

В. П. Кожем'яко
В. С. Гаркушевський
В. Г. Петрук

ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИСТРОЇ



В.П.Кожем'яко, В.С.Гаркушевський, В.Г.Петрук

ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИСТРОЇ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальності 7.091101 - "Лазерна та оптоелектронна техніка". Протокол № 9 від 28 квітня 2005 р.

УДК 621.3

О 91

Рецензенти:

В.С. Осадчук, доктор технічних наук, професор
С.М. Довгалець, кандидат технічних наук, доцент
В.Ф. Яремчук, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Робота виконана за сприяння Державного фонду фундаментальних досліджень

Кожем'яко В.П., Гаркушевський В.С., Петрук В.Г.

О 91 Оптикоелектронні системи та пристрої. Навчальний посібник.—
Вінниця: ВНТУ, 2005. — 100 с.

В навчальному посібнику подані основні напрямки створення оптикоелектронних систем перетворення інформації, методи і пристрої оптичної обробки зображень, а також теоретичні основи побудови високоефективних логіко-часових структур і класифікація оптикоелектронних обчислювальних систем.

Розрахована на студентів оптикоелектронних, радіотехнічних та фізичних спеціальностей ВНЗ, а також магістрантів і аспірантів, які займаються експериментальними дослідженнями в галузі оптичних систем, лазерної та оптикоелектронної техніки.

УДК 621.3

ЗМІСТ

Вступ	5
Розділ 1. Основні напрямки створення оптоелектронних систем перетворення інформації	6
1.1. Класифікація оптоелектронних інформаційно-обчислювальних систем.....	6
1.2. Матрична обробка оптичних зображень.....	10
1.3. Елементна база сучасної оптоелектроніки.....	16
1.4. Електронно-оптичні перетворювачі, їх характеристики і застосування.....	18
1.5. Рідинно-кристалічні індикатори, їх характеристики і застосування.....	23
1.6. Рідинно-кристалічні керуючі транспаранти, їх використання.....	26
Розділ 2. Методи і пристрої оптичної обробки зображень	27
2.1. Розмножувачі світлового зображення, їх основні оптичні характеристики.....	28
2.2. Пристрій обробки оптичної інформації на основі світло-ділильних призм.....	34
2.3. Пристрій обробки оптичної інформації з використанням зворотного зв'язку.....	36
2.4. Світлотехнічний розрахунок втрат в пристроях обробки інформації.....	39
2.5. Електрооптичні модулятори, їх характеристики і застосування.....	41
2.6. Акустооптичні модулятори, їх використання.....	44
2.7. Система обробки та запису оптичної інформації.....	49
Розділ 3. Методи кореляційного аналізу	51
3.1. Застосування кореляційного аналізу для розпізнавання образів.....	52
3.2. Прийняття рішень при розпізнаванні образів.....	53
3.3. Аналогові оптичні аналізатори.....	55
Розділ 4. Оптична обробка інформації	56
4.1. Математичні операції в оптичній обробці інформації.....	56
4.2. Оптичний Фур'є-аналізатор.....	60
4.3. Оптичний дифракційний корелятор.....	62

Розділ 5. Оптичні пристрої некогерентного кореляційного аналізу.....	66
5.1. Пристрої обробки світлових полів.....	66
5.2. Пристрої когерентного додавання зображень.....	70
Розділ 6. Обробка образів в реальному часі інваріантних масштабу і повороту.....	73
6.1. Загальна характеристика проблеми розпізнавання об'єктів і явищ.....	74
6.2. Теоретичні основи перетворення оптичного сигналу в зорові образи.....	75
6.3. Телескопічна оптична система введення інформативних образів.....	87
6.4. Теорія панкратичної телескопічної системи.....	90
6.5. Габаритний розрахунок панкратичної системи із двох компонент.....	91

ВСТУП

З розвитком мікроелектроніки збільшилися можливості обчислювальних засобів в напрямку підвищення швидкодії, зменшення показників споживаної потужності та габаритів.

Разом з тим, традиційні структури ЕОМ (електронно-обчислювальних машин) і їх математичне забезпечення все в більшій мірі не задовольняють специфічні вимоги, які пред'являються до обробки інформаційних масивів. До складу таких вимог відносять: розпізнавання образів, цифрова фільтрація сигналів тощо.

З кожним днем все більше розширюються протиріччя, які знаходяться в основі побудови ЕОМ, а саме: невідповідність між продуктивністю процесорної частини і пристроями введення (виведення); двійковим поданням інформації і її фізичним станом, що підлягає обробці послідовним характером обчислень і необхідністю паралельного (одночасного) перетворення.

Стимулювання розробки нових принципів організації структур і обчислювальних процесів визначається, в першу чергу, появою нових елементних баз і каналів передачі інформації. Це мова йде про такі елементні бази, які ґрунтуються на застосуванні оптичних, оптоелектронних, поверхнево-активно-хвильових, топографічних структур, волоконно-оптичних каналів передачі інформації тощо.

Розділ 1. ОСНОВНІ НАПРЯМКИ СТВОРЕННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

До недавнього часу існувала думка про обмеженість застосування оптоелектронних елементів, а про те щоб вони виконували обчислювальні функції, питання не ставилось.

Проте роботи останнього десятиріччя поклали теоретичний і експериментальний фундамент для висунення оптоелектронних елементів і структур в якості конкурентноспроможних засобів в порівнянні із традиційними. Якісно новим етапом, що базується на досягненнях останніх років, є розробка і дослідження нових структур функціональної організації і математичного забезпечення, яке веде до створення багатofункціональних оптоелектронних процесорів логіко-часового типу. Паралельно проводиться комплекс робіт із створення методів і технічних засобів перетворення, відображення інформації.

В якості теоретичної основи побудови високотовиробничих логіко-часових структур на базі оптоелектроніки пропонується принцип квантування часу світловим потоком, який несе в своєму часі існування інформації.

При цьому інформаційним параметром є часовий квант, інваріантний до елементарної бази, що принципово забезпечує максимальну швидкість дії логіко-часових середовищ. Фундаментальним в цьому підході є поняття структурної одиниці – квантрона, елемента, безвідносного до фізичної реалізації, основною функцією якого є квантування часу із певним кроком (дискретом).

1.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

В класифікації оптоелектронні інформаційно-обчислювальні системи розподілені за тим навантаженням, яке несуть в них оптоелектронні елементи і світлові пучки. В цій групі виділяється підгрупа інтегральної оптики, в якій оптоелектронні елементи служать для гальванічної розв'язки при створенні швидкодіючих інформаційних систем. Друга підгрупа – когерентні дискретні оптичні пристрої, які ґрунтуються на використанні ефектів гасіння генерації напівпровідникового лазера світлом другого лазера. При цьому досягається значна швидкість дії логічних та запам'ятовувальних елементів. Проте, складність керування променем лазера, великі габарити юстувальних пристроїв, їх чутливість до вібрацій, значна споживана потужність сучасних лазерів обмежують створення і масове використання когерентних оптичних обчислювальних машин.

Велику групу представляють аналогові системи, в яких головне – обробка оптичних зображень. В цих системах використовується когерентне оптичне випромінювання лазера. Крім обмежень, які вносять складність лазерної установки, практичне використання аналогових систем стримує-

ся тим, що в теперішній час ще не створені електричні та оптичні керуючі транспаранти з досконалими технічними характеристиками.

В окрему групу виділені системи оптичної пам'яті. Слід відзначити значні успіхи в створенні голографічних запам'ятовувальних пристроїв з великою густиною запису інформації (до 10^{12} біт/см²) і високою надійністю.

Своєрідну групу складають оптичні системи введення-виведення інформації із ЕОМ, швидкодія яких лежить в межах 10^8 - 10^9 біт/сек.

Існують пристрої, в яких через фотоматрицю з допомогою дефлектора або матриці лазерів вводяться із рухомого носія в пам'ять машини дані із швидкістю 10^7 біт/сек. Таким чином, оптичні системи введення-виведення мають суттєві переваги в порівнянні з механічними або електричними способами введення і відображення інформації.

Системи на основі волоконних пристроїв нейристорного типу виділені в окрему групу. Для створення аналогу нейростора використовується скловолокно, яке має мас області, що модулюють потік, який проходить по скловолокну. При цьому виникають значні труднощі, пов'язані із створенням ефективних мініатюрних модулаторів, однорідних за своїми оптичними властивостями з матеріалами скловолокна.

Успіхи оптоелектроніки дають можливість сформувати нову групу систем – оптронні системи з оптичним зв'язком. Відомо, що скловолоконний зв'язок використовується при передачі інформації між ЕОМ, її блоками і в середині блоків. Для функціонування таких систем вкрай важливі такі властивості оптичного зв'язку, як широкосмуговість, гальванічна розв'язка входу і виходу, однонаправленість, відсутність "коротких замикань", надійність, різке зменшення маси кабелів в порівнянні з мідними проводами (на порядок), незначна вартість і нечутливість до електромагнітних перешкод.

Оптрон має ряд позитивних якостей: простий, надійний, достатньо уніфікований в використанні, технологічний у виробництві, дає високу швидкість, не потребує додаткових елементів для індикації. В наш час швидкодія оптоелектронних елементів досягає порядку 10^9 – 10^{10} с.

Принципи реалізації спеціалізованих надшвидкодійних ЕОМ для обробки зображень базується на операції зсуву інформації "вправо", "вліво", "вверх", "вниз". Роботи із створення оптоелектронних логіко-часових середовищ (ЛЧС) направлені на виконання інтегральної схеми в єдиному технологічному циклі, в якому можлива обробка інформації в об'ємі твердого тіла.

Перспективою є реалізація принципу квантування часового інтервалу із наносекундною швидкістю, що визначається часом спрацювання оптоелектронної пари.

Одним із основних показників якості і ефективності засобів аналого-цифрового перетворювача (АЦП) є його здатність забезпечувати високу швидкість і достовірність інформації. При проектуванні АЦП на оптоелек-

тронних елементах, доцільним є розробка оцінювання швидкодії та достовірності в отриманні даних, згідно з якою можна судити про ефективність даного методу АЦ-перетворювача. В розрахунку швидкості перемикання електронних тригерів завжди враховується час передачі сигналу між елементами. Цей час, як правило, обмежується інерційністю електричних зв'язків за рахунок гальванічних, індукційних та інших фізичних явищ.

Існує багато методів АЦ-перетворення, які відносяться до трьох методів перетворення інформації:

- метод послідовної лічби, де часовий інтервал заповнюється архівним імпульсом і відраховується їх кількість;
- метод АЦ-перетворення підрозрядного кодування, в якому використовуються n еталонів різних величин для зрівноважування будь-якого значення вхідної величини;
- метод, для втілення якого необхідний набір із $(2n-1)$ еталонів, що відрізняються на один квант.

Як правило, всі АЦП побудовані на основі перерахованих методів, виконуються на електронних схемах і тому мають недостатню швидкість дії, обумовлену обмеженою швидкістю спрацювання електронних схем і елементів. Тому відомі АЦП не можуть вимірювати достатньо малі аналогові величини.

До складу недоліків електронних засобів і методів перетворення аналогової величини в дискретну можна віднести складну конструкцію, викликану багатоступеневістю перетворювача. Кожен АЦП для нормального функціонування, крім основних лічильників і вхідних блоків, ще має дешифратор і спеціальний індикаторний пристрій. Електронні перетворювачі здійснюють передачу інформації між елементами, вузлами і пристроями "електронним" методом через електричні канали зв'язку. Ця обставина відмічається як негативний фактор, що впливає на всі показники якості перетворення: заводозахищеність, надійність, швидкодію, конструктивну складність і інші, що не дозволяє створити АЦП в єдиному технологічному циклі.

Вказані недоліки електронних АЦП можуть бути усунені переходом до оптоелектронних засобів, в яких процес перетворення інформації здійснюється оптичними методами при правильному виборі елементної бази і методів перетворення.

Розроблені АЦП на основі використання оптоелектронних бістабільних елементів – квантронів. На основі встановлених і оптично пов'язаних квантронів реалізується багатофункціональний оптоелектронний модуль (БФОЕМ), який виконує всі функції: підсилення, запису, зсуву, перетворення, зберігання інформації з безпосередньою індикацією.

Введення квантронів в АЦП і задання кроку квантування їх часу спрацювання дає реальну можливість перетворення аналогової величини в дискретну виключно оптичним методом.

Розроблений метод АЦ-перетворення на оптоелектронних елементах вніс значні зміни в АЦ-вимірювання, що підтверджується основними показниками якості перетворення.

В останні роки все більше використовуються гібридні комбіновані обчислювальні перетворювачі, які суміщають операції як над дискретними, так і над аналоговими величинами.

Суміщення операцій реалізується на електронних схемах і пристроях, в яких наявність електричних з'єднань обмежує вільність організації зв'язків, супроводжується затримкою інформаційних даних. Тому, з метою покращення одних показників, доводиться миритися з компромісними рішеннями, в яких погіршуються інші показники.

Вихід із ситуації, що склалася, був знайдений в ідеї побудови універсальних оптоелектронних операційних перетворювачів, які без участі ЕОМ здійснюють перетворення і обробку як аналогової інформації оптичним методом, так і дискретної інформації, що потрапляє із об'єктів, які досліджуються з новими показниками якості в реальному масштабі часу. Результат перетворення і обчислення відображається безпосередньо за допомогою графічних і цифрових індикаторів, що є частиною оптоелектронних елементів, які можуть при необхідності перетворювати його в імпульсний сигнал. Основною операційною частиною таких комбінованих перетворювачів є БФОЕМ, що являє собою оптоелектронний реверсний лічильник, який здійснює зсув інформації у вигляді "маркера" вправо, вліво при подачі логічних сигналів "1" і "0" на відповідні входи.

Процес перетворення і обробки інформації в УОП (універсальний операційний перетворювач інформації) з однієї сторони розглядається як вимірювальний процес, оскільки має справу із аналоговими величинами, з другої сторони – як обчислювальний процес, оскільки відбувається додавання і віднімання інформації. Тому, для аналізу принципів функціонування УОП, необхідно суміщати апарати логічних схем вимірювальних і арифметичних пристроїв із адекватними математичними моделями. Тільки таке суміщення дає змогу побудувати абстрактну модель, яка описує не тільки результати, але й процес перетворення, обробки інформації. На базі процесора можлива організація інформаційно-вимірювального комплексу.

Суміщення функцій обчислювальних операцій і відображення в коірках дає змогу виконувати ефективну обробку відображення і розпізнавання образів. За допомогою процесора здійснюється досить просте керування переміщенням об'єктів в тривимірному просторі. Дві телекамери розташовані в площинах ZOX і ZOY здійснюють розкладання зображення на дві площини, які вводяться в дві групи решіток і індуються в двох зонах волографа. Потім здійснюється розрахунок пристоїв об'єкта по координатах X, Y, Z , - обробка переміщень. Одержана інформація використовується для повторного введення з координатами (X_i, Y_i, Z_i) після чого знову здійснюється розрахунок пристоїв об'єкта.

Досить актуальним завданням є обробка зображення. При цьому необхідно за короткі проміжки часу обробляти масиви великих розмірностей. Традиційні засоби не дають змоги розв'язати таке завдання в повному обсязі. Це пов'язано із проблемою введення та виведення інформації в ЕОМ і послідовними алгоритмами обробки кожної точки зображення. Очевидно, що такий шлях, не дивлячись на підвищення продуктивності універсальних ЕОМ, є принципово не прийнятним.

1.2. МАТРИЧНА ОБРОБКА ОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Перспективним напрямком є розвиток оптоелектронних засобів, зокрема, в області введення-виведення і перетворення інформації, які ґрунтуються на матричній обробці зображень. Це передбачає створення спеціалізованих оптоелектронних процесорів, які реалізують нові принципи обробки інформаційних масивів.

При обробці двовимірних зображень однією із найбільш складних задач є нормування зображення, тобто приведення у відповідність отриманого зображення складного об'єкта із необхідним координатним розташуванням, масштабуванням, попередньою фільтрацією. В подальшому передбачається, що зображення квантується в часі, потім дискретизується в площині множиною точок, які мають два рівні грацій – є світловий потік, – немає світлового потоку, або для простоти – 1 або 0. Іншими словами, розглядається множина матриць з елементами 1 і 0, з якими виконуються різні перетворення.

Під зміщенням зображення розуміють зміну всіх координат точок, зберігаючи лінійні розміри зображення, тобто для зміщення точки на Δx і Δy відносно центра маси $M(N_1 \times N_2)$ необхідно кожен елемент a_{ij} перемістити на місце $a(i \pm \Delta x, j \pm \Delta y)$, елемента. Позначимо операцію зміщення $S_m(\pm \Delta x, \pm \Delta y)$. При цьому можливі чотири варіанти виконання операції зміщення:

1. $S_m(+\Delta x, +\Delta y)$. 2. $S_m(+\Delta x, -\Delta y)$. 3. $S_m(-\Delta x, +\Delta y)$. 4. $S_m(-\Delta x, -\Delta y)$. На рис.1.1 показані приклади можливих варіантів зсувів.

Під масштабуванням розуміють збільшення (зменшення) зображення в Z_x, Z_y раз $Z=1, 2, 3, \dots$, тобто при збільшенні в Z разів кожен a_{ij} елемент матриці $M_2 [N'_1 \times N'_2]$, перетворюється в $Z_x \times Z_y$ елементів матриці $M_2 [N'_1 \times N'_2]$, а при зменшенні $Z_x \times Z_y$ елементів перетворюється в єдиний елемент a_{ij} . Позначається операція масштабування $S_n(\pm Z_x, \pm Z_y)$, де знак "+" відповідає збільшенню, а знак "-" – зменшенню зображення. При цьому можливі чотири варіанти виконання операції масштабування:

1. $S_n(+Z_x, +Z_y)$, 2. $S_n(+Z_x, -Z_y)$,
3. $S_n(-Z_x, +Z_y)$, 4. $S_n(-Z_x, -Z_y)$.

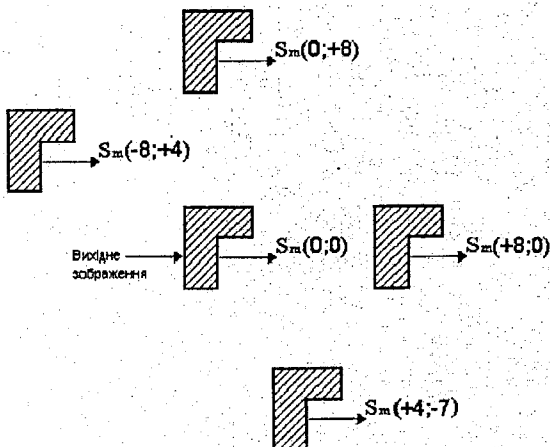


Рис.1.1. Зміщення зображення

На рис.1.2 показані приклади можливих варіантів масштабування.

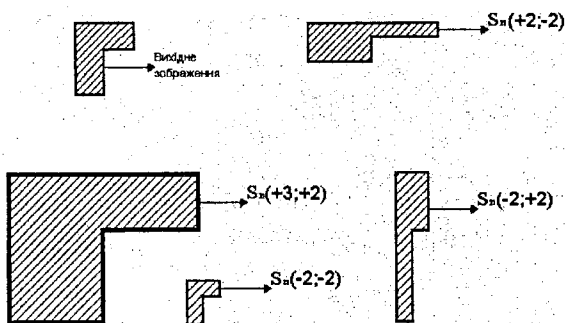


Рис.1.2. Масштабування зображення

Під поворотом зображення розуміють поворот навколо центра матриці a_{00} на деякий кут. Принциповим недоліком повороту є спотворення, пов'язані із дискретною структурою матричного поля. Єдиним видом повороту, що не вносить спотворень, є поворот кратний $\pi/2$. Операція повороту позначається $S_z(\pm\varphi)$, де $\varphi=1, 2, \dots, n$ тобто є дискретним кутом. Розглянемо це поняття більш конкретно.

Виконаємо розрідження в K раз, $K=2, 3, \dots, n$ тобто $F(a_{ij})$ перетворимо $F(a_{k-i, k-j})$, при цьому розміри матричного поля будуть збільшені $kN'_1 \times kN'_2$.

Побудуємо всі можливі прямокутники від початкової координати a_{00} із сторонами X і Y такими, що $\sqrt{x^2 + y^2} \approx k$. Діагональ прямокутника від точки a_{00} є новою координатою. При цьому при $K = 1$ маємо один дискретний кут повороту на $\pi/2$, при $K = 2$ маємо три кути $\arctg 1/2$, $\arctg 2$, $\arctg 0$, при $K = 3$ маємо чотири кути і так далі. Приклади повороту зображені на рис.1.3.

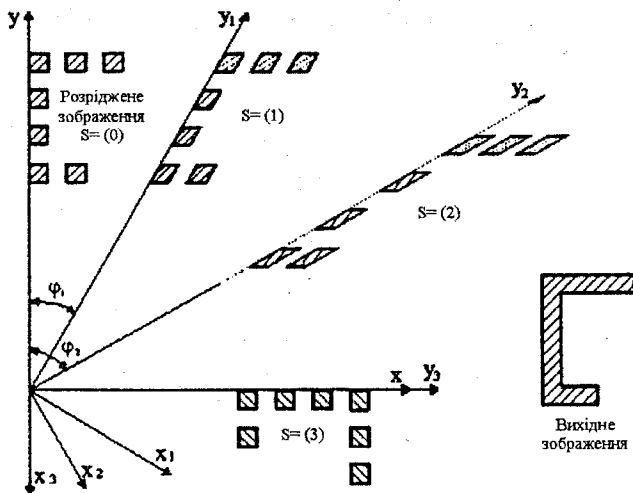


Рис.1.3. Поворот зображення

Під операцією знаходження центра зображення розуміють визначення центра координат (X, Y) з одночасним переміщенням $F(a_{ij})$ в центр матриці. Центр зображення визначається відносно яскравішої компоненти $F(a_{ij})$ таким чином, щоб сума яскравостей складової відносно осей координат, проведених через центр зображення по осі X зверху і знизу по осі Y справа і зліва, були рівні з точністю до дискрети зображення. Алгоритм $S_c(x,y)$ передбачує розбиття зображення на $n \times n$ квадратів, що вміщують $m \times n$ точок.

Оптоелектронний матричний процесор має своєрідну архітектуру, що визначається характером операцій, які виконуються.

Його основними вузлами є:

1. Модулі, що виконують специфічні операції перетворення зображення.
2. Волоконно-оптичний інтерфейс, який виконує одночасно ряд функцій перетворення зображення.

3. Керуючий блок, що реалізує набір сигналів, які визначає програма обробки.

Важливим органом живих істот є око. Біологічний шлях конструювання технічних пристроїв, що виконують певні функції ока, досягнув значних успіхів. На цьому шляху зроблена чергова спроба створення пристрою, в якому втілені деякі функції живого ока. Виникає цілеспрямована проблема розробки, так званого, ока-процесора, що використовує ряд властивостей ока при розв'язанні ряду фізичних задач.

Око-процесор – технічна система, що сприймає інформацію, представлену у вигляді зорового середовища довільної природи, яка виділяє певні ознаки середовища, обробляє їх і приймає рішення автоматично або за участю оператора.

Завданням ока-процесора є виконання таких операцій:

- попередня фільтрація. Передбачає усунення шумових та слабко пов'язаних точок, а також виділення вихідного зображення;
- зсув зображень одночасно на задану кількість вліво, вгору, вниз;
- масштабування зображення, при цьому виконується стиск і розширення зображення на задану величину;
- поворот зображення на фіксовані кути відносно центральної точки зображення;
- визначення центра зображення. Під центром розуміють аналог центра мас, якщо під одиничною масою розуміють значення ij точки в просторі вибраних ознак. Наприклад, центр яскравості зображення, центр червоного кольору, центр контурного зображення;
- виконання логічних операцій над зображенням O_1 і O_2 ;
- виділення контурів зображення заданої товщини.

Око-процесор розв'язує дві основні задачі виявлення образів, а саме:

1. Виділення із множини можливих образів $F(a_{ij})$ в фрагментах $\Phi(\tau)$, найбільш близьких до еталонних зразків $F_s(a_{ij})$ згідно із заданою множиною ознак.

2. Виділення із множини образів зображення образу $F(a_{ij})$, що має найбільшу швидкість еволюції V в просторі ознак, тобто образу найдинамічнішої траєкторії. Постановка задачі та її подальше рішення дає можливість розпізнавати об'єкти "невідомої структури", в яких розмиті або зовсім відсутні еталони.

Загальна структура око-процесора включає такі складові елементи:

- блоки рецепторів, які представляють собою регістратори зображення в просторі ознак;
- модулі попередньої обробки;
- модулі кореляторів;
- модулі еталонів-фрагментів;

- модулі прийняття рішення за функціями: близькості, кроку, розузгодженості;
- глобальний модуль адаптивного прийняття рішень.

Всі модулі, за винятком специфічних перетворювачів блоків-рецепторів, виконані на оптоелектронній елементній базі з основним функціональним елементом – квантроном у вигляді решіток, які складають МxМ комірок (однорідні середовища, що відповідають перерізам в просторі ознак). Будь-яка решітка суміщає в собі функції відображення, зберігання і обробки інформації.

В останній час започаткувалася і поступово закріплюється тенденція створення систем відображення інформації (СВІ) з плоским екраном. В зв'язку з цим найбільшу цікавість викликають СВІ на базі дискретних елементів відображення (ДЕВІ) таких, в яких пристрої візуалізації представляють собою деяку мозаїчну сукупність елементів відображення.

Можливості ДЕВІ в великій мірі залежать від функціонального навантаження системи, тобто від виду інформації, яку необхідно відображати на екрані. Розглядаючи весь діапазон інформації, відображеної в різноманітних ДЕВІ, можна виділити три ступені інформації, за якими була проведена класифікація ДЕВІ.

1. Найпростіша інформація в вигляді алфавіту, цифр і т.д. може бути кваліфікована як символічна.
2. Другий ступінь – графіка, мультиплікація, тобто графічна інформація, а ДЕВІ класифікована як електрографічна.
3. Третій ступінь – інформація в вигляді малюнків, картин, образів, тобто півтонова.

ДЕВІ, які дають змогу відображати такого виду інформацію, класифіковані як універсальні, тобто такі які можуть відображати інформацію всіх ступенів. За способом використання ДЕВІ класифікують на індивідуального, колективного і масового користування.

ДЕВІ – це функціонально завершена система, до складу якої разом з основним компонентом – пристроєм візуалізації, який безпосередньо відображає інформацію, входять ще й такі як: пристрої введення інформації, пристрої прийому, зберігання і обробки інформації, пристрій керування прийомом, зберігання, обробкою і введенням інформації в пристрій візуалізації.

Значну практичну зацікавленість викликає створення програмних оптоелектронних вузлів на принципах оптоелектроніки, дослідження оптоелектронного асоціального принципу зберігання, пошуку і обробки інформаційних сигналів як в електричному, так і в оптичному вигляді, виведення результатів в зручній для людини формі, в тому числі і візуально. В обчислювальних пристроях, побудованих на оптоелектронних приладах, процес перетворення, обробки, зберігання інформації виконується оптичними методами, що дає змогу покращити показники ефективності даних засобів.

Функціональна оптоелектроніка в теперішній час дає реальну можливість організації оптоелектронних матриць. За своїми технічними параметрами, принциповою можливістю і конструктивними особливостями, оптоелектронні матриці можуть ефективно використовуватись при паралельній обробці масиву оптичних сигналів. В області цифрової обробки зображень відмічається гостра потреба в нових ефективних методах аналізу зорової інформації. Розв'язати цю проблему дозволило створення логіко-часових оптоелектронних око-процесорів, які забезпечують:

1. Паралельне введення-виведення зображень безпосередньо в обчислювальне середовище.
2. Суміщення передачі та обробки інформації в одних і тих же фізичних середовищах "волокно-квантрон".
3. Виконання паралельної обробки масивів оптичної інформації, що підвищує продуктивність технічних засобів.
4. Виконання складних функцій прийняття рішень за обмежений час.
5. Однорідність структур блоків введення-виведення, нормалізацію створюють передумови для створення інтегральних структур.
6. Підвищення надійності.

Багато задач пов'язані з обробкою зображень, центруванням і нормалізацією зображень. Алгоритми роботи зорових систем промислових роботів, потребують визначення таких параметрів зображення як розміри, координати геометричного центра, координати крайніх точок. Вказані параметри можуть бути визначені за допомогою одновимірних пристроїв лінійних ПЗС-структур, оптоелектронних, фотоприймальних реєстрових структур і ін., шляхом попереднього оптичного перетворення вихідного двовимірного зображення в одновимірне і наступною паралельною обробкою перетворених зображень.

Пристрій на основі оптоволоконних середовищ дає змогу виділенню контурів зображення, визначенню довжин контурів, визначенню числа об'єктів в полі зору, здійсненню скелетизації зображень методом ізотропного потоншення.

В сучасний період виникає проблема прискорення виконання операцій введення-виведення інформації, розв'язання якої дасть можливість кардинально підвищити продуктивність обчислювальних систем. Одним із шляхів розв'язання цієї проблеми – організація паралельного введення-виведення інформації, представленій оптичним зображенням. Відомі спроби створення систем паралельної обробки зображень на основі оптоелектронної елементної бази.

Проблема підвищення швидкодії аналого-цифрових перетворювачів сигналів пов'язана з розв'язуванням задач формування короткого імпульсу вибірки, високошвидкісного багаторівневого квантування, а також здійснення широкосмутового зв'язку із цифровими обчислювальними засобами.

Застосування оптоелектронних методів дає змогу розв'язати такі задачі. Загальною ознакою оптоелектронних ОЕ АЦП є використання когерентного випромінювання в вигляді коротких світлових імпульсів, які модулюються вхідним аналоговим сигналом. ОЕ АЦП діляться на два типи: інтерференційні і дефлекторні.

1.3. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА СУЧАСНОЇ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

Елементну базу оптоелектроніки складають оптоелектронні прилади. Оптоелектронний прилад – це прилад, який використовує для своєї роботи електромагнітне випромінювання оптичного діапазону. В цілому елементна база сучасної оптоелектроніки досить різноманітна і включає в себе такі основні групи приладів:

1. Оптовипромінювачі – лазери і світло-випромінювальні прилади.
2. Фотоелектричні приймачі випромінювання; фотоприймачі з p - n переходом і фото-резистори з p - n переходом.
3. Прилади, які керують випромінюванням: модулятори, дефлектори, керуючі транспаранти.
4. Прилади для відображення інформації, індикаторні панелі.
5. Прилади для електричної ізоляції – оптрони.
6. Оптичні канали зв'язку і оптичні запам'ятовуючі пристрої: волоконно-оптичні світловоди, запам'ятовуючі середовища.

Когерентна (лазерна) оптоелектроніка визначає якісно нові можливості розвитку електроніки, дає змогу в повній мірі виявити всі переваги оптоелектроніки. Серед переваг когерентної оптоелектроніки, перш за все, необхідно виділити високу інформаційну ємність оптичних каналів, можливість подвійної просторової і часової модуляції оптичних сигналів, високу направленість випромінювання, високу густину запасу інформації.

Ступінь реалізації переваг когерентної оптоелектроніки визначається рівнем розвитку елементної бази. В наш час елементи когерентної оптоелектроніки такі як: лазери, оптичні модулятори, світловоди, знаходяться на порозі промислового виробництва, інші – голографічні запам'ятовуючі пристрої, елементи інтегральної оптики, просторово-часові модулятори – в стадії лабораторних досліджень.

Іntenсивно розвивається ряд напрямків щодо використання когерентної оптоелектроніки в системах обробки інформації.

Найбільші перспективи в цій області пов'язані з оптикою і в основному з голографічною пам'яттю, пристроями інтегральної оптики. В сучасній оптоелектроніці джерелами когерентного випромінювання є тільки лазери. Лазерне випромінювання має високу направленість, фіксовану частоту коливань, високу монохроматичність. За типом матеріалу активного елементу лазери поділяються на чотири групи: напівпровідникові, газові, твердотілі, рідинні.

СВД (світловипромінювальний діод) – основний і найбільш універсальний випромінювач некогерентної оптоелектроніки. Це обумовлює такі його переваги: високе значення ККД перетворення електричної енергії в оптичну; відносно вузький спектр випромінювання; квазімонохроматичність для одного типу СВД, з однієї сторони, і перекриття всього оптичного діапазону випромінювання СВД різних типів – з другої; висока для некогерентного випромінювача направленість випромінювання; незначні величини прямого спаду напруги, що забезпечує електричну сумісність СВД з інтегральними схемами; висока швидкодія; малі габарити, технологічна сумісність з мікроелектронними пристроями; висока надійність і довговічність.

Дефлектор представляє собою пристрій, який служить для зміни просторового положення лазерного променя. Найбільш широкое застосування, особливо в голографічних системах збереження і обробки інформації, знайшли електрооптичні і акустичні дефлектори. Типовий електрооптичний дефлектор представляє собою багатокаскадний пристрій. Кожен каскад складається із оптичного модулятора поляризації і двопроменезаломлювального кристалу. За допомогою модулятора забезпечується зміна поляризації випромінювання згідно із заданим законом. В залежності від комбінації керуючих напруг можна отримати 2^i дискретних положення в просторі променя на виході дефлектора, де i -число каскадів дефлектора.

Оптрони – такі оптоелектронні прилади, в яких є випромінювачі і фотоприймачі, оптично і конструктивно пов'язані між собою.

Фотоприймач – це оптоелектронний прилад, для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну. Сучасні фотоприймачі реагують тільки на інтенсивність випромінювання. Тому найбільш розповсюдженим видом оптичних модуляторів є модулятори інтенсивності. Аналізуючи застосування сучасних оптронів можна виділити три основних групи таких виробів:

- цифрові імпульсні оптрони, що використовуються для високошвидкісної передачі цифрової інформації по електрично-ізолюваних ланках;
- аналогові лінійні оптрони для спотвореної передачі аналогових сигналів по гальванічно-розділених ланках;
- потужні ключові оптрони, для безконтактного керування потужними високовольтними ланками.

В останній час отримують розвиток волоконно-оптичні лінії зв'язку – ВОЛЗ. Структурна схема ВОЛЗ включає в себе такі основні елементи: вхідний пристрій кодування, передавач, оптичний кабель, ретранслятор, приймач, вихідний пристрій декодування. Сучасну основу ВОЛЗ складають оптичні кабелі, виконані із окремих світловодів. Передача оптичної енергії по ВОЛЗ забезпечується за допомогою ефекту повного внутрішнього відбиття.

1.4. ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЗАСТОСУВАННЯ

Електровакуумний пристрій, що перетворює оптичне зображення одного спектрального складу, частіше всього інфрачервоне або ультрафіолетове в проміжне, а потім із електронного в видиме, називається електронно-оптичним перетворювачем ЕОП. За допомогою ЕОП, вбудованих в оптичну ланку системи передачі зображення, розв'язуються задачі перетворення спектрального діапазону, підсилення яскравості зображення. ЕОП класифікуються за:

1. Характером дії на потік випромінювання від об'єкта:

- спектральні, що змінюють спектр вихідного випромінювання в порівнянні із спектром падаючого одночасно і підсилення перетворюючого сигналу;

- підсилення яскравості в вихідному діапазоні спектра.

2. Робочою областю спектра, яка залежить від ширини смуги спектральної чутливості фотокатада: для видимої області спектра; ближньої інфрачервоної області; ближньої ультрафіолетової області; для перетворювачів рентгенівських променів.

В залежності від схеми і конструктивних особливостей перетворювачі класифікуються за кількістю камер, каскадів підсилення, принципом фокусування електронних пучків, методами підсилення фотокатада, кількістю камер: однокамерні (рис.1.4); двокамерні; багатоканерні (рис.1.5).

Каскадом підсилення є камера, в якій відбувається підсилення яскравості зображення, отриманого в першій камері. Трикамерний перетворювач називається двокаскадним. За способом фокусування електронних пучків перетворювачі поділяються на такі види: електростатичні, магнітні, змішані.

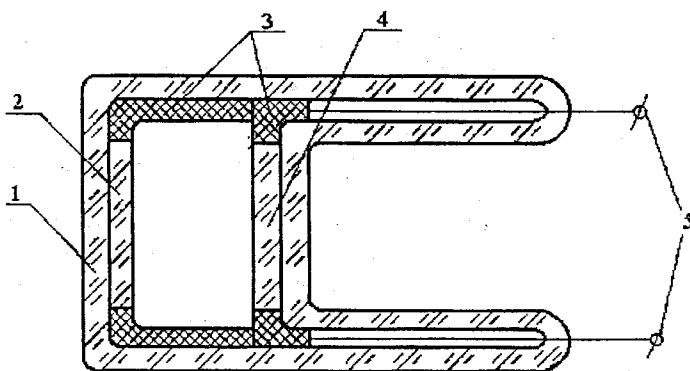


Рис.1.4. Однокамерний ЕОП.1-корпус, 2-фотокатод, 3-манжет фотокатаду, 4-екран, 5-блок живлення

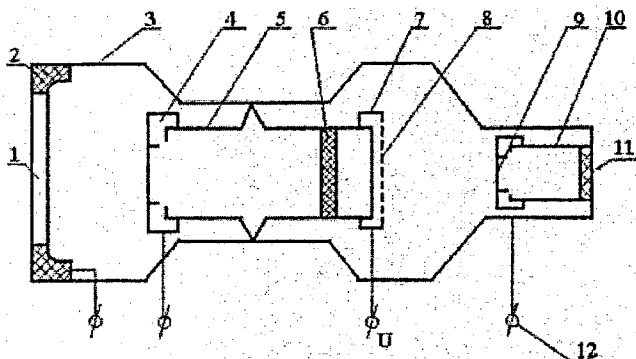


Рис.1.5. Багатокамерний ЕОП. 1,8-фотокатода, 2-манжет, 3-корпус, 4,9-фокусуєчі електроди,5-стакан, 6,11-екрани, 7-контактні з'єднання, 10-металізований електродний шар, 12-блок живлення

За способом підсилення фотокатода:

- каскадні;
- з використанням вторинної електронної емісії;
- з прискоренням електронів в електростатичних і магнітних полях.

До групи спеціальних перетворювачів відносяться електронно-оптичні затвори, які служать для високошвидкісної реєстрації і фотографування швидкопротічних процесів. Принцип дії будь-якого ЕОПа застосований на фізичних явищах, які виникають при роботі фотокатода, люмінесцентних екранів і систем електронного фокусування. У видимому діапазоні ЕОП дає змогу збільшувати яскравість зображення в сотні, тисячі раз.

Швидкодія їх настільки велика, що з їхньою допомогою вдається створити пристрої із часовим розділенням більше 10^{-12} с.

Основними параметрами ЕОП є: коефіцієнт перетворення η – відношення світлового потоку, що випромінює екран, до потоку, який потрапив на фотокатод:

$$\eta = \frac{F_s}{F_k}$$

Це основна фотометрична характеристика ЕОПа. Виражаючи через окремі параметри перетворювача, отримаємо:

$$\eta = S_i U_0 j \pi,$$

де S_i – чутливість фотокатода, U_0 – прискорювальна напруга, j – світлова віддача екрана, π – коефіцієнт, що враховує дифузне свічення екрана.

Наступним параметром ЕОП є коефіцієнт підсилення яскравості η_B – відношення яскравості зображення на екрані R_s до освітленості фотокатода E_K , де G_s – електронно-оптичне збільшення перетворювача, g_s , g_K – площі екрана і катода.

Яскравість теплового фону обумовлена, в основному, явищами термоелектронної і автоелектронної емісії катода і визначається згідно з формулою:

$$B_T = j_T U_0 \frac{j}{\delta^2},$$

де j_T – густина темнового струму фотокатода.

Цей параметр є визначальним по відношенню до порогових характеристик всього приладу, тому для збільшення дальності і точності приладу необхідно прямувати до граничного зменшення B_T .

Роздільна сила (роздільна здатність) – N залежить від цілого ряду факторів, головним чином, від роздільної здатності електронної оптики і від роздільної здатності екрана. Перша із них сягає значення 150 пар ліній на 1 мм в центрі, а на краях поля на багато менше.

Роздільна здатність для:

- однокамерних ЕОП – 30-40 пар ліній на 1 мм;
- багатокамерних ЕОП – 100-150 пар ліній на 1 мм.

Робочий діаметр $D_{роб}$ – це діаметр робочої зони фотокатода. Збільшення робочого діаметра обмежено різким спадом роздільної здатності електронної оптики до країв поля. Робочий діаметр визначається кутом поля зору приладу таким чином:

$$2\beta = 2 \arctg \frac{D_{роб}}{2j_{об}},$$

де $j_{об}$ – фокусна відстань об'єктива приладу з ЕОП.

Робоча прискорювальна напруга – U_0 для сучасних однокамерних ЕОП $U_0 = 10 \div 25$ кв, для чотирикамерних – $40 \div 45$ кв.

Коефіцієнт збереження контрасту C_K – визначає якість зображення і має вигляд відношення:

$$C_K = \frac{B_0 - B_T}{B_0 + B_T},$$

де B_0 – яскравість освітлених ділянок,

B_T – яскравість темних ділянок.

В окремих конструкціях ЕОП для підвищення яскравості використовують електронно-оптичну систему, яка забезпечує стиск зображення в 100 і більше разів. Яскравість зображення зростає в сотні раз. Для підвищення яскравості зображення в ЕОП необхідно підвищувати напругу між електродами, а для підвищення роздільної здатності – зменшувати відстань між ними. Підвищення обох основних параметрів (N, U_0) призводить, таким чином, до необхідності підвищення напруженості поля. Відбиття в цьому випадку накладаються механічною пружністю екрана і ймовірністю виникнення автоелектронної емісії з фотокатода.

Відривальна електростатична сила, що діє на одиницю поверхні екрана, пропорційна квадрату напруженості поля:

$$P = \frac{\epsilon_0 E^2}{2},$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ К}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$; E – напруженість електростатичного поля в ЕОП.

Порошкові люмінесцентні екрани починають порушуватися при напруженості поля біля 10 кв/мм.

Таким чином, для отримання найкращої комбінації параметрів роздільної здатності і підсилення, необхідно підняти напруженість поля до величини, близької до граничної, а відстань між електродами і напругу між ними вибирати в залежності від конкретних вимог.

Із певним наближенням можна вважати, що роздільна здатність плоского ЕОП рівна оберненій величині діаметра кола розмиття:

$$N = \frac{1}{2\rho} = \frac{1}{\Delta L} \sqrt{\frac{U_a}{U_{0\max}}}$$

Після перетворення можна показати, що при постійній напруженості роздільна здатність рівна:

$$N = \frac{E}{\Delta \sqrt{U_{0\max}}} \sqrt{\frac{1}{U_a}}$$

Підсилення яскравості пропорційне анодній напрузі або при постійній напруженості поля, відстані між електродами розраховуються за такими формулами:

$$\pi S_\xi j_\varphi U_a = \pi S_\xi j_\varphi E L$$

де S_ξ – чутливість фотокатода, j_φ – світловіддача екрана, E – напруженість поля, L – відстань між електродами, $U_{0\max}$ – максимальна напруга, U_a – анодна напруга.

На рис.1.6 наведено сімейство кривих, що визначають залежність роздільної здатності і підсилення яскравості від анодної напруги при граничних напруженостях поля (1 – К-10⁴В/мм; 2 – Е-7,5 · 10³В/мм; 3 – Е-5 · 10³В/мм; 4 – роздільна здатність підсилення світла).

На рис.1.7 зображено частотно-контрастну характеристику (ЧКХ), яка значно краще характеризує якість передачі зображення.

ЧКХ визначає залежність контрасту на екрані від просторової частоти n .

Важливою характеристикою ЕОПа є:

j_s – електронно-оптичне збільшення,

$$j_s = \frac{l_s}{l_{\text{дох}}} = \frac{d_s}{d_{\text{дох}}} = \sqrt{\frac{A_s}{A_{\text{дох}}}},$$

де l – лінійний розмір зображення, d – робочі діаметри, A – робочі площі.

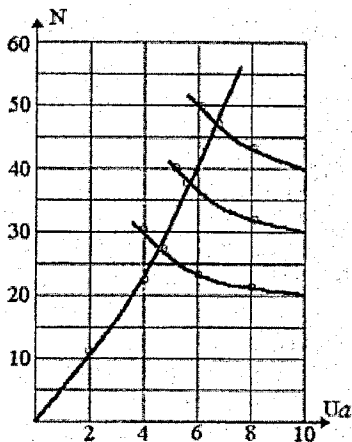


Рис.1.6. Графік залежності роздільної здатності і яскравості від анодної напруги

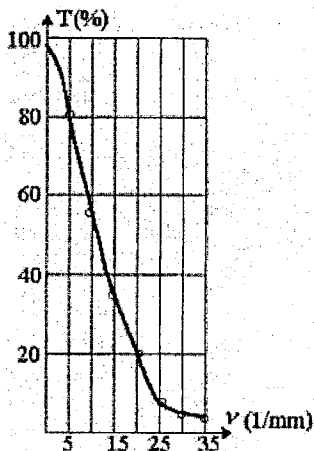


Рис.1.7. Частотно-контрастна характеристика ЕОПа

Забезпечення великих значень j , перетворювача ЕОП при відповідному збільшенні розмірів його екрана, дає змогу отримати зображення меншого масштабу, але при цьому зменшується яскравість зображення. При низькому рівні інтенсивності на фотокатоді однокамерного ЕОП його екран має таку низьку яскравість, що око спостерігача не в змозі визначити різницю в яскравості окремих малих ділянок. При відповідному підвищенні яскравості зображення, здібність ока до розпізнавання ділянок з малою градацією яскравості стає значно вища. Тому для спостереження малоінтенсивних зображень використовують каскадне з'єднання окремих однокамерних ЕОП, або ЕОП з додатковим підсилювачем, так що яскравість зображення підвищується до таких значень, коли око має високу чутливість і роздільну здатність. Багатокаскадний (багатокамерний) ЕОП може досягти настільки високого підсилення, що на вихідному екрані реєструються окремі електрони, що вилетіли із фотокатода. За способом перенесення електронного зображення із фотокатода на екран, ЕОП можна розділити на три типи:

- ЕОП з паралельним перенесенням зображення в однорідному електростатичному полі (плоский ЕОП);
- ЕОП з електромагнітним фокусуванням;
- ЕОП з електростатичним фокусуванням в неоднорідному полі.

Складність отримання високоякісного електронного зображення на екрані ЕОП обумовлена трьома основними факторами:

- необхідністю відображення великих поверхонь;
- різною за величиною початковою енергією електронів, що імітують фотокатод;

- дифузним характером фотоелектронної емісії, тобто різноманітністю в куті вильоту електронів із фотокатоду.

Існує ряд методів підсилення яскравості зображення:

- за рахунок електронно-оптичного стискання зображення;
- метод оптичного контакту екрана з фотокатодом;
- використання вторинної емісії "на простріль" для підсилення яскравості електронного зображення;
- використання скловолоконних елементів і мікроканалних пластин з підсиленням яскравості зображення.

В наш час розроблено велику кількість приладів з використанням ЕОП, призначених для розв'язання різноманітних задач візуального спостереження об'єктів при незадовільній видимості. Прилади спостереження з ЕОП знайшли широке використання для знаходження і розпізнавання об'єктів як в умовах природної нічної освітленості, так і з застосуванням спеціальних засобів підсвічування, в тому числі ІЧ-прожекторів, імпульсних лазерів.

Широке використання ЕОП знайшли при проведенні наукових досліджень в галузі фізики, астрономії, біології, рентгеноструктурному аналізі.

Розвиток ЕОП, призначених для наукових досліджень, відбувся за такими напрямками: створення ЕОП із граничним підсиленням для реєстрації надслабких процесів, створення ЕОП з затвором і системами розгортання зображення для реєстрації процесів з часом протікання 10^{-9} - 10^{-13} с, створення ЕОП для реєстрації процесів, що супроводжуються рентгенівським і нейтронним випромінюванням.

Основною вимогою, що висувається до ЕОП, для надслабких процесів, є забезпечення граничного підсилення, достатнього для реєстрації поодиноких фотоелектронів. Підсилення яскравості зображення об'єкта з допомогою ЕОП, дає змогу передати зображення на телевізійний екран або в тисячу раз скоротити час експозиції при реєстрації на фотоплівці.

1.5. РІДИННО-КРИСТАЛІЧНІ ІНДИКАТОРИ, ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЗАСТОСУВАННЯ

В результаті взаємодії світла з пасивним індикатором відбувається модуляція світла. При цьому можуть бути змінені амплітуда, фаза, довжина хвилі, площина поляризації, напрямок розповсюдження світла.

Оптичними показниками, наявність яких призводить до модуляції світла за одним із параметрів, є: коефіцієнт поглинання, відбиття і розсіювання, оптична різниця ходу, спектральне пропускання і відбиття, оптична анізотропія, зміна показника заломлення, оптична активність. Просторове розподілення перерахованих параметрів матеріалів пасивних індикаторів є природною властивістю і може бути отримано в результаті різноманітних зовнішніх дій на індикатор. Бажано, щоб власні оптичні показники були розподілені по поверхні індикатора рівномірно, зміни ж, щоб вводилися ззовні.

Результати цих вимірювань, обумовлених ціленаправленими діями, являють собою запис інформації. Джерелом і носієм інформації, частіше всього, бувають електричне і магнітне поля, звукові хвилі. Під дією електричного поля відбувається значна кількість електронно-оптичних ефектів в рідкому і твердому кристалі. Електричне поле стимулює ряд ефектів неелектричного характеру.

Рідинно-кристалічний стан – це термодинамічностійкий стан, при якому речовина зберігає анізотропію фізичних властивостей, притаманних твердим кристалом, і текучість, характерну рідинам. Такий стан речовини ще називається мезоморфним.

В залежності від орієнтації молекул в рідкому кристалі (РК) розрізняють три типи кристалів: смектичні, нематичні, холестеричні.

В смектиках сильно витягнуті молекули розташовані паралельно своїм великим осям і утворюють шари однакової товщини, близької до товщини молекул. Ці шари лежать один над другим на рівних відстанях.

В нематиках осі молекул теж паралельні, але не утворюють окремих шарів. Довгі осі молекул лежать вздовж переважного напрямлення, а їх центри розташовані хаотично.

В холестеричних РК молекули розташовані в шарах як і в смектиках, але довгі осі молекул паралельні площині шарів, а напрямлення їх переважної орієнтації монотонно змінюється від шару до шару, повертаючись на деякий кут.

Рідинні кристали відносяться до діелектриків, їх середній питомий опір коливається від 10^6 до 10^{10} Ом·см і залежить від наявності домішок, які проводять струм.

Діелектрична проникність РК визначається величиною і напрямленням постійного і індукваного дипольних моментів молекул. Характерними особливостями є анізотропія електричних і оптичних властивостей, зокрема анізотропія діелектричної проникності:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp},$$

де $\epsilon_{||}$, ϵ_{\perp} – діелектрична проникність в напрямку, паралельному і перпендикулярному довгим осям молекул РК.

Оптична анізотропія:

$$\Delta n = n_{||} - n_{\perp},$$

де $n_{||}$, n_{\perp} – показники заломлення для світлової хвилі, електричний вектор якої відповідно паралельний, перпендикулярний молекулярній орієнтації.

В залежності від знаку $\Delta\epsilon$ розрізняють РК n – типу ($\Delta\epsilon < 0$) і p – типу ($\Delta\epsilon > 0$). Рідинним кристалом притаманно обертання площини поляризації світла, що проходить через них. Кут повороту площини поляризації α залежить від товщини шару і природи РК: $\alpha = \alpha' \cdot d$, де α' – питоме обертання площини поляризації. В РК значення α' дуже велике: $\alpha' = (6 \div 7) \cdot 10^4$ град/мм., в той час як у кварцу $\alpha' = 15$ град/мм.

Спонтанна орієнтація молекул в РК призводить до того, що вони проявляють оптичне двопроменеве заломлення. Напрямок поляризації незвичайного променя збігається з напрямком оптичної осі, у звичайного променя напрямок поляризації перпендикулярний цій осі.

Принцип дії рідинно-кристалічних індикаторів (РКІ) ґрунтується на використанні різноманітних електрооптичних ефектів. Фізична суть електрооптичних ефектів в РК полягає в тому, що будь-який процес зміни їх оптичних властивостей за допомогою зовнішнього електричного поля має три особливості. По-перше, наявність анізотропії діелектричної постійної і електропровідності призводить до того, що РК випробовує обертовий момент, що змушує понизити енергію анізотропного поля в електричному полі. По-друге, через відносно невелику в'язкість РК обертовий момент призводить до переорієнтації РК за відносно короткий час (це не відбувається з твердими кристалами). По-третє, внаслідок великої анізотропії оптичних властивостей, будь-яка зміна структури РК легко фіксується оптично. Великою перевагою тонких шарів РК є їх здібність змінювати свої оптичні властивості при малих напругах і незначній споживчій потужності.

Конструкція елементарної комірки РКІ (рис.1.8) дуже проста і складається із двох скляних пластин 2, на які нанесені напівпрозорі електроди 3. При роботі РКІ на відбиття другий електрод мусить бути дзеркальним. Між пластинами залитий РК6, товщина шару якого задається прокладками 4, 1 – світло, яке падає на РК, 5 – світло, яке потрапляє до спостерігача.

Часові характеристики електрооптичних ефектів в РК визначаються переміщенням об'єму рідини, тому перехід комірки із одного стану в інший лежить в межах від мілісекунди до секунди. Час реакції пропорційний в'язкості рідини, квадратові товщини і приблизно обернено пропорційний різниці між квадратом прикладеної напруги і квадратом порогової напруги.

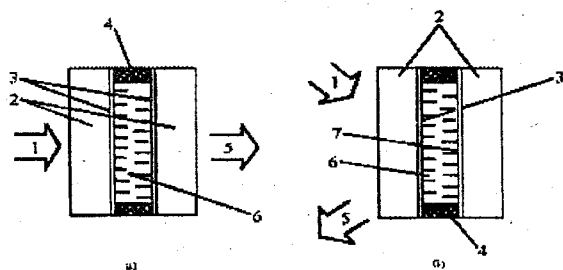


Рис.1.8. Будова РКІ: а) просвітлого, б) відбивного

Час релаксації пропорційний в'язкості і квадратові товщини шару рідкого кристалу. Оскільки швидкість перемикання залежить від товщини РК, бажано підтримувати товщину настільки малою, наскільки це технологічно можливо. Існують спеціальні методи зменшення часу релаксації РКІ, наприклад, пониженням в'язкості рідинно-кристалічного матеріалу. Необ-

хідним є те, щоб інтервал робочих температур складав від 10 до 60⁰С. Для покращення мезоморфної області використовується змішування двох і більше компонентів.

Споживання енергії в РКІ незначне. В пристроях, де використовується ефект динамічного розсіювання, типова потужність споживання складає 0,1 – 1 мВт/см² при напрузі збудження 15В і частоті 30⁹Гц.

В РКІ однією із головних проблем є забезпечення довговічності. Оскільки не можна гарантувати достатню хімічну стабільність РК, практично використовувана довговічність досягається конструктивними і технологічними заходами.

Проте ці заходи протидії старінню ведуть за собою ускладнення конструкції елементів, тому по можливості їх слід усувати і прямувати до підвищення стабільності рідинно-кристалічних матеріалів.

Серед пристроїв відображення інформації особливе місце займають рідинно-кристалічні індикатори (РКІ). Індикаторні пристрої на РК дають змогу здійснювати зчитування показів індикатора в широкому інтервалі яскравості. В наш час широко розповсюджені цифрові і буквено-цифрові РКІ, значна робота проводиться із створення і практичного використання матричних РКІ і індикаторів з полікольоровим зображенням.

1.6. РІДИННО-КРИСТАЛІЧНІ КЕРУЮЧІ ТРАНСПАРАНТИ, ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Рідкі кристали вже знайшли своє місце в створенні третього оптичного покоління обчислювальних машин. Це машини, які значно перевищують швидкість обробки інформації в порівнянні з обчислювальними пристроями, які працюють на напівпровідниках.

В основі третього покоління обчислювальних машин лежать оптичні методи, які дають змогу обробляти інформацію у вигляді двовимірних масивів зображень, таблиць в багато раз швидше, ніж в електронних машинах. В зв'язку з цим великого значення набувають рідинно-кристалічні керуючі транспаранти (РККТ) – оптоелектронні пристрої, які служать для формування і перетворення двовимірних масивів інформації, що переноситься світловими променями. Просторово-часова модуляція світлового потоку в РККТ здійснюється в результаті зміни під дією керуючих сигналів оптичних властивостей рідкого кристалу. При цьому можуть змінюватися, наприклад, прозорість, показник заломлення та інші властивості оптичного середовища. На рідких кристалах можуть виготовлятися транспаранти двох типів: керуючі безпосередньо електричними сигналами і керуючі світловими сигналами. В першому випадку світловий потік модулюється у відповідності з конфігурацією прозорих електродів, нанесених на підкладку. В іншому випадку світловий пучок фактично керує другим, оскільки оптичні властивості середовища змінюються в залежності від появи або відсутності керуючої підкладки. В цьому випадку в конструкцію транспа-

ранта додатково входить світлочутливий шар, який змінює свій електроопір в залежності від освітленості світлом.

В системах оптичної обробки інформації керуючі транспаранти або світло-каналні пристрої виконують функції введення-виведення і відображення інформації, здійснення логічних операцій. Рідкі кристали при обробці інформації дають змогу здійснювати швидкість перемикання сигналів з частотою 10^5 Гц.

Світло-каналні пристрої на основі динамічного розсіювання можуть зменшувати інтенсивність світла, що проходить через них в 100 разів. Конструкція пристрою досить проста. Це два складених скла, склеєних по краях і покриті із внутрішньої сторони S_nO_2 . Між ними знаходиться шар РК товщиною 20 мкм. Такі скляні пластинки можуть виготовлятися рівними за величиною віконним розмірам. При відсутності електричної напруги на електродах прозорість скла РК майже така ж, як у звичайного віконного скла. Змінюючи напругу приблизно від 10 до 60В, можна зменшити прозорість скла в декілька разів. Якщо на електроди подати змінну електричну напругу, то світловий потік, що пройшов через скло, буде модульований за інтенсивністю. При досить низькій частоті електричного поля буде спостерігатися то світло, то темрява. За допомогою такого пристрою – рідинно-кристалічного модулятора – змінюючи частоту електричного поля, можна передавати різноманітні світлові сигнали.

З розвитком лазерної техніки і створенням генераторів однорідного світлового випромінювання надзвичайно підвищилося значення різних оптичних, оптоелектронних пристроїв, які керують цим випромінюванням. В фізичну оптику майбутнього рідкі кристали внесуть багато нового.

Розділ 2. МЕТОДИ ТА ПРИСТРОЇ ОПТИЧНОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Останнім часом інтенсивний розвиток науки й техніки в таких напрямках як оптоелектронне, логіко-часове, інформаційно-обчислювальне середовища привів до розробки і створення інформаційно-обчислювальних пристроїв із принципово новими властивостями, які характеризуються виконанням функцій прийому, передачі, перетворення і оперативної обробки оптичної інформації.

Такий бурхливий розвиток згаданих вище напрямків обумовлений паралельним розвитком інтегральної оптики. Використання методів і властивостей інтегральної оптики для передачі і обробки сигналів забезпечує значні переваги в порівнянні з характеристиками звичайних електричних методів передачі й обробки інформації. Вони мають цілий ряд переваг, а саме:

- несприйнятливості до електричних і магнітних перешкод;
- відсутність ризику короткого замикання або замикання на землю;

- безпека роботи в оточуванні горючих речовин;
- безпека, пов'язана з радіоперехопленням або підслуховуванням;
- незначні втрати при передачі;
- велика пропускна здатність, тобто можливість мультиплексування;
- незначні розміри й вага;
- підвищена надійність;
- несприйнятливість до вібрацій.

2.1. РОЗМНОЖУВАЧІ СВІТЛОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ, ЇХ ОСНОВНІ ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Діагональна площина призм, які розділяють зображення, напилена шаром матеріалу з певними коефіцієнтами відбиття й пропускання. Це, так звані, тонкі плівки, матеріалом яких є Al, Al+TiO₂, ZnS, MgF₂ і їх похідні. Тонкі покриття, товщина яких складає десятки або сотні ангстремів, представляють собою особливий агрегатний стан речовини, характерною відмінністю якого є одночасна наявність мікро- і макроскопічних властивостей. Саме тому відкриваються великі можливості використання макроскопічних методів для вивчення мікроскопічних властивостей речовини, в тому числі й оптичних.

При розгляді оптичних властивостей, характеристик комірок, що розділяють світлове зображення, не слід чекати, щоб ефективні оптичні сталі, що характеризують тонке покриття речовини збіглися з оптичними сталими вихідного матеріалу. Матеріали, якими напиляють діагональну площину світлоділительних призм, крім інших відмінностей в оптичних властивостях мають різні показники заломлення n :

$$\text{MgF}_2 \rightarrow n = 1,36 \div 1,39$$

$$\text{ZnS} \rightarrow n = 2,27 \div 2,48$$

$$\text{TiO}_2 \rightarrow n = 2,23 \div 2,55$$

$$\text{Al, AlO}_2 \rightarrow n = 1,6$$

При покритті складових скляних призм, які розділяють світлові зображення, матеріалами MgF₂, ZnS зменшується їх відбивна здатність – це явище носить назву “просвітлення оптики”.

Підтвердженням цього є графік (рис.2.1) залежності коефіцієнта відбиття R шару, від довжини хвилі λ . У видимій області спектра, особливо на довжині хвилі 550 – 600нм. коефіцієнти відбиття R мінімальні і практично прямують до нуля. Важливість просвітлення елементів блока розділення оптичного сигналу витікає із того, що при однократному проходженні світловим пучком границі розділу скло-повітря втрачається на відбиття мінімум 4 – 9% потужності світлового пучка. При косому падінні світлових пучків значно більше. В сучасних оптичних пристроях, які використовуються в оптоелектроніці, є велика кількість границь розділу заломлявальних елементів, в результаті чого втрачається інколи до 80 і більше відсотків світла.

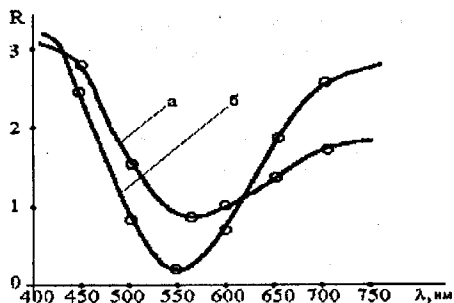


Рис.2.1. Графік залежності коефіцієнта відбиття шару MgF_2 (а) і ZnS (б) від довжини хвилі

Такі значні втрати на відбитті, природно, негативно впливають на якість оптоелектронних пристроїв і систем. Не менш важливою, особливо з метою розділення світлового зображення, є обернена задача – підвищення відбивної здатності плівок, напилених на діагональну поверхню призми. Із графіка (рис.2.2) залежності відбивної здатності плівки $Al+TiO_2$ від довжини хвилі в оптичній комірці видно, що максимальне відбиття спостерігається в області 500 – 600 нм при використанні плівок товщиною 550 \AA із матеріалу $Al+TiO_2$.

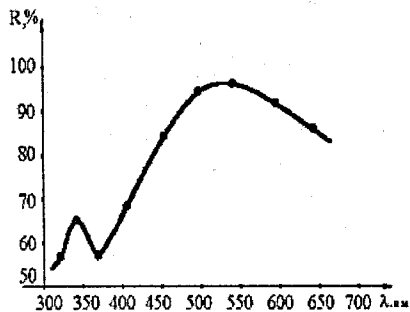


Рис.2.2. Графік залежності відбивної здатності плівки $Al+TiO_2$ від довжини хвилі

Просвітлення плівки істотно хроматичні. Проте, видима ділянка спектра, що охоплює менше однієї октави, достатньо вузька, і щоб завжди мати можливість підібрати плівки, яким притаманна помітна просвітлювальна дія, якщо не в усьому діапазоні видимого спектру, то, у всякому разі, у всій області його підвищеної видимості для людського ока.

Для цього існує декілька умов:

$$1. n_2^2 = n_1 \cdot n_3, \quad 2. \lambda = \frac{4n_2 \cdot t}{2m+1},$$

де m – ціле число, що відповідає числу шарів, інколи це порядок інтерференції; n_1, n_3 – показники заломлення, що утворюють тонку плівку; n_2 – показник заломлення середовища.

В якості прикладу наведені результати наших експериментальних досліджень і даних Ісігуро Кувабарі, де видно чітку залежність між t , τ , R , а також виконання першої умови (рис.2.3).

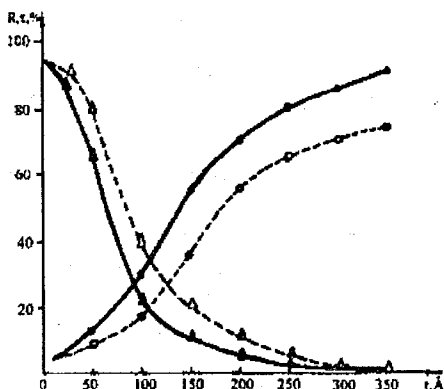


Рис.2.3. Графік залежності коефіцієнта відбиття R і пропускання τ від товщини алюмінієвої плівки на довжині хвилі $\lambda=590$ нм

Згідно з теорією Розенберга, тонкий шар виконує роль резонатора, в якому при опромінуванні збуджуються стоячі хвилі з амплітудою, яка залежить від його настроювання. В початковій фазі освітлення, доки вимушені коливання не встановилися, відбувається процес накопичення енергії в резонаторі. При цьому коефіцієнт відбиття від передньої поверхні шару поступово змінюється від свого початкового значення $R_{1,2}$ до кінцевого стаціонарного режиму резонатора з $R_{1,3}$, при якому доступ енергії в нього повністю компенсується втратами як на поглинання, так і на випромінювання через граничні поверхні. Величина втрат, очевидним чином, залежить від амплітуди вимушених коливань в середині резонатора, тобто від ступеня його настроювання, а також від його добротності. Іншими словами, при умові повного просвітлення, амплітуда електричних коливань в середині шару біля його передньої границі дорівнює амплітуді хвилі, що опромінює шар.

Зв'язок між поглинанням і відбиттям в оптичній комірці можна виразити таким співвідношенням:

$$R_{i,k} = e^{-2\alpha_k}$$

Очевидно, що R і τ залишаються осцилюючими функціями товщини шару і частоти випромінювання, а амплітуда коливань зменшується із зростанням t і λ (рис.2.4).

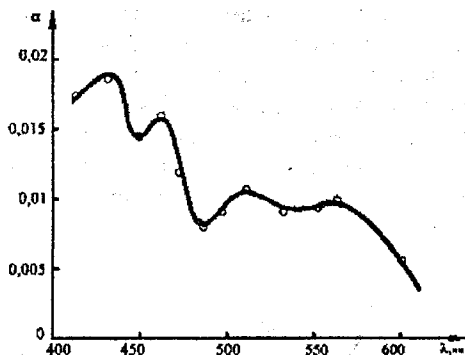


Рис.2.4. Графік залежності коефіцієнта поглинання шару ZnS від довжини хвилі λ

Відмітимо, що подібно до R і τ поглинання α є коливною функцією товщини шару. Із графіка (рис.2.5) видно, що при товщині шарів $400 \div 600 \text{ \AA}$ спостерігаються мінімальні поглинання, а при 1000 \AA – максимальні поглинання, що обумовлюється інтерференційними ефектами.

Практичну цікавість при конструюванні оптичних комірок, що розділяють світлове зображення, без сумніву, викликає визначення таких важливих оптичних характеристик, як контрастність C , роздільна здатність N , різкість F і інші, які характеризують якість оптоелектронного пристрою в цілому.

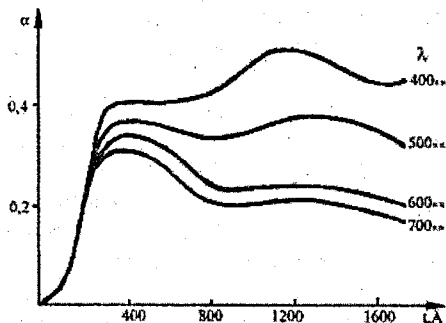


Рис.2.5. Графік залежності поглинальної здатності алюмінієвої плівки від її товщини t для різних довжин хвиль λ

Розенберг, Кун та інші дослідники доводять, що доцільним є визначення вищеперахованих параметрів через коефіцієнт відбиття:

$$C = \left(\frac{1+R}{1-R} \right)^2 \quad N = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

Проте помічено, що при великих R контрастність і роздільна здатність виявляються дещо нижчими розрахункової величини.

Таке зменшення цих характеристик в порівнянні із теоретичними можна пояснити рядом причин, в тому числі внутрішніми дефектами призм і самих напівпрозорих шарів, дифракційними явищами та іншими. Із рис.2.6 видно, що із збільшенням показника відбиття контрастність логарифмічно, а роздільна здатність лінійно збільшуються.

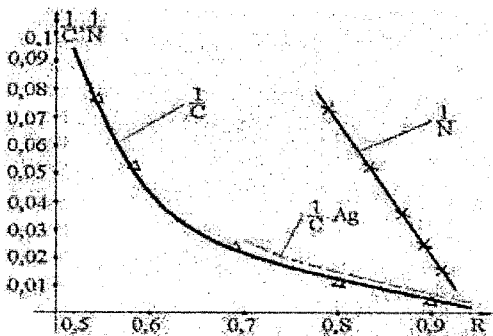


Рис.2.6. Графік залежності $\frac{1}{C}, \frac{1}{N}$ від коефіцієнта відбиття R плівки $Al+TiO_2$

Слід відмітити, що напівпрозорі шари тонких плівок здійснюють також і поляризуючу дію на світловий промінь. Особливо це виявляється тоді, коли світлове зображення падає під кутом до приймаючої поверхні оптичної комірки. Проте, оптимальними умовами просвітлення, а також відповідним підбором товщини шару і кута падіння променів, можна компенсувати цю поляризуючу дію.

Оптичні характеристики багатоступеневих комірок блока – коефіцієнт поглинання α , розсіяння σ , екстинкції $K=\alpha+\sigma$ легко визначаються за допомогою інтегрального фотометра. Проте, найбільш природною, представляється можливість прямого вимірювання коефіцієнта екстинкції за допомогою спектроекстинкціметра СЕП -2 за послабленням направленного світлового пучка, коефіцієнт розсіювання цього пучка напівпровідниковими комірками, з яких складається трансляційний блок розмноження світлового зображення. Надійність отриманих результатів в другому випадку забезпечується можливістю нехтування явищами кратного розсіювання, яка забезпечується двома умовами: 1. $D \ll L$; 2. $kL=1 \div 2$, причому $kL=1$ – оптимальна умова, D – діаметр світлового пучка; L – товщина зразка, шлях променя в речовині.

Якщо розміри розсіювальних частинок (i , в першу чергу, частинок матеріалу, який напиляється), великі в порівнянні з довжиною світлової хвилі, то ступінь концентрації розсіяного світла малих кутів розсіювання ϕ

велика, а поправка Δk - ефект вторинного розсіяння може досягти значної величини:

$$K = K_w - \Delta K$$

Радіус діафрагми $R = 10^{-5}$ м, кут розсіяного випромінювання, яке падає на приймач $\varphi = R/F \approx 20''$, де R – фокусна відстань лінзи.

Кут дифракції на частинках матеріалу, що напиляється, визначається як:

$$\varphi = 1,22 \lambda/d,$$

де d – діаметр частинок (близько 2мкм), λ – довжина хвилі монохроматичного випромінювання.

Як видно із графіка експериментальних досліджень (рис.2.7), коефіцієнт екстинкції майже лінійно зростає при послідовному з'єднанні комірок в блок. Перепади на стиках оптичних комірок пояснюються різними показниками заломлення клею – канадський бальзам $n = 1,49$, скла $n = 1,3$, напиленої плівки $n = 2,4$, внаслідок чого світловий пучок терпить зміни при переході із одного середовища в інше: заломлюється, відбивається, розсіюється.

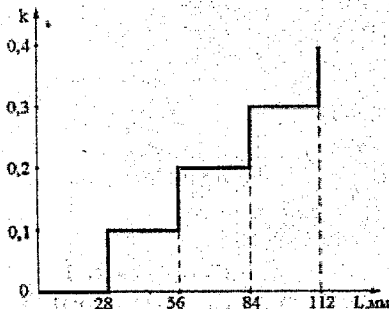


Рис.2.7. Графік залежності коефіцієнта екстинкції k від товщини оптичного блока L

Коефіцієнт пропускання зменшується з ростом товщини оптичного блока (див. графік залежності τ від L – рис.2.8).

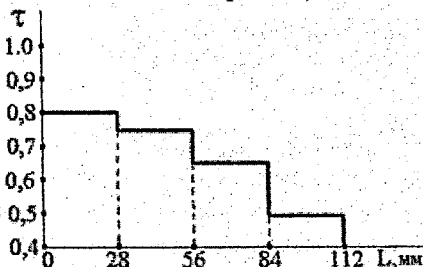


Рис.2.8. Графік залежності коефіцієнта пропускання τ від товщини оптичного блока L

Графік залежності коефіцієнта екстинкції окремих комірок і оптичного блока в цілому від довжини хвилі зображено на рис.2.9. Найбільше згасання відбувається в області 460 – 530 нм., що узгоджується з теорією. Стосовно блоків розмноження оптичного зображення – поглинання в 2-3 рази більше багатократного розсіювання.

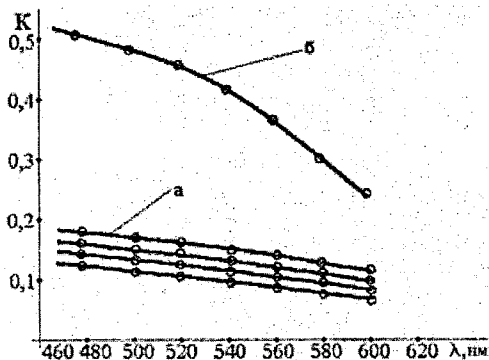


Рис.2.9. Графік залежності коефіцієнта екстинкції k окремих комірок (а) і оптичного блока (б) від довжини хвилі λ .

Питання про співвідношення між розсіюванням і поглинанням поки що не підлягало спеціальному вивченню, головним чином тому, що при розв'язуванні ряду чисто технічних задач, як правило, достатньо знати інтегральні втрати, тобто коефіцієнт екстинкції.

2.2. ПРИСТРІЙ ОБРОБКИ ОПТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ СВІТЛОДІЛИЛЬНИХ ПРИЗМ

Оптичний пристрій призначений для виконання операцій розмноження, об'єднання оптичного зображення, трансформації із зсувом по осях X і Y , поворотом навколо осі, масштабування оптичної інформації із заданою дискретністю.

Складається він із трьох основних функціональних блоків. Два з них чисто оптичні, що складаються із набору призм з світлоділильними 2 і відбивальними площинами 1. Кожна із призм 1 механічно зсунута відносно призмного блока 2 в напрямку оптичної осі, що забезпечує дискретність зміщення зображення.

Третій – електронний блок, формує згідно з певним алгоритмом потрібні коди і керує напругу для оптичних модуляторів (рідинно-кристалічні затвори – РКЗ) і електронно-оптичних перетворювачів (ЕОП).

Блок складається із дев'яти електронно-оптичних перетворювачів – 4, дванадцяти рідинно-кристалічних затворів – 3 тільки по одній осі X (рис.2.10). Аналогічний блок для зміщення зображення по осі Y , але повернутий відносно першого на 90° вздовж оптичної осі.

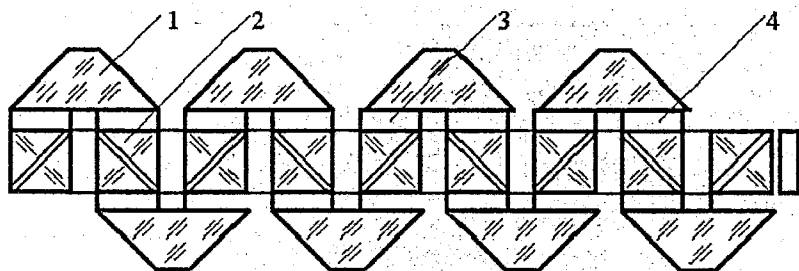


Рис.2.10. Канал пристрою зміщення оптичного зображення по осі X

Принцип роботи пристрою полягає в тому, що за допомогою світлоділильних і відбивальних поверхонь, зміщених одна відносно одної на свою певну величину і оптичних модуляторів РКЗ, встановлених між ними, формується два канали розповсюдження оптичного зображення. В одному з них оптичний сигнал терпить просторове зміщення, а в другому – ні. Вибір того чи іншого шляху передачі зображення встановлюється за допомогою РКЗ, на електричні входи яких подається цифровий керуючий код, який однозначно відповідає потрібному зміщенню.

Зміщення зображення досягається шляхом ввімкнення відповідного числа призменних блоків за допомогою РКЗ, а компенсація інтегральних втрат, які виникають при передачі зображення через оптичну частину, здійснюється поетапно ЕОПами. Пристрій відрізняється від відомих оптико-механічних і електронних пристроїв розгортання зображення з допомогою автоматичного вибору зміщення, відсутністю механічних вузлів, паралельністю обробки інформації, високою швидкістю дії. Керування зміщенням зображення за допомогою електронних вузлів значно може розширити функціональні можливості методу і пристрою.

Система керування призначена для керування процесом обробки інформації по каналах зміщення, повороту, масштабування, дає змогу змінювати крок, частоту зміщення, повороту. В схемному розв'язанні система керування представляє собою задавальний генератор імпульсів зібраний на мікросхемах серії K155, ЛА3, ІЕ4, ІЕ1; лічильник – перетворювач, зібраний на двох мікросхемах K155, ІЕ5 і підсилювач напруги. Задавальний генератор забезпечує на виході імпульси частотою від 1 Гц до 12 МГц.

Існує два режими роботи системи керування: ручний, автоматичний. Робота системи керування в ручному режимі дає змогу змінювати крок зміщення, поворот зображення від 0,1 мм до 12,5 мм. Автоматичний режим роботи системи керування дає можливість змінювати частоту зміщення, повороту зображення від 1 Гц до 12 МГц з кроком 0,1 мм. Блок-схема системи керування зображена на рис.2.11.

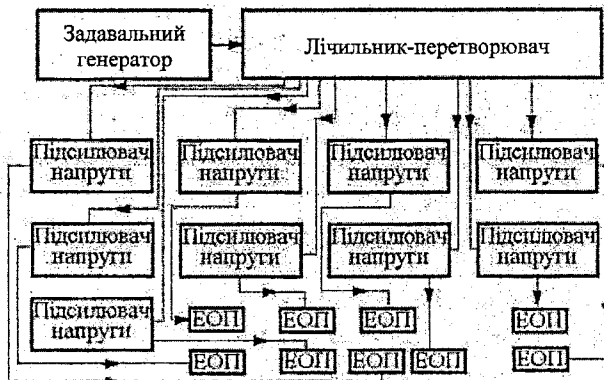


Рис.2.11. Блок-схема системи керування

При подачі першого імпульсу з виходу задавального генератора на вхід лічильника-перетворювача на його першому вході з'являється імпульс, який підсилювачем напруги підсилюється за амплітудою до 10 КВ і подається на перший ЕОП, що підсилює інтенсивність зображення. Другому за часом імпульсу відповідає поява імпульсу на виході 2, третьому на виходах 1,2 лічильника-перетворювача і так далі згідно із законом перетворення десяткової системи числення в двійкову. Таке почергове ввімкнення ЕОПів дає змогу здійснювати автоматичне зміщення зображення з певним, наперед заданим, кроком-дискретом 0,1 мм. В ручному режимі системи задавальний генератор, лічильник-перетворювач, підсилювач напруги блокуються і шляхом механічного натискання кнопок вмикаються певні ЕОПи. Вибірково вмикаючи певні ЕОПи, цим самим вибирають крок зміщення. Частота зміщення при цьому залежить від часу механічного вмикання кнопок.

Оскільки керування зміщенням здійснюється шляхом подачі високої напруги 10 КВ на кожний ЕОП з певною частотою, виникають значні труднощі, пов'язані з усуненням іскріння, можливих пробоїв. Крім цього, використання великої кількості РКЗ, які за своїми фізичними властивостями дуже чутливі до змін напруги, магнітних, механічних і температурних дій, що може призвести до великої ймовірності появи помилок, спотворень на виході пристрою обробки зображення.

2.3. ПРИСТРІЙ ОБРОБКИ ОПТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗВОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Оптичний пристрій призначений для виконання операцій розмноження, об'єднання оптичного зображення, трансформації із зсувом по осях X і Y, поворотом навколо осі, масштабуванням оптичної інформації із заданою дискретністю. Він складається з таких функціональних блоків (рис.2.12): 1 – блок введення зображення; 2 – блок розділення оптичного

зображення; 3 – блок транспарантів; 4 – блок підсилення; 5 – блок зворотного зв'язку; 6 – блок високовольтного живлення; 7 – блок керування.

Блок введення зображення представляє собою пристрій, за допомогою якого здійснюється переміщення фотоплівки або перфострічки, на яких міститься зображення, необхідне для введення.

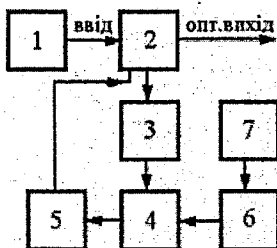


Рис. 2.12. Блок-схема пристрою оброблення оптичного зображення

Блок розділення оптичного зображення з'єднаний безпосередньо з блоком введення зображення і призначений для розділення зображення на два напрямки (потоки), які розрізняються за інтенсивністю, і передача одного із них через світловоди на блок транспарантів. Блок розділення оптичного зображення складається із оптичного багатоступеневого блока і чотирьох світловодів. Оптичний багатоступеневий блок, в свою чергу, складається із чотирьох оптичних комірок – світлоділительних кубиків, кожен з яких між собою з'єднаний і представляють собою дві напилені і склеєні по гіпотенузній площині, призми.

Розділення оптичного зображення на два напрямки досягається напівпрозорістю діагональних площин кожної оптичної комірки, на яку потрапляє первинне зображення. Частина його відбивається і поступає в світловоди, а друга частина надходить в наступну комірку і далі на оптичний вихід.

Блок транспарантів призначений для введення механічним шляхом початкової дискретної величини зміщення по X і Y ; повороту навколо осі, масштабування.

Блок підсилення виконує функцію підсилення оптичного зображення, яке поступило з транспарантів і передачі підсиленого зображення в блок зворотного зв'язку. Складається блок підсилення із чотирьох електронно-оптичних перетворювачів, підсилювачів інтенсивності світла типу ЕП-16.

Блок зворотного зв'язку призначений для прийому і передачі зображення з блока підсилення на вихідні комірки. Він складається із чотирьох світловодів з квадратним перерізом.

Блок високовольтного живлення призначений для подачі високої напруги на блок підсилення електронно-оптичних перетворювачів і являє собою високовольтний стабілізатор напруги.

Блок керування слугує для керування процесом обробки інформації. Він складається із панелі керування і задавального генератора. Принцип роботи пристрою замкнений, циклічний з дискретністю кожного циклу по осях X і $Y - 0,1$ мм, поворотом зображення навколо осі Z з дискретністю 1° і масштабуванням зображення з коефіцієнтом стискування-розтягнення $0,05 - 1,6$; кроком $0,05$.

Принципова схема пристрою обробки зображення представлена на рис.2.13, який складається: 1 – блок введення зображення, 2 – блок розділення оптичного зображення, 3 – блок транспарантів, 4 – блок підсилення, 5 – блок зворотного зв'язку, 6 – блок високовольтного живлення, 7 – блок керування. На схемі оптичний сигнал позначено \rightarrow , електричний сигнал - - -.

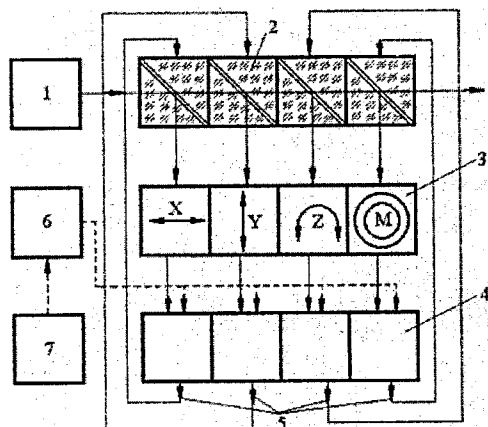


Рис.2.13. Принципова схема пристрою обробки оптичного зображення

Із фотоплівки або перфострічки, що знаходяться в блоці введення 1 світлове зображення потрапляє в блок розділення 2, де ділиться на два напрямки (потоки), один з яких через світловоди поступає в блок транспарантів 3, де задається первинне дискретне зміщення зображення по осях X , Y , поворот відносно осі Z і масштабування. Другий потік проходить через наступні оптичні комірки на оптичний вихід, де спостерігач фіксує первинне положення оптичного зображення. Первинне дискретне зміщення зображення по осях X і Y , поворот відносно осі Z і масштабування задаються механічним шляхом перед початком роботи, а потім при повороті циклів дискретності щодо зміщення, повороту і масштабування здійснюється автоматично. Вибір оптичного зображення виконується шляхом вмикання одного із каскадів підсилення, який цікавить в даний момент спостерігача.

Після блока транспарантів вибране зображення із заданою дискретністю потрапляє через світловоди на блок підсилення 4, де відбувається його підсилення в декілька разів більше за інтенсивністю, ніж компенсуються втрати яскравості зображення.

З блока підсилення через блок зворотного зв'язку 5 (світловоди) оптичне зображення, зміщене на дискретну величину, в блоці транспарантів, відносно вхідного – потрапляє в блок розділення оптичного зображення, де закінчується перший цикл і починається другий. Одне із розділених і вже зміщених зображень через світловоди, знову проходить в блок транспарантів, а друге, зміщене на дискретну величину відносно початкового, потрапляє в оптичний вихід, де спостерігач фіксує зміщення першого циклу оптичного зображення відносно початкового вхідного. І так далі цикли зміщення повторюються із заданою дискретністю. На екрані фіксуються зміщення оптичного зображення після кожного циклу відносно вхідного.

2.4. СВІТЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВТРАТ В ПРИБОРАХ ОБРОБКИ ОПТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Для визначення втрат в світловому циклі при передачі оптичного зображення через першу оптичну комірку необхідно врахувати значення втрат на кожному елементі пристрою обробки оптичного зображення, через який проходить світловий потік.

Для визначення значень, які розділяють світлові потоки на багатоступеневому оптичному блоці необхідно визначити коефіцієнт відбиття R і пропускання T . Для того, щоб досягти однакових за величиною початкових потоків, що потрапляють із комірки в оптичні цикли, необхідно світловий потік, який несе інформацію Φ_0 розділити на п'ять потоків ($\Phi = \Phi_0/5$).

Введемо позначення:

- Φ_{Ri} – потік, відбитий від i -тої комірки;
- Φ_{Ti} – потік, що пройшов через i -ту комірку;
- R_i – коефіцієнт відбиття i -тої комірки;
- T_i – коефіцієнт пропускання i -тої комірки;
- α_i – коефіцієнт поглинання i -тої комірки;
- Φ_i – потік, що потрапив в i -ту комірку.

Визначимо коефіцієнти відбиття і пропускання для кожної комірки:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\Phi_{R1}}{\Phi_1} = 0,2 & T_1 &= [1 - (\alpha_1 + R_1)] \approx 0,8 \\
 R_2 &= \frac{\Phi_{R2}}{\Phi_2} = 0,25 & T_2 &= [1 - (\alpha_2 + R_2)] \approx 0,75 \\
 R_3 &= \frac{\Phi_{R3}}{\Phi_3} = 0,33 & T_3 &= [1 - (\alpha_3 + R_3)] \approx 0,67 \\
 R_4 &= \frac{\Phi_{R4}}{\Phi_4} = 0,5 & T_4 &= [1 - (\alpha_4 + R_4)] \approx 0,5
 \end{aligned}$$

З урахуванням втрат відбиття на границі розділу скло-повітря (5%), потік, що входить в оптичну комірку складає $0,95\Phi_0$. Світловий потік, що проходить крізь світло-діляльну оптичну комірку, також зазнає втрат на

розсіювання (σ) і поглинання (α), рівних коефіцієнту екстинкції:

$$k = \alpha + \sigma = 10\%$$

Таким чином, світловий потік із урахуванням коефіцієнта екстинкції дорівнює 0,9 Φ_0 . Враховуючи технологію виготовлення багатоступеневого оптичного блока, кожна із його чотирьох комірок відбиває в канал (світловий цикл) 0,2 основного потоку.

Згідно з результатами вимірювання коефіцієнт світлопропускання, для вибраної партії світловодів, знаходиться в межах (0,55 - 0,6) Φ_0 .

Таким чином, коефіцієнт пропускання одного оптичного циклу виражається загальним співвідношенням:

$$T_{циклу} = T_{вх} \times T_{екст} \times T_{комірки} \times (T_{світлв})^3 = 0,95 \times 0,9 \times 0,2 \times (0,6)^3 = 0,036936.$$

Коефіцієнт перетворення ЕОПа, який входить в блок підсилення, дорівнює відношенню світлового потоку, що випромінює екран ЕОПа, до потоку, що потрапив на фотокатод:

$$K = \frac{\Phi_2}{\Phi_K} = \frac{\Phi}{\Phi_4} = \frac{1}{0,036936} \approx 27$$

при цьому $\Phi_e = \Phi = 1$; $\Phi_K = 0,036936\Phi_4$.

Для визначення затрат світлового потоку при проходженні його крізь багатоступеневий оптичний блок, необхідно врахувати коефіцієнт пропускання кожної комірки цього блока, оскільки всі елементи пристрою, крізь які проходить світловий потік – зміщені по осях X, Y, повороту навколо осі Z і масштабування – однакові за своїм конструктивним і технічним виконанням, крім комірок багатоступеневого оптичного блока, де кожна комірка має різний коефіцієнт пропускання.

Введемо позначення:

$T_{ц}(x, y, z, m)$ – коефіцієнт пропускання циклу;

$K(x, y, z, m)$ – коефіцієнт блока підсилення;

T_c – коефіцієнт пропускання світловодів;

n – кількість світловодів;

$T_{я}$ – коефіцієнт пропускання комірки.

Визначимо пропускання циклів зміщення, повороту і масштабування

$$T_{ц}(x) = K(x) \cdot T_c^n \cdot T_{я1} = 0,8 \cdot K(x) \cdot T_c^n$$

$$T_{ц}(y) = K(y) \cdot T_c^n \cdot T_{я2} = 0,75 \cdot K(y) \cdot T_c^n$$

$$T_{ц}(z) = K(z) \cdot T_c^n \cdot T_{я3} = 0,67 \cdot K(z) \cdot T_c^n$$

$$T_{ц}(m) = K(m) \cdot T_c^n \cdot T_{я4} = 0,5 \cdot K(m) \cdot T_c^n$$

На вхід кожного із циклів потрапляють однакові за величиною світлові потоки, що дорівнюють 0,2 Φ_0 , де Φ_0 – потік, який потрапляє в багатоступеневий оптичний блок.

Проходячи по кожному із оптичних циклів величини вхідних потоків змінюються в залежності від пропускання циклів. Визначимо величину світлового потоку, що пройшов по кожному циклу один раз:

$$\Phi_{\Pi}(x)=0,2\Phi_0T_{\Pi}(x)=0,16 \cdot K(x) \cdot T_c^n \cdot \Phi_0$$

$$\Phi_{\Pi}(y)=0,2\Phi_0T_{\Pi}(y)=0,15 \cdot K(y) \cdot T_c^n \cdot \Phi_0$$

$$\Phi_{\Pi}(z)=0,2\Phi_0T_{\Pi}(z)=0,13 \cdot K(z) \cdot T_c^n \cdot \Phi_0$$

$$\Phi_{\Pi}(M)=0,2\Phi_0T_{\Pi}(M)=0,10 \cdot K(M) \cdot T_c^n \cdot \Phi_0$$

Визначимо коефіцієнт підсилення блока підсилення для кожного циклу:

$$K(x) = \frac{\Phi_{\Pi}(x)}{0,16 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0} \quad K(z) = \frac{\Phi_{\Pi}(z)}{0,13 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0}$$

$$K(y) = \frac{\Phi_{\Pi}(y)}{0,15 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0} \quad K(M) = \frac{\Phi_{\Pi}(M)}{0,1 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0}$$

Блок підсилення пристрою обробки оптичного зображення мусить бути підібраним з розрахунком, щоб величина світлового потоку, який пройшов по циклу, дорівнювала величині вхідного світлового потоку, тобто світлові втрати мусять бути компенсовані блоком підсилення. Тому для розрахунку коефіцієнта підсилення (перетворення) блока підсилення, приймемо:

$$\Phi_{\Pi}(x) = \Phi_{\Pi}(y) = \Phi_{\Pi}(z) = \Phi_{\Pi}(M) = \Phi_0 = 1$$

Тоді:

$$K(x) = \frac{\Phi_{\Pi}(x)}{0,16 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0} \approx 29 \quad K(z) = \frac{\Phi_{\Pi}(z)}{0,13 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0} \approx 36$$

$$K(y) = \frac{\Phi_{\Pi}(y)}{0,15 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0} \approx 31 \quad K(M) = \frac{\Phi_{\Pi}(M)}{0,1 \cdot T_c^n \cdot \Phi_0} \approx 45$$

Для спрощення складання блоків підсилення із урахуванням стандартизації деталей, можна монтувати однакові електронно-оптичні перетворювачі з коефіцієнтом підсилення в межах (30-45).

Пристрій обробки оптичної інформації з використанням зворотного зв'язку має ряд переваг в порівнянні із пристроєм обробки оптичної інформації на основі світлоділительних призм:

- значне зменшення кількості основних елементів і деталей
- значне зниження ваги і габаритів;
- простота складання і з'єднання вузлів, елементів пристрою;
- зниження собівартості приладу в 2-3 рази;
- спрощення схеми керування.

2.5. ЕЛЕКТРООПТИЧНІ МОДУЛЯТОРИ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЗАСТОСУВАННЯ

Задачу обробки зображення в найпростішому вигляді можна звести до трьох підзадач. Це – відхилення зображення по двох осях, здійснення повороту зображення і зміна його масштабу.

Розв'язання першої підзадачі (відхилення зображення по двох координатах) представляється можливим на основі використання електрооптичних і акустичних модуляторів.

Розроблено цілий ряд різноманітних модуляторів і перемикачів, заснованих на використанні електрооптичного керування відбиття і дифракції світла.

Робота дифракційних модуляторів базується на ефекті Бретта, зображеному на рис.2.14. Він складається із пари електродів, переплетених один з одним. Напруга, що подається на електроди змінює показник заломлення матеріалу під електродами, формує в хвилеводі ефективну оптичну решіткову картину.

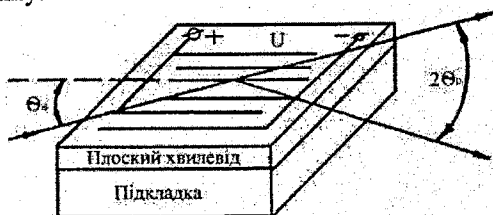


Рис.2.14. Будова дифракційного модулятора

Ця решітка викликає зміну в напрямку розповсюдження світлового пучка. Якщо напрямок пучка світла в хвилеводі вибрано так, що останній падає на штрихи цієї решітки під кутом Θ_b ефекта Бретта, то світло дифрагує з максимальною ефективністю при куті $2\Theta_b$ по відношенню до вхідного пучка.

Можна показати, що кут Θ_b задається співвідношенням:

$$\sin \Theta_b = \frac{\lambda_0}{2\lambda_g}$$

де λ – період решітки; n_g – ефективний показник заломлення хвилеводу.

Якщо вхідний пучок падає на решітку під кутом, який відрізняється від кута Бретта, то випромінювання все ж таки терпить дифракцію в межах кута $\Delta\Theta_b$, але з меншою ефективністю. Діапазон зміни кута $\Delta\Theta_b$ при 50-відсотковому зменшенні ефективності визначається співвідношенням:

$$\Delta\Theta_b = 2\lambda/L$$

для малих кутів Θ_b , оскільки при цьому $\sin \Theta_b \approx \Theta_b$.

Інтенсивність дифрагованого випромінювання залежить від прикладеної електричної напруги і, як правило, визначається:

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 UB$$

де I – інтенсивність дифрагованого світла при наявності прикладеної напруги U I_0 – інтенсивність світла, що пройшло; B – постійна, що залежить

від показника заломлення хвилеводу і вибраного елемента електрооптичного тензора.

Такий електрооптичний модулятор на основі дифракції Брегга був вперше запропонований Хаммером і незалежно Гіаруссо і Харрісом. Хаммер продемонстрував ефективну модуляцію за допомогою решітки в хвилеводах із ZnO , вирощених на епітаксильній технології на підкладці із сафіру, і в хвилеводах із $LiNb_xTa_{(1-x)}O_3$ на підкладках $LiTaO_3$. Теоретична модель була розроблена Лі і Вангом. Більш пізніші роботи показали, що можна виготовити досить ефективні електрооптичні модулятори з дифракцією Брегга, якщо чітко витримувати геометричний рисунок і допустити відхилення решіток.

Так, наприклад, був сформований модулятор, утворений дифузиею Ti в $LiNbO_3$, який мав багатосекційну решіткову структуру, спеціально розроблену для досягнення великої ефективності.

Вимірювання показали, що ефективність дифракції склала 30:1 (24,7 Дб) і довжині хвилі 1,06 мкм, а також при коефіцієнті послаблення 250:1 (24 Дб) і довжині хвилі 6328 Å. Поряд із подібними видами електрооптичних модуляторів використовуються хвилеводні електрооптичні модулятори. Вони відрізняються низькою споживчою потужністю, необхідною для їх роботи.

Кількісне порівняння потужності, яка споживається у випадку хвилеводних і об'ємних електрооптичних модуляторів зручно провести на простому, але загальному виразі для середньої потужності, що споживається на максимальній частоті, яка відповідає ширині його смуги Δf . У випадку 100% модуляції ця потужність визначається:

$$P_e = \Delta f \cdot \omega$$

де ω – енергія, що підводиться до пристрою від зовнішнього джерела.

В випадку ідеального електрооптичного модулятора, вся ця енергія без омичних втрат йде на підтримання електричного поля між електродами. Тому можна прийняти, що

$$\omega = \frac{1}{2} \int \epsilon E_a^2 dv$$

де E_a – пікова напруга, прикладеного електричного потенціалу; ϵ – діелектрична проникність матеріалу. Інтеграл береться по всьому об'ємові, що охоплює електричне поле.

Якщо для простоти вважати, що все електричне поле обмежується об'ємом модулятора, і крім цього, його величина одноріднорозподілена по всьому об'ємові, тоді:

$$\omega = \frac{1}{2} \epsilon \cdot w \cdot t \cdot L \cdot E_a^2$$

де w – ширина, t – товщина, L – довжина об'єму модулятора.

Використовуючи останній вираз, можна стверджувати, що потуж-

ність, яка споживається, необхідна для перемикаання модулятора і визначається:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \Delta f \cdot \varepsilon \cdot w \cdot t \cdot L \cdot E_a^2$$

Головною особливістю наведеного виразу є те, що енергія, яка споживається при модулюванні, пропорційна робочому об'ємові модулятора. Таким чином, якщо порівняти об'ємний модулятор з планерним хвилеводним, то, очевидно, що в другому випадку потужність, яка споживається, значно нижча.

Ще більшого зменшення потужності, що споживається, можна досягти при використанні каналних хвилеводних модуляторів, таких як зображений на рис.2.15.Такий електрооптичний модулятор дає змогу зменшити потужність, що споживається в порівнянні із звичайними хвилеводними електрооптичними модуляторами на порядок.

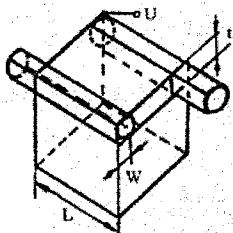


Рис.2.15. Канальний хвилеводний модулятор

Проте, наведені вище типи модуляторів світлового потоку мають ряд недоліків: достатньо велика інерційність, тобто значний час перемикаання; обмеженість робочого діапазону частот; велика вартість; необхідність використання для керування їх роботою при високих напругах від 500В до 4÷8кВ, які необхідно для точного відхилення зображення подавати теж з великою точністю, що складає труднощі у зв'язку з неоднозначністю втрат в трактах високої напруги. Для усунення більшості перерахованих недоліків, пропонується використовувати модулятори світлового потоку, які працюють на акустооптичному ефекті.

2.6. АКУСТООПТИЧНІ МОДУЛЯТОРИ, ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Акустичні хвилі можна використовувати для отримання бажаного періодичного розподілу показника заломлення. Акустооптичний ефект полягає в зміні показника заломлення, що викликається механічними напруженнями, які виникають при проходженні пружних акустичних хвиль по матеріалу. В результаті цього має місце періодична зміна показника заломлення, причому довжина хвилі рівна довжині акустичних хвиль, які розповсюджуються.

Акустооптичні модулятори є двох типів: Бреґа і Рамма-Ната, які

відрізняються один від другого довжиною взаємодії між акустичними і оптичними хвилями.

Розглянемо основні принципи акустооптичного ефекту. Механічна напруга в твердому тілі призводить до зміни його показника заломлення, який діє на фазу світлової хвилі, розповсюджується по цьому напруженому середовищу. Цей напружений фотоэффект, як його називають, можна описати тензором четвертого рангу (тензором фотопружності), який пов'язує тензор напружень з оптичною індикатрисою, оскільки електрооптичний тензор характеризує зміни в індикатрисі, що наводить електричне поле.

У випадку акустооптичного ефекту в матеріалі за рахунок проходження акустичних хвиль виникає механічне напруження. Тому таке напруження викликає зміни показника заломлення за рахунок фотопружного ефекту.

Взаємозв'язок між зміною показника заломлення і акустичними потужностями виражається таким рівнянням:

$$\Delta n = \sqrt{\frac{n^6 p^2 10^2 P_a}{2 \rho v_a^3 A}}$$

де n – показник заломлення середовища при відсутності механічного напруження; p – відповідний елемент тензору фотопружності; P_a – повна акустична потужність; ρ – густина матеріалу; v_a – швидкість звукових хвиль; A – площа поперечного перерізу зразку, крізь який проходить хвиля.

Якщо використати звичайний акустооптичний критерій якості M , то цей вираз можна переписати таким чином:

$$\Delta n = \sqrt{\frac{M_2 10^2 P_a}{2 A}}$$

де M_2 – визначається за формулою

$$M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v_a^3}$$

В кристалічних тілах, які в основному використовуються в якості підкладок, акустооптичний ефект має яскраво виражену залежність від орієнтації. Проте, цей ефект порівняно слабкий навіть для оптимальних випадків підбору матеріалів і орієнтації. Наприклад, при довжині хвилі випромінювання 6328 \AA для плавленого кварцу величина M_2 складає $1,51 \times 10^{-18} \text{ с}^3/\text{см}$, а для Li Nb O_3 вона складає $6,9 \times 10^{-18} \text{ с}^3/\text{см}$. Таким чином, величина Δn для цих матеріалів має порядок 10^{-4} навіть у випадку використання акустооптичного випромінювання з густиною потужності $100 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Не дивлячись на таку малу величину Δn , яку можна отримати за допомогою акустичних хвиль, повна їх дія на пучок світла може бути досить суттєвою, оскільки кожна, нехай незначна, різниця Δn , створювана піком напруження акустичної хвилі, приводить до оптичних взаємодій, які можуть накопичу-

ватись (або не накопичуватись), якщо забезпечено узгодженість. Таким чином, можна отримати різні дифракційні ефекти.

Акустооптичні модулятори і перемикачі застосовуються в інтегральних оптичних схемах, які ґрунтуються на використанні акустичних хвиль. Тому індукуюча решіткова структура профілю показника заломлення матеріалу фактично рухається відносно оптичного пучка. Проте, такий рух надає незначну дію на роботу більшості пристроїв. Середня дія, пов'язана з таким рухом решітки, ідентична дії решітки, яка знаходиться в стаціонарному стані, за винятком того, що спектр m -го порядку дифракції зсунутий за частотою на величину $\pm mf_0$, де f_0 – частота акустичних хвиль. Оскільки звукові частоти, як правило, на 10 порядків за величиною менші оптичних, то даний ефект дуже незначний.

Дифракції оптичних хвиль можна досягти за рахунок взаємодії з об'ємними акустичними хвилями, які проходять крізь об'єм середовища, з поверхневими акустичними хвилями, які розповсюджуються в приповерхневому шарі, рівному довжині хвилі звуку. Оскільки оптичні хвилеводи мають товщину всього декілька мікрометрів, то поверхнево-акустичні модулятори і перемикачі сумісні з більшістю оптичних інтегральних схем.

Незалежно від типу акустичних хвиль, що використовуються (об'ємних і поверхневих), можливі два основні типи модуляції. В модуляторах типу Романа-Ната промінь світла падає перпендикулярно акустичному пучку і довжина взаємодії між ними (тобто ширина акустичного пучка) відносно мала, тому оптичні хвилі терплять лише просту дифракцію на разовій решітці, що призводить до отримання ряду інтерференційних полісків в картині дальнього поля. Якщо акустичний пучок настільки широкий, що оптичні хвилі терплять багатократну дифракцію, перш ніж, залишать акустичний пучок, то в цьому випадку отримуємо суттєво іншу дифракційну картину. В такому випадку дифракція подібна об'ємній дифракції рентгенівського випромінювання на великій кількості атомних площин в кристалі, яку вперше спостерігав Брегг.

В акустичних модуляторах типу Брега оптичний пучок направляють під певним кутом (кутом Брега) до штрихів решіткової структури, яка отримується за допомогою звуку і при цьому спостерігається лише один дифракційний максимум в картині випромінювання в дальньому полі.

Вихідним каналом в модуляторах Романа-Ната беруть дифракційний пучок світла нульового порядку. В такому випадку глибина модуляції рівна частині світла, що пропадає за рахунок дифракції з дифракційного пучка нульового порядку і задається співвідношенням:

$$\eta_{PH} = [I_0 - I_{(m=0)}] = 1 - [I_0(\Delta\varphi')]^2$$

Модулятори Романа-Ната, як правило, мають велику глибину модуляції в порівнянні з модуляторами Брега. Крім того, модулятори Романа-Ната, хоча й викликають певну зацікавленість з теоретичної точки зору,

але в інтегральних оптичних схемах використовуються порівняно рідко. В протилежність цьому, модулятори Брегга достатньо широко використовуються в якості модуляторів інтенсивності пучка, дефлекторів і перемикачів оптичних пучків і найбільше підходять для відхилення оптичних зображень по двох координатах.

Застосування акустооптичних модуляторів дозволяє розв'язати просто і з невеликими апаратними затратами питання, пов'язані з відхиленням зображення по двох координатних осях.

На відміну від електронно-оптичних перетворювачів з відхиленням, акустичні модулятори можуть працювати в когерентних трактах оптичних систем, а також в акустооптичних пристроях не відбувається додаткових перетворень носія інформації, що, як правило, приводить до його втрат. Акустооптичні пристрої, призначені для відхилення зображень, можуть бути побудовані за двома варіантами оптичних схем. В першому варіанті акустооптичні комірки розташовуються поблизу об'єктива, який виконує перенесення зображення із вхідної площини у вихідну (рис.2.16).

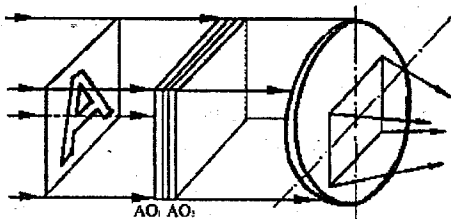


Рис.2.16. Акустооптичний пристрій з одним об'єктивом

Проте, більшу перевагу віддають варіанту оптичної схеми, зображеної на рис.2.17, в якому для перенесення зображення використовується два об'єктиви. В такому випадку акустооптичні комірки розташовуються в фокальній площині вхідного об'єктива O_1 . Вказана схема має ще й ту перевагу, що дає змогу здійснити вибір масштабу вихідного зображення. Масштаби вихідного і вхідного сигналів визначаються фокусною відстанню об'єктивів O_1 і O_2 . Крім того, дана схема характеризується слабким впливом неоднорідності дифракційних ефектів акустооптичних комірок по робочому полю на якість передачі зображення.

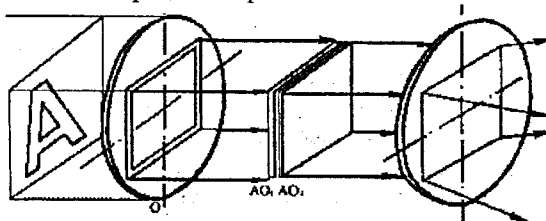


Рис.2.17. Акустооптичний пристрій з двома об'єктивами

Інформативність відхиленого зображення обмежується як лінійною, так і кутовою апертурою акустооптичних комірок, при цьому число роздільних елементів у вихідному зображенні M описується простою залежністю:

$$M = \frac{A\Omega}{\lambda}$$

де A – лінійна апертура акустооптичних комірок; λ – робоча довжина хвилі світла.

Кількість роздільних положень пристрою відхилення визначається звичайним способом:

$$N = \tau \cdot \Delta f$$

де τ – апертурний час акустооптичних комірок; Δf – смуга робочих частот.

Акустооптичні дефлектори, призначені для роботи в паралельних пучках світла, з успіхом можуть використовуватися і для відхилення зображень, проте в силу обмеженості їх кутової апертури, що досягає в кращому випадку $0,5^\circ \div 1^\circ$ інформативність зображень, які відхиляються, обмежується величиною порядку 200×200 роздільних елементів.

Використання особливостей акустооптичних дифракцій в анізотропних середовищах, дає змогу виготовити спеціалізовані комірки, які забезпечують відхилення зображень з роздільністю в стандарті для високороздільних телевізійних систем. Покращення параметрів системи відхилення при цьому досягається за рахунок збільшення кутової робочої апертури акустооптичних комірок шляхом геометрії взаємодії світла і звуку.

На основі вищесказаного розроблені і виготовляються анізотропні комірки із монокристалів TeO_2 і Li NbO_2 із збільшеною кутовою апертурою, призначені для двокоординатного відхилення зображення. Світлозвукотводи акустооптичних комірок виконані таким чином, що нешвидка зсувна акустична хвиля, яка формується за допомогою п'єзоперетворювача із ніобата літія зрізу Y_{+163} , розповсюджується під кутом 6° до осі, оптичні грані нахилені по відношенню до площини (001), забезпечує розповсюдження пучка під кутом біля $13,5^\circ$ до оптичної осі (001).

Кріплення п'єзоперетворювачів здійснюється методом холодного індієвого зварювання. Довжина взаємодії вибирається достатньо малою $L \approx 0,7 \div 0,75$ мм, що дає змогу при центральній частоті $f = 66,5 \div 80$ МГц забезпечити смугу робочої частоти $\Delta f \geq 5$ МГц.

Все вищевикладене доводить можливість побудови двох координатних пристроїв відхилення зображення на основі акустооптики. Використання при цьому анізотропних акустооптичних комірок із спеціальною геометрією взаємодії, яка забезпечує збільшення системи кутової апертури комірок, дає змогу створити високороздільні системи відхилення зображення. Необхідно також розглянути схему керування акустооптичним пристроєм. Ясно, що вона мусить мати керування за частотою – високочастотний генератор.

В якості відхиляючого пристрою пропонується використовувати акустооптичні модулятори МЛ-201. Їх робоча звукова частота – 80 МГц. Довжина хвилі світла 6328 А. В блок-схемі (рис.2.18): 1 – цифрове набірне поле, 2 – генератор опорної напруги, 3 – високочастотний генератор, 4 – акустооптичний модулятор.

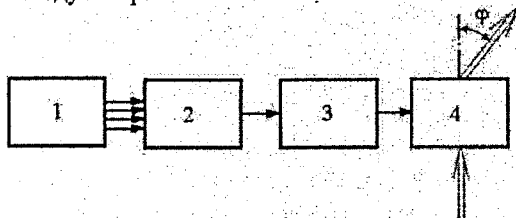


Рис.2.18. Блок-схема пристрою керування двокоординатним акустооптичним дефлектором

На набірнім полі набирається номер положення відхиленого зображення, який визначає разом із кроком відхилення зображення його положення в просторі. На виході набірнього поля формується цифровий код, який керує генератором опорної напруги.

Цей генератор 2 дає постійний сигнал на керуючий вхід генератора високої частоти 3, тим самим розстроюючи його відносно опорної частоти 80 МГц. Зміна частоти високочастотних коливань, які подаються на акустооптичну комірку, приводить до зміни умов дифракції Брегга в кристалі, і тим самим відбувається відхилення зображення.

2.7. СИСТЕМА ОБРОБКИ ТА ЗАПИСУ ОПТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Задача обробки оптичного зображення – масштабування і поворот, легко вирішується чисто оптичними методами. Так, питання повороту зображення розв'язується за допомогою використання оптичного тіла обертання – двопорожнинного конуса, який обертається навколо своєї осі. Якщо на вхід такого тіла обертання подавати зображення, в результаті отримаємо набір зображень, що повернуті на кут $\varphi = \varphi_0 \cdot k$, де k – номер зображення на виході.

Масштабування зображення проводять за допомогою системи дзеркал і системи фоконів. Природно, що масштаб вхідного зображення буде мати квантовий характер, а число рівнів квантування залежить від кількості фоконів.

В системі оптичної обробки та запису зображень важливим елементом є зворотний зв'язок, який служить для зациклювання зображення, яке підлягає обробці. В найпростішому випадку це система світловодів, заведених з виходу оптичного пристрою на його вхід. Проте, проблеми, які виникають при узгодженні рівнів сигналів, їх яскравісних, спектральних та

інших характеристик потребують окремого розгляду та дослідження.

На рис.2.19 зображена схема пристрою оптичної обробки та запису інформації, робота якого полягає в наступному. Вхідний світловий потік 1, потрапляє на одну із граней призми 3, через затвор 2, сприймається фотоприймальною матрицею 4. Сигнал із фотоприймачів, паралельно зі всіх, записується оптичним запам'ятовувальним пристроєм (ОЗП), що являє собою систему тригерів, стан яких (вихідна інформація) індукується за допомогою світловипромінювальної матриці 5. Таким чином, на матриці 5 буде зафіксовано вхідне зображення. Перекриваючи затвор 1а і одночасно відкриваючи затвор 2, подаючи сигнал дозволу зчитування пристроєм керування 8, дозволяється запис в ОЗП зображення з виходу світловипромінювальної матриці 5. Виконуючи зсув зображення (або поворот) на крок $\Delta x(\Delta\phi, \Delta y)$, за допомогою світловода 6, отримуємо на виході ОЗП вже перетворене зображення на один крок. Ввівши зображення в декілька тактів, кількість яких n , отримуємо вихідне зображення 7, зсунуте (повернуте) на $\Delta x \cdot n, \Delta\phi \cdot n$, або $\Delta y \cdot n$, де $\Delta x \cdot n, \Delta\phi \cdot n, \Delta y \cdot n$ відповідно рівні координатам перетворення X_n, Φ_n, Y_n .

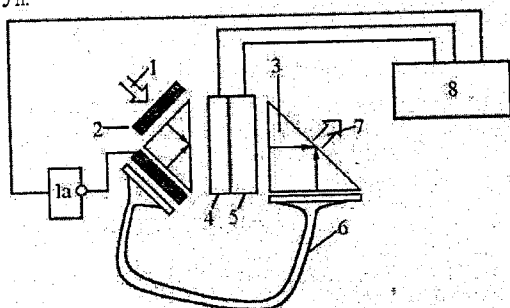


Рис.2.19. Схема пристрою оптичної обробки та запису інформації

Для отримання одночасно двох зображень – початкового і перетвореного, використовують систему дзеркал (рис.2.20).

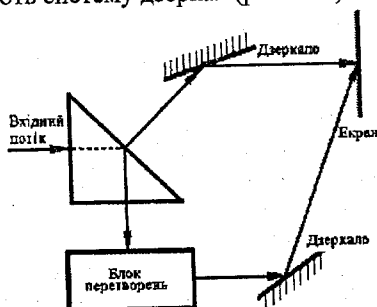


Рис.2.20. Система дзеркал для перетворення зображення

Найпростіший елемент ОЗП – тригер, на інформаційний вхід якого ввімкнений фотоприймач (фотодіод, фототранзистор). На вхід з тригера подається тактувальний синхроімпульс від пристрою керування, на один із виходів якого ввімкнений індуквальний елемент (світлодіод). Електрична схема такого найпростішого ОЗП зображена на рис.2.21.

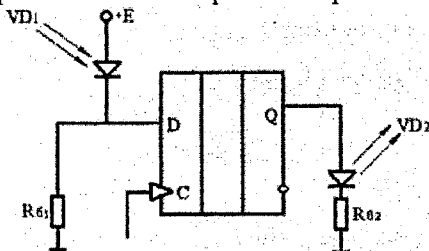


Рис.2.21. Електрична схема найпростішого ОЗП

При потраплянні світлового потоку на фотодіод VD_1 , на інформаційному вході тригера D з'являється сигнал логічної одиниці. Із приходом тактового імпульсу на вхід C , ця інформація переписується на вихід тригера Q , відповідно засвічується світлодіод VD_2 . Інформація в тригері зберігається до тих пір, доки наступний тактовий імпульс не поступить на вхід з тригера. Керуючий генератор тактових імпульсів зображений на рис.2.22.

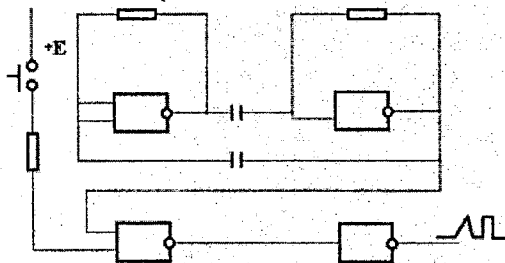


Рис.2.22. Схема керуючого генератора тактових імпульсів

В якості затворів можуть використовуватися РК-затвори, прилади акустооптики (МЗ-301), прилади електрооптики, проте, в двох останніх випадках бажано мати справу із зображенням в когерентному світлі.

Розділ 3. МЕТОДИ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ

Проблема розпізнавання продовжує викликати велику зацікавленість інженерів і дослідників різноманітних спеціальностей: радіоінженерів, фізиків, геологів, медиків, біологів, конструкторів промислових роботів, спеціалістів з космічних досліджень та ін.

Найбільш актуальними і складними вважаються задачі розпізнавання, пов'язані із аналогом зорових образів. Це пояснюється зручністю подання різного роду об'єктів і ситуацій у вигляді зображень і великої пропускної здатності зорового каналу. До недавнього часу найбільш ефективними методами розпізнавання образів вважалися голографічні. Поява перших робіт в цьому напрямку в часі збіглося з розвитком теорії розпізнавання образів, проте, спочатку (60 роки) не викликало особливої зацікавленості, оскільки голографічні методи, що реалізують кореляційний алгоритм розпізнавання, в теоретичному плані вносили мало нового. В кінці 60-х на початку 70-х років стало зрозумілим, що чекати теоретичного розв'язання проблеми розпізнавання в цілому на шляху розробки нових алгоритмів прийняття рішень не доводиться. Починали розвиватися нові підходи до розв'язання задач розпізнавання образів, що базуються на класичних методах прийняття рішень, але враховуючи специфіку образів, які розпізнаються.

3.1. ВИКОРИСТАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

Для розпізнавання зорових образів, запропонований структурно-лінгвістичний підхід (в останні роки він покладений в основу одного із напрямків робототехніки – “алгоритмічного зору”). Він є основою формального лінгвістичного написання відповідності структури зображення, що аналізується, еталону зразка. Така відповідність встановлюється за набором характерних образів – деталей зображення, для чого потрібно розпізнавати їх і вказати взаємне розташування на зображенні за допомогою будь-якого із відомих методів прийняття рішень. Проте, процес пошуку і розпізнавання різноманітних об'єктів на зображенні сам по собі є дуже складним, оскільки потребує послідовного перебору всіх елементів розкладу зображення. Разом з тим, виявилось, що методи когерентної оптики і голографії дають змогу простими апаратними засобами реалізувати паралельний аналіз великих масивів інформації і здійснити розпізнавання об'єктів із вказуванням їхніх координат практично в реальному масштабі часу. Ці методи дозволяють розв'язати і складну проблему зберігання великого числа еталонних образів. Все це привело до розробки голографічних розпізнавальних пристроїв для розв'язання різноманітних задач аналізу сигналів і зображень, введення буквено-цифрової інформації в ЕОМ, інформаційного пошуку, автоматизації наукових досліджень.

Проте, голографічні методи кореляційного аналізу із використанням голографії (когерентний кореляційний аналіз), маючи вище перераховані суттєві переваги, мають ряд недоліків, які характерні для некогерентних методів кореляційного аналізу. В останній час розробляються нові методи, засновані на теоретичних розробках ведучих організацій, які дозволяють достатньо широко використовувати для розпізнавання образів (зображень)

пристрої з некогерентними джерелами випромінювання, причому із неменшим успіхом, ніж голографічні системи і пристрої. Використання цих методів дають змогу значно спростити системи технічного зору роботизованих комплексів. Некогерентні методи дають змогу також широко використовувати частотні діапазони, які знаходяться вище і нижче видимого, що значно розширює сфери їх застосування.

Є перспективною, також, розробка методів кореляції, яка ґрунтується на комбінованих методах, а також методах, що базуються на використанні принципово інших частотних діапазонів.

3.2. ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ РОЗПІЗНАВАННІ ОБРАЗІВ

Найбільш розповсюджений підхід до розпізнавання образів полягає у встановленні відповідності між об'єктами, які розпізнаються і елементами деякого матричного простору. Кожному об'єктові відповідає деяка точка (або вектор) цього простору. Ступінь розпізнавання об'єктів визначається відстанню (в тій або іншій методиці). Цю відстань називають простором ознак, оскільки координати його елементів вибираються рівними значеннями деяких характеристик (ознак об'єктів). В якості простору опису частіше всього використовують евклідовий простір. Всі об'єкти i -го класу (образу) складають в просторі R^N деяку множину $\chi \subset R^N$, об'єкти j -го класу – множину χ_j і т.д. Достовірне розпізнавання можливе тоді, коли ці множини не перетинаються ($\chi_i \cap \chi_j = \emptyset$ для всіх $(i, j) = 1, 2, \dots, M; i \neq j$).

Перетин класів вносить в процес розпізнавання невизначеність, яка проявляється в тому, що розпізнавання об'єктів із області перетину можливе лише з певним ступенем впевненості. В зв'язку з цим синтез розпізнавальних пристроїв ціленаправлено здійснений на основі складання оптимальних (з точки зору *min* помилок) вирішальних правил. В поняття вирішального правила вкладається такий зміст.

Нехай в R^N кожному об'єктові ставиться у відповідність вектор X з координатами x_1, x_2, \dots, x_N , де x_k – значення k -ої ознаки. Якщо розбити простір R^N на M (за кількістю класів) областей, які попарно неперетинаються, що відповідають класам, які розглядаються, то вирішальне правило буде полягати у встановленні факту належності вектора X до тієї чи іншої області простору після визначення оптимальних границь цих областей.

Нехай $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, N – мірний вектор ознак, M – число різноманітних класів об'єктів, які необхідно розпізнавати, $P(\chi_i)$ – априорна ймовірність класу χ_i , $P(\chi_i/x)$ – апостеріорна ймовірність належності вектора X класові χ_i . Згідно із загальним положенням теорії статистичних рішень, введемо матрицю втрат $S = S_{ij}$, кожен елемент S_{ij} якої відповідає втратам при прийнятті рішення про належність вектора X класові χ_i , коли в дійсності він належить класові χ_j . При класифікації на M класів вектор ознак може бути віднесеним до будь-якого із них, і тоді математичне сподівання

втрата, пов'язане із прийняттям рішення про належність вектора X класові χ_j ,

$$R_j(x) = \sum_{i=1}^M S_{ij} P\left(\frac{\chi_i}{x}\right) \quad (3.1)$$

В теорії статистичних рішень величина R_j називається умовним середнім ризиком. Використовуючи до (3.1) формулу Байеса, отримаємо:

$$P\left(\frac{\chi_i}{x}\right) = \frac{P(\chi_i)P\left(\frac{x}{\chi_i}\right)}{P(x)} \quad (3.2)$$

де $P(x) = \sum_{i=1}^M P(\chi_i)P\left(\frac{x}{\chi_i}\right)$, будемо мати:

$$R_j(x) = \frac{1}{P(x)} \sum_{i=1}^M S_{ij} P(\chi_i) P\left(\frac{x}{\chi_i}\right) \quad (3.3)$$

Функція $P(x/\chi_i)$ називається функцією правдоподібності класу χ_i . Вона визначає собою густину розподілу ймовірності вектора X , при умові, що належить класові χ_i . Очевидно, що якщо для кожного вектора визначити його вагу $R_j(x)$ і відносити X до класу із мінімальним значенням R_j , тобто класові, якому відповідають мінімальні середні втрати, то математичне чекання втрат, що залежать від класифікації всіх елементів зображення на M класів також буде мінімальним. Така стратегія прийняття рішення і відповідає байєсовській класифікації.

Таким чином, відношення:

$$R_i(x) < R_j(x) \quad (3.4)$$

виконується для всіх $i, j = 1, 2, \dots, M$, і вектор X буде віднесеним до класу χ_i . Підставляючи в (3.4) значення для R_j із (3.3), отримаємо:

$$\sum_{i=1}^M S_{ij} P\left(\frac{x}{\chi_i}\right) P(\chi_i) < \sum_{i=1}^M S_{kj} P\left(\frac{x}{\chi_i}\right) P(\chi_k) \quad (3.5)$$

Ця рівність для пари класів (χ_i і χ_j) може бути записана у вигляді:

$$\frac{P\left(\frac{x}{\chi_i}\right)}{P\left(\frac{x}{\chi_j}\right)} > \frac{P(\chi_j)(S_{ji} - S_{jj})}{P(\chi_i)(S_{ji} - S_{ii})}, i = 1, 2, \dots, M; i \neq j \quad (3.6)$$

Ліва частина виразу (3.6) називається відношенням правдоподібності. Позначимо його U_{ij} . Тоді, якщо $U_{ij} > F_{ji}$, де F_{ji} – права частина виразу (3.6), то вектор X приписується класові χ_j , якщо $U_{ij} = F_{ji}$, то рішення приймається довільно. В випадку біпарної симетричної матриці втрат, що відповідає одиничним втратам при помилковому рішенні і нульовим при правильному, вирішальне правило можна сформулювати таким чином: вектор ознак X відноситься до класу χ_i , якщо:

$$P(\chi_i) P\left(\frac{x}{\chi_i}\right) > P(\chi_j) P\left(\frac{x}{\chi_j}\right), i, j = 1, 2, \dots, M; i \neq j \quad (3.7)$$

Вирази вигляду $P(\chi_i)$ $P(x/\chi_i)$, що входять в (3.7) називаються розв'язувальними функціями. Позначимо їх $D_i(x)$. Тоді в випадку $D_i(x) >$

$D_j(x)$ вектор X зараховується в клас χ_j , а в випадку $D_i(x) < D_j(x)$ – в клас χ_j . При використанні байєсовської стратегії прийняття рішення, вигляд і параметри розв'язувальних функцій визначаються на основі задання для кожного класу виборок і апріорних ймовірностей. Тому така класифікація відноситься до групи методів розпізнавання з навчанням. При невідомому вигляді функцій розподілу можуть бути використані методи оцінювання густини розподілу ймовірності, засновані на розкладі невідомої густини на ортогональні функції. Друга група методів класифікації з навчанням – непараметричні методи – не потребує інформації про вигляд функції розподілу. Найбільш ефективний із них – дискримінантний аналіз. При використанні цього методу задається загальний вигляд функції, що розв'язується, як правило, лінійний (інколи квадратичний) і виконується оптимізація положень границь між класами, яка мінімізує дисперсне відношення Фішера. Методом дискретного аналізу, найкращим чином, апроксимує байєсівське рішення за заданої форми границь, а в випадку, якщо розподіл векторів класів нормальні, метод є оптимальним. Проте, він потребує великої кількості розрахунків. Основний недолік методів класифікації з навчанням – відсутність гарантії на репрезентативність навчальних даних, а також значний час обчислення при реалізації найбільш складних методів. В останні роки розробляється підхід, який називається кластерним аналізом, що дає змогу здійснити розбиття початкового масиву даних на статично однорідні області без використання навчальних даних. При цьому розбиття (групування) даних виконується таким чином, щоб кожен вектор належав одній і тільки одній множині, яка називається кластером. Очевидно, що в залежності від прийнятого заходу близькості між елементами і між кластерами на одному і тому ж початковому масиві даних можна отримувати різні розбиття на однорідні області. Тому в розпізнаванні образів кластерний аналіз використовується все рідше.

3.3. АНАЛОГОВІ ОПТИЧНІ АНАЛІЗАТОРИ

Аналогові оптичні аналізатори можуть виконувати різноманітні функціональні перетворення сигналів і зображень. Найбільш розроблені, так звані, аналогові оптичні лічильники, які використовують когерентне світло. Вони знаходять використання при обробці радіосигналів із шумів і т. д. Основними елементами таких аналогових лічильників є когерентне джерело світла, пасивні оптичні елементи (лінзи), керуючі транспаранти і фотоприймачі. Дія такого пристрою ґрунтується на добре відомій властивості лінзи виконувати просторове перетворення Фур'є від вхідного перетворення. При такому перетворенні спектральні складові зображення розповсюджуються під різними кутами до оптичної осі системи, причому всі просторові частоти мають свої амплітуди і фази. Друга лінза, для якої входом є спектр сигналу, здійснює перетворення Фур'є спектра. Таким чином відновлюється початкове зображення. Система двох лінз являє собою ба-

зову структуру такого лічильника. Можливі і інші схеми. Наприклад, створені багатоканалні одновимірні оптичні аналізатори спектра радіосигналів на об'ємних акустичних хвилях, в яких використовується "багаторядкова" комірка Бреґга і роздільна обробка кожного "рядка". В розглянутій оптичній системі лічильника може бути здійснено велику кількість різних функціональних перетворень вхідних сигналів і зображень. З цією метою в дволінзову систему вводяться два керуючих транспаранта. Один з них поміщають у вхідній площині системи, і в цьому випадку зображення, яке обробляється, буде добутком початкового зображення на амплітудно-фазову функцію пропускання керуючого транспаранта. Другий транспарант поміщають в спектральній площині, де формується добуток спектра потрапляючих сигналів і функції пропускання керуючого транспаранта. Вибираючи дві функції, які реалізуються на обох транспарантах, можна здійснити потрібне перетворення зображення. При цьому може бути реалізовано велику кількість режимів роботи такого лічильника, при яких керуючі транспаранти можуть функціонувати як разом, так і окремо. Наприклад, при вмиканні тільки другого транспаранта (розміщеного в спектральній площині) пристрій може виконувати функції просторового фільтра, який обмежує непотрібні просторові частоти або шум. Розглянутий оптичний аналізатор може виконувати ряд обчислювальних операцій: множення, підсумовування, інтегрування, диференціювання зображення. За його допомогою можуть бути отримані інтеграли згортання і кореляції від двох зображень. Крім перерахованих, система може виконувати такі логічні перетворення над зображенням, як нормування, кодування, порівняння з еталонним зображенням, пошук відомого фрагмента, асоціативний вибір і т.п. Додаткові можливості дають зміни довжини хвилі і зміну зображення в часі.

Розділ 4. ОПТИЧНА ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ

В оптиці досить просто реалізуються операції комплексного множення (при модуляції оптичного сигналу), перетворення Фур'є (дифракційне наближення Фраунгофера). В зв'язку з цим викликає зацікавленість на основі чисто формального опису розгляд класу математичних операцій, які можуть бути реалізовані з використанням тільки двох базових операцій: множення і перетворення Фур'є.

4.1. МАТЕМАТИЧНІ ОПЕРАЦІЇ В ОПТИЧНІЙ ОБРОБЦІ ІНФОРМАЦІЇ

До математичних операцій, які можуть бути реалізовані на базі Фур'є-перетворень, можна віднести:

а) згортку функцій. Це операція згортання двох функцій $f(x)$ і $S(x)$:

$$f(x) * S(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) \cdot S(x - \xi) d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - \xi) \cdot S(\xi) d\xi \quad (4.1)$$

може бути реалізована через операції множення і перетворення Фур'є на основі теореми Бореля про розгортку:

$$F[f(x)]F[S(x)] = F[f(x) * S(x)] \quad (4.2)$$

$$F[f(x) \cdot S(x)] = F[f(x)] * F[S(x)] \quad (4.3)$$

тут $F[f(x)]$ – Фур'є образ функції $f(x)$.

$$F[f(x)] = \Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \exp(-j\omega x) dx \quad (4.4)$$

Із виразу (4.2) слідує, що для виконання операції згортання $g(x) = f(x) \cdot S(x)$ необхідно виконувати перетворення Фур'є над функціями $f(x)$ і $S(x)$, перемножити отримані Фур'є-образи і здійснити обернене перетворення Фур'є над отриманим добутком $G(x)$:

$$g(x) = F^{-1}[G(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) \exp(j\omega x) d\omega \quad (4.5)$$

Із властивостей асоціативності і дистрибутивності згортання:

$$f(x) \cdot [S(x) \cdot h(x)] = [f(x) \cdot S(x)] \cdot h(x) = f(x) \cdot S(x) \cdot h(x)$$

$$f(x) \cdot [S(x) + h(x)] = f(x) \cdot S(x) + f(x) \cdot h(x)$$

слідує, що за допомогою операції додавання, множення і перетворення Фур'є може бути організоване згортання лінійної комбінації кінцевого числа функцій.

б) диференціювання функцій. Ця операція виконується як на основі операції згортання, так і на основі перетворення Фур'є

$$F[f^n(x)] = (j\omega)^n \cdot F[f(x)] \quad (4.6)$$

де $f^n(x)$ – n -а похідна $f(x)$. Із (4.6) слідує, що

$$\frac{d^n}{dx^n} \cdot f(x) = F^{-1}\{(j\omega)^n \cdot F[f(x)]\} \quad (4.7)$$

і n -а похідна обчислюється при використанні до функції перетворення Фур'є, множення отриманого Фур'є-образу, на n -й степінь від $j\omega$ і виконання оберненого перетворення.

Для використання операції згортання використовуємо фільтрувальні властивості δ – функції і її похідних:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) \delta^n((x - \xi)) d\xi = (-1)^n f^n(x) \quad (4.8)$$

де $\delta^n(x - \xi)$ – n -а похідна δ -функції. Тоді

$$\frac{d^n}{dx^n} f(x) = (-1)^n f(x) \cdot \delta^n(x) \quad (4.9)$$

Цей результат можна розповсюдити і на диференціювання функцій декількох змінних. В випадку функції двох змінних частинна похідна порядку $n+m$ буде рівна:

$$\frac{d^n}{dx^n} \cdot \frac{d^m}{dy^m} f(x, y) = \iint f(\xi, \eta) (-1)^{n+m} \delta^n(x - \xi) \delta^m(y - \eta) d\xi d\eta \quad (4.10)$$

В якості прикладу відмітимо вагові функції згортання, які потрібні для реалізації диференціальних операторів першого і другого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) &\Leftrightarrow -\delta'(x)\delta(y) \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f(x, y) &\Leftrightarrow \delta'(x)\delta'(y) \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x, y) &\Leftrightarrow \delta''(x)\delta(y) + \delta(x)\delta''(y) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Останній оператор є не що інше як оператор Лапласа ∇^2 . Відмітимо, що його реалізація методом перетворення Фур'є зводиться до множення Фур'є-образу $F(\omega_x, \omega_y)$ функції $f(x, y)$ на функцію $-(\omega_x^2 + \omega_y^2)$.

$$\nabla^2 f(x, y) = F^{-1}[-(\omega_x^2 + \omega_y^2) \cdot F(\omega_x, \omega_y)] \quad (4.12)$$

в) інтегрування функцій. Розглянемо інтеграл типу "згортка" як операцію інтегрування з вагою. Незавжди помітити, що при ваговій функції згортання тотожно рівній одиниці, операція вигляду (а) перетворюється в звичайне інтегрування.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = f_x \{1\}; \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = F(0) \quad (4.13)$$

Доведення цього твердження виконується методом теорії узагальнених функцій.

г) зміну масштабу аргументу функції. Ця операція в загальному вигляді може бути виконана на основі перетворення, яке називається масштабним перетворенням Фур'є. Під таким перетворенням розуміють пряму і обернену операцію інтегрування.

$$F^a[f(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \exp(-j a \omega_x) dx \quad (4.14)$$

$$F^{-1}[F^a(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\omega) \exp(j a x \omega) d\omega \quad (4.15)$$

Із теореми зміни масштабу перетворення Фур'є:

$$\begin{aligned} f(ax) &\xrightarrow{F} \frac{1}{|a|} F\left(\frac{\omega}{a}\right) \\ f(ax) &\xrightarrow{F} \frac{1}{|a|} F(a\omega) \end{aligned} \quad (4.16)$$

слідє, що

$$\begin{aligned} F[f(x)] &= F(a\omega) = F\left[\frac{1}{|a|} f\left(\frac{x}{a}\right)\right] = \frac{1}{|a|} F\left[f\left(\frac{x}{a}\right)\right] \\ F^{-1}[F^a(\omega)] &= f(ax) = F^{-1}\left[\frac{1}{|a|} F\left(\frac{\omega}{a}\right)\right] = \frac{1}{|a|} F^{-1}\left[F\left(\frac{\omega}{a}\right)\right] \end{aligned} \quad (4.17)$$

Використовуючи вирази (4.16), (4.17) і відомі властивості Фур'є-перетворення,

$$F^{-1}\{F[f(x)]\} = F\{F^{-1}[f(x)]\} = f(x) \quad (4.18)$$

$$F\{F[f(x)]\} = F^{-1}\{F^{-1}[f(x)]\} = f(-x)$$

можна показати, що послідовне використання двох масштабних перетворень Фур'є із різними масштабами a і b приводить до зміни масштабу аргументу в відношенні b/a .

Дійсно

$$F^{-1}\left\{F\left[f(x)\right]\right\} = F^{-1}\left\{\frac{1}{|a|}F\left[f\left(\frac{x}{a}\right)\right]\right\} = F^{-1}\left[F(a\omega)\right] =$$

$$= \frac{1}{|b|}F^{-1}\left[\left(\frac{a\omega}{b}\right)\right] = \frac{1}{|a|}f\left(\frac{b}{a}x\right) \quad (4.19)$$

Для зміни аргументу функції достатньо використати два однотипних масштабних Фур'є-перетворень:

$$F^a\left\{F^a[f(x)]\right\} = F^{-1}\left\{F^{-1}[f(x)]\right\} = \frac{1}{|a|}f(-x) \quad (4.20)$$

Відтворення функції із зміною масштабу її аргументу може також бути виконаним на основі операцій множення згортання і формування функції вигляду $L(x;a) = \exp(jax^2)$. Дійсно, при $a_1 + a_3 = a_2$

$$\left\{[f(x) \cdot L(x;a_1)]L(x;a_2)\right\} \cdot L(x;a_3) \approx f\left(\frac{a_3x}{a_1}\right) \quad (4.21)$$

в тому числі пересвідчитись, розкриваючи ліву частину виразу (4.21) і використовуючи (4.20), (4.19).

д) віднімання функції. Ця операція може бути виконана при асинфазному додаванні спектральних густин вигляду

$$\psi(x) = a\delta(x - \xi) + f(x; \xi)x_0 + x \quad (4.22)$$

$$\text{з Фур'є-образом} \quad \hat{\Phi}(\omega) = \exp(j\omega\xi) + F(\omega) \quad (4.23)$$

Утворимо дві спектральні густини, аналогічні (4.23)

$$\hat{\Phi}(\omega) = |\exp(j\omega\xi) + F(\omega)|^2 = |\exp(j\omega\xi) + F_1(\omega)|\exp(j\omega\xi) + F_1(\omega)|^* =$$

$$= 1 + |F_1(\omega)|^2 + F_1(\omega)\exp(-j\omega\xi) \cdot F_1^*(\omega)\exp(j\omega\xi) \quad (4.24)$$

$$\hat{\Phi}_2(\omega) = |\exp(j\omega\xi + i\pi) + F_2(\omega)|^2 = |\exp(j\omega\xi + j\pi) + F_2(\omega)| \times$$

$$\times |\exp(j\omega\xi + j\pi) + F_2(\omega)|^* = 1 + |F_2(\omega)|^2 - F_2(\omega)\exp(-j\omega\xi) -$$

$$- F_2^*(\omega)\exp(j\omega\xi) \quad (4.25)$$

В сумі будемо мати:

$$\hat{\Phi}_1(\omega) + \hat{\Phi}_2(\omega) = 2 + |F_1(\omega)|^2 + |F_2(\omega)|^2 + |F_1(\omega) - F_2(\omega)| \times$$

$$\times \exp(-j\omega\xi) + [F_1(\omega) - F_2(\omega)]\exp(j\omega\xi) \quad (4.26)$$

Виконуючи обернене перетворення Фур'є, отримаємо:

$$F^{-1}\left[\hat{\Phi}_1(\omega) + \hat{\Phi}_2(\omega)\right] = 2\delta(x) + R_1(x) + R_2(x) + [f_1(x) - f_2(x)] \times$$

$$\times \delta(x - \xi) + [f_1(x) - f_2(x)] \cdot \delta(x + \xi) \quad (4.27)$$

де перший член є δ -функція, зосереджена в точці $x=0$, другий і третій члени – автокореляційні функції сигналів $f_1(x)$ і $f_2(x)$, симетричні відносно точки $x=0$, четвертий і п'ятий члени – шукані різниці функцій $f_1(x)$ і $f_2(x)$, рознесені відносно точки X_0 на відстань $\pm\xi$.

Віднімання комплексних функцій можливе шляхом додавання перетворених спектральних густин цих функцій. Для такого віднімання достатньо організувати систему сум кожного із сигналів з δ -функцією, отримати їх спектральні густини, додати отримані спектральні густини і знайти Фур'є-образ суми спектральних густин.

Таким чином, на основі виконання базових операцій комплексного множення і перетворення Фур'є можна реалізувати виконання широкого класу математичних операцій з обробки інформації (оптичної). Важливою особливістю оптичних обчислювальних пристроїв є можливість практично миттєво виконувати вказані базові операції, що дає змогу створити виключно виробничі (в змісті швидкодії) системи обробки інформації для розв'язування задач розпізнавання образів.

4.2. ОПТИЧНИЙ ФУР'Е – АНАЛІЗАТОР

Для кореляційних оптичних пристроїв важливо забезпечити не тільки велику швидкість дії, але й мінімум додаткових перешкод, оскільки на виході пристрою обробки сигналу відбувається неминуче підсилення шумів. Одним із суттєвих джерел шумів і шумів в когерентних оптичних системах є світлорозсіювання в подряпинах, пилинках і внутрішніх дефектах оптичних елементів (лінз, дзеркал, фотопластинок і т.п.), що називаються аберациями. За цієї причини бажано конструювати оптичні пристрої відновлення сигналів з мінімальною кількістю елементів. Мінімум оптичних елементів досягається в схемі з освітленням вхідного транспаранта не плоскою, а сферичною хвилею. В цьому випадку не потрібна коліміувна система для формування паралельного пучка, яка, як правило, складається із множини елементів.

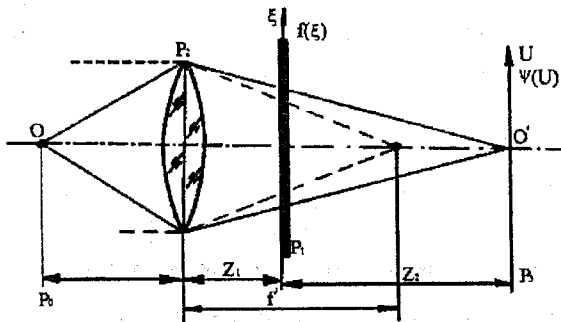


Рис.4.1. Пристрій обробки сигналу

Нехай транспарант із записом сигналу $f(\xi, \eta)$ встановлений в площині P_1 розташованій на відстані Z_1 за площиною P_2 ідеальної збірної лінзи, яка має фокусну відстань f' (рис.4.1). Лінза перетворює сферичний фронт хвилі, що розходить і утворюється точковим джерелом світла O , яке розташоване в площині P_0 на відстані Z_0 перед площиною лінзи, в хвильовий фронт, що сходиться. Нехай площина спостереження P_3 знаходиться на відстані Z_2 від транспаранта. Якщо відстані Z_1, Z_0, Z_2 , задовольняють формулу

$$\frac{1}{Z_1 + Z_2} + \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{f'} \quad (4.28)$$

то в площині P_3 буде спостерігатися зображення O' точкового джерела. В випадку малих розмірів транспаранта і невеликих кутах дифракції, комплексна амплітуда поля в площині P_3 рівна:

$$\psi(u, v) = C \exp\left[j \frac{k}{2Z_2}(u^2 + v^2)\right] \cdot \iint f(\xi, \eta) \exp\left[-j \frac{k}{2Z_1}(\xi u + \eta v)\right] d\xi d\eta \quad (4.29)$$

Таким чином, в площині зображення лінзою точкового джерела виникає Фур'є-спектр, сигналу, розташованого в площині між вхідною площиною і лінзою. Для кращого задоволення умов незначних кутів дифракції транспарант бажано розташувати виритул до лінзи ($Z_1 = 0$). При зміні відстані Z_2 від вхідної до вихідної площини, змінюється масштаб спектра: $\omega_x = 2\pi u / \lambda Z_2$, $\omega_y = 2\pi v / \lambda Z_2$. При масштабі проектування точкового джерела, рівного 1:1, коли:

$$Z_0 = Z_2 + Z_1 = 2f' \quad (4.30)$$

досягається мінімальна довжина оптичного пристрою. Масштаб спектра, в цьому випадку, дорівнює $\omega_x = \pi u / \lambda f'$, $\omega_y = \pi v / \lambda f'$. Цікаві властивості має Фур'є-аналізатор, в якого площина вхідного транспаранта знаходиться між джерелом світла і лінзою (рис.4.2).

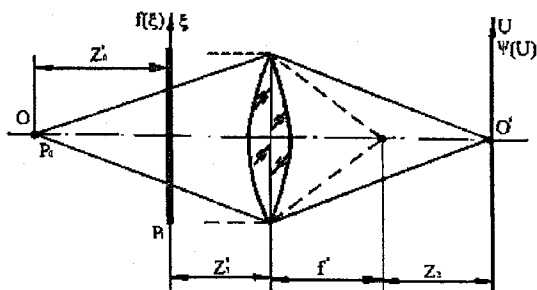


Рис.4.2. Фур'є-аналізатор, в якого площина вхідного транспаранта знаходиться між джерелом світла і лінзою

Якщо відстань Z'_0 (від джерела до транспаранта), Z'_1 (від транспаранта до лінзи), Z'_2 (від задньої фокальної площини лінзи до вихідної площини P_3)

вибрані так, що задовольняється умова:

$$\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{f'} - \frac{Z_1'}{(f')^2} = \frac{Z_0'}{(f')^2}, \quad (4.31)$$

то комплексна амплітуда у вихідній площині пристрою:

$$\begin{aligned} \psi(u, v) = & C' \exp \left[j \frac{k}{2Z_1} \left(1 - \frac{f'}{2Z_2'} \right) (u^2 + v^2) \right] \times \\ & \times \iint f(\xi, k) \exp \left[-j \frac{kf'}{2Z_2'} (\xi u + \eta v) \right] d\xi d\eta \end{aligned} \quad (4.32)$$

Тому, при розташуванні вхідного транспаранта між точковим джерелом і лінзою, в площині зображення джерела також отримуємо спектр вхідного сигналу, то масштаб його залежить від відстаней Z_2' і Z_0' . Пересуваючи площину вхідного транспаранта, тобто змінюючи відстань Z_0' (при $Z_0' + Z_2' = \text{const}$), можна змінювати масштаб спектра. Фазовий експоненціальний співмножник в порівнянні з (4.32) достатньо малий при невеликих кутах дифракції. Якщо вхідну площину розташувати на передній фокальній площині лінзи ($Z_1' = f'$), то $(Z_2' \cdot Z_0' = (f')^2)$ і фазовий співмножник взагалі зникне. Масштаб спектра в цьому випадку: $\omega_x = 2\pi u / \lambda f'$, $\omega_y = 2\pi v / \lambda f'$

4.3. ОПТИЧНИЙ ДИФРАКЦІЙНИЙ КОРЕЛЯТОР

Для реалізації операції типу згортання з довільним ядром, що потребує формування кореляційних функціоналів, які потрібні для прийняття рішення в задачах розпізнавання образів, можуть використовуватися різноманітні оптичні пристрої, які носять назву оптичний корелятор.

Оптичні корелятори, які працюють на когерентному випромінюванні (когерентні корелятори), можуть бути побудовані на основі методів синтезу в області просторових частот і в області зображень. В обох випадках синтез може бути виконаний на основі загальної моделі дії елементарної оптичної схеми з використанням однієї і тієї ж системи, приведеної на рис.4.3.

В схемі є дві лінзи L_1 і L_2 з однаковими фокусними відстанями f' . Нехай відстані між площинами P_1 - P_2 , P_2 - P_3 , P_3 - P_4 , P_4 - P_5 дорівнюють Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , відповідно. Нехай між площинами P_1 і P_2 виконується умова фокусування:

$$\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{f'} \quad (4.33)$$

наприклад, $Z_1 = Z_2 = 2f'$. Уявимо також, що апертурні обмеження лінз і кінцеві розміри об'єкту потрібно не враховувати. Тоді, беручи до уваги вищевказане, поле в площині P_3 можна записати так:

$$\psi(u, v) = K \exp \left[\frac{j\pi(\xi^2 + \eta^2)}{\lambda f'} \right] f(-\xi, -\eta) \quad (4.34)$$

що вказує на те, що в площині P_3 формуються зображення об'єкта, тобто відтворюється функція комплексного пропускання транспаранта множенням на експоненціальний множник, що характеризує середню кривизну квазісферичної розбіжної хвилі.

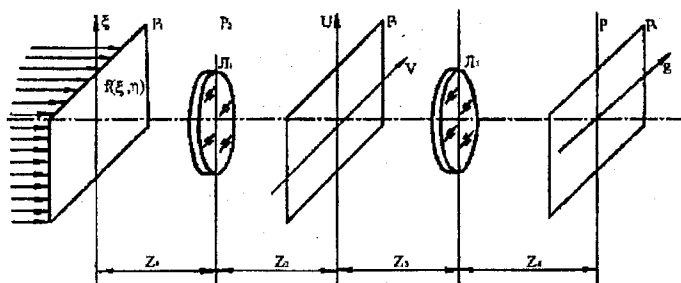


Рис.4.3. Оптичний когерентний корелятор

Встановимо в площині P_3 маску-транспарант з комплексним пропусканням $S(\xi_0 + \xi, \eta_0 + \eta)$, де ξ_0, η_0 - параметри трансляції, що характеризують відносне зміщення функцій f і S в паралельних площинах. Виберемо відстані Z_3 і Z_4 , таким чином, щоб оптична система з правої сторони від площини P_3 працювала як Фур'є-аналізатор. Для цього покладемо:

$$Z_4 = f', \quad 0 < Z_3 < f' \quad (4.35)$$

тоді без врахування експоненціальних множників, які залежать від середньої кривизни хвильового фронту, поле зразу ж за площиною P_3 можна зобразити:

$$f(-\xi - \eta) \cdot S(\xi_0 + \xi, \eta_0 + \eta),$$

а поле в площині P_5 буде :

$$R(p, g, \xi_0, \eta_0) \approx \iint f(-\xi, -\eta) S(\xi_0 + \xi; \eta_0 + \eta) \exp \left[\frac{-j2\pi}{\lambda f'} (p\xi + g\eta) \right] d\xi d\eta \quad (4.36)$$

Операцію кореляції функцій f і S отримуємо при встановленні в площині P_3 "перевернутого" транспаранта, тобто при $S(\xi_0 - \xi, \eta_0 - \eta)$.

Таким чином, операція типу згортання довільних функцій може бути реалізована в оптичній системі (рис.4.3) при виконанні умов (4.33) і (4.34) з використанням транспаранта, що поміщений в площині зображень.

Для ілюстрації можливості побудови когерентного зображення оптичного корелятора методом синтезу в області просторових частот, покладемо:

$$Z_2 = Z_4 = f'; \quad 0 < Z_1 < f'; \quad 0 < Z_3 < f' \quad (4.37)$$

Тоді оптична система (рис.4.3) може розглядатися як два послідовно встановлених Фур'є-аналізатори, і буде мати властивість "перенесення" функцій, заданих в площині P_1 - в площину P_5 , оскільки ці площини спряжені відносно лінзи L_2 .

Згідно з виразом

$$\psi(u, v) = K \exp \left[\frac{\pm j\pi \delta Z (U^2 + V^2)}{\lambda_2 (f')^2} \right] F \left(\frac{2\pi}{\lambda f'} U; \frac{2\pi}{\lambda f'} V \right) \quad (4.38)$$

де F – Фур'є-образ f , $\omega_x = 2\pi u / \lambda f'$, $\omega_y = 2\pi v / \lambda f'$ – кругові просторові частоти. Поле в площині P_3 дорівнює просторовому спектру $F(\omega_x, \omega_y)$ функції $f(\xi, \eta)$ комплексного транспаранта пропускання, який розміщений в площині P_1 .

$$\psi(u, v) = K \exp \left[\frac{\pm j\pi \delta Z (U^2 + V^2)}{\lambda_2 (f')^2} \right] F(\omega_x; \omega_y) \quad (4.39)$$

Якщо розмістити в площині P_3 просторово-частотний фільтр-транспарант, комплексне пропускання якого $S(\omega_x, \omega_y)$ рівне перетворенню Фур'є від функції $S(\xi, \eta)$, то в результаті дії Фур'є-аналізатора, розміщеного з правої сторони від площини P_3 поле в P_5 буде дорівнювати:

$$R(p, g) = K' \exp \left[\frac{\pm j\pi \delta Z_3 (p^2 + g^2)}{\lambda (f')^2} \right] \times \\ \times F \left\{ K \exp \left[\frac{\pm j\pi Z_1 (u^2 + v^2)}{\lambda (f')^2} \right] F(\omega_x, \omega_y) S(\omega_x, \omega_y) \right\} \quad (4.40)$$

При $\delta Z_1 = \delta Z_3 = 0$, що відповідає умові $Z_1 + Z_3 = f'$ квадратичні експоненціальні співмножники в (4.39) зникають і в відповідності з теоремою про згортання поля в площині P_5 пропорційно згортьці f і S :

$$R(p, g) = R(\xi_0, \eta_0) = \iint f(\xi, \eta) S(\xi_0 - \xi, \eta_0 - \eta) d\xi d\eta \quad (4.41)$$

Для отримання функції кореляції в площині P_3 розміщується фільтр-транспарант $S^*(\omega_x, \omega_y)$. Фотоприймач, розміщений в площині P_5 буде реструвати квадрат модуля виразу (4.41). Тому вплив квадратичних експоненціальних множників в (4.39) не відчувається при не дотриманні (4.40).

В цьому випадку необхідно врахувати збільшення тільки оптичної системи і відповідно зміни масштабу функції згортання. Більше того, недотримання умови (4.40) у ряді випадків дає змогу покращити характеристики корелятора. Зокрема, від'єднання транспаранта внаслідок кінцевих розмірів апертури лінзи L_1 може бути зведене до мінімуму, якщо транспарант розміщений впритул до лінзи (Z_1). При цьому максимізується база сигналу, розширення смуги частот сигналу відбувається внаслідок кутового спектра плоских хвиль, що потрапляють в апертуру лінзи, а максимально-му часу існування сигналу відповідає найбільший розмір ефективної апертури лінзи.

Синтез кореляторів в області просторових частот, по суті забезпечується за рахунок дифракційних явищ, і тому вони можуть бути названі дифракційними кореляторами. В таких кореляторах можливе гнучке керування масштабом Фур'є-перетворення. Для цього площина транспаранта P_1

розташовується між лінзою L_1 і площиною фільтра P_3 . Формально обидва методи синтезу оптичних кореляторів ведуть до одного і того ж результату, як видно із рівняння виразів ξ_0 і η_0 . Проте потенційні можливості, що реалізують ці методи, різноманітні.

Корелятори, синтезовані в області зображень, обчислюють тільки одне значення згортання функцій, що відповідає даним значенням ξ_0 і η_0 , параметрів відносно зміщення функцій. Для обчислення всіх необхідних значень згортання в кореляторах цього типу необхідно організувати послідовний перебір значень параметрів трансляції, тобто здійснити механічне переміщення транспаранта перпендикулярно оптичній осі системи.

Чим більше незалежних відліків використати при розрахунку згортання, тим більший об'єм перебору значень параметрів трансляції. При цьому об'єм перебору зростає як показникова функція числа відліків. Тому при значному числі відліків час розрахунку згортання часто стає недопустимо великим, а виграш швидкості обробки інформації в порівнянні із засобами електронно-обчислювальної техніки незначний. Таким чином, метод синтезу в області просторових частот має виключно переваги в порівнянні із часом обробки інформації в першому методі. Дійсно, в цьому випадку всі значення згортання обчислюються паралельно, тобто одночасно (вираз (4.41) існує для цілої області значень p, g) в той час, як при синтезі в області зображень обчислюється тільки одне значення згортання (вираз (4.37) має місце тільки для одного значення p_0, g_0). Тому, час обчислень при синтезі корелятора в області просторових частот практично не залежить від числа відліків функції, яка аналізується. Дифракційний корелятор можна розглядати як лінійний фільтр, що здійснює перетворення Фур'є від функції зображення, яке аналізується множенням результату перетворення на передавальну функцію фільтра і виконання оберненого перетворення над отриманим добутком.

Розглянемо оптичний пристрій для обчислення згортання або кореляції функцій методом перетворення Фур'є при освітленні сферичною хвилею (рис.4.4). Нехай відстань від точкового джерела до лінзи $2f'$.

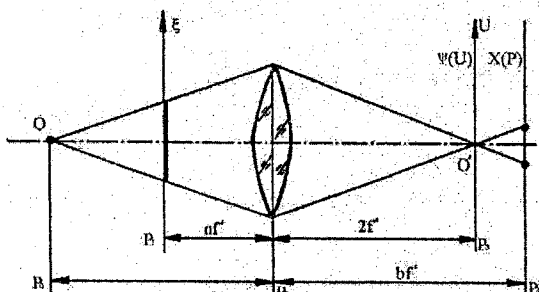


Рис.4.4. Оптичний пристрій для обчислення згортання

В цьому випадку згідно з формулою лінзи зображення точкового джерела виникає в площині P_3 , віддаленій від лінзи на відстань $2f'$. Площина вхідного транспаранта P_1 , знаходиться на відстані $Z_2=af'$ від лінзи ($1 < a < 2$). Зображення вхідного транспаранта при цьому буде знаходитись в площині P_4 , віддаленій від лінзи на відстань в bf' , де величина b визначається із формули лінзи: $1/af' + 1/bf' = 1/f'$.

Нехай для визначеності $a=3/2$. Тоді комплексна амплітуда поля в площині P_3 пропорційна Фур'є-образу об'єкту $f(\xi, \eta)$ при масштабі спектра $\omega_x = 4\pi u/\lambda f'$, $\omega_y = 4\pi v/\lambda f'$. Площина зображення вхідного транспаранта в цьому випадку знаходиться на відстані $3f'$ від лінзи. Тому, якщо в площину P_3 поміщений просторово-частотний фільтр $H(\omega)$, то в цій площині формується добуток $F(\omega)H(\omega)$, а розподіл комплексних амплітуд поля у вихідній площині P_4 , віддаленій від лінзи на відстань $3f'$, буде пропорційний згортанню $f(x) * h(x)$. Якщо $H=S^*(\omega)$, то на виході пристрою отримаємо функцію кореляції зображень $f(x)$ і $S(x)$, які порівнюються.

Розділ 5. ОПТИЧНІ ПРИСТРОЇ НЕКОГЕРЕНТНОГО КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ

5.1. ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ СВІТЛОВИХ ПОЛІВ

Найпростіший пристрій, який реалізовує виконання операцій додавання або множення двох оптичних зображень складається із джерела світла, розташованого на оптичній осі в площині P_0 , інтенсивність свічення якого регулюється; нерухомого транспаранта G і екрана, розташованого в площині P_3 , на який проектується результат оптичної операції. Принципова схема такого пристрою зображена на рис.5.1.

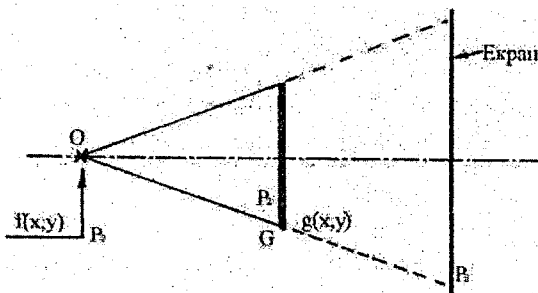


Рис.5.1. Пристрій, який реалізує виконання операцій додавання або множення двох оптичних зображень

Джерело випромінювання O живиться напругою U , яку можна змінювати в часі за певним законом $f(x,y)$ таким чином розгортаючи координати

нати X і Y в часі. Тому, світловий потік Φ , що пронизує транспарант T , буде змінюватися в часі, а тому результат операції на екрані буде також змінюватися в часі. Результат цього явища можна спостерігати або візуально, або реєструвати за допомогою спеціальних пристроїв.

Таким чином, в найпростішому випадку можна здійснити операцію множення двох зображень. Проте, така схема достатньо незручна, в тому розумінні, що зчитування результату необхідно виконувати додатковими автоматичними засобами, наприклад, ПЗС – структурою.

Незручність створює також необхідність заміни транспарантів G . Велике світлове розсіювання, що дає точкове некогерентне джерело, призводить до втрат інформації, оскільки в площині P_3 фіксується лише частина оптичної інформації. Цю схему можна дещо модернізувати, якщо перетворити її таким чином, як це зображено на рис.5.2. Де L_1 і L_2 – лінзи, Z – затвор (в найпростішому випадку електромеханічний), БК – блок керування електрооптичним просторово-часовим модулятором світла ПЧМС (наприклад, типу ПРіЗ), який дає змогу записувати і запам'ятовувати на певний час, достатній для здійснення одного такту оптичної операції, оптичні зображення. Керують роботою ПЧМС високою напругою від 300В до 3,5кВ.

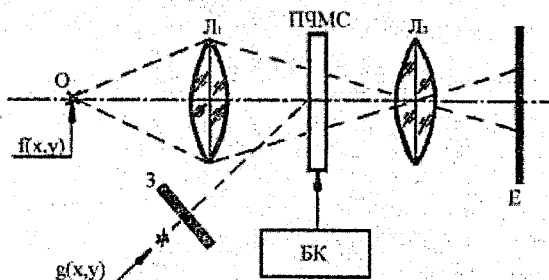


Рис.5.2. Пристрій, який реалізує виконання операцій додавання або множення двох оптичних зображень

За рахунок стаціонарності транспаранта ця схема позбавлена недоліків, пов'язаних із розсіюванням випромінювання в вихідній площині. Проте використання в схемі ПЧМС типу ПРіЗ, або іншого подібного пристрою, накладає додаткові обмеження на використання цієї оптичної схеми в широкому спектральному діапазоні.

Недостатнім є також рівень роздільної здатності схеми, яка визначається електрооптичними властивостями кристалу ПЧМС.

Оптична схема, зображена на рис.5.3, виконує подібні операції, і разом з тим, має ряд суттєвих особливостей. Пристрій складається із транспаранта (функція $f(x,y)$), розташованого в площині P_1 , об'єктива O , розташованого в площині P_2 , затвора Z , матриці ПЗС, яка знаходиться в площині P_4 .

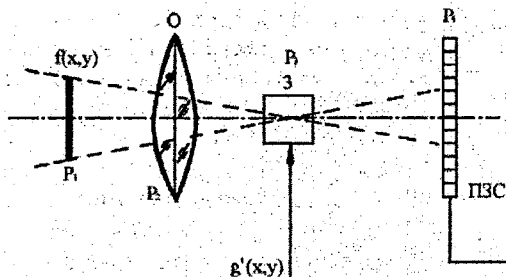


Рис.5.3. Пристрій оброблення оптичних зображень

Функція $f(x,y)$ є стаціонарною (незмінною в часі), а функція $g(x,y)$ отримує часову розгортку $g'(x,y)$. Результат операції фіксується матрицею ПЗС – приймачів, зчитування з яких виконується порядково. Затвор З, розташований в фокусі об'єктива О, керується напругою у відповідності з функцією $g'(x,y)$, в якості такого пристрою можуть використовуватися прилади на основі рідинних кристалів (РК), акустооптичні і електрооптичні пристрої, магнітооптичні затвори. Використання кожної із таких груп приладів накладає ряд додаткових обмежень на спектральний і динамічний діапазон джерела випромінювання, а також буде вплив на такі характеристики приладу в цілому, як швидкодія і роздільна здатність. Всі вище перераховані недоліки мають і матричні фотоприймачі, виготовлені на основі пристроїв ПЗС.

Таким чином, математичні залежності, наведені в розділі 4, справедливі для описаних нижче пристроїв кореляційного когерентного аналізу. В деяких випадках операція згортання двох зображень (двох функцій) замінюється операцією додавання по всьому полю зображень.

Здійснення функцій додавання, множення, згортання двох зображень використовуються в пристроях кореляційного аналізу. Результатом функції кореляції в оптичних пристроях є кореляційний пік, або декілька піків, що являють собою точки найбільшої інтенсивності свічення в площині зчитування результату операції. За площиною і розташуванням кореляційного піку (попередньо визначають його координати) судять про збіг тих або інших ознак (фрагментів) двох зображень і їх місцезнаходження на площині.

Когерентні оптичні корелятори, які використовуються в голографічних системах розпізнавання і голографічних читаючих автоматах, мають як ряд безсумнівних переваг, так і недоліків. Це – голографічний корелятор Ван дер Люгта і його сучасні модифікації.

Сучасні дослідження направлені на дослідження оптичних схем пристроїв некогерентної кореляції двох зображень, а також пристроїв, що реалізують інші специфічні функції. Такі дослідження здійснюються на основі структури, зображеної на рис.5.4. Де, P_0 – джерело випромінювання (на рисунку зображено хід променів від однієї точки поля М); T_1 і T_2 – транспа-

ранти, розташовані в площині P_2 і P_3 , з розподілом коефіцієнтів пропускання світлового потоку по площині з координатами x і y O – об'єктив, розміщений в площині P_4 ; E – екран, d і d' – відповідно відстані між транспарантами T_1 і T_2 від об'єктива O до T_2 ; f – фокусна відстань об'єктива.

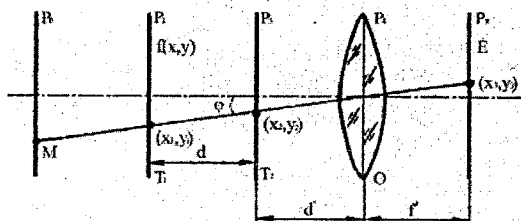


Рис.5.4. Пристрій некогерентної кореляції двох зображень

Тоді для розглянутого на рисунку ходу одного променя справедливі вирази:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{x_2}{f}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_2}{d'}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_1}{d' + d}; \frac{x_2}{d'} + \frac{x_3}{f} = \frac{x_1}{d}; \\ d' \operatorname{tg} \varphi + d \operatorname{tg} \varphi &= x_1; x_2 + d \operatorname{tg} \varphi = x_1; \end{aligned}$$

З урахуванням вищевикладеного і розглянутих раніше схем, можна утворити такі функції:

$$g = f(x_1; y_1) \cdot g(x_1 - \frac{dx_3}{f}; y_1 - \frac{dy_3}{f}); \text{ а також}$$

$$Q(x_3, y_3) = \iint f(x_1, y_1) g(x_1 - \frac{dx_3}{f}; y_1 - \frac{dy_3}{f}) dx_1 dy_1$$

Останній вираз – це одна із основних формул кореляційного аналізу. Використання в якості джерела випромінювання керованих яскравісних трубок (в найпростішому випадку – осцилографічних) дають змогу спростити виконання необхідних умов для побудови кореляційних пристроїв, що працюють в широкому спектральному діапазоні. Робота пристроїв буде реалізована в телевізійному режимі. Нижче (на рис.5.5 і 5.6) зображені опорні схеми таких пристроїв.

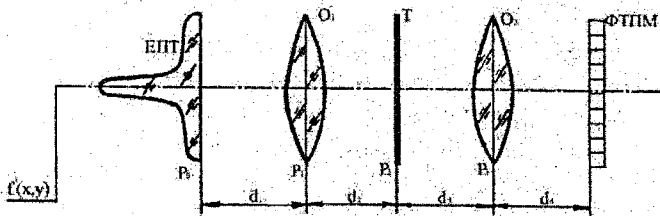


Рис.5.5. Кореляційний пристрій, що працює в широкому спектральному діапазоні

На рис.5.6 зображені: ЕПТ – електронно-променева трубка яскравості, що працює в телевізійному режимі, основна характеристика якої – яскравість випромінювання, – змінюється у відповідності з функцією $f'(x, y)$.

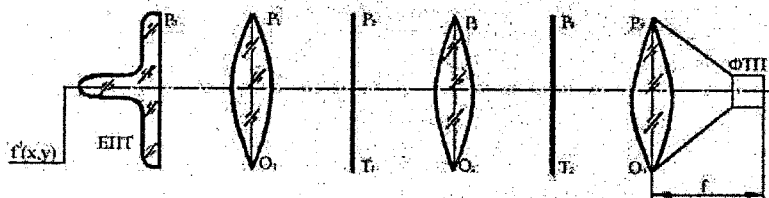


Рис.5.6. Пристрій обробки зображення, що працює в телевізійному режимі

В площинах P_1 і P_3 розміщені об'єктиви O_1 і O_2 відповідно, які виконують пряме і обернене Фур'є-перетворення. В площині P_2 знаходиться транспарант T із стаціонарною функцією $g(x, y)$. Результат операції сприймається ФТПМ (фотоприймальна матриця, набрана із фотодіодів). Зчитування інформації можна здійснювати порядково, або одночасно із всіх фотоприймачів, що визначається технологією виготовлення. Принцип роботи схеми аналогічний вищеприписаному. Головною перевагою схеми є той факт, що результат виконання операцій, які виконуються над двома зображеннями, зчитується одним фотоприймальним пристроєм, розташованим в фокусі об'єктива O_3 . Роль ЕПТ – розгортка променя по, тобто послідовний “перегляд” поля обох транспарантів, які є носіями двох різноманітних стаціонарних функцій. Тобто, виконується операція згортання, результат якої зчитується фотоприймачем ФПМ. Вибираючи максимальне значення інтенсивності за один кадр, або значення, що перевищують певний рівень, при відомому законі розгортання електронного променя по екрані ЕПТ, можна визначити з великою точністю і достовірністю місцезнаходження кореляційних полисків.

5.2. ПРИСТРІЙ КОГЕРЕНТНОГО ДОДАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Принципова схема пристрою когерентного додавання зображень приведена на рис.5.7.

Наведена схема складається із транспаранта T із зображенням $f(x, y)$, дзеркал з отворами, площини яких нахилені відносно головної оптичної осі на кут 45° . Діаметри отворів в дзеркалах змінюються за законом $d=G(n)$, де n – номер дзеркала. Останнє дзеркало без отвору. Світлові потоки, відбиті дзеркалами, збираються лінзами L_1, L_2, \dots, L_{16} в фокусах яких розташовані фотоприймачі $\Phi П_1, \Phi П_2, \dots, \Phi П_{16}$.

Електричні сигнали з фотоприймачів потрапляють на обчислювальний пристрій, що аналізує їх стан. Схема працює таким чином.

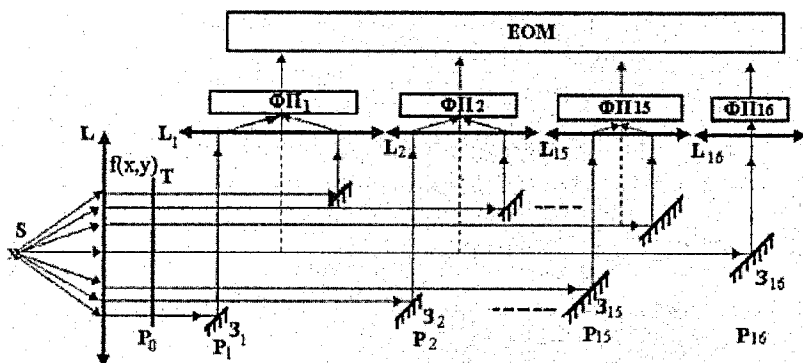


Рис.5.7. Пристрій когерентного додавання зображень

Паралельний світловий пучок, наперед колімований, направляється вздовж головної оптичної осі схеми, проходить крізь нерухомий транспарант з розподілом коефіцієнта пропускання по площині $f(x,y)$, і світловий потік після проходження через транспарант набирає параметри, зафіксовані на транспаранті. Далі цей потік потрапляє на перше дзеркало з діаметром отвору d_1 . Частина світлового потоку, відбита площиною дзеркала з площею $S_1 = S - \frac{\pi d_1^2}{4}$, де S – площа діафрагми, встановленої на вході системи після колімування світлового потоку, в цьому випадку

$$S_1 = \frac{\pi d^2 - \pi d_1^2}{4} = \frac{\pi}{4}(d^2 - d_1^2),$$

де d – діаметр діафрагми, встановленої на вході оптичної системи.

Світловий потік, відбитий першим дзеркалом, потрапляє на лінзу L_1 , яка збирає його, в фокусі L_1 встановлений фотоприймач ФП₁ (фотодіода). Світловий потік Ф₁, що потрапив на фотоприймач знаходиться в прямій пропорційній залежності від S_1 – площі поверхні відбиття першого діафрагмованого дзеркала і $\sum I_{k1}$ – суми інтенсивності свічення К точок поля транспаранта на площині S_1 . Сума $\sum I_{k1}$, буде залежати від функції $f(x,y)$ – розподілом коефіцієнтів пропускання транспаранта. Таким чином, можна отримувати на фотоприймачі сигнал, пропорційний сумарній інтенсивності свічення фрагмента початкового зображення. Світловий потік, що не відбився дзеркалом Z_1 , проходить далі, зберігаючи форму, задану йому раніше (діафрагмою), але зменшуючи величину. Частина його потрапляє на відбиваюче дзеркало Z_2 , відбиваючись від якого фокусується лінзою L_2 на фотоприймачеві ФП₂.

Таким чином, потік ділиться на n частин за допомогою діафрагмованих дзеркал Z_1, Z_2, \dots, Z_n і загальна інтенсивність кожного фрагменту світлового потоку аналізується своїм фотоприймачем ФП₁, ФП₂, ..., ФП_n (де

$n=1,2,\dots,16$). Число фотоприймачів, а відповідно і дзеркал обумовлене частковим технічним завданням.

Обчислювальний пристрій дає змогу визначити через яку частину (через який фрагмент) транспаранта, проходить потік з найбільшою сумарною інтенсивністю, а також виконувати різноманітні операції з цими фрагментарними сумарними потоками, що можна ототожити (при достатньо незначному кроці зміни величин площ отворів в дзеркалах $\Delta S=S_2-S_1$) з обробкою, порівняння зображень із фрагментом зображення, фіксованого на транспаранті у вигляді двовимірної функції $f(x,y)$. Це дає змогу використовувати цей пристрій для виконання таких операцій, як визначення координат центра ваги кореляційної плями, що є важливою задачею некогерентного кореляційного аналізу. Оскільки кореляційний пік являє собою не точку нескінченно малих розмірів, а деяку світлу пляму неправильної форми, інформацію несуть дві величини: центр ваги плями і інтегральна інтенсивність свічення плями по всій площі S_i .

Принцип визначення координат світної плями на базі описаної схеми досить простий. Координати визначаються обчислювальним пристроєм, що виконує операції із сумарними інтенсивностями світлових потоків, які потрапляють на окремі фотоприймачі згідно із заданою наперед програмою.

Така схема має ряд особливостей, з яких до переваг можна віднести такі. По-перше, в схемі використано мінімум електричних елементів, що обумовлює високу швидкодію; по-друге, пристрій майже не критичний до вибору довжини хвилі випромінювання, а також її стабільності; по-третє, що особливо важливо, така схема інваріантна до повороту початкового зображення. Остання властивість обумовлена тим, що початковий світловий потік є колімованим, а наступна його обробка виконується оптичними елементами у вигляді концентричних кілець (діафрагмовані дзеркала), які виготовляються декількох типів, в залежності від матеріалу основи (метал, металокераміка, оптичне скло). З метою дослідження якості роботи пристрою передбачається виготовлення діафрагмованих дзеркал із різноманітними законами зміни діаметрів отворів в них. Оцінювання виконується виходячи із критерію максимальної роздільної здатності пристрою. Передбачається зміна діаметрів отворів в дзеркалах як за лінійним, так за логарифмічним законами. Причому, дискретність зміни зменшується для отворів з меншим діаметром, оскільки основну інформацію несе центральна частина світлового потоку, який пройшов через транспарант Т, розташований в площині P_0 .

Аналогічні функції виконує пристрій (рис.5.8), який складається із джерела випромінювання (електронно-променева трубка – ЕПТ), розташованого в площині P_0 , діафрагми Д, що знаходиться в площині P_0 , колімної системи КС, а також автоматичного пристрою діафрагмування (АПД) і пристрою аналізу (ПА), розташованих відповідно в площинах P_3 і P_4 . АПД

являє собою динамічний транспарант (наприклад, рідинно-кристалічний), який має пропусне вікно.

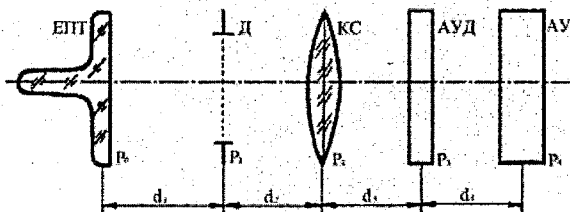


Рис.5.8. Пристрій для визначення координат центру ваги кореляційної плями

Площа цього вікна, а також його координати, можуть задаватися за допомогою електричних сигналів, що потрапляють від обчислювальної керуючої машини. За допомогою такого транспаранта можна реалізувати метод половинного розбиття, зменшуючи розміри вікна в два рази на кожному кроці операції.

Пристрій аналізу (ПА) може являти собою будь-яку оптоелектронну систему, що перетворює інтегральний світловий потік у відповідний електричний сигнал.

Наведені вище пристрої є прикладами швидкодіючих оптоелектронних систем, які можуть з великим ступенем точності обробляти, перетворювати оптичну інформацію.

Розділ 6. ОБРОБЛЕННЯ ОБРАЗІВ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ІНВАРІАНТНИХ МАСШТАБУ І ПОВОРОТУ

Розробка ефективних систем розпізнавання об'єктів, явищ, ситуацій і процесів в наш час являє собою задачу виняткового значення. Подібні системи вже знайшли використання в техніці, медицині, метрології, сільському господарстві, військовій справі і т.д. Проблеми розпізнавання, її теоретичним аспектам і прикладним додаткам в нашій країні і за кордоном приділяють велику увагу.

Розпізнавання образів – чи не найрозповсюдженіша задача, яку людині доводиться розв'язувати практично щосекундно. Для розв'язання цієї задачі людина використовує значні джерела свого мозку, задіюються при цьому біля 7-8 млрд. нейронів. Саме це дає можливість людям миттєво впізнавати один одного, з великою швидкістю читати друковані і рукописні тексти, безпомилково водити автомобілі в складному потоці дорожнього руху, здійснювати відбракування деталей на конвеєрі, дешифрувати аерокосмічні фотознімки, розгадувати коди, стародавній єгипетський клинопис і т.д.

Розпізнавання являє собою задачу перетворення вхідної інформації, в якості якої доцільно розглядати деякі параметри, ознаки образів, що розпізнаються, у вихідну, яка являє собою висновок про те, до якого класу відноситься об'єкт, що розпізнається.

Метод дає змогу виконувати в реальному часі відображення n на вхідний образ N без врахування комплексних логарифмічних координат. Моделювання (імітація) дає змогу архітектурі перетворювати масштабні зміни і обертання вхідного образу у відповідно постійні горизонталі і циклічні вертикальні зсуви вихідного образу. Внаслідок цього вихідні образи називаються інваріантами зсуву і повороту. Розпізнавання може виконуватися на інваріантних вхідних образах з використанням методів інваріантів перетворень. Інваріантним вихідним образам притаманна інтенсивність, що зберігає властивість при довільному варіюванні розміру образу. Причина цієї інваріантності з'являється внаслідок нового способу відображення, який виключає множник-Якобіан, що, як правило, використовується при зміні координат. Чутливість архітектури до положення вхідного образу, відхилення центра, обговорюється в термінах різниці між методами координатних і функціональних перетворень. Результати моделювання демонструють нечутливість архітектури до збігу центра на противагу чутливій природі відображень від декартових до полярних координат.

6.1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМИ РОЗПІЗНАННЯ ОБ'ЄКТІВ І ЯВИЩ

Яка структура інформації, що знаходиться безпосередньо за сітчаткою перед досягненням кори головного мозку? Відповідь на це питання може дати нам ключ до розуміння того, як зорова система людини здатна виконувати ефективно розпізнавання в реальному часі, даючи змогу, таким чином, розв'язати більш ефективних систем розпізнавання в реальному часі. Більше того, ця інформаційна структура може забезпечити кращий погляд на область розвитку дитячого вивчення образів, яка цікава для психології людини і суспільству штучного інтелекту. Оскільки неможливо "в живу" розглянути результуючу інформаційну структуру за сітчаткою, необхідно використати комп'ютер, щоб моделювати (імітувати) первинну зорову систему і вивчити її зв'язок із розпізнаванням і обробкою образів. Мотив цієї розробки подібний попереднім міждисциплінарним зусиллям, які використовували базу знань психології людини, обробку і розпізнавання образів. Запропонований підхід відрізняється тим, що розглядається просторовий розподіл рецепторів – "колбочок", який дасть знання основ для розвитку такої імітації обробки в реальному часі інваріантних образів. Концептуальний і імітаційний розвиток перших кроків до повного моделювання (імітації) розглянуті в літературі. Тому, не всі важливі аспекти системи зору людини тут досліджуються. Такі важливі характеристики, як різницева гальмування і множинне просторове фільтрування шумових об-

разів, виведені із теорії нейронової сітки, в наш час втілюються в імітаційні набори.

Архітектура для паралельної обробки була підказана паралельним відображенням нервових шляхів, що зустрічаються в зоровій системі людини. Ця архітектура виконує комплексне логарифмічне перетворення координат n на образ N за постійний час.

Для цього рівномірно розподілений масив образів відображається взаємно-однозначно на рівномірно розподілений вихідний масив за допомогою фізичних з'єднань (ввімкнень) архітектури, яка виконує відображення. Як наслідок, збільшення і обертання (повороту) вхідного образу перетворюється відповідно, в постійні горизонтальні і циклічні вертикальні зсуви у вихідному образі. Ця архітектура полегшує розпізнавання образів, оскільки технічні прийоми дій з відповідними зсунутими образами добре відомі. Архітектура виконує алгоритм, який еквівалентний комплексному логарифмічному перетворенню. В дійсності це означає те, що алгоритм безпосередньо втілений в архітектуру ЕОМ, формуючи ефективну паралельну структуру обробки. Це відрізняє її від інших архітектур. Запропонована архітектура є не тільки швидкісною і ефективною, але й забезпечує деякі ключові передпроцесорні характеристики, корисні для розпізнавання образів, що забезпечує зоровій системі людини її ефективну здатність процесу розпізнавання.

Використання згорнутого однорідного простору в системах розпізнавання образів, які використовують взаємну кореляцію, може бути чутливим до положення центру образу, його центрівду.

Проте, виникають сумніви в тому, що відповідний (при відображенні) процес із взаємною кореляцією, може бути толерантним до значної похибки при визначенні центрівду (відхилення центра); використовуючи це перетворення, а не інші масштабно-інваріантні перетворення, такі, як перетворення Мелліна-Фур'є, яке перетворює саму функцію шляхом заміни змінних операцій: відображення, що виконується така архітектура, змінює лише просторові координати функції i , таким чином, не потребує введення ні функції Якобіана, пов'язаної із заміною змінної, ні інтегральної операції перетворення Мелліна-Фур'є.

Результати імітації (моделювання) зображують масштабні і обертові інваріантні властивості цієї архітектури.

6.2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ В ЗОРОВІ ОБРАЗИ

В 1866 році Макс Шульце опублікував розгорнутий звіт з анатомії людського ока. Обережно піднявши склеру і усунувши судинний і пігментний шари, Шульце зміг побачити закінчення фоторецепторів "в живу". Він помітив, фоторецептори розташовані нерівномірно – густіше біля ямки (місця входу зорового нерва) і рідше на периферійних ділянках ока.

З цієї ранньої моделі була отримана експоненційна модель густини розподілу “колбочок”. Із збільшенням радіального зміщення від центра зору густина “колбочок” зменшується за експоненційним законом. Цей фізіологічний факт викликав великий інтерес до того, як інформація, що збирається “колбочками”, відображується на відповідну ділянку мозку.

Концентричне рецептивне поле гангліозної клітини – це ділянка поверхні сітчатки, світлова стимуляція якої змінює частоту імпульсації даної клітини. Причому дія на центральну область і на периферійну має ефекти протилежного знаку. У клітин з *оп* – центром стимуляція центра рецептивного поля викликає збільшення активності (зліва), стимуляція периферії – зниження активності (справа).

Дирекційно вибіркова клітина збуджується при переміщенні пучка світла в одному напрямку і гальмується, якщо пучок рухається в протилежну сторону. Напрямок руху пучка детектується в будь-якому місці рецептивного поля даної клітини.

Шварц показав, що при умові, якщо кора головного мозку розгорнута в корову площину, і крива поверхня сітчатки, що займає 20° поля зору, апроксимується дотичною до неї площиною, то множник (коефіцієнт) збільшення, який визначається як відношення відстані на поверхні кори головного мозку до відповідної відстані на поверхні сітчатки, введений Деніелом і Уттеріджем, може бути апроксимований комплексним логарифмічним відображенням. Шварц вказує, що це відображення поля зору на кору головного мозку може забезпечувати механізм для інваріантності зорової системи людини відносно розмірів і поворотів. Наступні дослідження за допомогою мічених атомів C^{14} при анатомічному дослідженні відображення у мавп-макак виявили логарифмічну природу коефіцієнта збільшення.

В інших дослідженнях феномену, який супроводжує ранні стадії наркотичних галюцинацій, була розроблена математична теорія, що розглядає зразки візуальних галюцинацій. Ця теорія також складає узгоджувальну (конформну) логарифмічну модель проектування поверхні сітчатки на кору головного мозку.

Конформне логарифмічне відображення не було повністю невідомим тим, хто займається обробкою образів. Вейман і Чайкін розробили математичну трактовку конформного відображення і запропонували її можливе використання в обробці образів на дисплеях для комп'ютерної графіки, але не пішли далі до розробки моделювання (імітації). Шенкер в своїх дослідженнях посилається на логарифмічне відображення полярної експоненційної сітки (ПЕС), яка також приймається тут для посилення на вибіркоче дослідження площини образів. Шенкер здійснив ПЕС – відображення за допомогою цифрової імітації, щоб виконати відновлення границь в шумових образах, але не продемонстрував важливі властивості самого відображення. В подібних ідеях використання неоднорідних сенсорних масивів, Пау розробив неоднорідний сенсорний масив із сенсорами, розподіленими

так, щоб зберегти ланцюгове шифрування (кодування). Проте, система зору людини не потребує збереження ланцюгового кодування, і ми замість цього використовуємо фізіологічну очевидність комплексного логарифмічного відображення, яке виконується тут без дійсного розрахунку логарифмічного перетворення при допомозі згорткування неоднорідного (сітчатка) поля вибірових образів на однорідне (кора головного мозку) поле і тим самим забезпечує паралельний перехід даних для обробки інваріантних образів в реальному часі. Концепція забезпечення інваріантності без розрахунків, яка полягає в паралельному проходженні даних через архітектуру, опубліковувалась в літературі.

Використовуючи негомогенне розподілення "колбочок" в системі зору людини, модульованого полярною однорідною за кутом $\theta = \nu$, але неоднорідною радіально-експоненціальною вибіркою $r = \exp(U)$, об'єкта, відображеного на відиконі, отримуємо інваріантний однорідний вихідний простір (U, V) . Це відображення із неоднорідного простору (r, θ) в однорідний (U, V) , яке зберігає кутову інформацію, зображене на рис.6.1 може бути розкладене на два кроки з метою моделювання. Першим кроком беремо вхід на нерівномірний масив, в площині образу вводимо вхідний образ і формуємо площину перетворення. Наступним кроком дані реорганізуються в просторових координатах так, щоб відобразити кутову інформацію образу. Внаслідок циклічності $V = \theta$ осі ми можемо "повернути" на $\theta = 2\pi$, тим самим формуючи промені горизонтальними лініями і кола вертикальними лініями.

Перетин цих ліній і кіл утворюють нове місцезнаходження даних. Ця "повертаюча" операція називається "wrapback". Іншими словами, рис.6.1 описує жорстке відображення експоненційної сітки образів вибірки на рівномірну Декартову сітку, тоді як рис.6.1(б) показує також жорстке відображення з тим винятком, що сенсорне просторове розміщення в площині "обернуте", щоб відобразити кутове положення образів на вхідній площині (r, V) . Математичне відношення для цього двокрокового відображення із площини неоднорідно розподілених образів в рівномірний простір (ознак) дано рівнянням:

$$z = \exp(\omega); z = x + iy; \omega = U + iV \quad (6.1)$$

де комплексні Z і ω виражають, відповідно, площину образу і простір ознак. Із рис.6.1(а) видно, що зсув на ΔU для всіх V в площині ω відповідає збільшенню образу в площині Z . Аналогічно, зсув в площині Z на $\Delta \theta$ для всіх U в площині ω відповідає обертанню образу в площині Z . Таким чином, незалежні обертання і масштаби в площині Z розкладаються на горизонтальні і вертикальні зсуви в площині ω .

Цікаво відмітити, що площина ω може розглядатися як банк комп'ютерної пам'яті, де зсув змісту пам'яті є простою операцією.

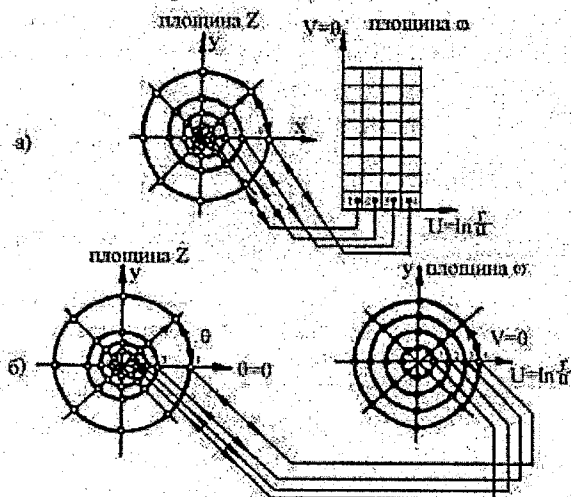


Рис.6.1. Відображення експоненційної сітки образів вибірки на рівномірну Декартову сітку

Жорстким з'єднанням виходів масиву сенсорів для забезпечення еквівалентного відображення одержують рівномірно стиснений простір. Рис.6.2 демонструє концепцію паралельного проходження даних де неоднорідна ПЕС вибірка в площині образу стискується нерівномірно розподіленою площиною вихідних даних світловоду. За допомогою цієї концепції ми досягаємо безпосередньо і без розрахунків конформного логарифмічного перетворення координат. Ми називаємо цю концепцію потоку даних "витонченим" стисненням.

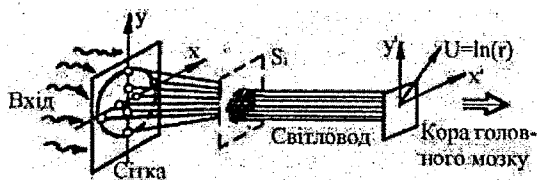


Рис.6.2. Конформне логарифмічне перетворення координат

Ця важлива концепція діє в сенсорних організмах, що сприймають велику кількість інформації в навколишньому середовищі. Ці організми мусять селективно вибирати, які дані потрібно ефективно обробити, щоб вижити в реальному часі. Представлене перетворення є одним із шляхів, якими система зору людини може відкинути (тобто стиснути дані) без катастрофічних наслідків частину доступної несуттєвої інформації (на периферії поля зору), щоб ефективно працювати в реальному часі.

У вказаному моделюванні еквівалентне комплексне перетворення здійснене для вивчення даної архітектури. Декілька простих прикладів того, як комплексне логарифмічне перетворення відображає із простору образів в інваріантний простір, зображено на рис.6.3. Слід зауважити, що промені, які виходять із центральної точки перетворення, рівновіддалені на кут θ , відображаються в рівновіддалені горизонтальні лінії, тоді як концентричні рівновіддалені кола відображаються в вертикальні логарифмічно розташовані лінії.

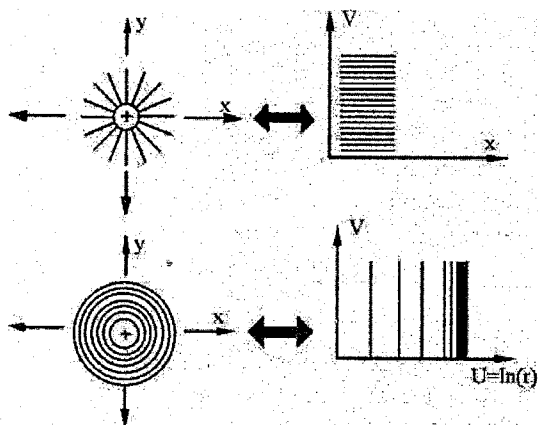


Рис.6.3. Еквівалентне комплексне перетворення зображення

Причиною розгляду неоднорідної полярної вибірки даних є можливість використання концепції “витонченого” стиснення, яка забезпечує масштабну інваріантність без виконання логарифмічних розрахунків. Ця властивість масштабної інваріантності виникає із того факту, що масштабна зміна в неоднорідному ПЕС просторі вибірки, приводить просто до зсуву немасштабованого представлення в рівномірному просторі ознак на множник $h_d(a)$. Дискретне математичне представлення для цього масштабного відображення в явному вигляді визначено рівнянням:

$$\left(\frac{r_j}{a, \theta_k}\right) = (\exp(U_j), V_k); j=1,2,3,\dots,N; k=1,2,3,\dots,N,$$

де r – радіус в площині образів, даний як $(x^2+y^2)^{1/2}$; θ – полярний кут вхідної координатної (x,y) площини, даний, як деяка центральна точка (x_c, y_c) . Дані на однорідній вихідній сітці тоді рівносильні одержанню натурального логарифму, заданого рівнянням:

$$U_j = j\Delta U = \ln\left(\frac{r_j}{a}\right) = \ln(r_j) - \ln(a); V_k = \theta_k.$$

Детальне дослідження цього відображення приводить до ще однієї нової концепції – “інваріантності передньої кромки” швидше, ніж до зага-

льноприйнятого бінарного позначення інваріантної кромки.

Ця концепція інваріантності передньої кромки краще всього може бути описана при розгляді масштабної кромки, яка конформно модульована за допомогою зміщеної від центра “дахоподібної” функції $G(r)$ (рис.6.4).

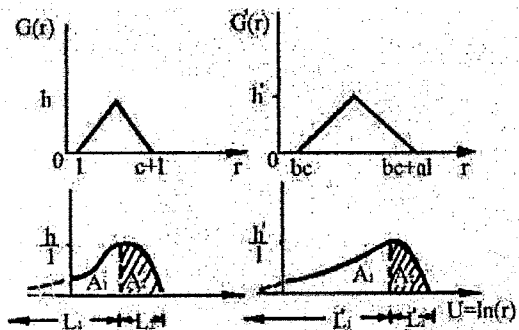


Рис.6.4. Концепція інваріантності передньої кромки

“Дахоподібна” функція була вибрана, відобразити перелом, пов’язаний із безперервним сірим масштабним об’єктом, а не з кроковим переломом бінарного об’єкта. Розтягуючи $G(r)$ за допомогою деякого коефіцієнта a , зсуваючи за допомогою коефіцієнта зсуву i і вимагаючи, щоб висота стала h' , ми отримуємо нову функцію $G(r)$. Відповідні логарифмічні перетворення цих двох функцій показані прямо під кожною із них і позначені $F(U)$ і $F(U')$. При умові, що $h=h'$, виявлено, що коли крива розтягнута по-різному, тоді по відношенню до логарифмічної координати, ідентична інтегральна інтенсивність передньої кромки (тобто площа $A_2=A_2'$) реалізується над ідентичною шириною ω і h/l висотою. На перший погляд – це дивний результат, оскільки очікувалося, що зміна змінної вимагатиме, щоб функція була деформована (спотворена) множителем Якобіаном e^u , як показано, звичайним методом, даним в рівнянні (6.2), в порівнянні з новим правилом (рівнянням (6.3)):

$$\int G(r) dr \rightarrow \int F(U) e^U dU \quad (6.2)$$

де $r = e^u$ і $dr = e^u du$

$$\int G(r) dr \rightarrow \int F(U) dU \quad (6.3)$$

Проте, запропоноване відображення виключає функцію Якобіан i , таким чином, приводить до уяви інваріанта передньої кромки, яка також є інваріантом для змін інтегральної інтенсивності через масштабні зміни площини образу. Таким чином, правило для одержання інваріантної інтегрованої інтенсивності кореляції – це не спотворений перетворений образ введенням множника – Якобіана. Це важливе правило забезпечить нам те,

що визначення у випадку перехресної корельованої відповідності відбується без необхідності адаптивної порогової системи.

Математика таблиць 6.1 та 6.2 відбиває функції, зображені на рис.48 для випадків виключеного і включеного Якобіана, відповідно. В таблиці 6.1, $G(r)$ і $G(r')$ кожна, створена двома, "частковими" неперервними функціями $g_1(r), g_2(r)$ і $g'_1(r), g'_2(r)$ де штрих означає масштабовану і зсунуту версію нештрихованої функції, масштабованої на множник a і зсунутої на множник b . Кожна із цих функцій відображується в площину за допомогою використання функції відображення $r = e^u$, де множник – Якобіан виключений. Ці функцію дано як $F_1(u), F_2(u)$ і $F'_1(u), F'_2(u)$. І, нарешті, ці функції на площині ω проінтегровані для знаходження виразів площ, пов'язаних з цими функціями. Ці площі дані як A_1, A_2, A'_1, A'_2 . Очевидно, що при $h=h'$ і $b=a$, площі A_1, A_2 відповідно ідентичні площам A'_1 і A'_2 .

Таблиця 6.2 складена аналогічно таблиці 6.1 за винятком того, що відображаюча функція тепер включає множник – Якобіан e^u , викликаний зміною змінних. Це призводить до спотворень в відображаючих функціях $F_1(u), F_2(u)$ і $F'_1(u), F'_2(u)$, які узгоджуються з принципом збереження енергії і, як очікувалось, здійснює для більших і менших об'єктів неоднакові інтенсивності в площині ω . Проте, це не бажано для збереження масштабно-інваріантної кореляції піку інтенсивності. Далі запропоновано нове правило відображення (див. рівняння 6.2) і проілюстроване це правило більш складними образами в наступному моделюванні. Було розроблено кодування, яке перетворювало образ, розташований в площині Z , в масштабно і поворотно інваріантний простір, розташований в площині ω , використовуючи комплексне логарифмічне відображення для моделювання архітектури таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

$G(r) = g_1(r) + g_2(r)$	$G'(r) = g'_1(r) + g'_2(r)$
$g_1(r) = \frac{h}{l}(r - c)$	$g'_1(r) = \frac{h'}{al}(r - bc)$
$g_2(r) = -\frac{h}{l}r + 2h + \frac{hc}{l}$	$g'_2(r) = -\frac{h'}{la}r + 2h' + \frac{hbc}{al}$
$F_1(u) = \frac{h}{l}(e^u - c)$	$F_1(u) = \frac{h'}{al}(e^u - bc)$
$F_2(u) = 2h - \frac{h}{l}(e^u - c)$	$F_2(u) = 2h' - \frac{h'}{al}(e^u - bc)$
$A_1 = h - \frac{hc}{l} \ln\left(\frac{c+l}{c}\right)$	$A'_1 = h' - \frac{h'bc}{al} \ln\left(\frac{bc+al}{bc}\right)$
$A_2 = -h + \left(2h + \frac{hc}{l}\right) \ln\left(\frac{c+2l}{c+l}\right)$	$A'_2 = -h' + \left(2h' + \frac{h'bc}{al}\right) \ln\left(\frac{bc+2al}{bc+al}\right)$

Розроблений додатковий код, який дає змогу “замотування” площини ω для створення логарифмічно спотвореного “намотаного” образу, який зберігав кутову інформацію, пов’язану з цим образом.

Таблиця 6.2

$G(r) = g_1(r) + g_2(r)$	$G'(r) = g'_1(r) + g'_2(r)$
$g_1(r) = \frac{h}{l}(r - c)$	$g'_1(r) = \frac{h'}{al}(r - bc)$
$g_2(r) = -\frac{h}{l}r + 2h + \frac{hc}{l}$	$g'_2(r) = -\frac{h'}{la}r + 2h' + \frac{hbc}{al}$
$F_1(u) = \frac{he^u}{l}(e^u - c)$	$F'_1(u) = \frac{h'e^u}{al}(e^u - bc)$
$F_2(u) = 2he^u - \frac{he^u}{l}(e^u - c)$	$F'_2(u) = 2h'e^u - \frac{h'e^u}{al}(e^u - bc)$
$A_1 = \frac{hl}{2}$	$A'_1 = \frac{h'al}{2}$
$A_2 = \frac{hl}{2}$	$A'_2 = \frac{h'al}{2}$

Це забезпечило засоби, за допомогою яких можна спостерігати шляхом цифрового моделювання інформаційної структури, яка може знаходитися між оком і корою головного мозку, де, як вважається, відбуваються процеси сприйняття більш високого рівня. Область штучного інтелекту, зокрема, представлення знань, так використовується в машинному вивченні образів, що може багато використати із інформаційної структури, яка ефективна і може бути розроблена для швидких адаптивних досліджень. Кодування було розроблено для забезпечення інтерактивного інструменту для вивчення можливої структури зорової інформації в людській зоровій системі за сітчаткою, яке можна знайти відповіді в цій області.

Першим тестовим образом, що розглядається тут, є вузьке кільце. Структури штучного кільця були створені при допомозі команди “CIRCLE”. Розмір образу 512 x 512 пікселів. Центр кільця розміщений в точці (256,256). Внутрішній і зовнішній радіуси немасштабованого кільця взяті, відповідно, 200:200 пікселів. Потім в кільці був зроблений виріз, щоб задати точку відліку для циклічних вертикальних зсувів, що відбуваються по u координаті площини ω для відповідних поворотів θ на площині Z .

Коли кільце в площині образів Z перетворено за допомогою відображення, заданого рівняннями (6.1) в площині ω отримується пряма вертикальна смуга. У випадку кільця з вирізом застосовують команду “POLARC”, щоб моделювати відображення, що задається рівняннями 6.1. В результаті отримується вертикальна смуга, в площині ω з невеликою пропущеною ділянкою, зумовленою вирізаним кільцем. Вертикальне по-

ложення вирізаної частини кільця відповідає кутіві, на якому знаходиться виріз на площині образів Z . При зміні масштабних розмірів текстового образу відповідна вертикальна смуга зсувається вздовж горизонтальної осі ($u=\ln(r)$) площини. Чим більше тестове кільце, тим правіше з'являється вертикальна смуга на площині ω .

Для формування масштабно-інваріантного виходу, який зберігає кутіву інформацію, як зображено на рис.6.1, звертаються до програми "WRAPBACK" слідом за використанням програми "POLARC". Ця програма впорядковує інформацію, що міститься на площині ω , просторово переорієнтовуючи ці дані.

Хоча кільце є простим бінарним образом з інваріантністю передньої кромки, масштабно-інваріантне зображення діє і на більш складних сірих масштабних образах. Щоб розглянути, що відбувається в просторі ознак інваріантної передньої кромки (тобто на площині ω), коли відбуваються масштабні зміни складного образу, розглянемо відповідні логарифмічні відображення для кожного випадку (трьох ідентичних сірих масштабних об'єктів різного розміру).

Рис.6.5 показує, який ефект масштабування здійснює на координати (U, V) площини ω . На цьому рисунку видно три ідентичних об'єкти різних розмірів. Навпроти кожного об'єкта знаходиться модульоване логарифмічне відображення. Видно, що для кожного масштабного об'єкта на площині Z є майже ідентичне подання, виключаючи лише постійне зміщення по координаті U , тому, об'єкт на площині ω незалежний від масштабу на площині образу. Будь-яка незначна відмінність відбувається внаслідок втрати роздільної здатності при розгляді менших образів.

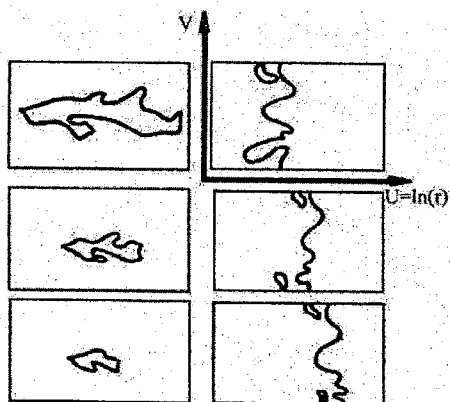


Рис.6.5. Ефект масштабування

Обертання площини образу (рис.6.6) призводить до кругових переміщень тільки координати V площини ω .

Проблема слідування є суттєво важливою внаслідок того, що будь-яка зміна, викликана перетворенням, може значно спотворити перетворений образ, який мусить бути впізнаним при допомозі шаблонного збігу з еталонним образом. Використання такої архітектури є менш чутливим до варіацій положення центроїду. Штучне кільце з центром в (256, 256) і розміром образу 512x512 пікселів вводиться в програму "POLARC" і перетворюється для отримання вихідних образів. При збільшенні незбігу центроїду із центром образу на п'ять піксельних кроків, спотворення вихідного образу також збільшується. Проте, зовсім очевидно, що лише полярне відображення більше спотворене, ніж відповідне архітектурне відображення.

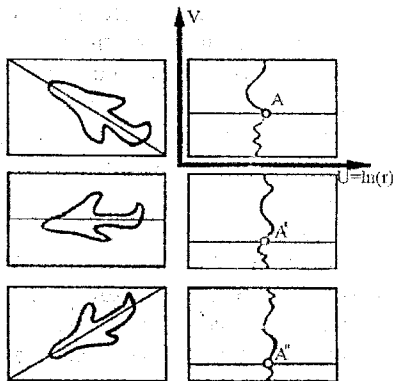


Рис 6.6. Обертання площини образу

Більш детальніший розгляд кількості пікселів, що містяться в вертикальній смугі, як функція від зміщення центроїду, дає міру видимого спотворення цієї смуги. Для полярного представлення 17-ти піксельна різниця існує між незміщеною версією (ширина 10 пікселів) і піксельною зміщеною версією (ширина 27 пікселів), в той час, як відповідна різниця модельованого запропонованою архітектурою відображення, всього 5 пікселів. Це частково може бути пояснено грубим розподілом образів на периферії площини образу. При збільшенні розмірів образу зовнішня частина його стає менш чутливою до руху центральної точки, внаслідок того, міжобразова відстань на площині ω зменшується із збільшенням координати відстані від центра (див. рис.6.3). Центроїд об'єкта визначається його зовнішніми краями. Якщо може бути запропоноване правильне ділення, отримуємо відображення, яке менш чутливе до помилок розміщення центроїду. Ця тенденція зображена у вигляді графіка на рис.6.7. Зменшення центроїду відкладається за кількістю пікселів по горизонтальній осі, а спотворення, що вимірюється кількістю пікселів, – по вертикальній осі. Спотворення визначається як кількість горизонтальних пікселів, необхідних для зміщення спотвореного образу в одній вертикальній смугі мінус ширина неспотворе-

ного образу. Таким чином, коли вказано на центр круга, спотворення рівне нулю. Із цього графічного зображення видно, що при введенні великої помилки координати, що вказує центр, ступінь спотворення для випадку рівномірного розподілу росте швидше ніж у випадку неоднорідного розподілу образів, створених даною архітектурою. Таким чином, забезпечується нечутливість до незначних зміщень центруду.

Зауважимо, що відстань між центральною точкою перетворення і першим кільцем може бути вибрана так, щоб мінімізувати чутливість до центральної точки в специфічних використаннях, де апріорна інформація про масштабні зміни доступна в промислових середовищах. Щоб уникнути втрат інформації, пов'язаних із проблемою центрального отвору, що викликаються сингулярністю еквівалентного логарифмічного перетворення, можна заповнити пропуск однорідним масивом сенсорів. Обробка цих даних в зв'язку із даними, що зібрані архітектурним відображенням, а також "зшиттям" цих двох сенсорних конфігурацій разом є областю, що потребує подальших досліджень.

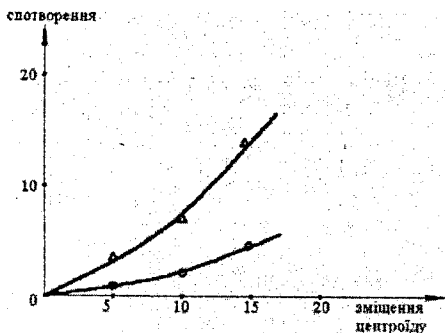


Рис.6.7. Графік залежності спотворення зображення від зміщення центруду

Описана архітектура є масштабно і обертово інваріантною. В ній масштаби і повороти перетворюються в зсуви ідентичних образів. Важливим фактором, що відрізняє цю архітектуру від масштабно-інваріантних перетворень Фур'є, або Мелліна-Фур'є, є те, що вона не потребує розрахунків для досягнення властивостей інваріантності, в той час, як інші методи потребують великих затрат часу на проведення математичних розрахунків. Більш детально це видно із короткого огляду масштабно-інваріантних перетворень Фур'є і Мелліна-Фур'є.

Відомо, що перетворення Фур'є (ПФ) забезпечує інваріантність перетворень при взятті величини ПФ:

$$\begin{aligned} f(x) &\leftrightarrow F(\omega) \rightarrow |F(\omega)| \\ f(x-a) &\leftrightarrow e^{ia} F(\omega) \rightarrow |F(\omega)| \end{aligned} \quad (6.4)$$

Функціональна форма ПФ зберігається при масштабуванні, проте амплітуда і загальний розмір перетворення змінюються на масштабний множник

$$f(a, x) \leftrightarrow \frac{1}{a} F\left(\frac{\omega}{a}\right) \rightarrow \left| \frac{1}{a} F\left(\frac{\omega}{a}\right) \right| \quad (6.5)$$

Із цього витікає, що ПФ, строго кажучи, не є масштабно-інваріантним за формозберіганням і мусить використовуватися пошук масштабованого множника, щоб “спарувати” дві різні масштабовані функції. Амплітуда перетворення масштабована за допомогою масштабованого множника, що звичайно не бажано.

Аспект інваріантності функціональної форми ПФ губиться, коли вихідна функція зрізана при допомозі вікна постійної ваги. Це призводить до зміни границь інтегрування, щоб відбити не нескінченну область визначення, що викликається вікном. Останні дослідження використання “зв’язаних” вікон (апертурних) забезпечують функціональну форму інваріантності ПФ при нескінченній області визначення і засновані на можливості зміни збільшення ваги вікна в реальному часі для кожної просторової частоти, щоб просумувати правильно оцінені величини в інтегралі. Це може бути здійснено цифровим методом, але було б дуже довготривалим для роботизованої системи зору в реальному часі. Оскільки ПФ інваріантне лише в функціональній формі, розглянемо перетворення, що базується на іншій процедурі ортогоналізації, також забезпечує масштабову інваріантність. Це перетворення дуже близьке до перетворень Лапласа і Фур’є, Мелліна (ПМ). Відомо, що ПМ забезпечує масштабову інваріантність при взятті магнітуди ПМ:

$$\begin{aligned} f(x) &\leftrightarrow F(\omega) \rightarrow |F(\omega)| \\ f(x-a) &\leftrightarrow e^{ia} F(\omega) \rightarrow |F(\omega)| \end{aligned} \quad (6.6)$$

Проте ПМ не є інваріантною відносно перенесення, що приводить до використання заміни змінних, що співвідносить ПМ і ПФ в спробі забезпечити інваріантність масштабу і перенесення розпізнавання образу оптично. Як підкреслено Макдонеллом ця процедура приводить до необхідності пошуку перенесення, необхідного для забезпечення того, що образ ніколи не розповсюдиться над від’ємними координатами, де функція натурального логарифму не визначена. Тому, перетворення Мелліна-Фур’є тільки перетворює пошук масштабу в пошук перенесення і не понижує розмірності проблеми пошуку.

Як функціональна форма інваріантності ПФ, так і масштабна інваріантність процесу Мелліна-Фур’є потребують розрахунків. Представлена архітектура не має таких недоліків, забезпечуючи n^2 архітектуру паралельно жорстко з’єднаного проходження даних для забезпечення масштабової і обертальної інваріантності в реальному часі. Ця архітектура не так чутлива до зміщення центра, як перетворення Мелліна-Фур’є. Архітектурі також

притаманний аспект інваріантності інтенсивності, який є важливим для процедур розпізнавання образів з використанням взаємно-перехресної відповідності, оскільки вони більше не потребують адаптивного порогового механізму для розпізнавання масштабних змін образу.

Деякі області потребують подальших досліджень з метою реалізації в дійсних системах. Ось деякі з них:

- 1) дослідження за проблемами, які пов'язані із електронним жорстким з'єднанням великої кількості сенсорів для реалізації архітектури. Додатково, використання комп'ютерно-генерованих голограм для виконання перетворення координат розпочалося і мусить бути досліджено для вивчення можливості використання оптичних засобів для полегшення проблеми зв'язку;
- 2) аналіз взаємно-корельованих відповідних процедур в інваріантному просторі ω мусить бути проведеним паралельно із порівнянням взаємної кореляції звичайної декоративної площини;
- 3) дослідження для визначення розміщення сенсорів на площині образу, яке оптимізує зсувно-інваріантні процеси пошуку.

6.3. ТЕЛЕСКОПІЧНА ОПТИЧНА СИСТЕМА ВВЕДЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ОБРАЗІВ

Телескопічна система являє собою складну оптичну систему із суміщеними заднім фокусом об'єктива і переднім фокусом окуляра (див. рис.6.8). Фокусні відстані телескопічної системи віддалені практично на безкінечність, тобто система не має дійсних фокусів і тому називається афокальною.

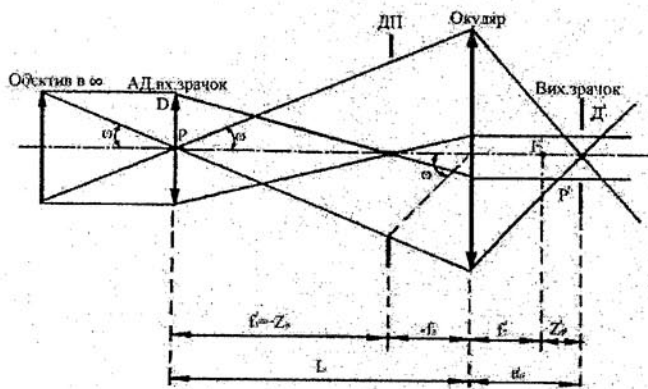


Рис.6.8. Оптична схема телескопічної системи

Всі оптичні елементи конструктивно зібрані у відповідних комірках кожуха, що покритий зсередини матеріалом, який поглинає розсіяне випромінювання.

Телескопічна оптична система (ТОС) складається: 1 – об'єктив (з заднім фокусом $f_1=200$), 2,3 – об'єктиви панкратичної системи, 4 – проміжний об'єктив, 5 – окуляр (з переднім фокусом $f_2 = 140$).

Лінійне збільшення телескопічної системи, коли $f_1=-f_1'=-f_2'$ і $\Delta=0$ дорівнює:

$$\beta_0 = \frac{-f_2'}{f_1'} = const \quad (6.7)$$

і не залежить від розташування досліджуваного об'єкта.

Кутове збільшення ТОС дорівнює:

$$\gamma_0 = \frac{-f_1'}{f_2'} = const \quad (6.8)$$

або, виражаючи кутове збільшення через лінійне, отримаємо:

$$\gamma_0 = \frac{1}{\beta_0} = const \quad (6.9)$$

Повздовжнє збільшення ТОС визначається:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\gamma_0^2} = \beta_0^2 = const \quad (6.10)$$

Видимим збільшенням ТОС називається відношення $tg\alpha'$ кута, під яким об'єкт видно неозброєним оком до зображення, що розглядається через ТОС під кутом α' , тобто:

$$\Gamma_T = \frac{tg\alpha'}{tg\alpha} \quad (6.11)$$

Світлосила ТОС визначається спільно з оком (див. рис. 6.8). Із рис. 6.8 отримуємо:

$$\frac{f_1'}{D} = \frac{f_0'}{D'} \leftrightarrow f' = \left(\frac{D}{D'}\right) f_0' \quad (6.12)$$

де f' – фокусна відстань системи ТОС – око.

Фізична (ефективна) світлосила виражається формулою:

$$\left(\frac{1}{K_\Phi}\right)^2 = \tau \left(\frac{D'}{f_0'}\right)^2 \quad (6.13)$$

Світлові якості телескопічної системи визначаються відносною суб'єктивною яскравістю, за яку приймають відношення суб'єктивної яскравості озброєного і неозброєного ока $\frac{\Phi'}{\Phi_1}$, де Φ' і Φ_1 – світлові потоки, що пройшли відповідно в систему і в неозброєне око. Виходячи із суб'єктивної яскравості, розрізняють нормальне збільшення, коли вихідний зрачок дорівнює вхідному зрачку ока ($D'=D_0$), збільшення більше нормального, коли $D' < D_0$ і збільшення менше нормального, коли $D' > D_0$. При оцінюванні суб'єктивної яскравості розглядаються два випадки.

1. Точковий об'єкт ($D' < D_o$).

Суб'єктивна яскравість для незброєного ока

$$\Phi_V = \frac{\pi D_o^2 I}{4S^2} \quad (6.14)$$

де I – сила світла джерела (об'єкта);

S – відстань від ока до об'єкта.

Суб'єктивна яскравість для озброєного ока

$$\Phi'_V = \frac{\pi D^2 I}{4S'^2} \quad (6.15)$$

де $S \approx S' = \infty$ – відстань від вхідного зрачка до об'єктиву, тоді

$$\frac{\Phi'_V}{\Phi_V} = \left(\frac{D}{D_o} \right)^2 \quad (6.16)$$

тобто відносна суб'єктивна яскравість зображення дорівнює квадратові відношення діаметрів вхідного зрачка труби до вхідного зрачка ока.

2. Об'єкт кінцевих розмірів ($D > D_o$).

Світловий потік для незброєного ока визначається як раніше (6.14), а для озброєного:

$$\Phi'_V = \frac{\pi D_o^2 \nu_o^2 I}{4S'^2} \quad (6.17)$$

де $D_o^2 \nu_o^2 = D'^2$ – величина зображення вхідного зрачка ока в просторі предметів (див. рис.6.9), тобто діючий вхідний отвір системи, тоді:

$$\frac{\Phi'_V}{\Phi_V} = \nu_o^2 \quad (6.18)$$

або відносна суб'єктивна яскравість дорівнює квадратові кутового збільшення труби.

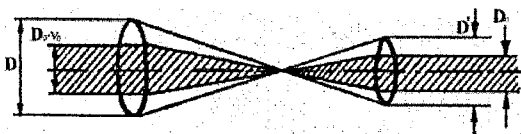


Рис.6.9. Діючий вхідний і вихідний отвори системи

У випадку об'єкта кінцевих розмірів в якості суб'єктивних яскравостей приймаються не світлові потоки, а освітленості відповідних зображень. Освітленість об'єкта, що знаходиться в нескінченності:

$$E' = \frac{\pi}{4} L \tau \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (6.19)$$

Суб'єктивна яскравість незброєного ока:

$$E'_o = \frac{\pi \tau_o L D_o^2}{4 f_o^2} \quad (6.20)$$

де τ_0 – коефіцієнт пропускання світла в оці.

Суб'єктивна яскравість озброєного ока:

$$E''_o = \frac{\pi \tau \tau_0 L D'^2}{4 f_o'^2} \quad (6.21)$$

де $L \tau = L'$ – яскравість зображення через трубку,

τ – коефіцієнт пропускання труби.

Відносна суб'єктивна яскравість системи ТОС – око буде:

$$\frac{E''_o}{E'_o} = \tau \left(\frac{D'}{D} \right)^2 \quad (6.22)$$

Роздільну здатність ТОС визначають для простору предметів і оцінюють її в кутовій мірі.

Припустимо, що роздільна відстань в площині зображення d' , а фокусна відстань останнього об'єкта (ока) f_o' , тоді у відповідності із формулою роздільної здатності:

$$\text{tg} \psi = \frac{d'}{f_o'} \quad (6.23)$$

або в кутовій мірі:

$$\psi'' = d' \cdot \frac{206265}{f_o'} \quad (6.24)$$

В об'єктивному просторі:

$$\psi'' = \frac{206265 d'}{f_o' \partial_T} \quad (6.25)$$

Для ока роздільна здатність оцінюється величиною, що приймається як критерій необхідної роздільної здатності телескопічних систем в просторі зображення. Тому роздільна здатність в просторі об'єкта мусить бути:

$\psi'' = \frac{60}{\Gamma_T}$ або для дальномірів, прицілів і т.п. $\psi'' = \frac{30}{\Gamma_T}$ Якщо аберації

об'єктива труби малі, то границя роздільної здатності об'єктива встановлюється у відповідності з дифракційною теорією зображення $\psi'' = \frac{140}{D}$, а

для астрофізичних приладів: $\psi'' = \frac{120}{D}$.

6.4. ТЕОРІЯ ПАНКРАТИЧНОЇ ТЕЛЕСКОПІЧНОЇ СИСТЕМИ

При спостереженні об'єкта з дискретною зміною збільшення (масштабуванням за відстанню до об'єкта, зокрема) спостерігач при переході з одного збільшення на друге тимчасово губить з виду об'єкт. Для безперервної (гнучкої) зміни видимого збільшення використовують так звані панкратичні вузли. Гнучка зміна збільшення в такій трубі досягається шляхом використання панкратичного об'єктива, в якому еквівалентна фокусна від-

стань може приймати довільне значення в межах від f_{min} до f_{max} .

Частіше всього зустрічаються двокомпонентні панкратичні системи. Відстань d_1 між компонентами може гнучко змінюватися. Тоді:

$$\Gamma_T = -\left(\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}\right)\beta \quad (6.26)$$

або

$$d_1 = \frac{1}{2} \left\{ Z \pm \sqrt{Z^2 - 4 \left[Z (f'_1 + f'_2) + \frac{(1-\beta)^2}{\beta} f'_1 f'_2 \right]} \right\} \quad (6.27)$$

де β – збільшення панкратичної системи,

$f'_{об}, f'_{ок}$ – фокусні відстані об'єктива і окуляра,

$1/f'$ – оптична сила панкратичної системи,

$1/f'_1, 1/f'_2$ – оптичні сили окремих компонентів.

На основі розрахунків складається графік руху лінз панкратичної системи і проектується механізм їх переміщення (див. рис.6.10).

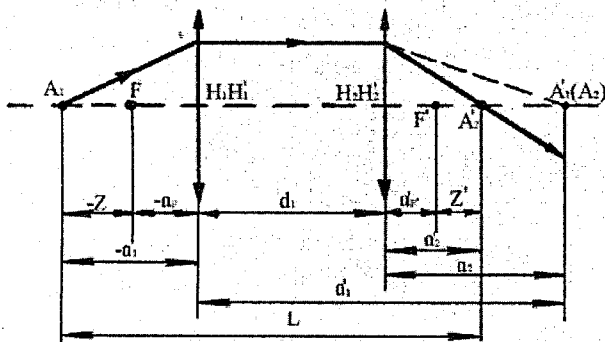


Рис.6.10. Оптична схема двокомпонентної панкратичної системи

6.5. ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ПАНКРАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІЗ ДВОХ КОМПОНЕНТ

Формула, що пов'язує міжкомпонентну відстань d з лінійним збільшенням β при відомих фокусних відстанях f_1, f_2 і відстанню l між об'єктом і зображенням, має вигляд:

$$d = \frac{1}{2} \left[l \pm \sqrt{l^2 - 4f_1 f_2 \frac{(\beta-1)^2}{\beta} - 4l(f_1 + f_2)} \right] \quad (6.28)$$

Величини S і S' – відстані від першого компонента до площини об'єктів і від другого компонента до площини зображення можуть бути зображені у вигляді:

$$S = f_1 \frac{d-l+(1-\beta)f_2}{\beta f_2 + f_1}; S' = l - S - d \quad (6.29)$$

Для того, щоб при заданій комбінації конструктивних елементів f_1, f_2 і l існувало розв'язання для певного діапазону значень лінійного збільшення β необхідно, щоб $\Delta = l^2 - 4f_1f_2 \frac{(\beta-1)^2}{\beta} - 4l(f_1 + f_2)$ було додатним.

Границя області розв'язування для величини β визначається умовою $\Delta=0$, або

$$\frac{(\beta-1)^2}{\beta} = -l \left(\varphi_1 + \varphi_2 - \frac{1}{4} \varphi_1 \varphi_2 \right) \quad (6.30)$$

де $\varphi_1 = 1/f_1, \varphi_2 = 1/f_2$

При цьому абсолютні значення β можуть бути довільними, тобто від 0 до $+\infty$ і від 0 до $-\infty$ відповідно при $f_1 \cdot f_2 < 0$ і $f_1 \cdot f_2 > 0$

Вибір f_1 і f_2 , а також d здійснюється на основі досягнення мінімально можливої довжини системи при заданих її параметрах (діаметр, фокусна відстань) і необхідної якості зображення. З цією метою вводиться деякий емпіричний критерій якості об'єктива C вигляду:

$$C = \frac{2f'_{\max} \cdot \omega'}{l_c - 1,2 \frac{f'_{\max}}{\sqrt{m}}} \quad (6.32)$$

де ω' – відносний отвір об'єктива;

l_c – довжина всього об'єктива;

m – перепад збільшень.

При виборі системи потрібно прямувати до мінімальних значень:

$$\frac{y_1}{f_1} \text{ і } \frac{h_1}{f_1} \rightarrow \min, \quad (6.33)$$

тобто до мінімальних кутів заломлення апертурного і польового променів і досягти максимального значення коефіцієнта якості C . З умов (6.32) і (6.33) визначаємо f_1 і f_2 .

Розв'язуючи сумісно рівняння (6.28) і (6.29) при умовах (6.30), (6.31) отримуємо значення S' . Знаючи S' , можна визначити фокусну відстань F телескопічної системи, а тому, лінійне збільшення четвертого компонента:

$$F = f'_1 \cdot \beta \cdot \beta_4 \quad (6.34)$$

де F – фокусна відстань системи;

f'_1 – фокусна відстань першого компонента;

β – лінійне збільшення паякратичної системи;

β_4 – лінійне збільшення четвертого компонента.

Таким чином, зображення об'єкта, віддаленого на відстань S від телескопічної системи, отримуємо в фокусі F останньої. Розмістивши окуляр S так, щоб його фокус збігся з фокусом телескопічної системи (рис. 6.11) на виході отримаємо паралельний пучок, а, відповідно, контрастне зображення об'єкта може знаходитися в певному інтервалі відстаней від окуляра.

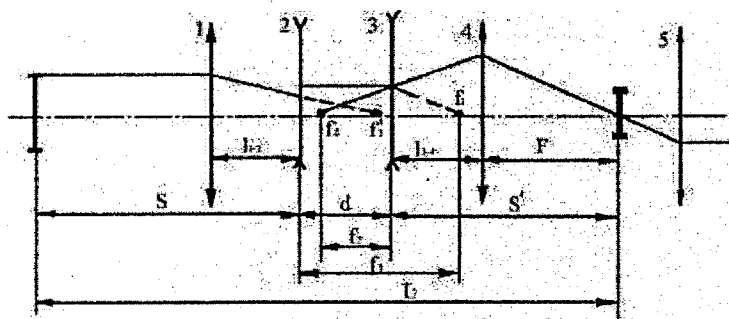


Рис.6.11. Оптична схема телескопічної системи

Враховуючи діаметр окуляра 5, який мусить бути узгодженим з діаметром компонента 4 телескопічної системи і зменшення лінійних розмірів системи, підбирається фокусна відстань компонента 5 – f_5 .

Тому, загальний габаритний розмір оптичної системи вздовж оптичної осі:

$$L = l_{1-2} + d + S' + f_5 \quad (6.35)$$

Повна принципова схема оптичної системи зображена на рис.6.12, а робоча оптична схема телескопічної системи введення інформації – на рис.6.13.

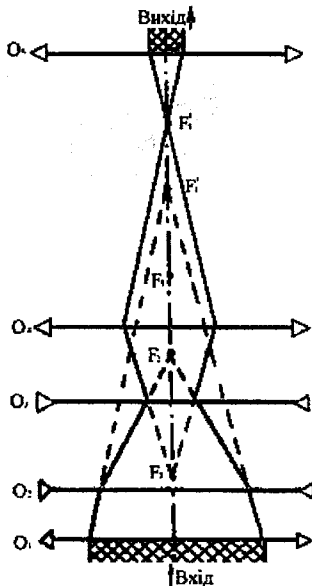


Рис.6.12. Принципова схема оптичної системи

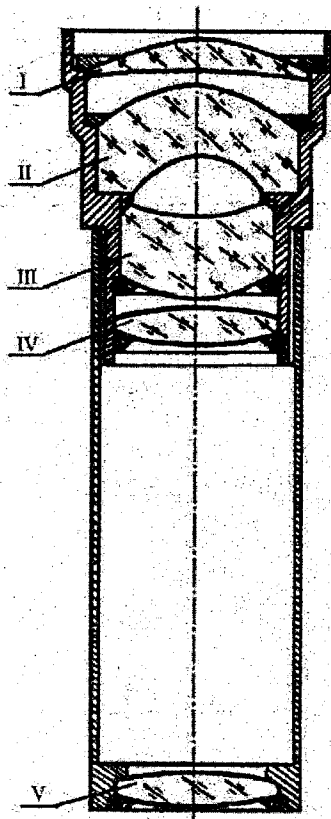


Рис.6.13. Оптична схема телескопічної системи введення інформації

ЛИТЕРАТУРА

1. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения: Пер. с франц.-М.: Мир,1973.-295с.
2. Слюсарев Г.Г. Метод расчета оптических систем.-Л.: Машиностроение, 1969.-С.48-54.
3. Карякин Н.А. Световые приборы.- М.: Высшая школа, 1975.- 335с.
4. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике: Пер. с англ.-М.: Мир,1971.-496 с.
5. Cornejo-Rodrigues Alejandro, Cordero Davila Alberto //Journ. Appl.Opt. - 1979.-vol.18,N18. -P.3075-3076.
6. Helstrom Carl W. Image restoration by method of least squares // Journ.Opt. Soc.America.- 1967.-vol.57, N3.-P.297-303.
7. Feder Donald P. Differentiation of ray-tracing equations with respect to construction parameter sofrotationally summetric optics // Journ.Opt. Soc.America.- 1968.-vol.58, N11. - P.1494-1505.
8. Edmonds W.R. Imaging propertie sofaconic axicon // Journ.Appl.Opt. - 1974.-vol.13,N8. - P.1762-1764.
9. Калке У., Харрис Т., Козанке К., Макс Э. Оптическая обработка информации: Пер.с англ.-М.: Мир,1966.-С.294-303.
10. Fried David L. Least square fitting wave-front distortione stimate to an array of phase-difference measurements. //Journ.Opt. Soc.America.- 1977.-vol.67,N3.-P.370-375.
11. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Пер. с англ.-М.: Мир,1983.-352с.
12. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов.- М.: Радио исвязь, 1983.-320с.
13. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика.-М.: Радио исвязь, 1990.-112с.
14. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания.- М.: Высшая школа, 1984.-208с.
15. Vuckling Eero. Aalto-optiikka // Tutkimu sjatekn.-1975.-N2.-P.7-10.
16. Пейсахсон И.В., Тарвакин И.Н. О расчёте хода лучей в произвольной оптической системе //ОМП.-1973.-N11.-С.15-19.
17. Frieden B. Roy Longitudinal image formation //Journ.Opt. Soc.America.- 1966.-vol.56, N11.-P.1495-1501.
18. Щепина Н.С. Основы светотехники.-М.:Энергоатомиздат,1985.-344с.
19. Матвеев А.Н. Оптика.-М.: Высшая школа,1985.-С.96-120.
20. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.Геометрическая оптика неоднородных сред.-М.: Наука, 1980.-С.22-28.
21. Микаэлян А.Л., Бобринев В.Н. Оптические методы обработки информации.-Л.:Наука,1974.-С.52-56.
22. Ивандиков Я.М. Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов.-М.:Машиностроение,1972.-С.84-92.

23. Webb Robert Howard. Elementary wave optics // Journ. Brit. Nat. Bibliogr. - 1969. - vol. 11, N1029. - P. 5-7.
24. Гуторов М.М. Основы светотехники и источники света. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - С. 124-134.
25. Сапожников Р.А. Теоретическая фотометрия. - М.: Энергия, 1977. - С. 154-162.
26. Shealy David L., Burkhard Donald G. Caustic surfaces and irradiance for reflection from an ellipsoid, elliptic paraboloid, and elliptic cone // Journ. Appl. Opt. - 1973. - vol. 12, N12. - P. 2955-2959.
27. Свет В.Д. Оптические методы обработки сигналов. - М.: Энергия, 1971. - С. 63-68.
28. Нельсон Т. Оптическая обработка информации: Пер. с англ. - М.: Мир, 1966. - С. 124-130.
29. Kamiyo Kozo, Kano Tetsuo, Matsuzawa Hidenori. Optimum design of spherical and ellipsoidal pumping chambers for lasers // Journ. Proc. IEEE. - 1967. - vol. 55, N9. - P. 1630-1631.
30. Медведев В.Е., Парицкая Г.Г. Расчет освещенности в изображении // Оптика и спектроскопия. - 1966. - т. 11. - Вып. 5. - С. 638-642.
31. Козанне А., Флере Ж., Метр Г., Руссо М. Оптика и связь: Пер. с франц. - М.: Мир, 1984. - С. 28-35.
32. Samberly Morris. Curious optical theorem // Amer. Journ. Phys. - 1967. - vol. 35, N9. - P. 882.
33. Катыс Г.П. Объемное и квазиобъемное представление информации. - М.: Энергия, 1975. - 185 с.
34. Carhoun Dean O. Time-varying reflection from rotating convex surfaces // Journ. Opt. Soc. America. - 1968. - vol. 58, N1. - P. 41-47.
35. Hayes John, Underwood K.L., Loomis John Parks, Robert E., Wyant James C. Testing of nonlinear diamond - turn reflexicons // Journ. Appl. Opt. - 1981. - vol. 20, N2. - P. 235-239.
36. Акаев А.А., Майоров С.А. Когерентные оптические вычислительные машины. - Л.: Наука, 1977. - С. 24-30.
37. Живонский В.Н., Арховский В.Ф. Корреляционные устройства. - М.: Энергия, 1972. - С. 28-32.
38. Сафронов Ю.П., Эльман Р.И. Инфракрасные распознающие устройства. - М.: Воениздат, 1976. - 208 с.
39. Смолинский Е.С., Кожемяко В.П., Гайда В.Б., Гаркушевский В.С., Петрук В.Г., Яблочников С.Л. Тепловизионное устройство для определения местоположения нагретых тел // Оптические сканирующие устройства и измерительные приборы на их основе. - Тез. докл. II Всесоюзного совещания "ОСУ - 88". - Барнаул, 1988, ч. 1. - С. 29.
40. Guha J.K., Martin John L., Mickish Roger A., Pape Eari E. Performance of a coated conical annular resonator // Journ. Appl. Opt. - 1981. - vol. 20, N18. - P. 3089-3090.

41. Eichhorn William L. Generalized conic concentrators //Journ.Appl.Opt. - 1982.-vol.21,N21. -P.3887-3890.
42. Al-Marzouk K., Jacobson M., Parks R., Rodgers M. Newab solute reflectometer // Journ.Opt.Eng. -1982.-vol.21,N6.- P.976-978.
43. Gomez-Reino C. Complex amplitude distribution transmittedby a conical lens // Journ.Opt.Acta.-1982.-vol.29. -N12.-P.1619-1630.
44. Eichhorn William L. Designing generalized conic concentrators for conventional optical systems //Journ.Appl.Opt.- 1985.-vol.24. - N8 .- P.1204-1205.
45. Schmidt-Kloiber Heins, Schoeffmann Herbert. Metallichollow cones as light concentrators // Journ.Appl.Opt.-1986.-vol.25, N2 .-P.252 - 257.
46. Pluchino A., Moller K.D. Aperture matching with a conicallight pipe // Journ.Appl.Opt. - 1971.-vol.10,N7. -P.1694-1695.
47. Buchroeder R.A. A note on the visualization of conic surfaces // Journ. Opt.Е ng. - 1972.-vol.11,N3.- P.83.
48. Кожемяко В.П., Красиленко В.Г., Смолинский Е.С., Гаркушевский В.С., Петрук В.Г., Шевчук,В.Н. Устройство обработки оптической информации //Функциональная оптоэлектроника в вычислительной технике и устройствах управления: Сб. докл. I Всесоюзн.конф.-Тбилиси,1986.-С.96-98.
49. Кожемяко В.П., Смолинский Е.С., Петрук В.Г., Гаркушевский В.С., Гайда В.Б. Метод некогерентного анализа изображений// Тез.докл. респ.совещ-я по оптоэл-ке.-Винница:ВПИ, 1988.-С.62.
50. Смолинский Е.С., Киселёва Н.Н., Петрук В.Г., Гаркушевский В.С. Разработка макета и исследование устройства обработки оптического изображения // Винница:ВГПИ, 1988.-117с.- Деп.в ВНТИ Центр 02.08, N80-067910.
51. Смолинский Е.С., Красиленко В.Г., Кутаев Е.Ф., Петрук В.Г., Гаркушевский В.С. Оптический метод смещения иразвёртки изображений// Сб.материалов Всесоюзн. Совещания по оптоэлектронике. -Барнаул: БПК, 1987.-С.103-105.
52. Petre Robert, Serlemitsos Peter J. Conical imaging mirrors for high-speed x-ray telescopes //Journ.Appl.Opt.-1985.-vol.24,N12.-P.1833-1837.
53. Ludwig U.W. Special rayt race equations for conic surfaces// Journ.Opt. Soc.America.- 1971.-vol.61, N8. - P.1121-1122.
54. Martin D.H. Skew-rays incone-condensersand conicalblack bodies // Journ. Infrared Phys.-1975.-vol.15,N1.-P.67.
55. Brown S.J.S. Geometrical optics of tapered gradient-index rods // Journ. Appl.Opt. - 1980.-vol.19,N7.-P.1056-1060.
56. Василенко Г.И., Цыбулкин Л.М. Голографические распознающие устройства.- М.: Радио и связь, 1985.- С.39-68.
57. Casasent David, Psaltis Dimetri. Scale invariant opticaltrans form // Journ.Opt.Eng. - 1976.-vol.15,N3.- P.258-261.

58. Casasent David., Psaltis Dimetri. Position, rotation and scale invariant optical correlation // Journ.Appl.Opt. -1976.-vol.15,N7.- P.1779-1780.
59. Venkate swara. Rao V. Fourier technigues and performace of optical systems // Journ. Sci. and Ind.Re s.-1974.-vol.33,N8.-P.386-397.
60. King Frederick W.A. Fourier series algorithm for theanalysis of reflectance data // Journ.Phys.C: Solid StatePhys. - 1977.-vol.10,N16.- P.3199-3204.
61. Василенко В.И. Голографическое опознавание образов.- М.:Сов. радио.1977.-328 с.
62. Swantner William. Wave fronts of axicon systems //Journ. Opt. Eng. - 1982.- vol.21,N2.- P.333-339.
63. Chen Junewen. Cone-mirrorre sonator Q-swithed operation //Journ. Appl.Opt.- 1982.-vol.21, N23.-P.4329-4330.
64. Ferguson T.R., Gutheinz L.M., Mayo J.M., German J.D., Lowrey W.H., Konopnicki M.J. Conical element nomenclature, use and metrology // Journ.Opt.E ng. - 1982.-vol.21,N6.-P.959-962.
65. Смолинский Е.С, Ляшенко Б.А., Цыгулев О.В., Домбровский Р.Ф, Гаркушевский В.С. Замкнутые оптические системы для концентрации изображения // Функциональная оптоэлектроника в вычислительной технике и устройствах управления: Сб.докл.И Всесоюзн. конф.-Тбилиси: 1986.-С.258-261.
66. Pedraza-Contreras J. Comejo-Rodrigues A., Cordero-DavilaA. Formulas for setting the diamond tool in the precisin machinign of conic surfaces // Journ.Appl.Opt. -1981.-vol.20,N17. -P.2882-2883.
67. Fantone Stephen D. Simple method for testing an axicon //Journ.Appl. Opt. - 1981.-vol.20,N20. -P.3685-3686.
68. Fender Jonet S., Harvey James E. Specifying surface finish and scatte ringtolerances of conical optical elements //Journ.Opt.Eng. - 1982.-vol.21, N6.- P.983-986.
69. Guha J.K., Yoder R. Design fabrication and metrology of negative branch waxicons // Journ.Opt.Eng. -1982.-vol.21,N6.- P.963-967.
70. Yoder R.C. Conical optics in spections and machining diagnostics //Journ. Opt.E ng. - 1982.-vol.21,N6.-P.1004-1008.
71. Conf Albuergue, N.M. Conical optical element metrology //Journ.Opt. Eng.- 1982.-vol.21,N6.- P.952-1082.
72. Pine David J. Azimuthal integration of scatte red lightintensity using a conicallens //Journ.Rev. Sci.Instrum. -1984.-vol.55,N6.-P.856-859.
73. Menchaca Carmen, Malacara Danie. Directional curvature inaconic surface // Journ.Appl.Opt.- 1984.-vol.23,N19.-P.3258-3260.
74. Berreman D.W. Simple relation between refflectances of polarized components of a beam when the angle of incidencceis 45 degress //Journ. Opt. Soc.America.- 1966. -vol.56,N12.-P.1784.

75. McCoyd G.C. Polarization properties of a simple dielectric rough-surface model // Journ.Opt.Soc.America.-1967.-vol.57, N11.-P.1345-1350.
76. Ferguson Thomas R. Polarization effects in interferograms of conical optical elements // Journ.Appl.Opt. -1982.-vol.21,N3. -P.514-517.
77. Azzam R.M.A. Scheme to polarization - correct a waxicon // Journ.Appl. Opt. - 1982.-vol.21,N17. - P.3067-3068.
78. Fredricks Ronald J. Conical and hyperbolic lens generation using interferometric methods // S.P.I.E. Journal. -1969.-vol.7,N4.-P.106-110.
79. Azzam R.M.A. On the reflection of light at 45 angle of incidence // Journ. Opt.Acta.-1979.-vol.26. - N1.-P.113-115.
80. Mikhaltova I.A., Nalivaiko V.J., Soldatenkov I. S.Kinofornax icons // Journ.Opt.-1984.-vol.67, N3. -P.267-278.
81. Mashev L., Popov E. Reflection gratings in conical diffraction mounting// Journ.Opt.-1987.-vol.18,N1.-P. 3-7.
82. Popov E., Mashev L. Diffraction anomalies of coated dielectric gratings in conical diffraction mounting // Journ.Opt.Communic. - 1986.-vol.59, N5-6.- P.323-326.
83. Смолинский Е.С., Гаркушевский В.С., Петрук В.Г., Кожемяко В.П., Красиленко В.Г. Применение спектрозастинкциметра СЭП-2 для определения основных оптических характеристик многоступенчатых ячеек разделения светового изображения // Функциональная оптоэлектроника в вычислительной технике и устройствах управления: Сб. докл. I Всесоюз. конф.-Тбилиси:1986.-С.146-149.
84. Мешков В.В. Основы светотехники.-М.:Энергия, 1979.-367с.
85. Смолинский Е.С., Петрук В.Г., Гаркушевский В.С., Кожемяко В.П., Красиленко В.Г. Применение специального интегрального фотометра для определения основных оптических характеристик блоков, разделяющих световое изображение // Функциональная оптоэлектроника в вычислительной технике и устройствах управления: Сб. докл. I Всесоюз. конф.-Тбилиси:1986.-С.246-249.
86. Смолинский Е.С., Киселёва Н.Н., Петрук В.Г., Гаркушевский В.С. Исследование и разработка оптических методов преобразований, инвариантных к масштабу и повороту /ВГПИ.-Винница, 1990.-40с.-Деп.в ВНИИ Центр 01.89; N0031321.
87. Li Yi - Fan, Lit John W.Y. Temperature effects of a multiconical fiber coupler // Journ.Appl.Opt.- 1986.-vol.25,N11.-P.1765-1769.
88. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. Теория оптических систем.-М.: Машиностроение, 1973.-487 с.

Навчальне видання

Заслужений діяч науки і техніки України, Заслужений винахідник
України, д.т.н., професор Володимир Прокопович Кожем'яко
к.т.н., доцент Володимир Савович Гаркушевський
д.т.н., професор Василь Григорович Петрук

ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИСТРОЇ

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлений авторами

Редактор В.О. Дружиніна
Коректор З.В. Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 8.12.05р. Гарнітура Times New Roman
Формат 29,7x42 1/4 Папір офсетний
Друк різнографічний Ум. друк. арк. 5.49
Тираж 75 прим.
Зам. № 2005-210

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ