

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.3

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної інженерії
та телекомунікацій

к.т.н., доц. Никітчук Т.М.

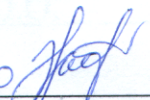
« 14 » 12 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему Дослідження методики оцінювання точності виміру координат об'єктів
по стереознімкам**

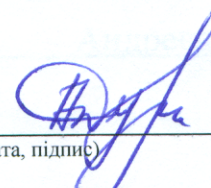
**за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»**

Виконавець роботи
студентка 2 курсу, гр.ТРМ-
19-1

14.12.20 
(дата, підпис)

Колесницька О.О.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

14.12.20 
(дата, підпис)

Дубина О.Ф.

Житомир
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему Дослідження методики оцінювання точності виміру координат об'єктів
по стереознімкам

Виконала: студентка 2 курсу, групи ТРм-19-1
спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Колесницька О.О.

Керівник Дубина О.Ф.

Рецензент Андрєєв О.В.

Житомир
2020

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т.М. Нікітчук

« 14 » серпня 2020 р.

Завдання

на кваліфікаційну магістерську роботу

Колесницької Ольги Олександрівни

1. Тема роботи Дослідження методики оцінювання точності виміру координат об'єктів по стереознімкам.

затверджено наказом по університету від «16» жовтня 2020 р. № 366/с

2. Мета дослідження Розробка та дослідження математичного апарату оцінювання точності визначення висот об'єктів по стереознімкам, отриманим з космічного апарату оптико-електронного знімання.

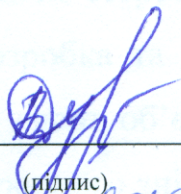
3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.): Параметри КСОЕЗ; стереознімання проводиться на одному витку польоту КА; математична модель об'єкта, що знімається; обробка знімків проводиться автоматизовано; строки зображень, що отримуються, перпендикулярні трасі КА; проекції середин строк зображень лежать на трасі КА; під час отримання першого та другого стереознімків КА рухається по прямолінійній траєкторії.

4. Основні задачі дослідження: Аналіз способів стереознімання; математичний апарат розрахунку СКВ помилки виміру висот об'єктів; розрахунок структури оптичного ПЗЗ приймача; аналіз впливу основних параметрів на точність визначення висот об'єктів.

5. Термін подання роботи до захисту 14 грудня 2020 р.

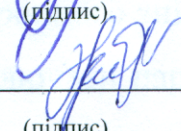
6. Дата видачі завдання «15» червня 2020 р.

Науковий керівник


(підпис)

Дубина О. Ф.

Завдання прийняв


(підпис)

Колесницька О. О.

до виконання

АННОТАЦІЯ

The topic of this master's thesis is the study of methods for measuring the accuracy of determining the coordinates of objects on stereo images.

The purpose of this work is to show and develop a method for determining the accuracy of determining the height of objects on stereo images obtained from the stereo optical-electronic imaging apparatus. This method should include the parameters that affect the accuracy of determining the height of objects and investigate the dependence of the accuracy of determining the height of objects on the parameters that affect it.

АНОТАЦІЯ

Темою даної магістерської роботи є дослідження методики оцінювання точності виміру координат об'єктів по стереознімкам.

Метою даної роботи є розробка та дослідження математичного апарату оцінювання точності визначення висот об'єктів по стереознімкам, отриманим з космічного апарату оптико-електронного знімання на одному витку польоту. Цей математичний апарат повинен включати параметри і характеристики КСОЕЗ для оцінювання помилки визначення висот об'єктів та дослідження залежності точності визначення висот об'єктів від параметрів, що впливають на неї.

ABSTRACT

The topic of this master's thesis is the study of methods for assessing the accuracy of measuring the coordinates of objects on stereo images.

The purpose of this work is to develop and study a mathematical apparatus for estimating the accuracy of determining the heights of objects on stereo images obtained from the spacecraft optoelectronic imaging in one round of flight. This mathematical apparatus should include the parameters and characteristics of the space-based optoelectronic imaging system to estimate the error in determining the heights of objects and to investigate the dependence of the accuracy of determining the heights of objects on the parameters that affect it.

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки містить 58 сторінок, 16 рисунків, 1 таблицю, 22 джерел посилання.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження методики оцінювання точності визначення висот об'єктів по стереознімкам

В першому розділі було проведено аналіз способів стереознімання за допомогою оптико-електронного датчика, в якому в якості оптичного приймача застосовується ПЗЗ. Була поставлена задача дослідження щодо розробки математичного апарату оцінювання точності визначення висот об'єктів по стереознімкам, отриманим з КА оптико-електронної системи знімання.

Другий розділ включає в себе математичний апарат розрахунку СКВ помилки виміру висот об'єктів та розрахунок структури оптичного ПЗЗ приймача.

До третього розділу увійшло дослідження впливу основних параметрів на точність визначення висот об'єктів.

У висновках підбито підсумки, щодо дослідження залежності СКВ помилки виміру висот об'єктів від основних параметрів КСОЕЗ.

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

КА	– космічний апарат
ПЗЗ	– прилад із зарядовим зв'язком
КМОН	– комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник
ЦММ	– цифрова модель місцевості
КСОЕЗ	– космічна система оптико-електронного знімання
ЕОМ	– електронно-обчислювальна машина
СКВ	– середньоквадратичне відхилення
АРМ	– автоматизоване робоче місце
ТЗН	– тимчасова затримка та накопичення
РЗ	– роздільна здатність
АСН	– автономна система навігації
ВІС	– велика інтегральна схема

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ СТЕРЕОЗНІМАННЯ.....	11
1.1 Порівняльний аналіз космічного і повітряного знімання	11
1.2 Порівняльний аналіз геометрії кадрового та сканерного знімків.....	13
1.3 Аналіз способів космічного стереознімання для розрахунку висот об'єктів .	15
1.4 Постановка задачі дослідження.....	20
2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ І ІСНУЮЧІ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ ВИМІРУ ВИСОТИ ОБ'ЄКТІВ	21
2.1 Розрахунок точності виміру висоти об'єктів для нормального випадку знімання.....	21
2.2 Розрахунок точності виміру перевищення висот об'єктів.....	22
2.3 Оптична передаточна функція приймача на ПЗЗ	25
2.4 Порівняльна характеристика сучасних оптичних приймачів	27
2.5 Розрахунок структури оптичного приймача.....	41
2.6 Методика розрахунку оцінки точності виміру висот об'єктів по результатам космічного оптико-електронного знімання	47
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗНІМАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРУ ВИСОТ ОБ'ЄКТІВ.....	50
3.1 Розрахунок СКВ помилки виміру висоти об'єкту.....	50
3.2 Аналіз впливу основних параметрів на точність визначення висот об'єктів .	51
ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	57

ВСТУП

Цифрова обробка зображень набуває в даний час велике значення в багатьох областях діяльності людини. Дійсно, зображення як форму як найповнішого представлення інформації нічим не можна замінити не тільки, наприклад, в такому винятковому випадку, як дослідження поверхні тієї чи іншої планети, але і в повсякденному житті. Воно є об'єктом дослідження або його результатом в космонавтиці, астрономії, біології, медицини, фізики, геології, криміналістиці і дефектоскопії.

Засоби їх формування і реєстрації зображення відрізняються великою різноманітністю (фото і кіноапаратура, оптико-механічні та оптико-електронні сканери, радіолокаційні і лазерні пристрої). З їх допомогою можна, наприклад, отримати на Венері зображення її поверхні або представити у видимій формі людську мову.

Техніка передачі зображень досягла в даний час високого рівня. Для передачі зображень використовуються оптична, дротова, радіо та інші види зв'язку. Теоретично і експериментально доведена можливість високоякісної передачі відеоінформації на відстані в кілька десятків і навіть сотень мільйонів кілометрів. Технічно здійсненою представляється в даний час і завдання створення глобальної системи зв'язку для передачі зображень.

Обсяг відеоінформації, що переробляється в різних областях діяльності людини, дуже виріс і продовжує збільшуватися. Наприклад, в США щорічно отримують близько 25 млрд. знімків і кілька сотень мільярдів одиниць паперової продукції, які потребують тієї чи іншої обробки. При звичайному експерименті з вивчення елементарних частинок в ядерній фізиці обробляється кілька сотень тисяч фотографій і т.і.

Величезні обсяги відеоінформації разом з природним бажанням витягти з неї якомога більше відомостей ведуть до необхідності автоматизації процесів її обробки. Для цього застосовуються оптико-механічні, оптико-електронні, телевізійні і аналогові обчислювальні системи. Особлива роль в техніці обробки

зображень належить ЕОМ, які мають в своєму складі пристрої введення, виведення і відображення зорової інформації і володіє достатнім швидкодією і об'ємом пам'яті.

Застосування ЕОМ для обробки зображень дозволяє у відносно короткі терміни і з меншими витратами в порівнянні з експериментальним макетуванням моделювати будь-які методики, включаючи ідеальні або такі, які при сучасному стані техніки реалізовані бути не можуть. При цьому забезпечуються точність, надійність, практично абсолютна відтворюваність результатів, можливість контролю процесу обробки на будь-якій проміжній стадії, гнучкість щодо типу і характеру вирішуваних завдань і широкий фронт робіт. Ось чому моделювання того чи іншого методу обробки відеоінформації на ЕОМ, як правило, передуює виготовленню експериментального макета.

Об'єкт дослідження: оптико-електронне стереознімання земної поверхні з КА.

Предмет дослідження: точність виміру координат об'єктів по стереознімкам.

Метою роботи є дослідження методики оцінювання точності виміру координат об'єктів по стереознімкам та проаналізувати роботу оптичного приймача на ПЗЗ на основі оптичної передаточної функції.

Для досягнення даної мети роботи були поставлені такі задачі :

1. Проаналізувати способи стереознімання.
2. Розробити математичний апарат розрахунку СКВ помилки виміру висот об'єктів.
3. Розрахувати структуру оптичного ПЗЗ приймача.
4. Провести аналіз впливу основних параметрів на точність визначення висот об'єктів.

1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ СТЕРЕОЗНІМАННЯ

1.1 Порівняльний аналіз космічного і повітряного знімання

На теперішній час необхідну інформацію про місцевість можна отримана як космічними, так і повітряними засобами. Але, космічні знімки мають на багато більші можливості, ніж мілкомасштабні повітряні знімки, оскільки і ті і інші зняті, практично, через всю товщину атмосфери, але повітряні знімки – з границі щільного слою атмосфери, а космічні знімки – із далеких від нього точок. Відповідно, світлорозсіяння в атмосфері впливає на космічні знімки слабше, ніж на повітряні. Завдяки цьому космічні знімки більш контрастні за повітряні.

На космічних знімках можна віддешифрувати малоконтрасні границі і структурні елементи, яких не має на повітряних знімках ні при якому масштабі знімання. Атмосферна корекція знімків допомагає встановити колір відносно крупних об'єктів, але не може вернути інформацію, що загубилася при світлорозсіянні. Останнє дуже важливо при розпізнаванні замаскованих об'єктів.

При збільшенні кута нахилу оптичного променя від вертикалі більше, ніж $40-45^\circ$, вплив світлорозсіяння в атмосфері швидко збільшується, а здатність знімків до дешифрування погіршується. Відповідно навіть з висоти 10 км не можна отримати якісний повітряний знімок зі смугою огляду більше 15-20 км. При космічних знімках цей чинник не впливає на надирне знімання високого розрізняння і навіть на нахильне знімання з нахилом променя датчика від надира на кути до $35-40^\circ$. Відповідно в однакових умовах освітлення і при одних умовах атмосфери із космосу можна отримати досить якісні знімки високого розрізняння зі смуги огляду понад 100 км.

При теперішній точності орієнтації і стабілізації КА геометричне корегування космічних знімків на багато простіше, ніж повітряних. Для надирного космічного знімання воно також простіше через відсутність впливу рельєфу. В той же час стереопара із надирного і нахильного космічних знімків

дозволяє при дешифруванні стереоскопічно відчувати мікрорельєф місцевості в межах перших метрів.

Корегування усіх видів для космічних знімків можуть виконуватися централізовано, на одному комплекті апаратури, і значно дешевше, швидше і якісніше, ніж при розрізнених повітряних. Ця обставина посилюється ще й тому, що один космічний знімок високого розрізняння охоплює на багато більшу площину, ніж мілкомасштабний аерознімок.

Труднощі, пов'язані з хмарністю при космічному зніманні, впливають і на аерознімання, що приводить до суттєвого збільшення його вартості в районах зі складними метеоумовами. Більше того, нахильне космічне знімання менше залежить від погоди, ніж мілкомасштабне аерознімання, тому що в смузі огляду шириною 1000-1500 км (для космічного знімання), як правило, завжди є райони, вільні від хмарності.

По одиночному знімку, що отриманий з КА, за допомогою фотограмметричних способів можливо отримати тільки дві координати об'єктів, що знімаються. Навіть у цих умовах горизонтальні координати отримуються з помилкою, що виникає за рахунок неврахованої третьої координати (висоти) об'єкта. Для повного просторового опису об'єктів необхідно мати три координати. Це можливо вирішити за допомогою двох знімках однієї і тієї ж ланки місцевості, отриманих з різних просторових точок. Такі знімки називаються стереознімками, або стереопарою. По таким знімкам можливо отримати об'єкти, що надає змогу будувати просторові трьохвимірні моделі рельєфу земної поверхні. Основною задачею обробки стереознімків є визначення висоти об'єктів. Цими питаннями займається стереограмметрія, яка вивчає способи, що дозволяють отримати повний геометричний опис об'єкту по знімкам, тобто визначити його просторове положення, форму і розміри [1].

Таким чином, із вище приведених доводів можна зробити висновок, що оперативну інформацію для створення цифрових карт місцевості ефективніше здобувати космічними засобами з використанням стереознімання.

1.2 Порівняльний аналіз геометрії кадрового та сканерного знімків

По способу проектування зображення і вигляду знімка, що отримується, розрізняють кадрове, сканерне та панорамне знімання [2]. Стерезнімки отримуються при кадровому або сканерному зніманні. Зображення на знімку за своїми метричними якостями відрізняється від об'єкта знімання – ландшафта. Ця різниця визначається, насамперед, масштабом знімку m_{zn} [1, 3]. Якщо на знімку відображається ділянка місцевості, що уявляє собою горизонтальну площину, а кут нахилу оптичної осі об'єктива датчика у момент знімання дорівнює нулю (знімок горизонтальний), то масштаб такого знімка – величина постійна по полю кадру.

На нахильному знімку в наслідок перспективних викривлень масштаб змінюється від точки до точки і може бути розрахований за наступною формулою [4]:

$$\frac{1}{m_{zn}} = \frac{fg_1^2}{H\sqrt{(g_1 \cos \varphi + g_2 \sin \varphi)^2 + \sin^2 \varphi}}, \quad (1.1)$$

де значення

$$g_1 = \cos \alpha_0 - \frac{y}{f} \sin \alpha_0; g_2 = \frac{x}{f} \sin \alpha_0, \quad (1.2)$$

є постійним для цієї точки знімка, α_0 – кут нахилу знімка, φ – кут, що визначає напрямок на знімку, f – фокусна відстань, H – висота знімання.

Для горизонтального знімка масштаб визначається за формулою:

$$\frac{1}{m_{zn}} = \frac{f}{H}, \quad (1.3)$$

а для планового

$$\frac{1}{m_{zn}} = \frac{f}{H} \left\{ 1 - \frac{\alpha_0}{f} \left[y(1 + \sin^2 \varphi) + \frac{1}{2} x \sin 2\varphi \right] \right\}. \quad (1.4)$$

При цьому, середній масштаб планового знімка у зоні кадру, обмеженого симетричними горизонталями, дорівнює $\frac{f}{H}$ і співпадає з масштабом горизонтального знімка.

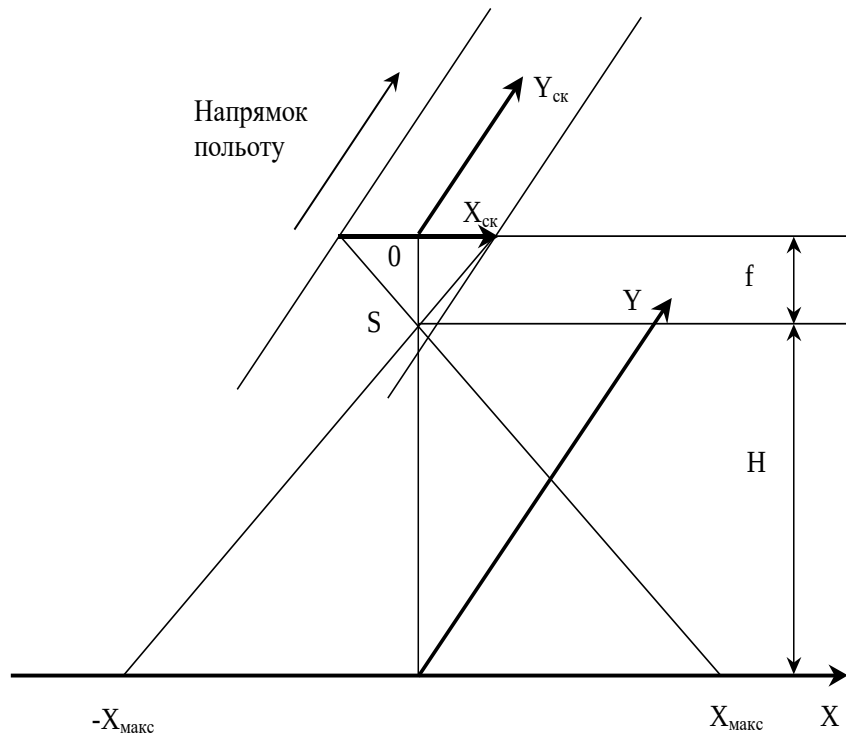


Рисунок 1.1 – До визначення координат і масштабу сканерного знімка

Розглянемо геометрію сканерного знімка, що отримується космічною оптико-електронною системою знімання з лінійним оптичним приймачем на основі ПЗЗ. У цій системі сканування місцевості у напрямку, перпендикулярному напрямку польоту КА, здійснюється за рахунок переносу зарядових пакетів в ПЗЗ, а сканування місцевості вздовж напрямку польоту здійснюється рухом системи

разом з КА.

Аналіз [4] показує, що масштаб такого знімка у подовжньому та у поперечному напрямках різний. Геометрія сканерного та кадрового знімків у поперечному напрямку співпадають. Масштаб сканерного знімка у подовжньому напрямку постійний і дорівнює середньому масштабу кадрового горизонтального знімка [4].

1.3 Аналіз способів космічного стереознімання для розрахунку висот об'єктів

Процес отримання стереознімків називається стереозніманням. Космічне стереознімання можливо проводити декількома способами.

1.3.1 Розрахунок висот об'єктів при отриманні стереознімків на різних витках орбіти КА. При використанні даного способу отримання стереопари одна і та ж ділянка місцевості знімається на різних (сусідніх) витках польоту одного КА або двома КА з різних просторових точок. У цьому разі розрізняють два способи знімання: нормальний і загальний. Нормальний випадок знімання – найбільш простий з геометричної точки зору і характеризується перпендикулярністю оптичних осей знімальної камери до базису (рис. 1.2). При загальному випадку знімання не накладаються будь-які додаткові вимоги до режиму знімання. При обробці стереознімків спочатку проводиться трансформування знімків, тобто, перетворення будь-як орієнтованого плоского зображення до нормального випадку знімання. Для нормального випадку знімання базис знімання буде визначатися як відстань між центрами проектування по осі X (поперечне направлення на знімках). Масштаб на сканерному знімку в поперечному напрямку не постійний і співпадає з масштабом відповідного кадрового знімка.

Для надання можливості оцінити точність виміру висот об'єктів отримаємо формулу розрахунку висоти об'єкту для цього способу стереознімання. Для цього розглянемо геометричні умови нормального випадку

знімання. Під нормальним випадком знімання розуміється такий випадок знімання, при якому оптичні осі знімальних камер перпендикулярні до базису. На етапі трансформування зображень останні перетворюються із вільно орієнтованих площинних зображень до нормального випадку знімання.

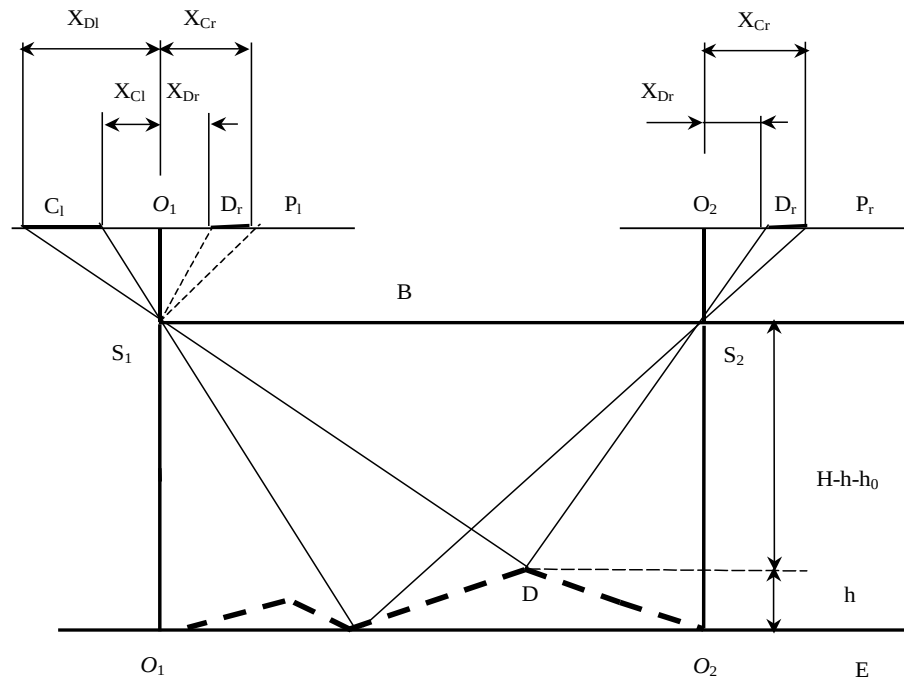


Рисунок 1.2 – Нормальний випадок знімання при отриманні стереознімків на різних витках орбіти КА

Приймемо за початкову площину E , що проходить через базисну точку C з абсолютною висотою h_0 (рис. 1.2). Подовжні паралакси для точок C і D , різницю висот h між якими необхідно визначити, знаходяться з формул [5]:

$$P_c = x_{c_1} - x_{c_r} = \frac{Bf}{H - h_0}, \quad (1.5)$$

$$P_d = x_{d_1} - x_{d_r} = \frac{Bf}{H - h - h_0}, \quad (1.6)$$

де $x_{c_1}, x_{c_r}, x_{d_1}, x_{d_r}$ – відповідно подовжні координати точок C і D на лівому та правому знімках, а різниця паралаксів двох точок

$$p = \frac{Bfh}{(H - h_0)(H - h - h_0)}. \quad (1.7)$$

Тоді перевищення висот h знаходиться з формули

$$h = \frac{2pNh_0 - pH^2 - ph_0^2}{ph_0 - Bf - pH}. \quad (1.8)$$

1.3.2 Розрахунок висоти об'єктів при отриманні оптико-електронних стереознімків на одному витку орбіти КА. Цей спосіб передбачає отримання стереознімків шляхом знімання з одного КА на одному витку, але з різних точок орбіти (рис. 1.3). При цьому забезпечується знімання одних і тих же об'єктів майже в однакових погодних умовах (за рахунок знімання майже в один час), що важливо для отримання високоточних координат об'єктів.

При отриманні кадрових стереознімків формула для отримання висоти об'єкту буде співпадати з формулою (1.8). Це пов'язано з тим, що масштаб кадрового знімку у подовжньому і у поперечному напрямку однаковий.

Але, геометрія сканерного знімка відрізняється від геометрії кадрового, так як при сканерному зніманні формування знімку відбувається за рахунок руху КА шляхом послідовного отримання строк зображення [6]. Масштаб у поперечному напрямку на сканерному знімку співпадає з кадровим, а у подовжньому напрямку – постійний.

У цьому разі для отримання стереопари за допомогою однієї знімальної камери оптичну вісь камери необхідно відхилити спочатку у напрямку польоту КА і зняти необхідну ділянку, а потім – у протилежну сторону і другий раз зняти ту ж саму ділянку місцевості [7]. При використанні двох знімальних камер оптичні осі останніх при плануванні знімання відхиляють на необхідні кути. У цьому разі базис знімання буде визначатися як відстань між центрами

проектування по осі Y (у подовжньому напрямку на знімках). Масштаб на сканерному знімку у подовжньому напрямку постійний.

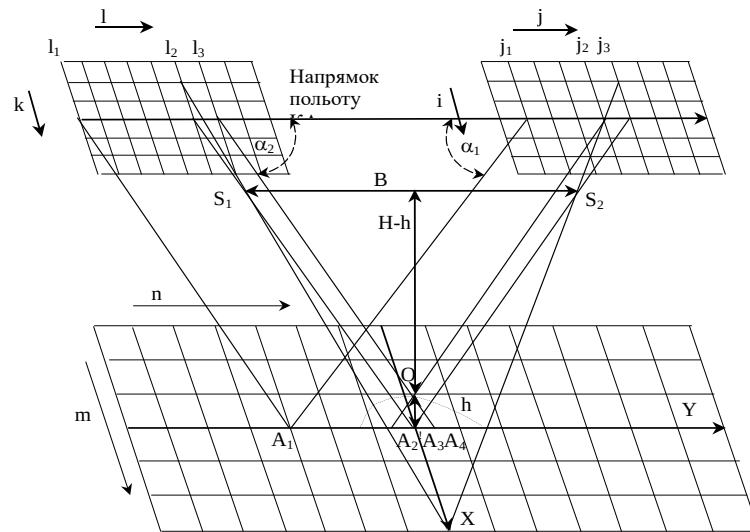


Рисунок 1.3 – Нормальний випадок знімання при отриманні стереознімків на одному витку орбіти КА

У цьому випадку отримується два цифрових знімки, що являють собою матриці цифрових значень $K_{zn1}[i, j]$, $K_{zn2}[i, j]$, що відповідають значенням освітленості оптичного приймача на ПЗЗ. Кожне цифрове значення відповідає інтегральній освітленості, що утворюється у фокальній площині одним лінійним елементом розділення на земній поверхні. Біля земної поверхні ця матриця відповідає зображенню об'єктів, що знімаються, яке може бути записане, як $K_{об}[i, j]$ (рис. 1.3).

Розглянемо знімок у фокальній площині з урахуванням процесу дискретизації. Нехай необхідно знайти перевищення висоти точки O над висотою базисної точки A_1' , тобто, необхідно знайти $B_2'O$ (рис. 1.3). Відстань A_1A_4 можна знайти за формулою:

$$A_1A_4 = (l_3 - l_1)t_n V_{KA}, \quad (1.9)$$

де t_n – час накопичення. Аналогічно:

$$A_1 A_2 = (j_2 - j_1) t_n V_{KA}, \quad (1.10)$$

$$A_2 A_3 = A_2 A_4 - A_1 A_2 = (l_3 - l_1 - j_2 + j_1) t_n V_{KA}. \quad (1.11)$$

Із трикутника $A_2 O A_3$ знаходимо шукану висоту:

$$h = \frac{A_2 A_3 \times \operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2}, \quad (1.12)$$

де α_1, α_2 – відповідні кути відхилення оптичних осей від напрямку у надир.

Із трикутника $S_1 O S_2$ знаходимо базис знімання:

$$B = \frac{H(\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2)}{\operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2}. \quad (1.13)$$

Підставляючи формулу (1.13) у формулу (1.12), отримуємо:

$$h = \frac{A_2 A_3 \times H}{B} \quad (1.14)$$

і після відповідних перетворень

$$h = \frac{H}{B} (l_3 - l_1 - j_2 + j_1) t_n V_{KA}. \quad (1.15)$$

Остаточню формулу розрахунку висоти об'єктів по сканерним знімкам при отриманні стереопари на одному витку буде мати вид:

$$h = \frac{H^2}{Bf} p, \quad (1.16)$$

де $p = (l_3 - l_1 - j_2 + j_1) t_n V_{KA} \frac{f}{H}$ – значення подовжнього паралакса заданої точки.

1.4 Постановка задачі дослідження

На теперішній час досить багато задач народного господарства вирішується із застосування цифрових моделей місцевості (ЦММ). Одним із основних показників, що впливає на якість створення ЦММ і, як наслідок, ймовірність виконання поставлених завдань, є точність виміру висот об'єктів.

У зв'язку з цим постає питання розробки математичного апарату оцінювання точності визначення висот об'єктів по стереознімкам, отриманим з КА оптико-електронної системи знімання. Цей математичний апарат повинен включати параметри і характеристики КСОЕЗ для оцінювання помилки визначення висот об'єктів та дослідження залежності точності визначення висот об'єктів від параметрів, що впливають на неї.

Передбачається, що у якості оптичного приймача застосовується приймач на ПЗЗ. Формування зображення здійснюється за рахунок орбітального руху КА шляхом послідовного отримання строк зображення.

Для забезпечення необхідної оперативності отримання інформації обробка отриманих цифрових зображень проводиться на ЕОМ за допомогою певного програмного забезпечення в автоматизованому режимі. При цьому, для знаходження паралаксів на стереознімках проводиться автоматичне суміщення останніх.

Для забезпечення необхідного відношення сигнал-шум на знімках пропонується проводити накопичення сигналу під час знімання.

Висновок: в даному розділі було проведено аналіз способів стереознімання за допомогою оптико-електронного датчика, в якому в якості оптичного приймача застосовується ПЗЗ. Була поставлена задача дослідження щодо розробки математичного апарату оцінювання точності визначення висот об'єктів по стереознімкам, отриманим з КА оптико-електронної системи знімання.

2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ І ІСНУЮЧІ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ ВИМІРУ ВИСОТИ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Розрахунок точності виміру висоти об'єктів для нормального випадку знімання

Одним із відомих способів оцінки точності визначення висоти об'єктів по стереознімках є наступний [1].

Нехай мається нормальний випадок знімання. На рис. 2.1 приведені два стереопарних знімка деякої точки M об'єкта у просторі та її зображення m та m' на лівому та правому знімках.

Початок координат знаходиться у лівому центрі проєкціювання S , вісь Y співпадає з направленням оптичної осі лівої камери, вісь X направлена вздовж базису B , а вісь Z перпендикулярна площині рисунка.

Для цього випадку координата Y (відповідає висоті об'єкта) об'єкта знаходиться із виразу:

$$Y = \frac{fB}{p}, \quad (2.1)$$

де f – фокусна відстань знімальної камери, B – базис знімання,

$$p = x - x' \quad (2.2)$$

подовжній паралакс.

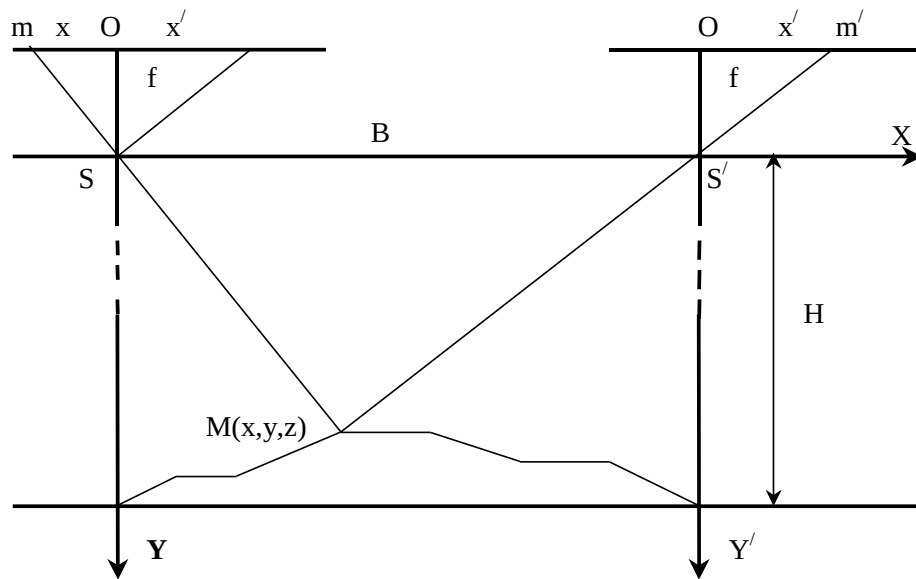


Рисунок 2.1 – Нормальний випадок знімання

Середньоквадратичне відхилення (СКВ) обчислення координати Y знаходиться із формули:

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{Y}{B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{Y^2}{Bf}\right)^2 \sigma_p^2, \quad (2.3)$$

де σ_B^2 і σ_p^2 – відповідно СКВ обчислення базису знімання та подовжнього паралакса.

2.2 Розрахунок точності виміру перевищення висот об'єктів

Описаний вище спосіб дає можливість оцінити точність визначення висоти об'єктів в орбітальній системі координат. Але, для більшості прикладних задач важливо знати не висоту об'єктів, а перевищення висоти об'єкта над вибраною площиною. На рис. 2.1 показана схема визначення перевищення точок місцевості над площиною E з висотою h_0 при нормальному випадку знімання. Тут S_1 і S_2 відповідно правий і лівий центри проєкціювання, B – базис знімання, D – точка

на земній поверхні, для якої необхідно визначити перевищення її відносно точки C , яка знаходиться на площині E .

Подовжні паралакси для точок C і D знаходяться із формул:

$$p_C = X_{C_l} - X_{C_r}, \quad (2.4)$$

$$p_D = X_{D_l} - X_{D_r}, \quad (2.5)$$

де $X_{C_l}, X_{C_r}, X_{D_l}, X_{D_r}$ – відповідно координати точок на лівому та правому знімках, що відповідають точкам C і D . Різниця паралаксів двох точок буде дорівнювати:

$$p = p_D - p_C = \frac{Bfh}{(H - h)H}, \quad (2.6)$$

де f – фокусна відстань знімальної камери, H – висота знімання, h – перевищення точки D над точкою C . Тоді величину h можна знайти за формулою:

$$h = \frac{H^2 p}{Hp + Bf}. \quad (2.7)$$

У зв'язку з тим, що величини H, B, p визначаються по незалежним вимірам, то, не беручи до уваги малу величину p у знаменнику, згідно теорії помилок отримаємо СКВ фотограмметричного визначення перевищення:

$$\sigma_h^2 = \left(\frac{H^2}{Bf} \right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{h}{H} \right)^2 \sigma_H^2 + \left(\frac{Hh}{Bf} \right)^2 \sigma_B^2, \quad (2.8)$$

де $\sigma_p^2, \sigma_H^2, \sigma_B^2$ – відповідно СКВ помилок обчислення паралакса, висоти знімання та базису знімання [4].

Приведені вище методики оцінки точності виміру висоти об'єкту надають змогу розрахувати помилку визначення висоти об'єкту по кадровим стереознімкам. Для сканерних стереознімків, що отримуються на одному витку польоту КА, не відомі методики для оцінки точності виміру висоти об'єкту.

Аналіз показує [1, 4], що на помилку визначення висоти об'єкту основний вплив здійснює помилка визначення паралакса.

Якщо у якості оптичного приймача використовується фотоплівка і остаточна обробка проводиться на відповідних оптико-механічних приладах, то точність виміру паралакса визначається, в основному, інструментальною помилкою, що надає вимірювальний прилад, а також фізичними властивостями оператора [8, 9].

На КА, що будуть входити у склад КОЕСЗ згідно національної космічної програми України, у якості оптичного приймача буде застосовуватися прилад на ПЗЗ [10]. Зображення ділянок поверхні Землі буде формуватися у цифровому вигляді, передаватися по радіоканалам на наземний пункт прийому спеціальної інформації і оброблятися на АРМ. При цьому, суміщення стереознімків, що необхідно для знаходження паралакса, буде проводитися автоматично за допомогою певного програмного забезпечення. На Україні не відомі методи, що дозволяють оцінити помилку визначення паралакса при автоматичному суміщенні стереознімків.

Суміщення знімків стереопари можливо здійснювати декількома методами. Космічні знімки відносяться до одних із найскладніших сигналів. Найбільш загальним методом, що може застосовуватися практично для будь-яких сигналів, це екстремально-кореляційний. При цьому методі рішення приймається по абсолютному максимуму взаємної кореляційної функції на виході вирішуючого пристрою. При цьому, велике значення має відношення сигнал-шум на зображеннях. Воно визначається освітленістю та шумами оптичного приймача. Підвищення відношення сигнал-шум можливо або за рахунок накопичення сигналу, або використанням охолодження приймача. Останнє характеризується

деякими недоліками, основним із яких є викривлення частотної характеристики приймача.

2.3 Оптична передаточна функція приймача на ПЗЗ

В узагальненому вигляді частотна математична модель роботи КОЕСЗ, як формувача оптичного зображення, містить у собі модель зображення об'єкта, модель атмосфери, модель об'єктива, модель зсуву зображення, модель оптичного ПЗЗ приймача (просторового дискретизатора), модель шуму, модель квантувача (АЦП), підсумкове зображення.

За оптичний приймач, як правило, застосовується прилад на ПЗЗ. Організація таких приладів за принципом зарядового зв'язку забезпечує можливість зчитування масиву електричних сигналів, що відповідають сцені зображення з мінімальними геометричними і тимчасовими шумами. Застосування ПЗЗ, що працюють у режимі накопичення, істотно поліпшило стан справ в області видимого й інфрачервоного діапазонів. Датчики зображень на основі ПЗЗ можуть забезпечувати одночасне виконання ряду функцій, таких, як детектування, зчитування і мультиплексування сигналу, а також його обробку в режимі тимчасової затримки й накопичення.

Формувачі відеосигналів (ФВС) на ПЗЗ мають наступні особливості: малу інерційність, низький рівень шумів; висока лінійність фото-електричного перетворення; малий розмір і вага пристрою; низька живляча напруга і мала споживча потужність; висока стійкість до механічних, акустичних і електромагнітних впливів; висока надійність і довговічність; широкі функціональні можливості.

Будемо вважати, що інтерполююча функція ідеально відновлює зображення і має частотний спектр $T_i(\omega_x, \omega_y)$. Тоді оптична передаточна функція (ОПФ) оптичного приймача на ПЗЗ з урахуванням інтерполяції буде розраховуватися за формулою:

$$T_{ПЗЗ}(\omega_x, \omega_y) = D_T(\omega_x, \omega_y) P_{ПЗЗ}(\omega_x, \omega_y) T_i(\omega_x, \omega_y) \quad (2.9)$$

де

$$D_T(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin \left[\omega_x \left(J_1 + \frac{1}{2} \right) p_x \right] \sin \left[\omega_y \left(J_2 + \frac{1}{2} \right) \frac{V_{KA} f}{H} t_H \right]}{\sin(\omega_x p_x / 2) \sin \left(\omega_y \frac{V_{KA} f}{H} t_H / 2 \right)}$$

– перетворення Фур’є кінцевої решітки дискретизуючих імпульсів, V_{KA} , H – швидкість і висота польоту КА, f – фокусна відстань, t_H – час експозиції.

$$P_{ПЗЗ}(\omega_x, \omega_y) = P_{геом}(\omega_x, \omega_y) P_{пер}(\omega_x, \omega_y) \quad (2.10)$$

Для прямокутних фоточувливих елементів довжиною l оптичного приймача на ПЗЗ, розташованих із кроком $p_{x,y}$ ОПФ геометрії визначається перетворенням Фур’є базової чарунки:

$$P_{геом}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin \left(\pi \frac{\omega_x}{\omega_{x \max}} \frac{l_x}{p_x} \right) \sin \left(\pi \frac{\omega_y}{\omega_{y \max}} \frac{l_y}{p_y} \right)}{\pi \frac{\omega_x}{\omega_{x \max}} \frac{l_x}{p_x} \pi \frac{\omega_y}{\omega_{y \max}} \frac{l_y}{p_y}} \quad (2.11)$$

Погіршення ОПФ, викликане неефективністю переносу ε , визначається співвідношенням

$$P_{пер}(\omega_x, \omega_y) = \exp \left\{ -n_x \varepsilon \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{\omega_x}{\omega_{x \max}} \right) \right] \right\} \times \exp \left\{ -n_y \varepsilon \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{\omega_y}{\omega_{y \max}} \right) \right] \right\} \quad (2.12)$$

де $n_{x,y}$ — число переносів.

Отримана ОПФ оптичного приймача дозволяє врахувати вплив ПЗЗ структури на формування результуючого зображення космічною оптико-електронною системою спостереження.

Оптичні приймачі на ПЗЗ можуть працювати у режимі тимчасової затримки та накопичення. Для цього необхідно застосовувати не лінійні, а матричні приймачі на ПЗЗ. При цьому виникає необхідність в розрахунку кількості лінійок ПЗЗ, необхідних для забезпечення необхідного відношення сигнал-шум.

2.4 Порівняльна характеристика сучасних оптичних приймачів

При виборі датчика для отримання зображення досить важливим є критерієм є показник світлочутливості. Він залежить від типу вбудованої матриці. Виділяють два основних типи матриці: ПЗЗ (CCD), який характеризується зворотнім зарядовим зв'язком, та КМОН (CMOS), представляє собою комплементарну структуру металу, оксиду та напівпровідника[21].



Рисунок 2.2 – КМОН та ПЗЗ матриці

Обидва типи функціонують за єдиним принципом перетворення світла в електричний заряд, після чого відправляють отриманий електричний сигнал. ПЗЗ матриці здійснюють передачу аналогового сигналу, для оцифрування якого буде

потрібно додатковий перетворювач, тоді як КМОН датчик вже на виході має цифровий сигнал[22].

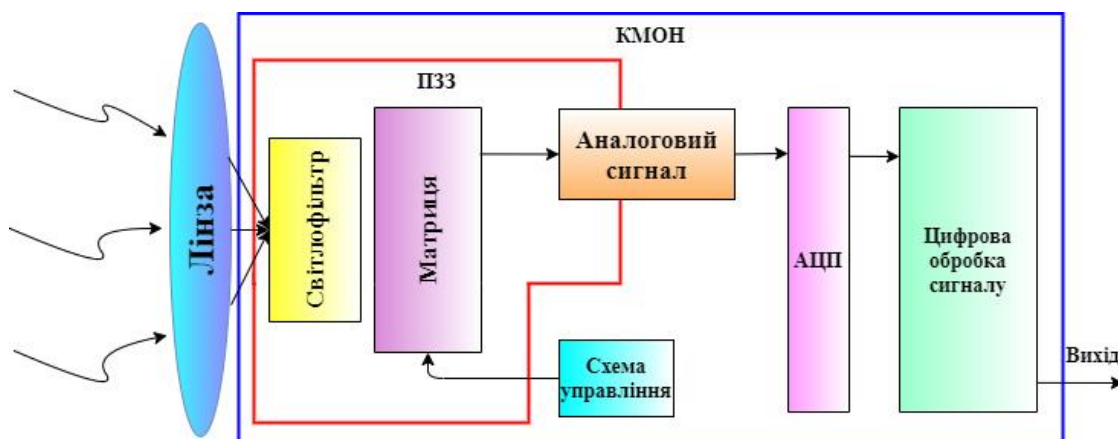


Рисунок 2.3 – Структурна схема матриць КМОН та ПЗЗ

2.4.1 Принципи роботи та пристрій приймачів світла на ПЗЗ. Вперше принцип ПЗЗ з ідеєю зберігати і потім зчитувати електронні заряди був розроблений двома інженерами корпорації BELL в кінці 60-х років в ході пошуку нових типів пам'яті для ЕОМ, здатних замінити пам'ять на феритових кільцях. Ця ідея виявилася безперспективною, але здатність кремнію реагувати на видимий спектр випромінювання була помічена і думка використовувати цей принцип для обробки зображень отримала свій розвиток. Почнемо з розшифровки терміну.

Абревіатура ПЗЗ означає "Прилади з зарядовим зв'язком" - цей термін утворився від англійського "Charge-Coupled Devices" (CCD).

Даний тип приладів в даний час має дуже широке застосування в самих різних оптико-електронних пристроях для реєстрації зображення. У побуті це цифрові фотоапарати, відеокамери, різні сканери.

Що ж відрізняє ПЗЗ-приймач від звичайного напівпровідникового фотодіода, що має світлочутливу площадку і два електричних контакти для знімання електричного сигналу?

По-перше, таких світлочутливих площадок (часто їх називають пікселями - елементами, які беруть світло і перетворюють його в електричні заряди) в ПЗЗ-приймачі дуже багато, від декількох тисяч до декількох сотень тисяч і навіть декількох мільйонів. Розміри окремих пікселів однакові і можуть бути від

одиниць до десятків мікрон. Пікселі можуть бути збудовані в один ряд – тоді приймач називається ПЗЗ-лінійкою, або рівними рядами заповнювати ділянку поверхні – тоді приймач називають ПЗЗ-матрицею.

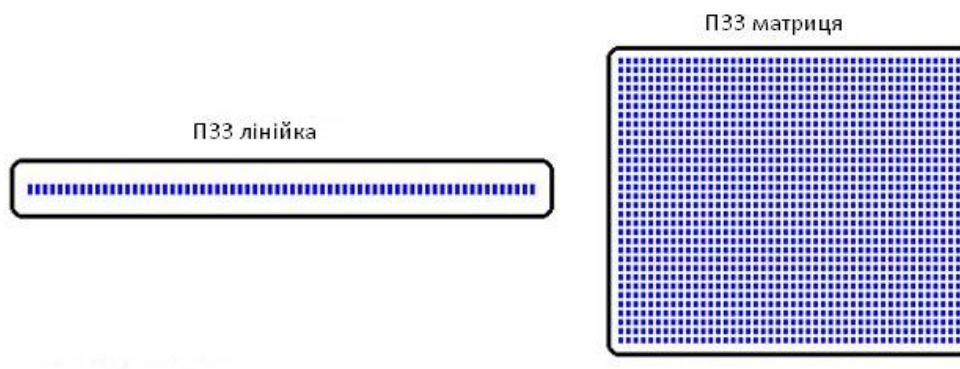


Рисунок 2.4 – Розташування світло-приймальних елементів (прямокутники синього кольору) в ПЗЗ-лінійці та ПЗЗ-матриці

По-других, в ПЗЗ-приймачі, зовні схожому на звичайну мікросхему, немає величезного числа електричних контактів для виведення електричних сигналів, які, здавалося б, повинні йти від кожного світло-приймального елемента. Проте до ПЗЗ-приймача підключається електронна схема, яка дозволяє витягувати з кожного світлочутливого елемента електричний сигнал, пропорційний його засвітленні.

Дію ПЗЗ можна описати таким чином: кожен світлочутливий елемент – піксель – працює як скарбничка для електронів. Електрони виникають в пікселях під дією світла, що прийшов від джерела. Протягом заданого інтервалу часу кожен піксель поступово заповнюється електронами пропорційно кількості світла, яке потрапило в нього, як відро, виставлене на вулицю під час дощу. Після закінчення цього часу електричні заряди, накопичені кожним пікселем, по черзі передаються на "вихід" приладу і вимірюються. Все це можливо за рахунок певної структури кристалу, де розміщуються світлочутливі елементи, і електричної схеми управління.

Практично так само працює і ПЗЗ-матриця. Після експонування (засвітленні проєктованого зображення) електронна схема управління приладом подає на нього складний набір імпульсних напруг, які починають зрушувати стовпці з накопиченими в пікселях електронами до краю матриці, де знаходиться аналогічний вимірювальний ПЗЗ-регістр, заряди в якому зсуваються вже в перпендикулярному напрямку і потрапляють на вимірювальний елемент, створюючи в ньому сигнали, пропорційні окремим зарядам. Таким чином, для кожного наступного моменту часу ми можемо отримати значення накопиченого заряду і збагнути, яким пікселя на матриці (номер рядка і номер стовпця) він відповідає.

2.4.2 Фізика процесу. Для початку зауважимо, що ПЗЗ відносяться до виробів так званої функціональної електроніки. Їх не можна уявити як сукупність окремих радіоелементів - транзисторів, опорів і конденсаторів. В основі роботи лежить принцип зарядового зв'язку. Принцип зарядового зв'язку використовує два відомих з електростатики положення:

1. однойменні заряди відштовхуються;
2. заряди прагнуть розташуватися там, де їх потенційна енергія мінімальна.

Для початку представим собі МОН-конденсатор. Це те, що залишається від МОН-транзистора, якщо прибрати з нього стік та витік, тобто є просто електрод, відокремлений від кремнію шаром діелектрика. Для визначеності будемо вважати, що напівпровідник – р-типу, тобто концентрація дірок в рівних умовах на багато (на кілька порядків) більше, ніж електронів. У електрофізиці «діркою» називають заряд, зворотний заряду електрона, тобто позитивний заряд.

Що буде, якщо на такий електрод (його називають затвором) подати позитивний потенціал? Електричне поле, створюване затвором, проникаючи в кремній крізь діелектрик, відштовхує рухливі дірки; виникає збіднена область - деякий обсяг кремнію, вільний від основних носіїв. При параметрах напівпровідникових підложок, типових для ПЗЗ, глибина цієї області становить близько 5 мкм. Навпаки, електрони, що виникли тут під дією світла, притягнуться

до затвору і будуть накопичуватися на кордоні розділу оксид-кремній безпосередньо під затвором, тобто звальюються в потенційну яму (рис. 2.5).

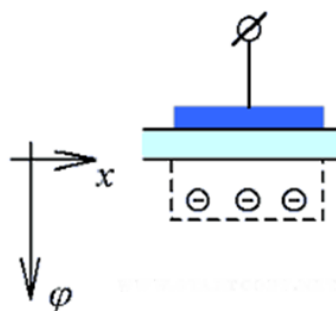


Рисунок 2.5 – Утворення потенційної ями при застосуванні напруги до затвора

При цьому електрони в міру накопичення в ямі частково нейтралізують електричне поле, створюване в напівпровіднику затвором, і врешті-решт можуть повністю його компенсувати, так що все електричне поле буде падати тільки на діелектрику, і все повернеться в початковий стан – за тим винятком, що на межі поділу утворюється тонкий шар електронів.

Нехай тепер поруч з затвором розташований ще один затвор, і на нього теж поданий позитивний потенціал, причому більший, ніж на перший (рис. 2).

Якщо тільки затвори розташовані досить близько, їх потенційні ями об'єднуються, і електрони, що знаходяться в одній потенційній ямі, переміщуються в сусідню, якщо вона «глибше».

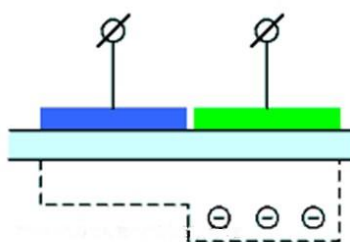


Рисунок 2.6 – Перекриття потенційних ям двох близько розташованих затворів.

Заряд перетікає в те місце, де потенційна яма глибше

Тепер вже має бути ясно, що якщо ми маємо ланцюжок затворів, то можна, подаючи на них відповідні керуючі напруги, передавати локалізований зарядовий

пакет уздовж такої структури. Чудова властивість ПЗЗ – властивість самосканування – полягає в тому, що для управління ланцюжком затворів будь-якої довжини достатньо всього трьох тактових шин. Термін шина в електроніці – провідник електричного струму, з'єднуючи однотипні елементи, тактова шина-провідники за якими передається зміщена по фазі напруга. Дійсно, для передачі зарядових пакетів необхідно і достатньо трьох електродів: одного передавального, одного приймаючого і одного ізолюючого, що розділяє пари приймальні і передавальні один від одного, причому однойменні електроди таких трійок можуть бути з'єднані один з одним в єдину тактову шину, що вимагає лише одного зовнішнього виведення (рис. 2.6).

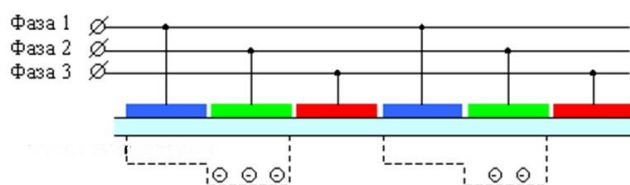


Рисунок 2.7 – Найпростіший трифазний ПЗЗ-регістр. Заряд в кожній потенційній ямі різний

Це і є найпростіший трифазний регістр зсуву на ПЗЗ. Тактові діаграми роботи такого регістра показані на рис. 2.7

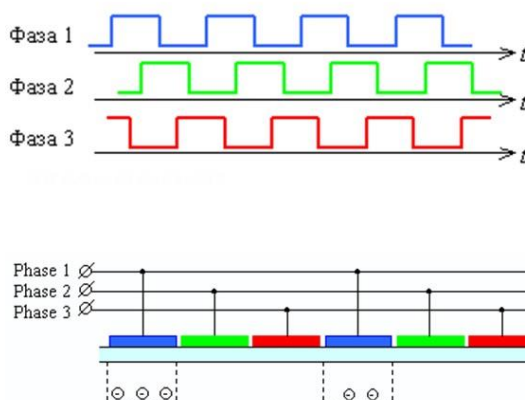


Рисунок 2.8 – Тактові діаграми управління трифазним регістром – це три меандра, зміщені на 120 градусів. При зміні потенціалів відбувається пересування зарядів

Видно, що для його нормальної роботи в кожен момент часу, принаймні, на одній тактовій шині повинен бути присутнім високий потенціал, і, принаймні, на одній – низький потенціал (потенціал бар'єру). При підвищенні потенціалу на одній шині і зниженні його на інший (попередній) відбувається одночасна передача всіх зарядових пакетів під сусідні затвори, і за повний цикл (один такт на кожній фазній шині) відбувається передача (зрушення) зарядових пакетів на один елемент регістра. Для локалізації зарядових пакетів в поперечному напрямку формуються так звані стоп-канали – вузькі смужки з підвищеною концентрацією основної легуючої домішки, що йдуть уздовж каналу перенесення (рис. 2.8).

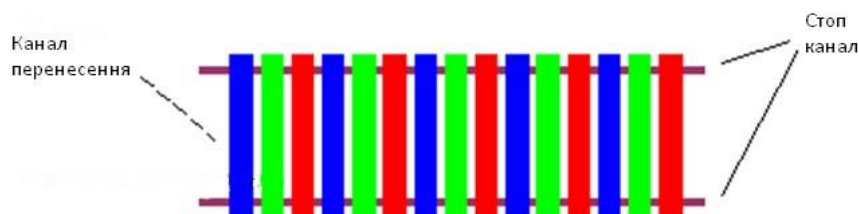


Рисунок 2.9 – Вид на регістр "зверху". Канал перенесення в бічному напрямку обмежується стоп-каналами.

Справа в тому, що від концентрації легуючої домішки залежить, при якій конкретній напрузі на затворі під ним утворюється збіднена область (цей параметр є не що інше, як порогова напруга МОН-структури). З інтуїтивних міркувань зрозуміло, що чим більше концентрація домішки, тобто чим більше дірок в напівпровіднику, тим важче їх відігнати вглиб, тобто чим вище гранична напруга або ж, при одній напрузі, тим нижче потенціал в потенційній ямі.

Якщо при виробництві цифрових приладів розкид параметрів по пластині може досягати декількох разів без помітного впливу на параметри одержуваних приладів (оскільки робота йде з дискретними рівнями напруги), то в ПЗЗ зміна, скажімо, концентрація легуючої домішки на 10% вже помітна на зображенні. Свої

проблеми додає і розмір кристала, і неможливість резервування, як в ВІС пам'яті, так що дефектні ділянки призводять до непридатності всього кристала.

2.4.3 Принципи роботи та пристрої приймачів світла на КМОН. До недавнього часу у всіх цифрових фотоапаратах і відеокамерах як світлочутливі елементи використовувалися прилади із зарядним зв'язком, так звані, ПЗЗ-матриці. Виготовлення подібних матриць завжди було технологічно складним процесом з великим відсотком відбраковування і здійснювалося обмеженим числом виробників, причому, та порівняно невеликими партіями. Все це визначало і досі визначає високу вартість матриць, нелінійно зростаючу при збільшенні їх розмірів, і як наслідок, – подорожчання фотоапаратів з високою роздільною здатністю.

В даний час поряд з традиційними ПЗЗ використовуються активні піксельні датчики CMOS APS (CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor, APS Active Pixel Sensor), засновані на сенсорах, створених на комплементарних структурах метал-оксид-напівпровідник (КМОН).

CMOS-технологія – одна з декількох технологій розробки і побудови схем електроніки. Сама назва технології є аббревіатурою англійського виразу – complementary metal-oxide-semiconductor. В українській транскрипції – КМОН, або комплементарна логіка з транзисторами на метал-оксид-напівпровіднику.

Робота транзисторів МОН-структури заснована на польовому ефекті, відкритому ще в 20-х роках дев'ятнадцятого століття. У мікросхемах, побудованих по CMOS-технології, застосовуються пари польових транзисторів з однаковими параметрами, але з різними провідностями ізолюваних затворів. Якщо у одного транзистора затвор р-типу, то в іншого він n-типу; наслідком такої структури є більш висока швидкодія.

Схеми CMOS винайшов американський інженер Френк Вонлас в 1963-му році, а перші мікросхеми за цією технологією з'явилися вже в 1968-му. Ці схеми відрізняються від схем, виконаних за іншими технологіями – ЕЗЛ, ТТЛ та ін., мізерно малим енергоспоживанням в режимі «спокою», що обумовлюється відсутністю будь-яких навантажувальних резисторів. Основна витрата енергії

відбувається в моменти перемикань стану схеми, в решту часу транзистори закриті, і через них протікає тільки струм витоку, яким, в більшості випадків, можна знехтувати. Такі мікросхеми знайшли широке застосування в електронних пристроях з живленням від батареї – годинник, мікрокалькулятори, стільникові телефони та ін. – де енергозбереження є одним з визначальних чинників.

По мірі вдосконалення технології виготовлення мікросхем і інтеграції в одному пікселі приймача інформації, засобів її обробки і виведення, з'явилася можливість виробництва CMOS-матриць великих розмірів. Такі матриці застосовуються в різних відеокамерах, на їх базі конструюються цифрові фотоапарати, охоронні датчики в системах безпеки та ін.

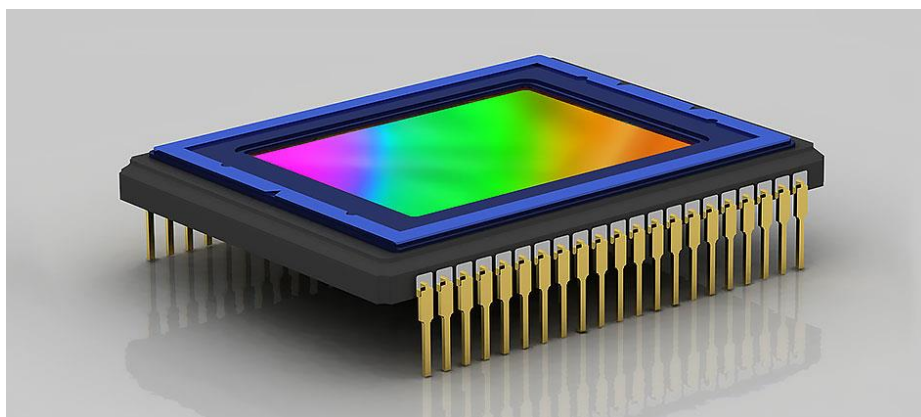


Рисунок 2.10 – CMOS матриця

Комплементарна структура це чип, побудований за схемою, в якій р-канальні і n-канальні польові транзистори використовуються парами і взаємно доповнюють один одного.

Кожний піксель активно-піксельного сенсора зображення на відміну від ПЗЗ-матриць містить не тільки фотодетекторний елемент (фотодіод або фотозатвор), але також і активно-транзисторну схему («обв'язку») для зчитування сигналу з пікселя. Технологія КМОН дозволяє інтегрувати всю систему формування зображення, включаючи масив світлочутливих елементів і керуючі схеми, на одному кристалі кремнію. Переваги такої структури були відомі в теорії з 60-х років, але їх не вдавалося реалізувати аж до 1993 року, коли вперше

Лабораторія реактивного руху NASA (Jet Propulsion Laboratory) успішно впровадила активно-пiксельну технологiю.

Датчики, засновані на активно-пiксельних матрицях, знаходять все бiльш широке застосування в країнах Західної Європи, Південно-Східної Азії, США, в медицині, науці, камерах спостереження, в космічній промисловості, іграшках. У Росії такі прилади поки не отримали широку популярність і не використовуються навіть в тому обсязі, в якому знайшли застосування прилади, засновані на технології накопичення заряду.

2.4.4 Принцип роботи активно-пiксельного датчика При відкритому затворі фотони збираються на сенсорі, тобто відбувається накопичення фотонів в кожному пiкселі датчика - за допомогою лінзи, встановленої на кожному пiкселі, концентруються в фоточутливій області пiкселя. При цьому відбувається фільтрація кольору, тобто в одному пiкселі відбувається накопичення червоних фотонів, в іншому - синіх і в третьому - зелених. Фотон, потрапляючи на фотодетектор фотодіода, вибиває електрони, які накопичуються в, так званих, потенційних ямах, накопичені електрони створюють різницю потенціалів. За синхронізуючим сигналом з генератора імпульсів відбувається одночасне зчитування накопичених зарядів - всіх або з окремих пiкселів, зазначених оператором. Отриманий сигнал занадто малий для самостійного використання, тому він проходить через підсилювач. Після цього відбувається обробка аналогового сигналу і перетворення аналогового сигналу в цифровий.

Потім в цифровому процесорі сигналів або за допомогою спеціального програмного забезпечення відбувається інтерпретація і корекція кольорів, зрозуміло, якщо розглянута нами камера не є монохромною. Потім отримані дані перетворюються в формат, з яким можуть працювати користувачеві, і виводяться на екран монітора, або записуються на електронно-магнітні носії.

Кожен з масиву пiкселів має виводи на сітку металевих провідників, що дозволяє тимчасовим, що зчитує і вихідним сигналам проходити по всіх клітинок. Виводи даної сітки приєднані до зчитувальним і декодувальним елементам, які розташовуються поза масивом пiкселів. Така архітектура дозволяє зчитувати дані

з усього масиву пікселів, з деяких частин цього масиву і з окремих пікселів з використанням простий XY адресації, що неможливо в ПЗЗ-матрицях. Відповідно до прийнятої термінології, активний піксель - це піксель, що містить розсіювальний потужність елемент. У більшості випадків в ролі активного елементи виступає MOSFET в підсилювальній або буферній конфігурації. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) це тип транзистора, заснований на структурі метал-оксидного напівпровідника. Струм між емітером і колектором протікає через область збіднення, керований напругою на базі. Наявність тільки одного транзистора типу MOSFET, що грає роль тільки перемикача, що не робить піксель "активним".

У колишні часи MOSFETs виготовлявся як "лишковий пиріг" з алюмінію (метал) і оксиду кремнію (оксид) на підкладці з силікону (напівпровідник). В даний час алюміній в більшості випадків замінюється на полікристалічний кремній, але колишня назва збережена. Іншими словами, зараз розробляють і працюють з POSFET-транзисторами (P-polycrystalic) і з датчиками зображення CPOS (Complementary Polycrystalic Oxide Semiconductor).

Таким чином, активний піксель є одиничний елемент твердотільної решітки, що володіє фотоелектричною передавальною функцією при дії світлового електромагнітного випромінювання. При цьому у кожного пікселя з'являвся свій зчитуючий транзисторний підсилювач (readout amplifier transistor), що дозволяє "перетворювати" заряд в напругу безпосередньо на пікселі. Посилуючі ж схеми можуть бути розташовані в будь-якому місці чипа, а не тільки на світлочутливій області. Це дозволяє створювати кілька каскадів посилення по всьому сенсору. Так, наприклад, в умовах недостатнього освітлення підсилювачі можуть «витягати» зображення повністю, а в інших випадках можуть посилювати лише певні кольори або області зображення.

2.4.5 Мікролінзи і набір кольорових фільтрів. Мікролінзи концентрують світло в фоточутливій частині кожного пікселя. Це дозволяє збільшити фактор заповнення (fill-factor).

Металевий непроникний шар не дозволяє фотонам проникати в кремнієву підкладку, створюючи додатковий заряд, і тим самим наводячи перешкоди (шуми) на вихідний сигнал з кожного пікселя.

На своєму шляху фотони світла проходять крізь масив кольорових фільтрів (color filter array), де починається процес отримання кольору для, по своїй суті, «монохромного» чипа. Насправді, «панхроматичний» більш відповідний термін, з тих пір як сенсори стали здатні працювати з усім спектром. Слово «монохромний» прийшло з телебачення і має значення чорного і білого.

Вибір кольору зі світла, що падає на сенсор, означає здатність до окремого виділення червоних (red = R), зелених (green = G) і синіх (blue = B) фотонів. Для цього кожен піксель кольорового сенсора має червоний, зелений або синій фільтр відповідно до спеціальної конфігурацією.

З того часу, коли кожен піксель був зроблений чутливим тільки до одного кольору (однієї спектральної лінії), загальна чутливість кольорового сенсора стала приблизно в 3 рази нижче в порівнянні з монохромним (панхроматичним) сенсором. В результаті монохромні сенсори більше підходять для застосування в областях з малим освітленням, наприклад в камерах спостереження в службі безпеки. Ось чому людське око в темряві «переключається» і бачить в чорно-білому діапазоні.

2.4.6 Зменшення розміру пікселя «плюси» і «мінуси». Чим більше піксель, тим більше світла він зможе зібрати. Великі пікселі краще працюють в умовах поганої освітленості. Для однакової кількості пікселів з великих виходить чип більшого розміру, а відповідно і більш дорогий. Чим більше видима область, тим більше лінзи. Відповідно, вони коштують дорожче. З іншого боку, пікселі меншого розміру дозволяють створювати чипи меншого розміру і, відповідно, вони коштують дешевше. Це ж відноситься і до лінз.

Коли архітектура КМОН активного пікселя була вперше реалізована, використовувалися великі пікселі розміром 40 мікрон по довжині і по ширині. Такі пікселі все ще використовуються для зйомки рентгенівських променів і в інших спеціальних областях. Поступово розробники досягли розміру в 20, потім в

12, а потім і в 10 мікрон, після чого товщина пікселя в сенсорах промислового виробництва досягла 7.9 мікрон. Такий розмір дозволяв застосовувати загальноприйняту 1/3-дюймову оптику.

Проте, все ще існують обмеження на зменшення розміру пікселя. По-перше, маленькі пікселі менш чутливі до світла (хоча цю проблему можна вирішити за допомогою мікролінз). По-друге, при досягненні розміру приблизно в 5 мікрон, оптичний елемент, присутній на пікселі, значно здорожує його загальну вартість. Хоча малогабаритна оптика дешевше, мікролінзи, які дозволяють зберегти прийнятні характеристики, мають дуже велику вартість. По-третє, виготовлення таких маленьких пікселів вимагає більш дорогої технології виробництва, що також збільшує кінцеву вартість сенсора, навіть якщо сам чип малий.

2.4.7 Порівняння активно-піксельних датчиків з приладами на основі зарядового зв'язку. Головним недоліком активно-піксельної технології є перешкоди, що виникають із-за додавання додаткових елементів на чип. Це транзисторні та діодні розсіювання, ефект залишкового заряду і багато інших. Усуненням таких перешкод розробники займаються вже давно. В даний час автори розробники активно-піксельних датчиків навчилися безпосередньо на чипі усувати шум тіньового струму з заряду перед тим, як передати його з сенсора.

Подібно ПЗЗ, КМОН-сенсори використовують масив фотодіодів для переведення світла в електричний сигнал. Цей маленький електричний заряд, що генерується фотодіодом, накопичується в конденсаторі. Заряд занадто слабкий, щоб бути використаним для самостійного використання, і потребує посилення до прийнятного для роботи з ним рівня.

Основною відмінністю між ПЗЗ і КМОН-сенсором - це спосіб переказу накопичених зарядів в сигнали, які підлягають обробці. ПЗЗ-матриця зчитує пікселі безперервно. Збережені заряди з кожного рядка фактично зсуваються до наступного рядка (так звана «зарядовий зв'язок») і по загальній шині заряди виводяться послідовним потоком даних. Рівень напруги кожного пікселя в послідовному потоці підвищується підсилювачем, встановленому на чипі перед

виходом, і далі направляється до зовнішнього або внутрішнього аналого-цифровому перетворювача (АЦП), де сигнали перетворюються в масив байтів, з яких створюється зображення.

Кожен піксель в КМОН-сенсорі має свою власну підсилювальну схему, тому підсилення сигналу відбувається ще до зчитування зображення.

Одержаний сигнал досить потужний, щоб бути використаним без будь-якого подальшого посилення. На відміну від ПЗЗ, КМОН-сенсори часто мають додаткову схему обробки зображення, включаючи аналого-цифрові перетворювачі і процесори стиску прямо на чипі, роблячи процес зчитування й обробки зображення більш швидким і простим. Все це виражається в менш потужному чипі, збільшеній надійності, зменшеному споживанні енергії та більш компактному дизайні.

З'явилася можливість довільного доступу до кожного пікселя сенсора подібно до того, як працює оперативний пристрій (по паралельній схемі). Такий доступ дозволяє КМОН-сенсору зчитувати не всю матрицю цілком, а лише деякі області. Цей метод називається методом віконного зчитування (window-of-interest, windowing readout). КМОН-сенсор здатний також зменшити розмір зображення. У порівнянні з ПЗЗ-датчиками при цьому також збільшується швидкість зчитування (в ПЗЗ-датчиках весь заряд виходить через єдиний зсувний регістр). Крім того, є можливість вбудування в кожен піксель аналого-цифрового перетворення та первинної обробки зображень.

Ще одна перевага активно-піксельної технології полягає в тому, що значно знижується споживана потужність і зменшується число складових частин, необхідних для складання готових виробів. Оскільки одна мікросхема виконує всі функції камери від реєстрації фотонів до побітового формування коду зображення, то пристрої, засновані на технології КМОН, відрізняються підвищеною надійністю.

При всіх вищеописаних перевагах головною же перевагою КМОН-датчиків є їх вартість. КМОН це стандартна технологія виготовлення мікросхем, мікроконтролерів, мікропроцесорів, освоєна тисячами виробників. Також,

матриця пікселів може бути розміщена на одній «платформі» разом з елементами цифрової електроніки, формувачем тактових імпульсів, АЦП, що є великою перевагою над ПЗЗ-датчиками. І коли КМОН-кристали стануть широко використовуватися в якості реєструючих елементів високо роздільних цифрових камер, ціна останніх стане дійсно настільки низькою, що плівкові фотоапарати, можливо, стануть раритетом.

Таблиця 2.1 Порівняльна таблиця властивостей і характеристик ПЗЗ і КМОН матриць

Параметр	ПЗЗ-матриця	КМОН-матриця
Вихідний сигнал пікселя	Електрони	Напруга
Вихідний сигнал пристрою	Напруга (аналоговий сигнал)	Біти (цифровий сигнал)
Коефіцієнт заповнення	Високого рівня	Помірного рівня
Неузгоджений підсилювач	Не застосовано	Помірного рівня
Системний шум	Низького рівня	Від помірного до високого рівня
Складність системи	Висока	Низька
Складність датчика	Низька	Висока
Компоненти камери	Друківана плата, мікросхеми, об'єктив	Мікросхема та об'єктив
Чутливість	Помірного рівня	Покращеного рівня
Динамічний діапазон	Високий	Помірний
Однорідність	Висока	Від низької до помірної
Швидкість	Від помірної до високої	Найбільша
Отримання неповного зображення	Обмежене	Необмежена
Антиблюмінг	Від хорошого до відсутнього	Добрий
Живлення та керування	Важке, високі напруги	Просте, низька напруга

2.5 Розрахунок структури оптичного приймача

Космічне знімання, як правило, ведеться в умовах слабкої освітленості [11]. У цьому випадку потенційна розрізняльна здатність знімків визначається не мінімальними геометричними розмірами елементарного світлочуттєвого елемента, а відношенням сигнал-шум.

Для підвищення відношення сигнал-шум може застосовуватися охолодження оптичного приймача чи попереднє електронне підсилення сигналів за рахунок їх накопичення. Охолодження приймачів зображення пов'язано з рядом недоліків: по-перше, для роботи охолоджувача потрібна енергія з потужністю декілька ват, по-друге, відбувається запотівання оптичного вікна, по-третє, відбувається зсув спектральної характеристики оптичного ПЗЗ приймача [12].

Для організації попереднього електронного підсилення сигналів за рахунок їх накопичення необхідно застосовувати матричні оптичні приймачі з використанням їх у режимі тимчасової затримки і накопичення (ТЗН) [12, 13].

Цей режим використовується, коли матриця чи об'єкт переміщуються одне відносно другого у напрямку, перпендикулярному рядкам матриці (наприклад, при зйомці з космічних апаратів). Середня швидкість переносу зарядів у вертикальних стовпцях матриці повинна збігатися зі швидкістю руху зображення у площині матриці.

Якщо визначений фрагмент зображення сполучений, наприклад, з першим рядком матриці ТЗН і на неї поданий потенціал накопичення, то протягом часу, рівного періоду зсувових імпульсів, буде відбуватися накопичення заряду від даного фрагмента. Потім потенціал накопичення переключають на другий рядок, накопичені в першому рядку заряди перейдуть у другий рядок. Оскільки швидкість руху зображення синхронна зі швидкістю руху зарядових пакетів, то в другому рядку буде відбуватися накопичення зарядів від того ж самого фрагмента. Далі зарядові пакети будуть переміщені під електроди третього рядка, і знову до накопиченого раніше заряду буде додаватися заряд від того ж фрагмента зображення. Цей процес буде повторюватися стільки разів, скільки рядків міститься в матриці по напрямку руху.

Використання режиму ТЗН дозволяє істотно підвищити відношення сигнал-шум [12, 14, 11].

Освітленість земної поверхні у найкращих умовах досягає $E_0 = 80 \text{ клк}$ [15]. Коефіцієнт поглинання для найбільш застосовуваних напівпровідників (InSb,

HgCdTe) приблизно дорівнює $0,005 \text{ см}^{-1}$ чи трохи більше [13]. При використанні напівпровідників із глибиною порядку 10-15 мкм інтенсивність світла у глибині буде зменшуватися у десятки разів. Для досягнення високої точності визначення координат об'єктів на поверхні Землі година експозиції повинна бути менш 100 мкс. З цього можна зробити висновок, що знімання з КА при використанні як приймача зображення ПЗЗ структури здійснюється в умовах слабкої освітленості (до $10^{-3} \text{ лк} \cdot \text{с}$) [11].

Розрізняльна здатність (РЗ) зображення визначається максимальною кількістю ліній (віднесених до одного міліметра), що ще може бути сприйнято даним оптичним приймачем без їхнього злиття в одне ціле. Очевидно, що в ПЗЗ максимальна РЗ визначається розміром одного світлочутливого елемента l_x і дорівнює

$$R_{\max} = \frac{1}{l_x}. \quad (2.13)$$

Реальна РЗ у ПЗЗ нижче розрахованої за цією формулою. При малих рівнях освітленості у світлочутливих елементах накопичуються малі зарядові пакети і велику роль починають грати шуми. У цьому випадку, мінімальний розмір світлочутливого елемента визначається не технологією виготовлення, а умовою одержання необхідного відношення сигнал-шум $g = 3 - 5$ [11].

Шуми в ПЗЗ можна розділити на дві групи: шуми, обумовлені процесом сприйняття зображення і шуми, пов'язані з режимом передачі зарядових пакетів (сканування) [12, 11]. До першої групи відносяться білий шум у потоці падаючих фотонів (флуктуації щільності потоку) і флуктуації фонового заряду.

Інтенсивність білого шуму фотонів $N_{\text{фот}}$ дорівнює

$$N_{\text{фот}} = \sqrt{N_{\text{вим}}}, \quad (2.14)$$

де $N_{вим}$ – загальне число носіїв, накопичених за годину інтегрування t_n світлочутливим елементом з сприймаючою площею A_e :

$$N_{вим} = E_{вим} t_n \theta A_e, \quad (2.15)$$

де $E_{вим}$ – потік падаючих фотонів, за винятком відбитих, θ – квантова ефективність.

Шуми фонового заряду залежать від способу його введення. Якщо фоновий заряд накопичений за рахунок термогенерації, то його флуктуації характеризуються білим шумом

$$N_{фон} = \sqrt{N_{тг}}, \quad (2.16)$$

де $N_{тг}$ – кількість термогенованих носіїв у зарядовому пакеті.

До шумів, що виникають при скануванні, відносяться шуми $N_{ном}$, обумовлені неповною передачею зарядів, і шуми $N_{зах}$, обумовлені захопленням носіїв і перезарядом швидких поверхневих станів при проходженні зарядових пакетів:

$$N_{ном} = \sqrt{2\epsilon u N_{тг} + N_{вим}}, \quad (2.17)$$

$$N_{зах} = \sqrt{1.4 \left(\frac{kT}{q} \right) N_{ss} A_e n}, \quad (2.18)$$

де u – число тактів у системі, n – число передач, N_{ss} – щільність швидких поверхневих станів, k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, q – величина заряду електрона, ϵ – коефіцієнт неефективності переносу заряду.

Корисний сигнал, прийнятий від об'єкта, повинний перевищувати шуми в задане число разів (g). Якщо контрастність k_k зображення низька, то корисний сигнал є тільки частиною загального числа падаючих фотонів $N_{вим}$ і дорівнює

$$\Delta N_{вим} = k_k E_{вим} t_n \theta A_e. \quad (2.19)$$

Для заданого світлового потоку $E_{вим}$ – мінімальна площа світлочутливого елемента A , безпосередньо зв'язана з РЗ, визначається з умови досягнення необхідного значення відносини сигнал-шум

$$g = \frac{N_{вим}}{N'}, \quad (2.20)$$

де N' – сумарний шум.

РЗ ПЗЗ на низьких рівнях освітленості обмежена, головним чином, шумами у фоновому заряді і шумами процесу захоплення носіїв [11].

Звідси знаходимо реально необхідне значення площі світлочутливого елемента A :

$$\sqrt{A} = \frac{g N'}{k_k E_{вим} t_n \theta}, \quad (2.21)$$

де

$$N' = \sqrt{1.4 \left(\frac{kT}{q} \right) N_{ss} n} + \sqrt{I_d t_n n / q}, \quad (2.22)$$

де I_d – щільність струму термогенерації [16].

Розрахунок, проведений по вищенаведених формулах, показує, що для забезпечення необхідного відношення сигнал-шум мінімальна площа одного елемента перевищує мінімальну «досяжну технологічну». Для поліпшення даного показника при космічній зйомці доцільне застосування матричного ПЗЗ приймача в режимі тимчасової затримки й накопичення при послідовно-рівнобіжному скануванні. При використанні ПЗЗ рядків для зрушення вихідних сигналів окремих детекторів уздовж матриці з тією ж швидкістю, з якою система сканування зрушує зображення (зі швидкістю руху КА), досягається збільшення відношення сигнал-шум на множник, який дорівнює квадратному кореню з числа світлочутливих елементів у напрямку сканування [12, 13, 16].

Конструкція приймача зображення буде визначатися наступним чином. Число елементів по ширині матриці N_x визначається необхідною шириною смуги захоплення по Землі з урахуванням масштабного коефіцієнта і розміром елемента A :

$$N_x = \frac{Xf}{H\sqrt{A_e}}, \quad (2.23)$$

де X – необхідна ширина смуги огляду по Землі, f – фокусна відстань оптичної системи, H – висота знімання.

Кількість елементів по довжині приймача N_y визначається досягненням необхідного відношення сигнал-шум, при якому реальна розрізняльна здатність вже буде визначатися мінімальними геометричними розмірами елементарного світлочутливого елемента.

У процесі накопичення зарядів еквівалентний світловий потік $H_{вим}$, що впливає на кожен наступний елемент, буде збільшуватися в N_y раз. Тому формула (2.17) прийме вид:

$$\sqrt{A_e} = \frac{g \left(\sqrt{1.4 \left(\frac{kT}{q} \right) N_{ss} (N_x + N_y)} + \sqrt{I_d t_n (N_x + N_y) / q} \right)}{k_k E_{\text{вим}} t_n \theta}. \quad (2.24)$$

Звідси знаходимо кількість елементів по довжині приймача N_y , необхідне для того, щоб реально необхідне значення площі елемента A дорівнювало мінімальній технологічній A_e :

$$N_y = \frac{z^2 + \sqrt{z^4 + 4z^2 N_x}}{2}, \quad (2.25)$$

де

$$z = \frac{g \left(\sqrt{1.4 \left(\frac{kT}{q} \right) N_{ss}} + \sqrt{I_d t_n / q} \right)}{k_k E_{\text{вим}} t_n \theta \sqrt{A_e}} \quad (2.26)$$

2.6 Методика розрахунку оцінки точності виміру висот об'єктів по результатам космічного оптико-електронного знімання

Дана методика включає у себе розрахунок точності виміру паралакса, розрахунок кількості лінійок матричного оптичного приймача ПЗЗ, математичну модель роботи космічної сканерної оптико-електронної системи знімання, як формувача зображення.

Зміст і математична постановка задачі має вигляд:

1. Дано:

- параметри КСОЕЗ;
- стереознімання проводиться на одному витку польоту КА;
- математична модель об'єкта, що знімається;

- обробка знімків проводиться автоматизовано.

2. *Потрібно:* Розрахувати помилку виміру висот об'єктів σ_h по космічним оптико-електронним стереознімкам.

3. *Обмеження і припущення, що прийняті у методиці:*

- строки зображень, що отримуються, перпендикулярні трасі КА;
- проекції середин строк зображень лежать на трасі КА;
- під час отримання першого та другого стереознімків КА рухається по прямолінійній траєкторії.

4. *Основні етапи методики.*

Перший крок: Розрахунок кількості лінійок оптичного приймача на ПЗЗ для забезпечення необхідного відношення сигнал-шум.

Другий крок: Розрахунок спектральної щільності шумів на першому та другому знімках N_1, N_2 . Якщо стереознімки отримуються за допомогою одного датчика, то $N_1 = N_2$.

Третій крок: Розрахунок відношення сигнал-шум на знімках з урахуванням процесу накопичення сигналу:

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{\sqrt{N_y} k_k E_{min1} t_n \theta A_e}{N_1}, \\ q_2 &= \frac{\sqrt{N_y} k_k E_{min2} t_n \theta A_e}{N_2}, \end{aligned} \quad (2.27)$$

де E_{min1}, E_{min2} - мінімальні значення освітленості по полях зображень на першому та другому знімках відповідно.

Четвертий крок: Розрахунок спектрів зображень першого та другого знімків

$$S_1(\omega_x, \omega_y) = N_y T_c(\omega_x, \omega_y) S_{31}(\omega_x, \omega_y) + \sqrt{N_y} N_1, \quad (2.28)$$

$$S_2(\omega_x, \omega_y) = N_y T_c(\omega_x, \omega_y) S_{32}(\omega_x, \omega_y) + \sqrt{N_y} N_2,$$

де $S_{31}(\omega_x, \omega_y)$, $S_{32}(\omega_x, \omega_y)$ - спектри ділянок на земній поверхні, що знімаються з різних просторових точок.

П'ятий крок: Розрахунок спектрів зображень об'єктів, що аналізуються на першому та другому знімках:

$$\begin{aligned} F_1(\omega_x, \omega_y) &= N_y T_c(\omega_x, \omega_y) F_{31}(\omega_x, \omega_y), \\ F_2(\omega_x, \omega_y) &= N_y T_c(\omega_x, \omega_y) F_{32}(\omega_x, \omega_y), \end{aligned} \tag{2.29}$$

де $F_{31}(\omega_x, \omega_y)$, $F_{32}(\omega_x, \omega_y)$ - спектри об'єктів на ділянках на земній поверхні, що знімаються з різних просторових точок.

Шостий крок: Розрахунок точності визначення паралакса.

Сьомий крок: Розрахунок точності виміру висот об'єктів.

Висновок: в даному розділі згідно постановці задачі був розроблений математичний апарат для розрахунку СКВ помилки виміру висоти об'єкту. Приведена порівняльна характеристика сучасних оптичних приймачів. Також було отримано аналітичний вираз для розрахунку параметрів оптичного приймача на ПЗЗ.

З ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗНІМАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРУ ВИСОТ ОБ'ЄКТІВ

3.1 Розрахунок СКВ помилки виміру висоти об'єкту

Для знаходження СКВ помилки виміру висоти об'єкту h використаємо формулу (2.7) для розрахунку h . Прийmemo у першому наближенні адитивну модель впливу помилок визначення змінних, що входять до цієї формули:

$$h + \delta_h = \frac{(H + \delta_H)^2 (p + \delta_p)}{(B + \delta_B)(f + \delta_f)}, \quad (3.1)$$

де δ_h , δ_p , δ_B , δ_f – відповідні помилки визначення відносної висоти об'єкта, паралакса, базису знімання та фокусної відстані. Будемо вважати, що математичне очікування цих помилок дорівнює нулю.

Права частина в (3.1) залежить від п'яти змінних. Вона є суттєво нелінійною та незручною для подальшого аналізу. Розкладемо цю функцію у ряд Тейлора [17, 18, 9] по відповідним змінним. Перший член цього ряду буде дорівнювати h (2.7). Наступні чотири члени будуть дорівнювати:

$$\frac{dh}{d\delta_H} \delta_H = \frac{2Hp}{Bf} \delta_H, \quad (3.2)$$

$$\frac{dh}{d\delta_B} \delta_B = -\frac{H^2 p}{B^2 f} \delta_B, \quad (3.3)$$

$$\frac{dh}{d\delta_p} \delta_p = \frac{H^2}{Bf} \delta_p, \quad (3.4)$$

$$\frac{dh}{d\delta_f} \delta_f = -\frac{H^2 p}{Bf^2} \delta_f. \quad (3.5)$$

Як показує аналіз подальшого розкладання, інші члени ряду будуть на декілька порядків менше, ніж перші п'ять. Тому, формула визначення помилки перевищення висот із вищепойменованими допущеннями прийме вигляд:

$$\delta_h = \left(\frac{dh}{d\delta_p} \right) \delta_p + \left(\frac{dh}{d\delta_B} \right) \delta_B + \left(\frac{dh}{d\delta_H} \right) \delta_H + \left(\frac{dh}{d\delta_f} \right) \delta_f. \quad (3.6)$$

Для обчислення дисперсії помилки визначення перевищення висот зведемо ліву та праву частини у квадрат та візьмемо математичне очікування від обох частин [19]. У зв'язку з тим, що паралакс, висота польоту КА, базис знімання та фокусна відстань вимірюються різними приладами, випадкові величини $\delta_p, \delta_H, \delta_B, \delta_f$ вважатимемо некорельованими. Тоді дисперсія помилки визначення перевищення висот буде розраховуватися за формулою:

$$\sigma_h^2 = \left(\frac{dh}{d\delta_p} \right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{dh}{d\delta_B} \right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{dh}{d\delta_H} \right)^2 \sigma_H^2 + \left(\frac{dh}{d\delta_f} \right)^2 \sigma_f^2, \quad (3.7)$$

де $\sigma_p, \sigma_H, \sigma_B, \sigma_f$ – СКВ помилок виміру паралакса, висоти польоту КА, базису стереознімання та фокусної відстані відповідно.

3.2 Аналіз впливу основних параметрів на точність визначення висот об'єктів

У формулу (3.7) входить СКВ помилки виміру базису σ_B . Базис знімання може бути визначений трьома способами: по даним з наземних вимірювальних комплексів, за допомогою прогнозування траєкторії КА за час між моментами знімання, по даним автономної системи навігації. Визначення координат КА на моменти знімання на багато точніше за даними автономної системи навігації

(АСН), тому розглянемо тільки останній варіант виміру базису. АСН визначає положення КА та його швидкість [20]. Проведемо аналіз значення σ_B .

Базис знімання може бути знайдений за наступною формулою:

$$B = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \quad (3.8)$$

де $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ – відповідно прямокутні координати КА в першій та другий моменти знімання в орбітальній системі координат.

Приймемо адитивну модель помилок виміру координат:

$$\hat{x}_i = x_i + \delta_{x_i}; \hat{y}_i = y_i + \delta_{y_i}; \hat{z}_i = z_i + \delta_{z_i}; \hat{B}_i = B_i + \delta_{B_i}, \quad (3.9)$$

де $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i, \hat{B}$ – оцінки в визначенні відповідно координат КА в перший та другий моменти знімання та базису;

$\delta_{\hat{x}_i}, \delta_{\hat{y}_i}, \delta_{\hat{z}_i}, \delta_{\hat{B}}$ – помилки в визначенні відповідних параметрів;

x_i, y_i, z_i, B – дійсні значення параметрів. ($i=1,2$).

Будемо вважати помилки виміру окремих координат некорельованими центрованими випадковими величинами.

Підставимо цю модель в формулу визначення базису стереознімання та зробимо усереднення по реалізаціям. Одержимо дисперсію виміру базису:

$$\sigma_b^2 = 6\sigma_k^2. \quad (3.10)$$

Разом з тим, точність виміру паралакса при автоматичному суміщенні стереознімків може бути розрахована за формулою:

$$\sigma_p^2 = \frac{\left(\frac{2}{q_1} + \frac{2}{q_2} + \frac{1}{q_1 q_2} \right)}{4k_{12}^2 \omega^2} = \frac{2q_1 + 2q_2 + 1}{4k_{12}^2 q_1 q_2 \omega^2}, \quad (3.11)$$

де q_1, q_2 – відношення сигнал-шум на першому та другому знімках відповідно,

$$k_{12} = \frac{E_{12}}{\sqrt{E_1 E_2}} \quad (3.12)$$

k – коефіцієнт кореляції спектрів зображень об'єкту на першому і другому знімках.

Проведений аналіз показав, що зі збільшенням значення базису помилка виміру висот об'єктів спочатку покращується, а потім – погіршується. Це погіршення викликано тим, що знімки стереопари отримуються із різних просторових точок і при цьому на зображеннях виникають перспективні викривлення та викривлення за рельєф [1]. Відповідно, при збільшенні базису знімання ці викривлення будуть збільшуватися. Графіки залежностей помилки визначення висот об'єктів від значення базису стереознімання представлені на рис. 3.1.

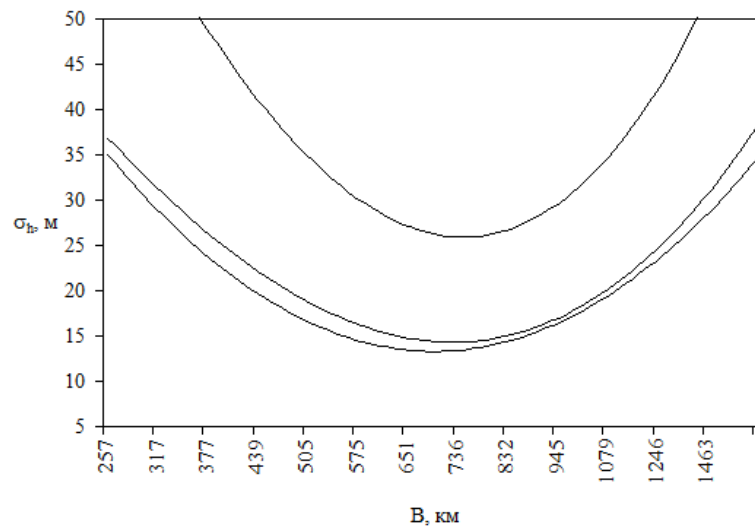


Рисунок 3.1 – Графік залежності СКВ помилки визначення висот об'єктів від СКВ помилки визначення базису

Висота польоту КА визначає масштаб знімання.

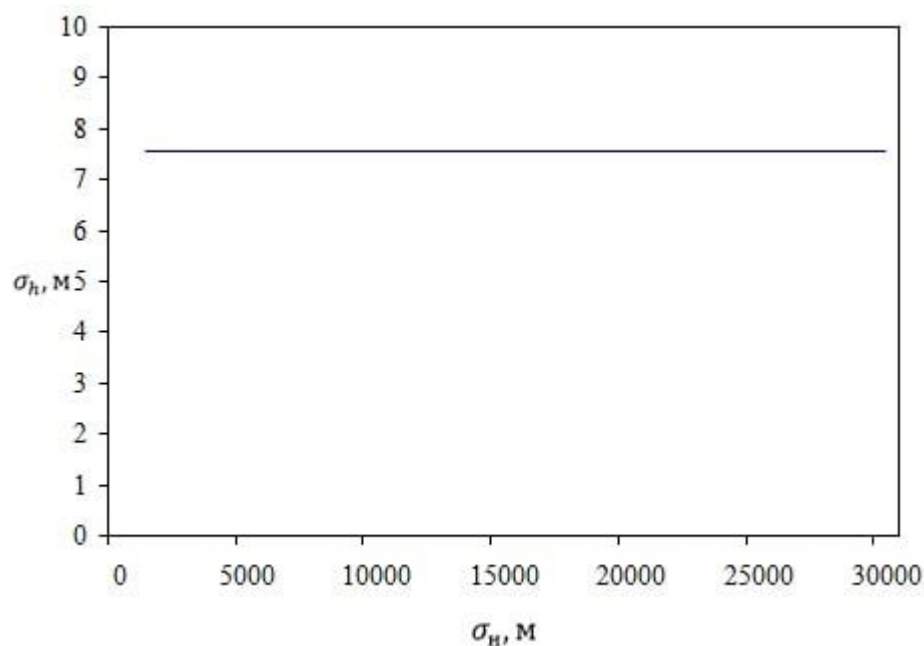


Рисунок 3.2 – Графік залежності СКВ помилки визначення висоти об'єктів від СКВ помилки визначення висоти польоту КА

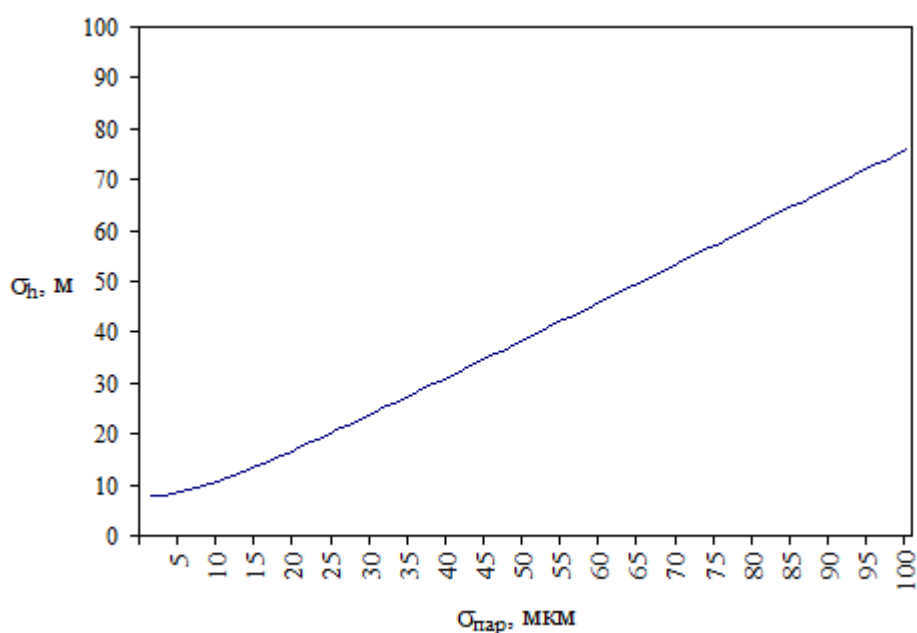


Рисунок 3.3 – Графік залежності СКВ помилки визначення висоти об'єктів від СКВ помилки визначення паралакса

Фокусна відстань оптичної системи належить до елементів внутрішнього орієнтування. У ході налагоджувальних та тестувальних робіт на відповідному

стендовому обладнанні f може бути визначена з досить великою точністю, що робить незначний вплив на точність визначення висоти об'єктів [1]. Графіки залежностей СКВ помилки виміру висот об'єктів від відповідних СКВ помилок визначення висоти польоту КА, паралакса для типових початкових умов представлені на рис. 3.2–3.3.

Із них видно, що основний вплив на помилку виміру висот об'єктів відіграє помилка виміру паралакса. Тому, для оцінки точності визначення висот об'єктів важливо оцінити помилку визначення паралакса при автоматичному суміщенні стереознімків.

Висновок: до даного розділу увійшло дослідження залежності точності виміру висот об'єктів від основних параметрів КСОЕЗ. Дослідження показало, що основний вплив на помилку визначення висоти об'єктів є помилка виміру паралаксу.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було проведено аналіз способів стереознімання за допомогою оптико-електронного датчика, в якому в якості оптичного приймача застосовується ПЗЗ. Була поставлена задача дослідження щодо розробки математичного апарату оцінювання точності визначення висот об'єктів по стереознімкам, отриманим з КА оптико-електронної системи знімання. Цей математичний апарат повинен включати параметри і характеристики КСОЕЗ для оцінювання помилки визначення висот об'єктів та дослідження залежності точності визначення висот об'єктів від параметрів, що впливають на неї. Крім того, необхідно розрахувати необхідну структуру оптичного приймача.

У відповідності до поставленого завдання був розроблений математичний апарат для розрахунку СКВ помилки виміру висоти об'єкту. В його склад входять основні параметри і характеристики КСОЕЗ, такі як висота і база знімання, фокусна відстань.

Також було отримано аналітичний вираз для розрахунку параметрів оптичного приймача на ПЗЗ. Це необхідно для визначення кількості лінійок накопичення зарядових пакетів, що необхідно застосовувати під час знімання у відповідності до умов освітленості земної поверхні.

Було проведено дослідження залежності точності виміру висот об'єктів від основних параметрів КСОЕЗ. Точність виміру бази та висоти польоту знімання на сьогоднішній день визначаються з досить високою точністю і не значно впливають на СКВ помилки виміру висоти. Фокусна відстань суттєво впливає на цей показник і її вимір проводиться ще під час тестувальних робіт. Основний вплив на точність виміру висот об'єктів відіграє точність виміру паралакса і параметри оптичного ПЗЗ приймача.

Розроблений математичний апарат може бути використаний при плануванні процесу стереознімання, наприклад, для визначення оптимального значення бази.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Zhu J., et al. "Deep Learning for Satellite Image Analysis: A Comprehensive Review." *Remote Sensing*, 2018. Vol. 10. P. 2034.
2. Elhassan A., et al. "Remote Sensing Image Classification Using Machine Learning Techniques." *Remote Sensing*, 2018. Vol. 10, Article 1345.
3. Ritchie A. C. *Remote Sensing and Digital Image Processing*. – New York: Springer, 2018. – 350 p.
4. Baker C. J., et al. *Satellite Image Processing: Principles and Techniques*. – Boston: Academic Press, 2019. – 480 p.
5. Roehrig C., et al. "Object Detection in Satellite Imagery: A Review of State-of-the-Art Techniques." *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2017. Vol. IV-2, P. 231-238.
6. Liu J., et al. "Multispectral Image Recognition of Space Objects: A Methodological Review." *International Journal of Remote Sensing*, 2016. Vol. 37, P. 349-372.
7. Дубина О.Ф. Визначення потенційної точності виміру перевищення висот об'єктів при отриманні стереознімків на одному витку траєкторії польоту КА// Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ КПІ, 2003. – №1. – С. 34 - 37.
8. Richards J. A., Jia X. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. – Berlin: Springer, 2017. – 300 p.
9. Harris A. *Principles of Digital Image Processing: A Practical Approach*. – Boston: Morgan Kaufmann, 2016. – 400 p.
10. Топольницький П.П. Методичні рекомендації для підготовки до лекційних занять з дисципліни “Управління космічними апаратами”. – Житомир: ЖВІРЕ, 2003.
11. Kumar A. *Optical Electronics in Modern Communications*. – New York: Oxford University Press, 2015. – 408 p.
12. Rosen J. *Optical Devices and Techniques: A Practical Guide to Optical System Design*. – Boston: Academic Press, 2018. – 360 p.
13. Левкович В. С., Мельник О. В. *Оптичні системи: проектування та розрахунок*. – Київ: Наукова думка, 2016. – 320 с.

14. Задорожний А. В.. Основи оптоелектроніки. – Харків: ХНУРЕ, 2017. – 250 с.
15. Костенко Р. І.. Електроніка оптичних пристроїв. – Одеса: ОНПУ, 2018. – 330 с.
16. Гвоздь А. О. Проблеми та рішення в оптичних системах. – Харків: НТУ, 2017. – 310 с.
17. Котельников С. А. Математичний справочник для студентів і інженерних спеціальностей. – Київ: Вища школа, 2015. – 390 с.
18. Зубарєв М. Г. Справочник з диференціальних рівнянь і математичного аналізу. – Харків: НТУ, 2016. – 420 с.
19. Куляшов С. В., Седлецкий І. В. Справочник з вищої математики. – Київ: Техніка, 2016. – 480 с.
20. Дубина О.Ф. Звіт про науково-дослідну роботу “Аналіз питань розробки систем прийняття рішень оператору складних інформаційних систем” (шифр “Рішення”). – Житомир: ЖВІРЕ, 2000. – С.52 – 63.
21. CCD і CMOS матриці в відеокамерах. Різниця між CCD і CMOS. [Електронний ресурс] / Охоронні системи і розумний дім - Інтернет сайт – Режим доступу: [www/ URL: https://stronghold.com.ua/blog/ccd-i-cmos-matritsy-v-videokamerah-razlichija-mezhduccd-i-cmos/](http://www/URL:https://stronghold.com.ua/blog/ccd-i-cmos-matritsy-v-videokamerah-razlichija-mezhduccd-i-cmos/)
22. High Definition Closed-Circuit Television [Електронний ресурс] / DataLink інформаційний блог – Режим доступу: [www/ URL: http://datalink.ua/services/videonablyudeniehdsvi](http://datalink.ua/services/videonablyudeniehdsvi)