

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 другий (магістерський)
СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ СЕНСОРА ШАКА-ХАРТМАНА
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ЛОЕТм-22-1
Федченко М.А.
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптикоелектронна техніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Афанасьєва О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)
Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____
(повна назва)
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ «Лазерна і оптоелектронна техніка» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Федченку Максиму Андрійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи _____ Створення моделі сенсора Шака-Хартмана
атверджена наказом університету від « 03 » _____ листопада _____ 2023 р. № 1284 Ст _____
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 22 січня _____ 2024 р. _____
- Вихідні дані до роботи _____
Фізика адаптивної оптики; основи збірних оптичних систем; принципи роботи сенсора Шака-Хартмана; фізичні принципи оптики розповсюдження.

- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - Дослідити принципи роботи та конструкцію збірних оптичних систем .
 - Дослідити принципи роботи та конструкцію сенсора Шака-Хартмана оптичних систем.
 - Дослідити фактори, що впливають на фізику оптичного розповсюдження

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 8 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про оптичні томографи	05.09.23–30.09.23	Виконано
2	Дослідження конструкції, можливостей та принципів роботи	01.10.23–20.10.23	Виконано
3	Дослідження та моделювання сенсора Шака-Хартмана	25.10.23–06.11.23	Виконано
4	Дослідження факторів, що впливають на фізику оптичного розповсюдження	10.11.23–25.11.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	02.12.23–17.12.23	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	20.12.24–27.12.24	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	05.01.24–16.01.24	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	18.01.24–19.01.24	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	20.01.24–23.01.24	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Афанасьєва
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 49 с., 44 рис., 1 додаток, 16 джерел.

ПРИНЦИПИ АДАПТИВНОЇ ОПТИКИ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ ДАТЧИКА ШАКА-ХАРТМАНА, МОДЕЛЮВАННЯ ОКА, ОСНОВИ ЗБІРНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ, ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ, ФІЗИКА ОПТИЧНИХ РОЗПОВСЮДЖЕНЬ, СУЧАСНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ.

Об'єкт дослідження – сенсор хвильового фронту Шака-Хартмана.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження створення сенсора Шака-Хартмана, його конструкції, продуктивних характеристик, а також тенденції розвитку систем адаптивної оптики та їх призначення.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Дослідити фізичні основи створення систем адаптивної оптики.
2. Дослідити конструкцію сенсора Шака-Хартмана.
3. Дослідити принципи фізики оптичних розповсюджень.
4. Проаналізувати принципи моделювання ока.
5. Визначити основні напрямки розвитку систем адаптивної оптики.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 49 pp., 44 figures, 1 application, 16 sources.

PRINCIPLES OF ADAPTIVE OPTICS, PRINCIPLES OF THE SHACK-HARTMANN SENSOR, EYE MODELING, PRINCIPLES OF COLLECTED OPTICAL SYSTEMS, DEVELOPMENT PROBLEMS, PHYSICS OF OPTICAL PROPAGATION, MODERN OPTICAL SYSTEMS.

The object of research is Shack–Hartmann wavefront sensor

The research method is theoretical.

The purpose of certification work is the study of Shack-Hartmann sensor creation, its design and performance characteristics as well as development trends in adaptive optics systems and their purposes.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. Investigate the physical basis of creating an adaptive optics system.
2. Investigate the design of Shack-Hartmann sensor.
3. Investigate the principles of physical optics propagation.
4. Analyze the principles of eye modeling.
5. Identify the main directions of development of adaptive optics systems.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Фізичні основи адаптивної оптики.....	8
1.1 Розвиток адаптивної оптики	8
1.2 Принципи адаптивної оптики	8
1.3 Датчики хвильового фронту	11
1.4 Лазерний промінь Шака-Хартмана	17
2 Моделювання ока	21
2.1 Принципи моделювання ока	21
2.2 Моделювання людського ока.....	24
2.3 Збірна оптична система.....	31
3 Моделювання сенсора Шака-Хартмана	34
3.1 Датчик Шака-Хартмана	34
3.2 Моделювання в системі Зеємана	40
3.3 Фізика оптичних розповсюджень.....	43
Висновки.....	47
Перелік джерел посилання	48
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	50

ВСТУП

Проблема корегування спотворень хвильового фронту виникає у багатьох областях оптики. Вирішенням цих проблем займається адаптивна оптика, в останні роки активно розвиваючись та знаходячи своє застосування в офтальмології, лазерних оптичних системах, астрономії та багатьох інших областях вимогливих до якості оптичного зображення.

Невід'ємною складовою таких систем оптики є датчик хвильового фронту. Кожен вид датчиків має свої переваги та недоліки, а створення "ідеального" датчика є невирішеною проблемою.

Саме тому в цій роботі об'єктом дослідження є голографічний датчик хвильового фронту Шака-Хартмана. Розглядатися матеріал буде за допомогою теоретичного метода.

Метою атестаційної роботи є дослідження фізичних основ, конструкції, продуктивних характеристик а також тенденції розвитку системи адаптивної оптики Шака-Хартмана та її призначення.

Для досягнення мети в роботі було поставлено низку завдань, в межах теми, які потребують дослідження та аналізу. Основним завданням є ознайомлення з принципами роботи цього виду пристроїв, аналізу їхньої перспективності, прийняття участі у дослідженні створенні установки, необхідної для подальших етапів створення датчика.

Розвиток сучасних систем хвильової оптики є вкрай необхідним. В свою чергу це вказує на те, що дослідження цього типу систем та спостереження за новітніми напрямками розробки є актуальною та необхідною задачею.

1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ АДАПТИВНОЇ ОПТИКИ

1.1 Розвиток адаптивної оптики

Дослідження принципів адаптивної оптики є важливою частиною розгляду цієї теми адже при поширенні у неоднорідних середовищах світло зазнає спотворення.

Ці спотворення спричиняють погіршення якості оптичного зображення, зниження щільності потоку випромінювання та інші проблеми. Забезпечення високої якості зображення є вкрай важливою задачею в оптиці та оптичній техніці. Вивченням методів усунення таких нерегулярних спотворень (аберацій) займається адаптивна оптика.

Адаптивна оптика комбінує у собі принципи класичних засобів оптики, радіофізики та теорії управління. У 1957 одним із перших можливість компенсації атмосферних спотворень розглянув В.П. Лінник, а в 1958 році Бєбкок вперше запропонував використання керованих оптичних елементів із зворотним зв'язком. Проте недостатній рівень розвитку техніки призвів до того, що експерименти з корегування атмосферних спотворень почали проводитись лише у 70-х роках. В той же час почали проводитися роботи по формуванню та фокусуванню лазерних пучків із застосуванням адаптивних систем. Вкрай ажливим внеском у розвиток адаптивної оптики є збірка праць Харді і Фріда 1979 року "Активна оптика". Першочергово розвиток адаптивної оптики був стимульований завданням проектування оптичних телескопів та розвитком лазерних технологій, проте наразі адаптивні оптичні системи знайшли своє широке застосування у багатьох галузях.

1.2 Принципи адаптивної оптики

За наявності аберацій хід променів відмінюється від ходу променів ідеальної оптичної системи. Розрізняють два види аберацій в оптичних системах: статичні – постійні в часі, їх можна компенсувати за рахунок

методів оптичного проектування (підбору певних параметрів оптичних систем); динамічні – перемінні у часі випадковим чином.

Адаптивні оптичні системи широко використовуються у астрономії адже хвильовий фронт від зірки, проходячи через атмосферу, спотворюється під впливом турбулентності (рис. 1.1).

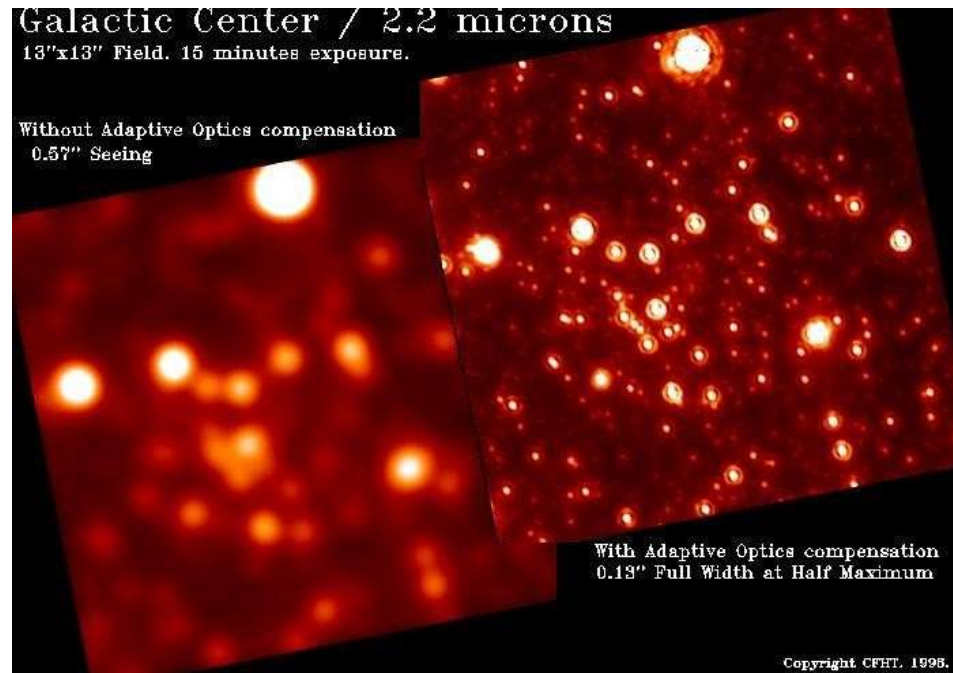


Рисунок 1.1 – Знімок телескопом з адаптивною системою CFHT центру нашої галактики

Адаптивна оптика використовує поняття хвильового фронту, під яким мається на увазі поверхні рівної фази світлової хвилі. Хвильовий фронт може відрізнитися від площини за наявності аберацій (цю відмінність необхідно виміряти та корегувати). Корекції найчастіше пов'язані зі зверненнями хвильового фронту адже перетворений хвильовий фронт є зворотнім до спотвореного і шляхом накладання таких фронтів можна отримати плоский фронт [1]. Найчастіше для корегування застосовують гнучкі дзеркала. Вони складаються з набору дзеркальних поверхонь, які можуть змінювати своє становище за допомогою актуаторів. Гнучкі дзеркала діляться на два типи:

зональні – розбиті на рівні поверхні, які відповідають за окремий сегмент хвильового фронту і модальні – розбиті на поверхні різного розміру, кожна з яких співвідноситься певним чином.

Адаптивні оптичні системи зазвичай складаються із датчика хвильового фронту, який реєструє хвильовий фронт, коректора хвильового фронту і системи управління.

Розглянемо схему адаптивної оптичної системи на прикладі телескопа із сегментованим дзеркалом (рис.1.2) [2].

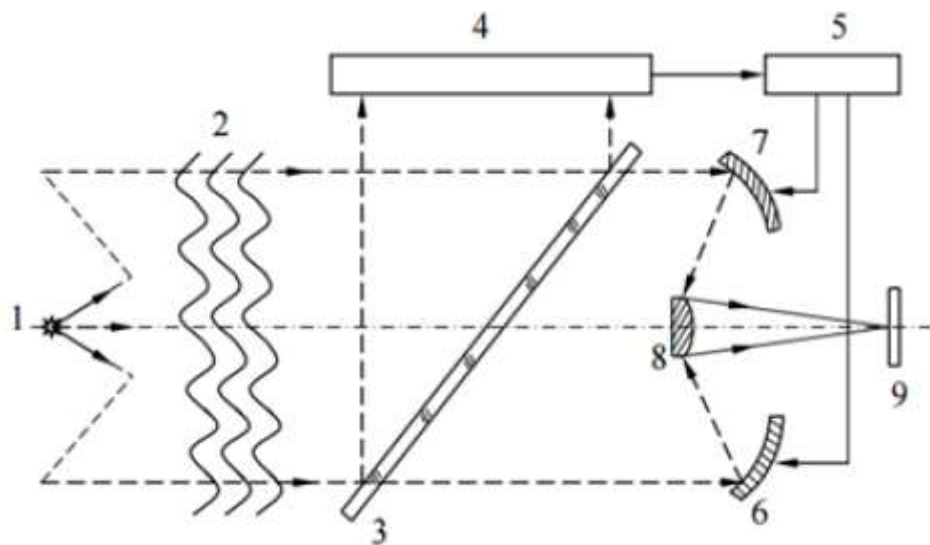


Рисунок 1.2 – ОКТ-зображення двовимірного перерізу внутрішньої оптичної структури шаруватих об'єктів

Зіркове світло 1 проходить через турбулентну атмосферу 2, поділяючись дільником 3, падає на датчик хвильового фронту 4, який фіксує інформацію про спотворення хвильового фронту і передає її у керуючий пристрій 5, формує сигнал для керованих дзеркал (6–7). Інша частина світла після світлоділяника, потрапляючи на дзеркала (7–8–9), створює зображення об'єкта (зірки) у площині 9. Такі системи прямого керування відрізняються високою швидкістю. Однак вони мають ряд недоліків, наприклад: не вирішують проблему спотворень, що виникають після світлоділяника.

Частковим вирішенням цієї проблеми є додання зворотного зв'язку в систему, але це призводить до значного зниження швидкодії [3].

1.3 Датчики хвильового фронту

Вагомим елементом адаптивних оптичних системи є датчик хвильового фронту (ДХФ). Датчик дозволяє вимірювати відмінність хвильового від плоского фронту і потім передавати це значення наступним елементам системи. Саме тому точність роботи ДХФ є важливою для системи в цілому.

Спотворення хвильового фронту можна визначати інтерферометричними методами. Проте в ДХФ ці методи не використовуються із ряду причин. В астрономії зоряне світло, що проходить через атмосферу, не є когерентним і не підходить для інтерферометрів. Алгоритми обробки невизначеності фазового зсуву інтерферометрів вимагають часу, який є критичним в обробці швидких атмосферних спотворень.

Принципово ДХФ складається з кількох елементів:

- системи перерахунку аберацій в інтенсивність світла, що формує розподіл інтенсивності на приймачі-матриці ПЗЗ/КМОН-камері;
- реконструктора, який отримує сигнал та перераховує його у фазові спотворення.

На сьогоднішній день широке поширення серед ДХФ отримав датчик Шака-Хартмана (ДШХ). Це пояснюється його відносно простим пристроєм, надійністю та невисокою вартістю.

Принцип дії датчика Шака-Хартмана приведений на рис. 1.3.

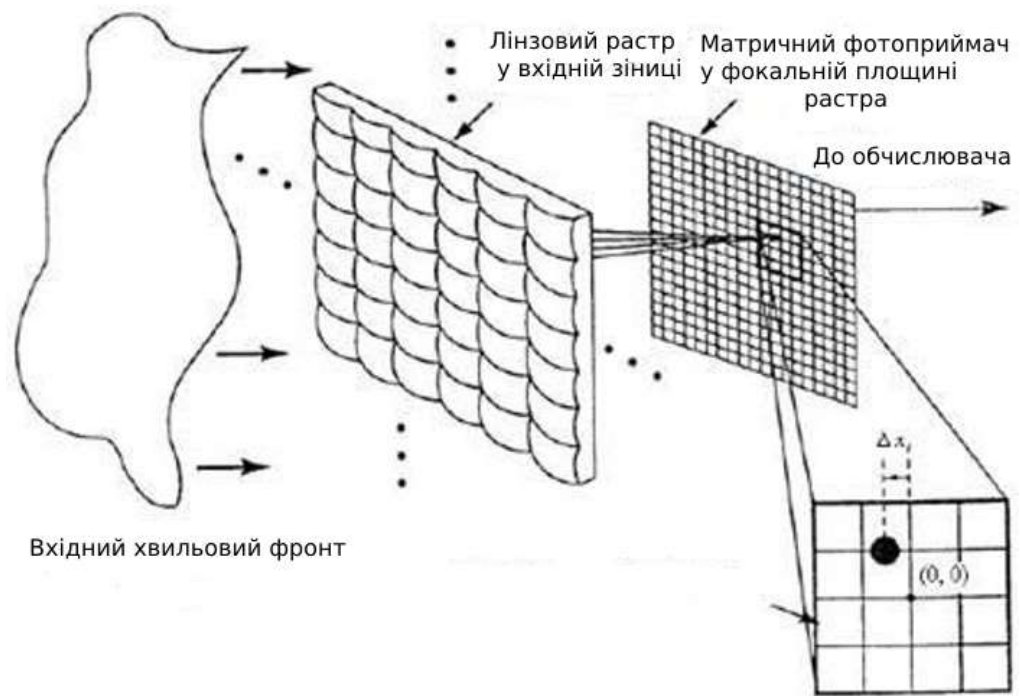


Рисунок 1.3 – Принцип дії датчика Шака-Хартмана

Припустимо, що на лінзу вздовж її осі падає хвиля і сфокусоване зображення також знаходиться на осі лінзи у випадку, якщо хвиля не спотворена (і відповідно не нахилена). В іншому випадку фокусна точка зміщується і по цьому зміщенню можна судити про нахилі хвилі. Далі, взявши набір таких лінз, що розбивають хвильовий фронт на сегменти (субапертури), можна для кожного із сегментів визначити нахил хвилі по положенню точки фокусу (набір мікролінз (растр) фокусує фронт на ПЗЗ-матрицю) [4].

Точки фокусування не зміщені, якщо вхідна хвиля плоска, проте за наявності спотворень вони можуть зміщуватись. Далі для кожної фокусної точки враховується міра її усунення від центру і визначається міра нахилу. Інформація про хвильовий фронт загалом відновлюється при інтегруванні всіх нахилів.

Нехай $\varphi(r)$ -фаза хвильового фронту, тоді нахил уздовж осі x за площею субапертури S дорівнює:

$$x = \frac{\lambda}{2\pi S} \int_S \frac{\partial \varphi(r)}{\partial r_x} dr. \quad (1.1)$$

Нахил вздовж x та y оцінюється по зміщенню від центру:

$$x = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, \quad y = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, \quad (1.2)$$

де $I_{i,j}$ – інтенсивність на (i,j) пікселі фотоприймача [6].

ДШХ не залежить від довжини хвилі випромінювання, тобто ахроматичний, слабо реагує на вібрації, простий та компактний (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Гартманова діаграма (фокальні плями)

Зазвичай матрицю фотоприймача беруть розміром у кілька мегапікселів а мінімальна необхідна кількість субапертур визначається необхідною роздільною здатністю і становить, як мінімум, 20×20 субапертур. Якщо лінза субапертури фокусує пляму на майданчику 20×20 пікселів, тоді для одного виміру хвильового фронту потрібно кілька мегабайт.

Для високочастотних атмосферних спотворень, що вимірюються в реальному часі, це число становить гігабайти за секунду і відповідно

продуктивність датчика обмежується продуктивністю системи обробки.

Також можлива ситуація, за якої через великі спотворення фокальні плями губляться (рис. 1.5). Звідси впливають недоліки ДШХ: розрахункова складність і обмеженість амплітуди вимірюємих викривлень.

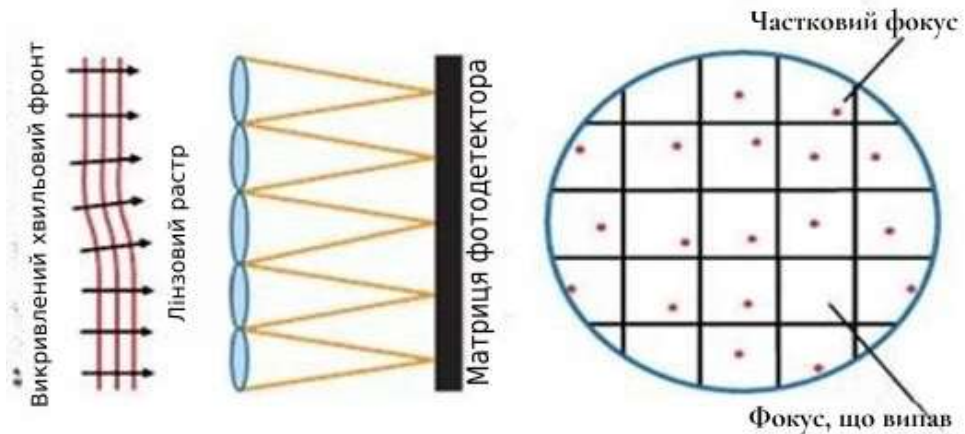


Рисунок 1.5 – Втрата фокальної плями в ДШХ

Існують різні види ДХФ та модифікації ДШХ, наприклад, датчик кривизни хвильового фронту. На відміну від ДШХ датчик кривизни здатний вимірювати як кривизну (сферичність) фронту цілком, так і його сегментовану частину (рис. 1.6).

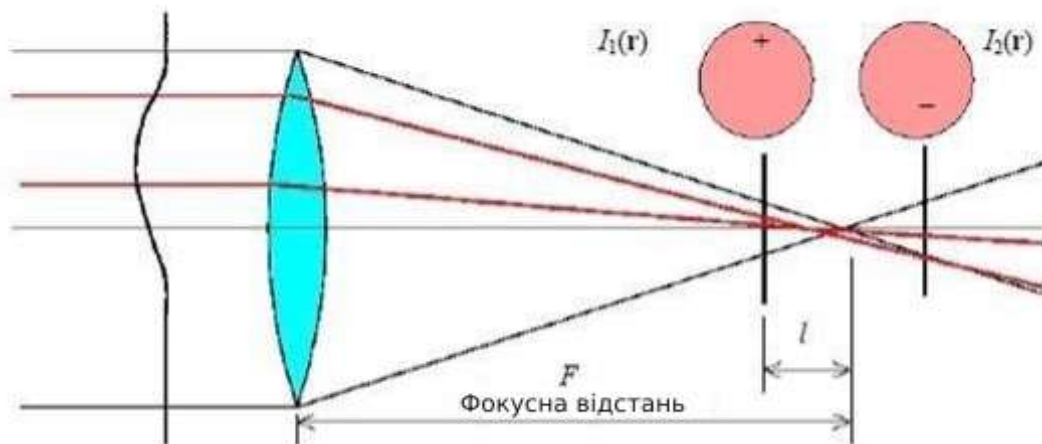


Рисунок 1.6 – Датчик кривизни хвильового фронту

Якщо $I_1(r)$ – розподіл інтенсивності у передфокальному зображенні зірки (у площині відстань l від фокальної), $I_2(r)$ – відповідний розподіл інтенсивності в зафокальному зображенні. Кривизна хвильового фронту робить зображення різними за яскравістю та для різниці їх інтенсивностей:

$$\frac{I_1(\mathbf{r}) - I_2(\mathbf{r})}{I_1(\mathbf{r}) + I_2(\mathbf{r})} = \frac{\lambda F(F-l)}{2\pi l} \left[\frac{\partial}{\partial n} \varphi \left(\frac{F\mathbf{r}}{l} \right) \delta_c - \nabla^2 \varphi \left(\frac{F\mathbf{r}}{l} \right) \right], \quad (1.3)$$

де перший член – градієнт фази на краю апертури (δ_c – похідна в напрямку, перпендикулярному до краю, помножена на «функцію краю»). За допомогою оператора Лапласа обчислюється кривизна фазового розподілу $\varphi(r)$.

Повертаючись до інтерферометричних методів, розглянемо схему інтерферометра зсуву. Варто зауважити, що частина проблем пов'язаних із їх використанням вирішується, якщо бічний зсув хвильових фронтів (що представляють інтерферуючі промені) буде замалий (рис. 1.7).

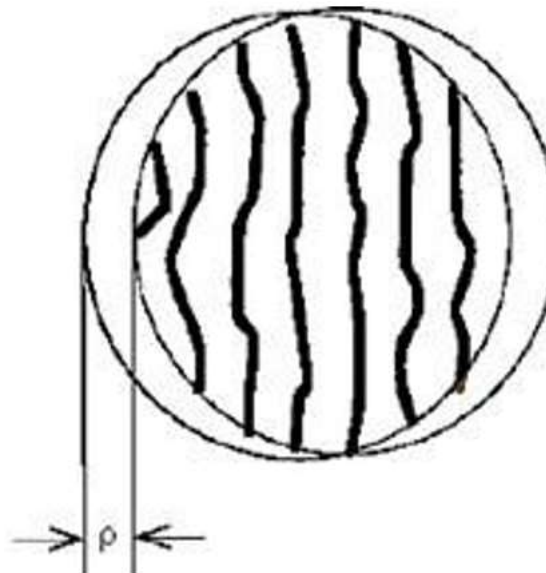


Рисунок 1.7 – Інтерферометр зсуву

При деяких значеннях зсуву, різниця фаз виявиться меншою за одну довжину хвилі, і це допоможе усунути 2π -невизначеності. В інтерферограмі вираз інтенсивності світла матиме такий вигляд:

$$I(\mathbf{r}) = |e^{i\varphi(\mathbf{r})} + e^{i\varphi(\mathbf{r}+\boldsymbol{\rho})}|^2 = 2 + 2 \cos[\varphi(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r} + \boldsymbol{\rho})] \approx 2 + 2 \cos\left[\boldsymbol{\rho} \frac{\partial\varphi(\mathbf{r})}{\partial\rho}\right]$$

Різниця фаз при малих зрушеннях буде пропорційна першій похідній (нахилу), що робить даний інтерферометр схожим з ДШХ [5]. Цікаво, що інтерферометр зсуву був використаний в одній із перших реалізованих адаптивних оптичних систем, а для протяжних джерел може бути використаний пірамідальний ДХФ (рис. 1.8).

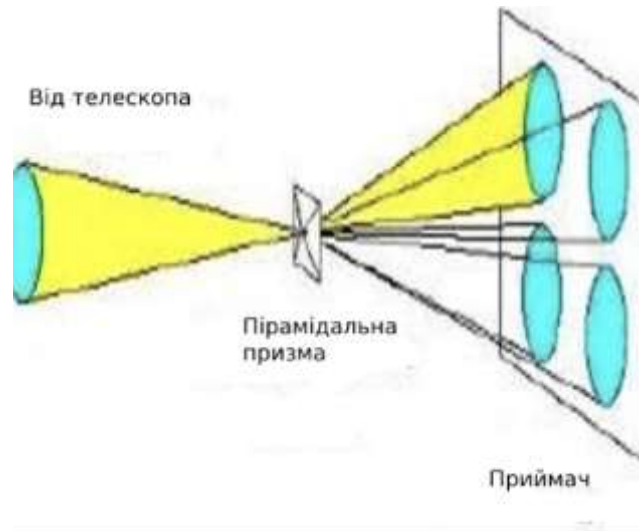


Рисунок 1.8 – Пірамідальний датчик

Прозора пірамідальна призма, розташована у фокальній площині телескопа, розділяє зіркове зображення на чотири частини. На ПЗЗ-матриці виникає чотири зображення, які фіксуються її чотирма пікселями. За таких умов нахил хвильового фронту на одній з апертур змінить положення, що призведе до різного зображення на матриці. Проте обчисливши різниці інтенсивностей можна отримати два сигнали. Вони виявляться

пропорційними нахилами хвильового фронту у двох напрямках. Вихідний сигнал такого датчика буде схожий із сигналом ДШХ.

1.4 Лазерний промінь Шака-Хартмана

У системах високопотужних лазерів структура сумарного поля виявляється дуже чутливою до навіть слабких різницевоїх амплітудних і фазових варіацій полів сумованих хвиль. Це призводить, як відомо, до виникнення гарячих точок та ефектів локального самофокусування випромінювання і з пробоем робочого середовища як наслідок. З метою запобігання таких ситуацій та нарощування загальної потужності випромінювання виконується контроль хвильових фронтів світлових пучків та подальша корекція форми цих пучків шляхом використання адаптивних систем. При цьому до датчиків хвильового фронту висуваються вимоги високого просторового дозволу, чутливості та динамічного діапазону. З іншого боку, у багатьох схемах процеси оперативного та високоточного контролю лазерних пучків, що мають широкий спектр випромінювання, є занадто складними та дорогими. Найбільш придатним інструментом для цієї цілі є ахроматичний датчик хвильового фронту побудований за схемою Шака-Хартмана. У цій роботі було проведено аналіз результатів попереднього тестування зазначеного датчика з метою виявлення найбільш вагомих похибок, проведення його калібрування та визначення можливостей щодо поліпшення якості окремих вузлів.

Нагадаємо, що принцип дії датчиків Шака-Хартмана ґрунтується на вимірі локальних нахилів хвильового фронту, які є пропорційними локальним зміщенням фокальних плям у площині реєстрації. Основною умовою коректної роботи датчика є гладкість функції хвильового фронту у межах окремої апертури лінзового растру. Для оцінки кривизни хвильового фронту було створено програму, в основу якої покладено представлення поверхні хвильового фронту у вигляді розкладання в ряд за поліномами

Церника з невідомими коефіцієнтами. Таким чином, вирішення задачі відновлення форми поверхні хвильового фронту за гартманогомою зводиться до пошуку коефіцієнтів розкладання. За базис розкладання використаний ряд із 48-ми поліномів Цернике.

Область визначення гартманогам розбивається на локальні ділянки, що відповідають апертурам лінзового растру. Пошук координат центрів фокальних плям (x_k, y_k) k -й апертури здійснюється методом центроїдів:

$$x_k = \frac{\sum_j^m \sum_i^n x_i I_{i,j}}{\sum_j^m \sum_i^n I_{i,j}}, y_k = \frac{\sum_j^m \sum_i^n y_i I_{i,j}}{\sum_j^m \sum_i^n I_{i,j}}, \quad (1.4)$$

де I_i, j – інтенсивність у осередку (пікселі) фотоматриці (x_i, y_j) k -ої локальної апертури. Локальний нахил хвильового фронту $W(x, y)$ у точках (x_k, y_k) відповідає рівнянням:

$$\frac{\partial W_k}{\partial x} = \frac{\Delta x_k}{f}, \quad \frac{\partial W_k}{\partial y} = \frac{\Delta y_k}{f},$$

де f – фокусна відстань мікролінзового растру;

x_k – локальне усунення центрів фокальних плян уздовж осей x, y .

Коефіцієнти розкладання для квадратів $W(x, y)$ можна знайти методом найменших квадратів вичисливши зміщення на кожній ділянці [6].

На рис. 1.9 представлена експериментальна гартманогома плоского фронту та оцінка його деформації. Пікове значення розмаху деформації $pv = 0,396\lambda$ при середньоквадратичному відхиленні від площини $rms = 0,082\lambda$, що при робочій довжині хвилі $\lambda = 532$ нм відповідає $pv = 210,6$ нм, $rms = 43,6$ нм.

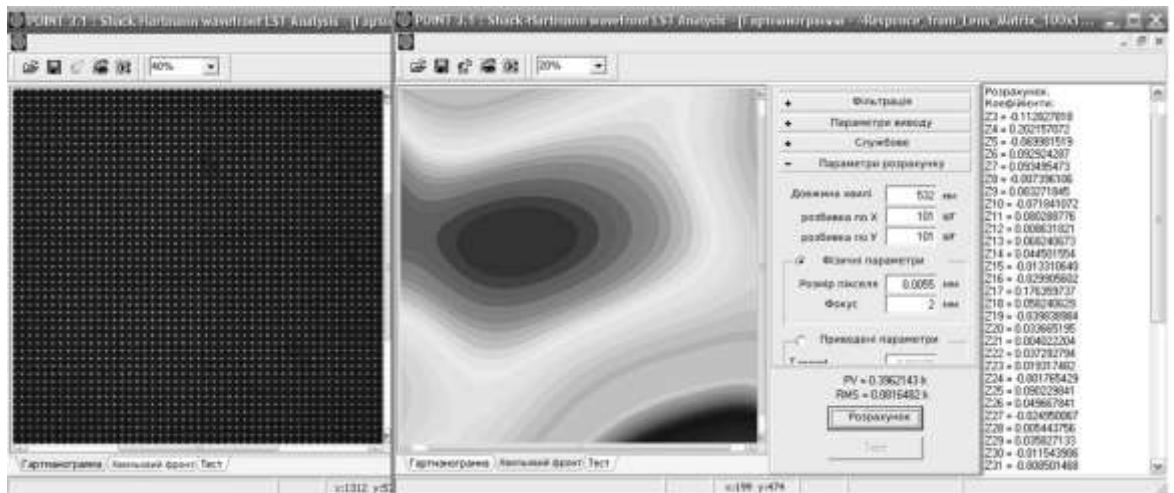


Рисунок 1.9 – Оцінка деформації плоского хвильового фронту за гартманограмою

Радіус кривизни сфери за стрілкою прогину s визначається як [7]:

$$r = \frac{1}{8} \cdot \frac{4s^2 + d^2}{s}.$$

На рис. 1.10 представлена оцінка кривизни сферичного хвильового фронту, отриманого в експерименті шляхом фокусування лазерного випромінювання та пропусканням через фільтр у вигляді ірисової діафрагми діаметром порядку 10 мкм. Для випадку, коли загальна кривизна фронту по всій апертурі лінзлету призводить до зміщення фокальних плям гартманограми на величину, що перевищує розмір окремої лінзи растру, оцінку кривизни хвильового фронту можна провести на менших ділянках. Наприклад, на рис. 1.10 оптимальний розмір області охоплення фокальних плям становить 440 розмірів комірок фотоматриці. Розмір $pv = 10,368\lambda$ відповідає стрілці прогину фронту на діагоналі d обраної ділянки.

Чисельно розрахований радіус кривизни для виділення на рис. 1.10, при розмірах комірок фотоматриці 5,5 мкм та розмірах лінз 0,11 мм становить величину 265,4 мм. У експерименті з формування гартманограми фактичний розмір становив 270,5 мм. Таким чином, для створеного в експерименті

сферичного хвильового фронту спостерігається гарна відповідність між експериментальними та розрахунковими даними, що свідчить про придатність датчика до подальшого побудування системи контролю високопотужних лазерних пучків.

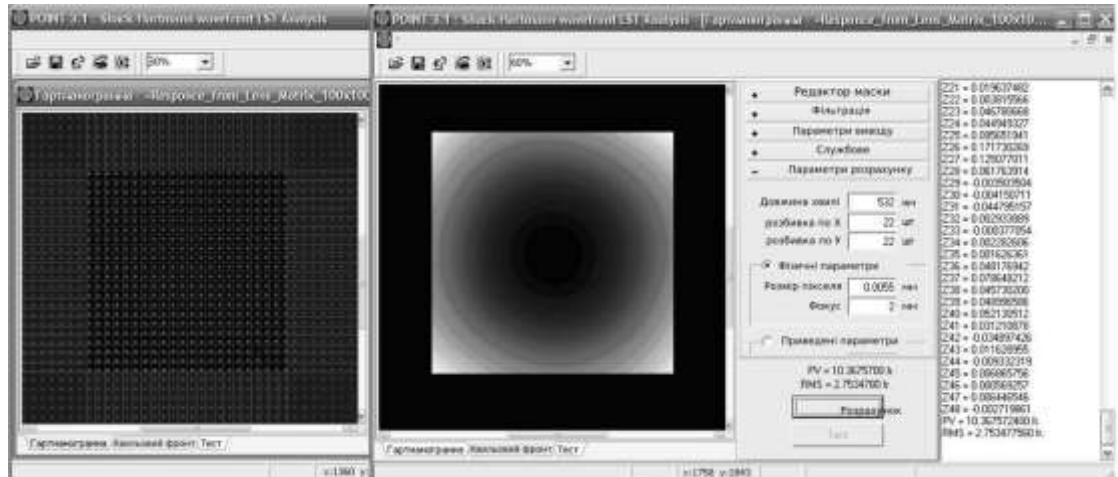


Рисунок 1.10 – Оцінка кривизни сферичного хвильового фронту за гартманогомою

У цьому досліді був використаний мікролінзовий растр фірми SUSS MicroOptics з площею елементів $110 \times 110 \text{ мкм}^2$ та фокусною відстанню 4 мм, а також GigE відеокамера Ace фірми Basler с CMOS сенсором фірми CMOSIS з роздільною здатністю 2048×2048 пікселів та площею пікселя $5,5 \times 5,5 \text{ мкм}^2$.

Дослідження використаного мікролінзового растру та аналіз тонкої структури гартманогом виявило деяку недосконалість оптичних характеристик растру. Вони проявилися на гартманогомах у вигляді паразитних осциляцій функцій розсіювання точок від растру на значних відстанях від центрів цих функцій розсіювання. Разом з результатами додаткового чисельного моделювання цей фактор свідчить про можливість подальшого поліпшення характеристики датчика при заміні растру на растр, оптимізований під завдання за своїми характеристиками.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ОКА

2.1 Принципи моделювання ока

В дослідженнях або в клінічних цілях широко використовують датчики Шака-Хартмана для вимірювання аберацій, що видаються оком, шляхом розробки промислових пристроїв.

Основні принципи такого пристрою можна описати наступним чином. Світловий промінь фокусується на сітківці, яка використовується як світлорозсіювач. Незважаючи на те, що з міркувань безпеки для вимірювання переважно використовують ближнє інфрачервоне випромінювання, основна частина променя поглинається складним середовищем. Слабка частина світла, відбита назад, проходить через різні елементи ока, такі як склоподібне тіло та кришталік передньої камери, рогівка передньої та задньої камер. Кожен з них вносить свій внесок у формування хвильового фронту на вихідній зіниці ока (рис. 2.1).

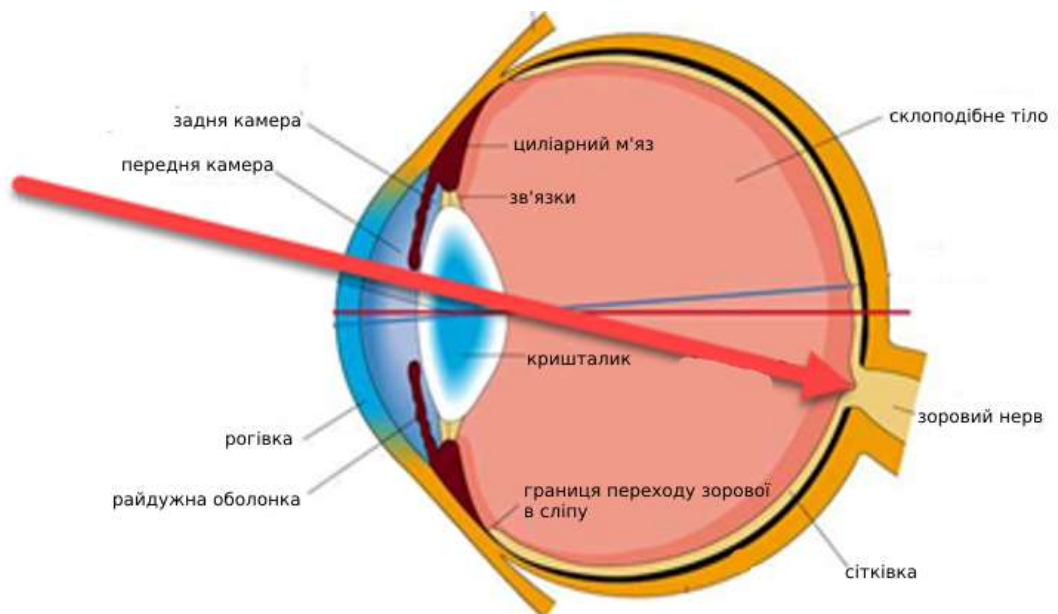


Рисунок 2.1 – Принцип роботи людського ока

Оптична система поєднує зіницю ока та датчик Шека-Хартмана із заданим збільшенням (рис.2.2).

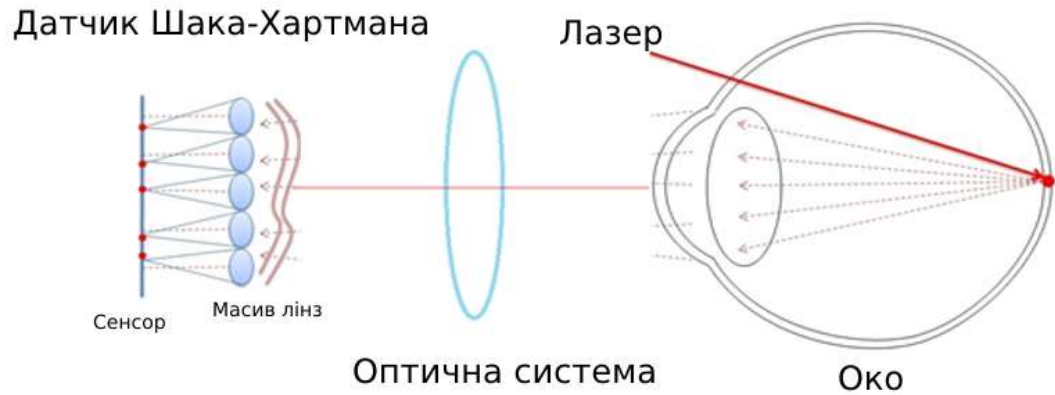


Рисунок 2.2 – Вимірювання аберації людського ока за допомогою приладу Шека-Хартмана

Датчик Шека-Хартмана складається з масиву лінз і датчика зображення, розташованого на фокусній відстані лінз. Кожна лінза локально вимірює деформацію хвильового фронту, оцінюючи бічний зсув фокуса датчика зображення (рис. 2.3).

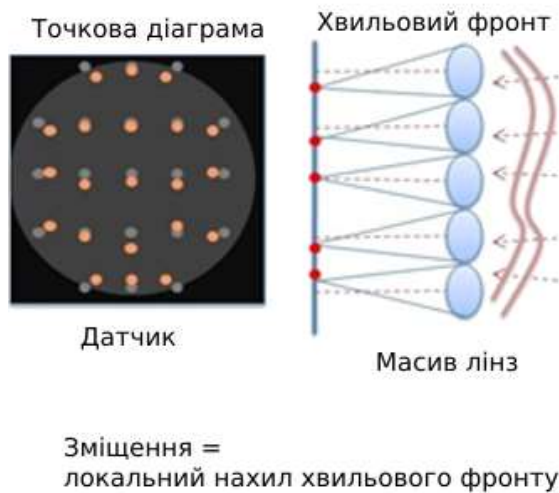


Рисунок 2.3 – Принцип Шека-Хартмана

Цей захід слід розглядати не як абсолютний результат, а як відносну деформацію для порівняння з опорним хвильовим фронтом, який, як правило, є плоскою хвилею. Далі весь хвильовий фронт реконструюється за результатами, отриманими від кожної лінзи, а для диференціації та визначення типів аберацій, спричинених оком використовуються поліноми Церніке .

Можливості такої системи будуть результатом компромісу між точністю, чутливістю та динамічним діапазоном. Наприклад, великі мікролінзи підвищують чутливість системи. Але великий розмір мікролінзи також буде означати, що локальна зміна хвильового фронту не виявляється. Отже, буде втрачатися точність результату [8].

Моделювання системи корисне для визначення розмірів елементів і оцінки впливу системи на результат та отримання надійної реконструкції аберованого хвильового фронту. Моделювання системи дозволяє оцінити потенційний внесок додаткової деформації хвильового фронту вибраними лінзами та можливість калібрування системи.

Процес моделювання системи можна розкласти на три частини: моделювання ока, оптичної системи збору та датчика Шака-Хартмана. У роботі буде описано моделювання кожної частини, а також інструменти аналізу для оцінки продуктивності системи.

Основну увагу буде приділено системі збору та датчику. У цьому дослідженні ми створимо модель людського ока, використовуючи модель Liou & Brennan 1997, показану в книзі «Оптика людського ока». Наведена модель ока є досить повною, вона враховує багато реалістичних факторів відсутніх у інших моделях, наприклад: зміщену зіницю, вигнуту поверхню сітківки, очне яблуко, спрямоване всередину, і кришталік із двома різними градієнтними профілями показника заломлення для передньої та задньої половини.

Після успішного створення цієї моделі ока ми використаємо її для розробки прогресивної окулярної лінзи вільної форми.

2.4 Моделювання людського ока

Почнемо з налаштування моделі людського ока. Спочатку перевірши систему у послідовний режим, а потім встановивши SystemGeneralUnitsLens на «Міліметри» встановимо довжину хвилі (у розділі «Система») на «F, d, C (Видимий)», як показано на рис. 2.4.

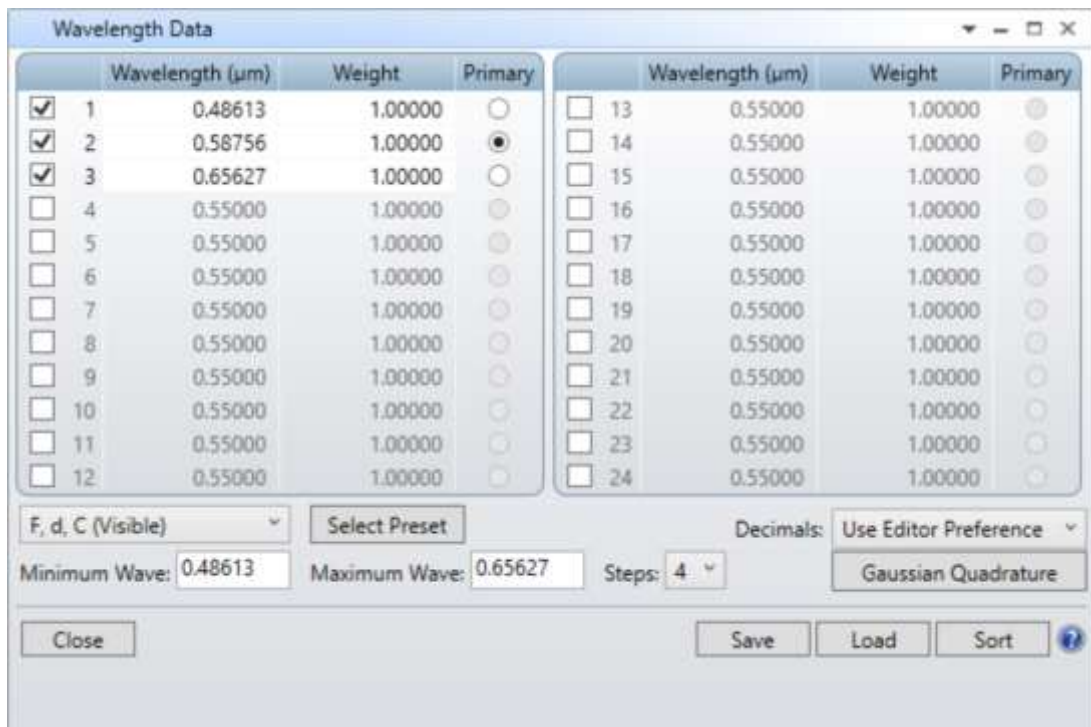


Рисунок 2.4 – Налаштування системи

Далі перейшовши до SystemExplorerAperture встановимо для параметра ApertureType значення FloatByStopSize, і у розділі SystemExplorerGlassCatalogs і додамо каталог MISC до своїх GlassCatalogs. У редакторі даних полів просто встановимо лише одне поле типу Angle(Deg) із значенням X-поля 5 (рис. 2.5).

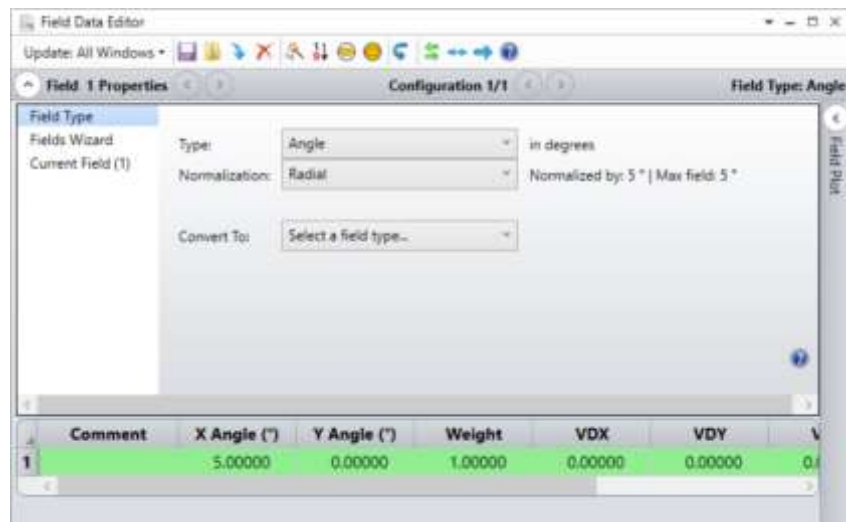


Рисунок 2.5 – Налаштування параметру ApertureType

Щоб змоделювати розташування зміщеної зіниці, нам необхідно децентрувати цю поверхню. Відкривши властивості поверхні натиснемо вкладку Нахил/Децентрування. Встановимо для цієї поверхні значення Decentre X -0,5 мм, а потім для After Surface виберемо ReverseThisSurface, як показано нижче (рис. 2.6).

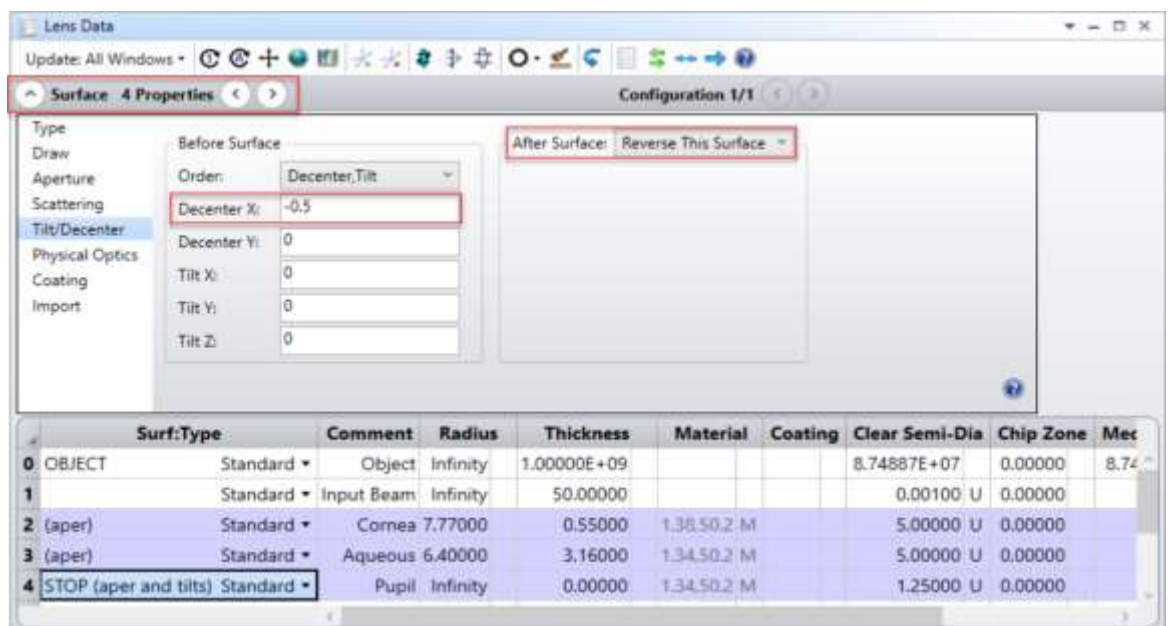


Рисунок 2.6 – Задання децентрування поверхні

Швидка перевірка 3D-макету системи (де для FirstSurface встановлено Surface2 замість Surface0 за замовчуванням) показує, що щось не так (рис. 2.7).

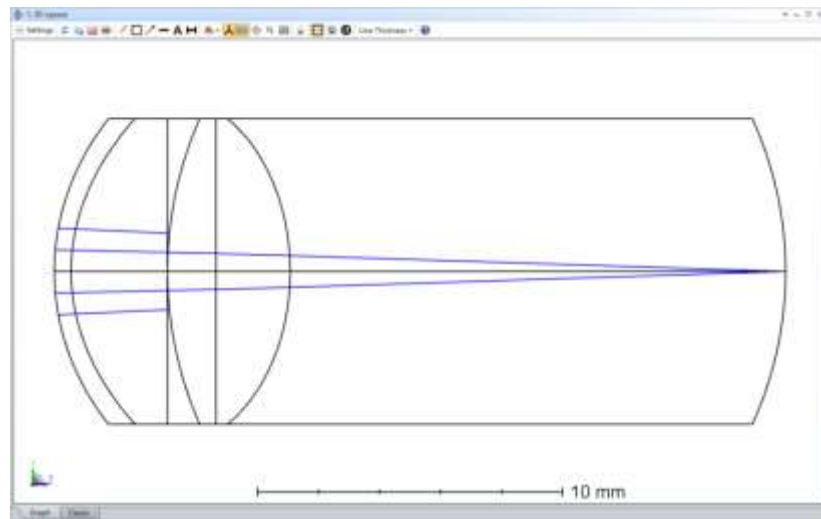


Рисунок 2.7 – Перевірка 3D-макету системи

На кресленні макета верхній і нижній крайові промені обрізаються зіницею. Це не може бути вірним, оскільки для нашої системи ми вибрали діафрагму плаваючого розміра (верхній і нижній крайові промені повинні, за визначенням, успішно проходити через зіницю) [9]. Оскільки у нас виникла підозра, ми вирішили перевірити лопать аберації зіниці (це інструмент аналізу). Лопать аберації зіниці нашої системи виглядає так, як приведено на рис. 2.8.

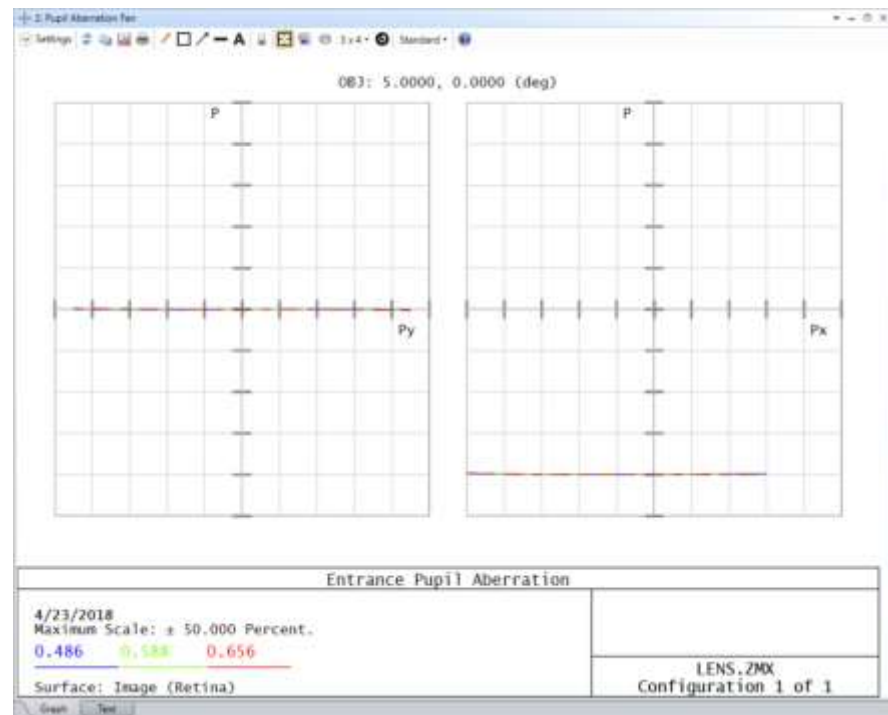


Рисунок 2.8 – Аберация зіниці

Лопать аберации зіниці говорять нам, що аберация зіниці становить 40 % у негативному X-напрямку. Це викликано тим, що система спрямовує промені на (недецентровану) параксіальну вхідну зіницю. Пам'ятаємо, що ми децентрували зіницю на 0,5 мм – що становить 40 % від півдіаметра зіниці – у негативному напрямку x .

Нащастя, програма пропонує легке вирішення цієї проблеми – RayAiming. Перейшовши до SystemExplorerRayAiming, встановили RayAiming на Paraxial (рис. 2.9).

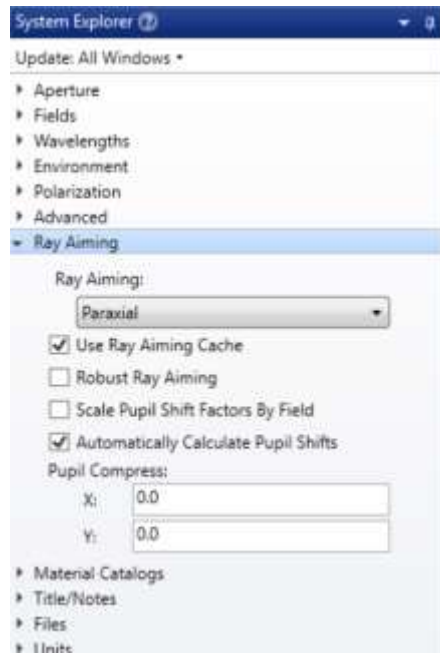


Рисунок 2.9 – Задання SystemExplorerRayAiming

Тепер аберації зіниці усунено, а 3D-макет показує, що верхні та нижні крайові промені успішно проходять через децентровану зіницю (рис. (2.10, 2.11)).

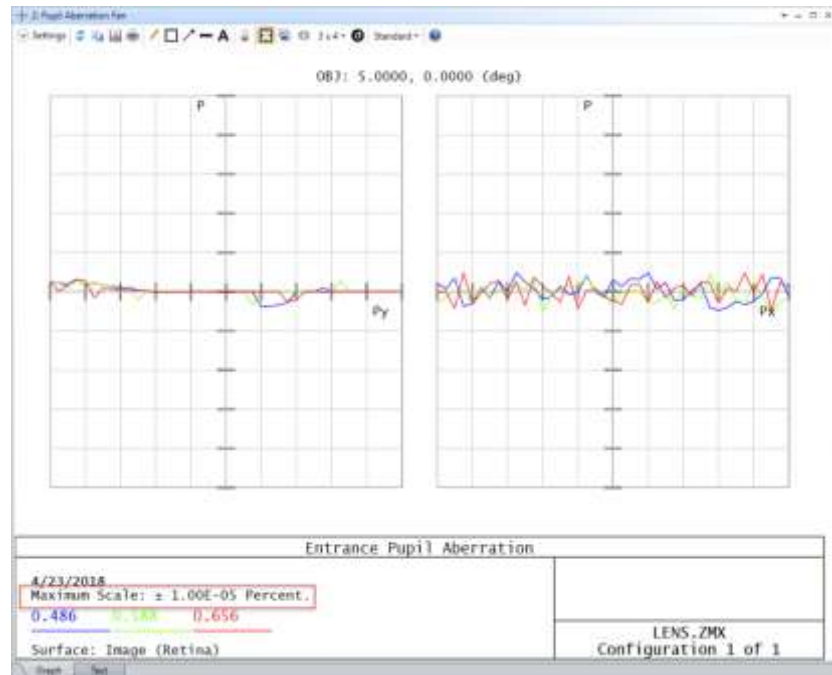


Рисунок 2.10 – Усунення аберації

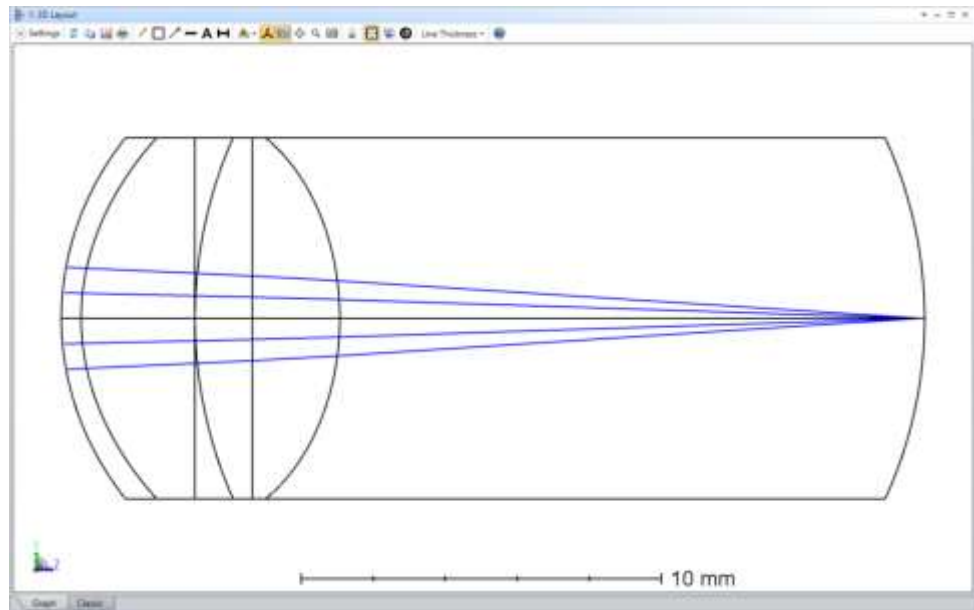


Рисунок 2.11 – Успішне проходження променів через децентровану зіницю

На цьому етапі редактор даних Lens виглядає так, як показано на рис. 2.12.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Apert-Dia	Conic	Delta T	nD	nE	nH	nG	nR1	nR2
W	OBJECT	Standard - Object	Infinity	1.00000E+09			0.140071E+01	0.00000							
E		Standard - Input Beam	Infinity	50.00000			0.001000 U	0.00000							
1	lens1	Standard - Convex	5.17020	0.15000	1.516012 M		0.00000 U	0.10000							
2	lens1	Standard - Aperture	0.40000	1.70000	1.516012 M		0.00000 U	0.00000							
4	EDF layer and fiber	Standard - Fiber	Infinity	0.00000	1.516012 M		1.00000 U	0.00000							
5	lens1	Gradient 3 - Lens Front	13.42010	1.00000			0.00000 U	0.00000	1.0000	1.3600	-0.0100	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0114
6	lens1	Gradient 3 - Lens Back	Infinity	2.40000			0.00000 U	0.00000	1.0000	1.40100	-0.0100	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0040
7	lens1	Standard - Vertex	-0.10000	16.33883	1.516012 M		0.00000 U	0.00000							
8	IMAGE	Standard - Retina	12.00000				0.00000 U	0.00000							

Рисунок 2.12 – Редактор даних Lens

Змінивши параметри 3D-макету RotationZ на 90, і встановивши його так, щоб перша поверхня була поверхнею 1 (вхідний промінь) можемо побачити вигляд моделі зверху вниз разом зі зміщеною зіницею та позаосьовим полем (деякі анотації до малюнка нижче додані щоб позначити різні частини моделі) (рис. 2.13).

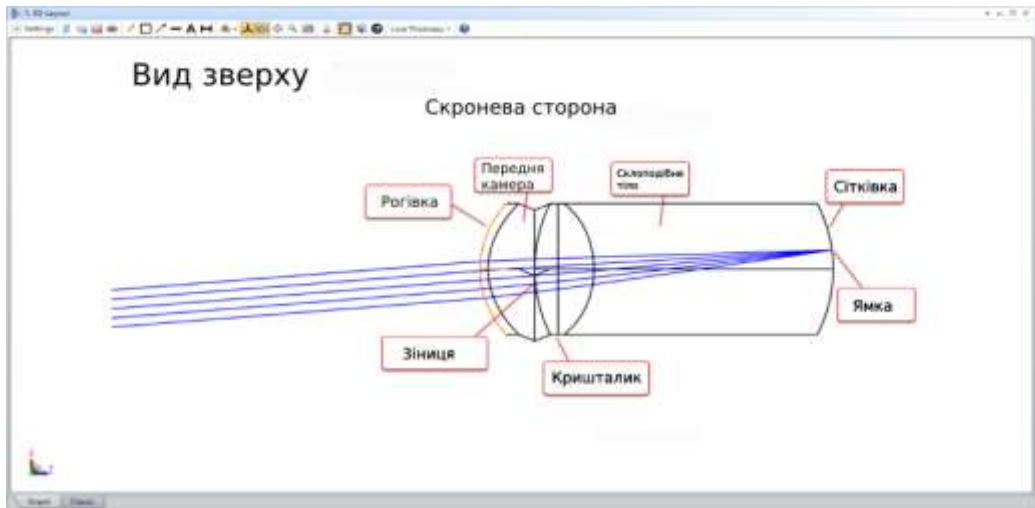


Рисунок 2.13 – Вигляд моделі зверху вниз

Центр сітківки встановлено як положення об'єкта (поверхня 0), а зупинка фіксується на зіниці ока (поверхня 5) із заданим діаметром, що змінюється від 2 мм до 8 мм залежно від зовнішнього середовища (рис. (2.14, 2.15)).

Surface	Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coat	Semi-Di	Chip	Mech Sem	Conic	TCE x 1	Par 1(μ)	Par 2(ur)	Par 3(umused)
0	OBJECT	Standard *	Infinity	0.000			0.000	0.0...	0.000	0.000	0.0...			
1	(aper)	Standard *	Retina	12.000	17.929	1.34502 M	5.000 U	0.0...	5.000	0.000	0.0...			
2	(aper)	Gradient 3 *	Lens-back	0.100	2.430		5.000 U	0.0...	5.000	0.960	0.0...	1.000	1.407	-1.978E-03
3	(aper)	Gradient 3 *	Lens-front	Infinity	1.590		3.000 U	0.0...	5.000	0.000	0.0...	1.000	1.368	-1.978E-03
4	(aper)	Standard *	Vitreous	-12.400	0.000	1.34502 M	5.000 U	0.0...	5.000	0.000	0.0...			
5	STOP (aper)	Standard *	Pupil	Infinity	3.160	1.34502 M	1.500 U	0.0...	5.000	0.000	0.0...			
6	(aper)	Standard *	Aqueous	-6.400	0.550	1.38302 M	5.000 U	0.0...	5.000	-0.6...	0.0...			
7	(aper)	Standard *	Cornea	-7.770	0.000		5.000 U	0.0...	5.000	-0.1...	0.0...			

Рисунок 2.14 – Редактор даних Lens після виправлення

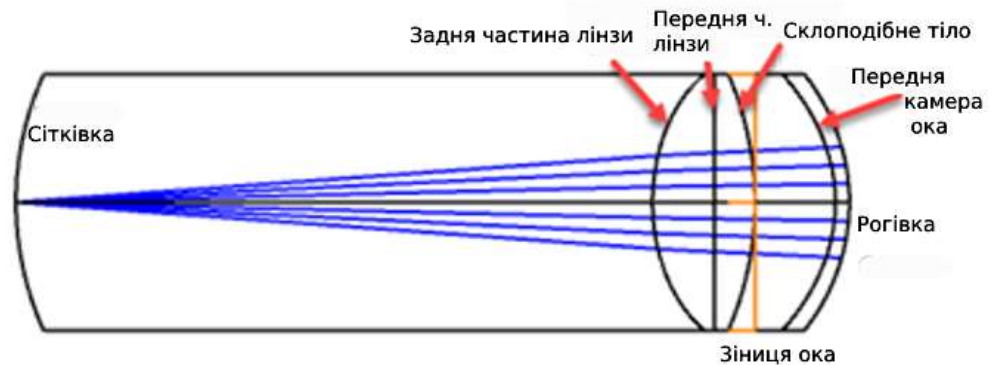


Рисунок 2.15 – Вигляд моделі з іншого боку

У другому телескопі фокусні відстані f_2 і f_3 вибираються таким чином, щоб було відповідне збільшення для налаштування розміру датчика Шака-Хартмана з діапазоном розмірів зіниці, які потрібно перевірити. У центрі другого телескопа у фокальній площині третьої лінзи розташовано отвір для усунення зворотнього розсіяного світла, що виходить від рогівки, адже воно є сильною перешкодою для системи.

Існує можливість картографування поля між двома телескопами. Вхідна зіниця кон'югована із зіницею Шака-Хартмана у системному провіднику:

- у розділі «Діафрагма» для параметра «Діафрагма» встановлено значення «Плаваюче за стоп-розміром». Поверхня STOP – це зіниця ока;
- у розділі «Діафрагма» позначено параметр `AfocalImageSpace`, оскільки ми маємо справу з двома афокальними системами.

Під `RayAiming`, `RayAiming` встановлено на параксіальний для більш надійного заповнювання STOP (особливо у випадку великих аберацій) (рис. (2.18, 2.19)).

У розділі «Додатково» `ReferenceOPD` встановлено на «Absolute». Для порівняння деформації хвильового фронту на зіниці ока та перед сенсором Шака-Хартмана хвильовий фронт оцінюється відносно плоскої поверхні.

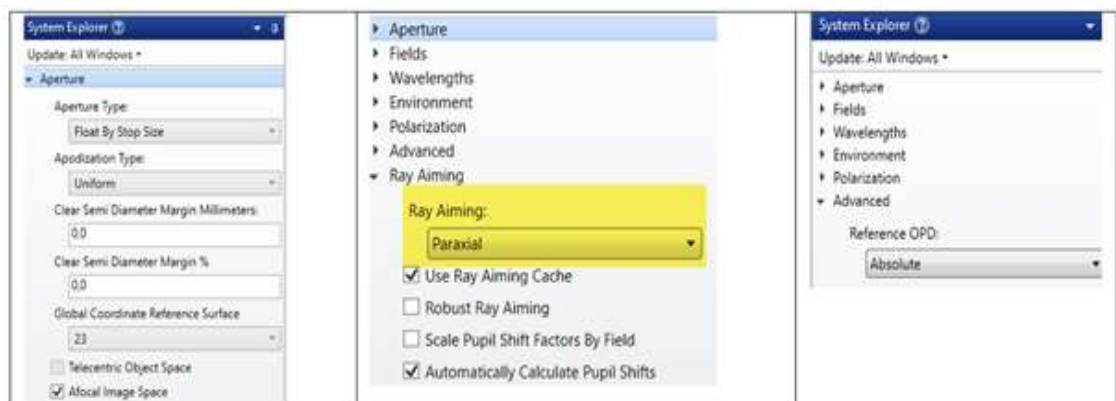


Рисунок 2.18 – Параметри для узгоджених поліномів Церніке

	Surface Type	Commen	Radius	Thickness	Material	Co.	Clear Se	Chip ;	Me	Conic	TCE x 1
8	Standard ▾		Infinity	95.200			10.0... U	0.0...	10..	0.000	0.0...
9 (aper)	Standard ▾		102.500	5.000	N-BK7	..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	-
10 (aper)	Standard ▾		-102.500	199.000		..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	0.0...
11 (aper)	Standard ▾		102.500	5.000	N-BK7	..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	-
12 (aper)	Standard ▾		-102.500	99.500		..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	0.0...
13 (aper)	Standard ▾	ph	Infinity	0.000			6.000 U	0.0...	12..	0.000	0.0...
14	Standard ▾		Infinity	99.500			6.000 U	0.0...	12..	0.000	0.0...
15 (aper)	Standard ▾		102.500	5.000	N-BK7	..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	-
16 (aper)	Standard ▾		-102.500	99.500		..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	0.0...
17 (aper)	Standard ▾	ph	Infinity	0.000			3.000 U	0.0...	20..	0.000	0.0...
18	Standard ▾		Infinity	99.500			14.5... U	0.0...	14..	0.000	0.0...
19 (aper)	Standard ▾		102.500	5.000	N-BK7	..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	-
20 (aper)	Standard ▾		-102.500	0.000		..	14.5... U	0.5...	15..	0.000	0.0...
21	Standard ▾		Infinity	99.500			6.000 U	0.0...	6.0..	0.000	0.0...

Рисунок 2.19 – Конструкція зі справжніми лінзами

Під час візуалізації всіх конфігурацій на одному дисплеї можна побачити різні випадки аметропії (рис. 2.20).

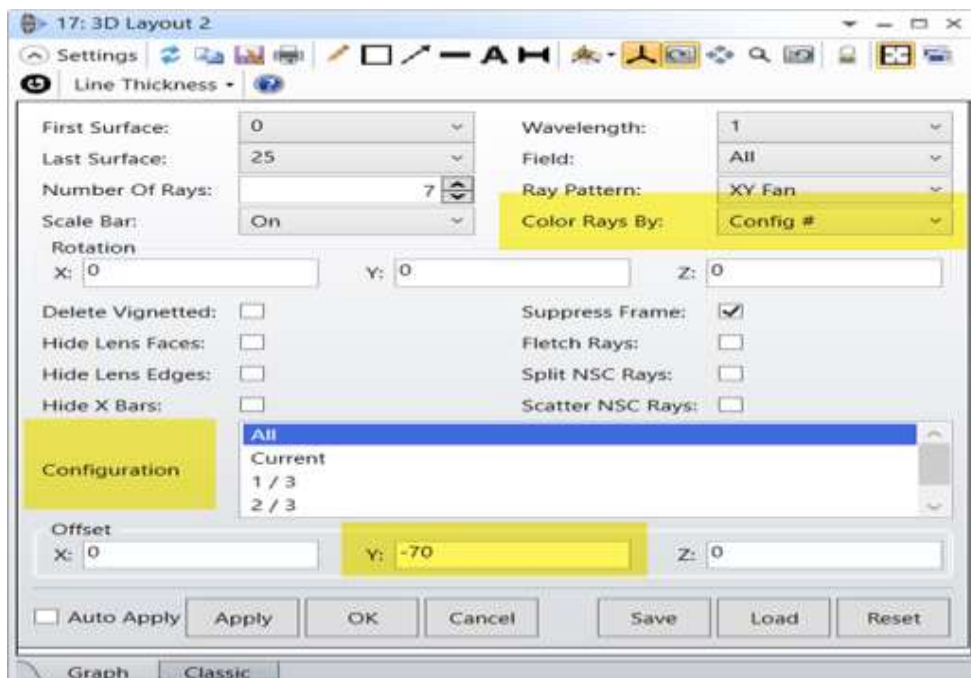


Рисунок 2.20 – Випадок аметропії

3 МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРА ШАКА-ХАРТМАНА

3.1 Датчик Шака-Хартмана

Датчик хвильового фронту Шака–Хартмана (SHWFS) — це оптичний інструмент, який використовується для визначення характеристик системи візуалізації. Це датчик хвильового фронту, який зазвичай використовується в системах адаптивної оптики. Він складається з масиву лінз однакової фокусної відстані. Кожен з масиву лінз фокусується на фотонному датчику (зазвичай це матриця ПЗЗ або КМОН). Якщо датчик розміщено в геометричній фокальній площині лінзи і рівномірно освітлено, тоді інтегрований градієнт хвильового фронту через лінзу буде пропорційним зміщенню центроїда. Отже, будь-яка фазова аберація може бути апроксимована набором дискретних нахилів. Відбираючи хвильовий фронт за допомогою масиву лінз, можна виміряти всі ці локальні нахили та реконструювати весь хвильовий фронт. Оскільки вимірюються лише нахили, сенсор Шака-Хартмана не може виявити перервисті кроки на хвильовому фронті (рис. 3.1) [12]. Лазер створює віртуальне джерело світла в сітківці. Масив лінз створює плями у датчику відповідно до хвильового фронту, що виходить з ока.

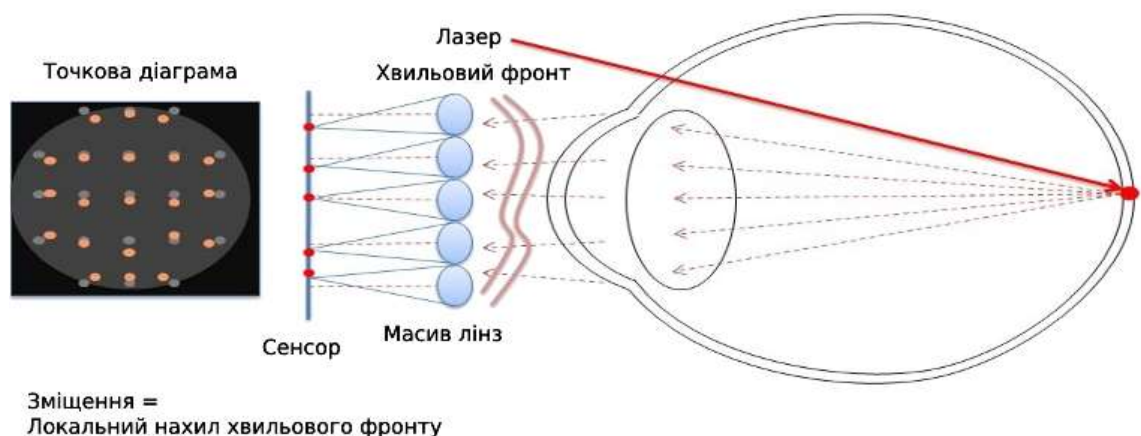


Рисунок 3.1 – Система Шака–Хартмана в клінічній оптиці

Конструкція цього датчика вдосконалена на основі ряду засобів відстеження окремих променів світла через оптичну систему великого телескопа, зроблених Йоганнесом Хартманом. Наприкінці 1960-х років Роланд Шек і Бен Платт модифікували екран Хартмана, замінивши отвори в непрозорому екрані набором лінз (рис. 3.2) [13]. Набір візерунків відображається на екрані, користувач вирівнює/перекриває їх в одному зображенні, натискаючи кнопки.

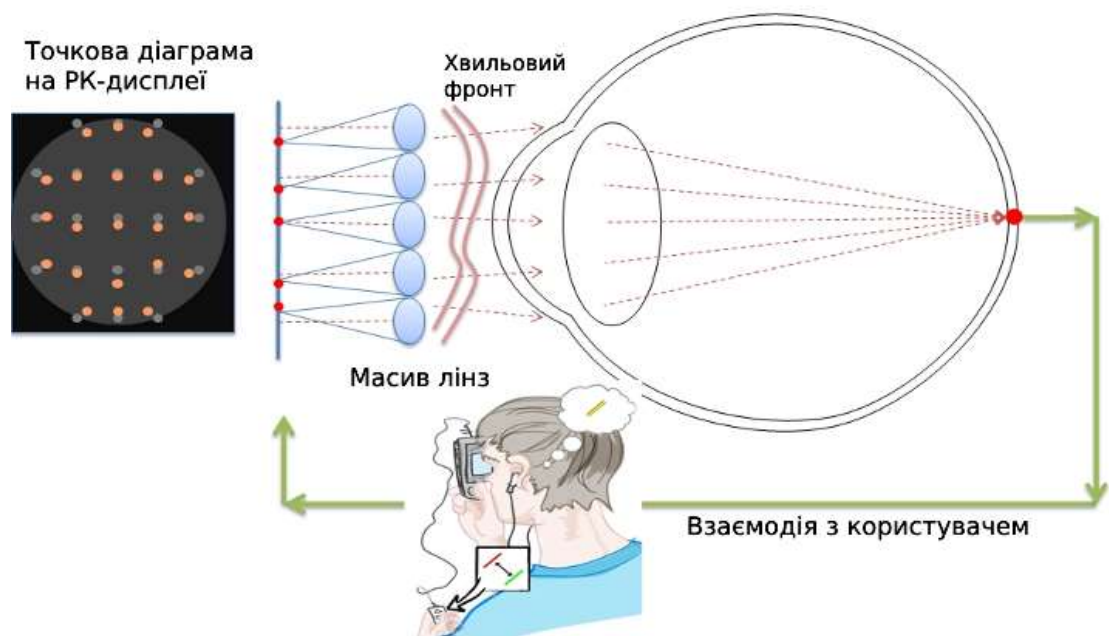


Рисунок 3.2 – Інверсія системи Шака-Хартмана в клінічній оптиці

Датчики Шака-Хартмана використовуються в астрономії та медицині (для визначення характеристик очей для лікування рогівки складних аномалій рефракції). Нещодавно була розроблена і зворотна система Шака-Хартмана для вимірювання аберацій кришталика ока. У той час як датчики Шака-Хартмана вимірюють локалізований нахил помилки хвильового фронту, використовуючи зміщення плями в площині датчика, було замінено сенсорну площину візуальним дисплеєм високої роздільної здатності (наприклад, екран мобільного телефону), який відображає плями, які користувач бачить через масив лінз (рис. 3.3) Потім користувач вручну зміщував відображені

плями (тобто згенерований хвильовий фронт) доки плями не вирівнялися. Величина цього зсуву надає дані для оцінки параметрів першого порядку (радіус кривизни і похибку через розфокусування та сферичну аберацію).

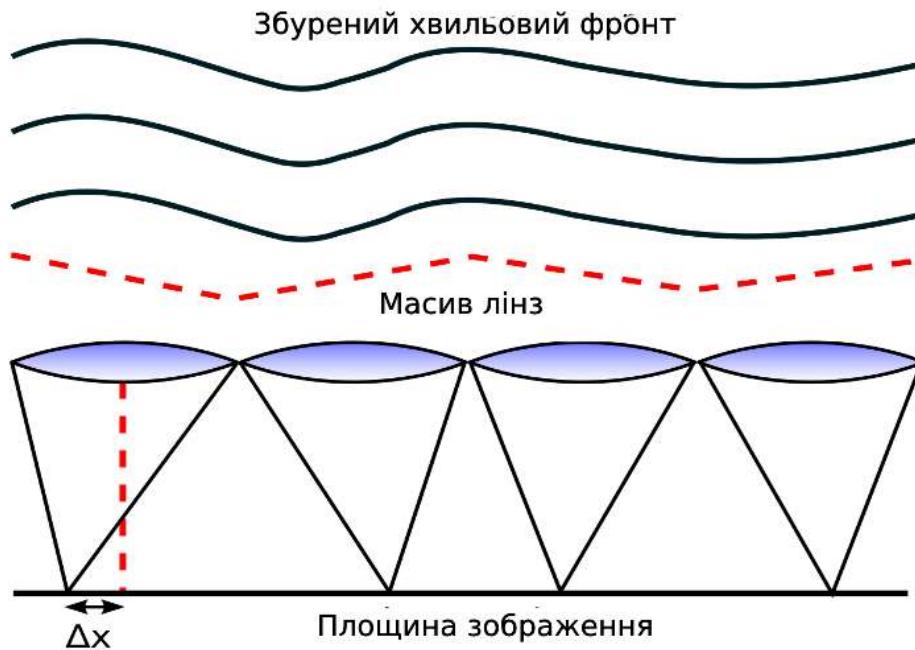


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення SHWFS

Сенсор Шака-Хартмана моделюємо за допомогою визначеної користувачем поверхні: us_array.dll. В параметрах 3 і 4 встановлюємо крок 150 мкм. Матеріал, товщина та радіус лінзи визначаємо так само, як і для стандартної поверхні. Налаштування датчика зображення, представленого площиною IMAGE системи та розташованого на задній фокусній відстані лінзи, показано на рис. 3.4.

Surface	Surface Type	Commen	Radius	Thickness	Material	Co	Clear Se	Chip; Me	Conic	TCE x 1	Par 1(um)	Par 2(ur)	Par 3(unused)	Par 4(unused)
23	(aper)	Standard ▾	Infinity	1,200	LITHO...		6,000 U	-	0,000	-				
24	(aper)	User Defined ▾	us_array	-2,000			6,000 U	-	0,000	0,0...	35,000	35,0...	0,150	0,150
25	IMAGE	Standard ▾	Infinity	-			14,5... U	0,0...	14,0,000	0,0...				

Рисунок 3.4 – Параметри для моделювання SHWFS

Наступним кроком стало проведення аналізу карти хвильового фронту. Перший аналіз можна провести, проаналізувавши хвильовий фронт на вході Шака-Хартмана. Карта хвильового фронту показує різницю в хвилях між хвильовим фронтом і плоскою хвилею на поверхні для нормалізованої вихідної зіниці (рис. 3.5). Ці дані можна масштабувати за допомогою діаметра вихідної зіниці в мм, показаного на стрічці WavefrontMap, і довжини хвилі, яка використовується в SystemExplorer. Стрічка WavefrontMap також відображає середньоквадратичне (RMS) значення хвильового фронту та значення від піку до спаду.

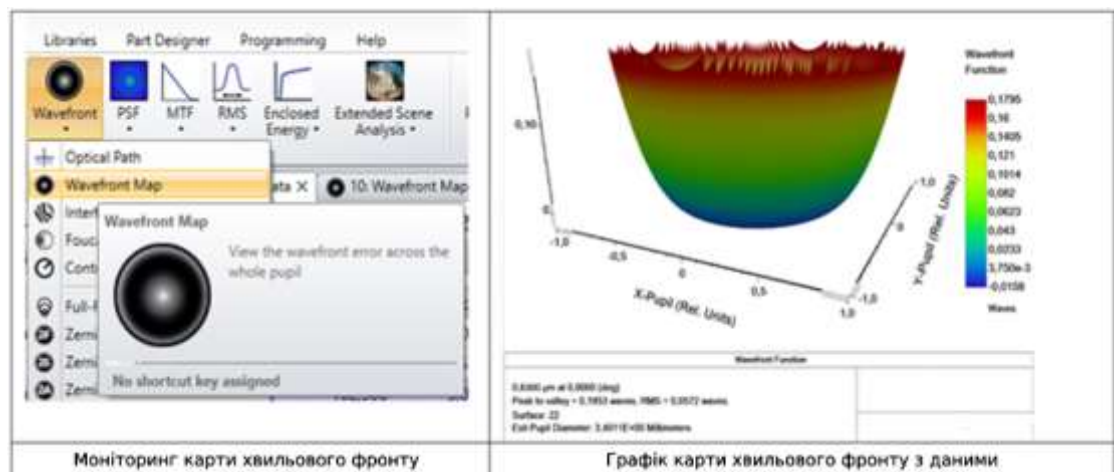


Рисунок 3.5 – Аналіз карти хвильового фронту

В подальшому можна виміряти аберації із застосуванням карти хвильового фронту в стандартному поліномі Церніке [14].

Найважливішим фактором у деформації хвильового фронту є розфокус. Розфокус в основному залежить від аметропії ока. Це основна зміна, яка спостерігається в параметрах Церніке в рамках мультиконфігурації варіювання довжини склоподібного тіла. Астигматизм, кома та сферична аберація більше пов'язані з проблемами заднього сегмента ока. Аберації третього порядку зазвичай мають меншу амплітуду, але їхній вплив, однак, є важливим для гостроти зору, особливо в умовах слабкого освітлення.

Наступні поліноми Церніке, обчислені для нормального ока, тепер можуть бути знайдені на поверхні, як показано нижче (рис. 3.6).

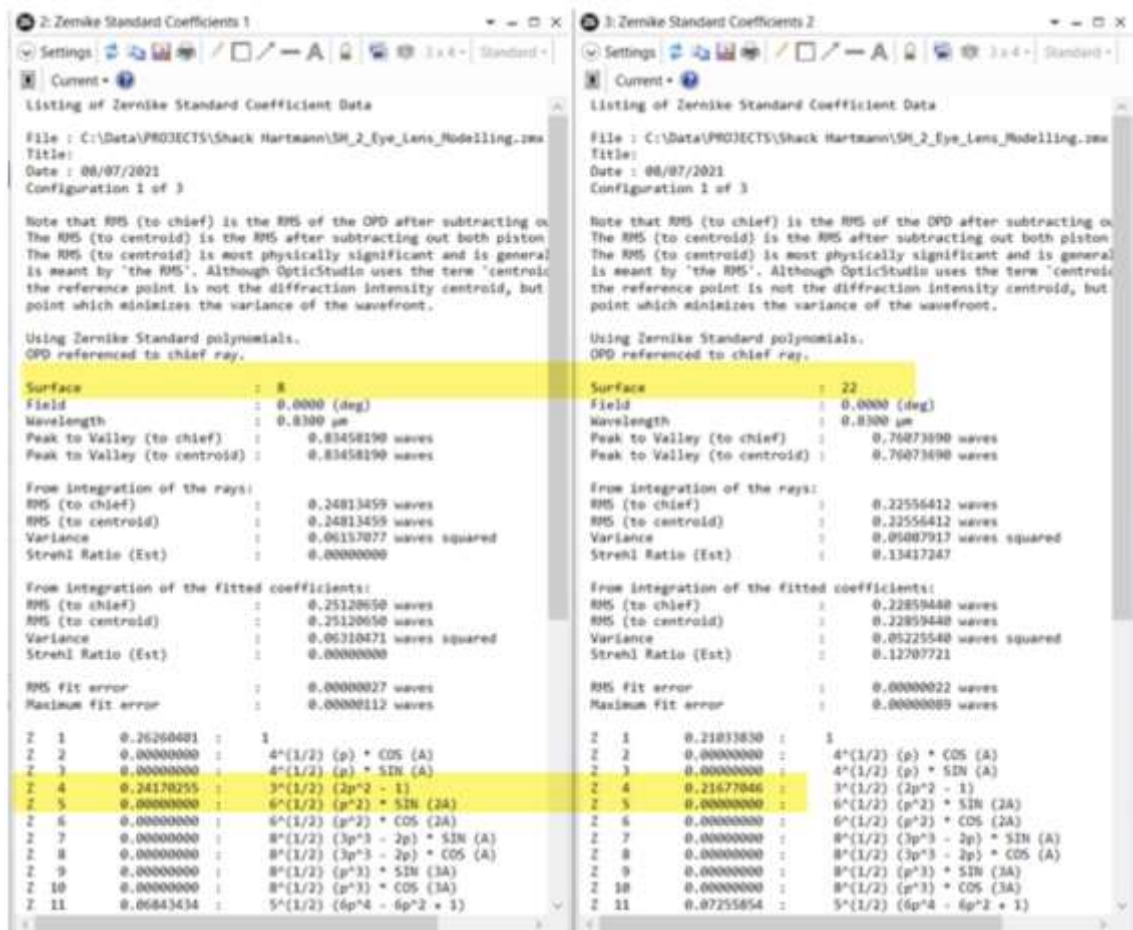


Рисунок 3.6 – На ро́гівці (поверхня 8). Після лінзи (поверхня 22)

Можна використати аналіз геометричного зображення для того, щоб побачити результат на датчику Шака-Хартмана (рис. 3.7).

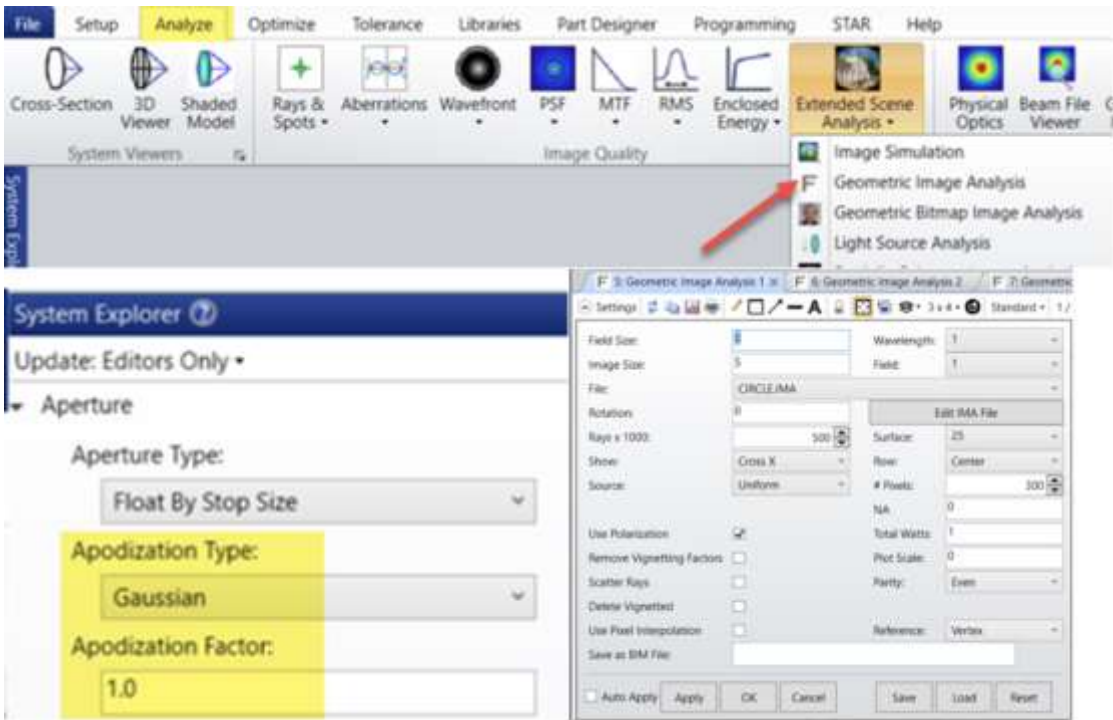


Рисунок 3.7 – Налаштування розширеного аналізу зображення

Ми можемо спостерігати опромінення в площині датчика кількома способами представленими нижче (рис. 3.8). Зміщення кожної точки фокусування від контрольної позиції, розташованої на осі кожної мікролінзи, дозволяє нам оцінити локальний нахил хвильового фронту.

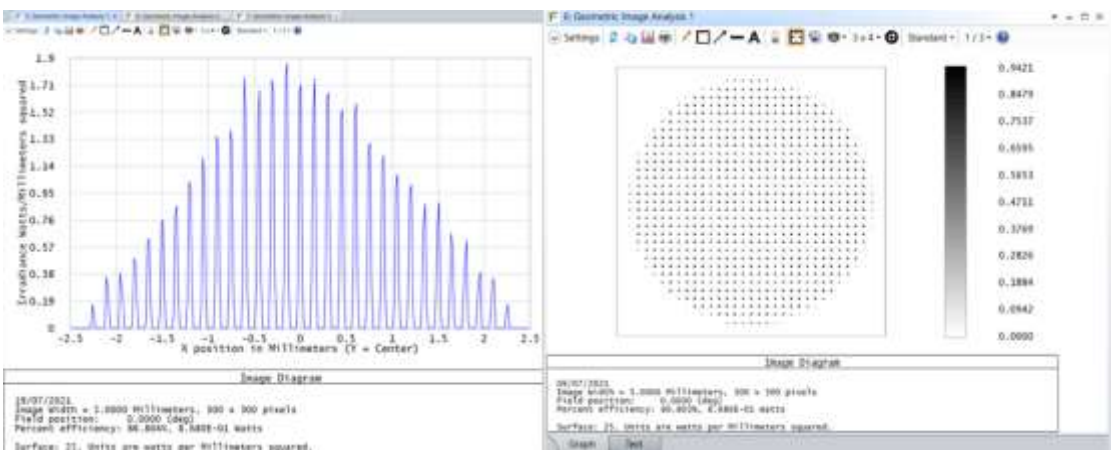


Рисунок 3.8 – Геометричний аналіз зображення

3.2 Моделювання в системі Зеемана

Ефект Зеемана – це явище розщеплення вироджених квантово-механічних станів та ліній оптичних спектрів у зовнішньому магнітному полі.

У оптиці при ефекті Зеемана відбувається розщеплення ліній оптичних спектрів на кілька компонентів. Це відбувається тому що енергія фотонів, випромінююмих атомами, залежить від їх квантового стану. Коли атом знаходиться в магнітному полі, фотони з різними енергіями можуть випромінюватися, що призводить до розщеплення ліній спектру.

Існує два основних типи ефекту Зеемана: звичайний і аномальний. Звичайний ефект спостерігається коли атом має лише один збуджений стан. Аномальний – коли атом має кілька збуджених станів, які різняться квантовими числами.

Завдяки ізотропності простору енергетичні рівні системи зазвичай не залежать від магнітного квантового числа (незалежність енергії від квантового числа називають виродженням). Однак ізотропність зникає у магнітному полі. Навіть у площині, перпендикулярній до напрямку поля, рух проти годинникової стрілки відрізняється від руху за годинниковою стрілкою, отже, якщо фізична система має орбітальний момент, то в прикладеному магнітному полі їхня енергія змінюється залежно від напрямку обертання в системі.

З погляду класичної механіки швидкість обертання, тому і момент кількості руху, змінюються неперервно. У квантовій механіці проєкція моменту кількості руху на напрямок поля може набувати лише значень, які задаються квантовим числом. Це квантове число отримало назву магнітного квантового числа. Як наслідок, енергія атома чи молекули у стані з ненульовим орбітальним моментом розщеплюється на кілька дискретних рівнів. Це розщеплення є зняттям виродження.

Оскільки лінії оптичних спектрів пояснюються переходами між енергетичними рівнями, то розщеплення якогось із енергетичних рівнів призводить до розщеплення відповідних ліній оптичних спектрів. Якщо, наприклад, основний стан атома є невиродженим (s-станом), а переходи відбуваються в трикратно вироджений p-стан, то оптична лінія розщепиться на три близькі складові, які будуть віддалятися при зростанні магнітного поля (рис. 3.9).

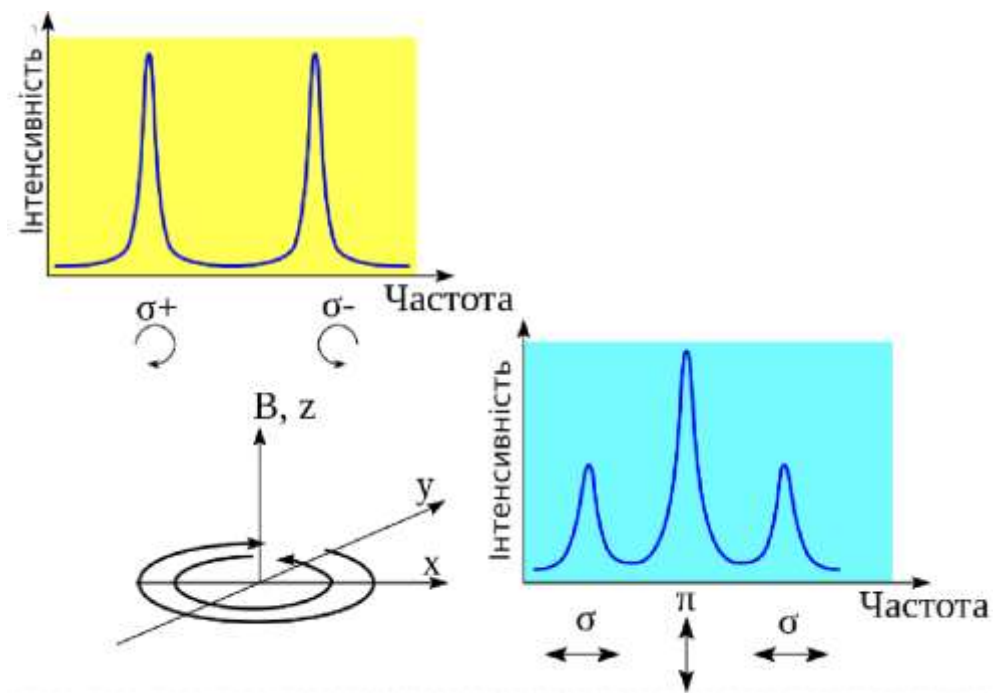


Рисунок 3.9 – Поляризація та спектр Зееман-ефекту, що детектуються з різних напрямків спостереження

На рис. 3.9 графік з жовтим тлом ілюструє випадок, коли спостереження ведеться у напрямку магнітного поля. В цьому випадку в спектрі флуоресценції детектується дві частоти з круговою поляризацією. Графік з синім тлом – спостереження ведеться перпендикулярно до напрямку магнітного поля. В цьому випадку в спектрі флуоресценції атомарних пар детектуються три частоти, що мають лінійну поляризацію σ і π [15].

Поперечний ефект Зеемана представлено на рис. 3.6, на якому речовина Hg, $\lambda = 579$ нм, $H \approx 2950$ ерстед (може не збігатися з розрахунковим), параметри інтерферометра Фабрі-Перо: $d = 4$ мм, $r = 98$ % (рис. 3.10).

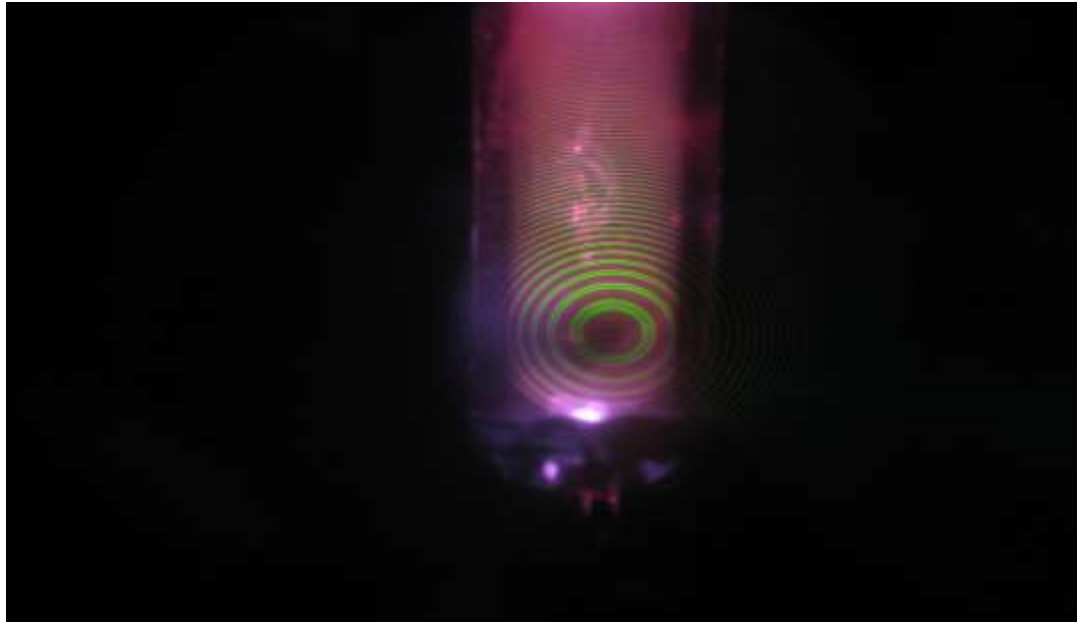


Рисунок 3.10 – Поперечний ефект Зеемана:

Лінії в оптичних спектрах відповідають переходам між енергетичними станами системи. Розщеплення енергетичних рівнів у магнітному полі призводить до розщеплення оптичних ліній. Проте не всі переходи між енергетичними станами можливі. Деякі з них заборонені правилами відбору. Так, наприклад, магнітне квантове число не може змінитися при оптичному переході на 2, бо спін фотона становить всього одиницю, а при переході має бути виконаним закон збереження моменту імпульсу. Як наслідок, в оптичних спектрах спостерігається менше ліній. Крім того, зееманівське розщеплення в оптичному спектрі залежить від напрямку спостереження (відносно напрямку магнітного поля).

При спостереженні в перпендикулярному до поля напрямку оптична лінія, відповідно до правила відбору, розщеплюється на 3. Лінії при цьому

поляризовані лінійно, крайні – перпендикулярно до магнітного поля, середня – паралельно до нього. При спостереженні у напрямку магнітного поля середня лінія зникає, а дві крайні лінії поляризовані циркулярно: одна – за годинниковою стрілкою, інша – проти неї. Така картина виникає в багатьох випадках і називається нормальним ефектом Зеемана.

У випадку, коли розщеплення електронних термів, між якими відбувається оптичний перехід, неоднакове за величиною, виникає аномальний ефект Зеемана і число ліній в оптичному спектрі становить більше ніж три. На відміну від нормального ефекту Зеемана, аномальний неможливо пояснити за класичними уявленнями.

Розщеплення ліній в оптичних спектрах пропорційне магнітному полю, доки лінії сусідніх атомних термів не починають перекриватися. У такому випадку картина аномального ефекту Зеемана поступово змінюється і в дуже сильних полях зводиться до трьох ліній, які відповідають нормальному ефекту Зеемана. Дане явище називається ефектом Пашена-Бака.

3.3 Фізика оптичних розповсюджень

При застосуванні фізики оптичних розповсюджень хвильовий фронт моделюється за допомогою масиву точок. Кожна точка в масиві зберігає комплексну амплітудну інформацію про промінь. Користувач може визначити масив з точки зору його розмірності, вибірки та співвідношення сторін.

Для поширення променя від однієї поверхні до іншої використовується або дифракція Френеля, або алгоритм розповсюдження кутового спектру. Програма автоматично вибирає алгоритм, який забезпечує найвищу чисельну точність. Алгоритми дифракційного розповсюдження дають правильні результати для будь-якої відстані, для будь-якого довільного променя та можуть врахувати будь-яку поверхневу апертуру, включаючи апертури, визначені користувачем.

Застосування фізики оптичних розповсюджень включає з'єднання волокон (одномодових і багатомодових), поширення дифракції через будь-який тип оптичного простору, обчислення зсувів, обчислення потоку променя та опромінення на оптичних поверхнях. Фізику оптичних розповсюджень також можна використовувати для детального аналізу довільного поширення лазерного променя через складну оптику, включаючи М-квадрат у розрахунки [16].

Для врахування ефекту дифракції ми можемо використати інструмент фізичного оптичного поширення від сітківки до поверхні датчика зображення.

Параметри у визначенні променя можна знайти шляхом зчитування числової апертури простору об'єкта в розділі `AnalyzReportsPrescriptionData` (рис. 3.11).

Image Space NA	:	0,4559078
Object Space NA	:	0,1262874
Stop Radius	:	2

Рисунок 3.11 – Апертура простору об'єкта

Числова апертура простору об'єкта визначається як: $NA = n \cdot \sin(\theta) = 0,126$ $n = 1,34$ – оптичний показник склоподібного тіла. Отже, θ дорівнює $5,4^\circ$. Він визначається як гаусів кут (рис. (3.12, 3.13)).

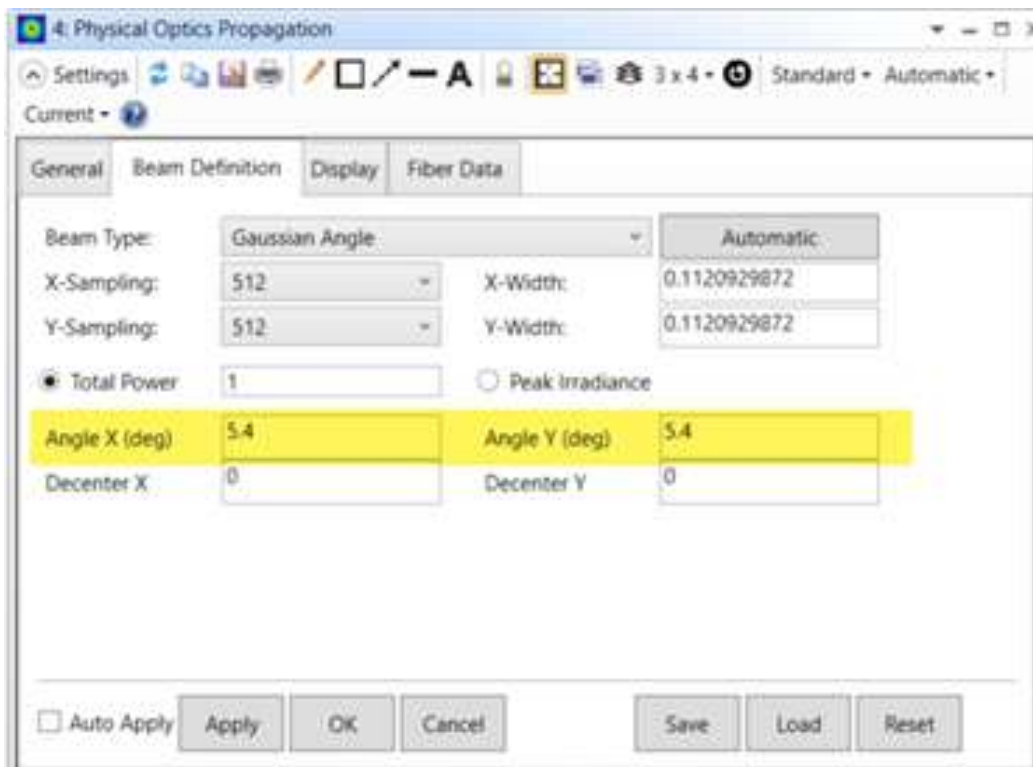


Рисунок 3.12 – Гаусів кут



Рисунок 3.13 – На поверхні вихідний пілотний радіус примусово має значення Plane

Як і в аналізі геометричного зображення, можна побачити опромінення в площині датчика (3.14).

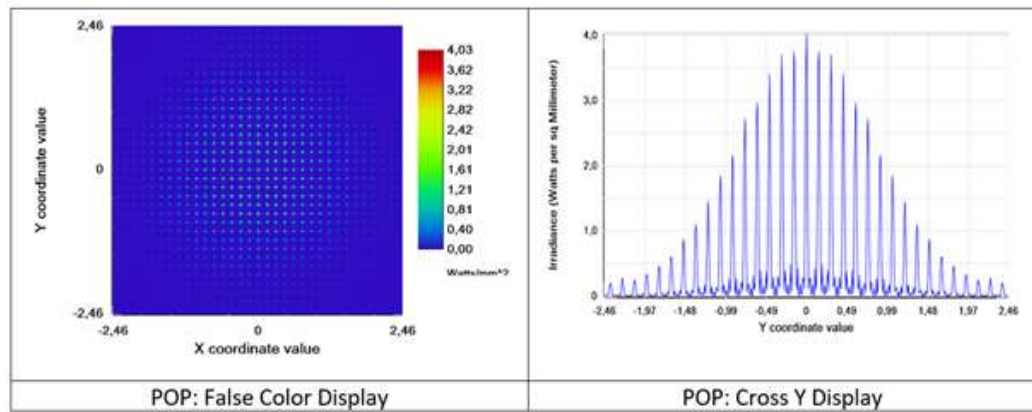


Рисунок 3.14 – Опромінення в площині датчика

Але бувають випадки, коли при трасуванні променів система може мати труднощі з точним моделюванням системи. Одним із прикладів є система, що містить масив лінз, у якому формується кілька зображень. Кілька зображень роблять визначення вихідної зіниці менш чітким, що ускладнює виконання аналізу Гюйгенса PSF або FFT. Це ситуація, в якій корисна фізика оптичних розповсюджень. Вона розглядає хвильовий фронт як єдиний складний масив амплітуд – більш природній метод аналізу для роботи з масивом лінз.

Послідовне моделювання системи з відповідним використанням аналізу геометричного зображення або з урахуванням фізики оптичних розповсюджень дозволяє оцінити оптичну систему від ока до детектора, який проходить через різні лінзи системи. Було представлено основні інструменти, які можна використовувати для оцінки системи на кожному кроці дослідження, а також важливі налаштування, які використовуються для досягнення надійного аналізу системи.

ВИСНОВКИ

У висновках можна висловити глибоку сутність важливості сенсора Штака-Хартмана для області офтальмології. Цей сенсор, використовуючи технології хвильової оптики, став необхідним інструментом для вимірювання аберацій в хвильових фронтах ока. Важливість його ролі полягає в тому, що він надає можливість докладно аналізувати оптичні аномалії та відхилення в структурі очей, що є критичним для точної діагностики та подальшої корекції зорових проблем.

Наші висновки підкреслюють, що оптимізація процесів вимірювань, зокрема врахування мінімального розміру області пошуку, робить сенсор Штака-Хартмана більш ефективним і надійним інструментом в офтальмології. Результати моделювань підтверджують, що цей підхід допомагає зменшити артефактні аберації, що можуть виникнути внаслідок вторинних хвильових фронтів.

Загальносистемний вигляд на важливість сенсора Штака-Хартмана в офтальмології підкреслює його значущість для просування технологій діагностики та лікування зорових захворювань, роблячи його необхідним інструментом у сучасній медицині.

Запропоновані в роботі методи моделювання дають змогу теоретично отримати різні параметри та конфігурації ока людини та оцінити його фізичні проблеми на основі Spot-діаграм або розрізу площини датчика, що має розвиток для визначення способів лікування або операційного втручання в око людини.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципи адаптивної оптики. М.: Наука, 1985.– 336 с.
2. Венедіктов В. Ю. Основи адаптивної оптики: 2014. 48 с.
3. А Токовинін. Лекції по адаптивній оптиці. URL: <https://znanierussia.ru/articles/> (дата звернення 20.10.2023).
4. Shack R.V. (1971). Smith F. Production and use of a lenticular Hartmann screen // Journal of the Optical Society of America. 1971. Vol. 61. P. 656–660.
5. Венедіктов В.Ю., Соловйов М.А. Голографічні датчики хвильового фронту.
6. Wyant J. C., Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology // Applied Optics and Optical Engineering. New York: Academic Press, 1992. Vol. 11. P. 28–39.
7. Зверев В.А., Радіонов С.А., Сокольский М.Н., Усоскін В.В. Математичні основи гартмановського теста головного зеркала БТА // Оптико-механічна промисловість, 1977. № 2. С. 18–22.
8. Hnatenko, Oleksandr S., Yuriy P. Machekhin, Victor Bilichenko, Valeriy Zarytskyi, Yaroslav Yaroslavskyy, Jacek Klimek, Kanat Mussabekov, Bakhyt Yeraliyeva, and Ainur Ormanbekova. “Fiber-optic system for control of the orientation of objects in space.” In Optical Fibers and Their Applications 2023, vol. 12985, pp. 47-54. SPIE, 2023.
9. Nirmaier T. Pudasaini G. Bille J. Very fast wave-front measurements at the human eye with a custom CMOS-based Hartmann-Shack sensor // Optics Express. OSA. 2003 Vol. 11, No 21. P. 2704–2716.
10. Hnatenko, O. S. (2021). Fiber Laser Based on Electronically Controlled Phase Plates. Journal of Nano- & Electronic Physics, 13(5).

11. Liang J. et al Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. // Opt. Soc. Am. 1994. Vol. 11. No. 7. P. 1949–1957.
12. Jump up to Hartmann J. (1904). Objektivuntersuchungen. Zeitschrift für Instrumentenkunde. Berlin: Verlag von Julius Springer. 24: 1–25, 33–47, 97–117.
13. Thomas O Salmon, Corina van de Pol. Normal-eie Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors // Y tsataratst refratst srg. 2006. Vol 32. No 12. P. 2064–2074.
14. Shack R.V. Smith F. Production and use of a lenticular Hartmann screen // Journal of the Optical Society of America (Oral presentation). Ramada Inn. 1971. Vol. 61 No 5. P. 656.
15. Back E., Lande A. Zeemaneffekt und Multiplettstruktur der Spektrallinien. Berlin // J. Springer. 1925
16. Hnatenko O. S. Modeling the interaction of laser radiation with complex biological optical systems / O. S. Hnatenko, O. O. Kalna // Інформатика, математика, автоматика: матеріали науково-технічної конференції ІМА:2018, 5-9 лютого 2018 р. Суми, 2018. 201 с.