

СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ДЛЯ ДРОНІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ ЦИФРОВІ КАМЕРИ

Безпілотні летальні апарати дуже важливі в повсякденному житті. Їх кількість збільшується з кожним днем, як і сфери їх використання. Тому стає необхідним автоматизувати їх політ з моменту вильоту до посадки. При автоматичному польоті безпілотники мають певні проблеми при вильоті, посадці та позиціонуванні. Проблема полягає у тому, що при посадці та вильоті необхідно забезпечити високу точність позиціонування, що є неможливим при використанні GPS, оскільки він може забезпечити точність лише в декілька метрів, чого не достатньо, а використання операторів хоч і є точним, але цей метод потребує використання якісних камер зі стабілізацією. Ці камери зі стабілізацією дуже важкі, тому корисне навантаження дронів зменшується, а також вони дуже дорогі (зазвичай дорожче ніж сам дрон). Також, використання операторів при посадці та вильоті може призвести до катастрофи через людський фактор. Задача цієї статті полягає у створенні класифікаційної таблиці, аналізі методів посадки, оцінці їх переваг і недоліків, створенні рекомендацій до використання найбільш ефективної системи позиціонування, а також розробці нових методів позиціонування. В процесі роботи було розглянуто сучасні, а також найбільш розповсюджені методи позиціонування, здійснено критичний аналіз робіт, запропоновано класифікацію систем позиціонування дронів, які забезпечують надійний зліт, посадку та доставку вантажів із застосуванням цифрових камер. Ця класифікація містить усі комбінації цифрових камер та джерел випромінювання, які можуть бути розташовані і на дроні, і на посадковому майданчику чи майданчику для доставки вантажу. Наведено приклади по кожній запропонованій в класифікації комбінації. Наводиться ґрунтовний аналіз переваг та недоліків кожної конфігурації цифрових камер та джерел випромінювання. Надано рекомендації щодо вибору найкращої системи позиціонування дронів. Основними недоліками розглянутих систем є складність алгоритмів, що робить системи дорожчими, а також ускладнює створення системи, що не виключає можливості зробити помилку при створенні системи. А це може призвести до аварії. Автори запропонували та обґрунтували систему, яка застосовує три еталонних джерела випромінювання, які задають трикутник, оскільки це дає можливість оцінити відстань та кутові координати посадкової площадки.

Ключові слова: система позиціонування дрону; цифрова камера; джерело випромінювання; цифрова обробка зображень; обчислення координат.

Надійшла до редакції
13 квітня 2022 року

Рецензовано
18 травня 2022 року

УДК 681.78

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПАНКРАТИЧНОГО ПРИЦІЛУ

¹⁾Сокурєнко В. М., ²⁾Сокурєнко О. М.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Оптико-механічний фаховий коледж Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

E-mail: sokurenko2@meta.ua

Запропоновано здійснювати автоматизований розрахунок багатолінзової оптичної системи панкратичного прицілу за допомогою одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації, а саме адаптивного методу диференціальної еволюції Коші. Оптична система, що розглядається, забезпечує видиме збільшення від $4\times$ до $16\times$ та кутове поле зору в просторі параметрів від $5,15^\circ$ до $1,32^\circ$. Вона має діаметр вхідної зіниці 42 мм , віддалення вихідної зіниці в діапазоні $85\text{--}90\text{ мм}$ та максимальну довжину системи – 325 мм . Приціл містить 14 лінз в 9-ти компонентах, виготовлених зі скла каталогу CDGM. У всіх станах панкратичної оптичної системи вильоту променів повністю відсутні. Для досягнення високої якості зображення, параметричний синтез прицілу здійснювався одночасно для п'яти проміжних станів, що відповідають видимому збільшенню $16\times$, $13\times$, $10\times$, $7\times$ і $4\times$. Завдяки розробленому спеціалізованому програмному забезпеченню виконано експериментальну перевірку дієздатності такого підходу на прикладі

автоматизованого розрахунку оптичної системи, аналогічної за своїми параметрами до комерційно доступних зразків. Практичне моделювання показало, що інтервал часу, потрібний на проведення безпосереднього автоматизованого розрахунку оптичної системи прицілу, становить біля 25 годин. Водночас, загальна кількість пошукових параметрів досягала 90. Середньоквадратичні значення кутових аберацій вихідних осьових пучків у всіх (п'яти) станах синтезованої панкратичної системи не перевищують 1 кутову хвилину у всьому спектральному діапазоні. Результати проведених досліджень свідчать про те, що реалізований в комп'ютерній програмі алгоритм розрахунку можна вважати ефективним інструментом, який здатний здійснювати автоматизований параметричний синтез складних панкратичних оптичних систем, що мають високу якість зображення. Алгоритм дозволяє визначати конструктивні параметри оптичних систем з урахуванням технічних вимог та обмежень, заданих конструктором.

Ключові слова: автоматизований розрахунок; панкратична оптична система; приціл; глобальна оптимізація; аберації; параметричний синтез.

Вступ

Через свою складність та багатоваріантність процедура проектування багатоелементних оптичних систем є зазвичай тривалим та ітераційним процесом, що потребує значного досвіду конструктора та врахування багатьох технічних вимог і конструктивних обмежень [1 - 5]. Ця процедура ускладнюється ще більше для панкратичних телескопічних оптичних систем, адже у всьому діапазоні зміни видимого збільшення потрібно задовольнити, насамперед, такі вимоги:

- формувати зображення в нескінченності;
- мати практично незмінне положення вихідної зіниці;
- забезпечувати високу якість зображення.

Для спрощення задачі на практиці процес проектування поділяють на окремі етапи, в яких спочатку визначають параметри та характеристики окремих складових компонентів [6, 7]. Щоб скоригувати хроматичні аберації панкратичної телескопічної системи, часто її окремі компоненти розраховують як ахромати. Проте, навіть це не дозволяє повністю виправити залишковий хроматизм у всьому діапазоні переміщення компонентів.

Незважаючи на те, що питанням проектування панкратичних систем була присвячена низка праць (наприклад, [8 - 14]), єдиного універсального підходу для отримання оптимального розв'язку знайдено не було.

Огляд методів проектування панкратичних оптичних систем

Через складність та багатовимірність проектування довільної панкратичної оптичної системи, розв'язати задачу параметричного синтезу аналітично не видається можливим. У зв'язку з цим, для абераційного розрахунку панкратичних оптичних систем поширеним виявився підхід, в якому спочатку на основі теорії аберацій 3-го порядку проводиться габаритний розрахунок системи та визначаються траєкторії переміщення компонентів [8 - 14]. Далі з отриманих компонентів складається вся система та

застосовується локальна оптимізація, яка поліпшує наявний стартовий розв'язок здійсненням відносно невеликих змін конструктивних параметрів. У ній на кожному кроці розраховуються перші та другі похідні, а ітераційний процес продовжується доти, поки він не зійдеться до оптимального розв'язку або поки не буде вичерпано певний ліміт часу. Незважаючи на позитивні сторони, розглянутий підхід має низку недоліків, головними з яких є тривалість процедури, обмеженість розв'язку аберациями нижчих порядків та потреба в якісній стартовій оптичній системі.

Щоб подолати (або хоча б зменшити) подібні обчислювальні складності, останнім часом у різних галузях науки та техніки все більшого розвитку набувають різноманітні чисельні методи глобальної оптимізації [15 - 18]. Як результат дії алгоритмів глобальної оптимізації, з багатовимірної множини можливих розв'язків може бути знайдений псевдо-оптимальний розв'язок, що задовольняє заданим конструктором критеріям (вимогам). Критерії оптимізації представляються цільовими (або оціночними) функціями – математичними функціями з різними ваговими коефіцієнтами окремих складових елементів.

Враховуючи наведені обставини, в останні роки для проектування оптичних систем почали все частіше використовуватися різні алгоритми глобальної оптимізації. Вони дозволяють зменшити залежність результату від досвіду конструктора та отримати бажаний розв'язок складних технічних задач. Так, Янг представив «поточковий» алгоритм проектування, який дозволяє автоматично отримувати оптичні системи довільної форми з поліпшеними характеристиками [19]. Для автоматичного проектування оптичних систем у роботі [20] було представлено та перевірено багатоцільовий алгоритм еволюційної меметичної оптимізації, який поділяє процес пошуку параметрів оптичної системи на три різні етапи або фази: вибір оптичного скла, аналіз простору можливих розв'язків та його детальне дослідження. У роботах [21 - 23] використовувався генетичний

алгоритм для розробки класичних об'єктів, а також панкратичних систем з лінійною та механічною компенсацією зсуву площини зображень. Для задач оптичного проєктування впроваджено та протестовано дві версії алгоритму оптимізації колоній мурах [24]. У роботах [25, 26] було представлено метод автоматичного проєктування спеціальної середньохвильової інфрачервоної панкратичної системи, в якій положення і площини зінці, і площини зображення, залишаються сталими під час зміни збільшення. Авторами цих робіт отримані аналітичні вирази для габаритного розрахунку панкратичної системи на основі «гаусових дужок», запропонованих Герцбергером ще в 40-х роках минулого століття. На основі методу оптимізації рою частинок авторами створено математичну модель для визначення кардинальних параметрів в параксіальному наближенні. Така модель оптимізується шляхом ітераційного поліпшення розв'язку з урахуванням конкретної оціночної функції. Подібні алгоритми глобального пошуку на основі алгоритму оптимізації рою частинок успішно застосовувалися для розробки лінз із змінною фокусною відстанню, асферичних лінз, рентгенівських лінз [27 - 30], а також знаходження стартових схем панкратичних систем [31, 32]. Незважаючи на вищезазначене, на сьогодні існує обмаль публікацій про часткову або повну автоматизацію процедури абераційного розрахунку панкратичних оптичних систем (зокрема, оптичних прицілів).

Постановка задачі

Метою даної роботи є перевірка ефективності автоматизованого параметричного абераційного синтезу складної багатолінзової оптичної системи прицілу зі змінними параметрами. Ця перевірка здійснюється комп'ютерним моделюванням процедури синтезу з використанням одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації.

Зокрема, в цій роботі для параметричного абераційного синтезу довільної оптичної системи пропонується використовувати адаптивний метод диференціальної еволюції Коші [33, 34]. Його особливістю є те, що кожна точка з обраної популяції має власні значення характерних числових параметрів диференціальної еволюції. На кожній новій ітерації алгоритму нові значення характерних числових параметрів генеруються на основі розподілу Коші відносно середніх значень параметрів, отриманих на попередніх ітераціях. Порівняно з гаусоподібним (нормальним) розподілом, функція розподілу Коші забезпечує більші відхилення випадкових значень, що дозволяє детальніше досліджувати багатовимірний простір параметрів. Нові значення характерних числових параметрів запам'ятовуються для нових точок лише у випадку покращення оціночної

функції. Останнє дозволяє параметрам алгоритму підлаштовувати свої значення до конкретної задачі. Розглянутий алгоритм є порівняно простим у використанні серед численних глобальних методів оптимізації. Його перевагами є швидка збіжність, висока якість розв'язку, ефективність під час пошуку оптимального значення у багатовимірному обмеженому функціональному просторі.

Розроблена нами комп'ютерна програма з реалізованим у ній адаптивним алгоритмом диференціальної еволюції дозволяє в автоматичному режимі визначити конструктивні параметри оптичної системи [35 - 40]. До таких параметрів системи можуть належати радіуси кривизни поверхонь, осьові товщини лінз, осьові повітряні проміжки, параметри оптичних середовищ. У більш складних випадках в якості параметрів оптимізації можуть виступати коефіцієнти асферичності, специфічні параметри оптичних поверхонь (наприклад, параметри різноманітних дифракційних ґраток) та середовищ (наприклад, градієнтних середовищ) [41]. У цій роботі подібні специфічні параметри не задіяні, оскільки через вимоги технологічності та дешевизни всі поверхні в оптичній системі панкратичного прицілу мають бути сферичними, а матеріал всіх лінз – це різні марки з обраного каталогу оптичного скла.

Запропонований підхід

Процедура параметричного синтезу довільної оптичної системи починається із задання основних функціональних параметрів системи (спектральний діапазон, поле зору, відносний отвір тощо) та визначення загальної компонентної будови оптичної системи. Водночас, всі лінзи розподіляються (за кількістю) між компонентами.

Далі мають бути обрані параметри оптимізації. Під час розрахунку оптичних систем, що містять лише плоскі та сферичні оптичні поверхні, такими параметрами виступають радіуси поверхонь, повітряні проміжки, осьові товщини лінз та параметри оптичного скла. Для них конструктор має ввести практично довільні стартові значення, а також прийнятні діапазони значень.

Встановлення регулятора вихідного кута апертурного променя на останній оптичній поверхні об'єктива дозволяє забезпечити бажане фіксоване значення задньої фокусної відстані системи. Зрозуміло, що в усіх станах панкратичної телескопічної системи цей кут має бути нульовим, а фокусна відстань системи – нескінченною.

Для параметричного синтезу оптичних систем переважно застосовується оціночна функція, що мінімізує середньоквадратичні розміри світлових плям на поверхні зображень для всіх заданих точок поля зору. Такий підхід не

потребує від стартової оптичної системи будь-якої якості зображення, головне, щоб через оптичну систему проходили промені від усіх заданих точок поля зору. У зв'язку з цим, на практиці стартову оптичну систему можна задавати як сукупність плоско-паралельних пластин.

Як альтернатива, у випадку синтезу дифракційно-обмежених оптичних систем можуть бути задіяні функція мінімізації деформацій хвильового фронту для всіх заданих пучків або функція мінімізації значень модуляційно-передавальних функцій для різних просторових частот і точок поля зору. Такі функції раціонально застосовувати вже на завершальних етапах проектування оптичних систем з високою якістю зображення.

Під час формування оціночної функції доцільно одразу встановити обмеження на загальну довжину оптичної системи вздовж осі, допустимі значення товщин на краю, максимальні значення світлових діаметрів (або радіусів) та інші обмеження, необхідні для дотримання умов фізичної реалізації системи.

З метою спрощення введення параметрів оціночної функції її базові складові елементи генеруються засобами розробленого програмного забезпечення автоматично. За потребою є можливість обмеження максимально допустимих значень окремих аберацій (наприклад, сферичної аберації, відносної дисторсії, хроматизму положення, хроматизму збільшення тощо).

Основний розрахунковий етап зводиться до здійснення процедури глобальної оптимізації за одним із закладених у програму алгоритмів. Цей процес є повністю автоматичним та не потребує

участі конструктора. Оскільки алгоритми глобальної оптимізації потребують від комп'ютера суттєвої потужності та проведення багатьох розрахунків, цей етап виявляється найбільш тривалим. Для зменшення часових витрат, раціонально застосовувати програмне забезпечення, здатне до здійснення багатопотокових розрахунків під час проведення процедури глобальної оптимізації.

В більшості практичних випадків після завершення процедури глобальної оптимізації оптична система набуває свого кінцевого вигляду. Проте, за необхідністю (у випадку можливого передчасного переривання конструктором процедури розрахунку) та з метою остаточного «тонкого доведення» якості зображення, може бути задіяна підпрограма локальної оптимізації оптичної системи.

Приклад параметричного синтезу

Як приклад для розрахунку панкратичного оптичної системи було обрано лінзовий приціл з видимим збільшенням $4-16\times$ та діаметром входної зіниці 42 мм. Загальна кількість лінз не повинна перевищувати 14. Кутове поле зору в просторі зображень у всіх станах системи має бути не менше 40° .

Приціл призначений для роботи у видимому спектральному діапазоні $0,47\dots0,656$ мкм з основною довжиною хвилі 0,555 мкм. Будь-яке віньетування променів від всіх точок поля зору має бути повністю уникнутим.

На рис. 1 представлена загальна схематична будова оптичної системи панкратичного прицілу:

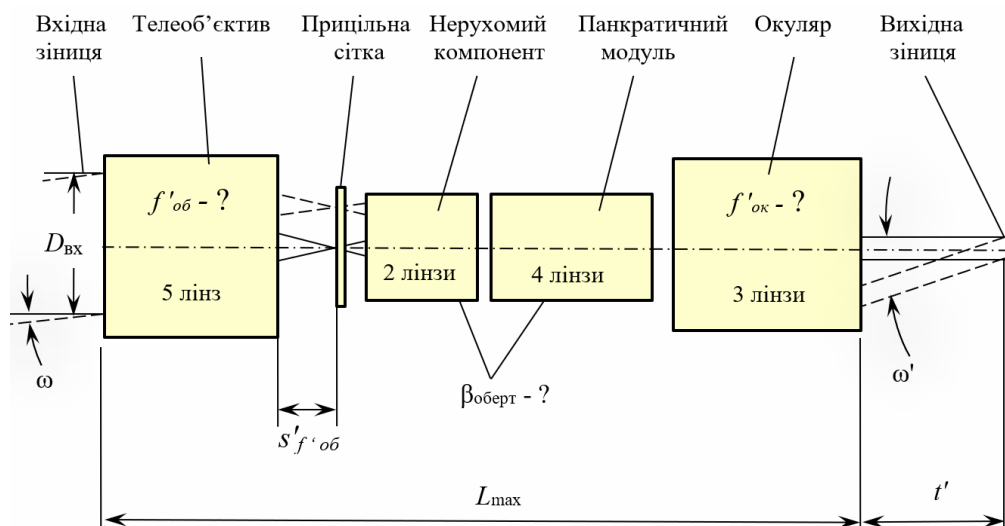


Рис. 1. Загальне компонування оптичної системи панкратичного прицілу.
Знаком питання показані невідомі параметри

З функціональної точки зору, приціл містить двокомпонентний телеоб'єктив, прицільна сітка,

дволінзовий нерухомий фокусувальний компонент, чотирилінзовий панкратичний модуль

та трилінзовий окуляр. Нерухомий фокусувальний компонент, що має позитивну оптичну силу, дозволяє зменшити світлові розміри наступного за ходом променів панкратичного модуля. Безпосередньо панкратичний модуль містить два рухомих компоненти, кожен з яких передбачається виготовити як склеєний дублет для належного коректування хроматичних аберацій.

З метою забезпечення високої якості зображення увесь діапазон збільшень було поділено на п'ять окремих станів (конфігурацій). Для кожного стану було попередньо визначено розміри кутового поля зору в просторі предметів та зображень, а також діаметр вихідної зіниці. Числові значення зовнішніх функціональних параметрів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Вихідні зовнішні параметри оптичної системи прицілу

Стан (конфігурація)	Видиме збільшення Γ , крат	Кутове поле зору в просторі предметів 2ω , градуси	Кутове поле зору в просторі зображень $2\omega'$, градуси	Діаметр вхідної зіниці $D_{вх}$, мм	Діаметр вихідної зіниці $D_{вих}$, мм
1	16	1,32	41,7	42	2,6
2	13	1,61	41,5	42	3,2
3	10	2,05	41,3	42	4,2
4	7	2,96	41,0	42	6
5	4	5,15	40,8	42	10,5

Під час параметричного синтезу прицілу було встановлено діапазон прийнятних осьових товщин лінз – від 3 мм до 5 мм та мінімальну товщину лінз на краю – 2 мм. Допустимий діапазон осьового віддалення останньої поверхні від'ємного компонента телеоб'єктива від площини сітки – від 10 до 80 мм. Вихідна зіниця системи у всіх станах мала бути віддаленою від останньої поверхні окуляра на відстань t' від 85 до 90 мм. Враховуючи конструктивні особливості кріплення прицілу, максимальний світловий діаметр компонентів лінзової обертальної системи був обмежений до 26 мм, а окуляра – до 50 мм. Загальна довжина L_{\max} системи (відстань від передньої поверхні телеоб'єктива до останньої поверхні окуляра) обмежена величиною 325 мм.

Для зменшення аберації кривизни поля та забезпечення більш якісного зображення, утвореного окремо телеоб'єктивом в площині

прицільної сітки, в загальну оціночну функцію додатково включалися складові поперечних аберацій в цій площині п'яти меридіональних променів периферійного пучка.

Під час синтезу пошуковими параметрами були встановлені радіуси кривизни всіх оптичних поверхонь, осьові товщини лінз, повітряні проміжки, параметри скла всіх лінз). Марки скла всіх лінз обиралися програмою автоматично з каталогу скла CDGM-2018 з показниками заломлення для основної довжини хвилі від 1,45...1,86 та числами Аббе від 20 до 85. Загальна кількість невідомих параметрів (змінних) становила 90.

Схема початкової оптичної системи панкратичного прицілу, задана однаковою у всіх станах (конфігураціях), зображена на рис. 2.

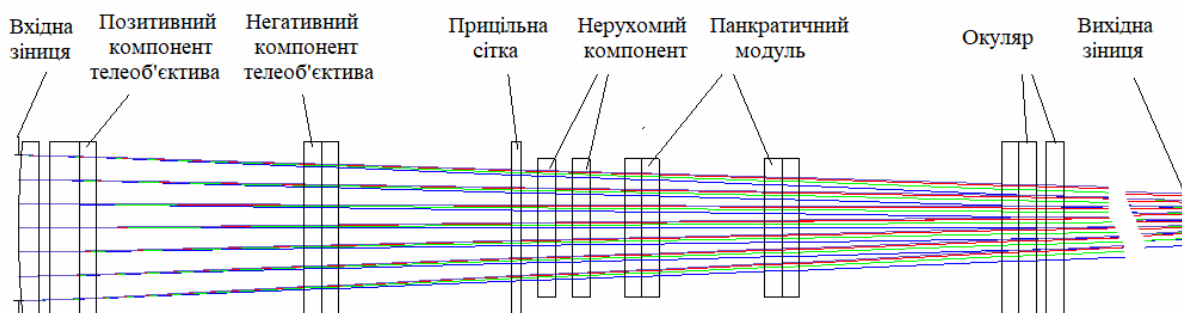


Рис. 2. Стартова схема оптичної системи панкратичного прицілу, задана у всіх станах як сукупність плоско-паралельних пластин

В принципі, для будь-якого стану (конфігурації) панкратичної оптичної системи прицілу її видиме збільшення може бути визначене за формулою:

$$\Gamma = f'_{об} \beta_{оберт} / f'_{ок},$$

де $f'_{об}$ – задня фокусна відстань телеоб'єктива; $\beta_{оберт}$ – поперечне збільшення обертальної

підсистеми «нерухомий компонент – панкратичний модуль»; $f'_{ок}$ – задня фокусна відстань окуляра. Тут важливо зазначити, що при використанні даного підходу розподіл числових значень величин $f'_{об}$, $\beta_{оберт}$ і $f'_{ок}$ (як і розподіл оптичних сил позитивного та негативного компонентів безпосередньо в самому телеоб'єктиві) конструктором може не задаватися (тобто не обмежуватися). Знаходження оптимального розподілу цих величин може бути повністю покладене на глобальний оптимізатор.

Проведене чисельне моделювання показує,

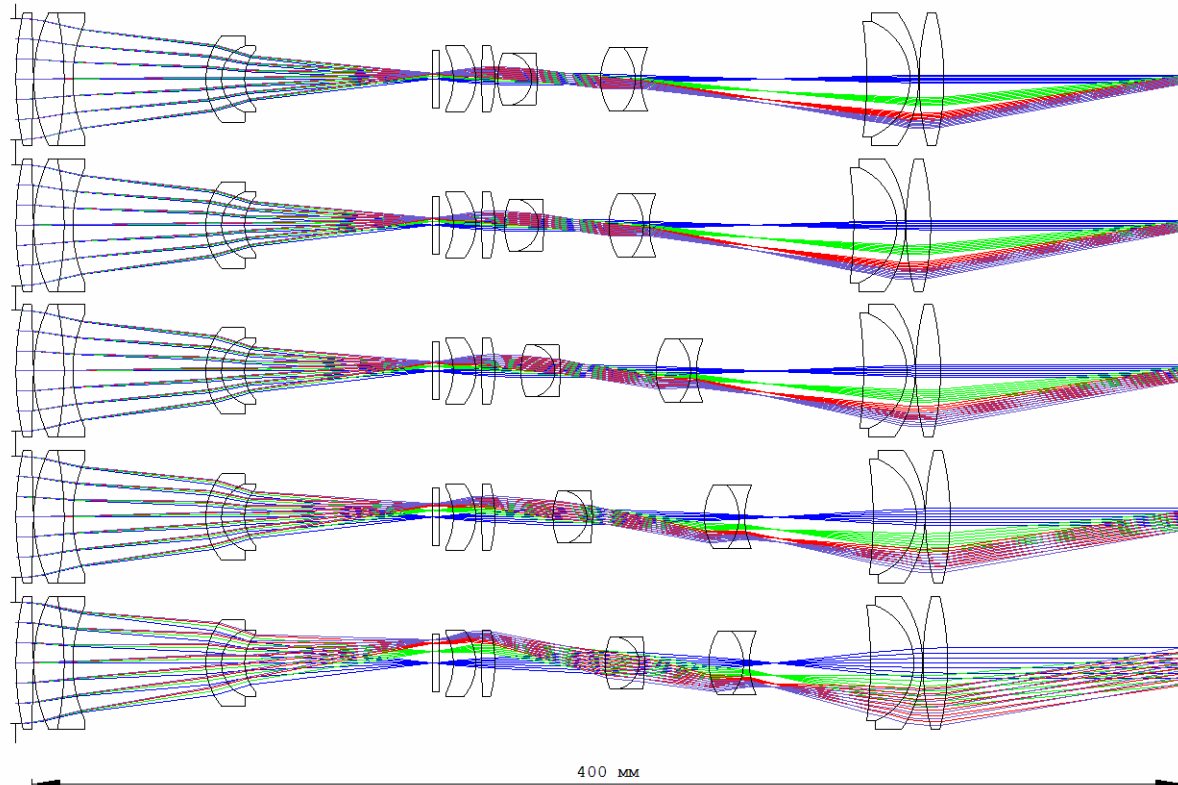


Рис. 3. Оптична схема з ходом променів отриманої оптичної системи панкратичного прицілу. Схема показана у різних станах (конфігураціях) для таких видимих збільшень Γ (зверху вниз): 16^x , 13^x , 10^x , 7^x і 4^x . Представлена оптична система синтезована автоматично алгоритмом глобальної оптимізації без використання локального оптимізатора

Таблиця 2. Значення кутових аберацій панкратичного оптичного прицілу для осьових точок зображення

Спектральний діапазон, в якому оцінюються аберації	Середньоквадратичні значення кутових аберацій в [кутових хвилинах], визначені в центрі поля зору для різних видимих збільшень Γ				
	$\Gamma = 16^x$	$\Gamma = 13^x$	$\Gamma = 10^x$	$\Gamma = 7^x$	$\Gamma = 4^x$
Основна довжина хвилі (0,555 мкм)	0,72	0,51	0,21	0,92	0,60
Широкий спектральний діапазон (0,47...0,656 мкм)	0,95	0,87	0,99	0,99	0,94

Як видно з табл. 2, середньоквадратичні значення кутових аберацій осьових пучків у всіх (п'яти) станах панкратичної системи не перевищують одну кутову хвилину не лише для основної довжини хвилі, а й у всьому видимому

що процедура безпосереднього розрахунку з кількістю змінних до 90 потребує до 25 годин роботи 8-ядерного (16-потоківого) процесора Intel Core i9-9900K в багатопотоковому режимі. Оптична схема отриманого прицілу для різних проміжних станів представлена на рис. 3.

Якість зображення отриманої оптичної системи можна оцінити за середньоквадратичними значеннями кутових аберацій вихідних пучків. Їх числові значення для осьових точок поля зору розглянутих п'яти станів представлені в табл. 2.

спектральному діапазоні. Це свідчить про високу якість зображення, досягнуту алгоритмом глобальної оптимізації. Водночас, всі задані обмеження на конструктивні параметри системи дотримані в повному обсязі.

Наступні дослідження доцільно направити на експериментальну перевірку ефективності даного підходу для автоматизованого проектування високоякісної оптичної системи панкратичного прицілу з поліпшеними функціональними параметрами, зокрема з більшим діаметром вхідної зіниці, розширеним діапазоном кратності та більш віддаленою вихідною зіницею.

Висновки

Комп'ютерне моделювання, проведене на прикладі розробки 4-кратного панкратичного 14-лінзового прицілу, підтвердило результативність запропонованого автоматизованого розрахунку складних оптичних систем із змінними параметрами. Отримані результати підтверджують, що синтезована оптична система прицілу має високу якість зображення. Реалізований адаптивний метод диференціальної еволюції Коші можна вважати потужним інструментом, за допомогою якого є доцільним ефективно здійснювати автоматизований параметричний синтез багатокомпонентних оптичних систем панкратичних прицілів з урахуванням вимог, заданих конструктором. Наступні дослідження доцільно направити на перевірку можливостей автоматизованого розрахунку високоякісних оптичних систем панкратичних прицілів з екстремальними функціональними параметрами.

Література

- [1] W. J. Smith, *Modern Lens Design*, 2nd Edition. McGraw Hill Professional, 2004.
- [2] M. Laikin, *Lens Design*, 4th Edition. CRC Press, 2018.
- [3] A. Mann, *Infrared optics and zoom lenses*. Bellingham, Wash: SPIE Press, 2009.
- [4] J. L. Bentley, C. Olson, *Field Guide to Lens Design*. SPIE, 2012.
- [5] D. Dilworth, *Lens Design: Automatic and Quasi-autonomous Computational Methods and Techniques*. Institute of Physics Publishing, 2018.
- [6] S. C. Park and R. R. Shannon, "Zoom lens design using lens modules," *Opt. Eng.* 35(6), 1668–1676, 1996. DOI: 10.1117/1.600742.
- [7] S. C. Park and S. H. Lee, "Zoom lens design for a 10x slim camera using successive procedures," *J. Opt. Soc. Korea*, 17(6), 518–524, 2013. DOI: 10.3807/JOSK.2013.17.6.518.
- [8] K. Tanaka, "Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type," *Appl. Opt.*, 21(12), 2174–2183, 1982. DOI: 10.1364/AO.21.002174.
- [9] K. Tanaka, "Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 2: Generalization of Yamaji type V," *Appl. Opt.*, 21(22), 4045–4053, 1982. DOI: 10.1364/AO.21.004045.
- [10] K. Tanaka, "Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 3: Five-component type," *Appl. Opt.*, 22(4), 541–553, 1983. DOI: 10.1364/AO.22.000541.
- [11] Q. Hao, X. Cheng, and K. Du, "Four-group stabilized zoom lens design of two focal-length-variable elements," *Opt. Express*, 21(6), 7758–7767, 2013. DOI: 10.1364/OE.21.007758.
- [12] A. Mikš and P. Novák, "Paraxial design of four-component zoom lens with fixed position of optical center composed of members with variable focal length," *Opt. Express*, 26(20), 25611–25616, 2018. DOI: 10.1364/OE.26.025611.
- [13] A. Mikš and P. Novák, "Paraxial design of a four-component zoom lens with zero separation of principal planes and fixed position of an image focal point composed of members with constant focal length," *Appl. Opt.*, 58(15), 3957–3961, 2019. DOI: 10.1364/AO.58.003957
- [14] Jinkai Zhang, Xiaobo Chen, Juntong Xi, and Zhuoqi Wu, "Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with three components," *Appl. Opt.*, 53, 4957–4967, 2014. DOI: 10.1364/AO.53.004957
- [15] Eiben A., Smith J. *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer-Verlag: Berlin, 2003.
- [16] R. Haupt, S. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience; 2 edition, 2004.
- [17] H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, F. Blechinger. *Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems*; Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.
- [18] В. М. Сокурєнко, В. С. Неділю, "Числове дослідження стохастичних методів безперервної глобальної оптимізації", *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, № 1, с. 81–88, 2012.
- [19] T. Yang, G. F. Jin, and J. Zhu, "Automated design of freeform imaging systems," *Light: Science and Applications*, vol. 6(10), e17081, 2017. DOI: 10.1038/lsa.2017.81
- [20] B. F. C. Albuquerque, F. L. Sousa, and A. S. Montes, "Multi-objective approach for the automatic design of optical systems," *Opt. Express*, 24(6), 6619–6643, 2016. DOI: 10.1364/OE.24.006619.
- [21] X. Chen and K. Yamamoto, "An experiment in genetic optimization in lens design," *J. Mod. Opt.*, 44(9), 1693–1702, 1997. DOI: 10.1080/09500349708230769
- [22] S. Pal and L. Hazra, "Structural design of mechanically compensated zoom lenses by evolutionary programming," *Opt. Eng.*, 51(6), 063001, 2012. DOI: 10.1117/1.OE.51.6.063001
- [23] S. Pal and L. Hazra, "Ab initio synthesis of linearly compensated zoom lenses by evolutionary programming," *Appl. Opt.*, 50(10), 1434–1441, 2011. DOI: 10.1364/AO.50.001434.

- [24] Z. Y. Tang, M. Sonntag, and H. Gross, "Ant colony optimization in lens design," *Appl. Opt.*, 58(23), 6357–6364, 2019. DOI: 10.1364/AO.58.006357.
- [25] Xiao Yu, Hanyu Wang, Yuan Yao, Songnian Tan, Yongsen Xu, and Yalin Ding, "Automatic design of a mid-wavelength infrared dual-conjugate zoom system based on particle swarm optimization," *Opt. Express*, 29, 14868-14882, 2021. DOI: 10.1364/OE.418584.
- [26] Chengxiang Fan, Bo Yang, Yunpeng Liu, Pengxiang Gu, Xingqi Wang, and Hui Zong, "Zoom lens with high zoom ratio design based on Gaussian bracket and particle swarm optimization," *Appl. Opt.*, 60, 3217-3223, 2021. DOI: 10.1364/AO.418970.
- [27] Sun-Hyung Jo and Sung-Chan Park, "Design and analysis of an 8x four-group zoom system using focus tunable lenses," *Opt. Express*, 26, 13370-13382, 2018. DOI: 10.1364/OE.26.013370.
- [28] H. Qin, "Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm," *Opt. Commun.*, 285(13-14), 2996–3000, 2012. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.02.083.
- [29] D. B. Guo, L. Yin, and G. Yuan, "New automatic optical design method based on combination of particle swarm optimization and least squares," *Opt. Express*, 27(12), pp. 17027–17040, 2019. DOI: 10.1364/OE.27.017027.
- [30] P. Zhou, X. R. Ma, S. Zhang, Z. G. Liu, Z. Y. Meng, Z. J. Xiang, X. Y. Wang, T. X. Sun, X. Y. Lin, and Y. D. Li, "Application of particle swarm optimization in the design of a mono-capillary X-ray lens," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 953, 163077, 2020. DOI: 10.1016/j.nima.2019.163077.
- [31] Z. C. Fan, S. L. Wei, Z. B. Zhu, Y. Mo, Y. Yan, and D. Ma, "Automatically retrieving an initial design of a double-sided telecentric zoom lens based on a particle swarm optimization," *Appl. Opt.*, 58(27), pp. 7379–7386, 2019. DOI: 10.1364/AO.58.007379.
- [32] Z. C. Fan, S. L. Wei, Z. B. Zhu, Y. M. Yan, Y. Mo, L. S. Yan, and D. L. Ma, "Globally optimal first-order design of zoom systems with fixed foci as well as high zoom ratio," *Opt. Express*, 27(26), pp. 38180–38190, 2019. DOI: 10.1364/OE.381116
- [33] T. J. Choi, C. W. Ahn, J. An, "An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, 2013. Art. ID 969734, 12 pages. DOI: 10.1155/2013/969734.
- [34] T. J. Choi, C. W. Ahn, "An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization," *Journal of Computers*, vol. 9, no. 9, pp. 2139-2145, 2014. DOI: 10.4304/cj.9.9.2139-2145.
- [35] В. М. Сокурєнко, Я. І. Макаренко, "Розробка оптичних систем методами глобальної оптимізації", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування*, вип. 50(2), с. 51-60, 2015.
- [36] В. М. Сокурєнко, І. С. Буй лов, "Застосування адаптивного методу диференційної еволюції Коші для розрахунку об'єктивів", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування*, вип. 51(1), с. 41-47, 2016.
- [37] В. М. Сокурєнко, О. Є. Стріха, "Розробка об'єктивів з виправленою дисторсією", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 99-105, 2017.
- [38] В. М. Сокурєнко, Д. П. Бондарчук, "Автоматизований параметричний синтез фотооб'єктива з виправленою дисторсією", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування*, вип. 56(2), с. 18-24, 2018. DOI: 10.20535/1970.56(2).2018.152205
- [39] В. М. Сокурєнко, І. О. Смажмо, "Автоматизований розрахунок оптичної системи SWIR-об'єктива", *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*, № 6 (279), с. 202-205, 2019. DOI: 10.31891/2307-5732-2019-279-6-202-205.
- [40] В. М. Сокурєнко, О. В. Тростяньська, "Синтез оптичної системи окуляра для мікродисплея з високою роздільною здатністю", *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*, №6 (279), с. 206-210, 2019. DOI: 10.31891/2307-5732-2019-279-6-206-210.
- [41] В. М. Сокурєнко, М. М. Вакулєнко, "Автоматизований розрахунок окулярів з дифракційними оптичними елементами", *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*, №1 (257), с. 107-112, 2018.

UDC 681.78

V. M. Sokurenko, O. M. Sokurenko¹*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*²*Optical-mechanical faculty college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine***AUTOMATED DESIGN OF THE OPTICAL SYSTEM OF THE ZOOM RIFLESCOPE**

It is proposed to perform an automated design of a multi-lens optical system of a zoom rifle scope by using one of modern global optimization algorithms, namely the adaptive Cauchy differential evolution method. The optical system

considered here provides the magnification 4-16^x and the angular field of view in the object space from 5.15° to 1.32°. It has the entrance pupil diameter of 42 mm, the exit pupil distance within 85...90 mm, and the maximum system length of 325 mm. The riflescope contains 14 lenses in 9 components made of glasses from the CDGM catalog. In all zoom configurations of the optical system, any ray vignetting is absent. To achieve the high image quality, the parametric synthesis of the riflescope has been carried out simultaneously for five intermediate configurations, corresponding to magnifications 16^x, 13^x, 10^x, 7^x and 4^x. By using the developed specialized software, an experimental examination of the operability of this approach has been performed on the example of automated design of the optical system having the parameters similar those found in commercially available samples. The performed simulation showed that the time interval required for direct automated design of the riflescope's optical system is about 25 hours. The total number of unknown parameters (variables) was up to 90. The root-mean-square values of the angular aberrations of the axial beams in all (five) configurations of the synthesized zoom system do not exceed 1 arc minute in the whole spectral range. The obtained results indicate that the design algorithm implemented in the computer program can be considered an effective tool capable to perform automated parametric synthesis of complex zoom optical systems with high image quality. The algorithm enables to establish the prescription data of optical systems, taking into account the technical requirements and restrictions specified by the designer.

Keywords: automated optical design; zoom optical system; riflescope; global optimization; aberrations; parametric synthesis.

Надійшла до редакції
14 січня 2022 року

Рецензовано
18 лютого 2022 року

УДК 621:681.7

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ДИСТОРСІЇ ВІДЕОРЕЄСТРАТОРА ПРИ ВИЯВЛЕННІ ДОРОЖНИХ ЗНАКІВ

Стаднічук В. С., Колобродов В. Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: v.stadnichuk@kpi.ua

Проблематика. Аналіз статистичних даних показує, що з року в рік автомобілів на дорогах загального користування становиться все більше, і, відповідно, збільшується кількість ДТП та підвищується ризик для кожного учасника дорожнього руху. Задля забезпечення безпеки дорожнього руху автовиробниками впроваджуються системи допомоги водієві та автомобілі з елементами автономного керування. Такі системи здатні аналізувати навколишнє середовище та у випадку небезпеки коректувати дії водія або брати керування транспортним засобом на себе. Зазвичай такі системи працюють за допомогою телевізійних систем, однією з вимог до яких є широкий кут поля зору. Однак основним недоліком ширококутних систем є велика дисторсія, тобто геометричне спотворення подоби між об'єктом та його зображенням.

Мета дослідження: розробити простий метод зменшення дисторсії в автомобільному відеореєстраторі з великим кутовим полем зору за допомогою цифрового калібрування камери.

Методика реалізації. Експериментальне дослідження телевізійної системи керування автомобілем та її калібрування.

Результати дослідження. Розроблено простий метод зменшення дисторсії відеореєстратора при виявленні дорожніх знаків внаслідок використання цифрового калібрування камери. Проведено експериментальне порівняння дисторсії ширококутної та звичайної телевізійної систем, виконано калібрування кожної та проведено аналіз знаходження дорожніх знаків кожною системою.

Висновки. Запропоновано простий метод зменшення дисторсії в автомобільному відеореєстраторі з великим кутовим полем зору за допомогою цифрового калібрування камери. Доведено, що для цілей керування автомобілем можливе використання ширококутних телевізійних систем із подальшим їх калібруванням задля позбавлення геометричного спотворення між об'єктом та його зображенням.

Ключові слова: телевізійна система керування автомобілем; кут поля зору; дисторсія; калібрування; ADAS; IoU.