

**АНАЛІЗ ПОХИБОК ЗАСОБУ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ
СТАНУ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ**

У роботі проаналізовано похибки засобу телевізійного вимірювального контролю та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ для прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції за місцем їх виникнення. Досліджено залежності інструментальної та методичної складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів. Оптимальна структура засобу мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю обирається з компромісу між зростанням інструментальної похибки та зменшенням методичної похибки зі зростанням кількості спектральних каналів.

Ключові слова: мультиспектральний контроль, неоднорідні біологічні середовища, засіб контролю, телевізійний вимірювальний контроль.

S. M. KVATERNYUK
Vinnytsia National Technical University

**ANALYSIS OF ERRORS IN THE MEANS OF MULTISPECTRAL TELEVISION MEASUREMENT CONTROL
PARAMETERS AND DIAGNOSING THE STATE OF HETEROGENEOUS BIOLOGICAL MEDIA**

The errors of the means of television measurement control and diagnosing the state of inhomogeneous biological media for applied tasks of environmental monitoring, biomedical diagnostics and quality control at the place of their origin are analyzed. The dependences of the instrumental and methodological component of the error in measuring the parameters of inhomogeneous biological media on the number of spectral channels are studied. The optimal structure of the multispectral television measuring instrument is selected from a compromise between the growth of the instrumental error and the reduction of the methodical error with an increase in the number of spectral channels.

Keywords: multispectral control, heterogeneous biological environment, control means, TV measurement control.

Вступ

На основі результатів опрацювання оптичних характеристик неоднорідних біологічних середовищ можливо опосередковано виміряти їх біофізичні та структурні параметри. Для прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції важливим є можливість проведення швидких неінвазивних досліджень, оскільки їх результати необхідні для оперативного реагування на відхилення цих параметрів від нормальних значень. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення достовірності контролю параметрів неоднорідних біологічних середовищ за рахунок вдосконалення методу мультиспектральних телевізійних вимірювань. Засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю дозволяють вимірювати координати у n -вимірному мультиспектральному просторі у кожному пікселі зображення на відміну від засобів цифрової колориметрії зображень, які вимірюють координати кольору у тривимірному колірному просторі [1, 2]. Метою роботи є вдосконалення засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

Аналіз структурної схеми засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань

Структурну схему засобу телевізійного вимірювального контролю параметрів та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ на мультиспектральних телевізійних вимірювань представлено на рис. 1. Пристрій містить джерело випромінювання з яким оптично з'єднано дифузний розсіювач, об'єкт дослідження та шкала зразків дифузного відбиття. Об'єкт оптично з'єднано з входом CCD-камери, яка через мікроконтролерний ресетруючий пристрій під'єднана до блоку автокалібрування мультиспектральних параметрів. Здійснюється автокалібрування результатів мультиспектральних вимірювань відносно зразку з відомим значенням коефіцієнту дифузного відбивання $M'_i = M_i / R(\lambda_i)$. Отримані результати подаються на блок розрахунку параметрів неоднорідних біологічних середовищ з використанням регресійного рівняння [1]:

$$f_x = b_{0,0} + \sum_{i=1}^n (b_{1,i} M'_i + b_{2,i} M'^2_i + b_{3,i} M'^3_i + \dots b_{k,i} M'^k_i), \quad (1)$$

де M'_i – мультиспектральні параметри (координати у n -вимірному мультиспектральному просторі), $b_{k,i}$ – регресійні коефіцієнти.

Розраховані параметри неоднорідних біологічних середовищ порівнюються з нормою. У випадку, якщо хоча б один з цих параметрів не відповідає нормі приймається висновок про непридатний стан об'єкта дослідження.

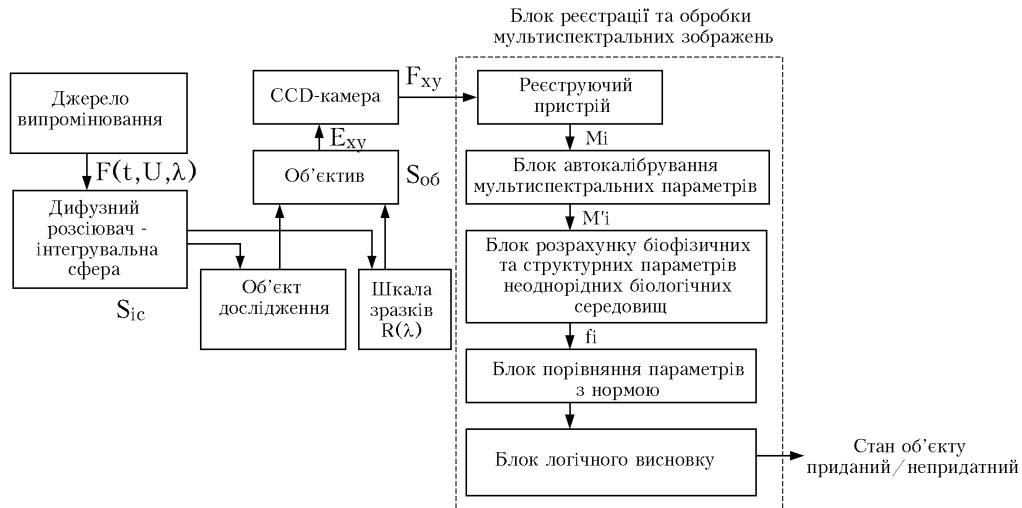


Рис. 1. Структурна схема засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань

Аналіз інструментальних похибок вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ

У лабораторних макетах засобів мультиспектральних телевізійних вимірювань у якості джерел випромінювання використовуються лінійки світлодіодів із застосуванням кола зворотного зв'язку для стабілізації світлового потоку, що забезпечує довготривалу стабільність випромінювання на рівні $\delta_{source} = 5\%$.

Похибка, що створюється інтегрувальною сферою δ_{dd} визначається такими складовими, як δ_ρ – відхилення значення коефіцієнту дифузного відбивання матеріалу стінок внутрішньої порожнини інтегрувальної сфери від номінального значення пов'язане зі зміною фізичного стану покриття; δ_{tol} – похибка, що визначається конструктивними допусками при виготовленні сфери:

$$\delta_{tol} = \frac{\Delta S_{sphere}}{S_{sphere}} 100\% = \frac{2\Delta r_{sphere}}{r_{sphere}} 100\% = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-2}} 100\% = 0,033\%, \quad (2)$$

Таким чином обчислимо загальну похибка, що створюється інтегрувальною сферою

$$\delta_{dd} = \sqrt{\delta_\rho^2 + \delta_{tol}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,033^2} = 0,501\%. \quad (3)$$

Похибка, що створюється за рахунок спотворення зображення елементами об'єктиву CCD-камери $\delta_{obj} = 0,5\%$, визначається такими складовими, як сферичні аберації, кома, астигматизм, дисторсія, хроматичні аберації. Об'єктив CCD-камери розрахований на відстань до об'єкту діагностування 300 мм, що відповідає діаметру інтегрувальної сфери, при цьому забезпечуються мінімальні спотворення зображення.

Похибка аналого-цифрового перетворення виникає за рахунок кінцевої кількості дозволених рівнів сигналу при квантуванні за рівнем $\delta_{ADC ccd}$ та інструментальної похибки, зумовленої наявністю шумів та випадкових завад у CCD камері $\delta_{noise ccd}$. Виникнення інструментальної похибки обумовлене багатьма факторами та її закон розподілу близький до нормального. Обчислимо її значення на основі співвідношення сигнал-шум для CCD камери $D_{S/N} = 70$ дБ

$$\delta_{noise ccd} = 100\% / (10^{D_{S/N}/20}) = 100\% / (10^{70/20}) = 0,032\%. \quad (3)$$

Похибка квантування $\delta_{ADC ccd}$ при великій кількості розрядів може бути описана прямокутним законом розподілу, що відповідає рівній щільності ймовірності похибки квантування в межах $\pm h_k / 2$, де h_k – крок квантування. З врахуванням максимальних та мінімальних рівнів сигналу на елементах матриці:

$$\delta_{ADC ccd} = \frac{F_H}{2 \cdot F_{X \max}} \cdot 100\% = \frac{1}{2 \cdot 2^8} \cdot 100\% = 0,2\%. \quad (4)$$

Середньоквадратичне значення похибки квантування [3]

$$\delta_{SD ADC ccd} = \frac{\delta_{ADC ccd}}{\sqrt{12}} = 0,056\%. \quad (5)$$

Систематична складова похибки вимірювання координат у n-вимірному мультиспектральному просторі визначається похибками, що створюються джерелом випромінювання δ_{source} , дифузним розсіювачем δ_{dd} та об'єктивом δ_{obj} . Визначимо значення систематичної складової похибки вимірювання координат у n-вимірному мультиспектральному просторі, враховуючи, що дія впливних факторів незалежна:

$$\delta_{sys.M} = \sqrt{\delta_{source}^2 + \delta_{dd}^2 + \delta_{obj}^2} = \sqrt{5^2 + 0,501^2 + 0,5^2} = 5,05\% . \quad (6)$$

При виконанні автокалібрування систематична складова похибки вимірювання мультиспектральних параметрів компенсується. Випадкова складова похибки вимірювання мультиспектральних параметрів визначається похибками за рахунок шумів та квантування при аналого-цифровому перетворенні:

$$\delta_{rand.Mi} = \sqrt{\delta_{noise.ccd}^2 + \delta_{ADC.ccd}^2} = \sqrt{0,032^2 + 0,056^2} = 0,064\% . \quad (7)$$

Випадкова складова похибки вимірювань параметрів середовища буде визначатись випадковими похибками відповідних мультиспектральних параметрів, які потрапили у загальне регресійне рівняння

$$\delta_{instr.} = \delta_{rand.f} = \sqrt{\delta_{rand.M1}^2 + \delta_{rand.M2}^2 + \dots + \delta_{rand.Mi}^2} . \quad (8)$$

Графік залежності випадкової складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів наведено на рис. 2. Аналізуючи залежність випадкової складової інструментальної похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів можна помітити, що вона зростає пропорційно \sqrt{N} .

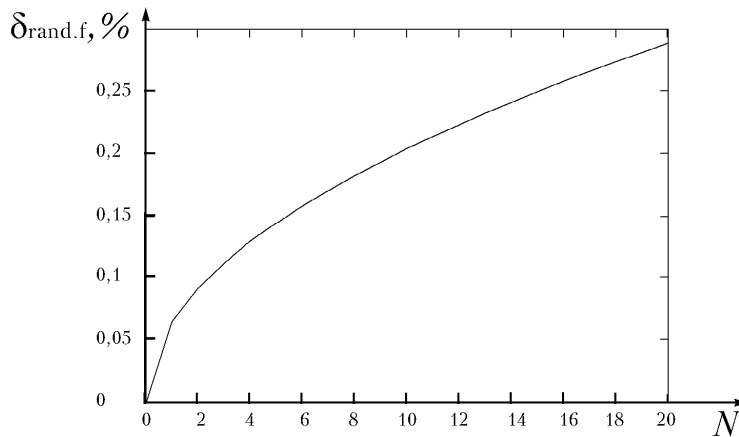


Рис. 2. Залежність випадкової складової похибки вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів

Аналіз методичної та загальної похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ

На основі математичного моделювання процесу вимірювання координат у n-вимірному мультиспектральному просторі для кожного пікселя зображення можливо опосередковано визначити з використанням множинної регресії [1] необхідні біофізичні та структурні параметри неоднорідних біологічних середовищ. Загальна схема математичної моделі відновлення біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ за мультиспектральними параметрами описана у роботі [4]. За умови відомих параметрів неоднорідних біологічних середовищ розраховують мультиспектральні параметри у кожному пікселі зображення, тобто розв'язують пряму оптичну задачу. Далі з використанням регресійних рівнянь, що пов'язують параметри неоднорідних біологічних середовищ та мультиспектральні параметри [5] здійснюють опосередковане вимірювання необхідних біофізичних чи структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, тобто розв'язують обернену оптичну задачу. Якщо у таку математичну модель процесу вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ за мультиспектральними параметрами не вносити інструментальних похибок, що відповідають ПЗЗ-камері, фільтрам та джерелам випромінювання, то отримана різниця між заданими значеннями параметрів та відновленими після множинної регресії значеннями відповідатиме саме методичній складовій похибки. На рис.3,а наведена залежність методичної складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів на прикладі відновлення коефіцієнту оксигенації крові. Наведена залежність методичних похибок вимірювання від кількості спектральних каналів отримана у ході складного імітаційного моделювання багатопарового неоднорідного біологічного середовища. При цьому помітно, що методична складова похибки вимірювань при збільшенні кількості спектральних каналів зменшується з кожним кроком все менше, за рахунок більш точної відповідності регресійного рівняння математичній моделі нелінійного біологічного середовища. Розрахуємо загальну похибку вимірювань біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, як суму інструментальної і методичної похибок:

$$\delta_{gen} = \delta_{instr.} + \delta_m . \quad (9)$$

Отримана залежність загальної похибки вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів на прикладі відновлення коефіцієнту оксигенації крові наведена на рис. 3,б.

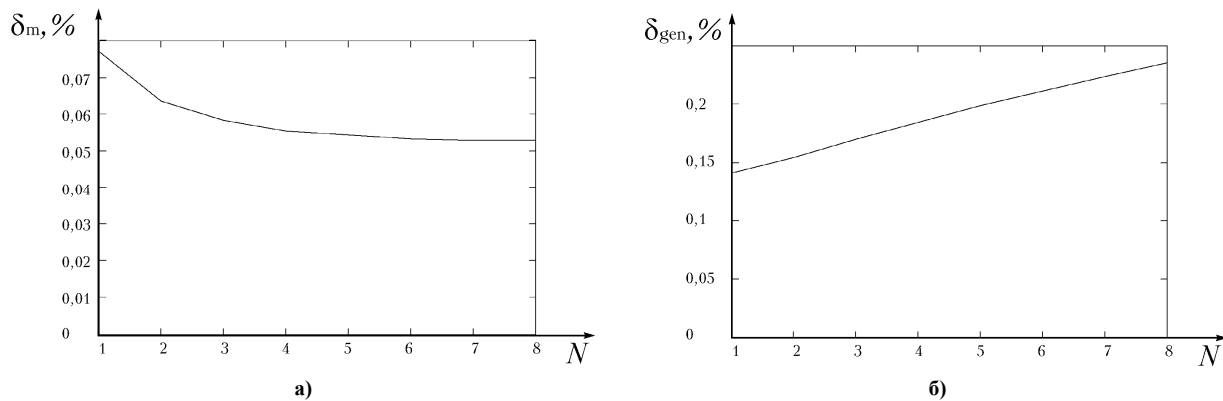


Рис. 3. Приклад залежності методичної та загальної похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів

Оскільки при зростанні кількості спектральних каналів інструментальна складова похибки зростає, а методична складова похибки зменшується, то для вибору оптимальної кількості спектральних каналів засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань необхідно обрати такі спектральні канали, що забезпечать мінімальну загальну похибку вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

Висновки

Проаналізовано похибки засобу вимірювання координат у n -вимірному мультиспектральному просторі неоднорідних біологічних середовищ для прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції за місцем їх виникнення. Проаналізовано залежності інструментальної та методичної складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів. Встановлено, що загальна похибка вимірювань не перевищує 0,25%. При цьому оптимальна кількість спектральних каналів засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань обирається з компромісних міркувань між зростанням випадкової складової похибки при зростанні кількості каналів та зменшенні методичної похибки за рахунок більш точного відображення регресійним рівнянням математичної моделі неоднорідного біологічного середовища.

Література

1. Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ / С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 15–22.
2. Аналіз похибок засобу діагностування на основі вимірювання координат кольору нормальних і патологічних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 2. – С. 135–139.
3. Булатов В. Н. Элементы и узлы информационных и управляющих систем (основы теории и синтеза) : учебное пособие / В. Н. Булатов. – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2002. – 200 с.
4. Моделювання спектральних характеристик шару епідермісу біотканини шкіри як об'єкту біомедичної діагностики / В. Г. Петрук, О. Є. Кватернюк, Ю. С. Любчик, С. М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 218–222.
5. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 50–56.

References

1. Kvaternyuk S. M. Metod ta zasoby multispektralnogo televiziynogo vymiryvalnogo kontrolyu stanu neodnorodnyh biologichnyh seredovyshh / S. M. Kvaternyuk // Visnyk Vinnyczkogo politehnichnogo instytutu. – 2017. – №1. – P. 15–22.
2. Analiz pohybok zasobu diagnostuvannya na osnovi vymiryuvannya koordynat koloru normalnyh i patologichnyh biotkanyu / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, O. Ye. Kvaternyuk [ta in.] // Vymiryvalna ta obchyslyvalna tehnika v texnologichnyx procesax. – 2015. – №2. – P. 135–139.
3. Bulatov V. N. Elementy i uzly informatsionnyh i upravlyayuschih sistem (osnovy teorii i sinteza): Uchebnoe posobie / V. N. Bulatov. – Orenburg : GOU VPO OGU, 2002. – 200 p.
4. Modelyuvannya spektralnyh harakterystyk sharu epidermisu biotkanyu shkiry yak obyektu biomedychnoyi diagnostyky / V. G. Petruk, O. Ye. Kvaternyuk, Yu. S. Lyubchyk, S. M. Kvaternyuk // Visnyk Hmelnyczkogo nacionalnogo universytetu. Seriya: Texnichni nauky. – 2015. – № 2. – P. 218–222.
5. Matematyчне modelyuvannya vplyvu parametriv okremykh shariv na spektralni harakterystyky neodnorodnyh biotkanyu / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, O. Ye. Kvaternyuk [ta in.] // Visnyk Vinnyczkogo politehnichnogo instytutu. – 2015. – №3. – P. 50–56.

Рецензія/Peer review : 27.07.2017 р.

Надрукована/Printed : 11.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Петрук В.Г.