Підопригора Ю.А.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

БАГАТОДІАПАЗОННІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ЯК ОСНОВА ТОЧНОСТІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Проведено дослідження багатодіапазонних оптико-електронних систем як основи точності геометричних вимірювань. Підкреслено, що одним із перспективних напрямів розвитку технології і техніки є автоматизація робіт із застосуванням сучасних засобів контролю, що дає змогу підвищити продуктивність обладнання, заощадити ресурси і скоротити частку ручної праці. Зазначється, що за структурною складовою частиною багатодіапазонні оптико-електронні системи мають кілька інформаційних каналів, які з'єднані між собою і всією системою в сукупності. Визначено два види оптико-електронних систем: активну і пасивну. Описано структуру найпростішої системи та наведено вимірювальну схему внутрішньо-основної оптико-електронної системи. На основі схеми математично обґрунтовано принципи визначення енергетичного центру, координат зображень та відокремлено систему координат багатодіапазонних оптико-електронних систем. Обґрунтовано застосування волоконно-оптичних датчиків частотного типу та відокремлено два види датчиків деформації: розподілені на основі ефекту розсіювання Манделштама – Бріллюена; квазі-розподілені на основі ефекту резонансного віддзеркалення від волоконно-оптичних брегівських решіток. Описано переваги кожного з них та на основі проведеного аналізу запропоновано методику розрахунку потенційно досяжних метрологічних характеристик для основних методів мультиплексування і реєстрації сигналу, яка базується на спектральному аналізі. Підкреслено, що метод на основі спектрального мультиплексування із застосуванням скануючого інтерферометра Фабрі-Перо є найбільш ефективним та затребуваним. Наведено структурну схему методу та описано взаємодію всіх компонентів. Зазначається, що проблемою цього методу реєстрації є використання н'єзокерамічний привід, який володіє порівняно високою нелінійністю, саме тому потрібно застосування методу калібрування.

Ключові слова: багатодіапазонні оптоелектронні системи, вимірювання, геометричні параметри, точність, спектр, інформаційний канал.

Постановка проблеми. Багатодіапазонні оптико-електронні системи (ОЕС) – це системи, що працюють одночасно у двох або більше оптичних спектральних діапазонах. Нині вони є доволі поширеними у різних сферах науки і техніки [1]. Такі системи успішно використовуються для виявлення різних об'єктів (цілей) у військовій техніці, для моніторингу екологічного стану і контролю навколишнього середовища, на промислових виробництвах, у правоохоронній та охоронній апаратурі тощо. Оскільки проведення натурних випробувань дуже часто пов'язане з великими техніко-економічними і часовими витратами, роль комп'ютерного моделювання в процесі синтезу і аналізу ОЕС, особливо на перших етапах проектування, важко переоцінити. Одним із перспективних напрямів розвитку технології і техніки є автоматизація робіт із застосуванням сучасних засобів контролю, що дає змогу підвищити продуктивність обладнання, заощадити ресурси і

скоротити частку ручної праці. За структурним складником багатодіапазонні оптико-електронні системи мають кілька інформаційних каналів, які з'єднані між собою і всією системою в сукупності.

Загалом багатодіапазонні оптико-електронні системи використовують під час контролю площинності або просторового положення об'єктів щодо базової площини під час спорудження доріг, шляхопроводів, аеродромів, а також під час визначення взаємного положення елементів великогабаритних конструкцій. Такі системи створюють протяжну оптичну базову площину, щодо якої здійснюється позиціонування. Безконтактність і можливість повної автоматизації процесу контролю дають змогу створювати універсальні ОЕС і використовувати їх для вирішення таких завдань, як контроль положення робочих органів систем автоматичного управління (САУ) будівельної та сільськогосподарської техніки, позиціонування частин і блоків у процесі монтажу в промисло-

вому виробництві і суднобудуванні. Саме тому тема цієї наукової роботи є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні кілька років чимало як зарубіжних, так і вітчизняних учених здійснили відкриття у сфері багатодіапазонних оптико-електронних систем.

М.С. Мамута [1] підійшла з технічної позиції до формування дієвої ОЕС, авторкою розроблено математичну модель двоканальної ОЕСС для дослідження процесу формування ТВ- та ТПВ-сигналів та їх комплексування з урахуванням особливостей зорового сприйняття візуальної інформації оператором. Розроблена математична модель двоканальної ОЕСС дозволяє враховувати особливості проходження сигналу в усіх ланках інформаційного комплексу «фоново-цільова обстановка (ФЦО) – двоканальна ОЕСС – оператор» та особливості процесу комплексування даних і дає змогу вибирати найкращий для даних умов функціонування метод комплексування, забезпечуючи найбільшу ефективність роботи.

Оцінку ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації запропонували В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко та М.С. Мамута [2]. Науковцями запропоновано методику оцінювання ефективності функціонування багатоканальної оптико-електронної системи спостереження (БОЕСС) із комплексуванням інформації. Вона поєднує таку споживчу характеристику ОЕСС, як імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації, з показником якості комплексованого зображення – показником успішності виконання завдання.

В.В. Кондрат, О.І. Костенко та В.В. Куценко [3] розкрили шляхи модернізації оптико-електронних систем.

Із зарубіжних авторів варто відзначити роботи Li Shao, Yun-long Wu [4], Schiopu P., Manea A., Cristea I., Grosu N., Craciun A. I., Craciun A., & Granciu D. [5], Lee E. S., Lee D. G., Lee S. H. [6], Bushlin Y., Baum G., Engel M. Y. [7], Simmons O. D., Jayner T. W., Weppner M. B. [8], Maurer T., Driggers R. G., Vollmerhausen R., Friedman M. M. [9], McKee D. C., Simmons O. D., Makar R. J. [10], Guissin R., Lavi E., Palatnik A. [11], Franning J., Halford C., Jacobs E. [12] та інших.

Проте, враховуючи описані наукові набутки за темою, питання дослідження багатодіапазонних оптико-електронних систем як основи точності геометричних вимірювань залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Мета статті – здійснити дослідження багатодіапазонних оптико-електро-

нних систем як основи точності геометричних вимірювань.

Виклад основного матеріалу дослідження. Протягом тривалого часу співіснують електронні та оптичні датчики, які застосовують електронні методи обробки інформації, оскільки оптичні сигнали чудово перетворюються в електронну, а електронні сигнали – в оптичну форму.

Як правило, оптико-електронна система із внутрішньою базою являє собою активну або пасивну оптико-електронну систему, яка працює як далекомір внутрішньої бази. Така система призначена для контролю розташування малогабаритного об'єкта в певній сфері дослідження. Найпростіший альтернативний варіант внутрішньо-основної оптико-електронної системи складається з двох цифрових відеокамер. Кожна камера включає об'єктив та візуатор області. Базова відстань між відеокамерами становить $B = B_1 + B_2$ (рис. 1). Система координат приладу позначається як OXYZ. Вісь OY (вісь вертикальних переміщень) спрямована вгору і проходить через основні точки об'єктивів в обох відеокамерах. Вісь OZ (вісь відстані) паралельна оптичним осям об'єктивів. Вісь OX (вісь горизонтальних переміщень) спрямована вправо, якщо дивитися на систему, що знаходиться спереду.

Рис. 1. Вимірювальна схема внутрішньо-основної оптико-електронної системи

У процесі вимірювань визначаються координати еталонної позначки. У разі пасивного варіанту еталонна позначка може бути представлена як світлодіод. B_1 і B_2 – відстані базової лінії від осі OZ до оптичних осей об'єктивів лінз O_1 і O_2 в мм, α'_1 і α'_2 – відстані від основних точок об'єктивів до лінз зображення камер у мм.

У процесі вимірювання лінзи відеокамер проєктують зображення керуючого елемента на поверхні (рис. 2). x'_1, x'_2 (1) та y'_1, y'_2 (2) – енергетичні центри координат зображень елемента керування для обох відеокамер. x'_{01}, x'_{02} та y'_{01}, y'_{02} – точки витоків на візуалізаторах відеокамер. Відеокамери формують два цифрових відеосигнали, які надходять до блоку обробки інформації. Потім кадри, що містять зображення елемента управління, зберігаються в основній пам'яті комп'ютера. Існує два етапи для визначення координат елемента управління відносно базової точки по вертикалі (вісь OY), поздовжній осі (вісь OZ) та горизонталі (вісь OX).

Спочатку вертикальні координати y'_1, y'_2 та горизонтальні x'_1, x'_2 координати елемента управління зображення енергетичних центрів обчислюються в блоці обробки (рис. 2).

Алгоритм визначення енергетичного центру є найпростішим і забезпечує точність близько 0,1–0,01 розміру пікселя [7]. Потім координати центрів зображень передаються до початкових точок у візуалізаторах області (3), де p_x, p_y – це розмір горизонтального та вертикального пікселів.

$$\begin{aligned} x'_1 &= \frac{\sum_{n=x'_{1max}-10}^{x'_{1max}+10} nU(y'_{1max}, n)}{\sum_{n=x'_{1max}-10}^{x'_{1max}+10} U(y'_{1max}, n)} \\ x'_2 &= \frac{\sum_{n=x'_{2max}-10}^{x'_{2max}+10} nU(y'_{2max}, n)}{\sum_{n=x'_{2max}-10}^{x'_{2max}+10} U(y'_{2max}, n)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$y'_1 = \frac{\sum_{n=y'_{1max}-10}^{y'_{1max}+10} nU(x'_{1max}, n)}{\sum_{n=y'_{1max}-10}^{y'_{1max}+10} U(x'_{1max}, n)}$$

$$y'_2 = \frac{\sum_{n=y'_{2max}-10}^{y'_{2max}+10} nU(x'_{2max}, n)}{\sum_{n=y'_{2max}-10}^{y'_{2max}+10} U(x'_{2max}, n)} \quad (2)$$

$$x''_1 = (x'_1 - x'_{01}) \cdot p_x$$

$$x''_2 = (x'_2 - x'_{02}) \cdot p_x$$

$$y''_1 = (y'_1 - y'_{01}) \cdot p_y$$

$$y''_2 = (y'_2 - y'_{02}) \cdot p_y \quad (3)$$

Система координат багатодіапазонних оптико-електронних систем має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{x'_1 \cdot \Delta Z}{a'_1} \\ \Delta Y &= \frac{B_1 \left(\frac{B_2}{Z_0} - \frac{y'_2}{a'_2} \right) - B_2 \left(\frac{B_1}{Z_0} - \frac{y'_1}{a'_1} \right)}{\left[\frac{1}{Z_0} (B_1 + B_2) - \left(\frac{y'_1}{a'_1} + \frac{y'_2}{a'_2} \right) \right]} \\ \Delta Z &= \frac{B_1 + B_2}{\left[\frac{1}{Z_0} (B_1 + B_2) - \left(\frac{y'_1}{a'_1} + \frac{y'_2}{a'_2} \right) \right]} \end{aligned} \quad (4)$$

У розглянутій внутрішньо-основній оптико-електронній системі є два фактори, які найбільше впливають на точність вимірювань. Технологічними факторами є помилки в параметрах матеріа-

Рис. 2. Зображення площин відеокамер під час вимірювання

лів, помилки у процесі виробництва та складання деталей системи.

Оптико-електронні вимірювальні системи працюють на основі волоконно-оптичних датчиків частотного типу. Нині найбільш затребуваними є два види датчиків деформації:

- 1) розподілені на основі ефекту розсіювання Мандельштама – Бріллюена;
- 2) квазі-розподілені на основі ефекту резонансного віддзеркалення від волоконно-оптичних брегівських решіток.

Перший тип датчиків – на основі ефекту розсіювання Мандельштама-Бріллюена – вимагає тривалого часу усереднення сигналу, це відбувається у результаті малої величини інтенсивності розсіяного випромінювання; як наслідок, цей тип датчиків використовується тільки для вивчення статичних розподілів деформації.

Стосовно другого типу – на основі ефекту резонансного віддзеркалення від волоконно-оптичних брегівських решіток – варто відзначити спектральність дії та можливість їх використання для вивчення як статичних, так і динамічних деформацій. Також, відповідно до [13], механічна міцність решітки тим більша, чим менша щільність дози опромінення. За однакової щільності дози опромінення, необхідної для створення потрібного показника заломлення, міцність решітки під час запису безперервним випромінюванням у 1,5 раза більша, ніж під час запису імпульсним. Під час запису імпульсним випромінюванням міцність решітки тим більша, чим менша енергія одного імпульсу. Квазі-розподілені датчики інформації на основі ефекту резонансного віддзеркалення від

волоконно-оптичних брегівських решіток можуть використовуватися в діапазоні відносних подовжень $-1 \dots +1\%$ протягом 25 років з імовірністю руйнування 0,1%.

Методики розрахунку потенційно досяжних метрологічних характеристик для основних методів мультиплексування і реєстрації сигналу базуються на спектральному аналізі, найбільш точним за [14] є метод на основі спектрального мультиплексування із застосуванням скануючого інтерферометра Фабрі-Перо.

Структурна схема пристрою, що реалізує описаний метод, наведена на рис. 3.

У цій схемі випромінювання від суперлюмінесцентного діода (СЛД) надходить на оптичний вентиль – пристрій, який запобігає відображенню і розсіюванню назад випромінювання в СЛД. Після проходження оптичного розгалужувача випромінювання, відбите від датчиків $1 \dots N$, надходить на вхід скануючого інтерферометра Фабрі-Перо. Залежно від поданої на його привід напруги змінюється спектр пропускання інтерферометра, тобто інтерферометр працює як фільтр, а випромінювання реєструється фотоприймальним пристроєм (ФПП).

Однією з проблем даного методу реєстрації є те, що використовуваний п'єзокерамічний привід володіє порівняно високою нелінійністю, яка становить 0,21%. У результаті при діапазоні сканування 40 нм похибка вимірювання резонансних довжин хвиль перевищить 80 ... 400 нм.

Для її зменшення потрібно застосування методу калібрування, заснованого на застосуванні реперних точок через вузькі спектральні інтервали, в межах яких похибка компенсується.

Рис. 3. Структурна схема пристрою реєстрації сигналу за допомогою скануючого інтерферометра Фабрі-Перо

Висновки. У роботі здійснено дослідження багатодіапазонних оптико-електронних систем як основи точності геометричних вимірювань. Застосування багатодіапазонних (багатоспектральних) оптико-електронних систем дає змогу підвищити ефективність вирішення багатьох практичних завдань, поліпшити показники якості роботи систем, наприклад збільшити швидкість прийняття рішень під час розпізнавання об'єктів,

підвищити ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілей.

У перспективі розвиток волоконної та інтегральної оптики значно доповнить і розширить можливості волоконно-оптичних датчиків та волоконно-оптичних вимірювальних систем, зробивши їх всеоптичними, оскільки стануть доступними потужні оптичні методи обробки інформації без оптико-електронних перетворень.

Список літератури:

1. Мамута М. С. Підвищення ефективності комплексування оптико-електронних систем спостереження: дис. канд. техн. наук: 05.11.07, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". К, 2013. 203 с.
2. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Мамута М.С. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2012. № 6. С. 127–131.
3. Кондрат В. В., Костенко О. І., Куценко В. В. Шляхи модернізації оптико-електронних засобів розвідки та прицілювання ОБТ. *Радиотехника*. 2018. Вып. 194. С. 34–37.
4. Li Shao, Yun-long Wu. Image metric analysis of laser jamming effect based on edge strength similarity and gray mean square error. *Proc. SPIE 9686*, 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices, 96860O, 25 October 2016; doi: 10.1117/12.2243215; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2243215>
5. Schiopu P., Manea A., Cristea I., Grosu N., Craciun A. I., Craciun A., & Granciu D. Image stabilization for SWIR advanced optoelectronic device. In *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies 2014*. 2015. P. 925819-925819.
6. Lee E. S., Lee D. G., Lee S. H. Opto-mechanical design and analysis of the MSC on the KOMPSAT-2. 20th Congress of the International Commission for Optics. Changchun, China. 2005.
7. Bushlin Y., Baum G., Engel M. Y. FPA sensor performance study using computer simulation. *Proc. SPIE*. 1996. Vol. 2743. P. 252–263.
8. Simmons O. D., Jayner T. W., Weppner M. B. et al. Infrared sensor stimulator (IRSS) installation in the ACETEF, NAWC-AD. *Pros. SPIE*. 2001. Vol. 4366. P. 331–340.
9. Maurer T., Driggers R. G., Vollmerhausen R., Friedman M. M. 2002 NVTherm improvements. *Proc. SPIE*. 2002. Vol. 4719. P. 15–23.
10. McKee D. C., Simmons O. D., Makar R. J. et al. Real-time IR/EO scene simulator (RISS) product improvements. *Proc. SPIE*. 2003. Vol. 5092. P. 259–267.
11. Guissin R., Lavi E., Palatnik A. IRISIM: Infrared Imaging Simulator. *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5784. P. 190–203.
12. Franning J., Halford C., Jacobs E. et al. Multispectral imager modeling. *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5784. P. 136–145.
13. Arakantsev K.G. Oslablenie vlijanija vertikal'nogo gradienta temperaturi vozdušnogo trakta na pogreshnost' izmerenija pologenija ob'ekta. *Izvestija vuzov Priborostroenie*. 2006, No. 8, S. 38–42.
14. Arakantsev K.G., Konyakhin I.A., Timofeev A.N. Precision system for motion path parameters measurement of wheel and rail transport. *Journal of Physics: Conference, Series*. 2006, 48, pp. 998–1002.

Pidopryhora Yu.A. MULTI-RANGE OPTO-ELECTRONIC SYSTEMS AS THE BASIS OF ACCURACY OF GEOMETRIC MEASUREMENTS

A study of multiband optoelectronic systems as a basis for the accuracy of geometric measurements. It is emphasized that one of the promising areas of technology and technology development is the automation of work with the use of modern means of control, which allows to increase the productivity of equipment, save resources and reduce the share of manual labor. It is noted that the structural component of multiband optoelectronic systems have several information channels that are interconnected and the system as a whole. Two types of optoelectronic systems are identified: active and passive. The structure of the simplest system is described and the measuring scheme of the intra-basic opto-electronic system is given. Based on the scheme, the principles of determining the energy center, image coordinates are mathematically substantiated and the coordinate system of multiband optoelectronic systems is separated. The use of fiber-optic frequency sensors is substantiated and two types of deformation sensors are distinguished: distributed on the basis of the Mandelstam-Brillouin scattering effect; quasi-distributed based on the effect of resonant reflection from fiber-

optic Breg lattices. The advantages of each of them are described, and on the basis of the carried out analysis the technique of calculation of potentially achievable metrological characteristics for the basic methods of multiplexing and registration of a signal which is based on the spectral analysis is offered. It is emphasized that the method based on spectral multiplexing using a scanning Fabry-Perot interferometer is the most effective and popular. The structural scheme of the method is given and the interaction of all components is described. It is noted that the problem with this registration method is the piezoceramic drive used, which has a relatively high non-linearity, which is why the calibration method is required.

Key words: multi-band optoelectronic systems, measurements, geometric parameters, accuracy, spectrum, information channel.