

Зміст та основні принципи тематичної обробки даних аерокосмічних спостережень

1. Особливості сприйняття людиною аерокосмічних зображень

Людський зір – це можливість розпізнавання відмінностей у навколишньому середовищі за допомогою відчуттів, створюваних випромінюванням із довжинами хвиль $\lambda = (0,38 - 0,78)$ мкм (світлом), що потрапляє в око [1, 11].

Дешифрування знімків є фізіологічним процесом, що безпосередньо пов'язаний із роботою зорового аналізатора людини. Останній складається з трьох відділів: 1) ока з фоторецепторами – кінцівками зорового нерва, розташованими в сітківці ока, що сприймають світлові сигнали та перетворюють їх у збудження; 2) провідника – зорових нервів, що передають подразнення в кору головного мозку – центр сприйняття; 3) коркового центру зорового аналізатора – тут нервові збудження перетворюються в зорове відчуття та формується образ.

Око – це частина органа зору, в якому створюється оптичне зображення предметів навколишнього середовища та відбуваються перетворення цього зображення в нервові збудження.

Якщо розглядати роботу ока з позицій автоматики, то можна сказати, що око має систему самонастроювання, просторову, часову, спектральну й яскравісну селекції, змінний кут зору і змінну роздільну здатність по полю зору.

Схематично будову ока зображено на рис. 1.2. Око має майже кулясту форму та діаметр близько 2,5 см. Зовні воно покрите захисною непрозорою білковою оболонкою (1) білого кольору –

склерою. Передня прозора частина (2) склери називається *роговицею (роговою оболонкою)*. На деякій відстані від неї розташована *райдужна оболонка (3)*, забарвлена пігментом. Продовження райдужної оболонки по всій внутрішній поверхні ока називається судинною оболонкою – це мережа кровоносних судин, що живлять око. Отвір у райдужній оболонці є *зіницею*. Залежно від інтенсивності падаючого світла зіниця рефлекторно змінює свій діаметр приблизно від 2 до 8 мм. Простір між роговицею та райдужною оболонкою (передня камера) заповнено прозорою рідиною. За зіницею знаходиться *кришталік (4)* – еластичне лінзоподібне тіло. Особливий м'яз (5) може змінювати в деяких межах форму кришталіка, змінюючи тим самим його оптичну силу. За умови розслабленого очного м'яза оптична сила ока приблизно дорівнює 59 діоптрій, у разі максимального напруження м'яза – 70 діоптрій. Рогова оболонка, передня камера і кришталік утворюють оптичну систему ока, оптичний центр якої розташований на відстані близько 5 мм від роговиці. Передня фокусна відстань ока – 17,05 мм, задня фокусна відстань – 22,78 мм. Показник заломлення – 1,336.

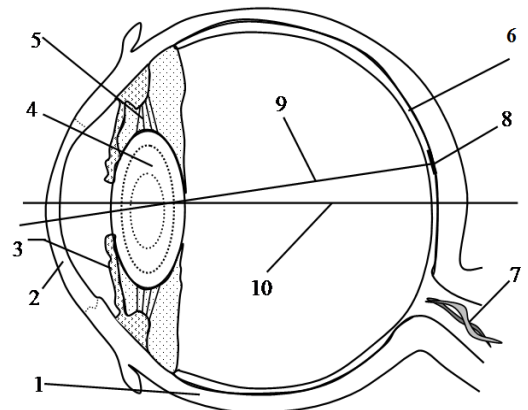


Рис. 1.2. Будова ока людини

Частина ока за кришталіком заповнена склоподібним тілом. Задня частина ока – очне дно, покрите *сітчастою оболонкою (6)*, яка являє собою складне розгалуження *зорового нерва (7)* з нервовими закінченнями – *паличками та колбочками*, що є світлочутливими елементами (фоторецепторами).

Колбочки й палички працюють за умови різних рівнів яскравості об'єкта, що спостерігається. Коли на око впливає яскравість більше 10 кд/м^2 , що відповідає денним умовам освітлення, працює колбочковий апарат. Тому зір, під час якого працюють переважно колбочки, називається *денним*.

Коли на око впливає яскравість менше ніж 10^{-2} кд/м^2 , що відповідає нічним умовам (без штучного освітлення), працює паличковий апарат. Тому зір, під час якого працюють в основному палички, називається *нічним*. Паличковий апарат значно чутливіший до світла, ніж колбочковий, але він має істотний недолік – не сприймає кольору предметів. Тому всі предмети (включаючи кольорові) в полі зору здаються сірими. Якщо на око діє яскравість, що задовольняє нерівність $0,01 < L < 10 \text{ кд/м}^2$ (сутінки), то працюють спільно колбочки і палички.

Колбочки та палички розташовані на сітківці нерівномірно. Колбочки розташовані загалом в центральній частині сітківки, що називається *жовтою плямою* (8). Жовта пляма має овальну форму з діаметром приблизно 1 мм, що відповідає кутові зору у 2° . По середині жовтої плями є поглиблення, що називається *центральною ямкою*. Її діаметр становить 0,25 – 0,3 мм, що відповідає кутові зору приблизно 1° . У разі віддалення від жовтої плями кількість колбочок зменшується, а кількість паличок зростає. За умови великої яскравості (вдень) центральна ямка є місцем найбільш чіткого бачення, а в разі малої – це місце є сліпим, оскільки в ньому вкрай мало паличок.

В ході розглядання зображень око автоматично суміщає найбільш цікаву (інформативну) ділянку зображення з центральною ямкою. Тому зорова вісь ока (9), що проходить через центр кристалика до об'єкта спостереження, відхилена приблизно на 5° від оптичної осі, що збігається з віссю симетрії оптичної системи ока (10).

Око є нелінійним приймачем світла. Зорове відчуття пропорційне логарифму яскравості, що забезпечує можливість роботи зорового апарата в умовах освітлення від 10^5 до 10^{-4} лк. Крім цього, шляхом зміни діаметра зіниці є можливість майже в 16 разів зменшити світловий потік, що надходить в око.

Око є вибірконим приймачем, тобто воно має властивість по-різному реагувати на однакову потужність випромінювання різної довжини хвилі. Ця властивість називається *спектральною чутливістю*.

Колір в оці сприймається за допомогою трьох видів колбочок. Одні з них реагують переважно на червоний, другі – на зелений, треті – на синій кольори. Комбінація нервових реакцій, що виникають у цих трьох видах колбочок та в корі головного мозку, створює умови для спостереження всього різноманіття кольорів.

Нормальний зір людини здатний розрізняти від 150 до 4 500 кольорових відтінків у видимій частині спектра. Колірна контрастна чутливість ока найбільша до жовтого і блакитного, де поріг розділення дорівнює 0,001 мкм. Значно нижча чутливість ока до червоного, зеленого й синьо-фіолетового кольорів.

Здатність розрізняти випромінювання різних довжин хвиль у паличок досить обмежена. За нічного зору максимум чутливості ока відповідає довжині хвилі $\lambda = 0,51$ мкм. За денного зору, коли працює переважно колбочковий апарат, максимум чутливості ока лежить на довжині хвилі $\lambda = 0,555$ мкм – у жовто-зеленій частині спектра.

Встановлено [11], що 1 Вт потоку монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,555$ мкм дорівнює 680 лм світлового потоку. Отже, максимальне значення спектральної чутливості ока чисельно дорівнює $K_{\lambda \text{ max}} = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

Відношення значень спектральної чутливості до максимальної чутливості ока називається *відносною спектральною чутливістю* або *відносною спектральною світловою ефективністю*.

За угодою, прийнятою в 1924 р. Міжнародною освітлювальною комісією, основною функцією спектральної чутливості ока прийнята функція відносної світлової ефективності

в умовах денного зору, що покладена в основу побудови системи світлових величин і одиниць.

Світлові та колірні пороги зору. Чутливість ока характеризується величиною світлового відчуття за умови впливу на нього визначеного світлового потоку. Око дуже чутливий приймач. У повній темряві за необмеженого часу впливу світла око здатне реагувати на випромінювання, що дорівнює $2 \cdot 10^{-17}$ Вт (для $\lambda = 0,555$ мкм), тобто око здатне сприймати світловий потік, що складається з декількох десятків квантів за секунду. Таку чутливість мають нервові закінчення – палички сітківки. Зазначене вище мінімальне значення світлової енергії, яку око здатне сприймати, характеризує його *порогову чутливість*.

Пороговий блиск. Порогова освітленість. Велике значення для практичних розрахунків дальності видимості світлових сигналів має порогова освітленість E_{Π} , тобто найменше значення освітленості на зіниці спостерігача, за якого світловий сигнал від точкового джерела є видимим. Міжнародна освітлювальна комісія рекомендує називати граничну освітленість *пороговим блиском*. Порогова освітленість є величиною оберненою до чутливості ока.

Найменшу порогову освітленість отримують у ході спостереження точкового світлового сигналу на абсолютно темному фоні, що відповідає яскравості менше 10^{-6} кд/м². Ця величина порогової освітленості називається абсолютним світловим порогом зору E_0 (за умови постійного впливу на око).

За даними багатьох досліджень [11], абсолютний поріг (пороговий блиск) E_0 коливається від $0,85 \times 10^{-9}$ до $8,5 \times 10^{-9}$ лк, але зазвичай приймається рівним 10^{-9} лк, практично у повній темряві (за яскравості 10^{-6} кд/м²). Звідси випливає, що пороговою яскравістю називається яскравість об'єкта (точкових розмірів), що спостерігається на фоні яскравістю 10^{-6} кд/м².

Порогова освітленість залежить від яскравості фону адаптації, а в разі збільшення яскравості фону зростає й гранична освітленість. У ході спостереження кольорових джерел світла око спочатку тільки виявляє за допомогою паличок наявність сигналу, а потім за умови збільшення освітленості (наприклад під час наближення до джерела) встановлює кольоровість випромінювання. Тому розрізняють світловий поріг E_{Π} і колірний поріг $E_{\Pi K}$. З усіх кольорових випромінювань найменший колірний поріг, що дорівнює світловому ($E_{\Pi} = E_{\Pi K}$), має червоний колір.

Адаптація. Пристосування ока до змінюваних умов освітлення називається *адаптацією* ока. Око має здатність пристосовуватися до широкого діапазону яскравості, що спостерігається. Процес адаптації з меншої яскравості на більшу називається процесом *світлової адаптації*, а процес адаптації з більшої яскравості на меншу – *темною адаптацією*. Адаптація пов'язана зі зміною чутливості ока. Пояснюється це тим, що чутливість ока залежить від концентрації на сітківці світлочутливої речовини. Якщо око спостерігало світлий фон (світлова адаптація), то концентрація зорового фотореагенту зменшилася (відбулося його розкладання), збільшилися шуми ока та потрібна більша освітленість від джерела світла, щоб останній був сприйнятий (зменшення чутливості). Якщо око знаходилося в темряві (темнова адаптація), то концентрація зорового фотореагенту на сітківці збільшилася, зменшилися шуми.

Процес адаптації вимагає часу, причому світлова адаптація відбувається порівняно швидко, протягом 5–8 хв, у той час як повна темнова адаптація більш тривала і забирає приблизно 50–60 хв.

Інерційність зору виявляється в запізненні світлового відчуття відносно початку впливу світлового імпульсу й у наявності протягом деякого часу цього відчуття після того, як імпульс припинився (наприклад від пробліскових джерел світла). Практичний час наростання та спадання світлового відчуття, приблизно однаковий і становить близько 0,1–0,2 с. Найбільш швидко наростають і загасають відчуття від червоного кольору, потім від зеленого й синього.

Контрастна чутливість ока. Око має здатність розрізнити один об'єкт на одноколірному фоні іншого тільки за деякої різниці яскравості між об'єктом і фоном. Процес

зорового сприйняття, за якого починає бути видимим об'єкт у вигляді плями, що не має форми, на фоні даної яскравості називається *стадією виявлення*.

Граничним контрастом називають відношення:

$$K_0 = \frac{L - L_\phi}{L_\phi}, \text{ якщо } L_\phi < L;$$

$$K_0 = \frac{L_\phi - L}{L}, \text{ якщо } L_\phi > L;$$

де L – мінімальна яскравість об'єкта, що ще виявляється;

L_ϕ – яскравість фону.

Контрастною чутливістю називають величину, обернену до найменшого граничного контрасту $1/K_0$.

Величина контрастної чутливості має максимум за яскравості фону 10^3 кд/м². Експериментально доведено, що у світлих тонах $K_{\text{нор}} = 0,02$, у середніх $K_{\text{нор}} = 0,06$, у темних $K_{\text{нор}} = 0,25$.

Фонове освітлення значно впливає на контрастну чутливість ока в зв'язку з його адаптацією. Залежність диференціальної контрастної чутливості ока людини від фонового освітлення показана на рис. 1.3.

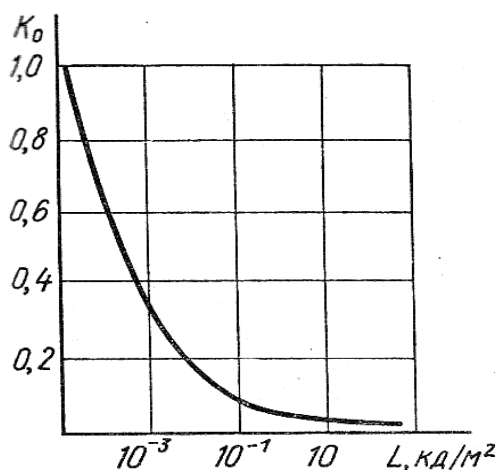


Рис. 1.3. Залежність порога контрастної чутливості ока від яскравості фону

Подальше зменшення фонового освітлення швидко погіршує диференціальну контрастну чутливість ока, а подальше збільшення фонового освітлення її покращує незначно [12].

Акомодація. Основна особливість ока як оптичного інструмента полягає в здатності рефлекторно змінювати оптичну силу (опуклість кристаліка) очної оптики залежно від положення предмета. Таке при-стосування ока до зміни положення предмета, що спостерігається, називається *акомодацією*.

Процес акомодатії й адаптації очей у тренованого дешифрувальника під час спостереження фотозображень займає близько 0,3 с. Промені, що пройшли через кристалік, створюють зменшене ізворотне зображення об'єктів на сітківці ока. Обернення цих зображень відбувається в мозку та є процесом психологічного характеру.

Область акомодатії ока можна визначити положенням двох точок:

дальня точка акомодатії визначається положенням предмета, зображення якого утворюється на сітківці за умови розслабленого очного м'яза. В нормального ока дальня точка акомодатії знаходиться в нескінченності;

ближня точка акомодатії – це відстань від предмета, що розглядається, до ока за максимальної напруги очного м'яза. Ближня точка нормального ока знаходиться на відстані 10–20 см від ока. З віком ця відстань збільшується.

Крім цих двох точок, що визначають границі області акомодатії, в ока існує *відстань найкращого зору*, тобто відстань від предмета до ока, за якої зручніше за все (без надмірної напруги) розглядати деталі об'єкта. Ця відстань у нормального ока дорівнює 25 см.

У разі порушення зору зображення віддалених предметів за умови ненапруженого ока можуть сформуватися або перед сітківкою (*короткозорість*), або за сітківкою (*далекозорість*), рис. 1.4.

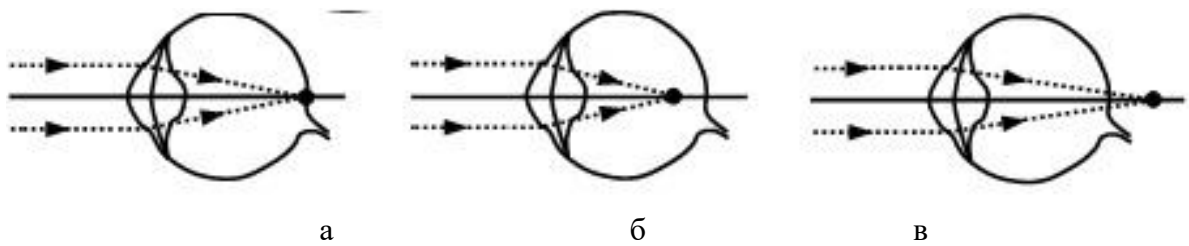


Рис. 1.4. Зображення віддаленого об'єкта:
а – нормальне око; б – короткозоре око; в – далекозоре око

Відстань найкращого зору в короткозорого ока менша, а в далекозорого більша, ніж у нормального ока. Для виправлення дефекту зору використовують окуляри. Для далекозорого ока необхідні окуляри з позитивною оптичною силою (збиральні лінзи), для короткозорого – з негативною оптичною силою (розсіювальні лінзи). Рис. 1.5 ілюструє корекцію далекозорого та короткозорого ока за допомогою окулярів.

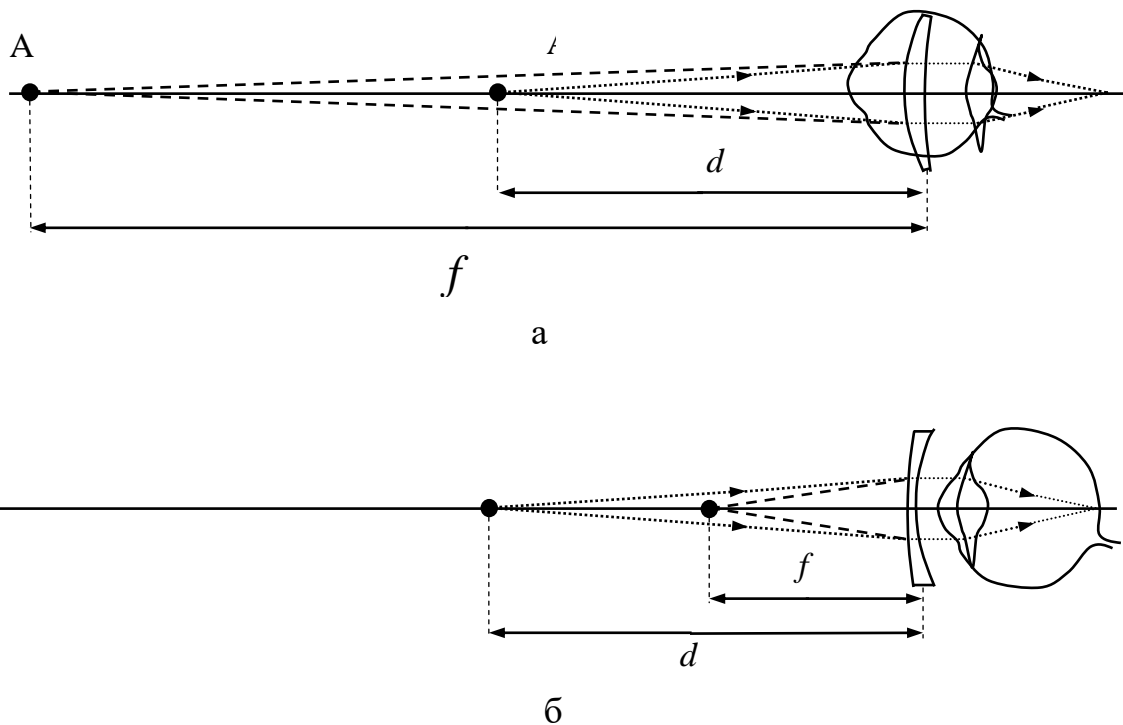


Рис. 1.5. Корекція порушень зору:
а – для далекозорого ока; б – для короткозорого ока

Блискучість і засліпленість. Розподіл яскравості в полі зору спостерігача зазвичай нерівномірний. Зниження видимості виникає з появою в полі зору спостерігача світлових плям з яскравістю, що різко відрізняється від яскравості навколишнього фону. Ця властивість предметів, що спостерігаються, називається їх *блискучістю*. Стан ока, що виникає в результаті впливу блискучості, називається *засліпленістю*.

Недоліки ока: неповне центрування, сферична та хроматична аберация, в результаті чого точка, що спостерігається, зображується на сітківці не у вигляді точки, а у вигляді кружка. Крім того, недоліки ока викликають явище іррадіації, яке полягає в тому, що зображення на сітківці не буває повністю різким, границя світлого й темного обрисів розмита і ми бачимо її не там, де вона знаходиться насправді. Границі світлого об'єкта ми бачимо або розширеними (позитивна іррадіація), або звуженими (негативна іррадіація).

Зорове стомлення виникає за тривалої роботи ока, особливо під час роботи на стереоскопічних приладах, і виявляється в зниженні працездатності оптичного та м'язового апаратів ока. Стомлення оптичного апарату призводить до зниження

роздільної і розпізнавальної здатності ока. Стомлення м'язового апарата зводиться до ослаблення й уповільнення реакції на подразнення окорушійних, акомодацийних та інших м'язів. Ці явища супроводжуються різно в очах, головним болем та іншими розладами нервової системи.

Зорові ілюзії виявляються у викривленні сприйняття розмірів, форм, тонів об'єктів. Найбільш розповсюджена ілюзія в процесі дешифрування – ілюзія зворотного рельєфу.

Розрізнення ока. Мірою розрізнення ока є найменша кутова відстань α_{\min} між двома близько розташованими на деякому фоні точками, які око здатне розрізнити окремо. Крім цього, розрізнення ока може бути оцінена кількістю світлих (або темних) ліній, що розрізняються оком за допомогою спеціальних тестів.

Гостротою зору називається величина, обернена до кута α_{\min} , вираженого в кутових хвилинах:

$$O_{zp} = \frac{1}{\alpha_{\min}}.$$

Граничне розрізнення ока визначається кінцевими розмірами колбочок, аберациями оптики ока і дифракційними явищами в ній.

Людське око з різною гостротою сприймає точкові та лінійні об'єкти. Тому роздільну здатність поділяють на гостроту зору першого й другого роду. *Гостроту монокулярного зору першого роду* визначає мінімальний кут, під яким спостерігач бачить окремо дві точки одиничного контрасту. Величина гостроти монокулярного зору здорової дорослої людини дорівнює від 1 до 0,5 кутових хвилин. У середньому, з відстані 250 мм спостерігач може розрізнити дві контрастні точки між якими 0,06 – 0,07 мм.

Гостроту монокулярного зору другого роду характеризує мінімальний кут, під яким око бачить окремо дві паралельні лінії. Середня величина гостроти монокулярного зору другого роду для вертикальних ліній становить 20". Розрізнення ока залежить від контрасту, яскравості об'єкта, часу спостереження [1].

Поле зору ока. Фізично спільне поле зору ока становить 125° по вертикалі та 150° по горизонталі. В денних умовах людина сприймає світло центральною частиною сітківки (жовтою плямою) у межах 5–10°. Для чіткого розрізнення за денного освітлення може бути використана лише незначна частина цього поля (приблизно 1,3–1,7°), яка відповідає центральній ямці. Вся інша частина поля зору слугує тільки для грубого орієнтування в просторі. Внаслідок цього, для огляду навколишнього простору оку доводиться здійснювати кутовий рух у межах 45–50°.

Прийнято, що все поле зору людини без повороту голови можна розділити на три зони [12]. Перша зона – оперативне поле 3°x3°, у ньому здійснюється миттєва обробка інформації. Друга зона – поле постійного контролю: ±31° у горизонтальному напрямку та +23° ... -32° по вертикалі. У разі появи зорового подразника поза цією зоною людині потрібно повернути голову.

Бінокулярний і стереоскопічний зір. Зір двома очима дозволяє сприймати просторове положення об'єкта. При цьому дешифрувальник встановлює очі так, щоб зорові осі перетиналися у тому місці об'єкта, яке він бажає чітко бачити.

Точка перетину зорових осей F називається *точкою фіксації бінокулярного зору*. Зображення точки фіксації знаходяться в центральних ямках f_1 і f_2 (рис. 1.6). Відстань між передніми вузловими точками очей o_1 і o_2 називається *очним базисом*. Величина очного базису в людей коливається в межах від 58 до 72 мм.

Зображення однієї й тієї ж точки предмета, отримані на сітківках обох очей, називаються *відповідними точками*, а промені, що будують ці зображення та проходять через вузлові точки, – *відповідними променями*.

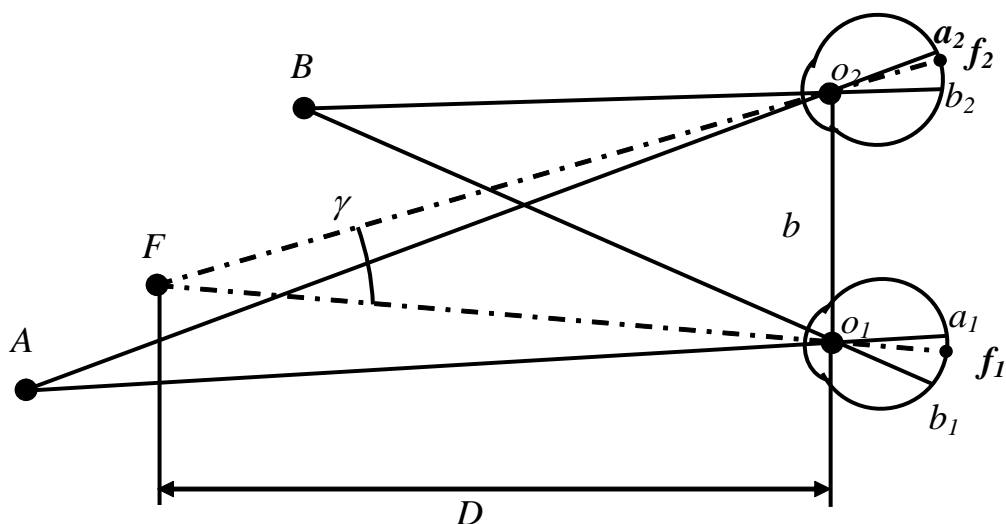


Рис. 1.6. Геометрія бінокулярного зору

Кут між зоровими осями очей називається *кутом конвергенції* γ , а кут між парою відповідних променів – *паралактичним кутом*.

Бінокулярний зір дозволяє об'єднати зображення двох предметів у одне й оцінити глибину. Основним фактором під час оцінювання глибини є *фізіологічний паралакс*, який являє собою різницю дуг, що визначають положення відповідних точок на сітківках, наприклад фізіологічний паралакс точки A :

$$P_{\phi} = f_1 \hat{a}_1 - f_2 \hat{a}_2.$$

Найменша різниця паралактичних кутів, коли ще помітна різниця глибин цих точок, називається *гостротою бінокулярного зору першого роду*. Експериментальним шляхом встановлено, що вона дорівнює $30''$.

Гостротою бінокулярного зору другого роду називається найменша різниця паралактичних кутів для двох вертикальних прямих, за якої ще помітна різниця глибин цих прямих. Ця величина дорівнює $10''$.

Необхідно відзначити, що наведені значення гостроти людського зору отримані за оптимальних умов розглядання, що характеризуються освітленістю об'єктів спостереження 800 лк, світлом із довжиною хвилі 0,50–0,57 мкм. Відхилення умов освітлення від оптимальних знижує гостроту людського зору.

Існує тісна залежність гостроти зору не тільки від розмірів об'єктів, але й від тонового контрасту зображень, що спостерігаються. Зменшення тонового контрасту викликає зниження гостроти зору, тому воно має компенсуватися збільшенням розмірів зображення об'єкта.

Найменша віддаленість точок, що може бути сприйнята незброєним оком, визначається рівнянням:

$$\Delta D_{\min} = \frac{D^2}{b} \Delta \gamma,$$

де $\Delta \gamma$ – гострота зору.

Гранична відстань до точки спостереження, за якої очі перестають фіксувати віддаленість точок, називається *радіусом стереоскопічного зору*. За очного базису, рівному 65 мм, радіус стереоскопічного зору – приблизно 1300 м.

Стереоскопічне спостереження знімків. Відомо, що сприйняття глибини можливе і під час спостереження плоских об'єктів (рис. 1.7).

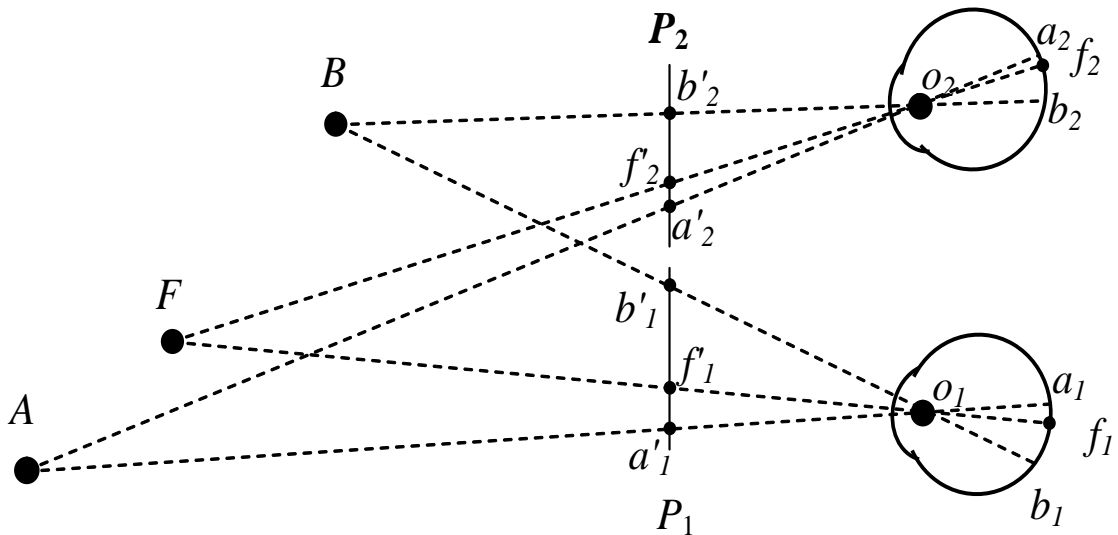


Рис. 1.7. Формування стереоскопічного ефекту під час спостереження стереопари

Якщо площинами P_1 і P_2 , розташованими довільно, перетнути пучки променів o_1AFB і o_2AFB , то точки a_1', f_1', b_1' і a_2', f_2', b_2' будуть слідами пучків на площинах та являють собою перспективні зображення предмета з центрами проєкцій у точках o_1 і o_2 .

Віддаливши предмет і поставивши вертикальний екран для спостереження кожним оком тільки відповідної йому перспективи, ліве око буде відновлювати точку A на лінії o_1a_1' , а праве – на лінії o_2a_2' . Під час спостереження двома очима буде здаватися, що точка розташована на перетині цих ліній, тобто в тому місці, яке займала в просторі точка A . Аналогічно можна сказати й про точки F і B .

Звідси випливає, що під час розглядання двох плоских пер-спективних зображень того ж предмета, наприклад двох знімків, можна одержати одне просторове зображення – стереоскопічний ефект. Для отримання стереоскопічного зображення необхідно одержати знімки з двох різних точок простору; масштаби знімків не повинні відрізнятися один від одного більше ніж на 16 %; кожним оком потрібно спостерігати окремий знімок; кут, під яким перетинаються відповідні промені, не повинен перевищувати 16° ; за даного значення паралактичного кута повинна забезпечуватися відповідна акомодация; знімки повинні бути розташовані щодо очей так, щоб відповідні зорові промені перетиналися.

Час стабільної надійності дешифрування пов'язаний із властивостями *нервової системи*. В деяких спостерігачів надійність дешифрування помітно знижується внаслідок перевантаження нервової системи вже через 2–3 год роботи, тоді як більшість дешифрувальників витримують 6–7 год безперервного дешифрування без зниження продуктивності та якості роботи [4].