

# АДАПТИВНА ОПТИКА

за редакцією С. В. Павлова



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

# **АДАПТИВНА ОПТИКА**

Навчальний посібник

**За редакцією С. В. Павлова**

Вінниця  
ВНТУ  
2015

**УДК 535.317(075)**

**ББК 32.86я73**

**A28**

Автори:

**Васюра А. С., Павлов С. В., Прокопова М. О., Тужанський С. Є.,  
Козловська Т. І.**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю “Лазерна та оптоелектронна техніка”. Лист № 1/11-11703 від 21.12.2010 р.

Рецензенти:

**В. С. Осадчук**, доктор технічних наук, професор

**В. Г. Петрук**, доктор технічних наук, професор

**В. І. Осінський**, доктор технічних наук, професор

**Адаптивна** оптика : навчальний посібник / [Васюра А. С.,  
**A28** Павлов С. В., Прокопова М. О. та ін.] – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 281 с.  
ISBN 978-966-641-638-7

У навчальному посібнику розглянуто матеріали щодо проектування та роботи сучасних адаптивних оптичних систем. Розглянуто принципи розповсюдження світла в неоднорідному середовищі і проблеми керування хвильовим фронтом. Зроблено аналіз систем фазового спряження та апертурного зондування, порівняння характеристик сенсорів хвильового фронту. Наведено приклади практичного застосування адаптивних оптичних систем.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності “Лазерна та оптоелектронна техніка” і може бути корисним для спеціалістів, що займаються використанням адаптивних оптичних систем.

**УДК 535.317(075)**

**ББК 32.86я73**

**ISBN 978-966-641-638-7**

© А. Васюра, С. Павлов, М. Прокопова,  
С. Тужанський, Т. Козловська, 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	7
1 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СВІТЛА В НЕОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ І ПРОБЛЕМА КЕРУВАННЯ ХВИЛЬОВИМ ФРОНТОМ....	12
1.1 Монохроматичне світлове поле.....	12
1.2 Просторово-когерентні та некогерентні світлові поля.....	16
1.3 Поняття турбулентності.....	16
1.4 Модель турбулентності Рейнольдса – Буссінеска.....	17
1.5 Модель турбулентності Колмогорова.....	19
1.6 Поняття хвильового фронту.....	22
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	24
2 ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ФОКУСУВАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	25
2.1 Оптичні системи для лазерів.....	25
2.1.1 Оптичні системи для фокусування лазерного випромінювання.....	25
2.1.2 Оптичні системи для зменшення розходження променів лазерів.....	29
2.2 Нелінійна оптика та нелінійна дія оптичного випромінювання.....	32
2.3 Подібність і питання оптимального керування світловими пучками.....	43
2.4 Керування хвильовим фронтом при тепловому фокусуванні.....	44
2.5 Адаптивне фокусування випромінювання лазерного локатора на малорозмірний об'єкт в зоні дифракції Френеля.....	46
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	55
3 АДАПТИВНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ.....	56
3.1 Принципи побудови адаптивних оптичних систем.....	56
3.2 Системи фазового спряження.....	60
3.3 Системи апертурного зондування.....	67
3.4 Особливості роботи адаптивних оптичних систем.....	71
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	78
4 СЕНСОРИ ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ.....	79
4.1 Інтерферометри.....	79
4.2 Сенсори гартманівського типу.....	83
4.3 Фазові детектори.....	90
4.4 Порівняльна характеристика сенсорів хвильового фронту.....	96
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	100

5 ВИМІРЮВАННЯ СПОТВОРЕНЬ ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ В АДАПТИВНІЙ ОПТИЦІ.....	101
5.1 Вимірювання локальних нахилів.....	101
5.1.1 Потенціальна чутливість вимірювання локальних нахилів хвильового фронту.....	101
5.1.2 Інтерферометри зсуву.....	102
5.2 Гартманівські сенсори хвильового фронту.....	105
5.2.1 Позиційна характеристика однокоординатного сенсора.....	106
5.2.2 Чутливість вимірювань.....	107
5.3 Відновлення хвильового фронту за вимірами локальних нахилів.....	107
5.3.1 Основні пропозиції.....	107
5.4 Розкладання фази за функціями відгуку коректора.....	109
5.4.1 Рівнозначні субапертури.....	109
5.4.2 Нерівнозначні субапертури.....	111
5.5 Відновлення хвильового фронту з урахуванням статистики фазових похибок, байесовський підхід.....	112
5.5.1 Основні положення.....	112
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	113
6 ДЗЕРКАЛА ДЛЯ АДАПТИВНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.....	114
6.1 Характеристики дзеркал.....	114
6.2 Секціоновані адаптивні дзеркала.....	117
6.3 Суцільні деформувальні дзеркала.....	118
6.4 Застосування деформувальних дзеркал у лазерних технологічних комплексах.....	121
6.5 Біморфні адаптивні дзеркала й оптичні модулі.....	126
6.5.1 Схема активної корекції хвильового фронту.....	127
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	129
7 МЕТОДИ ОБЕРНЕННЯ ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ В НЕЛІНІЙНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	130
7.1 Обернення хвильового фронту з використанням вимушеного розсіювання.....	131
7.1.1 Поняття оберненого хвильового фронту.....	131
7.1.2 Вимоги до виготовлення оптичних елементів для адаптивних систем.....	138
7.1.3 Причини різноманітності пристроїв корекції та їх класифікація.....	140
7.2 Обернення хвильового фронту методом чотирьоххвильового змішування.....	142
7.3 Інші методи та перспективи розвитку методів обернення хвильового фронту.....	145

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	149
8 СТАТИСТИЧНА ДИНАМІКА АДАПТИВНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.....	150
8.1 Головні особливості моделей адаптивних оптичних систем.....	150
8.2 Статистична динаміка адаптивних систем фокусування при точковому об'єкті спостереження.....	163
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	170
9 ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНОЇ ОПТИКИ.....	171
9.1 Передача світлової енергії на далекі відстані.....	171
9.2 Оптична астрономія.....	174
9.3 Світлові пучки в установках термоядерного синтезу, системах оптичної локації, технології та в інших областях сучасної техніки..	178
9.4 Лазерна приймально-передавальна система для супутникового вимірювання поглинання атмосферних шляхів.....	183
9.5 Наземна система для RIS-експерименту. Основні елементи системи.....	184
9.6 Активне спостереження за RIS.....	186
9.7 Спектроскопічні вимірювання за допомогою RIS.....	187
9.8 Висоочастотні одномодові поздовжньо-імпульсні ТЕА СО <sub>2</sub> -лазери.....	188
9.9 Початкові експерименти з використанням RIS.....	191
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	192
10 ВИДИ ТЕЛЕСКОПІВ.....	193
10.1 Типи телескопів.....	195
10.2 Об'єкти спостереження за допомогою телескопів.....	198
10.3 Великі оптичні телескопи.....	200
10.3.1 Великий Південно-Африканський Телескоп SALT.....	203
10.3.2 Космічний телескоп GALEX203.....	210
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	215
ДОДАТКИ.....	216
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ.....	217
Лабораторна робота № 1. Оптичні системи для керування лазерним випромінюванням.....	218
Лабораторна робота № 2. Розрахунок адаптивних оптичних систем атмосферного каналу зв'язку.....	221
Лабораторна робота № 3. Аналіз характеристик сенсорів хвильового фронту.....	232
Лабораторна робота № 4. Розрахунок атмосферного	

каналу зв'язку.....	239
Лабораторна робота № 5. Поглинання інфрачервоного випромінювання атмосферою.....	249
Лабораторна робота № 6. Агрегатні методи розрахунку Спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери.....	253
ГЛОСАРІЙ.....	268
ЛІТЕРАТУРА.....	277

## ПЕРЕДМОВА

Ще найперші створені людством оптичні системи передбачали можливість адаптації до конкретних умов спостереження. Подальший технічний прогрес оптичних систем пов'язаний, в першу чергу, з нарощуванням цих можливостей, що проявляється як у збільшенні кількості відповідних параметрів (дозволяють реагувати на певні зміни), так і у швидкості процесів налаштування та повному використанні можливостей ЕОМ. У сукупності ці фактори приводять до створення принципово нових адаптивних оптичних систем, що використовують оптичні елементи, синтез яких базується на нових наукових принципах.

**Предмет адаптивної оптики.** Адаптивна оптика (*adaptive optics*) – це розділ оптики, що вивчає динамічні оптичні системи, які дозволяють компенсувати спотворення хвильового фронту, які випадково виникають та змінюються в процесі свого функціонування. Адаптивна оптика майбутнього буде адаптуватись не тільки до хвильового фронту, але й до амплітудного розподілення.

Адаптивна оптика сьогодні – це тільки перший крок у створенні адаптивних оптичних систем. Однак, вже на цьому кроці не тільки вдається вирішити ряд важливих адаптивних задач, але й опрацювати загальні принципи створення оптичних систем. Подальше нарощування адаптивних можливостей оптичних систем – це і є той шлях, який приведе до оптики майбутнього [1–6].

**Розвиток адаптивної оптики.** Адаптивна оптика бере свій початок ще в сивій давнині. Емпіричне пізнання основних законів оптики (прямолінійне поширення світла, відбивання, заломлення і т. п.) дозволило Архімеду, творцю гігантського секціонованого дзеркала, кожна секція якого керувалась людиною, в 211 р. до н. е. зосередити сонячні промені в одному місці та спалити трієри ворожого флоту під час облоги Сіракуз. Для багатьох це легенда, однак в 1973 р. грецькому інженеру Іоанісу Саккасу вдалося «повторити» дослід Архімеда. Із допомогою 60 чоловік, що керували дзеркалами розміром 91×51 см кожне, Саккас підпалив човен, який знаходився на відстані 50 м і був навантажений смолою.

Хоча й прадавня за своїми витокami, адаптивна оптика – сучасний науковий напрям, який остаточно сформувався в останні 40-50 років і є



закономірним продовженням розвитку оптики. Розвиток адаптивної оптики можна розділити на три етапи:

- створення фізичних основ сучасної оптики і оптичних явищ (XIX ст.);
- створення когерентних джерел світла (50-60-і роки XX ст.);
- створення оптичних систем з реалізацією ідеї із компенсації фазових збурень при формуванні оптичних зображень (70 роки XX ст.).

До створення адаптивних оптичних систем науково-технічна ідея рухалася по декількох напрямках, що з'єдналися в один новий.

Так, необхідно згадати оптичні низькоякісні світлові колектори, що використовуються, наприклад, в сонячних енергетичних установках. Не можна не відзначити появу складних оптичних телескопів, що дозволили збільшити еквівалентну площу головного дзеркала телескопа. Великий вплив на розвиток адаптивної оптики виявили ідеї В. П. Лінника і Г. У. Бєбкока щодо компенсації атмосферних спотворень при спостереженні зірок за допомогою дзеркальних приладів зі складеною або суцільною поверхнею, що деформується [2].

**Принципи адаптивної оптики.** Запуск на орбіту в 1990 році оптичного телескопа «Хаббл» діаметром 2,4 м і його надзвичайно ефективна робота в наступні роки довели великі можливості телескопів, необтяжених атмосферними спотвореннями. Але висока вартість створення і експлуатації космічного телескопа змусили астрономів шукати шляхи компенсації атмосферних завад на поверхні Землі. Поява швидкодіючих комп'ютерів і, не в останню чергу, бажання військових створити систему космічної зброї з лазерами наземного базування зробили актуальною роботу з компенсації атмосферних спотворень зображення в реальному часі. Системи адаптивної оптики дозволяють вирівнювати і стабілізувати хвильовий фронт випромінювання, спотворений у атмосфері, дають можливість не тільки отримувати у фокусі телескопа чітке зображення космічного об'єкта, але і виводити із Землі в космос гостросфокусований промінь лазера. На щастя, військові пристрої такого типу не були реалізовані, але виконана в цьому напрямку робота надзвичайно допомогла астрономам майже повністю реалізувати теоретичні параметри великих телескопів за якістю зображення. До того ж розробка систем адаптивної оптики зробила можливим будівництво наземних оптичних інтерферометрів на базі телескопів великих діаметрів:

оскільки після проходження через атмосферу довжина когерентності світла становить усього близько 10 см, наземний інтерферометр без системи адаптивної оптики працювати не може.

Основним призначенням адаптивних оптичних систем є корекція в реальному часі спотворень, що вносяться атмосферою в зображення космічних об'єктів. Зазвичай адаптивна система працює спільно з системою активної оптики, що підтримує конструкцію і оптичні елементи телескопа в «ідеальному» стані. Діючи спільно, системи активної та адаптивної оптики наближають якість зображення до гранично високого, що визначається принциповими фізичними ефектами (в основному аберацією світла на об'єктиві телескопа).

В принципі системи активної та адаптивної оптики подібні одна до одної. Обидві вони містять три основні елементи: 1) аналізатор зображень; 2) комп'ютер з програмою, яка виробляє сигнали корекції і 3) виконуючі механізми, що змінюють оптичну систему телескопа таким чином, щоб зображення стало відкорегованим. Основна відмінність між цими системами полягає в тому, що корекція недоліків самого телескопа (активна оптика) відбувається повільно – з інтервалом від кількох секунд до 1 хвилини; але необхідність виправляти перешкоди, які вносяться атмосферою (адаптивна оптика), може виникати значно частіше – від декількох десятків до тисячі разів на секунду. Тому система адаптивної оптики не може змінювати форму масивного головного дзеркала телескопа і змушена управляти формою спеціального додаткового дзеркала, встановленого у вихідній зіниці телескопа [4].

**Реалізація адаптивної оптики.** Вперше на можливість корекції атмосферних спотворень зображення за допомогою деформованого дзеркала вказав у 1953 американський астроном Хорас Бабкок (Babcock HW, 1912 р.). Для компенсації спотворень він запропонував використовувати відбиття світла від масляної плівки, поверхня якої деформована електростатичними силами. Тонкоплівкові дзеркала з електростатичним управлінням розробляються для аналогічних цілей і в наші дні, хоча більш популярним виконавчим механізмом служать п'єзоелементи із дзеркальною поверхнею.

Плоский фронт світлової хвилі, пройшовши крізь атмосферу, спотворюється і поблизу телескопа має досить складну структуру. Для характеристики викривлення зазвичай використовують параметр  $r_0$  – радіус когерентності хвильового фронту, який визначається як відстань, на

якій середньоквадратична різниця фаз становить 0,4 довжини хвилі. У видимому діапазоні, на хвилі довжиною 500 нм, в переважній більшості випадків  $r_0$  лежить в інтервалі від 2 до 20 см; умови, коли  $r_0 = 10$  см, нерідко вважаються типовими. Максимальна роздільна здатність великого наземного телескопа, що працює через турбулентну атмосферу з довгою експозицією є такою самою, як і роздільна здатність ідеального телескопа діаметром  $r_0$ , що працює поза атмосферою. Оскільки значення  $r_0$  зростає приблизно пропорційно довжині хвилі  $r_0 \sim \lambda^{-6/5}$ , атмосферні перекручування випромінювання у інфрачервоному діапазоні є істотно меншими, ніж у видимому. Для невеликих наземних телескопів, діаметр яких співрозмірний з  $r_0$ , можна вважати, що в межах об'єктива хвильовий фронт плоский і в кожний момент часу нахилений випадковим чином на деякий кут. Нахил фронту відповідає зсуву зображення в фокальній площині, або, як говорять астрономи, тремтінню (у фізиці атмосфери прийнято термін «флуктуації кута падіння»). Для компенсації тремтіння в таких телескопах досить ввести плоске кероване дзеркало, що нахиляється по двох взаємно перпендикулярних осях.

Експерименти з системами адаптивної оптики почалися наприкінці 1980-х, а до середини 1990-х вже були отримані досить обнадійливі результати. З 2000 р. практично на всіх великих телескопах використовуються такі системи, що дозволяють довести кутову роздільну здатність телескопа до його фізичної (дифракційної) межі. Наприкінці листопада 2001 р. система адаптивної оптики почала працювати на 8,2-метровому телескопі «Йепун» (Yepun), що входить до складу «Дуже великого телескопа» (VLT) Європейської південної обсерваторії в Чилі.

На базі перерахованих самостійних напрямків сформувалася концепція створення адаптивних оптичних систем з адаптивним дзеркалом як виконавчим елементом. Це відбулося в середині 70-х рр. ХХ ст. з появою перших швидкодіючих оптичних дзеркал зі змінною геометрією поверхні. Ця концепція, взагалі-то, втілена і в системах з виконавчими елементами не відбивального, а прохідного типу.

Середина 70-х рр. ХХ ст. відзначена розвитком ще одного напрямку – **обернення хвильового фронту (ОХФ)**, самостійної концепції керування фазою оптичного випромінювання. Обернення хвильового фронту базується на нелінійних ефектах впливу світла на речовину. Ідея ОХФ виявилася настільки плідною для компенсації спотворень оптичних пучків, що вивчення адаптивної оптики без ОХФ було б неповним.

З моменту появи ідей Лінніка-Бєбєкєкє минуло майже 60 років, перш нїж вони знайшли своє часткове втілення в конкретних технїчних приладах. Основною причиною цього була відсутність необхідних виконавчих елементів. Потужним поштовхом розвитку даного напрямку стало вдосконалення когерентних джерел світла.

Слід відзначити одну з експериментальних робіт У. Катєя (1968 р.), що мала великий вплив на розвиток обох концепцій адаптивної компенсації. В статичному режимі за допомогою голограми У. Катєй продемонстрував майже ідеальне фокусування світла через сильно викривлену прозору пластину.

До кінця 70-х – початку 80-х рр. остаточно склалися принципи побудови виконавчих елементів – швидкодіючих високоточних адаптивних дзеркал. В 1976 – 1977 рр. вперше була здійснена компенсація атмосферної турбулентності і отримано покращене зображення зірок (розробки Калїфорнїйського університету і фірми Itek Corporation, США).

Ефект ОХФ в реальному масштабі часу вперше був виявлений в 1972 р. (Б. Я. Зєльдєвич, О. Ю. Нєсач, В. І. Попєвичєв, В. В. Рагульський, Ф. С. Файзулов). В основі фізичного механїзму обернення лежав ефект вимушеного розсіювання Мандєльштама-Брїллюєна. В 1977 – 1978 рр. була показана можливість отримання ОХФ з використанням вимушеного комбїнаційного розсіювання і суперлюмінесценції.

На можливість реалізації ОХФ голографїчними засобами вказувалося ще на початку 60-х рр. в роботах Ю. Дєнісюка і Г. Кєгєльнїка. Однак голографїчна «гїлка» ОХФ фактично була знайдєна в 1977 р.

В роботі Р. Хєллварса пропонувалося використання чотирьоххвїлевого змїшування для отримання оберненої хвїлі, а в роботі А. Ярїва – використання трїххвїлевого змїшування. В 1982 році було виявлено ефект ОХФ у скляних волоконних світловодах і т. д.

Таким чином, розвиток обох концепцій адаптивної компенсації спотворєнь світлового поля вїдбувався синхронно. Пїдтвердженням цього факту стала одночасна поява публїкацій, присвячених основам вїдповїдних концепцій [1–6].

# 1 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СВІТЛА В НЕОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ І ПРОБЛЕМА КЕРУВАННЯ ХВИЛЬОВИМ ФРОНТОМ

## 1.1 Монохроматичне світлове поле

Реальні світлові поля переважно не є монохроматичними, і в загальному випадку вони описуються складною часовою залежністю світлових коливань. Але зупинимось на дослідженні монохроматичних світлових полів. Такий підхід дозволяє спростити відповідні математичні вирази та виділити як об'єкт дослідження те головне, чим відрізняються світлові поля від інших електромагнітних більш довгохвильових діапазонів – їх просторову структуру. Тим більше, перенесення відповідних узагальнень далі на немонохроматичне світлове поле не є занадто складним [5, 6].

Монохроматичне світлове поле можна подати у вигляді

$$\varepsilon_c(\vec{\rho}, t) = \operatorname{Re} \varepsilon(\vec{\rho}) e^{-i\omega_0 t}, \quad (1.1)$$

де  $\operatorname{Re}$  означає реальну частину;  $\omega_0$  – кругова частота, пов'язана з довжиною хвилі  $\lambda$  співвідношенням  $\omega_0 = 2\pi c / \lambda$ ;  $c$  – швидкість світла в вакуумі;  $\varepsilon(\vec{\rho})$  – деяка комплексна функція, що описує просторову структуру даного поля, яка називається його комплексною амплітудою.

Відзначимо, що  $\vec{\rho}$  – радіус-вектор, який відповідає деякій точці в області, де здійснюється спостереження. Надалі будемо враховувати, що поле спостерігається в певній площині. Область, в якій безпосередньо здійснюється спостереження та є частиною цієї площини, позначимо  $\Omega$ .

Нехай виникнення світлового поля  $\varepsilon_c(\vec{\rho}, t)$  пов'язано з тим, що на деякій поверхні  $\Omega_0$  є монохроматичне світлове збудження. Очевидно, що це збудження може бути записано в тому ж вигляді, що і саме поле (1.1), але вже з деякою своєю комплексною амплітудою  $E(\vec{r})$ , де  $\vec{r}$  – радіус-вектор, що відповідає точці на поверхні  $\Omega_0$ .

Зв'язок між комплексними амплітудами  $\varepsilon(\vec{\rho})$  та  $E(\vec{r})$  у вільному просторі встановлюється добре відомою інтегральною теоремою Гельмгольца та Кірхгофа. Відповідне співвідношення можна отримати з розв'язку хвильового рівняння і воно є математичним виразом принципу

Гюйгенса-Френеля. Суть цього принципу полягає в тому, що кожну точку на поверхні  $\Omega_0$  можна розглядати як центр своєї елементарної сферичної хвилі. Поле в точці, що відповідає  $\vec{\rho}$ , являє собою результат суперпозиції всіх сформованих таким чином парціальних (віртуальних) хвиль. Не зупиняючись на загальній формі інтегральної теореми, розглянемо лише декілька конкретних прикладів, що становлять найбільший інтерес для подальших досліджень.

Нехай на нескінченну непрозору площину, в якій є отвір (область  $\Omega_0$ ), падає монохроматична хвиля (рис. 1.1). Введемо в цю площину систему координат  $\vec{r}$  та позначимо через  $E(\vec{r})$  комплексну амплітуду вхідної хвилі. Нехай площина спостереження є колінеарною даній площині та віддалена від останньої на відстань  $R$ . За таких умов інтегральна теорема приводить до виразу [5, 6]

$$\varepsilon(\vec{\rho}) = \int_{\Omega_0} E(\vec{r}) H(\vec{r} - \vec{\rho}) d\vec{r} \quad (1.2)$$

де так звана передаточна функція вільного простору

$$H(\vec{r} - \vec{\rho}) = \exp(ikR_0) \cos(\vec{R}\vec{R}_0) / (i\lambda\vec{R}_0). \quad (1.3)$$

Тут  $k$  – хвильове число,  $2\pi/\lambda$ ;  $\vec{R}_0$  – вектор з точки  $\vec{r}$  в точку  $\vec{\rho}$ , так що  $\vec{R}_0 = \vec{R} + \vec{\rho} - \vec{r}$ .

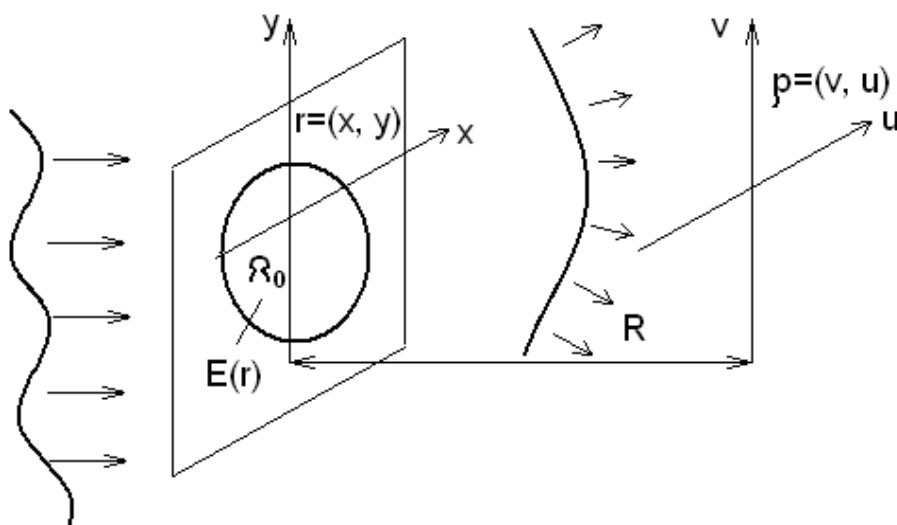


Рисунок 1.1 – Оптична схема, що ілюструє інтегральну теорему

Якщо  $\vec{R}$  є настільки великим, що для всіх  $\vec{\rho} \in \Omega$  та  $\vec{r} \in \Omega_0$  виконується умова

$$R^3 \gg \pi |\rho - r|^4 / (4\lambda), \quad (1.4)$$

тоді

$$H(\vec{r} - \vec{\rho}) \approx \exp \left[ ik\vec{R} + ik \left| \vec{\rho} - \vec{r} \right|^2 / (2R) \right] / (i\lambda R). \quad (1.5)$$

Якщо крім умови (1.4) для всіх  $\vec{r} \in \Omega_0$  виконується нерівність

$$R \gg 0,5k \left| \vec{r} \right|^2, \quad (1.6)$$

то функція  $H(\cdot)$  досить добре апроксимується функцією

$$H(\vec{r}, \vec{\rho}) = \exp \left[ ikR + ik \left| \vec{\rho} \right|^2 / (2R) - ik\vec{r} \vec{\rho} / R \right] / (i\lambda R). \quad (1.7)$$

Область, в якій справедливе наближення (1.5), називається областю дифракції Френеля, а та область, в якій задовольняється додаткове наближення (1.6) – областю дифракції Фраунгофера.

Розглянемо такий приклад. Нехай деяке опукле абсолютно відбиваюче тіло освітлюється плоскою монохроматичною хвилею, напрямком падіння якої протилежний напрямку, з якого проводиться спостереження (рис. 1.2). Оберемо поблизу від даного тіла довільну точку  $O$  «приведення». Відстань між точкою  $O$  та точкою  $O_1$  на площині спостереження позначимо як  $R$ , а вектор, направлений від точки приведення до елемента поверхні  $d\xi$  – як  $\vec{r}_0$ . Тоді, якщо  $E_0$  – комплексна амплітуда плоскої хвилі в момент її проходження крізь точку  $O$ , то при досить великих значеннях  $R$

$$\varepsilon(\vec{\rho}) \approx E_0 \iint_{\xi} \exp(-ik\vec{r}_0 \vec{R} / R_0) \exp(ikR_0) \cos(\vec{n} \vec{R}) d\xi / (i\lambda R), \quad (1.8)$$

де інтегрування проводиться по освітленій поверхні тіла,  $\vec{n}$  – зовнішня нормаль до цієї поверхні.

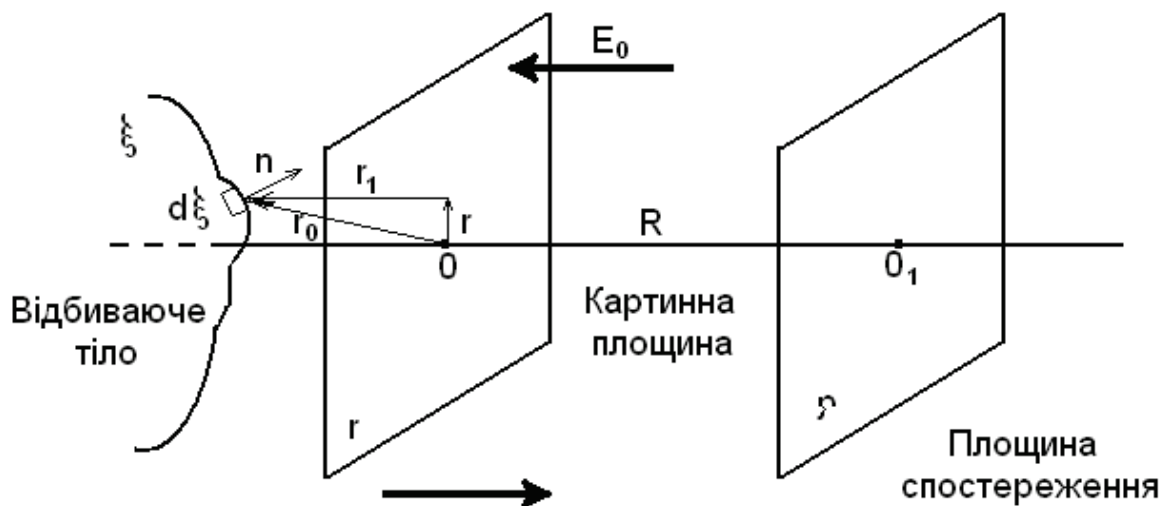


Рисунок 1.2 – Схема, що ілюструє методику проведення сигналу у фіксовану площину [ 5 ]

Проведемо через точку  $O$  площину, колінеарну площині спостереження, і назвемо її картинною площиною. Позначимо через  $\vec{r}$  вектор, що є проекцією вектора  $\vec{r}_0$  на картинну площину, так що  $\vec{r}_0 = \vec{r} + \vec{r}_\perp$ . Тоді при переході у (1.8) від інтегрування по поверхні  $\xi$  до інтегрування по картинній площині за умови (1.4), отримаємо

$$\begin{aligned} \varepsilon(\vec{\rho}) \approx E_0 \int_{\Omega_0} \exp\left[-2ikR\vec{r}_\perp / R + ik|\vec{r}_\perp|^2 / (2R)\right] \times \\ \times \exp\left[ikR + ik|\vec{\rho} - \vec{r}|^2 / (2R)\right] d\vec{r} / (i\lambda R), \end{aligned} \quad (1.9)$$

де в даному випадку  $\Omega_0$  – область, що визначає межу проекції освітленої поверхні тіла на картинну площину. Оскільки  $-2ikR\vec{r}_\perp / R + ik|\vec{r}_\perp|^2 / (2R)$  є деяка функція від  $\vec{r}$ , то можна ввести позначення

$$E(\vec{r}) = E_0 \exp\left[-2ikR\vec{r}_\perp / R + ik|\vec{r}_\perp|^2 / (2R)\right]. \quad (1.10)$$

Тоді з врахуванням (1.5) співвідношення (1.9) набуде вигляду, що точно збігається з (1.2).

Таким чином, і в тому випадку, коли об'єкт не є плоским, вдається знов-таки скористатись співвідношенням (1.2). Проте, якщо у випадку



плоского об'єкта, яким в попередньому прикладі є отвір, функція  $E(\vec{r})$  описує комплексну амплітуду в площині самого об'єкта, то для об'ємного тіла функція  $E(\vec{r})$  описує комплексну амплітуду в деякій картинній площині. В останньому випадку конкретний вигляд функції  $E(\vec{r})$ , як видно безпосередньо із (1.10), визначається геометричними особливостями освітлюваної частини поверхні тіла, яка спостерігається [1–6].

## 1.2 Просторово-когерентні та некогерентні світлові поля

Комплексна амплітуда поля у околі об'єкта  $E(\vec{r})$  визначається такими інтерференційними явищами, які супроводжують розсіяння світлових хвиль від об'єкта. Залежно від особливостей цих процесів функція  $E(\vec{r})$  може мати різні статистичні характеристики, що в підсумку впливає на ступінь просторової когерентності всього світлового поля. Розглянемо ці питання більш докладно.

Згадаємо приклади, наведені в підпункті 1.1. Уявімо собі, що площа з отвором  $\Omega_0$  (див. рис. 1.1.) замінена транспарантом, коефіцієнт пропускання якого поза областю  $\Omega_0$  дорівнює нулю. Нехай цей транспарант просвічується плоскою монохроматичною хвилею. Тоді поле після проходження цього транспаранта буде мати комплексну амплітуду  $E(\vec{r})$ , що однозначно визначається його комплексним коефіцієнтом пропускання. Фізична природа комплексності коефіцієнта пропускання полягає в тому, що при просвічуванні може відбуватись зміна не лише інтенсивності вхідного випромінювання, але і фазових співвідношень [2,5].

## 1.3 Турбулентність

**Турбулентність** (*turbulence*) (від лат. *turbulentus* – бурний, хаотичний) – явище, яке полягає в тому, що при збільшенні інтенсивності потоку рідини чи газу в середовищі довільно створюються багаточисельні хвилі (фрактальні або звичайні) різних лінійних розмірів, які проявляються як без впливу зовнішніх, випадкових, збурюючих середовище сил, так і/або за їх присутності. Для розрахунку подібних течій були створені різні моделі турбулентності.

Турбулентність експериментально відкрита англійським інженером Рейнольдсом в 1883 році при вивченні потоку нестисненої води в трубах.

Миттєві параметри потоку (швидкість, температура, тиск, концентрація домішок) при цьому хаотично коливаються навколо середніх значень. Залежність квадрата амплітуди від частоти коливань (або спектр Фур'є) є неперервною функцією. Для виникнення турбулентності необхідне суцільне середовище, що описується кінетичним рівнянням Больцмана чи Нав'є-Стокса або граничного шару. Рівняння Нав'є-Стокса (в нього входить і рівняння збереження маси або рівняння нерозривності) описує багато турбулентних потоків з достатньою для практики точністю. Зазвичай турбулентність настає при перевищенні деякого критичного числа Рейнольдса і/або числа Релея (в окремому випадку швидкості потоку при сталій густині та діаметрі труби і/або температурі на зовнішній границі поділу середовища).

В окремому випадку турбулентність спостерігається в багатьох потоках рідин і газів, багатофазних течіях, рідких кристалах, квантових Бозе- і Фермі- рідинах, магнітних рідинах, плазмі і різноманітних твердих середовищах (пісок, земля, метали та ін.). Це явище також спостерігається при вибухах зірок, у надтекучому гелії, в нейтронних зірках, у легенях людини, при русі крові в серці, при турбулентному (вібраційному) горінні.

Вона виникає самовільно, коли сусідні області середовища йдуть поряд або проходять одна в одну, за наявності перепадів тиску або за наявності сили тяжіння, або якщо області середовища обтікають непроникні поверхні.

Турбулентність може виникнути при наявності зовнішньої випадкової сили. Зазвичай зовнішня випадкова сила та сила тяжіння діють одночасно. Наприклад, при землетрусі або пориві вітру з гори може зійти снігова лавина, всередині якої потік снігу є турбулентним [2, 3].

#### **1.4 Модель турбулентності Рейнольдса-Буссінеска**

В рамках цієї моделі густина потоку забруднення атмосфери  $\bar{S}$  задається формулою [5,6]

$$\bar{S} = -[K] \text{grad} \bar{c}, \quad (1.11)$$

де  $\bar{c}$  – масова концентрація забруднення,  $[K]$  – тензор турбулентної дифузії.

Тензор турбулентної дифузії залежить від таких факторів, як шорсткість поверхні матеріалу, розподіл температури на висоті (температурна стратифікація), швидкість вітру, висота над поверхнею. Що стосується шорсткості, то вважається, що вона складає 0,1..0,16 середньої висоти нерівностей на поверхні. Температурна стратифікація визначає стан стійкості атмосфери: стійкий, інверсний, нестійкий та байдужий. Якщо при зміщенні частки зі свого початкового стану вона намагається ще більше віддалитися від цього положення, то стан атмосфери нестійкий, якщо навпаки, частка намагається повернутися в початкове положення, то стан атмосфери стійкий. У байдужому стані частка не зміщується з нового положення. Температурна стратифікація поділяється на 6 класів: А, В, С, D, E і F, що носять назву класів Песквіла. Клас D відповідає байдужому стану, E і F – інверсії, А, В, С – нестійкості. Від характеру стратифікації атмосфери залежать коефіцієнти турбулентної дифузії, які, в свою чергу, впливають на поле вітру.

В подальшому вважається, що поле швидкості вітру являється соленоїдальним, а в тензорі турбулентної дифузії відмінна від 0 тільки вертикальна компонента  $[K_{zz}] = [K]$ . Густина повітря вважається сталою. У вказаних припущеннях рівняння, що описує перенесення забруднення в атмосфері й виражає баланс його маси, має вигляд

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \text{div} \bar{c} w - \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{K} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) = \bar{Q} - \bar{R}. \quad (1.12)$$

де  $w$  – швидкість вітру,  $Q$  – поле емісії,  $R$  – члени, що описують забруднення (радіоактивний розпад, хімічна трансформація та інше).

У подальшому вважається, що  $z$  – компонента швидкості відсутня, якщо поверхня є рівною.

Граничні умови на бокових границях мають такий вигляд.

$$\bar{c} = \bar{c}_\phi, \text{ якщо } (w, n) < 0, \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial n} = 0, \text{ якщо } (w, n) > 0. \quad (1.14)$$

Фізичний зміст цих умов полягає в рівності концентрації забруднень деякому значенню у випадку, коли вітер на границі направлений всередину області, і у безперешкодному проникненні забруднень в іншому випадку.

На верхній границі:

$$[K] \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = 0. \quad (1.15)$$

На нижній границі:

$$[K] \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \delta, \quad (1.16)$$

де  $\delta$  – інтенсивність поглинання забруднення поверхні.

Початкові умови мають вигляд:

$$\bar{c}|_{t=0} = 0. \quad (1.17)$$

При наявності точкових джерел (заводських труб та ін.) необхідно підставляти після емісії їх ефективні координати [8–11].

### 1.5 Модель турбулентності Колмогорова

При розповсюдженні світла в атмосфері спотворення відбуваються внаслідок малих флуктуацій показника заломлення повітря. Для хвиль оптичного діапазону головну роль в варіаціях показника заломлення виконують малі варіації температури (0,1... 1°C), викликані в свою чергу турбулентним перемішуванням повітря, вітром і конвекцією [4].

Турбулентність є випадковим процесом, тому описується статистично. Найбільш відомою є модель турбулентності А. М. Колмогорова. Згідно з цією моделлю статистичні властивості різниці швидкостей потоків у двох точках простору залежать тільки від вектора розносу цих точок, причому істотне значення має тільки модуль цього вектора, тобто відстань між точками незалежно від напрямку. А.М. Колмогоров вважав поле дрібномасштабних неоднорідностей атмосфери однорідним та ізотропним (локально-однорідна і локально-ізотропна турбулентність). У загальному випадку кореляційна функція для локально-однорідних полів може не існувати – так, зокрема, відбувається для колмогорівської моделі.

Структурна функція для атмосферної турбулентності підкоряється закону Колмогорова-Обухова:

$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3}, \quad (1.18)$$

де  $r$  – радіус-вектор точки в просторі.

Стала  $C_n^2$  називається структурною сталою флуктуації показника заломлення і характеризує «силу» турбулентності. Ця стала залежить від метеоумов і визначається експериментально. Для тропосфери (приземного шару)  $C_n^2$  змінюється від  $5 \cdot 10^{-14}$  до  $10^{-17}$  ( $\text{м}^{-2/3}$ ).

Таким чином, одним із джерел спотворень є атмосферна турбулентність. Але не тільки.

Будь-яка оптична система, що формує зображення або світловий промінь, містить оптичні елементи – лінзи, плоскі поворотні дзеркала або дзеркала телескопів, напівпрозорі дзеркала, призми і т. д. Виготовити такі елементи точно відповідно до розрахунків важко – завжди є похибки виготовлення. Наприклад, допустима «хвилястість» дзеркала телескопа не повинна перевищувати  $1/20$  –  $1/100$  довжини хвилі випромінювання (висота нерівності –  $0,01$  мкм), інакше промені у фокусі не складуться належним чином. До речі, цим відрізняється дзеркало в оптичному приладі, скажімо, від дзеркала для гоління. Навіть якщо намагатися виключити ці похибки, тобто виготовити оптичні елементи з такою точністю, щоб сумарна похибка давала максимально малий внесок в спотворення, залишиться проблема деформацій цих елементів внаслідок можливої зміни температури навколишнього середовища, положення самого елемента відносно вектора сили тяжіння, прискорення, вібрацій і т. п. Нарешті, якщо звести до мінімуму і ці похибки, фізично неможливо виключити взаємодію елементів із самим світлом. Щоправда, останній чинник довелося взяти до уваги порівняно недавно, у зв'язку з появою сучасних джерел, що мають достатню світлову енергію для того, щоб мала частина випромінювання, котра поглинається елементом (таке поглинання завжди має місце навіть для самих кращих дзеркал), призводила до термічних деформацій елемента [4].

Розробники сучасних систем зустрілись із новим явищем – впливом світла на показник заломлення повітря. В сильному світловому полі відбувається нагрівання повітряного каналу розповсюдження за рахунок

## ГЛОСАРІЙ

**Адаптивна антена** (*adaptive aerial*) (від лат. *adapto* – пристосовую, приладжую) – різновид антени з обробкою сигналів, призначена для максимізації відношення сигнал/шум.

**Адаптивне дзеркало** (*adaptive mirror*) – це виконавчий пристрій адаптивної оптичної системи, що має відбивальну поверхню з деформувальним профілем і задовольняє за амплітудою деформації, числом ступенів свободи і смугою пропускання частот керувального сигналу вимоги, що забезпечують задану ефективність компенсації фазових збурень оптичного випромінювання.

**Адаптивна оптика** (*adaptive optics*) – це оптика, яка адаптується до спотворень хвильового фронту, що виникають та змінюються випадково в процесі функціонування оптичної системи.

**Адаптивна оптика в астрономії** (*adaptive optics in astronomy*) – автоматична оптико-механічна система, призначена для виправлення в реальному часі атмосферних спотворень зображення, яке дає телескоп.

**Атмосферні завади** (*atmospherics*). Ті промені світла, що йдуть від космічних джерел, проходячи крізь неоднорідну атмосферу Землі і зазнають сильних спотворень. Наприклад, хвильовий фронт світла, що приходить від далекої зірки (яку можна вважати нескінченно віддаленою точкою), на зовнішній межі атмосфери має ідеально плоску форму. Але пройшовши крізь турбулентність повітряної оболонки і досяг поверхні Землі, плоский хвильовий фронт втрачає свою форму і стає схожий на хвилю морської поверхні. Це призводить до того, що зображення зірки перетворюється з «точки» в неперервно тремтячу і бурхливу пляму. При спостереженні неозброєним оком ми сприймаємо це як швидке миготіння і тремтіння зірок. При спостереженні в телескоп замість «точкової» зірки ми бачимо тремтячу пляму, що переливається; зображення близьких одна до одної зірок зливаються і стають окремо нечіткими; протяжні об'єкти – Місяць і Сонце, планети, туманності і галактики – втрачають різкість, у них зникають дрібні деталі.

**Біморфний спосіб деформації поверхні** (*bimorfical way of deformation of a surface*) є високотехнологічним, дозволяє забезпечити широкий спектр можливостей.

**Видошукач** (*view-finder*) – це невеликий, слабкий, широкообзорний телескоп, зазвичай має внутрішній приціл для полегшення позиціонування об'єктів.

**Випрямні призми** (*straightening prisms*). Астрономічні телескопи отримують зображення перевернутим зі зміненими правою і лівою сторонами. Це не має особливого значення для дослідження астрономічних світил, але для спостереження наземних об'єктів правильне їхнє положення було б досить бажаним. Випрямні лінзи телескопів дозволяють скоректувати орієнтацію об'єктів і спостерігати їх під зручним кутом в 45°.

**Висотно-азимутальні опори** (*high-risely - azimuthal supports*). Це найпростіший тип установки телескопа, при якому прилад може повертатися вгору-вниз (у вертикальному, або "висотному" напрямку) і вліво-вправо (в горизонтальному або "азимутальному" напрямку).

**Галактики** (*galaxys*) – це гігантські віддалені "острови Всесвіту", кожен з яких складається з мільярдів зірок. Галактики мають різні розміри і форми. Вони бувають трьох основних типів: еліптичні, спіральні і неправильні.

**Гартманограма** (*hartmanogram*) – картина зсуву парціальних пучків.

**Деформувальні дзеркала** (*deforming mirrors*) дозволяють користувачу здійснювати контроль за формою хвильового фронту оптичного випромінювання і компенсувати її перекручування в різних оптичних системах і приладах.

**Дзеркала із суцільною поверхнею** (*mirrors with a continuous surface*) – під впливом спеціальних приводів зазнають складних деформацій.

**Дзеркально-лінзові (катадіоптричні) телескопи** (*mirror-lens telescopes*) використовують як лінзи, так і дзеркала, за рахунок чого їх

оптичний пристрій дозволяє досягти чудової якості зображення з високою роздільною здатністю, при тому, що вся конструкція складається з дуже коротких портативних оптичних труб.

**Діагональні дзеркала** (*diagonal mirrors*). Якщо спосередований об'єкт знаходиться практично над головою дослідника, то діагональне дзеркало (в деяких випадках діагональна призма) заломлювального або дзеркально-лінзового телескопа дозволяє зайняти зручне для спостережень положення. Воно відхиляє світло під прямим кутом до головної труби приладу.

**Екваторіальні опори** (*equatorial supports*) – цей тип установки характерний для більшості великих або найбільш складних телескопів. Вирівнюючи одну вісь такої опори за віссю обертання Землі (простий процес, що полягає в направленні однієї з осей телескопа на Полярну Зірку), спостерігач може відслідковувати астрономічні об'єкти, повертаючи лише один контрольний кабель, у таких випадках потребують двох одночасних рухів (висотно-азимутальні опори).

**Електромагнітне поле** (*electromagnetic field*) – це фізичне поле, подане як сукупність електричних і магнітних полів, які можуть за певних умов породжувати одне одне.

У сучасному формулюванні електромагнітне поле подане тензором електромагнітного поля, компонентами якого є три компоненти напруженості електричного поля й три компоненти напруженості магнітного поля (або магнітної індукції), а також чотиривимірним електромагнітним потенціалом.

**Електромагнітні хвилі** (*hertzian waves*) – поперечні хвилі, у яких векторна напруженість електричного й магнітного полів коливається перпендикулярно до напрямку поширення хвилі.

**Зоряні скупчення** (*star congestions*) – поділяються на два основних види. По-перше, це розсіяні зоряні скупчення – дрібні і великі групи зірок невизначеної форми, як правило, без помітної концентрації до центру. По-друге, це кульові зоряні скупчення – щільні зіркові "кулі", що налічують мільйони світил.

**Інтерферометрія** (*interferometry*) – один з найбільш розроблених



напрямків прикладної оптики. Інтерференційна картина, що отримується у результаті додавання двох пучків, дає можливість аналізувати розташування світлих і темних смуг, що утворюються при додаванні променів відповідно у фазі і проти фази, та визначати фазовий розподіл пучка.

**Когерентність** (*cogeneration*) (від латинського *cohaerentia* – зв'язок) – властивість збереження фазових співвідношень між точками простору.

**Комети** (*comets*) – видно як туманні плями, іноді зі світлим хвостом (а часом і відразу декількома хвостами), спрямованим від Сонця.

**Лінза Барлоу** (*lens of Barlow*). Вона знаходиться перед окулярами й збільшує загальну фокусну відстань телескопа.

**Монохроматичне джерело** (*monochromatic source*) – джерело, в якому довжина хвилі випромінювання або частота світлових коливань фіксована.

**Обернення хвильового фронту** (*returning of wave front*) – самостійна концепція керування фазою оптичного випромінювання, що базується на нелінійних ефектах впливу світла на речовину.

**Окуляр** (*eyepiece*) – складається з двох чи більше маленьких лінз, що закріплені в металевому циліндрі, і призначений для збільшення зображення у фокусі телескопа.

**Опори телескопів** (*support of telescopes*). Коли об'єкт, земний або небесний, визначений і відцентрований в полі зору телескопа, його опора дозволяє спостерігачеві "йти" за об'єктом при його русі по поверхні або в небі.

**Пасивний метод боротьби з атмосферними спотвореннями** (*passive method of the struggle with atmospheric*) полягає в тому, що обсерваторії будують на вершинах гір, зазвичай на висоті 2-3 км, вибираючи при цьому місця з найбільш прозорою і спокійною атмосферою. Але будувати обсерваторії і працювати на висоті більше 4,5 км практично неможливо. Тому навіть на найкращих високогірних обсерваторіях більша частина

атмосфери розташовується все-таки вище телескопа і суттєво псує зображення.

**Піроелектричні приймачі** (*pyroelectrical receivers*) – приймачі, які працюють у широкій області оптичного діапазону при реєстрації модульованого чи імпульсного випромінювання і не потребують систем охолодження.

**Повітряна яма** (*air hole*) – входження в зону високої турбулентності в цивільній авіації.

**Подвійні (кратні) зірки** (*double stars*) – пари або групи зірок, обертаються навколо загального центра мас (фізичні подвійні) або випадково проектується на одну і ту ж область неба (оптичні подвійні). Деякі з подвійних зірок мають приголомшливі контрастні кольори.

**Радіальні ґратки** (*radial lattices*) (ґратки Ронкі) – виконані з круглих пластин, в яких чергуються прозорі і непрозорі сектори.

**Рефлектори** (*reflectors*) – відбивальні телескопи, в яких для збирання світла та формування зображення використовується ввігнуте головне дзеркало. В рефлекторах ньютонівського типу маленьке плоске вторинне дзеркало відбиває світло на стінку головної труби.

**Рефрактори** (*refractors*) – заломлювальні телескопи, які як головний світлозбиральний елемент використовують велику лінзу – об'єktiv. Рефрактори всіх моделей і апертур містять ахроматичні (двоелементні) об'єktivні лінзи – таким чином скорочується чи практично усувається помилковий колір (хроматична аберація), який впливає на одержуваний образ, коли світло проходить через лінзу.

**Роздільна здатність** (*resolution*) – означає, як багато деталей можна побачити через даний телескоп.

**Роздільна сила** (*resolving force*) – здатність телескопа подати дві суміжні зірки не як одне частково перекрите зображення, а як два окремих і дуже чітких.

**Самофокусувальна антенна ґратка** (*focused antenna lattice*). У режимі прийому вона обробляє прийняту хвилю з будь-яким фазовим фронтом

так, що сигнали від всіх елементів додаються синфазно. Завдяки цьому при ізотропних зовнішніх шумах забезпечується максимум відношення сигнал/шум на виході адаптивної антени.

**Секціоновані дзеркала** (*section mirrors*) – дзеркала, в яких кожна окрема секція допускає її переміщення і нахил (чи тільки переміщення).

**Сенсори хвильового фронту** (*sensors of wave front*) – є одними з головних елементів адаптивної оптичної системи, адже за складністю структури та принципом дії вони не поступаються іншим елементам адаптивних оптичних систем, наприклад, таким як адаптивні дзеркала.

**Системи адаптивної оптики** (*systems of adaptive optics*) застосовуються в оптичних та інфрачервоних телескопах наземного базування для підвищення чіткості зображення. Вони необхідні також для роботи астрономічних інтерферометрів, що використовуються для вимірювання розмірів зірок і пошуку їх близьких супутників, особливо планет.

**Суцільні деформувальні дзеркала** (*continuous deforming mirrors*) – це дзеркала, що складаються з деформувальної відбивальної пластини і дискретних приводів, що діють по нормалі до поверхні і розміщені між цією пластиною й опорою.

**Телескоп** (*telescope*) – прилад, який збирає електромагнітне випромінювання з випромінюючого об'єкта і направляє його у фокус, де утворюється збільшене зображення об'єкта або формується посилений сигнал.

**Туманності** (*fog*) – ці об'єкти також поділяються на два великих типи: планетарні туманності, які спостерігаються у вигляді маленьких округлих хмарин, що залишаються після смерті зірки, і дифузні туманності, які не мають певної форми і складаються з пилу і газу.

**Турбулентність** (*turbulence*) (від лат. *turbulentus* – бурний, хаотичний) – фізичне явище, що характеризується нерегулярним взаємним переміщенням об'ємів середовища (рідини чи газу) та їх взаємним

перемішуванням, що супроводжується хаотичними змінами газодинамічних параметрів в просорі й часі.

**Турбулентний потік** (*turbulent stream*) – явище, яке полягає в тому, що при збільшенні інтенсивності потоку рідини чи газу в середовищі довільно створюються багаточисельні фрактальні чи звичайні хвилі, різних лінійних розмірів, без наявності зовнішніх, випадкових, збурюючих середовище сил і/або при їх присутності.

**Хвильовий фронт** (*wave front*) – гіпотетична поверхня, для якої виконується умова постійності фази коливань  $S(\rho) = const$ .

**Цифровий п'єзопривод** (*digital pyezodrive*) – створює дискретне переміщення. З одного боку, цифровий п'єзопривод спрощує електронну схему керування, а з іншого боку – сполучається з цифровою апаратурою.

**Штучна зірка** (*artificial star*) – опорна зірка, що використовується для швидкого аналізу зображення в системі адаптивної оптики. Іншими словами, це – маленька яскрава пляма, постійно присутня у полі зору телескопа. Для її створення застосовується лазер безперервної дії з вихідною потужністю в декілька ват, налаштований на частоту резонансної лінії натрію. Його промінь фокусується в атмосфері на висоті близько 90 км, там, де є природний шар повітря, збагачений натрієм, світіння якого збуджується лазерним променем. Фізичний розмір світимої області складає близько 1 м, що з відстані в 100 км сприймається як об'єкт з кутовим діаметром близько 1.

## Література

1. Дмитриев В. Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта / Дмитриев В. Г. – М. : Физматлит, 2000. – 256 с.
2. Воронцов М. А. Принципы адаптивной оптики / М. А. Воронцов, В. И. Шмальгаузен. – М. : Наука, 1985. – 336 с.
3. Витриченко Э. А. Адаптивная оптика / Витриченко Э. А.; [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1980. – 456 с.
4. Тараненко В. Г. Адаптивная оптика / В. Г. Тараненко, О. И. Шанин. – М. : Радио и связь, 1990. – 105 с.
5. Матвеев И. Н. Адаптация в информационно-оптических системах / И. Н. Матвеев, А. И. Сафронов. – М. : Радио и связь, 1984. – 342 с.
6. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика / Лукин В. П. – Новосибирск : Наука, 1986. – 248 с.
7. Самарский А. А. Вычислительный эксперимент / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. – М. : Знание, 1983. – 64 с.
8. Ахманов С. А. Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде / Ахманов С. А., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В. – УФН, 1967. – Т. 93. – С. 19.
9. Виноградова М. В. Теория волн / Виноградова М. В., Руденко О. В., Сухоруков А. П. – М. : Наука, 1979. – 384 с.
10. Волковицкий О. А. Распространение интенсивного лазерного излучения в облаках / Волковицкий О. А., Седунов Ю. С., Семенов Л. П. – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 312 с.
11. Карамзин Ю. Н. Нелинейная адаптивная оптика / Ю. Н. Карамзин, А. П. Сухоруков // Изв. АН СССР, сер. физ. – 1978. – Т. 42, № 12. – С. 2547 – 2559.
12. Карамзин Ю. Н. Адаптивные системы автофокусировки оптического излучения в нелинейных средах / Ю. Н. Карамзин, А. П. Сухоруков, В. А. Трофимов // Изв. АН СССР, сер. физ. – 1984. – Т. 11, № 4. – С. 663 – 670.
13. Воронцов М. А. Принципы адаптивной оптики / М. А. Воронцов, В. И. Шмальгаузен. – М. : Наука, 1985. – 336 с.
14. Сухоруков А. П. Оптимальное управление лазерными пучками в нелинейных средах / А. П. Сухоруков, В. А. Трофимов // Изв. АН СССР, сер. физ. – 1982. – Т. 46, № 10. – С. 1993 – 1998.

15. Справочник по инфракрасной технике : в 4 т. / [ред. Вольф У., Цисис Г.]. – М. : Мир, 1995. – Т. 1: физика ИК-излучения : пер. с англ. – 1995. – 606 с.
16. Единицы физических величин : ГОСТ 8.4117-81 ГСИ. – [Установлен от 1982-01-01]. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 18 с. – (Государственный стандарт союза ССР).
17. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц / Бурдун Г. Д.; 3-е изд. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 232 с.
18. Мешков В. В. Основы светотехники излучения в электронике / Мешков В. В. – М. : Энергия, 1975. – 248 с.
19. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел / Брамсон М. А. – М. : Наука, 1964. – 318 с.
20. Авегисов Э. С. Оптическая коррекция зрения / Э. С. Авегисов, Ю. З. Розенблюм. – М. : Медицина, 1981. – 200 с.
21. Межслойная рефракционная кератопластика при афакии, дальнозоркости и близорукости / В. С. Беляев, В. В. Веретенникова, Н. В. Душиц, В. М. Луэнго // Вестник офтальмологии. – 1980. – № 5. – С. 28 – 35.
22. Ватченко А. А. Спазм аккомодации и близорукость / Ватченко А. А. – Киев : Здоровье, 1977. – 120 с.
23. Сергиенко Н. М. Офтальмологическая оптика / Сергиенко Н. М. – М. : Медицина, 1991. – 144 с.
24. Тамарова Р. М. Оптические приборы для исследования глаза / Тамарова Р. М. – М. : Медицина, 1982. – 176 с.
25. Урмахер Л. С. Офтальмологические приборы / Урмахер Л. С. – М. : Медицина, 1988. – 288 с.
26. Фридман Ф. Е. Ультразвук в офтальмологии / Фридман Ф. Е., Гундорова Р. А., Кодзов М. Б. – М. : Медицина, 1989. – 256 с.
27. Дроздов А. А. Особенности учета параметров при конструировании оптических систем для слабовидящих / А. А. Дроздов, А. В. Разбродин // Электронно-оптическая и физико-оптическая аппаратура. Разработка и применение. – М. : Медицина, 1989. – С. 23 – 24.
28. Кругер М. Я. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Кругер М. Я. – Л. : Машиностроение, 1968. – 760 с.
29. Сенякина А. С. Влияние спазма аккомодации и его лечения на развитие приобретенной осевой миопии / А. С. Сенякина // Офтальмологический журнал. – 1981. – № 8. – С. 449 – 454.

30. Сергиенко Н. М. К измерению оптической силы интраокулярных линз / Н. М. Сергиенко // Офтальмологический журнал. – 1980. – № 4. – С. 241 – 242.
31. Сергиенко Н. М. Офтальмотонус и гониоскопическая картина при прогрессирующей близорукости / Н. М. Сергиенко, Ю. Н. Кондратенко // Вестник офтальмологии. – 1986. – № 6. – С. 20 – 23.
32. Трон Е. Ж. Изменчивость элементов оптического аппарата глаза и ее значение для клиники / Трон Е. Ж. – Л. : Изд-во воен.-мед. акад., 1947. – 271 с.
33. Урмахер Л. С. Очковая оптика / Л. С. Урмахер, Л. И. Айзенштат. – М. : Медицина, 1982. – 192 с.
34. Аветисов Э. С. Вопросы офтальмологии в кибернетическом освещении / Э. С. Аветисов, Ю. З. Розенблюм. – М. : Медицина, 1974. – 224 с.
35. Алексеев Б. Н. Усовершенствованный гониоскоп [в кн. : Проблемы офтальмологии]. / Алексеев Б. Н. – Киев, 1976. – С. 86 – 87.
36. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 720 с.
37. Волков В. В. Клиническое исследование глаза с помощью приборов / Волков В. В., Горбань А. И. Джалиашвили О. А. – Л. : Медицина, 1971. – 328 с.
38. Волков В. В. Клиническая визо- и рефрактометрия / Волков В. В., Горбань А. И. Джалиашвили О. А. – Л. : Медицина, 1976. – 215 с.
39. Глазные болезни : учебник / [под ред. Т. И. Ерошевского, А. А. Бочкаревой]. – М. : Медицина, 1977. – 448 с.
40. Калитеевский Н. И. Волновая оптика / Калитеевский Н. И. – М. : Высшая школа, 1978. – 383 с.
41. Шустов Б. М. Большие оптические телескопы будущего / Б. М. Шустов // ЗиВ. – 2004. – № 2. – С. 7 – 11.
42. Попов В. Д. Применение деформируемых зеркал в лазерных технологических комплексах [Электронный ресурс] / В. Д. Попов, С. Ю. Сухоросов. – Режим доступа:  
<http://pvd2.narod.ru/publ/report.htm>.
43. Космический телескоп GALEX – новое окно во Вселенную: электронный ресурс / [пер. А. Козловский]. – Режим доступа:  
<http://www.astrogalaxy.ru/258.html>.

44. Свечников С. В. Квазиимпульсные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа / Свечников С. В., Кожемяко В. П., Тимченко Л. И. – К. : Наукова думка, 1987. – 253 с.
45. Степанов М. В. Оптические нейрокомпьютеры: современное состояние и перспективы / М. В. Степанов // Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники. Нейрокомпьютеры и их применение (тематический выпуск). – М. : ИПРЖР. – 1997, № 2.
46. Свечников С. В. Нейротехнические системы обработки информации / С. В. Свечников, Л. М. Шквар. – К. : Наукова думка, 1983. – 224 с.
47. Функциональная оптоэлектроника : [учебное пособие] / В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко, Ю. Ф. Кутаев, Г. Л. Лысенко. / – К. : Вища школа, 1990.
48. Свечников С. В. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа / Свечников С. В., Кожемяко В. П., Тимченко Л. И. – Киев : Наукова думка, 1987. – 214 с.
49. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики (перцептрон и теория механизмов мозга) / Розенблатт Ф. – М. : Мир, 1965. – 480 с.
50. Васильев В. И. Распознающие системы. Справочник / Васильев В. И. – К. : Наукова думка, 1983. – 422 с.
51. Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического регулирования / Ивахненко А. Г. – К. : Техніка, 1969. – 349 с.
52. Kirby M. Application of the Karhunen-Loeve Procedure for the Characterization of Human Faces / M. Kirby and L. Sirovich // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. – Vol. PAMI-12, 1990.
53. Method and Models of Biosignal Volume Treatment / V. Kozhemyako, L. Timchenko, S. Chepornyuk, Y. Kutaev, S. Pavlov, A. Gertsy, V. Kuchko // In Proc. Seventh National Conference on Biomedical Physics and Engineering with International Participation, Sofia. – Bulgarian, 17-19 October 1996, PP. 252 – 255.
54. Ковалевский Е. И. Детская офтальмология / Ковалевский Е. И. – М. : Медицина, 1970.
55. Леушина Л. И. Зрительное пространственное восприятие / Леушина Л. И. – Л. : Наука, 1978. – 175 с.
56. Med-technical doublets of dynamic eye-processir image processing / I. Saldan, S. Zabrodskaya, Y. Saldan, I. Myslovsky // Збірник Міжнародної



- конференції з оптоелектронних інформаційних технологій “Photonics-ODS 2000”. – Vinnica (Ukraine). – 2000. – Р. 88.
57. Вступ в алгоритмічну теорію ієрархії і паралелізму нейроподібних обчислювальних середовищ та її застосування до перетворення зображень. Основи теорії пірамідально-сітьового перетворення зображень / [Кожем'яко В. П., Тимченко Л. І., Кутаєв Ю. Ф., Івасюк І. Д.]. – К. : УМК ВО, 1994. – 272 с.
  58. Лазерні методи діагностики стану серцево-судинної системи / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, П. Ф. Колісник [та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998 р. – № 2, С. 139 – 144.
  59. Kozhemiako V. Optoelectronic Device for the Express – Diagnosis of the Disturbances of the Microcirculation in the Affected Vertebra-Motive Segments / Kozhemiako V., Pavlov S., Cheporniuk S. // Proceedings of the 7th International IMECO TC-13 Conference ”Model Based Biomeasurements”. – St. Lesna, Slovak Republic. – 1995. – PP. 145 – 146.
  60. Optoelectronic Method of the Effected Vertebra-Motive Segments Definition for Osteochondrosis Diagnosis / [V. Kozhemiako, S. Pavlov, S. Markov, S. Cheporniuk] // Proceedings of the 13th Biennial International Conference “Analysis of Biomedical Signals and Image”. – Brno, Czech Republic. – PP. 305 – 307.
  61. Kozhemiako V. Method of Estimation of Conditions of the Cardio-Vascular Systems in Accordance with the Significance of Microcirculation of the Eye Conjunctiva / V. Kozhemiako, S. Pavlov // Proceedings of the 7-th International Conference "Medical Engineering and Physics". – Sofia, Bulgaria. – 1996. – PP. 252 – 255.
  62. Альтшулер В. М. Изменения оптических свойств плазмы крови под воздействием монохроматического света / В. М. Альтшулер, Ю. М. Миронов, Я. И. Ханин // Квантовая электроника. – 1992. – Т. 19. – № 3. – С. 309 – 311.
  63. Оптические методы изучения воздействия лазерного излучения на эритроциты крови человека. / А. Н. Кролевич и др. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1992. – Том 5. – № 1 – 2. – С. 152 – 156.
  64. О молекулярном механизме терапевтического действия, НИЛИ видимого спектрального диапазона / В. А. Мостовников и др. – Известия АН СССР, сер. физ. – 1990. – Т. 54, № 8. – С. 1636 – 1641.

65. Плетнёв С. Д. Влияние низкоэнергетического лазерного излучения на нормальную кожу и некоторые опухолевые ткани. / С. Д. Плетнёв, О. М. Карпенко. – Изв. АН СССР. Сер. Биолог. – 1985. – № 1. – С. 134 – 137.
66. Исследование поглощения излучения гелий-неонового лазера тканями живого организма. / И. Б. Лапрун и др. // Здоровье. – 1977. – № 4. – С. 28 – 30.
67. N. Sugimoto and A. Minato, "Optical characteristics of the retroreflector in space for the Advanced Earth Observing Satellite," *Opt Rev.* – 1996. – № 3(2). – PP. 62 – 64.
68. N. Sugimoto and A. Minato, "Data reduction method for the laser long-path absorption measurement of atmospheric trace species using the retroreflector in space," *IEICE Trans. Commun.* – 1995. – E78-B 12y, PP. 1585 – 1590.
69. ГОСТ 8.4117-81 ГСИ. Единицы физических величин.
70. Мешков В. В. Основы светотехники излучения в электронике / В. В. Мешков. – М. : Энергия, 1975. – 248 с.
71. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. / М. А. Брамсон. – М. : Наука, 1964. – 318 с.
72. Minato A. Optical design of cube corner retroreflectors having curved mirror surfaces / N. Sugimoto, and Y. Sasano // *Appl. Opt.* – 1992. – 31. – PP. 6016 – 6020.
73. Plan for the experiment with the retroreflector in space (RIS) on ADEOS / [N. Sugimoto, A. Minato, I. Matsui, Y. Sasano, T. Itabe, T. Aoki, M Takabe, N. Hiromoto and H. Kunimori] // *Proc. SPIE 2583.* – 1995. – PP. 217 – 227.
74. Time-gated gain cell for frequency-stable, single-longitudinal-mode operation of a transverse, electric, atmospheric CO<sub>2</sub> laser / [R. J. Nordstrom, L. J. Berg, A. F. DeSimone, and N. Sugimoto] // *Rev. Sci. – Instrum.* – № 64(6). – 1993. – PP. 1663 – 1664.
75. Single-longitudinal-mode operation of a TEA CO<sub>2</sub> laser using a\* time-gated gain cell / [R. J. Nordstrom, L. J. Berg, A. F. DeSimone, and N. Sugimoto] *Rev. Laser Eng.* – № 22(2). – 1993. – PP. 132 – 139.
76. Bradley L. C. Absolute frequencies of lasing transitions in nine CO<sub>2</sub> isotopic species / L. C. Bradley, K. L. Soohoo, and C. Freed // *IEEE J. Quantum Electron.* QE-22. – 1986. – PP. 234 – 267.

*Навчальне видання*

**Васюра Анатолій Степанович  
Павлов Сергій Володимирович  
Прокопова Марія Олександрівна  
Тужанський Станіслав Євгенович  
Козловська Тетяна Іванівна**

## **АДАПТИВНА ОПТИКА**

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено Т. Козловською

Підписано до друку 06.10.2015 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 18,3.  
Наклад 300 (1-й запуск 1-100) пр. Зам. № 2015-099.

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.