

ФПТ

(повна назва факультету)

Приладів і контрольно-вимірювальних систем

(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Система прецизійного контролю параметрів поверхонь  
великогабаритних дзеркальних антен на об'єктах  
(в процесі монтажу і експлуатації)**

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РІм - 61  
спеціальності Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка  
(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_  
(підпис) Редчук А.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_  
(підпис) Паламар М.І.  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_  
(підпис) Паламар М.І.  
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис) Паламар М.І.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(підпис) Дунець В.Л.  
(прізвище та ініціали)

## Зміст

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	4
ВСТУП .....	5
1 Аналітична .....	7
1.1 Аналіз існуючих пристроїв .....	7
1.2 Лазерний трекер FARO Laser Tracker ION .....	8
1.3 Лазерний трекер LTD800.....	10
1.4 Лазерний радар MV260.....	11
2 Основна частина .....	13
2.1 Огляд існуючих методів контролю профілю дзеркальних антен .....	13
2.2 Оптичний метод контролю поверхні .....	14
2.2.1 Оптично-механічна система для дослідження форми дзеркала антени .....	14
2.3 Загальні принципи побудови оптичних систем .....	22
2.4 Лазерний далекомір .....	23
2.5 Методи на основі ультразвукової ехолокації.....	27
2.6 Голографічний метод.....	30
3 Науково-дослідницька частина.....	33
3.1 Похибки лазерних далекомірів .....	33
3.1.1 Випадкові похибки.....	33
3.1.2 Систематичні похибки.....	38
3.1.3 Відхилення часового кроку .....	38
3.1.4 «Змішування пікселів».....	39
3.2 Графічне оформлення результатів отриманих при вимірюванні лазерним сканером.....	40

3.3	Сканування поверхні рефлектора РТ-32 за допомогою тахеометра Topcon IS-301.....	45
3.4	Опрацювання у програмі Image Master for IS .....	50
3.5	Методика контролю поверхні рефлектора в робочому режимі з використанням електронного тахеометра .....	51
4.	Охорона праці .....	54
4.1	Державний пожежний нагляд .....	54
4.2	Пожежна профілактика при проектуванні і експлуатації промислових об'єктів .....	55
	ВИСНОВОКИ.....	57
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	58
	ДОДАТОК А.....	60

**СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ**

Скорочення	Пояснення скорочення
ККД	Коефіцієнт корисної дії
АРП	Автоматичне регулювання посилення
ЕОМ	Електронно-обчислювальна машина
ПЗЗ	Прилад із зворотнім зв'язком
ПЧД	Постійна частка дискримінації
ЛСП	Лазерні скануючі пристрої
АС	Антені системи

## ВСТУП

Випромінювання дзеркальних антен сильно залежать від точності їх поверхні. Таким чином, виявлення стану і кількість поверхневих спотворень є ключовим для контролю рефлектора антени. Екологічні причини, механічні деформації через позиціонування антени і зміна гравітаційних навантажень із напрямом антени змінюється, можуть призвести до зниження точності поверхні і, як наслідок, ККД антени. Таким чином, поверхня дзеркала має періодично перевірятися, щоб забезпечувати потрібну точність поверхні. Деякі дзеркальні антени недавніх конструкцій були спроектовані з активними поверхнями (наприклад, Ното радіотелескоп в Італії), щоб компенсувати деформації. Як наслідок, зсуви панелей повинні бути оцінені і виправлені за допомогою ефективної і точної процедури.

Багато різних методів були запропоновані для вимірювання поверхні рефлектора. Ці методи можна розділити на прямі і зворотні методи вимірювання. Перші вимірювання поверхні дзеркала відбувались за допомогою механічних або оптичних вимірювальних систем. Вихід з цих технік дає фактичну форму головного дзеркала. З іншого боку, зворотні методи, засновані на голографічних вимірюваннях, вивчаючи весь оптичний ланцюг. Вони отримують струм, індукований на поверхні дзеркала, а потім інформацію про поверхню зсуву, при використанні антени далекого поля, яке вимірюється, вказуючи рефлектор до супутникової антени або радіоджерел. Амплітуди і фази в далекій зоні можуть бути виміряні за допомогою другої антени для отримання стабільної опорної фази. В якості альтернативи, тільки амплітуда далекого поля може бути використана в якості вхідних даних. Обидва типи в далекій зоні вимірювання дозволяють створювати точну карту поверхні рефлектора.

Проведений аналіз літератури показав, що більшість публікацій присвячена вибору конструктивних параметрів рефлектора. Робіт, направлених на забезпечення вимірювання поверхні рефлектора досить багато, але в них не вистачає методичного забезпечення.

## **Актуальність роботи**

Забезпечення точності вихідних геометричних параметрів і зниження трудомісткості її досягнення є важливим технологічним завданням машинобудівного виробництва, оскільки воно визначає підвищення технічної та економічної ефективності експлуатації технічних систем. Завдання часто вирішується шляхом регулювання геометричних параметрів на базі різних методів компенсації похибок при складанні конструкції: видаленням припуску в процесі складання шляхом механічної обробки по місцю; заповненням проміжків між з'єднуваними поверхнями; відносним переміщенням і деформуванням елементів конструкції.

У ракетно-космічному машинобудуванні особливою гостротою відрізняється технологічна задача регулювання форми поверхні великих розкривних космічних антен, де при габаритних розмірах антени 10-20м необхідно обмежити відхилення точок поверхні рефлектора від теоретичного контуру рівнем  $\pm 0,3$  мм. У разі відхилення форми дзеркала від теоретичної порушується синфазність хвильового фронту у розкриві та, як наслідок, погіршуються електричні характеристики антени.

Часто існує потреба провести вимірювання в процесі роботи антени чи проводити контроль поверхні рефлектора через деякий час її роботи. Виникає потреба у точних методах вимірювання поверхні дзеркала антени.

## **Мета і завдання дослідження**

В даній роботі розглядаються відомі методи вимірювання форми дзеркала, проведено аналіз існуючих рішень у вигляді пристроїв для отримання карти поверхні рефлектора. Запропонована нова схема приладу та оптичної системи для дослідження поверхні рефлектора антени.

## 1 Аналітична

### 1.1 Аналіз існуючих пристроїв

З розвитком електроніки і комп'ютерних програм появились різні методики дослідження об'єктів і створення їх математичної моделі один із таких методів є лазерне сканування.

Лазерний сканер – пристрій, який за допомогою лазерного променя аналізує об'єкт сканування. Сканер отримує дані про фізичний об'єкт у вигляді координатних точок в просторі. Далі за допомогою спеціальних CAD програм ці точки дозволяють відтворити форму об'єкту в 3D чи порівняти її з іншою формою.

Лазерний сканер це різновид знімального пристрою, який з високою швидкістю вимірює відстань до точок об'єкта сканування та зберігає дані, такі як X, Y, Z координати. За допомогою цих просторових координат і спеціальних програм дозволяється створити 3D модель для подальшого аналізу і створення математичної моделі.

Теперішні сканери дозволяють робити вимірювання з досить великою точністю в режимі реального часу і широко застосовуються в різних галузях. Також вони дозволяють провести початкове сканування, яке проходить швидко, а далі в програмі вибрати область сканування для більш точного вимірювання. Крім того в сканерів є можливість проводити вимірювання із різних точок базування чи навіть із кількома сканерами одночасно, оскільки від цього збільшується точність отриманих даних.

Основними характеристиками лазерних сканерів можна назвати:

- діапазон вимірювання відстаней;
- точність вимірювання;
- швидкість вимірювання;
- час потрібний на все вимірювання;
- кут охоплення сканування;

- час сканування який може витримати батарея;
- принцип вимірювання відстані;
- крок і точність кутового позиціонування

Для того щоб прилад міг проводити вимірювання відхилення від поверхні рефлекторів великогабаритних дзеркальних антен він повинен задовільняти такі критерії:

- Діапазон вимірюваних відстаней: від 1 м до 10 м;
- Дискретність вимірювання відстані: 0,1 мм;
- Точність вимірювання відстані: 1 мм;
- Крок кутового позиціонування: 0,01 °
- Похибка кроку позиціонування: 0,01 °
- Кут охоплення сканування: 180 ° x 180 °

## **1.2 Лазерний трекер FARO Laser Tracker ION**

Лазерні трекари - це пристрої, які здатні проводити точні вимірювання великих поверхонь і предметів, також здатні на визначення положення оптичних об'єктів. Точність лазерних трекерів становить близько 0,025 мм в залежності на якій відстані проводяться виміри.

Принцип роботи координатно-вимірювальних машин FARO Laser Tracker полягає в наступному. Прилад у верхній частині має поворотну головку з лазерним випромінювачем, яка здатна обертатися по вертикалі і по горизонталі. Усередині розташовані два високоточних датчика, які в режимі реального часу відстежують кут повороту головки по обох осях (вертикальній і горизонтальній). Випромінювач дає лазерний промінь, що відбивається від дзеркал кутового відбивача. Вони мають форму піраміди і встановлені всередині вимірювальної сфери, так, що її вершина збігається з центром сфери. За допомогою лазерного променя визначається відстань до сфери. Її оператор повинен підносити до поверхні контрольованого об'єкта для зняття координат точок. Координати точок розраховуються комп'ютером в системі координат трекера за рахунок відомих двох кутів повороту



головки лазерного трекера FARO по горизонталі і вертикалі, і відомого відстані до відбивача. За допомогою сервоприводів, які встановлені в поворотній голівці, трекер автоматично стежить за переміщенням вимірювального відбивача і визначає координати його положення в режимі реального часу.



Рисунок 1.1 FARO Laser Tracker

Характеристики системи вимірювання відстані

- У режимі ADM
- Дозвіл: 0,5 мкм
- Точність: 8мкм + 0,4 мкм / м
- Параметр R0: 8 мкм
- Швидкість вимірювань вимірів: 10000 вимірів за секунду
- Макс. швидкість переміщення відбивача: 4 м / сек

### 1.3 Лазерний трекер LTD800

Лазерний трекер фірми Leica Geosystems (Швейцарія) являє собою обладнання для високоточних вимірювань трикоординатних в діапазоні розмірів до 80 м. Він об'єднує в собі високоточний автоматичний тахеометр і лазерний інтерферометр.



Рисунок 1.2 Лазерний трекер LTD800

По поверхні об'єкта переміщається прецизійний тріпельпризмовий відбивач (CCR-відбивач), що стежить система трекера передає команду сервоприводом, і прилад розгортається за змінює своє положення маркою. Інтерферометр постійно підраховує зміна кількості цілих довжин хвиль в дистанції, а кутові датчики ( $m\beta = 2''$ ) фіксують зміна кута. З цих даних система постійно обчислює поточне значення координат марки. Швидкість стеження може досягати

б м в секунду, але при цьому дещо знижується точність . Швидкість фіксації координат - до 3000 точок в секунду. Спеціальні датчики температури і вологості повітря проводять моніторинг атмосферних параметрів і автоматично вносять корекцію у вигляді поправок до результатів вимірювань. Точність визначення координат на відстані до 40 м становить 0.01 мм +0.008 мм на кожен метр від віддалі від приладу. Система вимагає обов'язкового контакту з обмірюваною поверхнею.

Ручна приставка-сканер TScan дозволяє визначати положення сотень тисяч точок безпосередньо на поверхні обмірюваного об'єкта при відстані від приладу до 30 м. Точність визначення координат точок на поверхні об'єкта з застосуванням лазерного трекера Leica LTD840 і скануючої приставки TScan порядку 0.03-0.05 мм залежно від відстані, режиму сканування і якості обробки поверхні об'єкта.

#### **1.4 Лазерний радар MV260**

Лазерний радар MV260 - розробка американської фірми Metric Vision. Це мобільна електронно-оптична координати-вимірювальна машина, призначена для безконтактного визначення геометричних характеристик об'єктів складної форми.

У лазерному радарі реалізований полярний метод визначення координат, однак, на відміну від лазерного трекера, для вимірювання відстані не потрібно відбивача. Вимірювання можуть виконуватися безпосередньо до поверхні обміряє об'єкта. Таким чином, окрім одиничних вимірів, можна сканувати поверхню з будь-якої точки в повністю автоматичному режимі. На підставі великої хмари точок, отриманого в результаті вимірів, можна скласти САD-модель і порівнювати з цією моделлю з теоретичної.



Рисунок 1.3 Лазерний радарMV260

Точність вимірювань залежить від необхідної швидкості сканування і змінюється від 0.1-0.2 мм при максимальній швидкості 1000 точок у секунду до 0.025 мм при швидкості 1 точка в 2 секунди. Для виконання прецизійних вимірювань можуть використовуватися візирні цілі у вигляді спеціальних каліброваних металевих кульок.

Невидимі з однієї установки приладу області об'єкта можуть бути обміри із застосуванням метрологічного дзеркала.

В даний час випускається дві модифікації радара MV224 і MV260 з дальністю вимірювань відповідно до 24 і 60 м.

## 2 Основна частина

### 2.1 Огляд існуючих методів контролю профілю дзеркальних антен

Основним контрольованим параметром є відповідність форми дзеркала сателітарної антени це ідеальна парабола, яка її утворює, що впливає на точність фокусування. Методи контролю діляться на контактні і безконтактні. До контактних відносяться методи контролю, що базуються на використанні контрольних шаблонів і мікрометричних вимірювальних засобів та вимірюванні з допомогою щупів і датчиків переміщення. Перші з названих методів є досить ненадійними так, як включають людський фактор. Контроль з допомогою щупів включає похибку механічної частини датчика і не є високоточним. Крім того в першому випадку вимірювання є повільним і не піддається автоматизації та обидва методи викликають сильний вплив на поверхневий шар. До недоліків першого методу слід віднести високу вартість шаблонів і високу похибку.

До безконтактних методів контролю дзеркал сателітарних антен відносяться методи вимірювання з допомогою лазерів, ультразвуку, електромагнітних хвиль. До переваг даних методів відносяться точність контролю, можливість автоматизації процесу контролю та обробки результатів з допомогою ЕОМ.

Оптичний метод контролю поверхні реалізується за допомогою лазерного устаткування. Методи контролю з допомогою лазерів базуються на складних теоретичних принципах вимірювання і потребують складної високоточної і дорогої апаратури, а вимірювання з допомогою електромагнітних хвиль потребують великої кількості теоретичних викладок, то розглядати тут ми їх не будемо, а зупинимося на двох відносно простих методах контролю з використанням лазерів і ультразвуку.

## **2.2 Оптичний метод контролю поверхні**

### **2.2.1 Оптично-механічна система для дослідження форми дзеркала антени**

У роботі запропоновано схему оптичного пристрою – рис.2.1, що дозволяє позбутися вказаних недоліків відомих установок за контролем поверхні.

Схема пристрою містить освітлювальну 1-4 та вимірювальну 6-9 частини. Освітлювальна частина формує на поверхні 5 множину оптичних марок у вигляді кружків малого діаметра. Для формування марок вузький лазерний пучок 1 фокусується оптичною системою 2,3 на розсіювальній поверхні 5. Дифракційний оптичний елемент 4 створює одно- або двовимірну множину марок, центри яких відповідають контрольним точкам поверхні, наприклад, точці S. Як оптичний елемент 4 можна використати дифракційні решітки або голограмні оптичні елементи [5]. Призначення вимірювальної частини – у побудові зображень множини оптичних марок, їхній цифровій фотореєстрації та визначенні координат зображень контрольних точок поверхні. Дана частина містить непрозорі екрани 6,7 з круглими отворами a, b, розміщеними в одній площині на відстані r один від одного, та дві ПЗЗ фотоматриці 8,9, розміщені паралельно площині екранів на відстані p. Зображення марок у площині фотоматриць є картинами дифракції на отворі, на яких точки екстремумів головних максимумів вважаємо за зображення контрольних точок на поверхні 5.

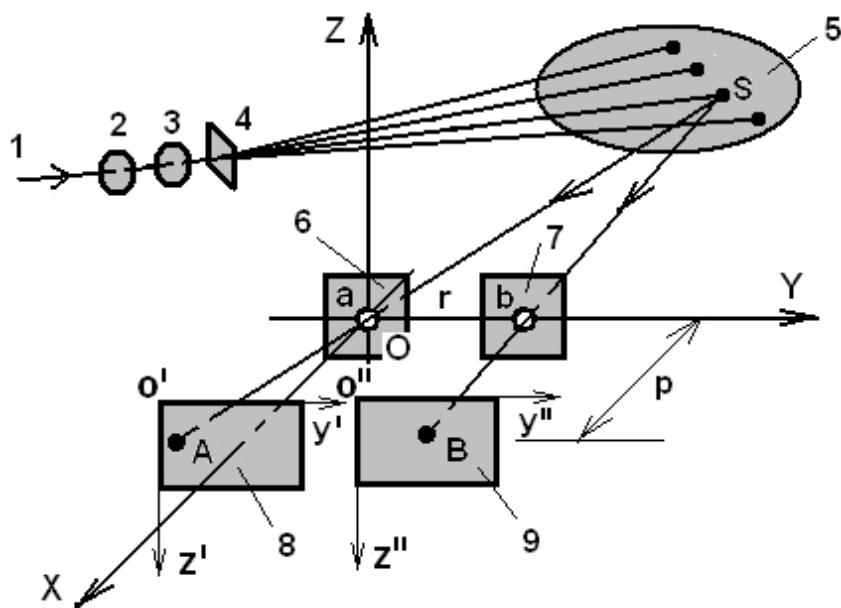


Рисунок 2.1 – Схема оптичного пристрою для визначення форми поверхні:  $OXYZ$  – прямокутна система координат схеми пристрою; 1 – лазерний пучок; 2,3 – об’єктиви; 4 – дифракційний оптичний елемент; 5 – дослідна поверхня, що розсіює світло;  $S$  – точка поверхні; 6,7 – екрани з отворами  $a, b$ ;  $r$  – відстань між центрами отворів; 8,9 – ПЗС фотоматриці;  $A, B$  – місця перетину осями світлових пучків площини фотоматриць;  $p$  – відстань між екранами та фотоматрицями;  $o'y'z'$  та  $o''y''z''$  – власні прямокутні системи координат фотоматриць 8,9

Розглянемо дію схеми на прикладі визначення координат контрольної точки  $S$ . Для спрощення описання виберемо систему координат  $OXYZ$  схеми пристрою так, щоб її центр містився посередині отвору  $a$  (див. рис.2.1) діафрагми 6, а вісь  $OY$  проходила через середину отвору  $b$  діафрагми 7. У такому разі координати центрів обох діафрагм будуть такими:  $a\{0, 0, 0\}$ ,  $b\{0, r, 0\}$ . Нехай точки  $A, B$  – екстремуми головних максимумів дифракції пучків на отворах  $a, b$ , з координатами  $A\{p, YA, ZA\}$ ,  $B\{p, YB, ZB\}$  відповідно. Шукані координати контрольної точки  $S$ , як точки перетину прямих  $aA$  та  $bB$ , можна визначити, записавши рівняння цих прямих у вибраній системі координат

$$\frac{X}{p} = \frac{Y}{Y_A} = \frac{Z}{Z_A}, \quad (2.1)$$

$$\frac{X}{p} = \frac{Y-r}{Y_B-r} = \frac{Z}{Z_B}. \quad (2.2)$$

Тоді складові координати  $SX$ ,  $SY$ ,  $SZ$  контрольної точки  $S$  знайдемо як розв'язок системи рівнянь

$$\begin{pmatrix} Y_A & -p & 0 \\ Z_A & 0 & -p \\ Y_B-r & -p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -rp \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

з якої

$$S_X = -\frac{pr}{Y_B - Y_A - r}$$

$$S_Y = -\frac{rY_A}{Y_B - Y_A - r}$$

$$S_Z = -\frac{rZ_A}{Y_B - Y_A - r} \quad (2.4)$$

Згідно зі схемою пристрою дані із фотоматриць отримують у власних системах координат  $o'y'z'$  та  $o''y''z''$ , початки яких співпадають з нульовим номером пікселя кожної фотоматриці, а осі направлено в напрямку зростання номерів чутливих елементів фотоматриць. Легко показати, що перехід від власних координат фотоматриць до системи координат  $OXYZ$  пристрою здійснюється, для точок  $A, B$ , згідно із виразами



$$Y_A = c + y_A, \quad (2.5) \qquad Y_B = c + r + y'_B, \quad (2.8)$$

$$Z_A = d + z'_A \quad (2.6) \qquad Z_B = d - z'_B, \quad (2.9)$$

$$X_A = p \quad (2.7) \qquad X_B = p \quad (2.10)$$

де  $c, d$  – початкові координати систем  $o'y'z'$  та  $o''y''z''$  у системі  $OXYZ$  на осях  $OY$  та  $OZ$  відповідно;  $y'_A, z'_A$ , та  $y'_B, z'_B$  – лінійні координати точок  $A, B$  у системах  $o'y'z'$  та  $o''y''z''$  відповідно. Підставляючи значення виразів (2.5-2.10) у вирази (2.4) отримуємо значення координат точки  $S$  через значення координат точок  $A, B$  у власній системі координат фотоматриць.

$$S_X = -\frac{2pr}{y'_B - y'_A}$$

$$S_Y = -\frac{r(c + y'_A)}{y'_B - y'_A}$$
(2.11)

$$S_Z = -\frac{r(d - z'_A)}{y'_B - y'_A}$$

Аналогічно визначають координати інших контрольних точок поверхні.

Отримаємо вирази для визначення граничних похибок  $aSX$ ,  $aSY$ ,  $aSZ$  складових координат згідно з наступною методикою.

Нехай  $\alpha$  – гранична похибка вимірювання координат  $y'_A, y'_B, z'_A$  на фотоматрицях. Враховуючи, що похибки складових координат

$$|\Delta S_X| \leq \left[ \left| \frac{\partial S_X}{\partial y'_A} \right| + \left| \frac{\partial S_X}{\partial y'_B} \right| \right] \alpha, \quad (2.12)$$

$$|\Delta S_Y| \leq \left[ \left| \frac{\partial S_Y}{\partial y'_A} \right| + \left| \frac{\partial S_Y}{\partial y'_B} \right| \right] a, \quad (2.13)$$

$$|\Delta S_Z| \leq \left[ \left| \frac{\partial S_Z}{\partial y'_A} \right| + \left| \frac{\partial S_Y}{\partial y'_B} \right| + \left| \frac{\partial S_Z}{\partial y'_A} \right| \right] a. \quad (2.14)$$

та проводячи диференціювання виразів (2.11), отримаємо такі формули для визначення похибок:

$$|\Delta S_X| = \frac{2pra}{(y'_B - y'_A)^2} a, \quad (2.15)$$

$$|\Delta S_Y| = r \frac{2c + y'_B + y'_A}{(y'_B - y'_A)^2} a, \quad (2.16)$$

$$|\Delta S_Z| = r \frac{2|d - z'_A| + |y'_B - y'_A|}{|y'_B - y'_A|} a. \quad (2.17)$$

Таким чином, користуючись експериментальними даними  $y'_A$ ,  $y'_B$ ,  $z'_A$  стосовно координат зображень контрольної точки поверхні та конструктивними параметрами  $r$ ,  $p$ ,  $a$  пристрою визначають похибки вимірювань. Окрім цього, задаючи допустимі значення похибок, можливо підібрати відповідні параметри  $r$ ,  $p$ ,  $a$  пристрою.

На етапі експериментального моделювання поверхню 5 опромінювали множиною сфокусованих лазерних пучків. Кількість пучків та їх розподіл на поверхні визначали характеристиками оптичного дифракційного елемента 4, а саме – частотою штрихів та формою їхнього профілю. У даному випадку застосовано двовимірну дифракційну решітку з частотою штрихів 50мм-1, що формувала в горизонтальній та вертикальній площинах поверхні 49 оптичних марок. Діаметр кружків марок на поверхні  $\sim 1$ мм.

Побудова зображень множини марок та їхню реєстрацію проводили в один момент часу за допомогою непрозорих екранів 6,7 з отворами  $\sim 1$  мм кожний та двох

ПЗС фотоматриць 8,9. Відстань  $r$  між отворами екранів складала 5см, а кожна з фотоматриць містила по 640x480 фоточутливих елементів (пікселів) при розмірах пікселя  $\sim 8 \times 8$  мікрон. Величину відстані  $p$  від екранів до фотоматриць вибирали із умов формування множини зображень марок з чітко вираженими екстремумами центральних максимумів дифракції на фотоматрицях – рис.2.2 а,б та необхідної точності вимірювань.

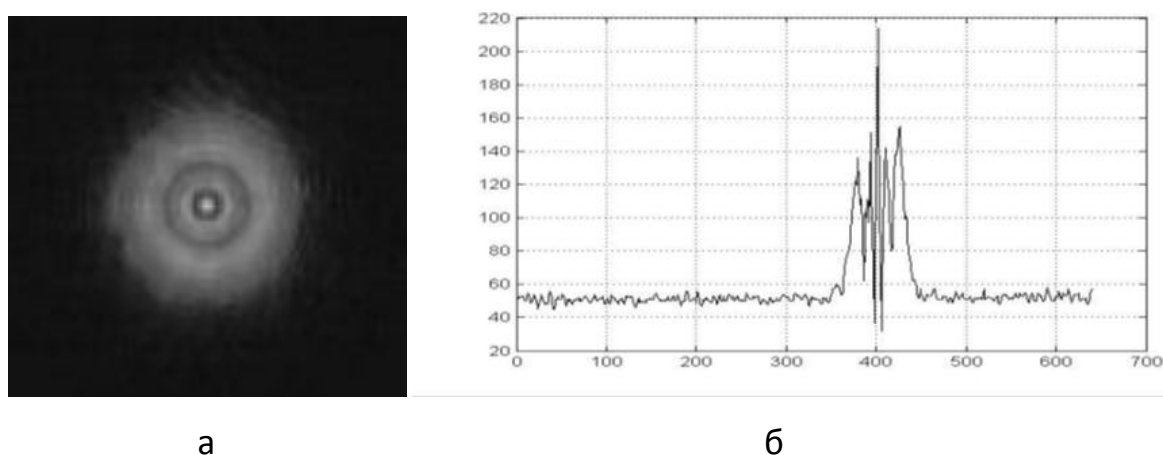


Рисунок 2.2 – Зображення світлової марки в площині фотоматриці: а) графік розподілу освітленості в горизонтальному січенні головного максимуму; б) по горизонтальній вісі графіка відкладені порядкові номери пікселів фотоматриці, а по вертикальній – значення інтенсивності зображення у межах від 0 до 255

На етапі цифрового опрацювання зображень слід враховувати, що координати екстремумів інтенсивності отримують у вигляді порядкових номерів пікселів у горизонтальному і вертикальному напрямках відносно верхнього краю фотоматриць – зліва. Тому попередньо варто калібрувати фотоматриці та кожному номерові пікселя поставити у відповідність координати у лінійній мірі (дану задачу в статті не розглядаємо). Після експериментального визначення координат екстремумів відповідних пар картин та обчислення координат точок поверхні згідно з формулами (2.11) необхідно перевести їх у систему координат контрольованої поверхні (теоретичного рівняння поверхні). Нехай це буде прямокутна система  $O' X' Y' Z'$  – рис.1.3.

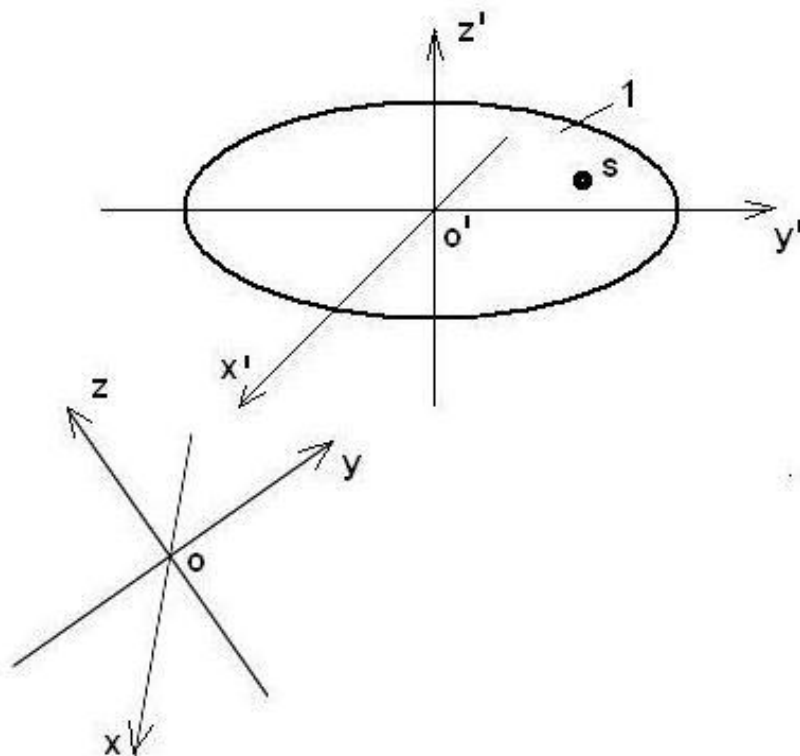


Рисунок 2.3 – Розміщення системи координат  $OXYZ$  вимірювального пристрою та системи координат  $O'X'Y'Z'$  контрольованої поверхні 1;  $S$  – точка поверхні 1

Формули перетворення координат для точки  $S$  поверхні із системи  $OXYZ$  у систему  $O'X'Y'Z'$  записуємо таким чином [6]:

$$XS' = a + XS \cos \alpha 1 + YS \cos \alpha 2 + ZS \cos \alpha 3, \quad (2.18)$$

$$YS' = b + XS \cos \beta 1 + YS \cos \beta 2 + ZS \cos \beta 3, \quad (2.19)$$

$$ZS' = c + XS \cos \gamma 1 + YS \cos \gamma 2 + ZS \cos \gamma 3, \quad (2.20)$$

де  $XS'$ ,  $YS'$ ,  $ZS'$  – координати точки  $S$  у системі  $O'X'Y'Z'$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – координати початку координат системи  $OXYZ$  у координатній системі  $O'X'Y'Z'$ ;  $XS$ ,  $YS$ ,  $ZS$  – визначені в системі  $OXYZ$  координати точки  $S$ ;  $\alpha 1$ ,  $\alpha 2$ ,  $\alpha 3$  – кути між віссю  $O'X'$  та осями  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  відповідно;  $\beta 1$ ,  $\beta 2$ ,  $\beta 3$  – кути між віссю  $O'Y'$  та осями  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  відповідно;  $\gamma 1$ ,  $\gamma 2$ ,  $\gamma 3$  – кути між віссю  $O'Z'$  та осями  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  відповідно.

Щоб визначити коефіцієнти  $a, b, c, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ , виходимо з того, що існують чотири точки поверхні, координати яких у системі  $O' X' Y' Z'$  заздалегідь відомі. Технології виготовлення поверхонь дають таку можливість. Тоді, експериментально визначивши координати даних точок у системі пристрою та користуючись виразами (18–20), легко скласти систему із 12 незалежних рівнянь та отримати значення коефіцієнтів  $a, b, c, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ . Підставивши значення коефіцієнтів та експериментальні значення координат  $X_S, Y_S, Z_S$  у систему рівнянь (11), отримаємо координати точки S у координатній системі контрольованої поверхні (теоретичного рівняння поверхні). Аналогічно перераховуємо координати інших точок поверхні.

Отже, по-перше, застосування двовимірної дифракційної решітки для утворення на підконтрольній поверхні множини оптичних марок та їхня фотореєстрація за допомогою ПЗЗ фотоматриць дозволяє звести визначення координат точок поверхні до одного моменту часу, зменшити витрати часу та собівартість вимірювань, по-друге, експериментальне моделювання показало можливість застосування діафрагм з отворами для формування у площині фотоматриць множини дифракційних зображень оптичних марок, придатних для цифрового опрацювання та визначення координат екстремумів інтенсивності.

### 2.3 Загальні принципи побудови оптичних систем

Як правило використання законів лінійної оптики (рис.2.4) ґрунтується на сходженні двох лазерних променів в точку, яка знаходиться на ідеальній поверхні (теоретична парабола).

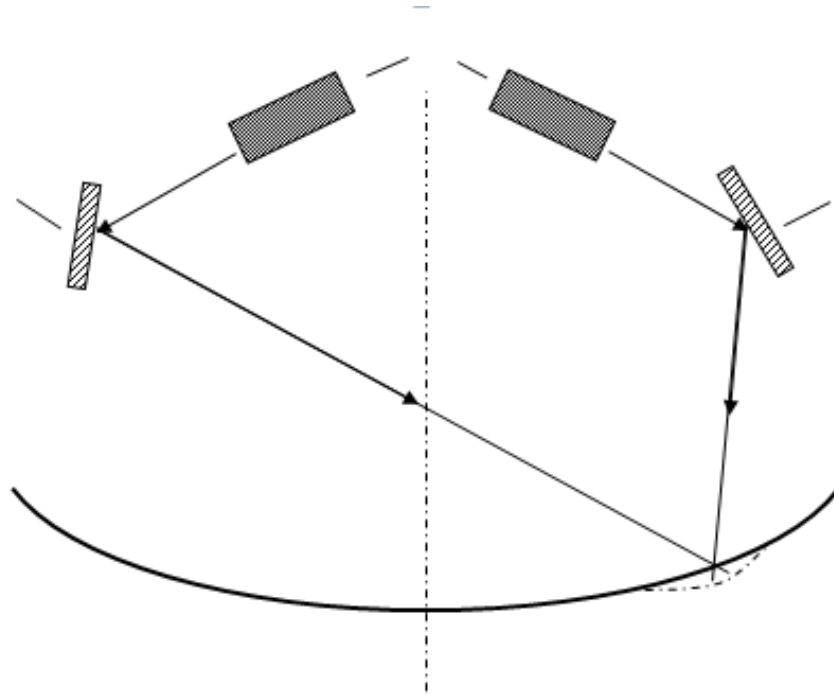


Рисунок 2.4 – Лазерний метод контролю

В даному способі реалізації вимірювальної схеми промені лазерів 1 відбиваються від дзеркал 2 і сходяться в певну точку К, що має знаходитися на ідеальному параболоїді. У випадку коли світлові плями від променів лазерів утворюють на поверхні антени дві світлові плями, а не накладаються, то в даному місці цей профіль має відхилення від ідеального.

До недоліків даного методу відносяться складність створення високоточного механізму керування поворотом дзеркал, доволі складна схема управління даним механізмом та похибка вимірювання пов'язана з тим, що контроль за сходженням променів здійснює людина. Цей метод контролю майже не піддається автоматизації, так як створення схеми яка могла б замінити око людини в процесі вимірювання не окуповує себе.

Однак ідея застосування лазерного пучка у скануванні складно доступних поверхонь знайшла свій розвиток у побудові лазерних далекомірів, а, на їх основі, і лазерних сканерів.

Основними компонентами лазерних сканерів є:

- Лазерний далекомір;
- джерело відхилення лазерного променя (в оптико-механічному сканері) і системи вимірювання кута.

Варто зазначити, що опис компонентів лазерних сканерів ускладнюється їх власним дизайном. Дослідження нижче значною мірою базується на теорії лазерної локації і лазерного сканування пучка, а також наявних публікацій з ЛСП.

## 2.4 Лазерний далекомір

Лазерний далекомір складається з:

- Передавач (твердотільний лазер або напівпровідниковий лазерний діод);
- Приймач (детектор, підсилювачі і автоматичне регулювання пересилки);
- Електроніка вимірювання часу (дискримінатор часу і вимірювач часу)(Часоцифровий перетворювач);
- Передавальна і приймаюча оптика.

Блок-схема типового імпульсного лазерного далекоміра наведена на рис 2.5.

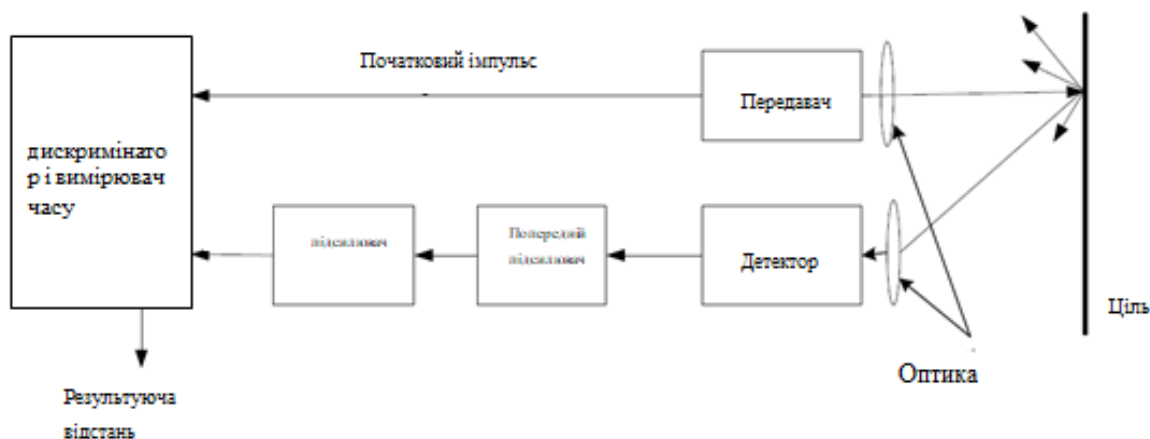


Рисунок 2.5. Блок-схема імпульсного лазерного далекоміра

Лазери, що використовуються в лазерних далекомірах працюють в діапазоні довжин хвиль від 500 до 1500 нм. Загальні частоти повторення імпульсів знаходяться в межах 1 - 10 кГц, з максимальною кількістю десятків кГц. Наприклад, максимальна частота лазерних далекомірів в сканерах Leica HDS і 2500 Leica HDS 3000: 1 кГц і 4 кГц відповідно. Детектор призначений для виявлення лазерних сигналів відбитих від поверхні об'єкта. Як правило, лавинні фотодіоди застосовуються в якості детекторів. Передавач і приймач каналів або коаксіальний або параксіальний, що полегшує установку і компактність та забезпечує уникання тіньових ефектів. Перевага параксіального дизайну це вища прозорість оптики.

Основний принцип локалізації імпульсного лазера може бути описаний наступним чином. Лазерний передавач випромінює короткий імпульс, який розділений на дві частини, одна з яких (початок імпульсу) направляє в приймач і запускає вимірювання часу, а інша прямує на об'єкт. Типова форма імпульсу в інтервалі часу є гауссова. При досягненні поверхні об'єкта сканування лазерним імпульсом він буде зворотньо розсіяний, і частина його повертається в детектор. Потужність випромінювання імпульсів перетвориться в електричний струм. Останній посилюється в приймачі і відправлений в пристрій, який називається дискримінатор часу, який виконує ділення часу (реєстрація повернутого імпульсу) і зупиняє пристрій вимірювання часу. Інтервал часу між випромінюванням імпульсу і прийомом повернутого імпульсу вимірюється у дискримінаторі часу, шляхом підрахунку кількості тактових імпульсів високої частоти (наприклад, 100 МГц) генератор (годинник), використовуючи техніку цифрового підрахунку поряд з аналоговим методом інтерполяції. Дальність до цілі розраховується наступним чином:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (2.21)$$



де  $R$  - відстань,  $c$  - швидкість світла в повітрі ( $\approx 3 \cdot 10^8$  м/с) і  $t$  - двосторонній час проходження лазерного імпульсу (час пролітання). Роздільна здатність відстані імпульсних лазерних далекомірів,  $\Delta R$  пропорційно дозвіл виміру часу,  $\Delta t$ :

$$\Delta R = \frac{c \cdot \Delta t}{2}. \quad (2.22)$$

Як видно з вищевикладеного, що найголовніше в імпульсній лазерній далекомірності є висока точність вимірювання часу. Таким чином, вимірювач часу повинен бути дуже чутливий і швидкий. Наприклад, для вимірювання діапазону  $R = 1$  мм, необхідно мати можливість записувати час

$$t = \frac{2R}{c} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} \approx 6.7$$

Відношення між переданою ( $P_T$ ) і отриманою ( $P_R$ ) потужністю лазера описується основним енергетичним рівнянням радіолокації. Важливо проаналізувати ці відношення, тому що кількість прийнятої потужності впливає на відношення сигнал-шум, і відповідно, в межах точності вимірювання довжини, як буде показано в далі. Можна бачити різні способи для отримання цього рівняння і трохи різні вирази в літературі. Нижче ми наведемо основне енергетичне рівняння радіолокації, для цілі при нормальному падінні лазерного променя:

$$P_R = \frac{\pi \rho D^2}{(4R)^2} P_T \cdot \eta_{atm} \cdot \eta_{sys}, \quad (2.23)$$

де  $\rho$  – коефіцієнт зворотного розсіяння поверхні об'єкта ( $0 < \rho < 1$ ),  $D$  – діаметр апертури,  $\eta_{atm}$  і  $\eta_{sys}$  - атмосферні і системні коефіцієнти передачі (двосторонньої), відповідно, на частку яких припадають втрати поширення променя через оптику і

атмосферу. В рівнянні. (2.23), передбачається, що зворотна потужність лазерного випромінювання слідує розподілом Ламберта, а його величина змінюється пропорційно косинусу кута падіння променя.

Як вже було зазначено, що тільки частина від потужності лазера повертається до сканера. Рівняння (2.23) показує, що отримана потужність досить невелика частка від переданої потужності (зменшується в  $1/R^2$ ) і залежить від змін у цілі відображення (характеризуються  $\rho$ ). Через цей факт, динаміка отриманих імпульсів регулюється в тому, що часовий дискримінатор за допомогою автоматичного регулювання посилення (АРП), яка може бути реалізована за допомогою оптичного або електричного подільника потужності.

Електроніка приймача відкалібрована для запису потужності відбитого сигналу в певному діапазоні (між мінімальним і максимальним). Якщо потужність сигналу, відбитого від поверхні в межах цього діапазону, пристрій вимірювання часу буде зупинений в потрібний момент, а також відстань до поверхні буде записана правильно. Тим не менш, може статися, що потужність відбитого сигналу може бути за межами каліброваного діапазону, тобто занадто сильним або занадто слабким. Прикладом занадто сильного повернення сигналу відображення лазерного променя від високо відбиваючих поверхонь, таких як дорожні знаки, особливо на короткі відстані. У разі такого відображення, потужність відбитого сигналу буде більша, ніж очікувалося (одержувачем). В результаті, розрахунок часу буде зроблений занадто рано, і відстань записана в далекомір буде коротшою, ніж насправді. З іншого боку, якщо відбитий сигнал дуже слабкий, записана відстань буде більшою, ніж вона є.

Розрахунок часу зроблено по відношенню до певної точки на імпульсі, як правило, на передньому краї (зростаючої сторони) імпульсу, який має більшу крутизну, і може бути реалізований по-різному. Найпростіший варіант це постійне задання порогу, тобто вимірювання часу припиняється, коли рівень сигналу перевищує деякий заздалегідь визначений і фіксований поріг. Недоліком такого підходу є висока залежність вимірюного спектру відбиття на поверхні об'єкта, тобто занадто сильно відбитий сигнал може привести до дуже короткої відстані і навпаки,

через різницю в часі порогового проходження (Рис. 2.6). Ця проблема може бути вирішена за допомогою постійної частки дискримінації (ПЧД), метод, широко використовуваний у сучасних лазерних далекомірах, коли миттєвий поріг визначається виходячи з рівня сигналу. У (ПЧД), повернення імпульсу ділиться на дві частини: одна частина затримується, і поділ часу виконується при передньому і задньому фронті із затримкою і без затримки імпульсами, відповідно, перетинаючи на половині амплітуди точки імпульсу. Використання (ПЧД) компенсує тимчасові помилки, викликані змінами амплітуди і форми відбитого імпульсу (час проходження) і збільшує точність, починаючи з коефіцієнтом  $\sqrt{2}$ .

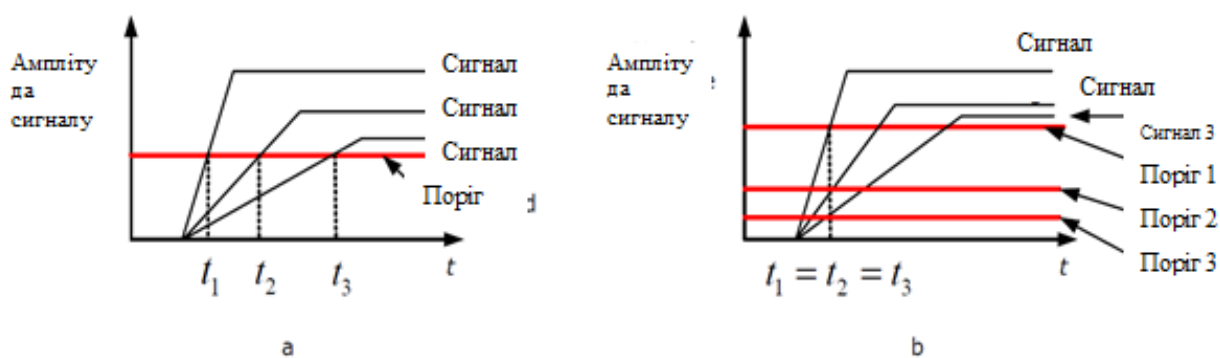


Рисунок 2.6. Принципи розрахунку часу лазерного імпульсного дальноміра. а) Спосіб постійного вибору порога, б) постійна частка дискримінації

## 2.5 Методи на основі ультразвукової ехолокації

Дані методи засновані на принципі ультразвукової ехолокації в повітряному середовищі. Контроль за допомогою ультразвукового пучка відбитого від поверхні дзеркала антени здійснюється електронною частиною пристрою, що дозволяє повністю автоматизувати процес вимірювання і дає можливість обробки результатів на ЕОМ. Принцип ультразвукової ехо-локації полягає в тому, що ультразвуковий імпульс від генератора (рис.2.7) відбивається від поверхні антени і попадає на приймач 2.

В залежності від специфіки виконання вимірювального приладу провірка на відповідність профілю дзеркала ідеальному може відбуватись за рахунок порівняння часу проходження імпульсу з теоретичним або по різниці фаз між випроміненим і прийнятим сигналом .

Цей метод дозволяє зробити процес контролю досить точним і продуктивним.

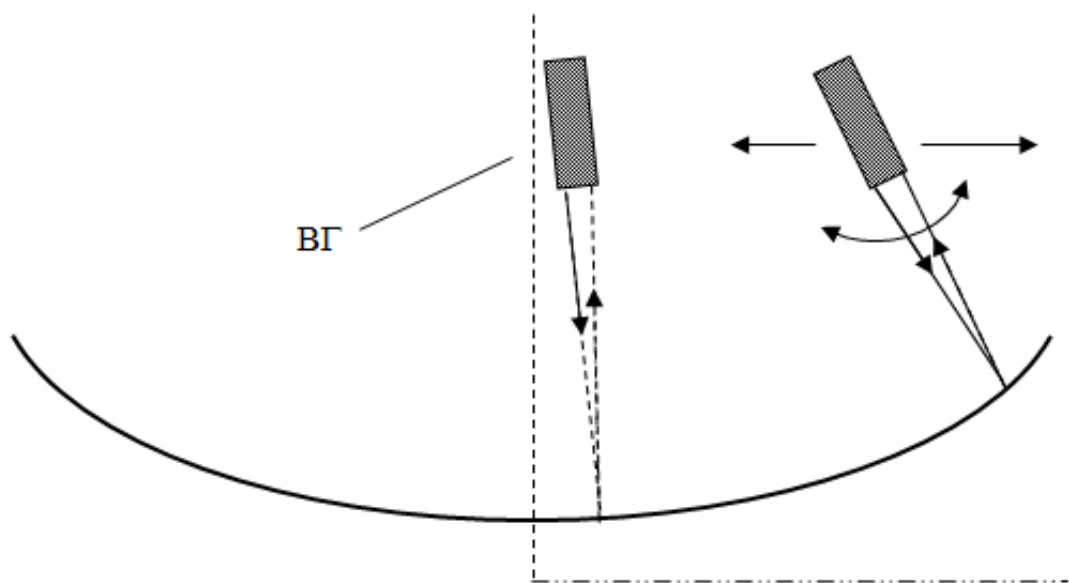


Рисунок 2.7 – Суміщений приймач-генератор

Є два варіанти реалізації даного принципу контролю. В першому з них (рис.1.8) генератор і приймач ультразвукових сигналів суміщені в один вимірювальний вузол. В процесі вимірювання вимірювальна головка, рухаючись від центру до краю антени , сканує поверхню неперервним ультразвуковим променем , направленим по нормалі до поверхні в даній точці, використовуючи для вимірювання принцип фазової модуляції. До переваг приладу побудованого на такому принципі відноситься висока точність вимірювання, отримання в кінці вимірювального циклу майже повної карти дефектних зон з визначенням не тільки координат дефектів, але й їх величини та точна оцінка більшості параметрів

відхилення профілю від ідеального. До недоліків цієї схеми відноситься складність системи керування нахилом вимірювальної головки та високі вимоги до точності виготовлення і жорсткості направляючих по яких пересувається каретка з вимірювальною системою. Крім того дана схема має високу чутливість до вібрації і потребує дуже точного базування дзеркала антени на обертальній системі. Цей принцип потребує створення складної електронної системи для контролю повороту вимірювальної головки і обробки результатів контролю .

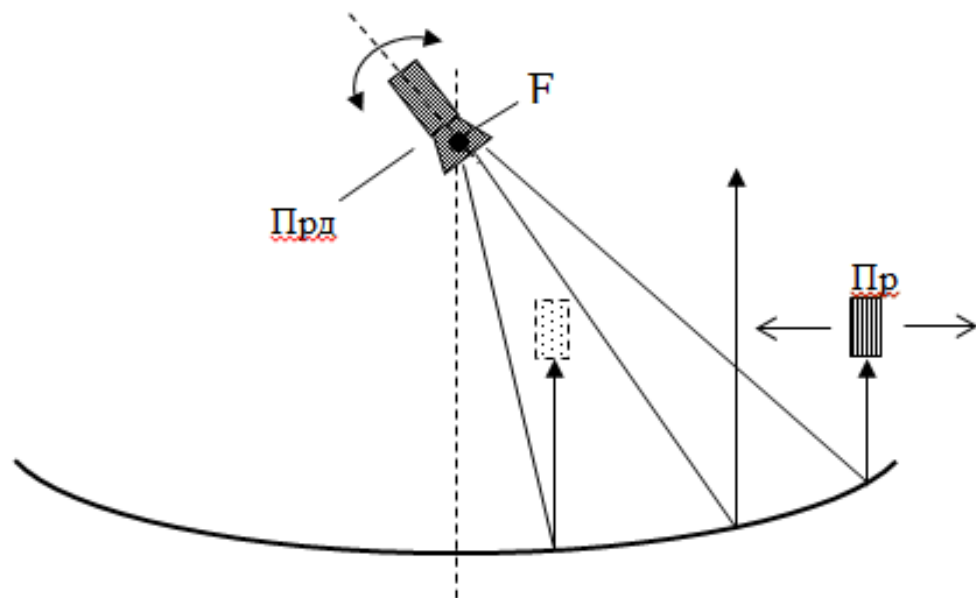


Рисунок 2.8 – Фокусна схема

Іншим варіантом є розміщення генератора ультразвуку в фокусі антени, промені, випущені ї, відбиваються від поверхні антени та йдуть паралельно її осі, так як основною властивістю параболічної антени є те, що паралельний пучок променів, направлених паралельно осі, падаючи на її поверхню відбиваються в одну точку. Датчик являє собою конструктивно суміщені приймач ультразвуку і рупор, який обмежує попадання ультразвукових променів на приймач. Датчик переміщується радіально від центру антени до її краю. Генератор видає короточасні ультразвукові імпульси, а електронна система обробки інформації

вимірює час проходження імпульсу. Так як датчик приймає тільки ті ультразвукові імпульси, які йдуть паралельно осі, то в місцях де є значні дефекти сигнал на приймач не проходить. Ця схема дозволяє скласти доволі детальну карту дефектних зон, але не дозволяє точно вимірювати величину відхилення базового профілю від ідеального. Цей метод не потребує дуже складної механічної частини та менш чутливий до зовнішніх впливів і точності базування ніж попередній .

## 2.6 Голографічний метод

Даний метод був використаний для вимірювання поверхні дзеркала радіотелескопа університету штату Техас при відтворенні розподілу поля в площині розкриву поблизу антени. Функціональна схема вимірювальної схеми показана на рис.7, де 1 – привід і кодування, 2 – двоканальний приймач, 3 – чотирьохступеневе перетворення частоти, 4 – чотири місцевих гетеродина, 5 – аналого-цифровий перетворювач на 15 біт, 6 – дисплей, 7 – інтерфейс, 8 – запис на стрічку, 9 – ЕОМ, 10 – апаратура Tektronics 4010, 11 – передавач. Приклади отриманого фазового розподілу показані на рис. 2.10.

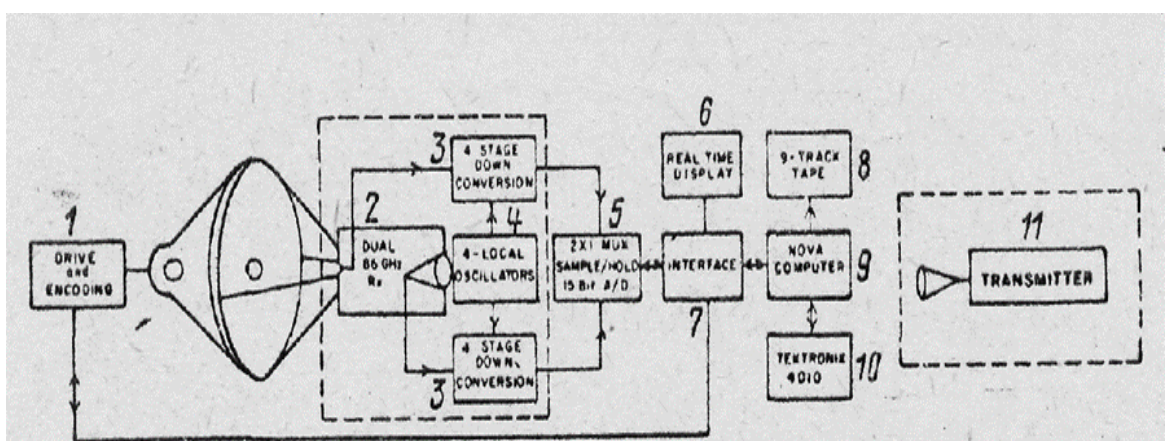


Рисунок 2.9 Функціональна схема вимірювальної установки.

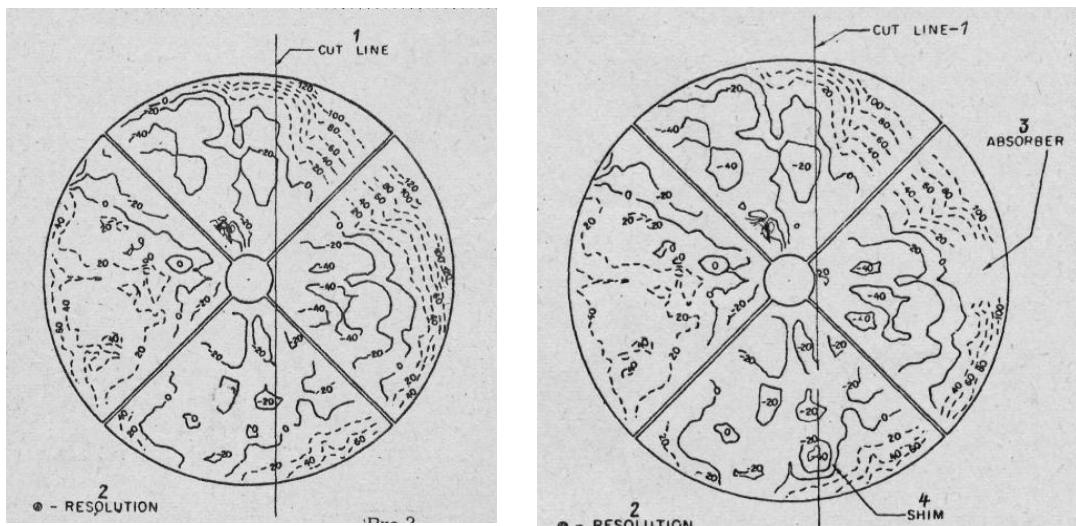


Рисунок 2.10 Приклади знятого фазового розподілу.  
1- лінія розрізу, 2 - роздільна здатність, 3 – поглинач

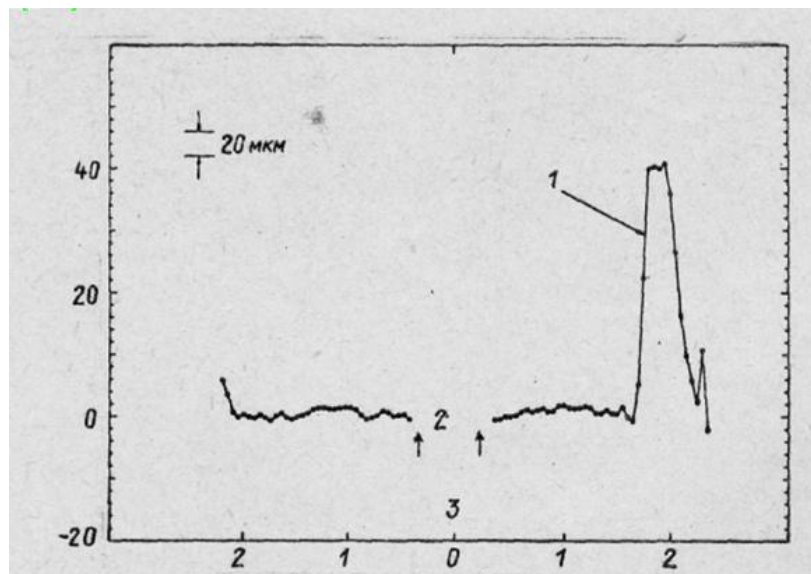


Рисунок 2.11 Розріз фазового розподілу по лінії  
1 – накладка, 2 – затемнення в центрі, 3 – центр антени



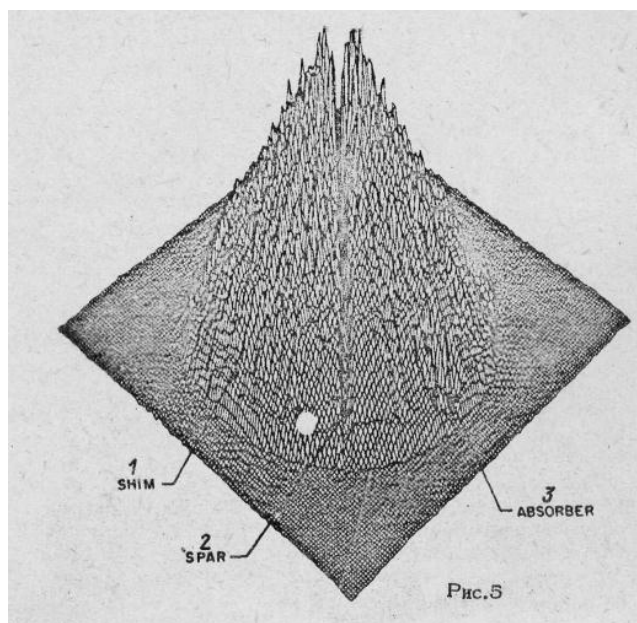


Рисунок 2.12 Приклад амплітудного розподілу. 1 - накладка, 2 - стійка, 3 – поглинач.



### 3 Науково-дослідницька частина

#### 3.1 Похибки лазерних далекомірів

Оскільки відстань є одною з основних величин для точного і якісного вимірювання, вона досить сильно впливає на точність вимірювання. В ході дослідження нижче, ми розглянемо окремо випадкові і систематичні похибки.

##### 3.1.1 Випадкові похибки

Випадкові похибки – це похибки, які постійно виникають при проведенні вимірювання і змінюються випадково навіть коли вимірюється одна і та ж величина.

Ці похибки в лазерних далекомірах визначають точність вимірювань відстаней імпульсного лазерного далекоміра, і можуть бути описані таким рівнянням:

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \cdot \sigma_t, \quad (3.1)$$

де  $c$  - швидкість світла в повітрі і  $\sigma_t$  - тремтіння зображення в момент часу, яке дорівнює

$$\sigma_t = \frac{\sigma_n}{dU / dt}. \quad (3.2)$$

Тут  $\sigma_n$  середньоквадратична амплітуда шуму на вході дискримінатора часу, а  $dU / dt$  є відхилення імпульсу синхронізації в момент часу, який може бути апроксимований відношенням амплітуди сигналу до тривалості часу наростання імпульсу  $t_{rise}$ :

$$dU / dt \approx \frac{U_s}{t_{rise}}. \quad (3.3)$$

Таким чином, можна записати вираз для точності визначення відстані так:

$$\sigma_r \approx \frac{c}{2} \cdot \frac{\sigma_n \cdot t_{rise}}{U_s} = \frac{c}{2} \cdot \frac{t_{rise}}{SNR}, \quad (3.4)$$

Де

$$SNR = \frac{U_s}{\sigma_n} \quad (3.5)$$

Це відношення сигнал-шум імпульсу виявлення. Якщо відстань обчислюється шляхом усереднення  $n$  незалежних вимірювань, діапазон точності буде розраховуватися таким чином:

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \cdot \frac{t_{rise}}{SNR \sqrt{n}}. \quad (3.6)$$

Можливість провести кілька вимірів відстані до тієї ж точки присутня в деяких імпульсних сканерах, наприклад, Mensi GS 100. Час тремтіння показано на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 Часове тремтіння (jitter).

Як впливає з рівняння. (3.4), точність визначення відстані залежить від SNR, яка, в свою чергу, залежить від цілого ряду чинників, які описані нижче. Значення SNR для імпульсного лазерного далекоміра:

$$SNR = \frac{i_{SIG}^2}{i_{SN}^2 + i_{BK}^2 + i_{TH}^2 + i_{DK}^2}, \quad (3.7)$$

де  $i_{SIG}^2$  - середньо квадратичний сигналу струму, який пропорційний отриманій потужності лазера і в знаменнику середній квадрат струму шуму в результаті наступних основних джерел:

- 1 Сигнало-індукований (також називають квантовий або Пуассона) шум,  $i_{2SN}$  - в результаті отриманого сигналу, що надходить на детектор.

- 2 Фон викликаних шумом,  $i2BK$  - небажані відбиття сигналу від землі, атмосфери, джерела перешкод поблизу об'єкта або будь-якого іншого джерела. Якщо поверхня об'єкта сканування має високу температуру.
- 3 Тепловий або приймач Джонсона, шум в приймачі,  $i2TH$  - в результаті теплових флуктуацій електронів в електроніці.
- 4 Темний шум струму в детекторі,  $i2DK$  - "витік" струму за відсутності падаючого випромінювання, викликаний внутрішньою структурою детектора.

Фактори, що впливають на SNR імпульсного лазерного далекоміра зі сторони приладу наведені нижче:

- 1) Потужність прийнятого сигналу лазера, який визначає надійність вимірної відстані, і в свою чергу, залежить від багатьох факторів.

Фактори пов'язані з приладом, наведені нижче:

- Передана потужності лазерного випромінювання;
- Діаметр апертури приймача (чим вона більша, тим більша прийнята потужність, і SNR);
- Відстань до об'єкта (обмежена, зокрема, граничною дальністю дії сканера);
- Відстань до об'єкта (обмежена, зокрема, граничною дальністю дії сканера);
- Тривалість імпульсу. Це пов'язано з тим, що для даної лазерної енергії, потужність імпульсу (як відправленого так і отриманого) зростає зі зменшенням ширини імпульсу, і похибка виявлення імпульсу зменшується.

Різноманітні втрати в процесі вимірювання:

- Втрати передачі та прийому, коли лазерний промінь проходить через оптичну систему (передавачі і приймачі оптики, захисна кришка з вікна сканування і т.д.);
- Приймач/процесор втрати, що виникають коли оптичний сигнал був перетворений в електричний струм, наприклад, втрати через тепловий

шум попереднього підсилювача;

- Обрізання втрати, пов'язані з обрізанням лазерних пучків діафрагми.

## 2) Характеристики приймача:

- Чутливість детектора на виявленій довжині хвилі - ефективність повернутого прийнятого сигналу, яка описується відношенням діючого значення струму з детектора потужності падаючого на детектор RMS. Таким чином, описує ефективність перетворення світлової енергії в електричний струм;
- Здатність до виявлення випромінювання

$$D^* = \frac{A^{1/2}}{NEP}, \quad (3.8)$$

де  $D^*$  - здатність до виявлення випромінювання,  $A$  - площа детектора, і  $NEP$  - еквівалентна потужності шумів, тобто потужність випромінювання вироблена сигналом напруги, рівна напрузі шуму від детектора. Чим вище  $D^*$ , тим кращий детектор для виявлення слабкого сигналу при наявності шуму;

- Детектор розміру, до яких  $NEP$  пропорційний;
- Діапазон робочих частот приймача. Збільшення смуги пропускання приймача за зменшить  $SNR$ ;
- Опір навантаження детектора, для якого величина теплових шумів обернено пропорційна.

Слід згадати, про ще одну випадкову похибку, через розбіжність лазерного променя. Це невизначеність в кутовому розташуванні вимірювача відстані в межах зони охоплення лазера на поверхні об'єкту. Очевидне розташування вздовж центральної лінії випромінювання, але реальна точка може бути розташована в будь-якому місці в межах лазерного сліду. Стандартне відхилення на похибку позиціонування, пов'язаного з шириною променя становить:

$$\sigma_{beam} = \pm \frac{\gamma}{4}, \quad (3.9)$$

де  $\gamma$  є розбіжність пучка. Таким чином, похибки цілком незначні тільки одна чверть розбіжності лазерного променя і будуть менш значними для сканерів з хорошим фокусуванням пучка.

### 3.1.2 Систематичні похибки

Систематичні похибки – це похибки які постійно залишаються або змінюються при перших чи повторних вимірюваннях. В більшості випадків ці похибки виникають при неправильному чи неточному вимірюванні, похибкою вимірювального приладу тощо.

Систематичні похибки обмежують точність, яка може бути досягнута з імпульсними лазерними далекомірами. Відзначимо деякі фактори, від яких точність багато в чому залежить

- Можливість вибору тієї ж відносної позиції на переданих та отриманих імпульсах. Це в основному під впливом наростання отриманих імпульсів. Час наростання не залежить від тривалості імпульсу, але залежить від довжини хвилі падаючого світла і опору навантаження детектора.
- Точність лічильників проміжків часу і їх стабільність.

### 3.1.3 Відхилення часового кроку

Відхилення часового кроку у зв'язку із змінами в імпульсі синхронізації амплітуди і форми, які, в свою чергу, залежить від відбивної здатності поверхні об'єкта сканування (рис. 3.2). Зміни амплітуди імпульсів часу особливо значні в лазерного сканування у зв'язку зі швидкою зміною коефіцієнта відбиття, як промінь

пробігає по цілі. Відхилення часового кроку викликані зміною амплітуди і часу наростання імпульсу може бути компенсований при використанні (ПЧД).

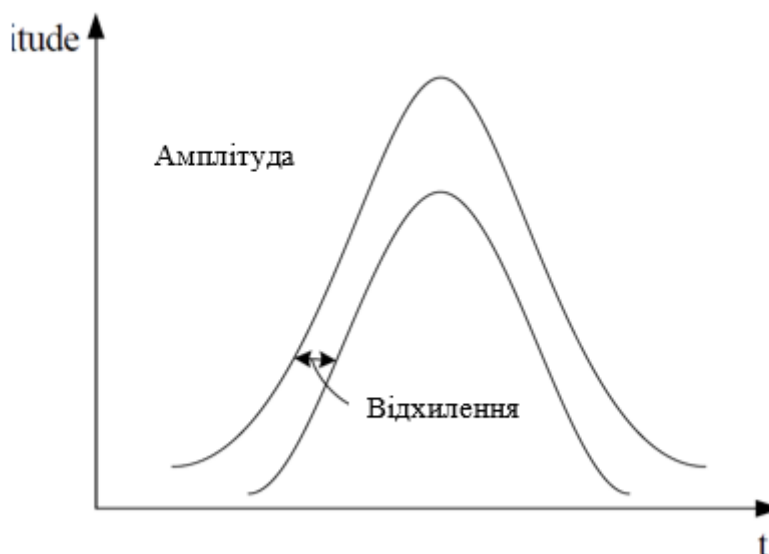


Рисунок 3.2 Відхилення часового кроку.

### 3.1.4 «Змішування пікселів»

"Змішування пікселів" представляють собою особливо серйозну проблему, яка часто розглядається в публікаціях з TLS. Воно представляє зміщення у відстані країв вимірюваного об'єкта. Через розбіжності лазерного променя, якщо лазерний промінь падає на край об'єкта, одна частина його відбивається від поверхні об'єкта, а інша - від поверхні об'єкта за неї (іноді на великій відстані) або не зовсім (якщо немає об'єкта за межами робочого діапазону сканера)(рис 3.3). Якщо відстань між двома поверхнями, складає менше половини ширини імпульсу (в метрах), приймач не може розрізнити імпульси відбиті з обох поверхонь. Тому відстань обчислюється шляхом інтегрування відстаней до точки від обох поверхонь. Остаточна відстань не на якісь поверхні, а десь між ними. Очікувана похибка може варіювати від часток міліметра до декількох дециметрів.

Таким чином, лазерний сканер виробляє багато помилкових точок в безпосередній близькості від краю, що ускладнює моделювання хмар точок. У

зв'язку з цим, ЛСП як і раніше поступається цифровій фотограмметрії. Очевидно, що проблема «змішаних пікселів» властива ЛСП, і не може бути повністю усунена. Можливо, найкращий спосіб подолати це вибрати лазерний випромінювач з малим розходженням променя. Похибку, пов'язану зі «змішаними пікселями» можна розглядати як грубу похибку.

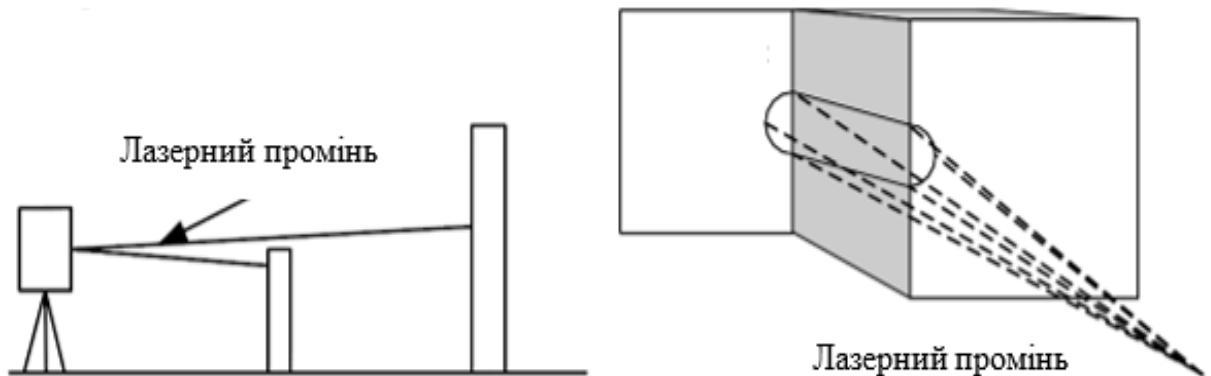


Рисунок 3.3. Ліворуч: похибка «змішаних пікселів», вид збоку. Справа: ефект лазерного сліду, що падає на край об'єкту.

### 3.2 Графічне оформлення результатів отриманих при вимірюванні лазерним сканером

Промодельюємо роботу сканера на кожному кроці

Спочатку за допомогою лазера випромінюється синусоїдальний сигнал сталої частоти. Приймач-камера знімає зображення і проводиться пошук лазерного сліду на отриманому зображенні. Далі відбувається обрахунок меж сліда і обчислення діаметра лазерного сліду (рис. 3.5). Обчислюється значення відхилення фаз (рис. 3.4). Розраховуються координати точки відносно сканера. Координати точки вносяться в хмару точок (рис. 3.5). Хмара точок порівнюється з еталонною моделлю. Значення відхилень від еталонної поверхні дзеркала антени виводяться в графік (рис 3.9).



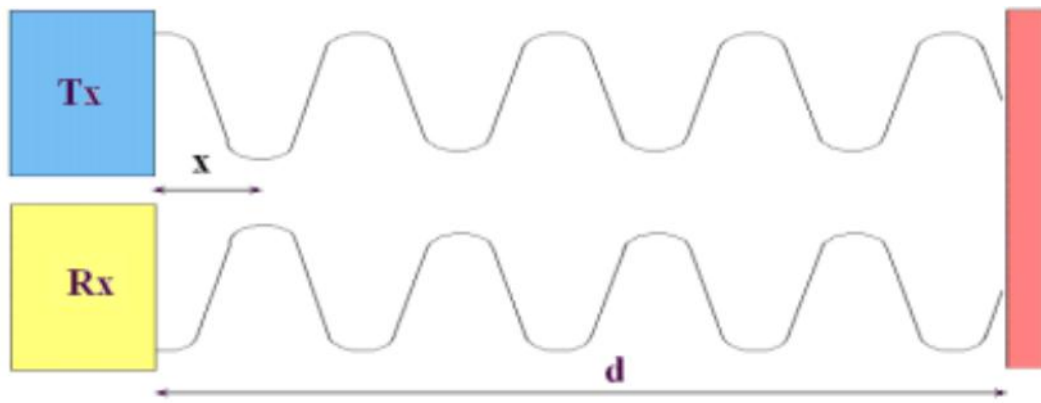


Рисунок 3.4 Різниця фаз випромінюваного і прийнятого сигналу

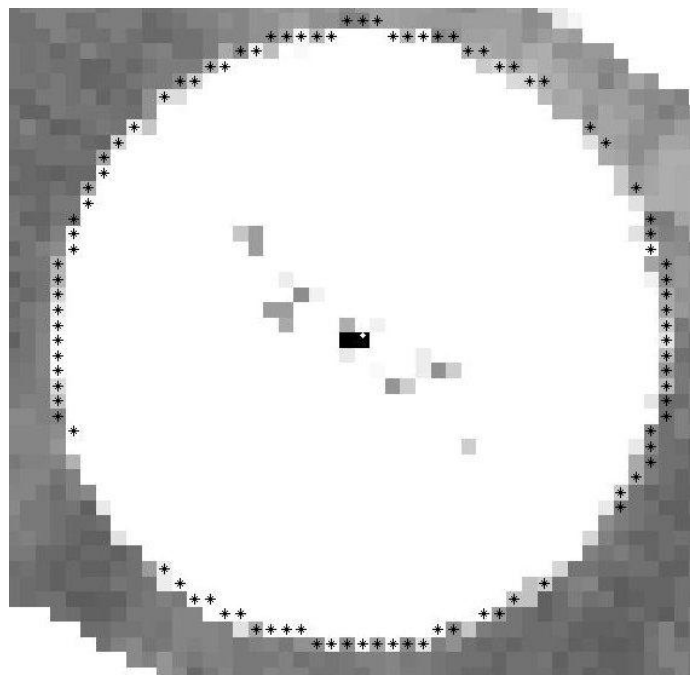


Рисунок 3.5. Виділення меж лазерного сліда

Для початку роботи, за допомогою програмного забезпечення лазерно-вимірювального пристрою виділяємо крайні точки об'єкту сканування. На рис. 3.5 вони показані чорними зірочками які розміщені на об'єкті, в нашому випадку це дзеркало антени.

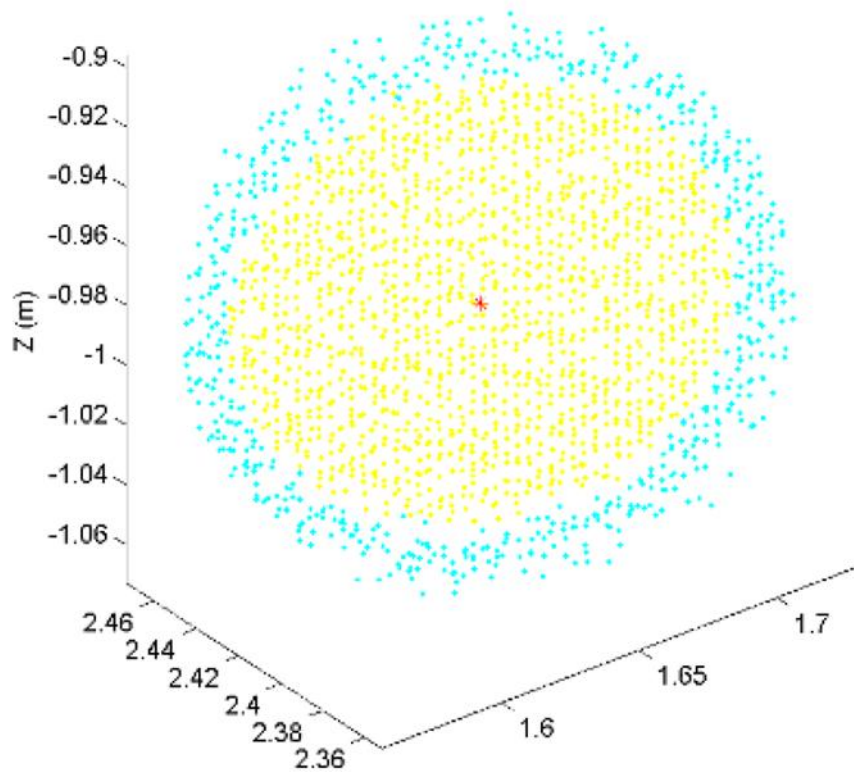


Рисунок 3.6. Хмара точок отриманих зі сканера.

На рис.3.6 ми бачимо вже скановані координатні точки об'єкту, за допомогою, які в подальшому нам дозволяють більш детально дослідити об'єкт сканування.

Для подальшого дослідження і аналізування результатів сканування ми будемо використовувати середовище Matlab Simulink.

За допомогою цієї хмари точок ми можемо змоделювати еталону поверхню дзеркала антени, яка нам дозволить більш детально дослідити і порівнювати діючі рефлектори антен, які застосовуються в АС. Приклад змодельованої еталонної поверхні профілю антени показано на рис.3.7.

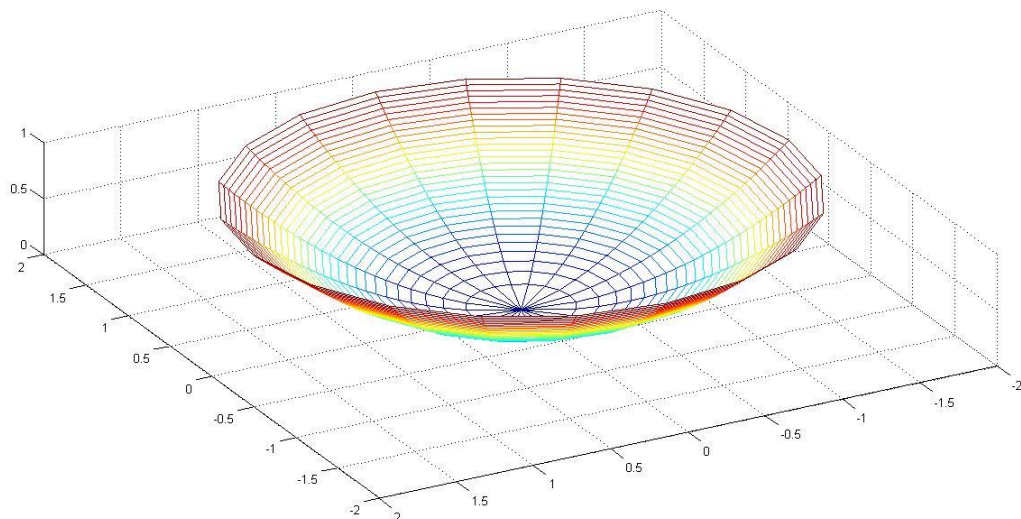


Рисунок 3.7 Еталонна поверхня профілю антени змодельована в програмі Matlab.



Рисунок 3.8 Приклад сканування рефлектора антени.

Для прикладу порівняння з розробленою еталонною моделлю було проведено сканування рефлектора антени.

За допомогою програми Matlab була змодельована поверхня сканованого рефлектора антени для розроблення карти відхилення (рис.3.9) для точнішого аналізу і дослідження проблем АС.

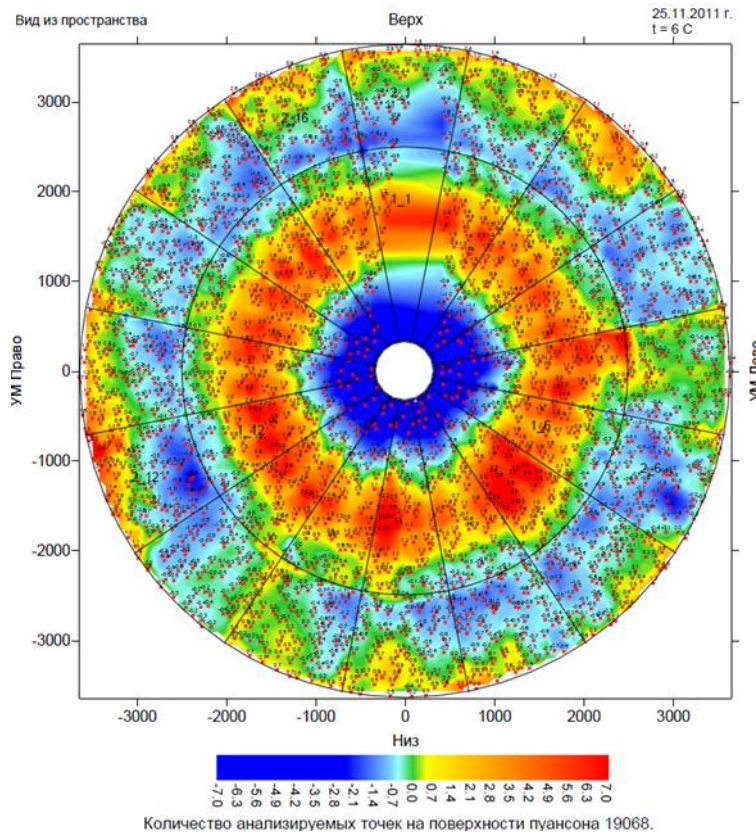


Рисунок 3.9 Карта відхилень поверхні рефлектора антени від еталону.

Карта відхилень поверхні рефлектора антени від еталону дозволяє нам візуально оцінити проблемні ділянки на, яких відбуваються втрати сигналу. За допомогою цих досліджень ми можемо більш точно оцінювати якість приймаючого сигналу і його втрати.

Якість поверхні рефлектора антени є одною із основних характеристик для побудови діаграми направленості антени. Діаграма направленості антени - графічне представлення залежності коефіцієнта посилення антени або коефіцієнта спрямованої дії антени від напрямку антени в заданій площині .

При поєднанні діаграми направленості і карти відхилень ми можемо більш точно визначити розміри сліпої зони сигналу антени.

### 3.3 Сканування поверхні рефлектора РТ-32 за допомогою тахеометра Topcon IS-301

Проведення сканування поверхні рефлектора антени РТ-32 було реалізовано за допомогою тахеометра Topcon IS301. Основні технічні характеристики показано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 основні технічні характеристики

<b>Точність вимірювання</b>	
Точність вимірювання відстані без відбивача	До 250м ± 3мм До 2000м ±10мм+10 ppm
Точність вимірювання по одній призмі	± 2 мм+2 ppm
Точність вимірювання кута	1"
<b>Діапазон вимірювання</b>	
Діапазон виміру відстані без відбивача	1,5 м – 250 м 5 м -2000 м
Діапазон виміру відстані на одній призмі	3000м
<b>Властивості камери</b>	
Роздільна здатність камери	1,3 Мп
Збільшення	30х
Швидкість зйомки	15 кадрів в сек.
<b>Сканування</b>	
Дальність сканування	Від 150м до 1200м
Швидкість сканування	20 т/сек. (1 точка 1-12сек. В залежності від відстані)
Стандартне відхилення точок сканування	5 мм





Рисунок 3.11 Вигляд тахеометра Topcon IS301

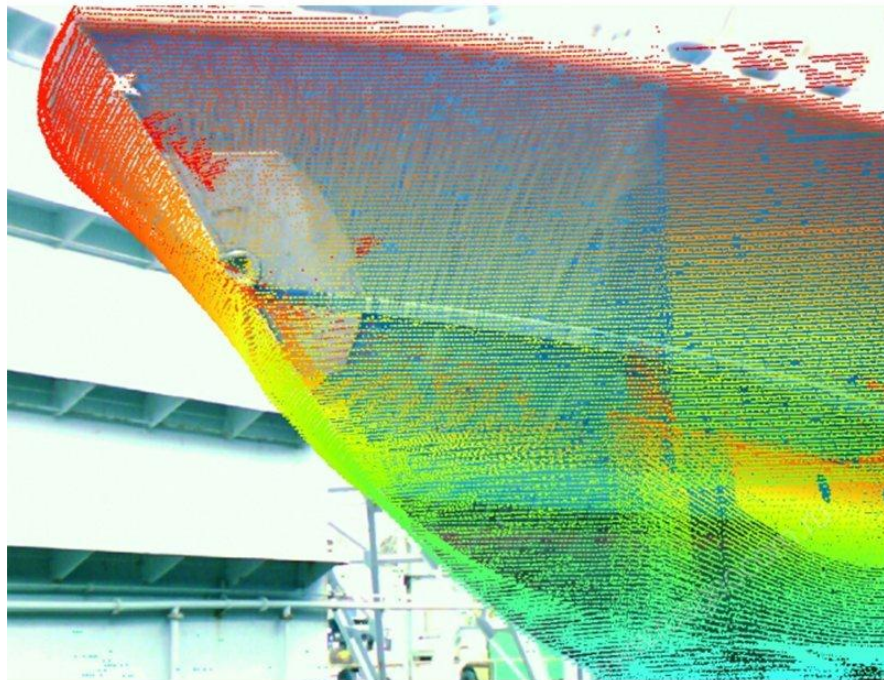


Рисунок 3.12 Приклад сканованої поверхні тахеометром Topcon IS301



Рисунок 3.13 Сканування поверхні рефлектора АС за допомогою тахеометра  
Topcon IS-301

З метою виявлення відхилення поверхні рефлектора АС від параболоїда при впливі власної ваги проведено сканування та аналіз поверхні рефлектора при різних кутах нахилу за допомогою тахеометра із відповідною функцією автоматичного сканування. Сканування проходило зліва на право та зверху вниз рівномірними галсами з різним кроком. Точка О – головна точка тахеометра – перехрестя горизонтальної та вертикальної осі.

Формат отриманих даних з тахеометра показано в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 дані тахеометра сканованої поверхні рефлектора

X	Y	Z	I	R	G	B
1047.740000	484.137000	535.305000	0.000000	51	153	204
1047.683000	483.976000	535.303000	0.000000	51	153	204
1047.628000	483.821000	535.302000	0.000000	51	153	204
1049.479000	490.196000	534.966000	0.000000	51	153	204
1049.509000	490.362000	534.964000	0.000000	51	153	204
1049.520000	490.532000	534.949000	0.000000	51	153	204

де, XYZ – Просторові координати (у даному випадку умовні)

I – інтенсивність; RGB – колір

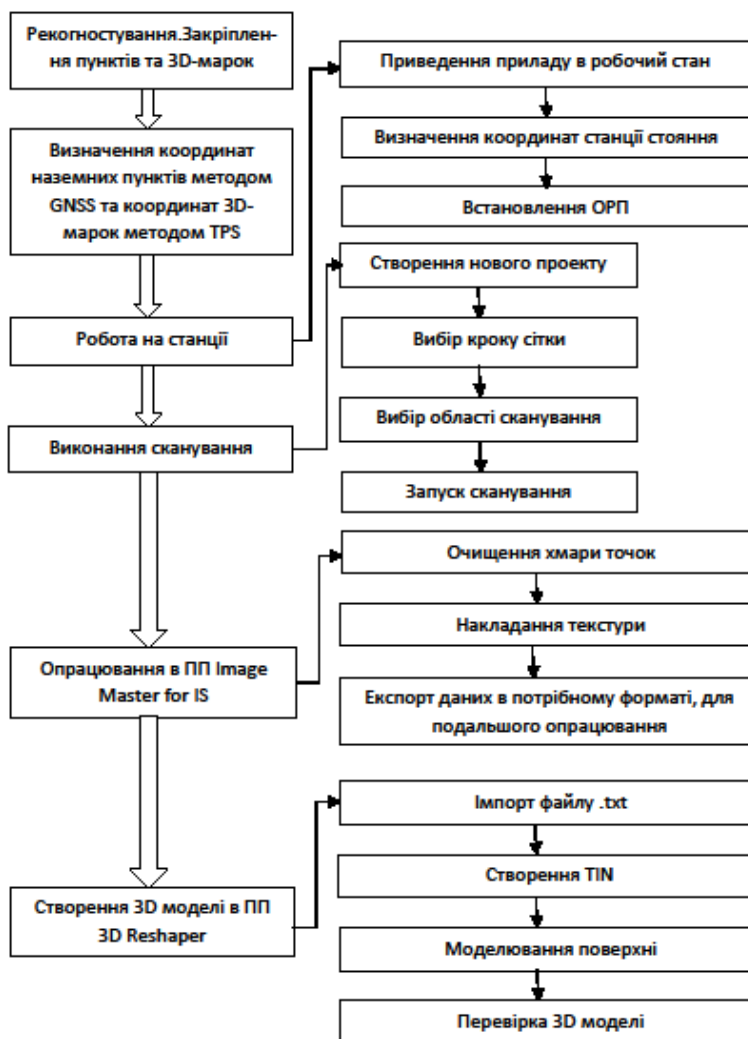


Рисунок 3.14 Блок-схема алгоритму сканування поверхні і опрацювання даних



Згідно з блок-схемою алгоритму (рис.3.14), виконуємо наступні дії: Встановивши прилад у робочий стан, визначаємо положення його головної точки (перетин вертикальної та візирної осі) функцією «оберненої засічки» (рис.3.15 а) від пунктів, визначених методом GNSS

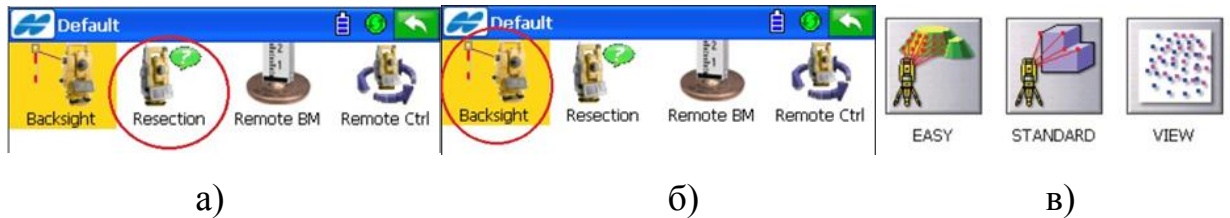
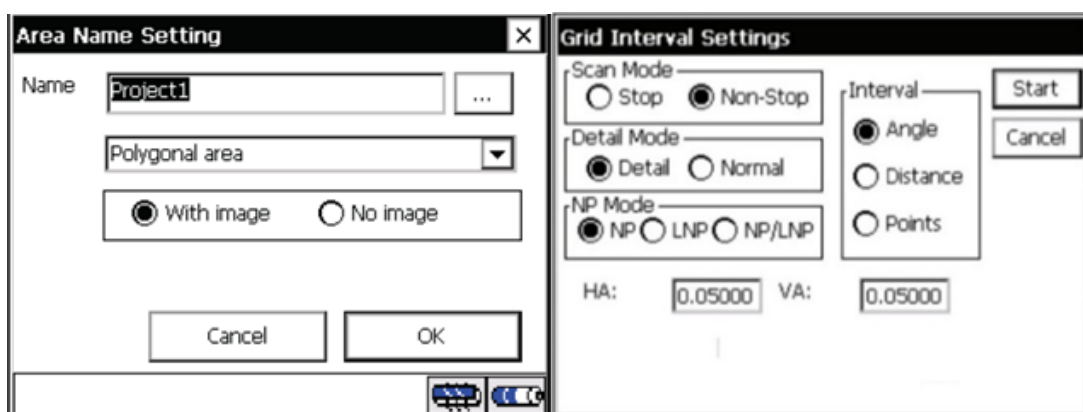


Рисунок 3.15 а) Функція «обернена насічка», б) Функція «ОРП», в) Функція «Сканування»

Далі виконуємо орієнтування приладу (рис.3.15 б), щоб у подальшому координати визначалися правильно. Визначивши координати і точку орієнтування, перейдемо до функції «Сканування» (рис.3.15 в). Вказуємо характеристики сканування: тип області, метод вимірювання відстані, крок сканування (горизонтальний і вертикальний). Тип області сканування залежить від об'єкта. В заданому дослідженні вибирали тип області – полігон і визначали межі об'єкта сканування (рис. 3.16 а).



а)

б)

Рисунок 3.16 Вибір типу області (а) та вибір характеристики сітки (б)

Вказуємо характеристики сітки – деталізований режим (Detail), та нормальне вимірювання відстані (NP), крок сітки вибираємо за кутом (Angle) – 0,050 (рис. 3.16 б).

Крок сітки вибирають залежно від бажаної точності об'єкта, відстані до об'єкта, а також бажаної точності сканування. Для забезпечення деталізації моделі, крок сітки у кутовій мірі можна обчислити за формулою 3.1.

$$R^0 = \arctan \frac{R_{\text{мм}}}{d_{\text{мм}}}, \quad (3.1)$$

де  $R_{\text{мм}}$  – деталізація у міліметрах,  $d_{\text{мм}}$  – віддаль до об'єкта.

Запускаємо сканування по сітці. Середній час сканування на станції 1,5 год. Після завершення роботи експортуємо дані для подальшого опрацювання. Створення 3D моделі виконано у двох програмних пакетах Image Master for IS та 3D Reshaper. Детальніше алгоритм опрацювання наведено нижче.

### 3.4 Опрацювання у програмі Image Master for IS

Програма «Image Master for IS» дає змогу виконувати все, від бездротового керування вимірюваннями до створення 3D, за допомогою стереопар.

Робота в прграмі «Image Master for IS» розпочалася з створення нового проекту і імпорту п'ятох файлів TopSURV Scanning File(T), які містять хмари точок.

Зшивання отриманих хмар точок відбувається автоматично. Завантаживши хмару точок, почали її очищувати від зайвих об'єктів. Отримана хмара зображена на рис. 3.17.

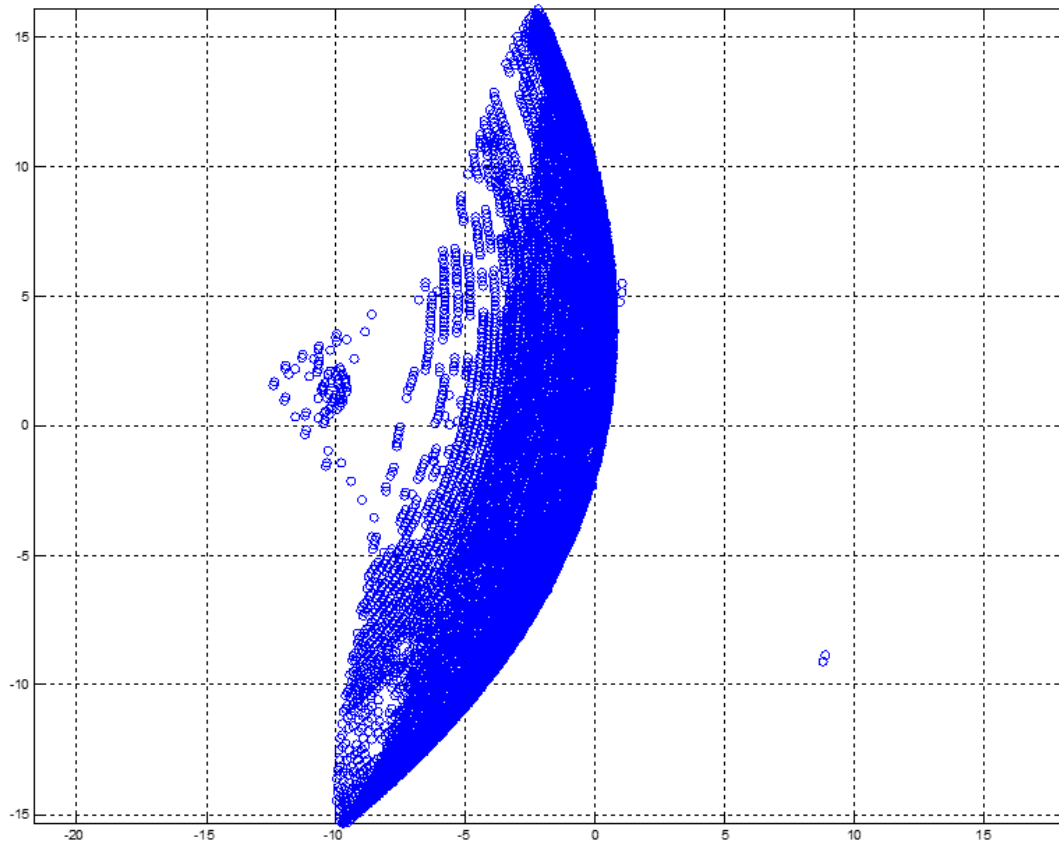


Рисунок 3.17 Зразок відсканованої сканером Topcon IS301  
поверхні рефлектора

### **3.5 Методика контролю поверхні рефлектора в робочому режимі з використанням електронного тахеометра**

Оскільки виміри позицій на поверхні рефлектора подані в системі координат, прив'язаній до вимірювального пристрою, не дозволяють отримати безпосередню оцінку відхилень його форми від допустимої. Одним із варіантів є перерахунок вимірних значень до системи координат, прив'язаної до досліджуваної поверхні. Проте даний підхід виходить із того що наперед відомі координати чотирьох контрольних позицій, виміряні в системах координат вимірювального пристрою і поверхні відповідно. Його застосування доцільніше для контролю поверхні рефлектора підчас виготовлення чи монтажу і може бути утруднено підчас безпосередньої експлуатації для оцінки біжучих деформацій робочої поверхні.

В цьому випадку для оцінки відхилень форми рефлектора при його довільному положенні в робочому режимі від параболоїда запропоновано наступний алгоритм опрацювання даних вимірювання. Нехай в процесі контролю в декартовій системі координат, прив'язаній до вимірювального пристрою, виміряно координати  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  позицій. В загальному випадку оптимально наближеною до них параболічною поверхнею буде апроксимована за методом найменших квадратів за формулою

$$z = a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + a_{11}xy + a_{10}x + a_{01}y + a_{00}. \quad (3.2)$$

Вектор коефіцієнтів

$$C = \begin{bmatrix} a_{20} \\ a_{02} \\ a_{11} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ a_{00} \end{bmatrix}$$

знаходимо як  $C = A^{-1}B$ , де

$A$

$$= \begin{bmatrix} \sum_1^N x_i^4 & \sum_1^N x_i^2 y_i^2 & \sum_1^N x_i^3 y_i & \sum_1^N x_i^3 & \sum_1^N x_i^2 y_i & \sum_1^N x_i^2 \\ \sum_1^N x_i^2 y_i^2 & \sum_1^N y_i^4 & \sum_1^N x_i y_i^3 & \sum_1^N x_i y_i^2 & \sum_1^N y_i^3 & \sum_1^N y_i^2 \\ \sum_1^N x_i^3 y_i & \sum_1^N x_i y_i^3 & \sum_1^N x_i^2 y_i^2 & \sum_1^N x_i^2 y_i & \sum_1^N x_i y_i^2 & \sum_1^N x_i y_i \\ \sum_1^N x_i^3 & \sum_1^N x_i y_i^2 & \sum_1^N x_i^2 y_i & \sum_1^N x_i^2 & \sum_1^N x_i y_i & \sum_1^N x_i \\ \sum_1^N x_i^2 y_i & \sum_1^N y_i^3 & \sum_1^N x_i y_i^2 & \sum_1^N x_i y_i & \sum_1^N y_i^2 & \sum_1^N y_i \\ \sum_1^N x_i^2 & \sum_1^N y_i^2 & \sum_1^N x_i y_i & \sum_1^N x_i & \sum_1^N y_i & N \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \sum_1^N x_i^2 z_i \\ \sum_1^N y_i^2 z_i \\ \sum_1^N x_i y_i z_i \\ \sum_1^N x_i z_i \\ \sum_1^N y_i z_i \\ \sum_1^N z_i \end{bmatrix}$$

Через послідовні заміни змінних (перетворення систем координат)  $x' = x$  –Рисунок 3.18 Зразок апроксимованої та відтвореної за вимірюваними даними поверхонь

Етапи опрацювання результатів вимірювання поділяються на дві частини :

- Приведення відсканованої поверхні рефлектора до канонічної форми;
- Апроксимація поверхні параболоїдом за методом найменших квадратів (рис. 3.19);
- Оцінка відхилень поверхні від еталонної (рис. 3.19)

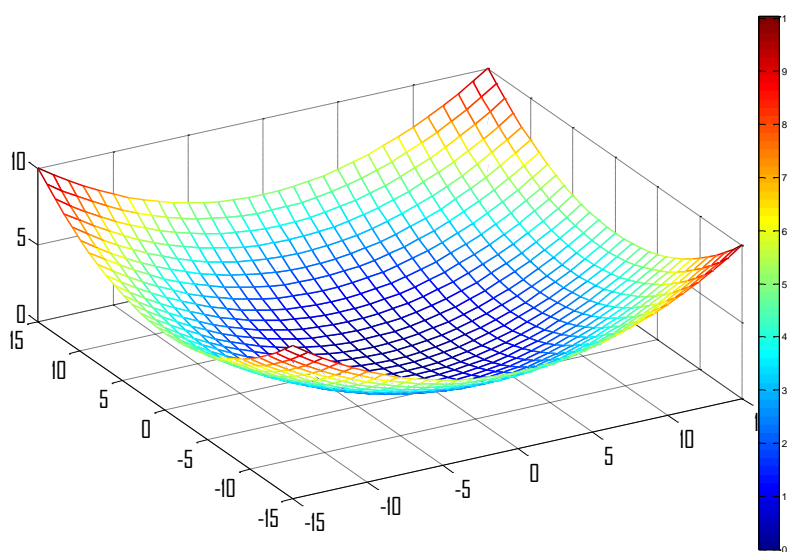


Рисунок 3.19 Апроксимація поверхні параболоїдом за методом найменших квадратів

## **4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях**

### **4.1 Державний пожежний нагляд**

В населених пунктах та на об'єктах незалежно від форм власності здійснюється державний пожежний нагляд. Основним завданням державного пожежного нагляду є контроль за дотриманням вимог державних стандартів, правил пожежної безпеки в процесі проектування, будівництва, реконструкції та експлуатації промислових об'єктів, а також виявлення та усунення причин, що спричиняють пожежі та створюють загрозу життю або здоров'ю людей.

Відповідно до своїх посадових обов'язків органи Державного пожежного нагляду проводять технічне розслідування обставин та причин пожежі, загибелі або травмування людей, знищення або пошкодження матеріальних цінностей. Вони діють відповідно до Закону «Про пожежну безпеку» та Положення про ці органи.

Також органи державного пожежного нагляду виконують такі задачі:

- розробляють і затверджують загальнодержавні правила пожежної безпеки, які є обов'язковими для всіх підприємств, установ, організацій та громадян;
- погоджують норми та проекти державних і галузевих стандартів, що стосуються забезпечення пожежної безпеки;
- встановлюють порядок опрацювання і затвердження положень з питань пожежної безпеки, що діють на підприємстві, в установі та організації, розробляють типові документи з цих питань;
- здійснюють контроль за додержанням вимог актів законодавства з питань пожежної безпеки керівниками центральних та місцевих органів державної виконавчої влади, установ, а також громадянами;

Посадові особи органів Державного пожежного нагляду є державними інспекторами з пожежного нагляду. Їх обов'язки:

- здійснювати контроль за виконанням протипожежних вимог;

- притягати до адміністративної відповідальності посадових осіб, винних у порушенні вимог пожежної безпеки;
- застосовувати штрафні санкції.

#### **4.2 Пожежна профілактика при проектуванні і експлуатації промислових об'єктів**

Пожежна профілактика - комплекс інженерно-технічних і організаційних заходів, спрямованих на забезпечення протипожежного захисту об'єктів народного господарства. Метою пожежно-профілактичної роботи є підтримання в країні високого рівня пожежної безпеки в містах, населених пунктах, місцях концентрації матеріальних цінностей і на об'єктах народного господарства шляхом приведення їх у зразкове протипожежний стан.

Основними завданнями профілактичної роботи є: розробка і здійснення заходів, спрямованих на усунення причин, що можуть спричинити виникнення пожеж; обмеження поширення можливих пожеж та створення умов для успішної евакуації людей і майна на випадок пожежі; забезпечення своєчасного виявлення виниклої пожежі, швидкого виклику пожежної охорони та успішного гасіння пожежі.

Профілактична робота на об'єктах включає; періодичні перевірки стану пожежної безпеки об'єкта в цілому і його окремих ділянок, а також забезпечення контролю за своєчасним виконанням запропонованих заходів; проведення пожежно-технічних обстежень об'єкта представниками Державного пожежного нагляду з врученням приписів, встановлення дієвого контролю за виконанням приписів та наказів, виданих по них; постійний контроль за проведенням пожежно небезпечних робіт, виконанням протипожежних вимог на об'єктах нового будівництва, при реконструкції та переобладнанні цехів, установок, майстерень, складів та інших приміщень; проведення бесід-інструктажів та спеціальних занять з робітниками і службовцями об'єкта з питань пожежної безпеки (а також з тимчасовими робітниками інших підприємств і організацій, які прибули на об'єкт)

та інших заходів з протипожежної пропаганди та агітації; перевірку справності і правильного змісту стаціонарних автоматичних і первинних засобів пожежогасіння, протипожежного водопостачання та систем сповіщення про пожежі; підготовку особового складу добровільних пожежних дружин та бойових розрахунків для проведення профілактичної роботи та гасіння пожеж і загорянь; установку в цехах, майстернях, складах і на окремих агрегатах систем пожежної автоматики.



## ВИСНОВОКИ

Випромінювання дзеркальних антен сильно залежать від точності їх поверхні. Таким чином, виявлення стану і кількість поверхневих спотворень є ключовим для контролю рефлектора антени. Екологічні причини, механічні деформації через позиціонування антени і зміна гравітаційних навантажень із напрямом антени змінюється, можуть призвести до зниження точності поверхні і, як наслідок, ККД антени. Таким чином, поверхня дзеркала має періодично перевірятися, щоб забезпечувати потрібну точність поверхні.

Було досліджено багато запропонованих різних методів для вимірювання поверхні рефлектора. Ці методи можна розділити на прямі і зворотні методи вимірювання. Перші вимірювання поверхні дзеркала відбувались за допомогою механічних або оптичних вимірювальних систем.

В даній роботі розглянуто відомі сучасні методи вимірювання форми дзеркала антенних систем, проведено аналіз існуючих рішень у вигляді пристроїв для отримання карти поверхні рефлектора. Були виконано ряд таких задач як:

- Проведений аналіз літератури, який показав, що більшість публікацій присвячена вибору конструктивних параметрів рефлектора.
- Проведений аналіз існуючих пристроїв для вимірювання рефлектора антен;
- Огляд існуючих методів контролю профілю дзеркальних антен;
  - Оптично–механічних;
  - Метод на основі ультразвукової ехолокації;
  - Голографічний.
- Дослідження похибок лазерних далекомірів;
- Лазерне сканування дзеркала антени і оформлення результатів;
- Моделювання поверхні профілю антени у Matlab з отриманих результатів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Белянский П.В. Методы измерения профиля отражающей поверхности больших наземных и космических антенн / П.В. Белянский, Г.А. Терехова // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – №2. – С. 68 – 84.
2. Поляк В.С. Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов: Опыт создания, проблемы анализа и синтеза / В.С. Поляк, Є.Я. Бервалдс. – Рига: Зинатне, 1990. – 526 с.
3. Зелінський І.М. Схема оптичного пристрою для визначення відхилень поверхні від теоретичної / Зелінський І.М., Яворська М.І. // Вісник ТДТУ. — 2010. - Том 15. - № 1. - С. 177-181. — (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).
4. D. J. Rochblatt. A microwave holography methodology for diagnostics and performance improvement for large reflector antennas. – TDA Progress Report 42-108. – 1992.
5. Bolli, P., Mazzarella, G., Montisci, G., Serra, G., “An Alternative Solution for the Reflector Surface Retrieval Problem,” Progress In Electromagnetics Research, PIER 82, 167-188 (2008).
6. Yahya Rahmat-Samii. “Microwave Holography of Large Reflector Antennas-Simulation Algorithms” IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. AP-33, No. 11, November 1985
7. J. W. M. Vaars, R. Lucas, J. G. Mangum, and J. A. Lopez-Perez “Near-Field Radio Holography of Large Reflector Antennas” IEEE Transactions on antennas and propagation magazine, vol. 49, No. 5, October 2007.
8. Зелінський І.М.; Яворська М.І. Алгоритм обробки даних в системі дистанційного вимірювання просторових координат. Матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. с33.
9. Лавров, А. С. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие для вузов / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. — М.: «Советское радио», 1974. — 368 с.

10. В. Г. Маценко Математичне моделювання: навчальний посібник / В. Г. Маценко. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2014. – 519с.
11. Дашенко А. Ф., Кирилов В. Х., Коломиец Л. Л., Оробей В. Ф. Matlab в инженерных и научных расчетах, 2003. – 214с.
12. Богославский Г. Е., Олексенко П. Ф., Свечников С. В. и др. Некоторые возможности использования принципов оптоэлектроники для совершенствования средств измерительной техники. Измерительная техника. — 1970. №1. — С. 5—8

## ДОДАТОК А

(Зразки відсканованої поверхні рефлектора, в різних робочих положеннях)

