

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗІ ЗМІНОЮ ПОЛЯ ЗОРУ
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи МТІОЛСу-22-1
Ярослав БАЛАБАЙ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія оптичних та лазерних систем»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Балабаю Ярославу Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Моделювання оптичної системи зі зміною поля зору _____

затверджена наказом університету від « 23 » _____ травня _____ 2025 р. № 409 Ст
. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15 липня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Закони геометричної оптики. 2. Принципи побудови зум-об'єктивів та систем зі змінним полем зору. 3. Характеристики лінз Альвареса.
4. Показники заломлення матеріалів. Програмне забезпечення Zemax OpticStudio.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 1 Принципи роботи оптичних систем зі змінним полем зору. 2 Конструкції зум-об'єктивів та лінз Альвареса. 3 Методи розрахунку фокусної відстані та масштабування. 4 Особливості моделювання в Zemax OpticStudio. 5 Аналіз ефективності зміни поля зору та впливу параметрів системи.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 11 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про оптичні системи змінного поля зору	08.05.25–20.05.25	Виконано
2	Дослідження конструкцій, можливостей та прикладів використання	21.05.25–30.05.25	Виконано
3	Дослідження факторів, що впливають на характеристики оптичних систем	02.06.25–11.06.25	Виконано
4	Дослідження тенденцій розвитку оптичних систем змінного поля зору	12.06.25–17.06.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.25–27.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	28.06.25–02.07.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	03.07.25–11.07.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	12.07.25–13.07.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	14.07.25–16.07.25	Виконано

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. кафедри ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 38 с., 23 рис., 20 джерел, 1 додаток.

ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ, ЛІНЗА, ОБ'ЄКТИВ, ПОЛЕ ЗОРУ, ФОКАЛЬНА ТОЧКА.

Об'єкт дослідження – моделювання оптичної системи зі зміною поля зору.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження фізичних основ, конструкцій, експлуатаційних характеристик, а також тенденції розвитку оптичної системи зі зміною поля зору.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Дослідити фізичні основи оптичних систем.
2. Дослідити конструкції оптичних системи зі зміною поля зору
Проаналізувати експлуатаційні характеристики систем та фактори впливу на них.
3. На основі отриманої інформації змоделювати та розрахувати оптичну систему

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 38 pp., 23 figures, 20 sources, 1 appendix.

LASER SCANNING, LENS, OBJECTIVE, FIELD OF VIEW, FOCAL POINT.

Research Object – Modeling of an Optical System with Variable Field of View. The aim of this qualification work is to investigate the physical principles, designs, operational characteristics, and development trends of an optical system with a variable field of view.

Research Method – Theoretical.

To achieve this aim, the following tasks were set and completed in the work:

1. To study the physical principles of optical systems.
2. To study the designs of optical systems with variable field of view and to analyze their operational characteristics and influencing factors.
3. Based on the obtained information, to model and calculate the optical system.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Огляд існуючих оптичних систем.....	8
1.1 Розширювачі лазерного променя.....	8
1.2 Скануючі системи.....	11
1.3 Людське око.....	16
1.4 Об'єктив фотоапарата.....	18
1.5 Висновки до розділу 1.....	21
2 Моделювання оптичної системи.....	23
2.1 Оптична пара Альвареса.....	23
2.2 Моделювання об'єктива Alvarez Zoom.....	27
2.3 Висновки до розділу 2.....	33
Висновки.....	35
Перелік джерел посилання.....	37
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	39

ВСТУП

У сучасних умовах бурхливого розвитку технологій оптичні системи набувають все більшого значення в різних сферах науки, техніки та промисловості. Від пристроїв машинного зору до медичної діагностики, від систем лазерного сканування до фото- і відеотехніки – у кожному з цих застосувань велику роль відіграє здатність оптичної системи адаптуватися до змін умов спостереження.

Одним із ключових параметрів, що визначає ефективність таких систем, є поле зору, яке безпосередньо впливає на якість, точність і функціональність вимірювань або зображення. Зміна поля зору дозволяє оптимізувати роботу пристрою в залежності від конкретної задачі, що ставить питання про необхідність моделювання та аналізу відповідних оптичних конструкцій

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження фізичних основ, конструкцій, експлуатаційних характеристик, а також тенденцій розвитку оптичної системи зі змінним полем зору. Обрана тема є актуальною та перспективною в контексті подальшої мініатюризації та вдосконалення оптичних технологій.

Робота має теоретичний характер і базується на аналізі сучасної науково-технічної літератури, конструктивних рішень та принципів моделювання, що дозволяє сформулювати цілісне уявлення про перспективи створення ефективних оптичних систем зі змінною геометрією поля зору.

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Розширювачі лазерного променя

Розширювачі лазерного променя – це оптичні системи, призначені для зміни параметрів лазерного пучка, зокрема його діаметра, розбіжності та колімації. Вони широко використовуються в наукових дослідженнях, промисловій обробці, телекомунікаціях і медичних технологіях. Залежно від конструкції, розширювачі можуть забезпечувати як фіксоване, так і змінне збільшення, адаптуючи пучок до вимог конкретного застосування.

Серед основних типів конструкцій розрізняють кеплерівські та галілеєвські розширювачі променя. Така класифікація ґрунтується на оптичній схемі – комбінації позитивних і негативних лінз, що визначає геометричні характеристики системи та її оптичну силу [1]. Класифікація розширювачів лазерного променя типу Кеплера та Галілея ґрунтується на оптичній конфігурації лінз, що формують систему (рис. 1.1).

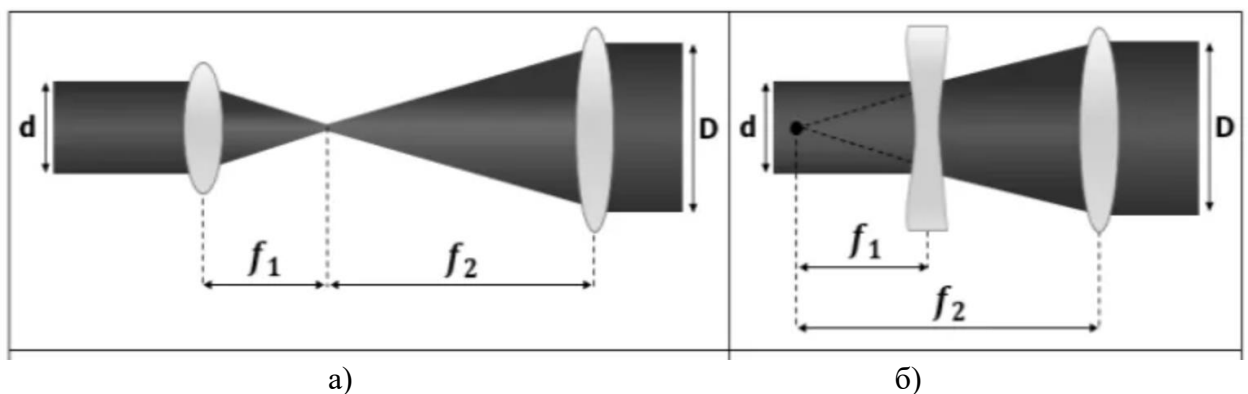


Рисунок 1.1 – Кеплерівський а) та Галілеєвський б) розширювачі променя

У кеплерівській схемі використовується пара позитивних (збиральних) лінз, фокальні площини яких збігаються. Відстань між ними дорівнює сумі фокусних відстаней, а в центрі формується проміжна фокусна точка, яка дозволяє застосовувати просторову фільтрацію. Це дає можливість усунути небажані моди або шумові компоненти пучка, що є критично важливим для інтерферометрії, прецизійного вимірювання та сканування.

Оскільки фокус розташований всередині системи, кеплерівські розширювачі використовують переважно в лазерах малої потужності, де теплові ефекти не є критичними (юстування, калібрування, машинний зір).

У галілеєвській схемі, навпаки, застосовується комбінація негативної і позитивної лінз. Відстань між ними відповідає різниці фокусних відстаней. Така система не має реального фокуса, що робить її придатною для високопотужних лазерів – зокрема в задачах лазерного маркування, паяння та різання.

Крім основної класифікації, розширювачі можна розрізняти також за:

- кратністю збільшення: фіксовані або зі змінним масштабом;
- типом управління: ручні або моторизовані;
- оптичним принципом: рефракційні (лінзові) або відбивні (дзеркальні);
- застосуванням: зокрема, окремі моделі розроблені для CO₂-лазерів у середньому інфрачервоному діапазоні.

У розширювачах з фіксованим збільшенням (рис. (1.2, 1.3)) передбачена лише можливість регулювання кута розходження лазерного променя, без зміни кратності збільшення. Такі системи, на відміну від розширювачів зі змінним масштабуванням, мають простішу конструкцію, менші габарити та знижену вагу, що робить їх зручними для інтеграції в компактні оптичні пристрої.



Рисунок 1.2 – Фіксований розширювач лазерного променя Ronar-Smith

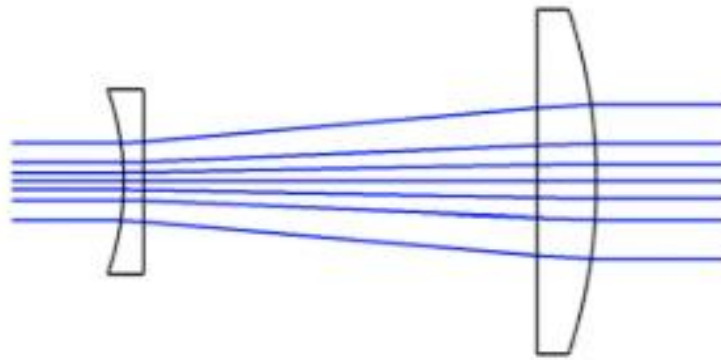


Рисунок 1.3 – Схема розширювача фіксованого збільшення

Розширювачі лазерного променя зі змінним масштабуванням (рис. 1.4) реалізують зміну кратності збільшення за рахунок внутрішніх механізмів переміщення лінз та систем фокусування. Така конструкція забезпечує плавне регулювання параметрів пучка в широкому діапазоні збільшень та дозволяє адаптувати оптичну систему до різних режимів роботи.

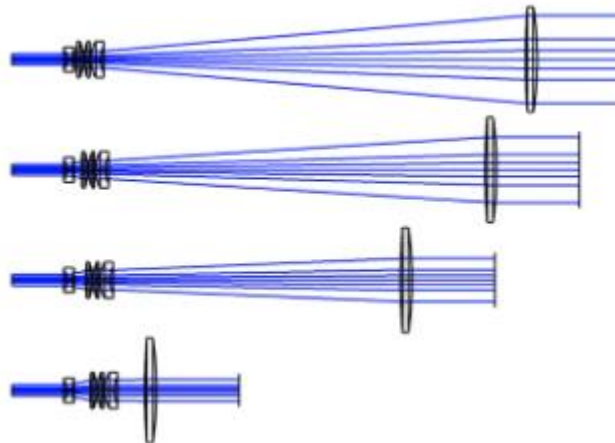


Рисунок 1.4 – Схема розширювача з масштабуванням

Ручні/моторизовані розширювачі лазерного променя з масштабуванням мають змінне збільшення в певному діапазоні. Для мінімізації теплових навантажень у високопотужних лазерах, а також

усунення хроматичних аберацій у надшвидкісних системах, розроблено розширювачі променя на основі відбивної фокусуєчої оптики (рис. 1.5). Такі модулі можуть функціонувати як самостійні елементи, або бути інтегрованими в комбіновані оптичні системи, що поєднують відбивні та заломлюючі компоненти.

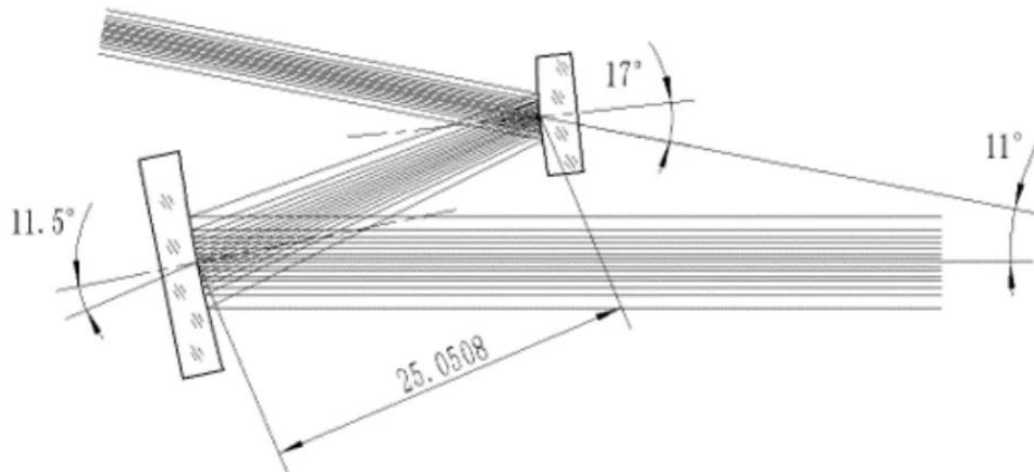


Рисунок 1.5 – Конструкція відбивного розширювача лазерного променя

1.2 Скануючі системи

Скануючі лінзи – це оптичні елементи, спеціально розроблені для лазерної обробки матеріалів, зокрема для гравіювання, різання, зварювання та склеювання. Вони можуть мати телецентричну або нетелецентричну конфігурацію, що визначає геометрію променя на поверхні об'єкта. Для систем машинного зору, які працюють у розширеному спектральному діапазоні, доцільно використовувати ахроматичні скануючі лінзи – як телецентричні, так і нетелецентричні – з метою зменшення аберацій і забезпечення точності при багатохвильовому зондуванні (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – F-Theta Об'єктив

Скануючі лінзи – це оптичні елементи, спеціально оптимізовані для лазерних процесів обробки матеріалів, таких як гравіювання, різання, зварювання та склеювання. Залежно від конфігурації, вони можуть бути виконані з телецентричною робочою геометрією або без неї, що визначає характер проходження променя через фокальну площину. Для систем машинного зору, які потребують роботи на додаткових довжинах хвиль, застосовуються ахроматичні скануючі лінзи, що компенсують хроматичні аберації. Такі лінзи можуть реалізовуватися як у телецентричному, так і в нетелецентричному виконанні – залежно від вимог до точності зображення, глибини різкості та спотворень [2].

У більшості випадків, при лазерній обробці матеріалів, необхідно забезпечити плоске фокальне поле, оскільки саме воно дозволяє досягти рівномірної якості сканування по всій площині об'єкта. Традиційна оптика, наприклад, параксіальні лінзи, фокусують зображення на сферичній поверхні, що призводить до виникнення геометричних спотворень, таких як сферична аберація, при проєкції на плоский зразок.

Для усунення цієї проблеми застосовують лінзи з вирівнюванням поля, які здатні формувати плоску фокальну площину. Однак така корекція здійснюється ціною нелінійної поведінки променя: зміщення точки фокусування залежить не лінійно від кута відхилення. Зокрема, між

ефективною фокусною відстанню f та кутом відхилення променя θ виникає залежність типу $f \cdot \tan(\theta)$, яка призводить до нерівномірності сканування.

Ця нелінійність ускладнює точне позиціонування променя та викликає похибки між фактичним масштабом зображення й передбаченим збільшенням, що особливо критично для систем технічного зору. Щоб компенсувати ці ефекти, скануючі лінзи проєктуються таким чином, щоб зміщення фокусної точки залежало лінійно від кута відхилення, тобто було пропорційним самому куту, а не його тангенсу. Це дозволяє забезпечити стабільну геометрію сканування, спрощує керування гальванометричними дзеркалами та зменшує вимоги до цифрової компенсації (рис. 1.7).

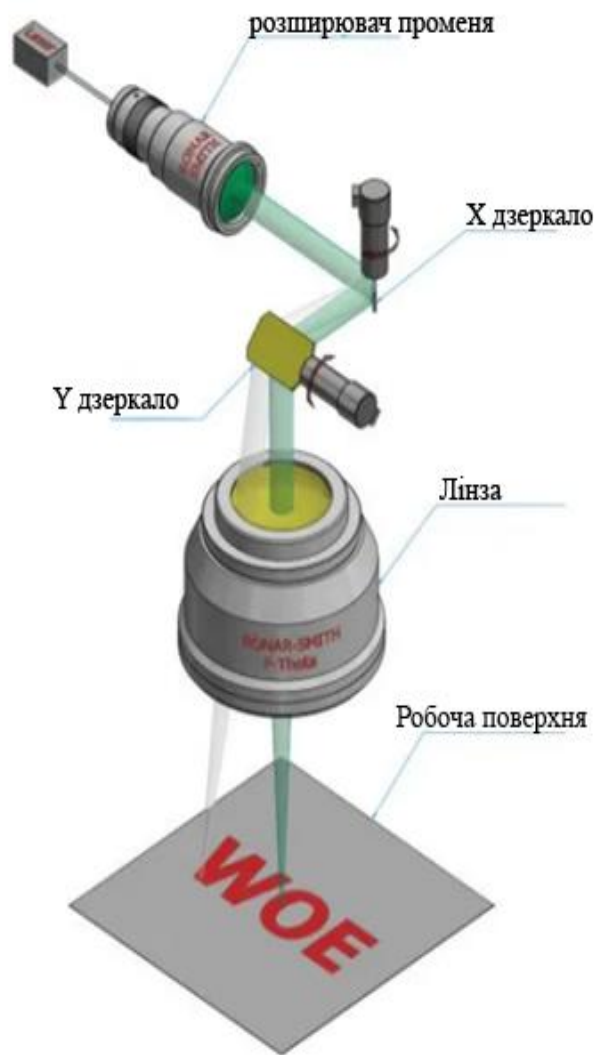


Рисунок 1.7 – Процес лазерного сканування з використанням F-Theta лінзи

Скануюча лінза забезпечує лінійну залежність між ефективною фокусною відстанню f та кутом відхилення променя θ , що дозволяє досягти лінійного зміщення фокусної точки на зразку. Така характеристика є оптимальною для використання зі скануючими системами на базі ХУ-гальванометричних дзеркал, які обертаються з постійною кутовою швидкістю. У результаті забезпечується стала лінійна швидкість переміщення променя по фокальній площині. Це значно спрощує побудову системи керування: відпадає потреба у складних алгоритмах компенсації нелінійності, а електронна корекція шумів або збурень майже не потрібна. Такий підхід дозволяє реалізувати точне, стабільне та економічно ефективне рішення для задач високошвидкісного сканування [3].

Скануючі лінзи застосовуються в широкому спектрі технологій і сумісні з лазерами у великому діапазоні довжин хвиль – від ультрафіолетового (УФ) і видимого до ближнього інфрачервоного (ІЧ) та CO₂-лазерів, що працюють у середньому ІЧ-діапазоні.

Одним із ключових параметрів таких лінз є телецентричність, яка визначає кут падіння променя на оброблювану поверхню. У телецентричних системах цей кут залишається сталим по всій площині зразка, що забезпечує однорідне фокусування і постійний розмір лазерної плями. Це усуває помилки, пов'язані з ефектом паралаксу, які притаманні нетелецентричним системам, де кут падіння змінюється залежно від положення променя в полі.

Крім того, у промислових системах широко застосовуються ахроматичні скануючі лінзи (рис. 1.8), які дозволяють поєднувати дві довжини хвиль – зазвичай лазерну (робочу) та видиму (сигнальну) – в одній фокальній площині. Це забезпечує просторову й тимчасову відповідність між робочим лазерним випромінюванням та каналом зворотного зв'язку на видимому діапазоні. Завдяки цьому досягається висока точність позиціонування в реальному часі. Такий підхід дозволяє ефективно інтегрувати системи машинного зору в структуру лазерної обробки,

підвищуючи рівень автоматизації, контролю якості та надійності промислових процесів.

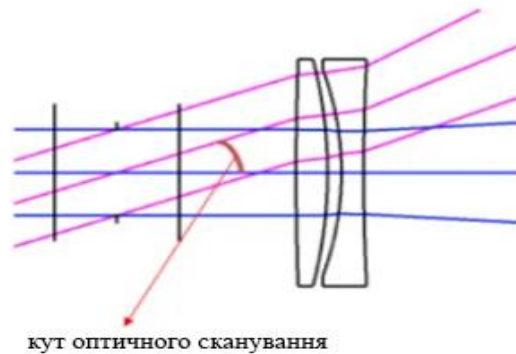


Рисунок 1.8 – Оптична схема системи з фіксованим полем зору

Зазвичай об'єктив має два кути сканування, один кут сканування – це кут оптичного сканування, а інший – кут механічного сканування. Кут механічного сканування пов'язаний зі скануючим дзеркалом. Зазвичай це кут повороту двох дзеркал, який керує діапазоном сканування з двох сторін (рис. 1.9).

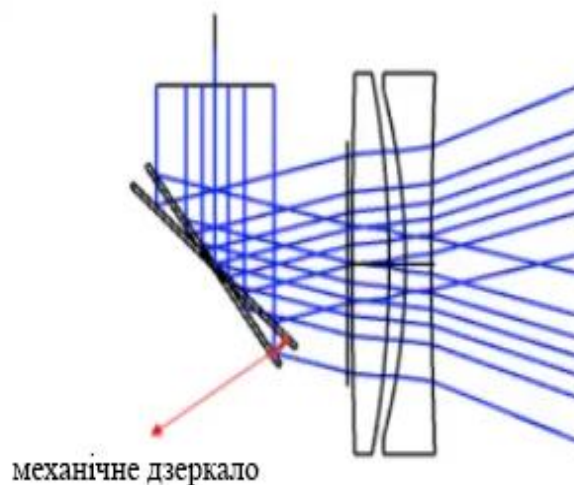


Рисунок 1.9 – Оптична схема системи з механічним дзеркалом

Використовуємо два механічних скануючих дзеркала як кут дзеркала X і кута дзеркала Y відповідно, тоді відношення між ними та кутом оптичного

сканування буде наступним: $(\text{кут дзеркала } X)^2 + (\text{кут дзеркала } Y)^2 = (\text{кут оптичного сканування}/2)^2$.

1.3 Людське око

Людське око (рис. 1.10) не є ідеально сферичним утворенням – воно складається з двох основних частин, які мають різну форму: рогівки та склери. Рогівка утворює передню прозору частину ока, тоді як склера – це щільна біла оболонка, що формує задню частину очного яблука. Межа між ними називається лімбом, який являє собою перехідну зону [4].

Видимою частиною ока є райдужна оболонка – кольорове кільце, яке визначає індивідуальний колір очей. У центрі райдужки розташована зіниця – округлий отвір, який регулює кількість світла, що потрапляє в око, змінюючи свій діаметр залежно від умов освітлення. Рогівка покриває як райдужку, так і зіницю, але сама при цьому залишається абсолютно прозорою.

Усередині очного яблука, навпроти зіниці, знаходиться очне дно, яке включає сітківку – світлочутливу тканину, що сприймає зображення. Проте ця ділянка не є доступною для прямого спостереження без застосування спеціальних оптичних приладів, таких як офтальмоскоп.

Передача зорової інформації від сітківки до мозку здійснюється через зоровий нерв, що забезпечує перетворення оптичного сигналу на електричні імпульси та їх подальшу обробку в зорових центрах головного мозку.

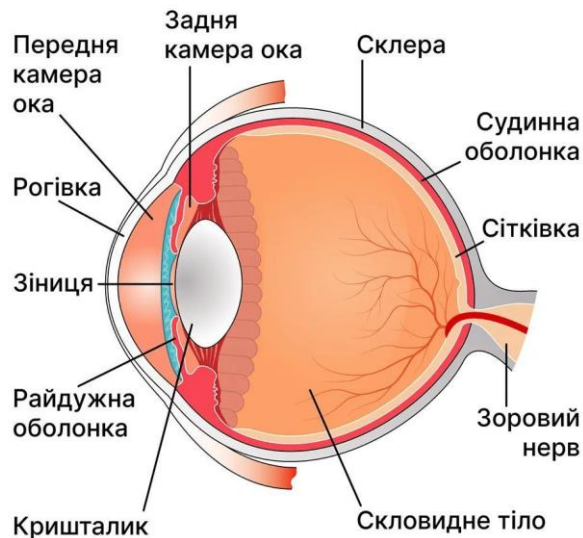


Рисунок 1.10 – Будова людського ока

Оптична система людського ока побудована з кількох середовищ, кожне з яких має власний показник заломлення, що впливає на хід променів. Основний внесок у заломлення світла вносить рогівка, яка забезпечує приблизно дві третини загальної оптичної сили ока. Решта припадає на кришталік – двоопуклу гнучку лінзу, розташовану за райдужною оболонкою [5].

Світлові промені, проходячи через рогівку, водянисту вологу, кришталік і склисте тіло, заломлюються й формують зображення на сітківці, подібно до того, як це відбувається в опуклій лінзі. Сформоване зображення є інверсним (перевернутим), але мозок автоматично коригує його орієнтацію на рівні обробки візуальної інформації.

Для забезпечення чіткого зору на різних відстанях система має змінювати свою фокусну відстань, що здійснюється завдяки акомаційній здатності кришталіка (рис. 1.11). Його форма змінюється під дією циліарних м'язів, які скорочуються або розслабляються залежно від положення об'єкта в просторі. Це дозволяє фокусувати зображення безпосередньо на сітківці, забезпечуючи гостре сприйняття об'єктів як поблизу, так і вдалині.

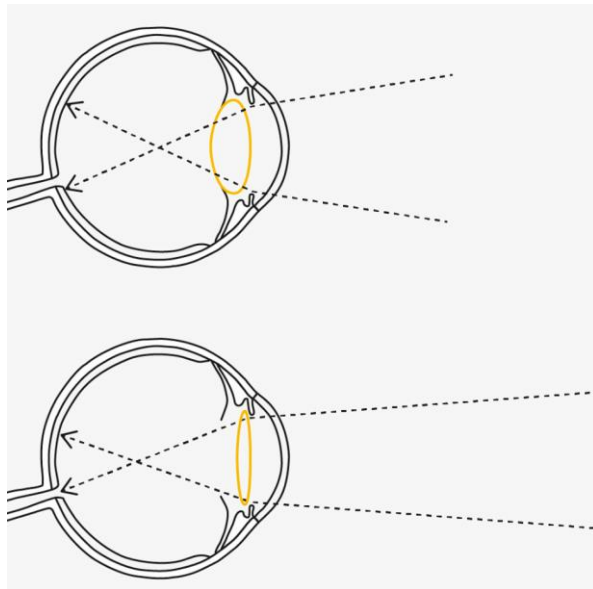


Рисунок 1.11 – Зміна кута зору за допомогою кришталіка

1.4 Об'єктив фотоапарата

Зум-об'єктив стандартної конфігурації з чітко розмежованими функціями чотирьох груп лінз (фокусувальна група, група зміни збільшення, група корекції та група формування зображення). Дві групи – зміни збільшення та корекції – рухаються під час зміни фокусної відстані. Оскільки в такій конструкції легко досягти великого коефіцієнта зміни фокусної відстані з високим збільшенням, вона зазвичай використовується в об'єктивах кінокамер і теле-зум-об'єктивах однооб'єктивних дзеркальних фотоапаратів. Проте через складнощі, що виникають під час розробки компактних зум-об'єктивів, її використання стає не таким поширеним у сучасних звичайних зум-об'єктивах (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Переріз об’єктиву Leica

Існує п’ять основних конструкцій (рис. 1.13), що використовуються в об’єктивах із фіксованою фокусною відстанню загального призначення. Перший тип з однією лінзою є найпростішим, складається з однієї або двох з’єднаних лінз. Другий і третій – це подвійні об’єктиви, які складаються з двох незалежних лінз. Четвертий тип – це триплети, об’єктиви, що складаються з трьох незалежних лінз, розташованих у такій послідовності: опукла-вгнута-опукла. П’ятий тип – симетричний, складається з двох груп по одній або більше лінз однакової форми й конфігурації в кожній групі, симетрично розташованих відносно діафрагми [6–10].

На відміну від об’єктивів із фіксованою фокусною відстанню, які містять від 3 до 7 лінз, варіооб’єктиви мають багатолінзову конструкцію, і кількість оптичних елементів у них може перевищувати 20. При цьому окремі лінзи переміщуються всередині оправы та відносно одна одної, іноді за складними законами, змінюючи фокусну відстань всієї системи без зміни положення фокальної площини.

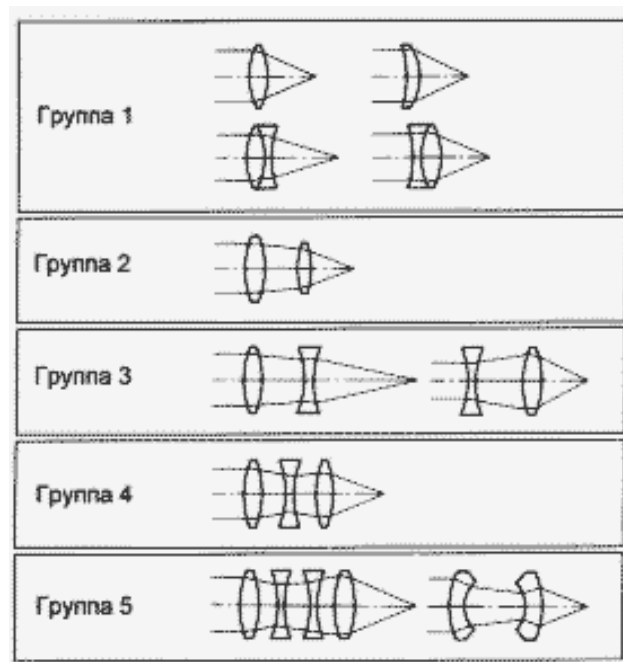


Рисунок 1.13 – Поширені конструкції об'єктивів

За принципом корекції абераций панкратичні об'єктиви умовно поділяються на дві групи:

1) трансфокатор – оптична система, що складається з афокальної насадки зі змінним кутовим збільшенням і об'єктива з постійною фокусною відстанню. Корекція абераций здійснюється окремо для обох частин трансфокатора. Такий принцип побудови дозволяє використовувати одну й ту ж панкратичну насадку з різними об'єктивами. Для цього вихідна зіниця насадки суміщується з вхідною зіницею об'єктива (рис. 1.14);

2) варіооб'єктив – об'єктив, у якому зміна фокусної відстані досягається дією всіх груп лінз. Він сконструйований як єдине ціле і складається з варіатора, в якому за складними законами переміщуються окремі лінзи, та коректора, що виправляє залишкові аберации варіатора. У порівнянні з трансфокатором, дозволяє досягти кращої корекції багатьох абераций при меншій кількості лінз і компонентів, а також забезпечує підвищену геометричну світлосилу в усьому діапазоні фокусних відстаней.

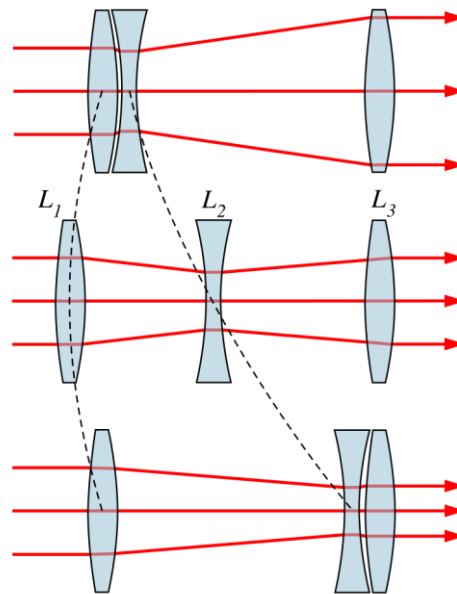


Рисунок 1.14 – Принцип дії найпростішого трансфокатора

1.5 Висновки до розділу 1

У даному розділі проведено огляд існуючих типів оптичних систем, що реалізують зміну поля зору. Зокрема:

а) проаналізовано принцип дії розширювачів лазерного променя кеплерівського та галілеєвського типів, а також конструкції з фіксованим та змінним масштабом. Визначено їхні переваги для задач масштабування променя в різних умовах;

б) описано особливості скануючих лінз, включаючи F-Theta-оптику, телецентричні й ахроматичні конфігурації. Показано важливість забезпечення лінійної відповідності між кутом відхилення та зміщенням фокусної точки для систем високоточних сканерів;

б) наведено аналогію між оптичними системами та біологічними механізмами адаптації людського ока, підкреслюючи важливість механізму акомодації;

б) розглянуто принципи побудови сучасних об'єктивів фотокамер, включаючи трансфокатори й варіооб'єктиви. Визначено труднощі, пов'язані

зі зменшенням габаритів і корекцією аберцій у системах зі змінною фокусною відстанню.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Оптична пара Альвареса

У більшості традиційних зум-об'єктивів зміна фокусної відстані досягається шляхом поздовжнього переміщення груп лінз уздовж оптичної осі. Кожна група рухається за заданою траєкторією, змінюючи загальну оптичну силу системи, тобто її фокусну відстань. Це дозволяє реалізовувати різні значення зум-коефіцієнта, забезпечуючи масштабування зображення без зміни положення сенсора.

На відміну від цього, у зум-об'єктиві Альвареса (рис. 2.1) використовується інший принцип: пари вільноформних лінз зміщуються взаємно у поперечному (латеральному) напрямку, перпендикулярно до оптичної осі. Такий бічний зсув викликає зміну сумарної оптичної сили пари, що призводить до зміни ефективної фокусної відстані системи. Цей підхід дозволяє створювати плоскі, компактні зум-об'єктиви без потреби в осьовому русі оптичних компонентів, що особливо актуально для мобільної та портативної оптики [10–12].

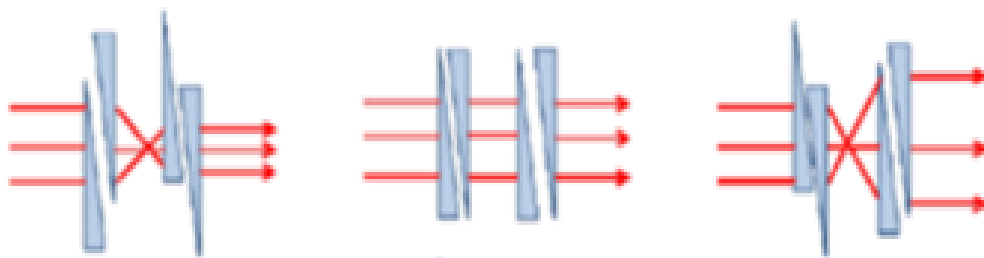


Рисунок 2.1 – Принцип дії об'єктива Альвареса

Ключова відмінність між традиційними зум-об'єктивами та системою Альвареса (рис. 2.2) полягає у напрямку переміщення оптичних елементів. У класичних конструкціях лінзи або їхні групи переміщуються вздовж оптичної осі, тоді як у системі Альвареса зміна фокусної відстані досягається латеральним (поперечним) зміщенням лінз, тобто перпендикулярно до осі.

Такий принцип дає змогу суттєво зменшити глибину об'єктива, що робить його ідеальним для застосування в тонкопрофільних пристроях, зокрема смартфонах, планшетах та портативній оптиці, де критичною є компактність і механічна простота.

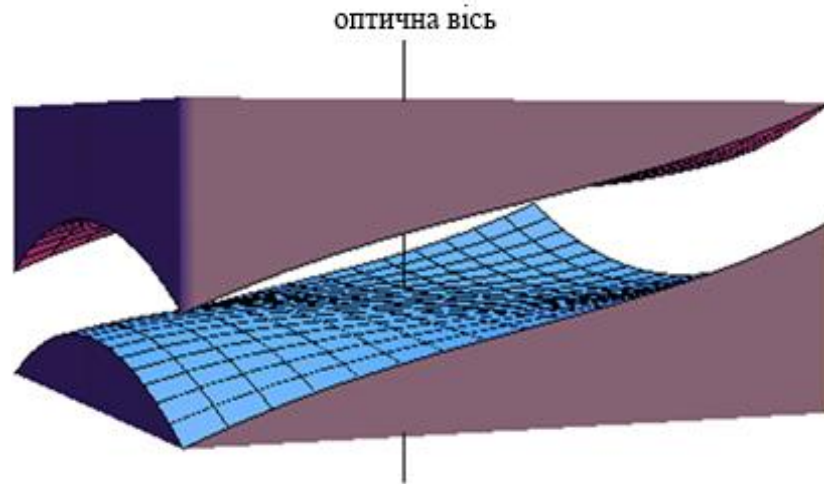


Рисунок 2.2 – Оптична пара Альвареса

Кожна лінза Альвареса є вільноформним оптичним елементом, тобто має поверхню, яка не є сферичною чи асферичною в класичному розумінні, а формується за спеціальною математичною функцією [13]. Водночас вона характеризується однією площиною симетрії, що забезпечує керовану зміну оптичної сили під час зміщення.

Як видно зі схеми (рис. 2.3), при бічному (латеральному) зсуві лінз у парі відносно одна одної, сумарна оптична сила системи змінюється. Це, у свою чергу, призводить до зміни ефективної фокусної відстані всієї оптичної системи, що є основою функціонування зум-об'єктива Альвареса.

Щоб глибше зрозуміти принцип дії зум-об'єктива Альвареса, необхідно проаналізувати поведінку окремих пар лінз цієї конструкції. Кожна лінза Альвареса є вільноформним оптичним елементом з лише однією площиною симетрії, що відрізняє її від традиційних сферичних або асферичних компонентів.

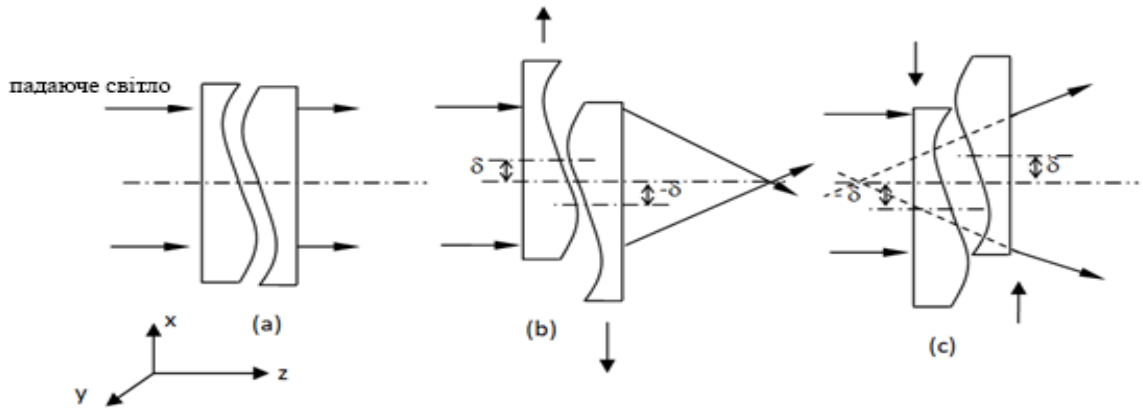


Рисунок 2.3 – Загальний принцип роботи пари лінз Альвареса

Як показано на рисунку 2.4, пара лінз Альвареса утворює систему, в якій сумарна оптична сила змінюється під впливом латерального (бічного) зміщення лінз відносно одна одної. Зміна цього зсуву безпосередньо впливає на фокусну відстань пари, що й забезпечує механізм масштабування зображення без осьового руху.

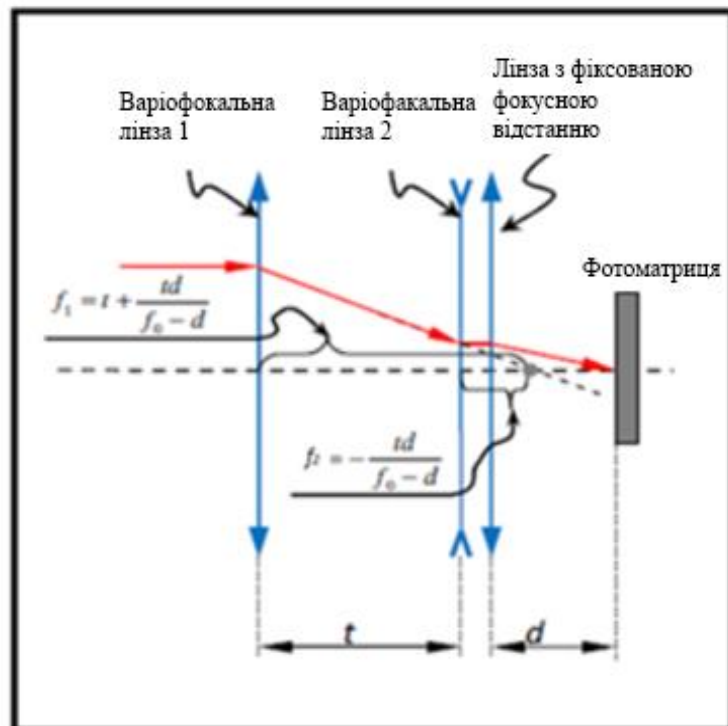


Рисунок 2.4 – Параксіальне розташування об'єктива Alvarez Zoom

Оптична архітектура зум-об'єктива Альвареса базується на принципі афокальної системи типу Галілея, яка складається з двох основних компонентів: об'єктива та окуляра, розташованих співвісно. У цьому випадку перша пара лінз Альвареса виконує функцію об'єктива афокальної системи, тоді як друга пара відповідає за роль окуляра.

Завдяки використанню вільноформних лінз із регульованою оптичною силою, така система дозволяє змінювати збільшення без введення фокальної площини всередині об'єктива, що характерно для афокальних конфігурацій.

Збільшення системи Галілея визначається як:

$$M = \frac{f_1}{f_2}, \quad (2.1)$$

де f_1 – фокусна відстань об'єктива;

f_2 – фокусна відстань окуляра.

У зум-об'єктиві Альвареса об'єктив та окуляр представлені парами Альвареса, що означає, що можна змінювати фокусні відстані f_1 та f_2 , отже, плавно змінювати збільшення системи, таким чином виконується масштабування [14-17].

Система Галілея є афокальною системою, тому для фокусування зображення на площині сенсора ми вводимо базову лінзу – оптичний компонент з фіксованим фокусом

Фокусні відстані компонентів можна розрахувати за такими рівняннями:

$$f_1 = t + \frac{td}{f_0 - d}, \quad (2.2)$$

$$f_2 = -\frac{td}{f_0 - d}, \quad (2.3)$$

$$f_3 = d. \quad (2.4)$$

2.2 Моделювання об'єктива Alvarez Zoom

Приклад обчислення першої параксіальної моделі.

FOV (поле зору) : -70° при шир окому куті.

$HFOV$: половина поля зору.

Розмір датчика : датчик 1/3, 06 дюйма (висота зображення по діагоналі складає 2,933 мм).

Коефіцієнт масштабування : ефективна фокусна відстань у режимі телеоб'єктива f_t . Ефективна фокусна відстань у режимі ширококутного фокусування f_w . Об'єктив із 3-х кратним зумом.

Ефективна фокусна відстань у ширококутному режимі:

$$F_w = \frac{Diag/2}{HFOV} = 2,094 \text{ мм.} \quad (2.5)$$

Ефективна фокусна відстань у режимі телеоб'єктивного фокусування:

$$F_t = Zoom \text{ ratio} \times f_w = 6,283 \text{ мм.} \quad (2.6)$$

$HFOV$ у телеоб'єктивному режимі:

$$a = \arctan\left(\frac{Diag/2}{f_{tp}}\right) \approx 13^\circ. \quad (2.7)$$

Отже, кут поля зору в телеоб'єктивному режимі становить близько 26° .

Для початку ми вирішили встановити $t = 20$ мм та $d = 5$ мм. Розрахуємо фокусні відстані компонентів у ширококутному та телеоб'єктивному положеннях:

$$f_{1w} = t + \frac{td}{EFFL_w - d} = -14,416 \text{ мм,} \quad (2.8)$$

$$f_{2w} = -\frac{td}{EFFL_w - d} = 34,416 \text{ мм}, \quad (2.9)$$

$$f_{1t} = t + \frac{td}{EFFL_t - d} = 97,934 \text{ мм}, \quad (2.10)$$

$$f_{2t} = -\frac{td}{EFFL_t - d} = -77,934 \text{ мм}. \quad (2.11)$$

Перетворимо першу та другу параксіальні групи на реальні лінзи Альвареса. Як перший підхід зручно використовувати розширений поліном. Використовуючи наступні рівняння, ми можемо обчислити провисання пар Альвареса:

$$z_{(x,y)} = A \left(\frac{1}{3} y^3 + yx^2 \right), \quad (2.12)$$

$$\varphi(\delta) = 4A\delta(n - 1), \quad (2.13)$$

де φ – оптична сила пари Альвареса, що відповідає латеральному зміщенню лінз у парі Альвареса;

A – коефіцієнт розширеного полінома;

δ – це латеральне зміщення лінз у парі Альвареса, воно має бути ненульовим значенням. Оскільки з нульовим зміщенням пара Альвареса буде просто паралельною пластиною з нульовою оптичною силою [17–20].

Призначимо для ширококутного положення бічне зміщення лінз у кожній парі Альвареса рівним 1 мм, наприклад, $\delta_{1w} = 1$ мм та $\delta_{2w} = 1$ мм. Як матеріал був обраний оптичний пластик APL5014CL з каталогу APPEL, доступного в Zemax Optic Studio, показник заломлення $n = 1,5445$. Маючи ці дані, ми можемо обчислити коефіцієнт A розширеного полінома.

Для першої пари Альвареса:

$$A_1 = \frac{1}{4f_{1w}\delta_{1w}(n - 1)} = -0,032, \quad (2.14)$$

Для другої пари Альвареса:

$$A_2 = \frac{1}{4f_{2w}\delta_{2w}(n-1)} = 0,013. \quad (2.15)$$

Латеральне зміщення лінз у кожній парі Альвареса в положенні телеоб'єктива можна розрахувати як:

$$\delta_t = \frac{\varphi_t}{\varphi_w}. \quad (2.16)$$

Враховуючи інверсію фокусної відстані, ми отримаємо значення 0,147 мм та 0,442 мм. Тепер у нас є всі дані для моделювання нашого об'єктива Alvarez Zoom у Zemax OpticStudio (рис. 2.5).

Surf. #	Surf. Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Semi-Diameter	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6	Decenter X	Decenter Y
0	OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			0.000000	0.0000...	0.000000	0.0000...	0.0000...		
1		Standard	Infinity	5.000000			1.000000	0.0000...	1.000000	0.0000...	0.0000...		
2	STOP	Standard	Infinity	0.000000			1.000000 U	0.0000...	1.000000	0.0000...	0.0000...		
3		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	-0.147000
4		Standard	Infinity	1.000000	APL5014CL		2.000000 M	0.0000...	2.000000	0.0000...			
5		Extended Polynomial	Infinity	0.500000			2.000000 M			0.0000...	0.0000...		
6		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	0.147000 P
7		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	0.147000 P
8		Extended Polynomial	Infinity	1.000000	APL5014CL		2.000000 M			0.0000...			
9		Standard	Infinity	0.000000			2.050655 M	0.0000...	2.050655	0.0000...	0.0000...		
10		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	-0.147000 P
11		Standard	Infinity	18.2644... V			1.003230	0.0000...	1.003230	0.0000...	0.0000...		
12		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	-0.442000
13		Standard	Infinity	1.000000	APL5014CL		3.404149 M	0.0000...	3.442553	0.0000...			
14		Extended Polynomial	Infinity	0.500000			3.442553 M			0.0000...	0.0000...		
15		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	0.442000 P
16		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	0.442000 P
17		Extended Polynomial	Infinity	1.000000	APL5014CL		3.473479 M			0.0000...			
18		Standard	Infinity	0.000000			3.472426 M	0.0000...	3.472426	0.0000...	0.0000...		
19		Coordinate Break	0.000000				0.000000					0.000000	-0.442000 P
20		Standard	Infinity	2.000000			0.790605	0.0000...	0.790605	0.0000...	0.0000...		
21		Paraxial	5.000000				2.468427 M					5.000000	1
22	IMAGE	Standard	Infinity				6.984041E-...	0.0000...	6.984041E-03	0.0000...	0.0000...		

Рисунок 2.5 – Вікно параметрів моделювання об'єктива Alvarez Zoom в OpticStudio: редактор даних об'єктива (ліворуч)

Для реалізації латерального зміщення лінз Альвареса під час моделювання в середовищі Zemax OpticStudio використовуються так звані розриви координат (coordinate breaks). Вони дозволяють локально зміщувати або повертати систему координат для окремих оптичних елементів. Зокрема,

кожен другий розрив координат використовується для відновлення початкової системи відліку, що необхідно для правильного позиціонування наступних компонентів.

З метою спрощення розрахункової моделі, базову лінзу системи на цьому етапі моделювання представлено у вигляді ідеалізованої параксіальної лінзи, що дозволяє зосередитися на аналізі дії саме пар Альвареса, не враховуючи додаткових аберацій або геометричних спотворень (рис. 2.6).

Surf-Type	Maximum Term	Norm Radius	X1Y0	X0Y1	X2Y0	X1Y1	X0Y2	X3Y0	X2Y1	X1Y2	X0Y3	
OBJECT	Standard											
	Standard											
STOP	Standard											
	Coordinate Break											
	Standard											
	Extended Polynomial	9	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.012000	0.000000	-0.011000
	Coordinate Break											
	Coordinate Break											
	Extended Polynomial	9	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.012000	0.000000	-0.011000
	Standard											
	Coordinate Break											
	Coordinate Break											
	Standard											
	Extended Polynomial	9	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.013000	0.000000	4.447000E-03
	Coordinate Break											
	Coordinate Break											
	Extended Polynomial	9	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.013000	0.000000	4.447000E-03
	Standard											
	Coordinate Break											
	Standard											
	Paraxial											
IMAGE	Standard											

Рисунок 2.6 – Вікно моделювання об'єктива Alvarez Zoom в OpticStudio:
Редактор даних об'єктива (праворуч)

Усі розширені поліноміальні поверхні мають 9 членів, а нормований радіус дорівнює 1. Для першої пари Альвареса ми встановлюємо член X2Y1 рівним раніше обчисленому A_1 , а член X0Y3 рівним $A_1/3$. І відповідно, для другої пари Альвареса член X2Y1 рівним A_2 , а член X0Y3 рівним $A_2/3$.

Тепер перейдемо до редактора багатоконфігурацій та налаштуємо відповідні бічні зміщення лінз Альвареса (рис. 2.7).

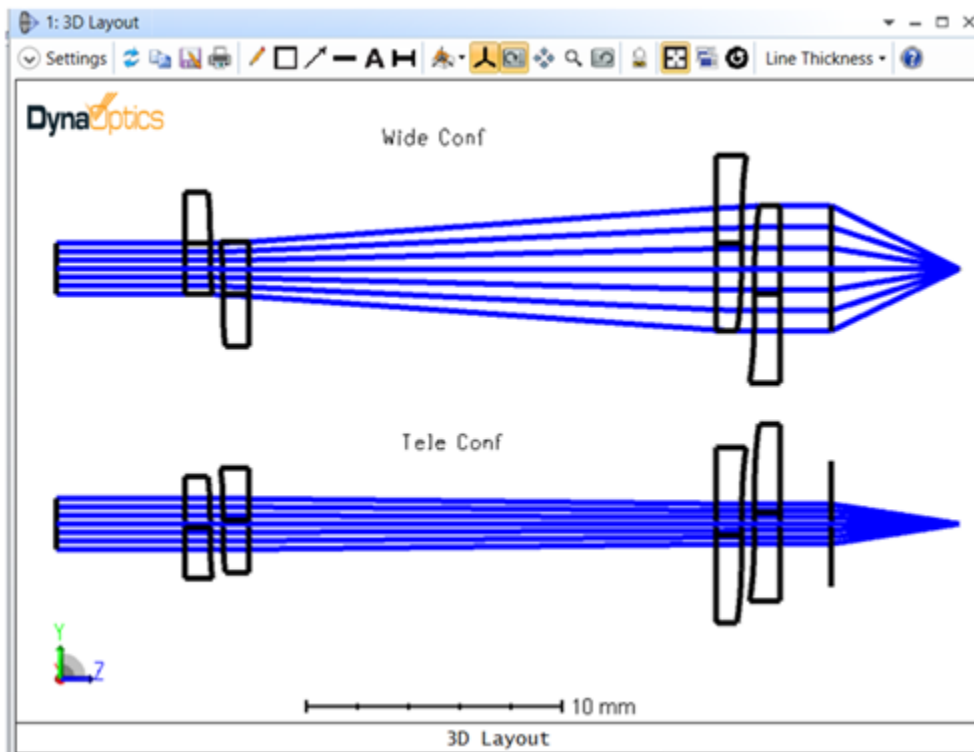


Рисунок 2.7 – Вікно моделювання об'єктива Alvarez Zoom в OpticStudio:
3D-макет

У процесі моделювання об'єктива Альвареса в редакторі даних лінз Zemax OpticStudio можна помітити, що фактична відстань між першою та другою парами лінз не дорівнює 20 мм, як було передбачено початковими аналітичними розрахунками. Це пов'язано з тим, що у вихідних формулах використовувалося припущення про тонкі оптичні компоненти, тоді як у моделі – лінзи мають реальну (ненульову) товщину.

Щоб врахувати цей ефект, зазначену відстань між парами лінз було введено в моделі як оптимізована змінна. У редакторі було застосовано просту функцію якості (merit function), і виконано оптимізацію лише по одній змінній – міжпарній відстані. В результаті, цільове значення 20 мм змінилося до 18,2644 мм, що відповідає реальній оптичній конфігурації з урахуванням товщини елементів.

Оскільки у моделі застосовуються децентровано розташовані розширені поліноміальні поверхні, значення ефективної фокусної відстані (EFFL), розраховане Z_{max} на основі параксіальних наближень, буде неточним. Для коректного визначення фокусної відстані в такій системі необхідно використовувати реальний параксіальний промінь, розташований максимально близько до оптичної осі. Його хід дозволяє отримати фізично точне значення фокусної відстані з урахуванням усіх геометричних та оптичних нюансів системи (рис. 2.8).

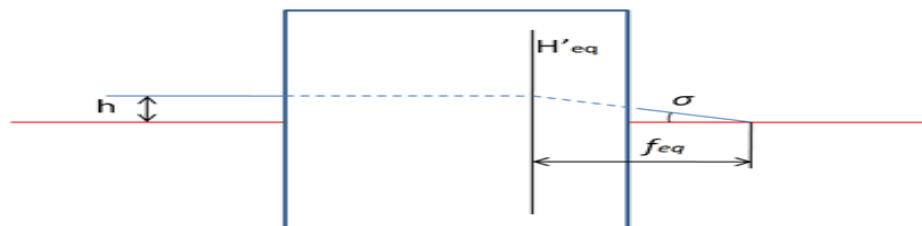


Рисунок 2.8 – Схема розрахунку фокусної відстані для об'єктива Alvarez Zoom

Знаючи σ та h , легко розрахувати ефективну фокусну відстань оптичної системи. Ми просто виконали цей розрахунок у редакторі функцій якості та отримали фокусну відстань 2,135 мм для ширококутної конфігурації та 6,306 мм для телеоб'єктивної конфігурації. Як бачимо, ці значення дуже близькі до цільових, що означає, що оптична система працює правильно.

Оскільки це параксіальна модель, вона буде певною мірою точною лише для малих кутів, то для корекції аберацій вздовж усього поля зору нам слід додати більше членів до розширених поліноміальних поверхонь та оптимізувати оптичну систему (рис. 2.9).

Type	Surf	Wave	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value	% Contrib	
1	CONF	1									
2	BLNK	Wide Conf									
3	REAY	2	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.100000	0.0000...	0.0000...	0.100000	0.000000
4	RAID	22	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.100000	0.0000...	0.0000...	2.681459	0.000000
5	TANG	4	1					0.0000...	0.0000...	0.046834	0.000000
6	DIVI	3	5					0.0000...	0.0000...	2.135179	0.000000
7	BLNK										
8	BLNK										
9	CONF	2									
10	BLNK	Tele Conf									
11	REAY	2	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.100000	0.0000...	0.0000...	0.100000	0.000000
12	RAID	22	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.100000	0.0000...	0.0000...	0.908436	0.000000
13	TANG	12	1					0.0000...	0.0000...	0.015857	0.000000
14	DIVI	11	13					0.0000...	0.0000...	6.306551	0.000000
15	BLNK										

Рисунок 2.9 – Вікно моделювання об'єктива Alvarez Zoom в OpticStudio:
редактор функцій Merit

У представленій моделі в Zemax OpticStudio діаметр вхідної зіниці системи було умовно встановлено на рівні 2 мм. Це значення вибрано переважно з ілюстративною метою, оскільки за такого діаметра контури поверхонь лінз Альвареса краще візуалізуються на графіках та 3D-макетах.

Однак, згідно з розрахунками, при ширококутній конфігурації системи це відповідає відносному отвору ($F/\#$) приблизно 1, що є вкрай низьким значенням для оптичних систем. Такий великий діаметр апертури створює значні труднощі для корекції аберацій, оскільки система стає чутливою до поля зору, коми, сферичної аберації та астигматизму.

Для практичних застосувань доцільно обмежувати апертуру або впроваджувати додаткові механізми корекції, щоб забезпечити прийнятну якість зображення у всьому діапазоні масштабування.

2.3 Висновки до розділу 2

У даному розділі проведено чисельне моделювання оптичної системи зі змінним полем зору на основі концепції зум-об'єктива Альвареса:

Реалізовано математичну модель зміни фокусної відстані при латеральному зміщенні пар лінз Альвареса.

Виконано розрахунок основних параметрів системи (кут поля зору, ефективна фокусна відстань) у ширококутному та телеоб'єктивному режимах. Результати підтверджують здатність системи змінювати фокусування без переміщення лінз уздовж оптичної осі.

Моделювання в Zemax OpticStudio показало, що конструкція на основі вільноформних поверхонь дозволяє реалізувати зум-ефект у компактному форм-факторі. Проведено оптимізацію міжпарної відстані для врахування реальної товщини лінз.

Визначено, що умовно обраний діаметр вхідної зіниці створює надто мале значення $F/\#$, що потребує подальшої корекції при практичному проектуванні.

Виявлено чутливість системи до зміщення координат та асиметрії поверхонь, що підкреслює необхідність високої точності моделювання в Zemax.

Таким чином, модель успішно реалізує принцип масштабування поля зору за рахунок зміни оптичної сили без осьового руху, що відповідає вимогам до сучасних адаптивних оптичних пристроїв.

ВИСНОВКИ

У межах цієї кваліфікаційної роботи виконано дослідження принципів побудови та моделювання оптичних систем зі змінним полем зору. Робота охоплює як аналітичний огляд сучасних технічних рішень, так і практичне чисельне моделювання інноваційної оптичної архітектури з використанням спеціалізованого програмного забезпечення Zemax OpticStudio.

Проведений аналіз існуючих конструкцій – таких як розширювачі лазерного променя, скануючі системи, зум-об'єктиви фотоапаратів та анатомічна структура людського ока – дозволив узагальнити ключові підходи до формування поля зору та його масштабування в оптичних пристроях. Було показано, що традиційні методи зміни фокусної відстані (шляхом осьового переміщення оптичних груп) мають конструктивні обмеження, особливо при проєктуванні мініатюрних і вбудованих систем.

На цій основі було обґрунтовано доцільність використання оптичної конфігурації на базі пари лінз Альвареса – вільноформних оптичних елементів, які змінюють сумарну оптичну силу при латеральному зміщенні відносно одне одного. Такий підхід дозволяє реалізувати зміну поля зору без осьового руху лінз, забезпечуючи компактність конструкції та зменшення кількості рухомих частин, що є критично важливим у сучасних системах технічного зору, AR/VR-дисплеях, мобільних камерах, медичній оптиці.

У процесі моделювання було:

- виконано побудову параксіальної моделі системи з пар лінз Альвареса;
реалізовано зміну фокусної відстані від ширококутного до телеоб'єктивного режиму;
- визначено ключові параметри системи (ефективні фокусні відстані, геометрія, розміщення компонентів);
- враховано вплив реальної товщини лінз і відхилень від тонколінзової моделі;

– виконано оптимізацію міжпарної відстані для забезпечення фокусування на сенсорі.

Значна увага приділена інженерним аспектам моделювання: реалізації розривів координат, роботі з поліноміальними поверхнями, використанню функцій якості для оптимізації, а також особливостям застосування Zemax OpticStudio для роботи з вільноформною оптикою.

Результати розрахунків свідчать про високу точність реалізованої моделі: розраховані значення ефективної фокусної відстані узгоджуються з аналітичними передбаченнями, а зміна поля зору досягається в межах цільового діапазону без суттєвих аберацій (за умови подальшої оптимізації поверхонь).

Наукова і практична новизна роботи полягає в тому, що вона демонструє реальну працездатність концепції оптичного масштабування без осьового переміщення, а також адаптує теоретичні основи лінз Альвареса до інженерного моделювання в сучасному середовищі. Такий підхід створює передумови для розвитку нових класів компактних адаптивних об'єктивів.

Отримані результати можуть бути використані:

- при створенні систем зображення для безпілотних літальних апаратів і робототехніки;
- в інтегрованих оптичних сенсорах для біомедичної діагностики;
- в адаптивній оптиці AR/VR пристроїв;
- для розвитку дистанційних вимірювальних систем у метрології.

Таким чином, поставлені завдання виконано повністю. Модель оптичної системи зі змінним полем зору побудовано, параметри розраховано, можливості практичного застосування обґрунтовано. Робота демонструє інтеграцію теоретичних знань, методів оптичного дизайну та програмної реалізації інженерного моделювання, що відповідає вимогам до сучасного фахівця в галузі оптоінформаційних технологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. MacNekhin Yu P., Kurskoy Yu S, Gnatenko A. S.. Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems. *Telecommunications and Radio Engineering* 77.18 (2018).
2. Гнатенко О. С., Жданова Ю. В. Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв. (2019).
3. Kurskoy Yu S., O. S. Hnatenko, and O. V. Afanasieva. "Precision Synchronization of Chaotic Optical Systems." (2021).
4. Бітюков А. Ю., and О. С. Гнатенко. "Розрахунок та моделювання оптики приймальних вузлів лазерних систем." (2019).
5. Kurskoy Y., Hnatenko, O., Sherstyuk, D., Zarytskyi, V., Chernovolyk, G., Nussupbekova, G., ... & Muslimov, K. (2024, December). Precision control model for chaotic laser generation in optical communication and laser measurement systems. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024* (Vol. 13400, pp. 208-215). SPIE.
6. Гнатенко О. С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 3. Фемтосекундні лазери для інформаційно-вимірювальних технологій. (2023).
7. Hnatenko, Oleksandr S., et al. "Fiber-optic system for control of the orientation of objects in space." *Optical Fibers and Their Applications 2023*. Vol. 12985. SPIE, 2023.
8. Kurskoy, Yu S., O. S. Hnatenko, and O. V. Afanasieva. "Application of Supercontinuum in Optical Gyroscopy." (2023).
9. Machekhin, Yu P., S. S. Herasymov, and O. S. Hnatenko. "Design and optimal parameters of a small-sized diode-pumped Nd: YAG laser setup." (2023).
10. Мачехін, Ю. П., Гнатенко, О. С., Курський, Ю. С., Семенець, В. В., & Неофітний, М. В. (2019). Лазерні, оптико-електронні прилади та системи.

Ч. 1. Лазерна інформаційновимірювальна техніка для задач військового призначення.

11. Hnatenko, O. S., Machehkin, Y. P., Neofitnyi, M. V., & Gulak, S. V. (2019). Design and study of a laser system for detecting optical devices.

12. Obozna, V. P., and O. S. Hnatenko. "Formation of Laser Radiation Pulses for Encoding in Formation." (2018).

13. Касьянов, В. П. Основы оптики: навчальний посібник. Київ: Вища школа, 2017. 312 с.

14. Савчук О. М. Лазерна техніка та її застосування. Львів: Техніка, 2020. 224 с.

15. Smith W. J. Modern Optical Engineering. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2007. 784 p.

16. Гудзь І. В., Бондаренко С. П. Теоретичні основи оптичних систем. Харків: ХНУРЕ, 2019. 198 с.

17. Hecht, E. Optics. 5th ed. Pearson Education, 2016. 720 p.

18. Васильєв В. П. Оптичні прилади. Київ: Наукова думка, 2010. 280 с.

19. Патенти, технічна документація компаній Thorlabs, Edmund Optics, Leica. доступ 2024 р.

20. Born M., Wolf E. Principles of Optics. 7th ed. Cambridge University Press, 1999. 986 p.