

ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

В. А. Порєв

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: kugaran@gmail.com

О. М. Маркіна

Асистент*

E-mail: o.n.markina@gmail.com

Ю. А. Агінський

Аспірант*

*Кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"

пр. Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056

Проаналізовано проблему оцінки похибки вимірювання лінійних розмірів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем. Показано, що просторово-частотний підхід забезпечує отримання найбільш достовірних оцінок похибки вимірювання, а імовірнісний підхід дозволяє зменшити граничну похибку вимірювання лінійних розмірів на порядок без зміни структури та елементної бази оптико-електронної схеми ТІВС

Ключові слова: телевізійна інформаційно-вимірювальна система, вимірювання лінійних розмірів

Проанализирована проблема оценки погрешности измерения линейных размеров с помощью телевизионных информационно-измерительных систем. Показано, что пространственно-частотный подход обеспечивает получение наиболее достоверных оценок погрешности измерения, а вероятностный подход позволяет уменьшить предельную погрешность измерения линейных размеров на порядок без изменения структуры и элементной базы оптико-электронной схемы ТИИС

Ключевые слова: телевизионная информационно-измерительная система, измерение линейных размеров

1. Вступ

Постійною домінантою в розвитку виробництва незалежно від суспільної формації є поліпшення якості продукції, що в першу чергу передбачає наявність адекватних засобів контролю. Стан багатьох сучасних технологій визначається саме науковим та технічним рівнем засобів контролю, значна частина яких базується на використанні методів аналізу оптичних полів. Ці засоби аналізу характеризуються широким діапазоном призначень та великим розмаїттям технічних і споживчих характеристик і складають широкий і надзвичайно різноманітний за набором параметрів та методик застосування клас технічних засобів. Деяко умовним, але обґрунтованим з точки зору специфіки можливих задач є поділ цього класу на підклас приладів для вимірювання температури поверхні в одній точці поля та підклас приладів, які формують зображення поля та здійснюють його аналіз шляхом вимірювання в багатьох точках практично одночасно. Чільне місце серед них належить приладам з розгортанням зображення, які надають можливість провадити аналіз оптичного поля в багатьох точках за довільною траєкторією в реальному масштабі часу і з високим просторовим розрізненням.

В свою чергу в другому підкласі можна виділити групу приладів, в яких формування зображення відбувається за допомогою оптико-механічного розгор-

тання, та групу приладів з електронним розгортанням зображення.

Історично склалося так, що прилади першої групи розвивалися більш інтенсивно і тому на сьогоднішній день вони представлені досить великою номенклатурою і широким спектром параметрів. Найбільш типовими представниками приладів з оптико-механічною розгортанням є "Thermovision" (Швеція). "Thermovision-1000" на сьогодні є найдосконалішою системою аналізу оптичних (температурних) полів, що забезпечує формування, обробку та аналіз в реальному масштабі часу як статичних так і динамічних полів розміром від 1,6x1,6 мм до десятків метрів [1].

Останнім часом при виконанні наукових досліджень, пов'язаних з аналізом оптичних полів, переваги віддаються телевізійним інформаційно-вимірювальним системам (ТІВС), що обумовлено їх більшою роздільною здатністю і значно меншою вартістю порівняно з приладами, в яких застосовується оптико-механічне розгортання [2].

ТІВС фактично знаменують собою новий рівень вимірювальних технологій і потенційно найбільше відповідають сучасним вимогам контролю багатьох технологічних процесів. ТІВС надають унікальну можливість провадити вимірювання геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів в реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням шляхом аналізу як власного випромінювання, так і того, що відбулося або пройшло через

об'єкт. ТІВС широко використовуються в наукових дослідженнях, в промислових технологіях, в екології, в медичній діагностиці, в астрономії, в матеріалознавстві, на транспорті, в криміналістичній експертизі, в біотехнології, в мікроелектроніці тощо.

2. Постановка задачі

Всі методики застосування ТІВС полягають в формуванні зображення, перетворенні його в цифровий код та використанні алгоритмів, які забезпечують необхідну точність вимірювання лінійних розмірів об'єктів контролю. При цьому телевізійне зображення може існувати як розподіл освітленості на чутливій поверхні світло-електричного перетворювача (СЕП), як розподіл зарядів, як сформована законом розгортки послідовність аналогових електричних сигналів, як цифровий масив, як розподіл яскравості екрану. З точки зору наукових та технологічних досліджень ТІВС викликає особливу цікавість як технічний засіб з потенційно високим просторовим розрізненням, що має значні перспективи в плані зменшення похибок вимірювання лінійних розмірів. В той же час при вирішенні конкретних задач можливі значні розходження в оцінках похибки вимірювання, пов'язані із застосуванням різних методик.

Задачею даної роботи є порівняльний аналіз підходів до оцінки похибки вимірювання та обґрунтування можливості зменшення похибки вимірювання розмірів та лінійних переміщень об'єктів без зміни структури та елементної бази оптико-електронної схеми ТІВС.

3. Аналіз підходів до оцінки похибки вимірювання лінійних розмірів

Найбільш уживаним підходом до оцінки похибки телевізійних засобів вимірювання лінійних розмірів є геометричний підхід, в основу якого покладено поняття елемента розкладу зображення, в межах якого функція освітленості інтегрується. В цьому випадку приймають, що лінійне розрізнення ТІВС обернено пропорційне лінійному розміру піксела. Геометричний підхід для сучасних ТІВС дає значення похибки вимірювання лінійних розмірів порядку 10 мкм.

При застосуванні телевізійних засобів для аналізу оптичних полів, утворених невласним випромінюванням та за умови адитивності шуму, оцінка похибки вимірювання координат точки, яка належить сукупності точок, що утворюють виборку A_{ij} може бути проведена за формулою [3]

$$\sigma_y^2 = \frac{S(f_x, f_y)}{\sum_i^p \sum_j^q \left(\frac{A_{i,j+1} - A_{ij}}{\Delta y} \right)^2}, \tag{1}$$

де $S(f_x, f_y)$ - спектральна інтенсивність шуму;

f_x, f_y - просторові частоти;

Δy - крок виборки сигналів по координаті Y, тобто вертикальний розмір піксела;

p, q - число елементів СЕП, які формують зображення об'єкту.

Припущення про адитивність шуму телевізійних засобів потребує експериментального обґрунтування.

Відповідні експерименти нами були виконані за методикою, яка базується на твердженні про постійну величину дисперсії при умові адитивності шуму і полягає в наступному. Спочатку встановлюється деякий рівень вихідного сигналу, наприклад A_1 . Загальний алгоритм вимірювання передбачає встановлення меж виборки або задання траєкторії аналізу. Відповідно до особливостей процесу встановлюється кількість виборок в кожній точці з подальшим обчисленням середнього значення. Мінімально необхідний обсяг виборки n_{min} в загальному випадку визначається у відповідності з прийнятим значенням довірчої імовірності P за формулою $n_{min} = \frac{2}{1-p}$. Довірча імовірність, як правило, вибирається рівною 0,95. В даному експерименті для вибраного піксела в послідовних кадрах визначаються реалізації сигналів A_{1C} та шумів $A_{1ш}$, обчислюється середнє значення \bar{A}_{1C} і дисперсія σ^2 . Далі рівень вихідного сигналу збільшується приблизно в 2 рази, повторюються вимірювання і знову визначається дисперсія. Результати експериментів наведені в табл. 1.

Таблица 1

Реалізація сигналів та шуму (всі значення в умовних одиницях)

A_C	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{A}	σ_2
A_1	A_{1i}	3	5	3	5	3	3	3	3	3	4	3,5	
	$A_{1шi}$	-0,5	1,5	-0,5	1,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5		0,25
A_2	A_{2i}	8	8	8	6	6	6	10	9	7	8	7,6	
	$A_{2шi}$	0,4	0,4	0,4	-1,6	-1,6	-1,6	2,4	1,4	-0,6	0,4		0,4
A_3	A_{3i}	15	16	15	16	14	14	15	15	15	15	15	
	$A_{3шi}$	0	1	0	1	-1	-1	0	0	0	0		0,2
A_4	A_{4i}	30	31	30	31	30	31	30	32	32	32	30,9	
	$A_{4шi}$	-0,9	0,1	-0,9	0,1	-0,9	0,1	-0,9	1,1	1,1	1,1		0,26
A_5	A_{5i}	55	55	55	55	55	58	55	57	56	58	55,9	
	$A_{5шi}$	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	2,1	-0,9	1,1	0,1	2,1		0,32

Як видно з табл. 1, в діапазоні змін вихідного сигналу від 3 ум. од. до 55 ум. од. (діапазон лінійності ТІВС) дисперсія практично не зростає, що відповідає припущенню про адитивність шуму.

Оскільки флуктуації яскравості є квазібілим шумом, то спектральну інтенсивність шуму можна визначити через середній квадрат флуктуації яскравості

$$S(f_x, f_y) = \sum_i^p \sum_j^q [A_{шк} - \bar{A}_{ш}]^2, \quad (2)$$

де $A_{шк}$ - реалізація шуму в одному кадрі для пікселя, що знаходиться на перетині i -го рядка з j -м стовпцем;

$\bar{A}_{ш}$ - середнє значення шуму в зображенні об'єкту, визначене в одному кадрі по матриці $p \times q$ елементів.

Реалізація шуму в k -му кадрі визначається співвідношенням

$$A_{шк} = A_{ck} - \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k A_{cm}, \quad (3)$$

де A_{ck} - реалізація сигналу пікселя (i, j) в k -му кадрі;

A_{cm} - реалізації сигналів з першого по k -й кадри;

$\frac{1}{k} \sum_{m=1}^k A_{cm}$ - середнє значення сигналу для виборки із k кадрів.

Розрахунки величини σ_y , виконані для масиву сигналів, дали результат $\sigma_y = 0,3\Delta y$.

До оцінки похибки вимірювання лінійних розмірів може бути застосований просторово-частотний підхід, 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]. Нагадаємо, що контраст – найважливіша характеристика зображення, яка використовується при дослідженні роботи телевізійних систем і визначається для сусідніх точок зображення, для сусідніх фрагментів зображення або в межах фрагменту чи всього зображення.

При цьому розрізняють вхідний $K_{вх}$ і вихідний $K_{вих}$ контрасти, які кількісно визначаються співвідношеннями екстремальних значень яскравості поверхні об'єкту та освітленості на мішені

$$K_{вх} = \frac{L_{max}(x, y) - L_{min}(x, y)}{L_{max}(x, y) + L_{min}(x, y)}, \quad (4)$$

$$K_{вих} = \frac{E_{max}(x', y') - E_{min}(x', y')}{E_{max}(x', y') + E_{min}(x', y')}, \quad (5)$$

де $L_{max}(x, y)$, $L_{min}(x, y)$ - максимальне і мінімальне значення яскравості поверхні об'єкту в спектральному діапазоні чутливості ТІВС;

$E_{max}(x', y')$, $E_{min}(x', y')$ - максимальне і мінімальне значення освітленості на мішені.

Можливі також інші визначення контрасту, але тільки визначення за формулою типу (4) співпадає з визначенням коефіцієнту модуляції в теорії сигналів, що дозволяє надалі при аналізі процесів формування зображення використовувати добре розроблений апарат теорії сигналів.

Зробимо кілька зауважень стосовно утворення контрасту. По-перше, для повністю непрозорих тіл контраст вхідного зображення (на поверхні об'єкту) утворюється за рахунок відмінностей в яскравостях ділянок, обумовлених відмінностями в значеннях коефіцієнтів випромінювальної здатності (власне випромінювання) або коефіцієнтів відбиття (невласне випромінювання).

Якщо в межах фрагменту освітленість має постійне значення, а коефіцієнти відбиття наприклад, $\rho_1(x, y)$ і $\rho_2(x, y)$, то

$$K_{вх} = \frac{\rho_1(x, y) - \rho_2(x, y)}{\rho_1(x, y) + \rho_2(x, y)}. \quad (6)$$

У випадку власного випромінювання контраст вхідного зображення утворюється за рахунок відмінностей у яскравостях ділянок, що мають різні температури T , або за рахунок відмінностей у значеннях коефіцієнтів випромінювальної здатності. Контраст, обумовлений флуктуаціями температури ΔT , визначається за формулою

$$K_p = \frac{1 - \exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_e} \left(\frac{\Delta T}{T^2}\right)\right]}{1 + \exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_e} \left(\frac{\Delta T}{T^2}\right)\right]}, \quad (7)$$

де $C_2 = 1,44 \cdot 10^4$ мкм, K – константа з формули Планка;

λ_e – еквівалентна довжина хвилі.

Якщо температури практично однакові, наприклад, в межах фазового переходу, то контраст утворюється за рахунок значної різниці між коефіцієнтами випромінювальної здатності у твердій $\epsilon_T(\lambda)$ та рідкій $\epsilon_P(\lambda)$ фазах.

$$K_\phi = \frac{\epsilon_T(\lambda) - \epsilon_P(\lambda)}{\epsilon_T(\lambda) + \epsilon_P(\lambda)}. \quad (8)$$

Кількісно пороговий контраст K_Π може бути визначений за формулою, отриманою в [5]

$$K_\Pi = \frac{q_\Pi(P)}{K_{вх} q(E) \gamma(E)}, \quad (9)$$

де $q(E)$, $q_\Pi(P)$ - відношення сигнал/шум при освітленості E та порогове при імовірності реєстрації P ;

$\gamma(E)$ - показник ступеню світлосигнальної характеристики.

По-друге, K_Π може бути складною функцією просторової частоти і, як правило, K_Π збільшується із збільшенням просторової частоти [6].

В цілому, просторово-частотний підхід при умові використання реальних значень вхідного контрасту та врахування особливостей формування сигналу дозволяє отримати найбільш достовірні оцінки похибки вимірювання.

Причиною виникнення додаткових похибок при визначенні меж може бути також та обставина, що лінія, яка визначає межу, як правило, довільно перетинає групу піксел. В даному випадку можна застосувати

методику, яка полягає в формуванні відліків в сусідніх Y - рядках при фіксованому значенні координати X . Відповідні координати визначаються за формулою

$$Y(X) = \frac{\sum_{i=1}^m A_i Y_i(X)}{\sum_{i=1}^m A_i}, \tag{10}$$

де A_i - відлік сигналу в i -й строчці;
 Y_i - координата i -ї строчки;
 m - кількість рядків, що використовуються при визначенні координати.

Ідентифікація межі може провадитись також і по одному пікселю. Наприклад, на рис. 1 показано зображення межі, яка проходить через піксел n та відповідні значення сигналів, утворених пікселами ($n-1, n-2, n+1, n+2$), які розташовані з обох боків межі.

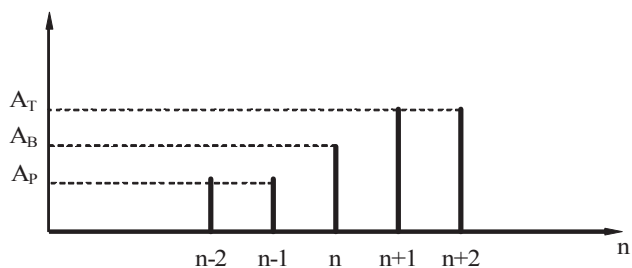
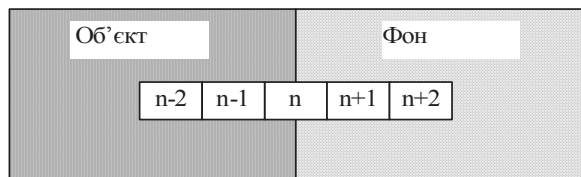


Рис. 1. Зображення межі та відносні значення сигналів, які утворюються на межі

Величина сигналу A_B , утвореного пікселом, який “розташований” на межі, знаходиться в такому інтервалі $A_P < A_B < A_T$, де A_P і A_T - середні значення сигналів. В цьому випадку точність вимірювання лінійних розмірів можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування сигналу пікселами ПЗЗ-матриці. Дана методика використовує особливості формування сигналу в межових точках і при лінійному розмірі піксела Δ забезпечує ідентифікацію положення межі з точністю до ділянки розміром Δ/N , де N - кількість ділянок, яка визначається відношенням максимального сигналу A_0 при освітленості E'_0 до середньоквадратичного значення шуму σ [6]. Цей парадоксальний, на перший погляд, висновок базується на співвідношенні між середньоквадратичним значення шуму та сигналом, який сформований фрагментом з площею меншою за площу ЕРЗ. Підтвердженням цього висновку можуть слугувати наведені в роботі [7] експериментальні дані, з яких випливає, що використання такої методики дозволяє зменшити граничну похибку вимірювання лінійних розмірів на порядок без зміни структури та елементної бази оптико-електронної схеми ТІВС [8-11].

Аналогічним чином, за необхідності, визначаються і координати іншої межі.

4. Висновки

Експериментально встановлена адитивність шуму телевізійних засобів в діапазоні лінійності.

Просторово-частотний підхід при умові використання реальних значень вхідного контрасту та врахування особливостей формування сигналу дозволяє отримати найбільш достовірні оцінки похибки вимірювання.

Точність вимірювання лінійних розмірів можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування сигналу пікселами ПЗЗ-матриці.

Література

1. Termovision-1000: Technical reference, AGEMA Infrared System AB, 1998.
2. Порєв, В.А. Телевізійні інформаційно-вимірювальні системи – стан і перспективи розвитку [Текст] / В.А.Порєв // Методи та прилади контролю якості. – 2005. – № 13. – С.71 – 74.
3. Горелик, С.Л. Телевизионные измерительные системы [Текст] / С.Л.Горелик, Б.М.Кац, В.И.Киврин. – М.: Связь, 1980. – 168 с.
4. Рыфтин, Я.А. Телевизионная система. Теория [Текст] / Я.А.Рыфтин. – М.: Сов. радио, 1967. – 271 с.
5. Брацлавец, П.Ф. Космическое телевидение [Текст] / П.Ф.Брацлавец, И.А.Росселевич, Л.И.Хромов. – М.: Связь, 1973. – 245 с.
6. Порєв, В.А. Імовірносний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю [Текст] / В.А.Порєв, Г.В. Порєв, Р.І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. - 2002. - №8. - С.40-43.
7. Маслоков, Ю.С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС [Текст] / Ю.С.Маслоков // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – №4. –С.70-73.
8. Мильвидский М.Г., Везуб Н.А., Картавых А.В. и др. [Текст] Кристаллография.1997.Т.42.№ 5.С.913.
9. Kartavykh A.V., Kopeliovich E.S., Milvidskii M.G., Rakov V.V. [Текст] //Microgravity Sci. Technol.1999.V.12 №1.P.16.
10. Sensori cut the price of colour control. Opto and Laser Europe, issue 62, May 1999.
11. Нестеров В.Н. Мещанов А.В. Теоретические основы оптических измерений составляющих многокомпонентных перемещений подвижных объектов на базе метода многомерных тестов // Измерительная техника. - 2007. - № 11.- С.3.