

УДК 621.307.13

ОЦІНКА ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

*Маркін М.О., Маркіна О.М., Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

В статті проаналізовано проблему оцінки похибки вимірювання геометричних параметрів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем. Розглянуто три підходи до оцінки похибки вимірювання: геометричний, просторово-частотний та імовірнісний. Доведено, що просторово-частотний підхід внаслідок врахування реальних значень вхідного контрасту та умов формування сигналу дозволяє отримати найбільш достовірні оцінки похибки вимірювання

Вступ

На сьогодні у багатьох технологічно розвинених країнах широко використовуються комп'ютеризовані телевізійні інформаційно-вимірювальні системи (ТІВС), які дають можливість аналізувати інформацію про структуру, стан та властивості об'єктів різної природи, яка міститься у їх випромінюванні.

Звичайно ТІВС застосовується за такою методикою: формування зображення, перетворення його у цифровий код, використання алгоритмів, які забезпечують необхідну точність вимірювання енергетичних і геометричних параметрів.

Для наукових та технологічних досліджень ТІВС є потужним технічним засобом з потенційно високою точністю вимірювання геометричних параметрів. Але в оцінках похибки вимірювання ТІВС при вирішенні конкретних задач можливі значні розходження, пов'язані із застосуванням різних методик.

Постановка задачі

Класичним підходом до оцінки похибки вимірювання систем формування зображення є геометричний підхід, який і розглядається у більшості літературних джерел [1,2].

В основу геометричного підходу покладено поняття елементу розкладу зображення (ЕРЗ), як частини СЕП, у межах якої двомірна (просторова) функція освітленості інтегрується.

При такому підході приймають, що похибка вимірювання δ не перевищує значення лінійного розміру Δ по відповідній координаті. Зазвичай приймають, що $\delta = \Delta$.

Цим підходом користуються переважно для отримання оціночних значень похибки вимірювання. Отже, геометричний підхід годиться для використання в лабораторних умовах, коли об'єктом виступають еталонні атестовані джерела.

В той же час до оцінки похибки вимірювання, крім геометричного, можуть бути застосовані інші підходи, зокрема, просторово-частотний. Але літературні джерела, де використовується просторово-частотний підхід до визначення роз-

дільної здатності [3], не враховують особливостей формування порогового контрасту та умов реальної задачі. Ця ж невизначеність у заданні порогового контрасту виникає також при застосуванні просторово-частотного підходу до оцінки похибки вимірювання [5].

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

Особливості просторово-частотного підходу до оцінки похибки вимірювання

Розвиток та широке впровадження просторово-частотних уявлень в практику аналізу систем формування та передачі зображення дозволили визначити похибку вимірювання через функцію передачі модуляції (ФПМ) та деякий пороговий рівень контрасту зображення, що є більш строгою оцінкою порівняно з тією, коли похибка вимірювання визначається розмірами ЕРЗ.

Методика базується на аналітичному або графічному розв'язанні рівняння $H(f_x, f_y) = K_{\Pi}$, де $H(f_x, f_y)$ – ФПМ ТІВС, K_{Π} – пороговий контраст у вихідному зображенні, f_x, f_y – просторові частоти за відповідними координатами x, y .

Для визначення ФПМ телевізійної передавальної камери представимо її послідовним сполученням просторового фільтра об'єктива $H_0(f_x, f_y)$ та просторового фільтра приладу з зарядовим зв'язком (ПЗЗ).

В цьому випадку ФПМ ТІВС визначається як добуток ФПМ складових ланок

$$H(f_x, f_y) = H_0(f_x, f_y) \cdot H_{\text{ПЗЗ}}(f_x, f_y). \quad (1)$$

Перетворення (1) коректне, якщо випромінювання сприймається некогерентно, а ТІВС лінійна та просторово-інваріантна.

Умова некогерентності випромінювання забезпечується, якщо йдеться про ТІВС, які не використовують лазерне випромінювання.

Щодо лінійності, то ТІВС взагалі є нелінійними системами, але для конкретної задачі можна визначити діапазон, в якому відбувається лінійне перетворення сигналу.

Просторова інваріантність ТІВС потребує певних припущень, наприклад, введення в розгляд ізопланатичних зон, в межах яких функція розсіяння може вважатися постійною.

Якщо у межах розгляду всі ланки ТІВС лінійні та ізотропні, то така система може бути характеризована одномірними ФПМ – $H(f_x)$ і $H(f_y)$.

Одномірна ФПМ об'єктива визначається наступною апроксимацією [2]

$$H_0(f_x) = \exp(-2\pi^2 f_x^2 r_0^2), \quad (2)$$

де r_0 – радіус плями розсіяння об'єктива на рівні 0,606 від максимального значення.

Для одновірної ФПМ матриці ПЗЗ можна використати формулу, наведену в [4], спростивши її з врахуванням того, що в сучасних матрицях неефективність переносу зарядового пакету практично відсутня.

В цьому випадку одновірна ФПМ ПЗЗ-матриці матиме вигляд

$$H_{\text{ПЗЗ}}(f_x) = \frac{\sin(\pi f_x \Delta x)}{\pi f_x \Delta x}. \quad (3)$$

З врахуванням (1), (2) і (3) отримаємо

$$H(f_x) = \exp(-2\pi^2 f_x^2 r_0^2) \frac{\sin(\pi f_x \Delta x)}{\pi f_x \Delta x}. \quad (4)$$

А для кількісних оцінок порогового контрасту на виході можливе використання формули, наведеної в [5]

$$K_{\text{П}} = \frac{q_{\text{П}}(P)}{K_{\text{ВХ}} \gamma(E) q(E)}, \quad (5)$$

де $K_{\text{ВХ}}$ – вхідний контраст; $q(E)$, $q_{\text{П}}(P)$ – відношення сигнал/шум при освітленості E та порогове, при якому забезпечується задана імовірність реєстрації сигналу P ; $\gamma(E)$ – показник нелінійності світло-електричної характеристики.

При умові, що СЕП працює в діапазоні лінійності, тобто $\gamma(E) = 1$,

$$K_{\text{П}} = \frac{q_{\text{П}}(P)}{K_{\text{ВХ}} q(E)}. \quad (6)$$

Фактично просторово-частотний підхід до оцінки похибки вимірювання ТІВС є розвитком геометричного підходу, оскільки базується на положенні про неможливість дискретизації функції освітленості в межах ЕРЗ. Але в цьому випадку мова йде не про технологічні параметри ЕРЗ, а про деяке ефективне значення d , яке визначається з врахуванням вхідного контрасту та умов формування сигналу. Кількісно ефективний розмір d визначається з рівняння $H(f_x, f_y) = K_{\text{І}}$ як величина, обернена до просторової частоти f_x , на якій коефіцієнт передачі контрасту дорівнює пороговому.

Наприклад, якщо $\Delta_x = 10$ мкм, $K_{\text{ВХ}} = 0,5$, $q(E) = 30$, $q_{\text{І}}(P) = 2,6$, то $f_x = 45$, відповідно $d = 1/45 = 22$ мкм.

Оскільки в більшості реальних задач, для вирішення яких застосовуються ТІВС, $K_{\text{ВХ}} < 1$, то завжди $d > \Delta x$.

Імовірнісний підхід до оцінки похибки вимірювання

Розглянемо довільний ЕРЗ, площа якого S , середнє квадратичне значення шумового сигналу σ .

Нехай в момент часу t сигнал має значення $A(t)$, а реалізація шуму – $A_0(t)$. Визначимо поріг реєстрації $A_{\text{І}}$, і встановимо, що сигнал $A(t)$ може бути зареєстрований за умови $A(t) > A_{\text{І}} + A_0(t)$, або $A_0(t) < A(t) - A_{\text{І}}$. Введемо приведені

значення $a_1 = \frac{A(t)}{\sigma}$, $a_2 = \frac{A_1}{\sigma}$, $a_3 = \frac{A_0(t)}{\sigma}$. Тоді умова реєстрації сигналу $a_3 < a_1 - a_2$. Шум ЕРЗ $A_0(t)$, відповідно, і приведені значення a_3 є випадковими величинами.

Прийmemo, що шум СЕП підкоряється нормальному закону розподілу. Тоді функція розподілу випадкової величини a_3 , тобто імовірність реєстрації сигналу визначиться інтегралом імовірності

$$P(a_3 < a_1 - a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (7)$$

Прийmemo, що $a_2(t) = 1$, сигнал реєструється при $A_n = \sigma$. Тоді для значення імовірності $P = 0,95$ з таблиць інтегралу імовірності знайдемо $a_1 - a_2 = 2,6$, тобто $A(t) = 2,6 \cdot \sigma$.

Якщо в момент часу t реалізація сигналу $A(t)$ в 2,6 рази перевищує середньоквадратичне значення шуму, то сигнал буде зареєстровано з імовірністю 0,95.

Але ж, такий сигнал може бути сформований фрагментом ЕРЗ з площею $S_1^* < S$. Це означає, що кількість ділянок, які можуть бути розрізнені в межах ЕРЗ як окремі, визначиться формулою

$$N_1 = \frac{S}{S_1^*} = \frac{A_0}{2,6\sigma}, \quad (8)$$

де A_0 – значення сигналу, яке відповідає верхній межі діапазону лінійності світлосигнальної характеристики.

Отриманий результат підтверджується експериментальними даними, наведеними в роботі [6], де було показано, що гранична похибка вимірювання геометричних параметрів за допомогою ПЗЗ може бути зменшена на порядок, наприклад, до 1 мкм при лінійному розмірі ЕРЗ 10 мкм.

Висновки

Незважаючи на те, що ТІВС широко використовуються для наукових та технологічних досліджень і є технічними засобами з потенційно високою точністю вимірювання, до цього часу мають місце значні розходження в оцінках похибки вимірювання ТІВС, пов'язані із застосуванням різних методик.

Геометричний підхід є загальноприйнятим і для сучасних ТІВС дає значення похибки в діапазоні від 5 мкм до 10 мкм.

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

Імовірнісний підхід до визначення потенційних характеристик ТІВС обґрунтовує можливість зменшення похибки вимірювання без зміни структури та

елементної бази оптико-електронної схеми ТІВС до значень, які в 5 і більше разів можуть перевищувати значення, отримані при застосуванні інших підходів.

Отримані результати мають важливе наукове та практичне значення, оскільки дозволяють суттєво розширити діапазон застосувань ТІВС. Зокрема, розроблений в статті імовірнісний підхід забезпечує обґрунтоване використання ТІВС в системах керування рухом в нанопросторі.

Література

1. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. Телевизионные измерительные системы. -М.: Связь, 1980. – 168 с.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. - Л.:Машиностроение, 1983. – 696 с.
3. Рыфтин Я.А. Телевизионная система. Теория. - М.: Сов.радио, 1967. – 271с.
4. Шостацкий Н.Н. Применение теории дискретизации для анализа разложения изображений на матрицах ПЗС // Техника средств связи, сер. "Техника телевидения". – 1982. – Вып.2.– С.3-14.
5. Брацлавец П.Ф., Росселевич И.А., Хромов Л.И. Космическое телевидение. – М.: Связь, 1973.
6. Маслюков Ю.С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – №4. –С.70-73.

<p>Маркин М.А., Маркина О.Н. Оценка погрешности измерения геометрических параметров при помощи телевизионных информационно-измерительных систем</p> <p>В статье проанализировано проблему оценки погрешности измерения геометрических параметров при помощи телевизионных информационно-измерительных систем. Рассмотрено три подхода к оценке погрешности измерения: геометрический, пространственно-частотный и вероятностный. Доказано, что пространственно-частотный подход вследствие учета реальных значений входного контраста и условий формирования сигнала позволяет получить наиболее достоверные оценки погрешности измерения.</p>	<p>Markin M., Markina O. Evaluation of accuracy of the geometrical parameters by means of television informative-measuring systems</p> <p>The problem of estimating of accuracy for measuring of geometrical parameters using television informative-measuring systems. Three approaches for estimating accuracy of measurement were considered: the geometric, spatial frequency and probabilistic. It was shown that the space-frequency approach as a result of incorporation of the real values of the input contrast and the terms of the signal can get the most accurate assessment of error.</p>
---	---

*Надійшла до редакції
16 квітня 2009 року*