

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.038>  
УДК 543.423:621.383.72

С.А. Єгоров<sup>1</sup>, В.І. Луценко<sup>1,2</sup>,  
А.Д. Єгоров<sup>1</sup>, В.А. Єгоров<sup>1</sup>, І.Є. Сінельников<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070, Україна

<sup>3</sup> Інститут астрономії Харківського національного  
університету імені В.Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна  
E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua; sergyegorov2012@gmail.com;  
vladislavlutsenko@ukr.net

## СУБПІКСЕЛЬНЕ СКАНУВАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ СПЕКТРА

**Предмет і мета роботи** — розробка алгоритму підвищення роздільної здатності при реєстрації зображень атомно-емісійних спектрів багатоелементними детекторами за рахунок багатократної експозиції зі зсувом зображень на дробову частину пікселя.

**Методи та методологія.** Для досягнення поставленої мети використовувалися методи математичного моделювання в координатному представленні з урахуванням апіорної інформації. Результати моделювання було підтверджено експериментальними даними.

**Результати.** Висвітлено важливість роздільної здатності систем реєстрації зображень і її вплив на якість отриманих результатів. У спектральному представленні зроблено відносні оцінки інформативності багатоелементних детекторів з регулярною структурою (матричних або лінійних) у порівнянні з нерегулярними структурами, такими як фотографічні емульсії. Зазначено, що зменшення розмірів пікселів є технологічно складним, тому пропонується використовувати альтернативний підхід — субпіксельний зсув зображень для підвищення роздільної здатності. На відміну від техніки, яка зазвичай реалізується в частотному представленні, задача зводиться до розв'язання перевизначеної системи лінійних рівнянь. Запропоновано алгоритм розв'язання одержаної системи рівнянь методом найменших квадратів з використанням специфіки апіорних даних, що враховує відокремленість спектральних ліній і плавний хід фону в проміжках між ними. Наводяться результати, що ілюструють дію цього алгоритму для випадків цифрового моделювання та реального експерименту при атомно-емісійному спектральному аналізі. Експериментальне дослідження виконано для одновимірних зображень спектра, які зареєстровано лінійними приладами з зарядовим зв'язком (ПЗЗ-фотоприймачами), отримано розділення, що в два рази перевищує просторове розділення фотоприймача.

Цитування: Єгоров С.А., Луценко В.І., Єгоров А.Д., Єгоров В.А., Сінельников І.Є. Субпіксельне сканування для аналізу зображень спектра. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2024. Т. 29, № 1. С. 38–45. <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.038>

Citation: Yegorov, S.A., Lutsenko, V.I., Yegorov, A.D., Yegorov, V.A., Sinelnikov, I.E., 2024. Subpixel scanning for spectrum image analysis. *Radio Phys. Radio Astron.*, 29(1), pp. 38–45. <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.038>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

**Висновки.** Показано, що у випадках контрольованого зміщення зображення можна не тільки підвищити точність фотометрування, але й одержати суттєвий вииграш у роздільній здатності детектора. Загальні результати порівняння теорії з експериментальними даними свідчать про прийнятність запропонованої методики для практичного застосування в атомно-емісійному аналізі.

**Ключові слова:** обробка зображень, реєстрація зображення зі зсувом, багатоелементні сенсори, спектральний аналіз, метод найменших квадратів, субпіксельне розділення.

## Вступ

Важливим параметром майже будь-якої оптичної системи реєстрації зображення є її роздільна здатність, яка визначається, в основному, роздільною здатністю оптики та системи реєстрації.

Відгук оптичної системи на  $\delta$ -подібний вхідний сигнал, що для оптичного приладу є точковим джерелом, визначає її апаратну функцію й роздільну здатність [1, 2]. Для оптичних систем фундаментальним обмеженням роздільної здатності є дифракція на вхідній апертурі, крім того, існують аберації зображень, що пов'язані з недосконалістю оптичних систем. Просторова роздільна здатність реєстраторів зазвичай узгоджується з оптичною, але в деяких випадках, у зв'язку з різного роду технічними та технологічними причинами, не може повністю реалізувати можливості оптики. Так, розмір пікселів лінійних приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), що використовуються в спектрометрії, складає від 7 до 25 мкм, разом з тим дифракційний розмір зображення точкового джерела визначається світлосилою оптики та для світлосили, рівної одиниці, наближається до довжини світлової хвилі [3], а саме 0.4...0.7 мкм у видимій області й аж до 0.2 мкм в ультрафіолетовій. Постійний прогрес у напівпровідникових технологіях частково вирішує проблему, але зі зменшенням розміру пікселя погіршуються інші параметри фотоприймачів, такі як спектральні характеристики, чутливість, рівень шумів і динамічний діапазон. Тому необхідно розглядати інші способи вирішення цієї проблеми.

Одним з таких способів є застосування субпіксельного зсуву зображення відносно детектора, як показано в даній статті. Подібні технології використовуються для підвищення роздільної здатності відеокамер, особливо інфрачервоних, що значно поступаються за кількістю пікселів стандартним відеосенсорам [4, 5], але вони не враховують особливості одновимірних зображень спектрів, що розглядаються в даній роботі.

## 1. Математичне моделювання

У разі реєстрації багатоелементними сенсорами рухомого зображення у випадку дистанційної зйомки з рухомих платформ (як-то літаки, ракети та супутники) з'являється можливість отримати зображення зі зсувом на частину пікселя [6–9]. У разі використання оптики з більшою роздільною здатністю, ніж доступні детектори, виникає можливість збільшити роздільну здатність отриманого зображення, базуючись на двох зображеннях  $F$  (First Image) та  $S$  (Second Image), і реконструювати зображення, яке було б отримано при реєстрації сенсором з подвоєною кількістю пікселів. Але в такому випадку треба вирішувати проблему неповноти даних, що не вирішується прямим пошуком розв'язання системи рівнянь.

Така ж можливість виникає в разі зсуву зображення по сенсору внаслідок керованих маніпуляцій з оптичною системою реєстратора чи в разі реєстрації того самого зображення двома незалежними багатоелементними сенсорами.

Одним з найбільш поширених методів підвищення роздільної здатності багатоелементних детекторів є використання відновлювального фільтра, що підкреслює верхні просторові частоти. Ефективність використання такого фільтра пропорційна відношенню сигнал/шум у смузі частот відеосигналу, й ділянки, де передавальна функція фотоприймача наближається до нуля, не можуть бути відновлені.

Як приклад можна розглянути одновимірний багатоелементний фотоприймач з геометричними розмірами пікселів, що дорівнюють  $w$ . Імпульсна характеристика одного елемента такого сенсора в координатній площині може бути зображена у вигляді прямокутного імпульсу. Модуль перетворення Фур'є від імпульсу з прямокутними фронтами є функція  $|\sin(\pi wk)/(\pi wk)|$ , де  $k$  — відносна просторова частота. Достатньо великий рівень високочастотних складових просторових частот у цій функції свідчить про можливість застосування фільтрації, але суттєвим її недоліком

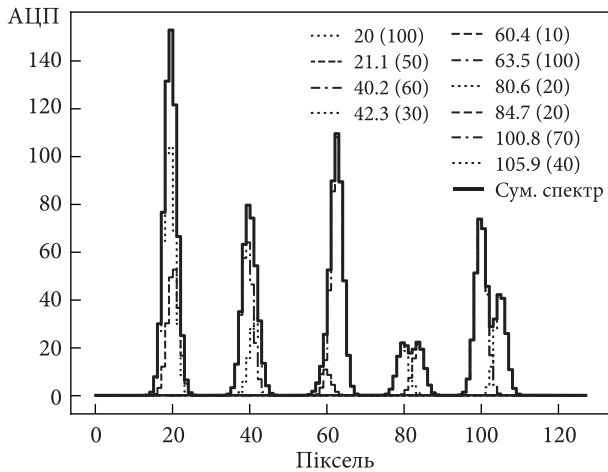


Рис. 1. Сумарний спектр  $O_i$  (суцільна лінія), що складається з окремих гаусіан (переривчасті лінії)

є наявність глибоких провалів на деяких просторових частотах, що є наслідком періодичної структури сенсора. Особливо негативно це впливає на реєстрацію одновимірних зображень, коли оптичне розділення наближається до розміру пікселя [10, 11].

У атомно-емісійному спектральному аналізі реєструється зображення спектра, що складається з нерегулярної послідовності атомних спектральних ліній на безперервному фоні. Фон визначається неселективним випромінюванням і шумами фотодетектора, що мають білий безперервний спектр. Форма спектральних ліній визначається апаратною функцією спектрального приладу й зі збільшенням розділення наближається до  $\delta$ -функції, спектр якої займає широку смугу, але спадає у високочастотній області. Таким чином, при розгляді в спектральній області співвідношення сигнал/шум погіршується, що привело нас до рішення розглянути задачу в координатному представленні.

Алгоритм розв'язання цієї задачі було запропоновано нами в [11]. Він базується на методі найменших квадратів із застосуванням матричного підходу до розв'язання перевизначених систем лінійних рівнянь [12]. Такий метод дає змогу знайти розв'язок системи не тільки при цифровому моделюванні за відсутності шумів, як це зроблено в роботі [6], але й при зашумлених експериментальних даних при реальних вимірюваннях [11].

Для розгляду цієї спектрометричної задачі у випадку, коли роздільна здатність подвоюється

ся, тобто  $N = 2$ , було застосовано модельний цифровий експеримент, суть якого зрозуміла з наступного спрощеного розгляду. Генерується спектральний сигнал  $O_i$ , який є сумою гаусіан з різними амплітудами та координатами, зображений на рис. 1.

З цього сумарного спектра формуються два спектри з великими (подвоєної ширини) пікселями, тобто з у два рази нижчою роздільною здатністю та зміщені на половину ширини один відносно іншого. Для цього масиви формуються як

$$F = \begin{bmatrix} O_1 + O_2 \\ O_3 + O_4 \\ O_5 + O_6 \\ \dots \\ O_{127} + O_{128} \end{bmatrix} \text{ та } S = \begin{bmatrix} O_2 + O_3 \\ O_4 + O_5 \\ O_6 + O_7 \\ \dots \\ O_{128} + O_{129} \end{bmatrix},$$

де  $O_i$  — сигнал з у два рази більшою роздільною здатністю, ніж спектри  $F_i$  і  $S_i$ .

Ці два спектри моделюють експериментальний матеріал, одержаний двома послідовними експозиціями із застосуванням зміщення на половину пікселя, як зображено на рис. 2.

У нашому випадку необхідно знайти масив подвоєної довжини, що буде відповідати фотореєстратору з подвоєною роздільною здатністю, і при відсутності шумів він повинен збігтися з початковим масивом даних, зображеним на рис. 1 суцільною лінією. Завдання полягає в розв'язанні системи лінійних рівнянь:

$$A \cdot \vec{X} = \vec{B}, \tag{1}$$

де  $\vec{B}$  — вектор з результатами вимірювань;  $\vec{X}$  — шуканий вектор;

$$A = \begin{bmatrix} 110\dots000 \\ 011\dots000 \\ \dots \\ \dots \\ 000\dots110 \\ 000\dots011 \end{bmatrix}.$$

Вектор  $\vec{B}$  складається з парних і непарних компонент, що відповідають двом експозиціям зі зсувом на половину ширини пікселя. Якщо необхідно отримати більше розділення, зростає

кількість вимірювань  $N$  у межах одного пікселя, а зсув відбувається на менший крок. Відповідно зростає кількість компонентів у векторі  $\vec{B}$  і матриці  $A$ .

Зауважимо, що в системі (1) кількість рівнянь завжди на одиницю менше, ніж кількість невідомих, тому навіть при відсутності шуму вона є невизначеною. Регуляризація в такому випадку можлива за рахунок апріорних даних, які виходять з характеру зображень спектра. Спектр являє собою нерівномірно розподілені піки на більш-менш рівномірному шумовому фоні, як це можна бачити на спектрі заліза на рис. 3.

Використаємо як апріорні дані те, що фон між спектральними лініями порівняно гладкий і може бути інтерпольований з достатньою точністю. Наявність таких ділянок є обмежувальним фактором у використанні цього алгоритму. Таким чином спектр можна розбити на окремі ділянки, що починаються й закінчуються фоном. Це, по-перше, суттєво скорочує обсяг обчислень, а по-друге, маючи значення функції по обидві сторони інтервалу, можна перейти до перевизначеної системи з матрицею

$$M = \begin{pmatrix} 100\dots000 \\ 110\dots000 \\ 011\dots000 \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ 000\dots110 \\ 000\dots011 \\ 000\dots001 \end{pmatrix} \quad (2)$$

та матрицею  $B$ , яку сформовано з величини фону на початку інтервалу  $U_{beg}$  і наприкінці інтервалу  $U_{end}$ , та значень двох спектрів меншої роздільної здатності  $F_i$  і  $S_i$ :

$$B = \begin{pmatrix} U_{beg} \\ F_1 \\ S_1 \\ \dots \\ F_{64} \\ S_{64} \\ U_{end} \end{pmatrix}.$$

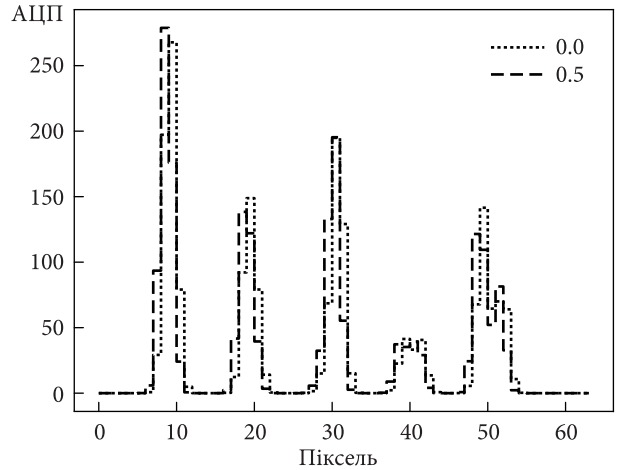


Рис. 2. Вигляд згенерованих сигналів  $F_i$  і  $S_i$

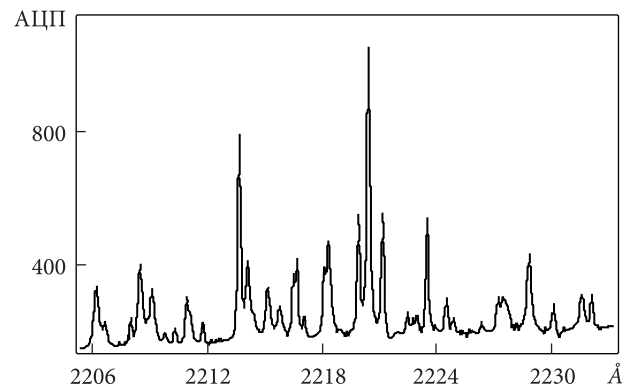


Рис. 3. Результат вимірювання атомно-емісійного спектра заліза лінійним ПЗЗ-фотоприймачем (вісь  $x$  — довжина хвилі в ангстремах, вісь  $y$  — відліки АЦП)

У разі присутності шумів і кількості рівнянь, що перевищує кількість невідомих, доцільно скористатися методом найменших квадратів. У цьому випадку завдання зводиться до розв'язання системи [11]:

$$M^T \cdot M \cdot \vec{X} = M^T \cdot \vec{B}, \quad (3)$$

де  $\vec{B}$  — вектор-стовпчик, сформований з елементів вхідних векторів згідно з методикою, описаною раніше.

Таким чином, результат реконструкції можна здобути, виконавши наступну послідовність обчислювань:

$$\vec{X} = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T \cdot \vec{B}. \quad (4)$$

Найбільш затратною операцією при розв'язанні рівняння (4) є добуток зворотної матриці разом з двома матричними множеннями. Для прискорення її виконання вираз  $(M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T$

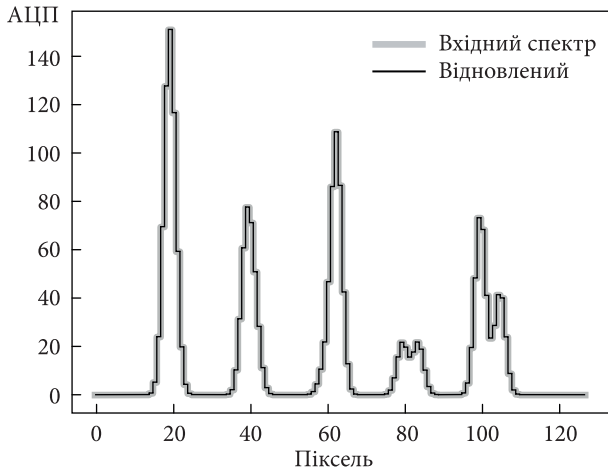


Рис. 4. Вхідний спектр, з якого були отримані заміти (з погіршеною роздільною здатністю) спектри довжиною 129 пікселів (сіра лінія), та відновлений спектр довжиною 128 пікселів (чорна лінія)

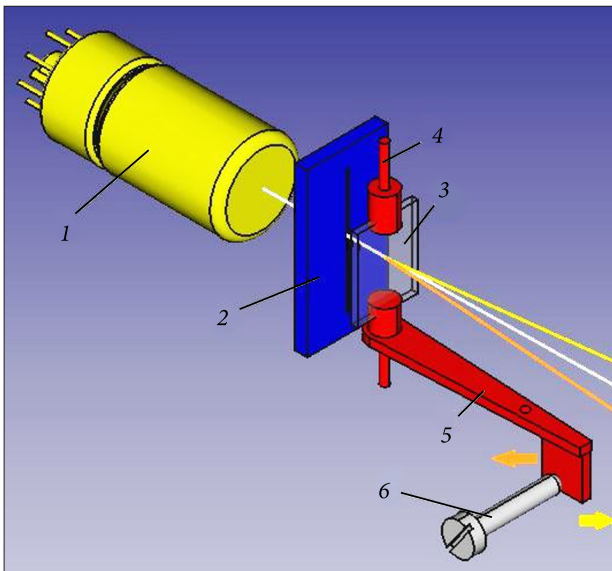


Рис. 5. Схема модифікованої щілини спектрографа з контрольованим зсувом: 1 — спектральна лампа ТМН; 2 — вхідна щілина; 3 — кварцова пластина; 4 — вісь пластини; 5 — плече осі; 6 — штовхаючий гвинт

може бути обчисленим заздалегідь. До того ж об'єми обчислень системи (3) значно скорочуються, якщо відновлюваний інтервал розбити на ділянки, що починаються й закінчуються фоновими відліками. Відліки, віддалені від  $V_i$ , майже не впливають на  $X_i$ , як і шумова компонента вектора  $\vec{V}$ .

Результат реконструкції наведеного прикладу можна побачити на рис. 4.

Якщо відняти початковий сигнал від отриманого із застосуванням запропонованого алгоритму, то середньоквадратична похибка дорівнює (для цього сигналу)  $1.2 \cdot 10^{-11}$ , що, найімовірніше, є наслідком обмеженої точності обчислення. Отже, показано, що застосування запропонованого алгоритму за відсутності шумів повністю відновлює змодельований початковий сигнал.

На практиці при вимірюваннях у реальних умовах завжди є якась невизначеність апріорних даних і шумова компонента, що спотворюють кінцевий результат і обмежують отриману точність.

## 2. Експериментальна перевірка методики

У стаціонарних умовах при незмінності передавальної характеристики між експозиціями та малому рівні шумів запропонований алгоритм дозволяє отримати прийнятну точність. Але на практиці такі умови не завжди можуть бути реалізовані, це може призводити до осцилюючих рішень для вектора  $\vec{X}$ , як це описано в [13], де також викладено деякі засоби згладжування, що забезпечують придушення осциляцій.

Для експериментальної перевірки запропонованого алгоритму було створено експериментальну установку, що базувалася на спектрометрі видимого діапазону ІСП-51, лінійного ПЗЗ-фотоприймача ІLX511 (SONY) з пікселем  $14 \times 200$  мкм. Відносний отвір спектрометра складає 1:5.5, що на довжині хвилі 0.5 мкм дозволяє отримати дифракційне зображення розміром 6.6 мкм, це майже вдвічі менше розміру пікселя фотоприймача.

Для апаратної реалізації послідовного варіанту [11] експериментальної апробації алгоритму реконструкції спектрометр було дещо модифіковано (рис. 5).

Зсув зображення спектра спектральної лампи ТМН 1 виконувався шляхом повороту плоскопаралельної пластини 3, розташованої за вхідною щілиною 2 та закріпленої на осі 4, яка поверталася плечем 5, що приводилось у рух мікрометричним гвинтом 6.

Товщина плоскопаралельної пластини складала близько 2 мм, а коефіцієнт рефракції 1.55, що при її повороті з кроком близько до  $4 \cdot 10^{-3}$  радіанів забезпечило зміщення спектра з кроком

у 1/10 пікселя. У подальшому надлишкові дані нормувалися і згладжувалися, після чого лінійною інтерполяцією було отримано усереднені дані з кроком у половину пікселя. Як джерело випромінювання використовувалась газорозрядна лампа з порожнистим катодом, що забезпечує стабільний світловий потік.

Зазвичай при реальних вимірюваннях інтенсивність таких джерел випромінювання як дуга значно більше, ніж лампи з порожнистим катодом, що дозволяє отримати бажану точність при експозиціях менше, ніж 0.1 с, але у зв'язку з відносно повільними процесами розігріву й випаровування зразка потрібний час вимірювання доводиться збільшувати до декількох хвилин. Тому зазвичай виконують серію з  $N$  однакових експозицій. Пропонується робити кожен з  $N$  експозицій з контрольованим субпіксельним зсувом спектра відносно фотоприймача, що дозволить не тільки одержати повне оптичне розділення спектрометра, але й значно підвищити точність вимірювання.

Справа в тому, що повторення вимірювань без зсуву зображень спектра збільшує тільки точність вимірювань в тих самих точках спектра, а в нашому випадку додатково збільшується ще й кількість точок відліку на спектральній координаті. А збільшення кількості точок спектральної залежності більш детально передає її форму. Ця додаткова можливість є безумовною перевагою в порівнянні з фотометричною точністю, що досягається простим повторенням вимірювань без зсуву спектра відносно детектора.

На рис. 6 наведено зображення подвійної спектральної лінії лампи ТМН, отримані зі зсувом у 0.5 пікселя, а на рис. 7 — той же фрагмент з подвоєним розділенням в результаті дії описаного алгоритму.

Наведені експериментальні дані наочно підтверджують можливість застосування запропонованої методики субпіксельного розділення при реєстрації спектрів. Отриманий результат дозволив розділити двокомпонентну лінію, що не могла бути розділена сенсором, використаним в експерименті. Це відкриває можливості підвищення роздільної просторової здатності наявних реєстраторів і суттєвого зменшення шкідливих фазових ефектів, що виникають при реєстрації спектрів, які досліджувалися в роботі [13].

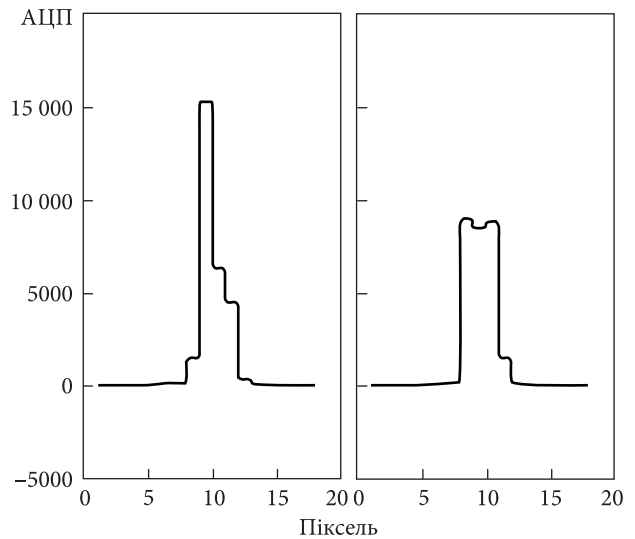


Рис. 6. Два зображення подвійної лінії лампи ТМН, що мають зсув приблизно 0.5 пікселя

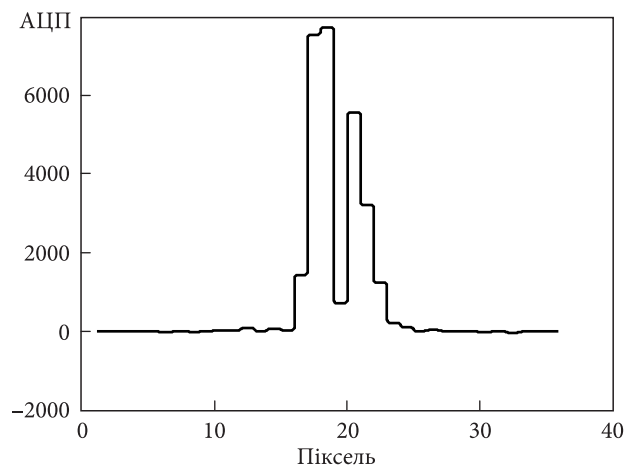


Рис. 7. Реконструйоване зображення подвійної лінії лампи ТМН

Розглянута в даній статті методика збільшення роздільної здатності детектора принципово відрізняється від методів вінерівської фільтрації та частотної інтерполяції, що застосовуються для покращення й реставрації зображень, які представлено в [13]. У деякій мірі збільшення роздільної здатності детектора «покращує» читабельність спектрів при ідентифікації спектральних ліній, полегшує контроль стабільності параметрів апаратури з часом і при коливаннях температури та з дією інших зовнішніх чинників. Але основним завданням атомно-емісійного аналізу вважається не краса спектра, а одержання кількісних характеристик процентного складу

досліджуваного зразка. Тому наведені в публікації [13] Б. Фріденом інтуїтивні методи реставрації, згладжування та фільтрації можуть привести до зворотного результату, якщо говорити про точність аналізу. Особливо це може бути відчутно при малих співвідношеннях сигнал/шум. Зазвичай для боротьби з шумом у нормальних умовах експерименту застосовують метод найменших квадратів. Для нашого конкретного випадку його описано в попередньому розділі в матричному варіанті.

Найбільш прийнятним методом для оцінки параметрів спектра, основними з яких є амплітуда і фаза, є метод максимальної правдоподібності Р. Фішера, викладений, для випадку реєстрації спектральних ліній багатоелементними сенсорами, у [14].

## Висновки

1. Запропонована методика підвищення роздільної здатності багатоелементних фотоприймачів при вимірюванні спектрів дозволяє реалізувати

повне оптичне розділення спектрометра. Але підвищення роздільної здатності за рахунок субпиксельного сканування з одного боку потребує збільшення кількості вимірювань, а з іншого суттєво залежить від співвідношення сигнал/шум зі зростанням просторової частоти сигналу.

2. Створено експериментальну установку на базі серійного спектрометра для перевірки запропонованої методики. Відносно нескладне удосконалення, що забезпечило мікрометричний зсув зображення, дозволило подвоїти просторову роздільну здатність системи з 14 до 7 мкм.

Збільшення роздільної здатності детектора сприяє створенню більш адекватного методичного забезпечення, полегшує контроль стабільності оптико-механічної частини спектрометра, що, в підсумку, зменшує випадкову та, головне, систематичну помилку вимірювань.

Подальші роботи в цьому напрямку буде спрямовано на дослідження впливу на запропонований алгоритм шумів і похибок апріорних даних і методик визначення їхніх коректних значень.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Юу Ф.Т.С. *Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию*. Москва: Сов. радио, 1979. 304 с.
2. Пейсахсон И.В. *Оптика спектральных приборов*. Изд. 2-е, перераб. Ленинград: Машиностроение, 1975. 312 с.
3. Максудов Д.Д. *Астрономическая оптика*. Ленинград: Наука, 1979. 395 с.
4. Zhang X.F., Huang W., Xu M. F., Jia S. Q., Xu X. R., Li F. B., Zheng Y. D. Super-resolution imaging for infrared micro-scanning optical system. *Opt. Express*. 2019. Vol. 27, Iss. 5. P. 7719–7737. DOI: 10.1364/OE.27.007719
5. Chen J., Li Y., Cao L. Research on region selection super resolution restoration algorithm based on infrared micro-scanning optical imaging model. *Sci Rep*. 2021. Vol. 11, 2852. DOI: 10.1038/s41598-021-82119-1
6. Блажевич С.И., Винтаев В.Н., Ушаков Н.Н. Синтез космического изображения с улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. № 7. Вып. 2. С. 9–13.
7. Peleg S., Keren D., Schweitzer L. Improving image resolution using subpixel motion. *Pattern Recognit. Lett.* 1987. Vol. 5, Iss. 3. P. 223–226.
8. Gross D. *Super-resolution from subpixel shifted pictures*. Master's thesis. Tel Aviv University, 1986.
9. Блажевич С.В., Селютин Е.С. Повышение разрешения цифрового изображения с использованием субпиксельного сканирования. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика*. 2014. № 5. С. 186–190.
10. Шелпакова И.Р., Гаранин В.Г., Чанышева Т.А. Аналитические возможности многоканального анализатора эмиссионных спектров (МАЭС) в спектральном анализе. *Аналитика и контроль*. 1998. № 1(3). С. 36.
11. Yegorov A., Yegorov V., Yegorov S. Subpixel Detection of Spectrum Images by Photodiode Structures. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009. Т. 14, № 1. С. 77–83.
12. Ланцош К. *Практические методы прикладного анализа*. Москва: Физматлит, 1961. 171 с.
13. Фриден Б.Р. *Улучшение и восстановление изображения. Обработка изображений и цифровая фильтрация*. Под ред. Т.С. Хуанга. Пер. с англ. Москва: Мир, 1979. 199 с.
14. Косарев Е.Л. *Методы обработки экспериментальных данных*. Москва: Физматлит, 2008. 207 с.

Стаття надійшла 21.06.2023

## REFERENCES

1. Yuu, F.T.S., 1979. *Introduction to the theory of diffraction, information processing and holography*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
2. Peisakhson, I.V., 1975. *Optics of spectral instruments*. 2nd ed. Leningrad: Mashinostroenie Publ. (in Russian).
3. Maksutov, D.D., 1979. *Astronomical optics*. Leningrad: Nauka Publ. (in Russian).
4. Zhang, X.F., Huang, W., Xu, M.F., Jia, S.Q., Xu, X.R., Li, F.B., Zheng, Y.D., 2019. Super-resolution imaging for infrared micro-scanning optical system. *Opt. Express*, **27**(5), pp. 7719–7737. DOI: 10.1364/OE.27.007719
5. Chen, J., Li, Y., Cao, L., 2021. Research on region selection super resolution restoration algorithm based on infrared micro-scanning optical imaging model. *Sci Rep.*, **11**, 2852. DOI: 10.1038/s41598-021-82119-1
6. Blazhevich, S.V., Vintaev, V.N., Ushakova, N.N., 2010. Image synthesis with enhanced resolution on the basis of subpixel scanning. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, **7**(2), pp. 9–13 (in Russian).
7. Peleg, S., Keren, D., Schweitzer, L., 1987. Improving image resolution using subpixel motion. *Pattern Recognit. Lett.*, **5**(3), pp. 223–226.
8. Gross, D., 1986. *Super-resolution from subpixel shifted pictures*. Master's thesis. Tel Aviv University.
9. Selyutina, E.S., Blazhevich, S.V., 2014. Enhancing the resolution of digital images using subpixel scanning. *Nauchnyie vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Mathematics. Physics*, **5**, pp. 186–190 (in Russian).
10. Shelpakova, I.R., Garanin, V.G., Chanysheva, T.A., 1998. Analytical Capabilities of a Multichannel Emission Spectrum Analyzer (MAES) in Spectral Analysis. *Analytics and control*, **1**, pp. 33–40 (in Russian).
11. Yegorov, A.D., Yegorov, V.A., Yegorov, S.A., 2009. Subpixel Detection of Spectrum Images by Photodiode Structures. *Radio Phys. Radio Astron.*, **14**(1), pp. 77–83.
12. Lanczohs, K., 1961. *Practical methods of applied analysis: Reference guide*. Moscow: Fizmatgiz Publ. (in Russian).
13. Frieden, B.R., 1979. Image Enhancement and Restoration. In: *Picture Processing and Digital Filtering*. 2nd ed., ed. by T.S. Huang. Topics in Applied Physics. Vol. 6, pp. 177–248. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
14. Kosarev, E.L., 2008. *Methods of experimental data processing*. Moscow: Fiz-Matlit Publ. (in Russian).

Received 21.06.2023

S.A. Yegorov<sup>1</sup>, V.I. Lutsenko<sup>1,2</sup>, A.D. Yegorov<sup>1</sup>, V.A. Yegorov<sup>1</sup>, I.E. Sinelnikov<sup>1,3</sup><sup>1</sup> O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine<sup>2</sup> N.Ye. Zhukovsky National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"  
17, Chkalova St., Kharkiv, 61070, Ukraine<sup>3</sup> Institute of Astronomy of V.N. Karazin National University of Kharkiv  
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine.

## SUBPIXEL SCANNING FOR SPECTRUM IMAGE ANALYSIS

**Subject and Purpose.** In this paper, an algorithm is developed to improve the spectrum image resolution in the atomic emission spectrum registration using multi-element detectors and taking multiple exposures with image shifting by a fractional part of a pixel.

**Methods and Methodology.** Mathematical modeling techniques are employed in the coordinate representation dictated by the prior information. The modeling results are checked by experiment.

**Results.** The importance of the resolution value of spectral image registration systems and its impact on the quality of the obtained results have been highlighted. The spectral informativeness of the regularly (matrix- or linearly) structured multi-element detectors has been evaluated against the irregular-structure sensors, such as photographic emulsions. As it has been found that the process of pixel size reduction is demanding, an alternative approach through subpixel image shifting has been proposed. Unlike the case of the corresponding instruments implemented as a rule in the frequency domain, here the relevant theoretical problem reduces to the over-determined system of linear equations. The proposed solution algorithm employs the least squares method having regard to the prior data specificity posed by the isolation of the spectral lines and a smooth flow of the background between them. The digital simulation results and the real experimental evidence from the atomic emission spectral analysis have been presented, illustrating the algorithm operation. The experimental research was carried out for one-dimensional spectrum images registered with linear charge-coupling photodetectors. The so gained resolution was twice the spatial resolution of the photodetector.

**Conclusions.** It has been demonstrated that controlled image shifting not only improves the photometry accuracy but also significantly enhances the detector resolution. The general comparisons of the theory with the experiment have proved the feasibility of bringing the proposed methodology into atomic emission analysis.

**Keywords:** image processing, image registration with shifting, multi-element sensors, spectral analysis, least squares method, sub-pixel resolution.