

**АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

УДК 621.307.13

**ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ  
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ПРИЛАДАХ ІЗ  
ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ***Дубова М. В., Порєв В. А.**Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна**E-mail: [kugaran@gmail.com](mailto:kugaran@gmail.com)*

*Показано, що потенційні переваги приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) (великий обсяг та малий час формування вибірки, малі розміри елемента розкладу зображення) найбільш повно трансформуються в характеристики інформаційно-вимірювальних систем на ПЗЗ при виконанні концептуальних вимог щодо незалежності та ідентичності піксел.*

*Показано, що точність вимірювання лінійних розмірів, яка в загальному випадку обумовлюється параметрами інформаційно-вимірювальної системи на ПЗЗ, контрастом на об'єкті та умовами задачі, можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування сигналу в межах крайніх піксел зображення.*

*Врахування сформульованих положень дозволить розширити межі застосування інформаційно-вимірювальних систем на ПЗЗ і повніше реалізувати потенційні можливості перспективного класу засобів вимірювання.*

**Ключові слова:** інформаційно-вимірювальна система, ПЗЗ-матриця, похибки вимірювання.

**Постановка проблеми**

В технологічно розвинених країнах значного поширення набули інформаційно-вимірювальні системи на ПЗЗ (ІВСПЗЗ), за допомогою яких інформація про структуру, стан та властивості об'єктів різної природи, яка міститься в їх випромінненні, перетворюється в зображення за схемою: розподіл освітленості ПЗЗ – матриці, розподіл заряду, цифровий код, обробка засобами обчислювальної техніки [1]. ІВСПЗЗ надають унікальну можливість провадити вимірювання в реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням шляхом перетворення як власного випроміннення, так і того, що відбулося або пройшло через об'єкт.

Концепція застосування ІВСПЗЗ для дослідження геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів базується на припущенні про ПЗЗ-матрицю як про первинний вимірювальний перетворювач, що складається з упорядкованої сукупності ідентичних і незалежних мікроперетворювачів випромінювання (піксел). Реально таке припущення не завжди відповідає дійсності, вимога незалежності сусідніх піксел виконується тільки при роботі ПЗЗ-матриці в діапазоні лінійності, а ідентичність, як правило, забезпечується програмовою корекцією [2].

Елементна база ІВСПЗЗ на сьогодні досягла високого рівня і намітилась тенденція до стабілізації, але незважаючи на значні

технологічні досягнення, потенційні можливості ІВСПЗЗ повністю не вичерпані, головним чином, внаслідок недосконалості методології їх використання як засобів вимірювання. Отже, істотне підвищення ефективності ІВСПЗЗ можливе тільки на шляху розробки більш досконалих методик їх використання як засобів вимірювання.

З точки зору наукових та технологічних задач ІВСПЗЗ викликає особливу цікавість як технічний засіб з потенційно високим просторовим розрізненням. Але при їх використанні для вимірювання геометричних параметрів можливі значні розходження в методиках оцінки потенційних можливостей в конкретних задачах. В більшості випадків приймають, що лінійне розрізнення ІВСПЗЗ обернено пропорційне лінійному розміру пікселя матриці. При цьому розміри пікселя визначаються типом ПЗЗ і можуть бути в діапазоні від одиниць до десятків мікрон. Ця обставина разом з малою тривалістю формування є принциповою особливістю ІВСПЗЗ, яка відкриває перед ними широкі перспективи впровадження в наукові дослідження та в технологічну практику, зокрема, в астрономії, в космічному матеріалознавстві, в криміналістичній експертизі, в біотехнології, в мікроелектроніці, в відеоімітоскопії та телевізійній пірометрії.

Метою даного дослідження є визначення умов, за дотримання яких потенційні переваги ІВСПЗЗ (великий обсяг та малий час формування

вибірки, малі розміри елемента розкладу зображення) максимально трансформуються в таку важливу характеристику як точність вимірювання геометричних параметрів.

#### Аналіз підходів до оцінки похибки вимірювання лінійних розмірів

Класичним підходом до оцінки похибки вимірювання лінійних розмірів в системах формування зображення є геометричний підхід, в основу якого покладено поняття елемента розкладу зображення, в межах якого двомірна (просторова) функція освітленості інтегрується. При такому підході приймають, що абсолютна похибка вимірювання не перевищує значення лінійного розміру елемента розкладу зображення по відповідній координаті. Але цим підходом доцільно користуватись переважно для отримання оціночних значень похибки вимірювання. Строго кажучи, геометричний підхід годиться для використання в лабораторних умовах, коли об'єктом виступають атестовані джерела [3].

До оцінки похибки вимірювання, крім геометричного, можуть бути застосовані інші підходи, зокрема, просторово-частотний, при якому точність вимірювання лінійних розмірів співставляється з роздільною здатністю, що визначається по ширині сумарної функції передачі модуляції (ФПМ) як значення просторової частоти, на якій нормований коефіцієнт передачі контрасту дорівнює пороговому [4]. В свою чергу, пороговий контраст  $K_{\Pi}$  може бути визначений за формулою, наведеною в [5]

$$K_{\Pi} = \frac{q_{\Pi}(P)}{K_{\text{ВХ}}q(E)\gamma(E)}, \quad (1)$$

де  $q(E)$ ,  $q_{\Pi}(P)$  — відношення сигнал/шум при освітленості  $E$  та порогове при імовірності реєстрації  $P$ ,  $K_{\text{ВХ}}$  — вхідний контраст,  $\gamma(E)$  — показник ступеня світлосигнальної характеристики.

Оскільки ФПМ ІВСПЗЗ, як правило, монотонно спадають в бік високих частот, то роздільна здатність буде тим більшою, чим більшим буде  $K_{\text{ВХ}}$  на даній просторовій частоті і чим кращою буде ФПМ (кращою вважається ФПМ, для якої коефіцієнт передачі контрасту приймає одне і те ж значення на більшій просторовій частоті).

При цьому в дослідженнях, де використовується просторово-частотний підхід до визначення роздільної здатності, часто не враховуються особливості формування порогового контрасту та умови реальної задачі. В експериментальних дослідженнях ФПМ, як правило, використовуються міри з  $K_{\text{ВХ}}=1$ . Отримане при цьому за формулою (1) значення  $K_{\Pi}$  може виявитися заниженим, а роздільна здатність, відповідно, завищеною. Отже, використання моделі з  $K_{\text{ВХ}}=1$  є цілком

прийнятним тільки для оцінки потенційної роздільної здатності.

Якщо ФПМ задана аналітично, то роздільну здатність можна визначити розрахунковим шляхом. Наприклад, в межах лінійної одномірної моделі передавальної камери ІВСПЗЗ

$$H(f_x) = \exp\left[-2\pi^2 f_x^2 (r_p^2 + r_0^2)\right], \quad (2)$$

де  $r_p$ ,  $r_0$  — радіуси розсіяння елемента розкладу зображення ПЗЗ-матриці та оптики,  $H(f_x)$  — функція передачі модуляції,  $f_x$  — просторова частота.

Коефіцієнт передачі контрасту на просторовій частоті  $f_{Kn}$ , для якої досягається значення порогового контрасту

$$K(f_{Kn}) = \exp\left[-2\pi^2 f_{Kn}^2 (r_p^2 + r_0^2)\right]. \quad (3)$$

Прирівнявши (1) і (3) та за умови, що  $\gamma(E)=1$ , отримаємо

$$\frac{q_{\Pi}(P)}{K_{\text{ВХ}}q(E)} = \exp\left[-2\pi^2 f_{Kn}^2 (r_0^2 + r_p^2)\right]. \quad (4)$$

Прологарифмувавши (4) та виконавши нескладні перетворення, отримаємо вираз для просторової частоти, яка обумовлюється параметрами приладу ( $r_0$ ,  $r_p$ ), контрастом на об'єкті ( $K_{\text{ВХ}}$ ), умовами роботи —  $q(E)$  і на якій досягається значення порогового контрасту

$$f_{Kn} = \left[ \frac{\ln(K_{\text{ВХ}} \cdot q(E)) - \ln q(P)}{2\pi^2 (r_0^2 + r_p^2)} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Формулу (5) можна використати для оцінки точності вимірювання лінійних розмірів за допомогою ІВСПЗЗ в умовах реальної задачі, задавши необхідне значення імовірності реєстрації  $P$  з подальшим визначенням елемента розкладу зображення як значення, оберненого до подвійного значення просторової частоти.

#### Методика формування сигналу

Виконані нами дослідження показали, що точність вимірювання лінійних розмірів можна збільшити за рахунок методики формування сигналу, яка базується на залежності сигналу пікселя ПЗЗ-матриці від співвідношення між більш освітленою і менш освітленою його ділянками.

В загальному випадку сигнал, який формується пікселем з площею  $S$  в межах лінійної ділянки світлосигнальної характеристики ПЗЗ-матриці знаходиться в діапазоні від середньоквадратичного значення шуму  $\sigma$  до деякого максимального значення  $A_0$  при освітленості  $E_0$ .

Введемо параметр  $S_{\Pi}^*$ , який визначає освітлену площу пікселя. Очевидно, що  $0 \leq S_{\Pi}^* \leq S$ , а при роботі в межах діапазону лінійності сформований пікселем сигнал  $\sigma \leq A(S_{\Pi}^*) \leq A_0$ .

Якщо поріг реєстрації сигналу  $A_{II}$ , то сигнал  $A(t)$  може бути зареєстрований за умови  $A(t) > A_{II} + A_{III}(t)$ , або  $A_{III}(t) < A(t) - A_{II}$ , де  $A_{III}(t)$  — реалізація шуму.

Введемо приведені значення

$$a_1 = \frac{A(t)}{\sigma}, a_2 = \frac{A_{II}}{\sigma}, a_3 = \frac{A_{III}(t)}{\sigma}.$$

Тоді умова реєстрації сигналу визначиться нерівністю  $a_3 < a_1 - a_2$ .

Оскільки всі приведені значення  $a_3$  є випадковими величинами, то повною характеристикою випадкової величини є функція розподілу (інтегральний закон розподілу), який визначає імовірність того, що випадкова величина приймає значення менше заданого. Для найбільш поширених в науковій практиці ІВСПЗЗ сигнал підкоряється нормальному закону розподілу, тому що утворюється внаслідок одночасної дії кількох незалежних факторів, жоден з яких не домінує [6].

Тоді імовірність реєстрації сигналу, тобто імовірність того, що  $P(a_3 < a_1 - a_2)$  визначиться так

$$P(a_3 < a_1 - a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (6)$$

Скориставшись табличними значеннями інтегралу, можна встановити залежність між будь-якими параметрами, що входять в формулу (6). Наприклад, при  $a_2 = 1$ , тобто при  $A_{II} = \sigma$  значення імовірності реєстрації  $P = 0.99$  буде забезпечуватись при  $A(t) = 3.2\sigma$ . Якщо такий сигнал буде сформований частиною елемента розкладу зображення і при цьому  $A(t) \ll A_0$ , то кількість ділянок, що можуть бути розрізнені в його межах як окремі

$$N_1 = \frac{A_0}{3.2\sigma}. \quad (7)$$

З цього випливає, що при лінійному розмірі елемента розкладу зображення  $\Delta_{pix}$  можлива ідентифікація положення межі з точністю до ділянки розміром  $\Delta_{pix}/N$ .

В принципі, методика дозволяє підвищувати точність визначення координати до рівня, який обмежується тільки дисперсією шуму. Для оцінки достовірності сформульованого положення можна скористатися експериментальними результатами, отриманими в [7], де вказується, що гранична похибка вимірювання координати для ПЗЗ була зменшена до величини 1 мкм. Зазначимо, що дані експериментальні дослідження підтвердили ефективність методики, зокрема, її використання дозволило збільшити точність вимірювання геометричних параметрів зони розплаву в технології безтигельної зонної плавки кремнію [8].

Зрозуміло, що застосування запропонованої методики може привести до підвищення точності вимірювання геометричних параметрів також в інших задачах. Наприклад, зображення об'єкту

формується в межах від пікселя  $(i; j)$  до пікселя  $(i; k)$ . Тоді лінійний розмір зображення об'єкту згідно з традиційною методикою обчислюється як різниця координат крайніх піксел зображення.

Оскільки лінія межі може довільно перетинати піксел, то абсолютна похибка визначення координати дорівнює половині розміру пікселя  $\Delta_{pix}$  вздовж цієї координати, а похибка вимірювання розміру зображення дорівнює розміру пікселя  $\Delta_{pix}$ .

У відповідності із запропонованою методикою розмір зображення об'єкту буде визначатися за формулою

$$h_o = (Y_{i,k-1} - Y_{i,j-1}) + \frac{\Delta_{pix} \cdot y}{N} (l_k + l_j), \quad (8)$$

де  $Y_{i,k-1}$ ,  $Y_{i,j-1}$  — координати піксел, повністю заповнених зображенням,  $l_k$ ,  $l_j$  — кількість ділянок розміром  $\frac{\Delta_{pix} \cdot y}{N}$ , зайнятих зображенням об'єкту в межах крайніх піксел  $(i; k)$  та  $(i; j)$ , відповідно.

Згідно з формулою (8) похибка визначення розміру зображення визначається розміром  $\Delta_{pix}/N < \Delta_{pix}$ .

В даному випадку показана можливість умовної дискретизації функції освітленості в межах крайніх піксел, яка впливає з характеру функції в межах вказаних піксел і здійснюється шляхом встановлення відповідності між значенням сигналу пікселя і кількістю умовних (фізично не заданих) елементів дискретизації.

В той же час практична реалізація такого підходу може бути пов'язана із значними труднощами внаслідок цілого ряду причин, серед яких основну роль відіграють власні шуми, флуктуації вхідного сигналу, якість оптики, мікрівібрації, пов'язані з роботою лабораторного обладнання та інших джерел механічних коливань.

## Висновки

Потенційні переваги ПЗЗ (великий обсяг та малий час формування вибірки, малі розміри елемента розкладу зображення) найбільш повно трансформуються в характеристики ІВСПЗЗ при виконанні концептуальних вимог щодо незалежності та ідентичності піксел.

Водночас, точність вимірювання лінійних розмірів за допомогою ІВСПЗЗ, яка обумовлюється параметрами приладу, контрастом на об'єкті, умовами реальної задачі, можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування сигналу в межах крайніх піксел зображення.

Врахування сформульованих положень дозволить розширити межі застосування ІВСПЗЗ для вимірювання лінійних розмірів широкого класу об'єктів, отже, повніше реалізувати потенційні можливості найбільш перспективних засобів вимірювання.

**Література**

1. Молодяков С. А. Фотоприемники в системах потоковой обработки сигналов и изображений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 134 с.
2. Порев В. А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів / В. А. Порев, Г. В. Порев // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2001. – № 1. – С. 56 – 61.
3. Шульман М. Я. Измерение передаточных функций оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
4. Маркін М. О. Оцінка похибки вимірювання геометричних параметрів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем / М. О. Маркін, О. М. Маркіна // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2009. – Вип. 38. – С. 102-106.
5. Брацлавец П. Ф. Космическое телевидение / П. Ф. Брацлавец, И. А. Росселевич, Л. И. Хромов – М.: Связь, 1973. – 271 с.
6. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
7. Маслюков Ю. С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС / Ю. С. Маслюков // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – № 4. – С. 70-73.
8. Poryev G. To the issue of melting zone height control in the technology of electron-emitting crucibleless zone melting of silicon / G. Poryev, V. Poryev // Journal of Hydrocarbon Power Engineering. – Ivano-Frankivsk: ІФНТУНГ, 2015. – № 2 (2). – P. 58-62.

УДК 621.307.13

**М. В. Дубовая, В. А. Порев***Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, г. Киев, Украина***ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ПОМОЩИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ**

**Проблематика.** Показано, что потенциальные преимущества приборов с зарядовой связью (ПЗС) (большой объем и малое время формирования выборки, малые размеры элемента разложения изображения) наиболее полно трансформируются в характеристики информационно-измерительных систем на ПЗС при выполнении концептуальных требований независимости и идентичности пиксел.

**Цель исследования** – определение условий, при соблюдении которых потенциальные преимущества ИИС ПЗС (большой объем и малое время формирования выборки, малые размеры элемента разложения изображения) максимально трансформируются в точность измерения геометрических параметров.

**Результаты исследования.** Показано, что точность измерения линейных размеров, в общем случае обусловленную параметрами информационно-измерительной системы на ПЗС, контрастом на объекте и условиями задачи, можно увеличить за счет специальной методики формирования сигнала в пределах крайних пиксел изображения.

**Выводы.** Учет сформулированных положений позволит расширить границы применения информационно-измерительных систем на ПЗС и полнее реализовать потенциальные преимущества перспективного класса средств измерения.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, ПЗС-матрица, погрешность измерения.

**M. Dubova, V. Poryev***National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine***MEASURING THE LINEAR DIMENSIONS USING THE CCD-BASED INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS**

**Problematics.** It has been shown that the potential advantages of the CCD (such as large volume and short time of sampling, small pixel dimensions) are fully transformed into the characteristics of the CCD-based measurement and information systems only while fulfilling the conceptual requirements concerning the independence of identical pixels.

**Research methods.** Determining the conditions under which the potential advantages of CBIMS are most effectively implemented into the accuracy of measuring geometric parameters (the advantages being large volume and short time of sampling, small pixel dimensions).

**Research results.** It has been shown that the accuracy of determining the linear dimensions, which is usually constrained by the parameters of the CCD-based measurement and information systems, the contrast on the object and the conditions of measurement, can be increased using the special technique for signal formation on the edges of the image.

**Conclusions.** Taking into account the formulated clauses will allow extending the applicability margins for CCD-based measurement and information systems and implementing the potential advantages of this prospective measurement instrumentation more fully.

**Keywords:** measurement and information systems, CCD, measurement error.

*Надійшла до редакції  
20 березня 2017 року*

*Рецензовано  
04 квітня 2017 року*

© Дубова М. В., Порєв В. А., 2017