

УДК 531.7:004.932

Ю.О. Подчашинський, к.т.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМІВ НА ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯХ ПРИ ВІДЕОВІМІРЮВАННЯХ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

В статті визначено статистичні характеристики шумів на відеозображеннях, які містять вимірювальну інформацію про лінійні й кутові переміщення об'єктів. Отримані характеристики використовуються для розрахунку похибок відеовимірювань механічних величин та для визначення методів зменшення цих похибок.

Одним із ефективних методів вимірювань механічних величин є алгоритмічна обробка сигналів, що містять інформацію про об'єкт вимірювань. Наприклад, при експериментальному дослідженні процесів механічної деформації актуальним завданням є вимірювання і реєстрація лінійних розмірів зразка матеріалу, що змінюються в процесі деформації, а також визначення лінійних і кутових переміщень окремих ділянок зразка. Результати цих вимірювань, отримані при випробуванні конструкційних матеріалів на розтягання, використовуються для визначення міцності матеріалів [14].

Для визначення лінійних і кутових переміщень окремих ділянок зразка доцільно перетворювати візуальну інформацію про переміщення у відеозображення і виконувати алгоритмічну обробку отриманих відеозображень, тобто виконувати відеовимірювання механічних величин [13]. Використання відеовимірювань дозволяє з мінімальними затратами роботи і часу отримати повну і точну інформацію про процеси механічної деформації зразків конструкційних матеріалів.

Відомо [1, 9, 10], що на якість відеозображень суттєво впливає шум, присутній на цих відеозображеннях. Шум виникає в електронних схемах, що формують відеозображення, і викликає похибки геометричних вимірювань. Загальні відомості про характеристики власних шумів в електронних схемах викладені в [4, 6]. Моделі шумів, що використовуються при цифровій обробці зображень, наведені в [9]. Шуми в напівпровідникових перетворювачах "світло-сигнал" пристроїв формування відеозображень описані в [8].

Вказані математичні моделі шумів є загальними моделями, орієнтованими на визначення впливу шумів на візуальну якість відеозображень. Але вони не дозволяють безпосередньо визначити вплив шумів на результати відеовимірювань механічних величин і не враховують особливості апаратних засобів автоматизованої системи для відеовимірювань. Тому виникає завдання визначити статистичні характеристики шумів на цифрових відеозображеннях, що використовуються для відеовимірювань механічних величин, і розробити математичні моделі, що відображають вплив шумів на точність відеовимірювань. Вирішення цієї проблеми і є темою даної статті.

Для відеовимірювань суттєвими є такі властивості шуму в пристроях формування відеозображень.

1. Основними компонентами шуму, які слід брати до уваги при розрахунках, є тепловий і дробовий шум електронних схем, в тому числі шум вихідного пристрою напівпровідникового перетворювача "світло-сигнал".

2. Шум, присутній у відеосигналі, є адитивний випадковий процес з нормальним законом розподілу.

3. Тепловий шум має властивості "білого" шуму і статистично незалежний від корисного сигналу.

4. Дробовий шум може бути апроксимований "білим" шумом в смузі частот відеосигналу.

5. Для безпосереднього аналітичного розрахунку значень ймовірнісних характеристик шуму необхідно виконати складні розрахунки і провести аналіз складних електричних схем. Тому більш доцільно визначити статистичні характеристики шуму на основі непрямих методів, наприклад використовуючи значення співвідношення сигнал-шум для відеосигналу на виході пристрою формування відеозображень.

Вказані властивості характеризують шум в момент його виникнення. Але у вимірювальному каналі автоматизованої системи для відеовимірювань механічних величин шум разом з корисним відеосигналом проходить ряд перетворень [13]. В результаті статистичні характеристики шуму можуть значно змінитися. Тому визначимо статистичні характеристики шуму для кінцевого результату цих перетворень, тобто для цифрового відеозображення, яке зберігається у вказаній автоматизованій системі і на якому вимірюються лінійні та кутові переміщення об'єктів.

Визначимо кореляційну функцію шуму на цифрових відеозображеннях, що використовуються для відеовимірювань механічних величин. Тепловий і дробовий шум, що виникають в пристрої формування відеозображень, за своїми властивостями наближаються до "білого" шуму. Але при проходженні шуму через електронні схеми з обмеженою смугою частот, що має місце у вимірювальному каналі, характер шуму змінюється.

В [5] розглянуто проходження "білого" шуму через багатокаскадний підсилювач з частотною характеристикою

$$H(\omega) = \exp\left\{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\beta^2}\right\},$$

де ω_0 – частота, на якій частотна характеристика має максимальне значення,

$$\beta = \frac{\Delta\omega_n}{\sqrt{\pi}},$$

де $\Delta\omega_n$ – ширина смуги перепускання підсилювача, $\Delta\omega_n = 2\pi\Delta f_n$,

Δf_n – ширина смуги перепускання в Гц.

Кореляційна функція шуму на виході багатокаскадного підсилювача [5]:

$$K_w(\tau) = \frac{N_0\beta}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{\beta^2\tau^2}{4}\right\} \cdot \cos(\omega_0\tau),$$

де N_0 – спектральна щільність "білого" шуму.

Коефіцієнт кореляції (нормована кореляційна функція):

$$R_w(\tau) = \exp\left\{-\frac{\beta^2\tau^2}{4}\right\} \cdot \cos(\omega_0\tau).$$

В даному випадку для підсилення відеосигналу використовуються широкосмугові електронні схеми. Тому можна вважати, що $\omega_0 = 0$, $\beta = 4\sqrt{\pi}f_v$, де $f_v = 5$ МГц – верхня межа смуги частот підсилювача.

В результаті маємо:

$$K_w(\tau) = \sigma_w^2 \cdot \exp\left\{-4\pi \cdot f_v^2 \cdot \tau^2\right\}; \tag{1}$$

$$R_w(\tau) = \exp\left\{-4\pi \cdot f_v^2 \cdot \tau^2\right\}, \tag{2}$$

де σ_w^2 – дисперсія шуму на виході підсилювача.

Визначимо інтервал кореляції τ_0 напруги шуму на вході АЦП. Відомо, що

$$|R_w(\tau)| < 0,05 \text{ для } \tau > \tau_0.$$

Використовуючи формулу (2), маємо:

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{-\ln(0,05)}{4\pi \cdot f_v^2}}.$$

В автоматизованій системі для відеовимірювань $f_v = 5$ МГц. Тоді $\tau_0 = 9,77 \cdot 10^{-8}$ с.

Можливий і інший варіант визначення інтервалу кореляції. Інтервал кореляції – це половина ширини основи прямокутника одиничної висоти, площа якого дорівнює площі під кривою модуля коефіцієнта кореляції:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |R(\tau)| d\tau.$$

Виходячи з цього визначення і на основі теореми Хінчина–Вінера, яка пов'язує кореляційну функцію і енергетичний спектр, для випадкового процесу з додатною кореляційною функцією в [5] отримано вираз для визначення інтервалу кореляції:

$$\tau_0 = \frac{W(0)}{4K(0)},$$

де W – спектральна щільність потужності шуму,

$$W(0) = W(\omega)|_{\omega=0}, \quad K(0) = K(\tau)|_{\tau=0}.$$

В даному випадку шум на виході пристрою формування відеозображень має додатну кореляційну функцію (1). Тому

$$\begin{aligned} K_u(0) &= \sigma_u^2, \\ W_u(\omega) &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} K_u(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau = \\ &= 2\sigma_u^2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-4\pi \cdot f_s^2 \cdot \tau^2 - j\omega\tau\} d\tau = \frac{\sigma_u^2}{f_s} \cdot \exp\left\{-\frac{\omega^2}{16\pi \cdot f_s^2}\right\}, \\ W_u(0) &= \frac{\sigma_u^2}{f_s}. \end{aligned}$$

В результаті маємо:

$$\tau_0 = \frac{1}{4f_s}.$$

В автоматизованій системі для відеовимірювань $f_s = 5$ МГц. Тоді $\tau_0 = 5,0 \cdot 10^{-8}$ с.

Порівнюючи два варіанти розрахунку значення інтервалу кореляції, можна зауважити, що отримані значення мають деяку розбіжність. Це пояснюється відмінностями в підході до визначення інтервалу кореляції за графіком нормованої кореляційної функції.

Перший варіант визначення інтервалу кореляції використовує тільки порівняння значень нормованої кореляційної функції з довільно вибраним пороговим значенням. Другий варіант визначення інтервалу кореляції використовує інтегральний підхід до графіка нормованої кореляційної функції і краще відповідає фізичній суті задачі, що розв'язується. Тому доцільно використовувати результати визначення інтервалу кореляції за другим варіантом.

Після перетворення відеосигналу в цифрову форму шум присутній в дискретних відліках відеосигналу, що утворюють цифрове відеозображення. Для типового розміру відеозображення по горизонталі $H = 720 \dots 800$ дискретних точок [11, 12] інтервал дискретизації $\delta_d = (7,22 \dots 6,50) \cdot 10^{-8}$ с. В даному випадку $\tau_0 < \delta_d$. Таким чином, шум, присутній на цифровому відеозображенні, має властивості "білого" шуму, тобто його дискретні відліки некорельовані між собою.

Визначимо статистичні характеристик шуму на основі співвідношення сигнал-шум. Співвідношення сигнал-шум в телевізійній техніці – це є співвідношення повного динамічного діапазону сигналу яскравості (від рівня чорного $U_{\text{ч}}$ до рівня білого $U_{\text{б}}$) до діючого значення напруги шуму $U_{\text{ш д}}$ [3]:

$$\Psi = 20 \lg \frac{U_{\text{б}} - U_{\text{ч}}}{U_{\text{ш д}}}. \quad (3)$$

При розрахунку ймовірнісних характеристик шуму на основі співвідношення сигнал-шум необхідно знайти середньоквадратичне значення його напруги. В формулі (3) можна використовувати середньоквадратичне значення напруги шуму замість діючого значення, якщо шум є ергодичний випадковий процес.

Відповідно до [5] необхідною і достатньою умовою ергодичності випадкового процесу є:

- 1) його стаціонарність у вузькому значенні,
- 2) його метрична транзитивність. Це означає, що будь-яка частина сукупності реалізацій випадкового процесу, вірогідність якої відрізняється від нуля або одиниці, вже не є стаціонарною у вузькому значенні.

Розглянемо питання про стаціонарність шуму на вході АЦП.

Напруга шуму у відеосигналі – це є сума напруг теплового і дробового шумів. Тепловий шум є стаціонарний випадковий процес, оскільки його характеристики не залежать від часу. Рівень дробового шуму в загальному випадку залежить від значень напруги відеосигналу, які змінюються в часі. В даному випадку будемо розглядати дробовий шум для максимального значення напруги відеосигналу (максимального значення яскравості точок відеозображення). Тому шум, присутній у відеосигналі, можна вважати стаціонарним випадковим процесом. Це відповідає оцінці щодо максимального можливого значення похибки вимірювань.

Виходячи з визначення співвідношення сигнал-шум, шум має середнє значення і дисперсію, які не залежать від часу, а його кореляційна функція залежить тільки від різниці $\tau = t_2 - t_1$.

Таким чином, шум є стаціонарний випадковий процес, стаціонарний в широкому значенні. Відомо, що для випадкового процесу з нормальним розподілом стаціонарність в широкому і вузькому значенні співпадають. Оскільки шум має нормальний розподіл, то він стаціонарний в вузькому значенні (суворо стаціонарний).

Для того, щоб стаціонарний нормальний випадковий процес був ергодичним (виконувалася умова метричної транзитивності), достатня безперервність його енергетичного спектру, тобто збіжність інтегралу $\int_{-\infty}^{\infty} |K(\tau)| d\tau$ [5].

В даному випадку шум є стаціонарним нормальним випадковим процесом, кореляційна функція якого визначається формулою (1). Тому

$$\int_{-\infty}^{\infty} |K(\tau)| d\tau = \sigma_w^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-4\pi \cdot f_g^2 \cdot \tau^2\} = \frac{\sigma_w^2}{2f_g}$$

Таким чином, даний інтеграл збігається і шум є ергодичний випадковий процес. Тому формулу (3) можна записати у такому вигляді:

$$\Psi = 20 \lg \frac{U_6 - U_w}{\sigma_w} \tag{4}$$

Співвідношення сигнал-шум відомого для відеосигналу на виході конкретного пристрою формування відеозображень. Тому на основі формули (4) можна визначити середньоквадратичне значення шуму для цифрового зображення:

$$\sigma_w = \frac{Y_{\max}}{10^{(\Psi/20)}} \tag{5}$$

Для визначення максимального практично можливого значення шуму використовується коефіцієнт амплітуди [2]. Для шуму з нормальним законом розподілу значення коефіцієнта амплітуди $K_a = 3$ (ймовірність пікових значень шуму, що перевищують максимальне значення, дорівнює 0,3 %). Тоді

$$U_{w \max} = K_a \cdot \sigma_w = \frac{3 \cdot Y_{\max}}{10^{(\Psi/20)}} \tag{6}$$

Співвідношення сигнал-шум в каналі яскравості для відеокамер знаходиться в межах 40–50 дБ [11, 12]. Для формату запису відеозображень VHS співвідношення сигнал-шум дорівнює 43 дБ, для формату S-video (SVHS): 45 дБ, для формату Betacam: 49–51 дБ. Цифрові пристрої формування і запису відеозображень забезпечують співвідношення сигнал шум близько 55 дБ. Характеристики шуму на цифровому відеозображенні для типових значень співвідношення сигнал-шум розраховані за формулами (5), (6) і наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики шуму на цифровому відео зображенні

Співвідношення сигнал-шум для пристрою формування відеозображень, дБ	40	43	45	50	55
Максимальне значення напруги шуму, дискретних рівнів	7,65	5,42	4,30	2,42	1,36
Середньоквадратичне значення напруги шуму, дискретних рівнів	2,55	1,81	1,43	0,81	0,45

Примітка. Значення в дискретних рівнях обчислені виходячи з того, що динамічному діапазону сигналу яскравості від рівня чорного до рівня білого відповідають цифрові значення 0–255 (8-бітовий цифровий код).

В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки. Одним з факторів, які впливають на похибки відеовимірювань механічних величин, є шум, що виникає в пристрої формування відеозображень і присутній на цифрових відеозображеннях. Статистичні характеристики шуму і відповідної складової частини похибки вимірювань розраховано на основі співвідношення сигнал-шум для відеосигналу ((5), (6); табл. 1). Доведено, що в даному випадку шум на цифровому відеозображенні можна вважати стаціонарним і ергодичним

випадковим процесом з нормальним законом розподілу. Цей шум має властивості "білого шуму" і статистично незалежний від корисного відеосигналу. На основі отриманих результатів можна визначити похибки відеовимірювань механічних величин в автоматизованій системі для дослідження деформації конструкційних матеріалів [14] і розробити заходи з підвищення точності таких вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Абламейко С.В., Лагуновский Д.М.* Обработка изображений: технология, методы, применение. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.
2. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Советское радио, 1977. – 608 с.
3. *Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И.* Телевизионные измерительные системы. – М.: Связь, 1980. – 168 с.
4. *Жалуд В., Кулешов В.М.* Шумы в полупроводниковых устройствах / Под общей ред. А.К. Нарышкина. – М.: Советское радио, 1977. – 416 с.
5. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. – Книга первая. – М.: Советское радио, 1969. – 752 с.
6. *Отт Г.* Методы подавления шумов и помех в электронных схемах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 320 с.
7. *Певзнер Б.М.* Качество цветных телевизионных изображений: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
8. *Пресс Ф.П.* Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
9. *Прэнтт У.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 792 с.
10. Цифровое кодирование телевизионных изображений / И.И. Цуккерман, Б.М. Кац, Д.С. Лебедев и др. / Под общ. ред. И.И. Цуккермана. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.
11. *Шарыгин М.Е.* Сканеры и цифровые камеры. – СПб.: BHV – Санкт-Петербург, 2000. – 384 с.
12. *Шлихт Г.Ю.* Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
13. *Подчашинський Ю.О.* Похибки квантування і дискретизації при геометричних вимірюваннях на цифрових відеозображеннях // Вісник ЖІТІ. – 2001. – № 16 / Технічні науки. – С. 148–153.
14. *Grabar I., Kolodnitska R., Podchashinsky Yu.* Hardware-software complex for research of kinetics of elastic – plastic deformations and destructions of rigid bodies // Proceedings of the International Scientific Conference "Mechanics 2000". – Rzeszow (Poland). – 2000. – P. 103–108.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання механічних величин;
- цифрова обробка відеозображень.

Подано 10.10.2003