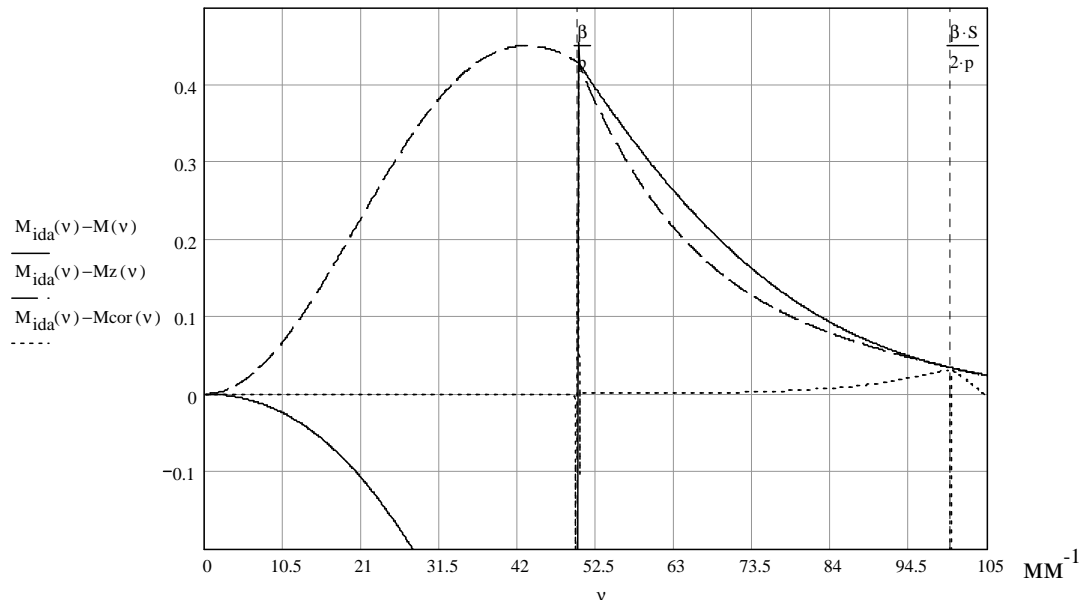


Рисунок 6 – Похибка визначення МПФ при чотирьох кроковому мікроскануванні

## Висновки

Проведені авторами дослідження підтвердили можливість використання мікросканування фотоприймальним пристроєм з ЛППЗ зображення ФР з метою підвищення точності вимірювання розподілу освітленості у її межах. Це, в свою чергу, сприятиме підвищенню точності обчислення МПФ об'єктів, що досліджуються. Запропонована методика дозволить розв'язати проблему визначення МПФ інфрачервоних об'єктів, роздільна здатність яких суттєво більша, ніж роздільна здатність багатоелементних фотоприймачів запропонованих на світовому ринку. Подальші дослідження в цьому напрямку будуть напрямлені на оцінку можливості використання крокових та п'єзодвигунів для здійснення прицензійного покорокового мікросканування фотоприймальним пристроєм з ЛППЗ.

## Література

1. Кучеренко О.К. та ін. Вимірювально-обчислювальний комплекс для контролю якості об'єктів // Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування. – 2003. – № 25. – С. 38 – 45.
2. Мирошников М. М., Теоритические основы оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
3. Кучеренко О.К., Савекін А.В. Визначення параметрів вузла фотометрування в стенді вимірювання ОПФ об'єктів // Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування. – 2003. – № 26. – С. 5 – 11.
4. Великотный М.А., Петрас С.В. Принципиальные аспекты измерения ОПФ с помощью дискретного самосканирующего фотоприемника // Опт. журнал – 1994. – № 9. – С. 50 – 55.

Кучеренко О.К., Кучеров Е.В. <b>Точность определения МПФ объективов фотоприемным устройством с ЛППЗ</b> Рассматривается влияние дискретности фоточувствительных элементов ЛППЗ на точность определения МПФ объективов. Предложен метод повышения точности измерений путем микросканирования линейным фотоприемником в плоскости изображения	Kucherenko O.K. KucheroV E.V. <b>Accuracy of determination MTF of lens with optical detector based on linear CCD</b> Examining the influence of linear CCD's photosensitive elements discreteness on accuracy of determination lens MTF. Suggested the method of increasing measuring accuracy by the way of microscanning with linear optical detector in image plain
--	---

Надійшло до редакції  
23 червня 2005 року

УДК 621.384.326

## ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ І ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

<sup>1)</sup>Демченко Л.І., <sup>2)</sup>Колобродов В.Г., <sup>1)</sup> Стефанович В.Т., <sup>1)</sup>Трандаш М.М. <sup>1)</sup> Науково-дослідний інститут «Квант», <sup>2)</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

Запропоновано визначати просторову роздільну здатність оптико-електронних систем спостереження новим параметром – геометричною шумовою смугою пропускання. Підвищення роздільної здатності тепловізійних і телевізійних систем досягається шляхом узгод-

*дження модуляційних передатних функцій об'єктива і приймача випромінювання*

### **Вступ**

В останні десятиріччя тепловізійні й телевізійні системи знаходять широке застосування як оптико-електронні системи спостереження (ОЕСС) у військовій справі, космічних системах дистанційного зондування Землі, охоронних системах тощо [1, 2]. Однією з найважливіших характеристик таких систем є просторове розділення, яке визначається, перш за все, аберациями та фокусною відстанню об'єктива і розмірами чутливої площадки (пікселя) приймача випромінювання (ПВ). Дослідженню просторового розділення ОЕСС присвячена значна кількість робіт [2 – 4], але в них не розглядається проблема узгодження параметрів об'єктива і ПВ. В статті на основі нового критерію – геометрична шумова смуга пропускання - досліджується узгодження абераций об'єктива з розмірами пікселя ПВ з метою підвищення просторової роздільної здатності.

### **Постановка задачі**

Формування зображення в ОЕСС відбувається наступним чином. Випромінювання (власне або відбите) від об'єкта спостереження й фона проходить через атмосферу і потрапляє в об'єктив. Об'єктив формує зображення об'єкта в площині ПВ, який перетворює світловий потік в електричний сигнал. Після підсилення та необхідної обробки сигнал надходить до дисплею, який формує на екрані видимий аналог об'єкта, що сприймає спостерігач.

Якість зображення, сформованого на екрані дисплея, визначається просторовою роздільною здатністю  $v_{res}$ , тобто здатністю ОЕСС створювати роздільними зображення двох точкових джерел випромінювання однакової інтенсивності, які розташовані одне біля одного [5]. Просторова роздільна здатність визначається як величина, що обернена до подвійної відстані між двома точковими зображеннями, які формуються роздільно. Існує декілька визначень просторового розділення, але вони мають низку обмежень стосовно ОЕСС, позаяк вони були розроблені для оптичних систем, що формують зображення.

В електронних інформаційних системах, що обробляють відеосигнали з метою створення зображення, багато років успішно застосовується ефективна шумова смуга пропускання, що визначається як

$$\Delta f = \int_0^{\infty} M_{El}^2(f) df, \quad (1)$$

де  $M_{El}(f)$  – модуляційна передатна функція (МПФ) електронної системи.

Аналогічний підхід було використано для визначення геометричної шумової смуги пропускання GNBW (Geometrical Noise Bandwidth) [5]

$$GB = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_s^2(v_x, v_y) dv_x dv_y, \quad (2)$$

де  $M_s(v_x, v_y)$  – МПФ ОЕСС.

У формулі (2) права частина визначає об'єм фігури, який обмежений поверх-

нею  $M_s^2(v_x, v_y)$ , а ліва частина – об’єм паралелепіпеда, який має основу площею  $GB$  і висоту, що дорівнює одиниці. Такий підхід використовується у телебаченні, як критерій Шаде, для визначення роздільної здатності [4].

Для одномірного випадку шумова  $GB$  смуга визначається як

$$GB = 2v_{res} = \int_{-\infty}^{\infty} M_s^2(v_x) dv_x. \quad (3)$$

Звідси роздільна здатність ОЕСС

$$v_{res} = \int_0^{\infty} M_s^2(v_x) dv_x. \quad (4)$$

Таким чином, для збільшення просторової роздільної здатності необхідно збільшувати інтеграл (4), тобто “розширювати” МПФ ОЕСС.

### **Модуляційна передатна функція ОЕСС**

При моделюванні ОЕСС поняття МПФ може застосовуватися лише для лінійних інваріантних систем. При невеликих контрастах яскравості у межах обмеженого поля зору ОЕСС можна вважати лінійними інваріантними системами [6]. При цьому вважається, що об’єкт і фон випромінюють некогерентно, а кожний елемент узагальненої схеми ОЕСС має власну МПФ. Тоді результуюча МПФ усієї ОЕСС визначається добутком МПФ її окремих елементів: об’єктива, ПВ, електронного блоку та дисплея. Для одномірного випадку вздовж осі  $x$ , яка співпадає з напрямком сканування, МПФ ОЕСС визначається як [4, 6]

$$M_s(v_x) = M_o(v_x) \cdot M_D(v_x, f) \cdot M_{El}(f) \cdot M_S(v_x), \quad (5)$$

де  $M_o, M_D, M_{El}, M_S$  – МПФ об’єктива, ПВ, електронного блоку, дисплея відповідно.

Досвід проектування ОЕСС свідчить про те, що якість зображення в таких системах визначається, перш за все, МПФ об’єктива й ПВ [4]. Це означає, що у виразі (5) МПФ електронного блоку та дисплея дорівнюють одиниці. Тоді

$$M_s(v_x) = M_o(v_x) \cdot M_{Ds}(v_x) \cdot M_{Dt}(f), \quad (6)$$

де  $M_{Ds}, M_{Dt}$  – просторова і часова МПФ ПВ відповідно.

Для апроксимації МПФ сучасних об’єктивів використовують лінійне наближення [2]

$$M_o(v_x) = 1 - \left( \frac{1 - M_{o1}}{v_{x1}} \right) v_x, \quad (7)$$

де  $v_{x1}$  – просторова частота, яка відповідає зменшенню МПФ об’єктива до величини  $M_{o1}$ . При цьому просторова частота змінюється в межах  $0 \leq v_x \leq v_{xo} = v_{x1} / (1 - M_{o1})$ .

Просторова частота  $v_{xo}$  відповідає нульовому контрасту в зображенні, що формує об’єктив. Для дифракційно обмеженого об’єктива вона дорівнює [5]

$$v_{xo} = \frac{D_p}{1,218 \cdot \lambda \cdot f'_o}, \quad (8)$$

де  $D_p$  і  $f'_o$  – діаметр вхідної зіниці та фокусна відстань об'єктива відповідно;  $\lambda$  – середня довжина хвилі.

Просторова МПФ ПВ  $M_{Ds}(v_x)$  визначається розмірами чутливої площадки пікселя  $V_D \times W_D$ . Для одномірного випадку маємо:

$$M_{Ds}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \quad (9)$$

При цьому слід зауважити, що ОЕСС працюють в області просторових частот  $0 \leq v_x \leq v_{xD} = 1/V_D$ . На практиці завжди виконується умова  $v_{xD} < v_{xo}$ .

Часова МПФ ПВ  $M_{Dt}(f)$  залежить від інерційності ПВ (постійної часу  $t_D$ ). Якщо час формування одного елемента зображення  $t_o \gg t_D$ , що справедливо для фотонних ПВ, то  $M_{Dt}(f) \approx 1$ .

Тоді результуюча МПФ ОЕСС визначається функцією

$$M_s(v_x) = \left(1 - \frac{v_x}{v_{xo}}\right) \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \quad (10)$$

На рис. 1 представлено графіки функцій (7), (9) і (10).

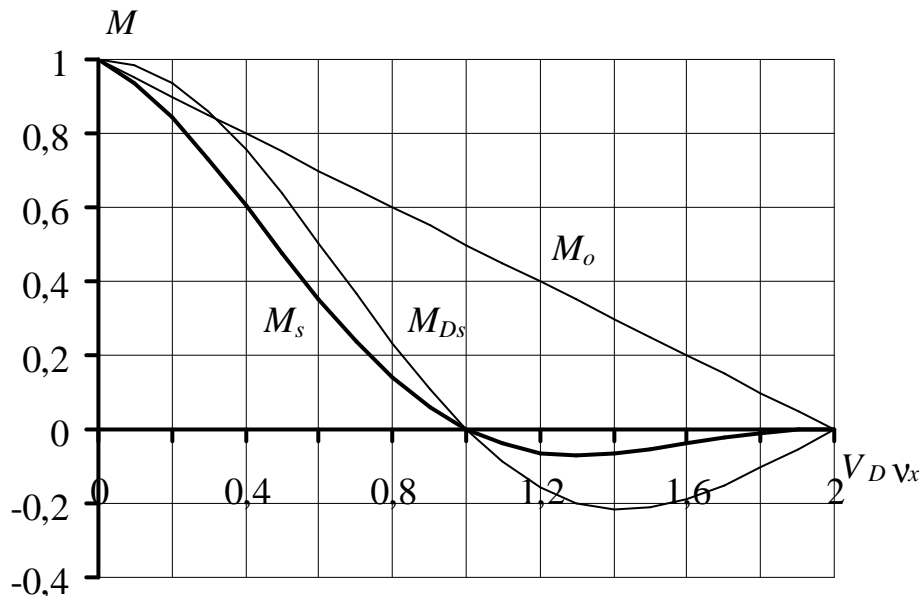


Рисунок 1 – Модуляційні передатні функції об'єктива  $M_o$ , ПВ  $M_{Ds}$  і ОЕСС  $M_s$ , коли  $v_{xo} = 2v_{xD}$

### Роздільна здатність ОЕСС

Визначимо роздільну здатність ОЕСС, МПФ якої описується функцією (10). Після підстановки (10) в (4) маємо

$$v_{res} = \int_0^{v_{xD}} \left(1 - \frac{v_x}{v_{xo}}\right)^2 \frac{\sin^2(\pi V_D v_x)}{(\pi V_D v_x)^2} dv_x = I_1 + I_2 + I_3. \quad (11)$$

Для розрахунку першого інтегралу скористаємося методом числового інтегрування

$$I_1 = \int_0^{v_{xD}} \frac{\sin^2(\pi V_D v_x)}{(\pi V_D v_x)^2} dv_x = \frac{1}{\pi V_D} \int_0^{\pi} \frac{\sin^2 x}{x^2} dx = \frac{0,427}{V_D}.$$

Для розрахунку другого інтегралу скористаємося табличним інтегралом 1.5.41.16 [7], який для визначеного інтегралу має вигляд

$$\int_0^z \frac{\sin^2 x}{x} dx = \frac{1}{2} [\ln z - Ci(2z)],$$

де  $Ci(\ )$  – інтегральний косинус;  $x = \pi V_D v_x$ . Тоді

$$\begin{aligned} I_2 &= -\frac{2}{v_{xo} \pi V_D} \int_0^{v_{xD}} \frac{\sin^2(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x} dv_x = -\frac{2}{v_{xo} (\pi V_D)^2} \int_0^{\pi} \frac{\sin^2 x}{x} dx = \\ &= -\frac{2}{v_{xo} (\pi V_D)^2} \frac{1}{2} [\ln \pi - Ci(2\pi)] = -\frac{1,36}{v_{xo} (\pi V_D)^2}. \end{aligned}$$

Для розрахунку третього інтегралу скористаємося табличним інтегралом 1.5.2.8 [7]

$$\int \sin^2 x dx = -\frac{1}{4} \sin 2x + \frac{1}{2} x,$$

де  $x = \pi V_D v_x$ . Тоді

$$I_3 = \frac{1}{(\pi v_{xo} V_D)^2} \int_0^{v_{xD}} \sin^2(\pi V_D v_x) dv_x = \frac{1}{v_{xo}^2 (\pi V_D)^3} \int_0^{\pi} \sin^2 x dx = \frac{1}{2\pi^2 v_{xo}^2 V_D^3}.$$

Після підстановки цих інтегралів в (11) отримаємо формулу для розрахунку роздільної здатності ОЕСС

$$V_{res} = \frac{0,427}{V_D} - \frac{1,36}{(\pi V_D)^2 v_{xo}} + \frac{1}{2\pi^2 V_D^3 v_{xo}^2} = \frac{0,427 v_{xD}}{\pi} - \frac{1,36 v_{xD}^2}{\pi^2 v_{xo}} + \frac{1}{2\pi^2} \frac{v_{xD}^3}{v_{xo}^2}. \quad (12)$$

Проаналізуємо функцію (12).

На рис. 2 представлено графік залежності роздільної здатності ОЕСС від розміру пікселя ПВ.

При дослідженні цієї залежності враховувалась умова  $v_{xD} \leq v_{xo}$ , або

$$V_D = \frac{1}{v_{xD}} \geq \frac{1}{v_{xo}} = \frac{1 - M_{ol}}{v_{x1}}. \quad (13)$$

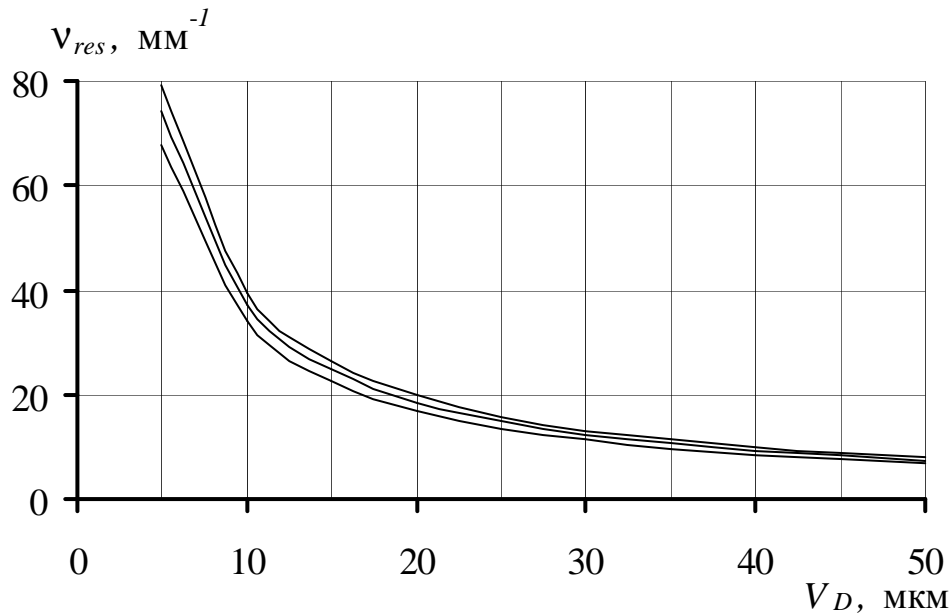
Із аналізу функції (12) та її графіків маємо, що:

1. Із зменшенням розміру пікселя ПВ роздільна здатність ОЕСС завжди збільшується, коли виконується умова (13).

2. Якщо  $v_{xo} \gg v_{xD}$ , тобто об'єktiv має кружок розсіювання, діаметр якого значно менший за розмір пікселя, то  $v_{res} \approx 0,427/V_D$ . Таке розділення відповідає частоті Найквіста  $\nu_N = 1/2V_D$ , що свідчить про достовірність запропонованої моделі формування зображення.

3. Якщо в ОЕСС використовується об'єktiv з великими аберациями ( $v_{xo} = v_{xD}$ ), то  $v_{res} \approx 0,339/V_D$ . Це свідчить про те, що використання простих

об'єктивів, для яких  $v_{xo} = v_{xD}$ , призводить до зменшення просторої роздільної здатності лише на 20% порівняно з використанням високоякісних об'єктивів.



$$1 - v_{xo} = v_{xD}; 2 - v_{xo} = 2v_{xD}; 3 - v_{xo} = 4v_{xD}$$

Рисунок 2 – Залежність роздільної здатності ОЕСС  $v_{res}$  від розміру чутливого елемента ПВ  $V_D$

### Висновки

1. Використання геометричної шумової смуги пропускання для дослідження ОЕСС дозволяє об'єктивно визначити просторову роздільну здатність, або оцінити якість зображення, що формує система.

2. Підвищення просторової роздільної здатності ОЕСС досягається узгодженням аберацій об'єктива з розміром пікселя ПВ.

3. На основі геометричної шумової смуги отримано загальну формулу (12) для розрахунку просторової роздільної здатності ОЕСС, аналіз якої показав, що:

3.1. При використанні високоякісних об'єктивів, коли  $v_{xo} \gg v_{xD}$ , роздільна здатність системи  $v_{res} \approx 0,427/V_D$ .

3.2. При використанні об'єктивів з великими абераціями, коли  $v_{xo} = v_{xD}$ , роздільна здатність системи  $v_{res} \approx 0,339/V_D$ , тобто якість зображення при цьому погіршується на 20% порівняно з п. 3.1.

4. Надалі видається доцільним при узгодженні параметрів об'єктива і ПВ враховувати їх вартість та габарити.

### Література

1. Орлов В.А., Петров В.И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. – М.: Воениздат, 1989. – 212 с.
2. Колобродов В.Г. О пространственном разрешении космических ИК-систем дистанционного зондирования Земли // Космична наука і технологія. – 1997. – Т.3. – №5–6. – С. 55– 59.

3. Грязин Г.Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства: Системы телевидения. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 417 с.
5. Колобродов В.Г., Шустер Н. Геометрична шумова смуга пропускання – новий критерій для визначення роздільної здатності оптичних та оптико-електронних приладів // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2003. - №2. – С. 97 – 101.
6. Колобродов В.Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування): Підручник для вузів. – К.: Тираж. – 1999. – 340 с.
7. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Элементарные функции. – М.: Наука, 1981. – 798 с.

<p>Демченко Л.И., Колобродов В.Г., Стефанович В.Т., Грандаш М.М. <b>Повышение разрешающей способности тепловизионных и телевизионных систем.</b></p> <p>Предложено определять пространственную разрешающую способность оптико-электронных систем наблюдения новым параметром – геометрической шумовой полосой пропускания. Повышение разрешающей способности тепловизионных и телевизионных систем достигается путём согласования модуляционных передаточных функций объектива и приемника излучения.</p>	<p>Demchenko L.I., Kolobrodov V.G., Stefanovich V.T., Trandash M.M. <b>Increase of resolution thermovision and television systems.</b></p> <p>It is offered to determine spatial resolution of the observation optic-electronic systems in new parameter - geometrical noise bandwidth. Increase of resolution thermovision and television systems is achieved by the coordination modulation transfer functions of the objective and the detector.</p>
---	---

*Надійшло до редакції  
16 січня 2006 року*

## **КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.923

### **ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Сидорко В.И., Филатов А.Ю., Филатов Ю.Д., Поперенко Л.В., Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, г. Киев, Украина*

*Показано, что в процессе обработки оптические постоянные обрабатываемого материала, состояние его поверхности и рабочего слоя инструмента изменяются периодически*

#### **Вступлення. Постановка проблеми**

Качество полированных поверхностей деталей из неметаллических материалов (НМ) в промышленных условиях традиционно оценивается методами профилометрии или рефлектометрии.

Экспериментальные исследования изменений в поверхностном слое НМ можно осуществить непосредственно в процессе их механической обработки путем контроля эллипсометрических параметров отраженного от них света [1-4].