

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ



Географічний факультет  
Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру



ГЕОТРОНІКА  
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

рівень вищої освіти	третій (доктор філософії)
галузь знань	19 Архітектура та будівництво
спеціальність	193 Геодезія та землеустрій
освітня професійна програма	Геодезія та землеустрій

Луцьк – 2022

УДК 911:114(07)

У 51

Рекомендовано до друку методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_ 2022 р.)

Рецензенти:

Поручинський В.І., кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри економічної та соціальної географії Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Парфентьєва І.О., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету.

М 48

*Геотроніка*. Конспект лекцій.-метод. вид. для студентів геогр. факультету, А.В. Уль. – Луцьк: РВВ "Вежа-Друк", 2022. – 124 с.

*Конспект лекцій з дисципліни «Геотроніка» охоплює питання сучасних радіоелектронних наземних та супутникових методів виконання геодезичних робіт. Додатково розглянута технологія радіолокаційної зйомки..*

*Зроблено спробу дати по можливості простий, короткий і наочний виклад основних аспектів сучасної геотроніки. У багатьох місцях опуцені менш істотні деталі (докладно викладені в наукових публікаціях ) заради більш ясного сприйняття основних ідей і принципів сучасної геотроніки.*

*Для студентів та аспірантів геодезичних спеціальностей, а також для геодезистів - практиків, що спеціалізуються або збираються спеціалізуватися в галузі сучасних радіоелектронних наземних та супутникових методів виконання геодезичних робіт.*

УДК 911:114(07)

У 51

© А.В. Уль. 2022

© Ю.А. Мельник. 2022

## Зміст

<b>Вступ</b> .....	5
<b>Тема 1 Фізичні основи геотроніки</b> .....	7
1.1 Коливання .....	7
1.2 Зображення гармонічних функцій.....	9
1.3 Додавання гармонічних коливань.....	11
1.4 Диференціальне рівняння гармонічних коливань.....	16
1.5 Хвилі. Характеристики та рівняння гармонічних хвиль.....	17
1.6 Характеристики та рівняння гармонічних хвиль.....	18
<b>Тема 2 Системи координат та системи часу</b> .....	19
2.1 Системи координат.....	19
2.2 Системи часу.....	20
<b>Тема 3 Електронна віддалеметрія</b> .....	22
3.1 Часовий метод вимірювання віддалей.....	22
3.2 Фазовий метод вимірювання віддалей.....	24
3.3 Виключення багатозначності прифазовому методі вимірювання віддалей....	27
3.4 Частотний метод вимірювання віддалей . Ефект Доплера.....	33
3.5 Перотворення гармонічних коливань. Модуляція. Демодуляція. Гетерединування.....	36
<b>Тема 4 Атмосфера та її вплив на радіогеодезичні вимірювання</b> .....	40
4.1 Загальні відомості про атмосферу Землі.....	40
4.2 Вплив атмосфери на процеси дистанційного зондування Землі.....	41
4.3 Показник заломлення та його градієнт як «геодезичні» параметри атмосфери.....	43
4.4 Вимоги до точності визначення показника заломлення та його градієнта при геодезичних вимірах.....	46
4.5 Вплив температури на результати геодезичних вимірів.....	48
<b>Тема 5 Геодезична інтерферометрія</b> .....	55
5.1 Основні положення.....	55
5.2 Технологія радіолокаційної зйомки.....	56
5.3 Геометрія радіолокаційної зйомки.....	58
5.4 Режими огляду космічних РСА.....	62
5.5 Режими роботи космічних РСА.....	64
5.6 Властивості об'єктів, що впливають на характер радіолокаційного зображення.....	65

5.7	Радіолокаційні знімки.....	68
5.8	Обробка радіолокаційних зображень.....	79
5.9	Системи зйомки Землі із космосу.....	88
5.10	Радіолокаційна зйомка небесних тіл.....	88
5.11	Області застосування радіолокаційної зйомки Землі.....	90
5.12	Приклади практичного застосування радіолокаційних даних.....	93
5.13	Технологічна схема інтерферометричної обробки радіолокаційних даних....	101
<b>Тема 6</b>	<b>Глобальні системи позиціонування.....</b>	<b>104</b>
6.1	Основні аспекти Глобальних навігаційних супутникових систем – GNSS.....	104
6.2	Принцип методу високоточних координатних визначень PPP.....	111
6.3	Точність методу PPP.....	117
	Література.....	119

## Вступ

Що таке геотроніка?

Геотроніка - це поєднання слів "геодезія" і "електроніка", що відображає той факт, що зараз вся вимірювальна геодезична техніка практично заснована на електроніці у широкому значенні цього слова.

В історії розвитку методів та засобів геодезичних вимірювань слід відзначити два основні етапи:

Перший з них відбувся в сорокових - п'ятдесятих роках ХХ століття, із поступальним входом електроніки в геодезичну науку. До цього всі геодезичні прилади були виключно оптико-механічними пристроями.

Електроніка ввійшла у лінійні та кутові вимірювання, а згодом і в найбільш консервативну область – нівелювання. Інтенсивна розробка світлодалекомірів, радіодалекомірів, електронних тахеометрів, радіогеодезичних систем для визначення координат рухомих об'єктів сприяла початку нової ери в геодезії. Величезну роль відіграла поява перших лазерів в 60-х роках минулого століття, бурхливий розвиток мікроелектроніки та обчислювальної техніки, що забезпечило створення сучасних комп'ютерних технологій. До перерахованих вище електронних засобів геодезичних вимірів додалися лазерні інтерферометри і балістичні (лазерні) гравіметри.

Другий етап, початок якого припадає на сімдесяті роки минулого століття, полягав у створенні глобальних супутникових навігаційно-геодезичних систем. Хоча розробка та використання супутникових систем типу «Транзит» (США) та «Цікада» (СРСР) для цілей навігації почалася ще в 60-х роках, переворот у геодезії здійснили саме глобальні системи GPS та ГЛОНАСС, які забезпечили отримання координат у будь-якій точці Землі у будь-який момент часу. В цих системах реалізовані принципово нові методи вимірювань, і ці системи дозволяють здійснити нові підходи до виконання геодезичних робіт. Роль глобальних супутникових систем важко переоцінити. Визначення координат точок на земній поверхні за допомогою цих систем отримало своє застосування в самих різноманітних галузях людської діяльності. Координати потрібні не тільки геодезістам – вони потрібні і морякам, і авіаторам, і військовим, і учасникам різноманітних експедицій, та багатьом іншим споживачам. Раніше, щоб отримати координати, доводилося виконувати трудомісткі геодезичні роботи на місцевості, вимірюючи геометричні величини – відстані, кути та перевищення між точками на земній поверхні, будувати геодезичні мережі різних конфігурацій, розраховувати та викреслювати їх. Поява супутникових систем зробило, у принципі, непотрібними усі ці роботи. Маючи супутниковий приймач, ми отримуємо можливість відразу ж визначити координати місця його встановлення з точністю близько

десятків метрів, що достатньо для багатьох навігаційних завдань, а за наявності двох приймачів отримати «геодезичну» точність визначення їхнього взаємного становища – до сантиметрів і навіть міліметрів. Це дозволяє створювати опорні мережі, виконувати знімальні роботи та прив'язку набагато ефективніше в порівнянні із традиційними методами.

Історично появі глобальних супутникових систем передувала розробка методу радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РСДБ) та створення скануючих лазерних далекомірів (напр. LIDAR) для вимірювання відстаней до штучних супутників Землі (ІСЗ).

Саме цими засобами побудована глобальна геодезична мережа, яка постійно вдосконалюється, і яка є опорною для мереж, створюваних усіма іншими методами.

На сьогодні практично всі вимірювання в геодезії здійснюють переважно електронними засобами. Злиття геодезії та електроніки призвело до утворення нового розділу геодезичної науки – геотроніки, а також до виникнення навчального курсу з тією самою назвою.

Поєднанням геодезії та геоінформатики і стала геотроніка. Геотроніка – сукупність методів та сукупність технологій моделювання, представлення та аналізу територій для створення віртуальних зображень. До таких технологій відносять геолокацію, просторові зображення, бази даних, ГІС (географічні інформаційні системи), веб-технології та багато інших. Геотроніка використовує методи картографії, геодезії, фотограмметрії та ДЗЗ, інформатики, суспільних наук.

## Тема 1 Фізичні основи геотроніки

Коливаннями називаються процеси, які багаторазово точно, або наближено повторюються у часі. Приклади таких процесів легко знайти і в природі, і в техніці. Коливальні процеси можуть мати різне походження. Зокрема, важливими типами коливань, які часто спостерігаються в природі і використовуються в техніці, є механічні та електромагнітні коливання. Механічними коливаннями, зокрема, зумовлений звук, а електромагнітними – світло. Як приклади коливань можна навести також добові чи сезонні зміни температури повітря, зміни видимої площі освітленої поверхні Місяця, тощо. Але незалежно від природи коливальні процеси мають спільні загальні властивості, й описуються аналогічними математичними рівняннями та співвідношеннями. Тому теорія коливальних і хвильових процесів різної природи становить єдиний самостійний розділ фізики – фізику коливань.

Загальні властивості коливань визначаються умовами виникнення та законом зміни їхніх характеристик у часі. При цьому всі коливання поділяють на вільні та вимушені. Вільні коливання виникають після одноразового виведення системи із рівноважного стану і далі існують самостійно. Вільні коливання можливі тільки в так званих коливальних системах або осциляторах, в яких при відхиленні від рівноважного стану виникають внутрішні процеси, що спричиняють періодичні зміни фізичних характеристик системи. Натомість вимушені коливання створюються постійним зовнішнім впливом і тому можливі в будь-якій системі.

Що до змін у часі, то найпростішими є гармонічні коливання — процеси, в яких зміна їхніх характеристик у часі визначається гармонічними функціями (синус і косинус).

Усе сказане стосується й хвиль — процесів поширення коливань у просторі і часі.

### 1.1 Коливання

Серед безлічі коливальних процесів особливе місце займають періодичні коливання, для яких виконується рівність:

$$S(t)=S(t+NT), \quad (1.1)$$

де  $S(t)$  – значення величини сигналу, що коливається,  $t$  – час,  $N$  – будь-яке ціле число,  $T$  – деякий незначний кінцевий проміжок часу, через який повторюються значення всіх фізичних величин, що характеризують коливальний рух.

Цей проміжок часу називається періодом коливання.

Зворотня періоду величина  $f$ :

$$f=1/T \quad (1.2)$$

виражає число коливань в одиницю часу і називається частотою.

Частота вимірюється в герцах. 1 герц (Гц) – це одне коливання в секунду. Вживаються також наступні одиниці частоти:

- Кілогерц (кГц) – 10<sup>3</sup> Гц; • Мегагерц (МГц) – 10<sup>6</sup> Гц;
- Гігагерц (ГГц) – 10<sup>9</sup> Гц;
- Терагерц (ТГц) – 10<sup>12</sup> Гц.

#### Гармонічні коливання

Серед періодичних коливань для науки і практики найважливішими є гармонічні коливання, які описуються гармонічними функціями і мають прості властивості. Важливість саме таких процесів зумовлена двома обставинами. По-перше, реальні коливання і хвилі, з якими доводиться мати справу, часто є близькими до гармонічних. По-друге, будь-який складний коливальний процес, як доводить математика, можна розглядати як суперпозицію (сукупність) гармонічних коливань. Тому в цей розділ присвячено саме таким процесам. Далі розглянуто:

#### Рівняння гармонічних коливань

Як було сказано, гармонічні коливання якоїсь величини  $\xi$  відбуваються за законом синуса або косинуса, тож визначаються *рівнянням*:

$$\xi(t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) \quad (1.3)$$

або  $\xi(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi_0\right),$

де

$$\varphi_0 = \phi_0 + \frac{\pi}{2},$$

і визначаються трьома параметрами — амплітудою, періодом (або частотою) і фазою.

*Амплітуда*  $A$ — додатне число, що дорівнює максимальному значенню коливної величини  $\xi$ , так що всі її можливі значення лежать в інтервалі  $\pm A$ . Іншими словами, амплітуда задає “розмах” коливань.

За рівнянням (1.1), величина  $\xi$  задовольняє умову  $\xi(t+nT)=\xi(t)$ , отже *період коливань*  $T$  є найменшим проміжком часу, через який значення величини  $\xi$  та характер її зміни повністю повторюються.

Окрім періоду, повторюваність коливального процесу у часі характеризують іще й частотою. При цьому розрізняють лінійну та циклічну (колову) частоту.

*Лінійна частота*  $\nu$  є величиною оберненою до періоду:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1.4)$$

Вона дорівнює кількості коливань, які здійснюються за одну секунду і вимірюється в герцах (Гц). При частоті 1 Гц = 1 с<sup>-1</sup> за одну секунду здійснюється одне повне коливання.

*Циклічна (колова) частота*  $\omega$  пов’язана з лінійною частотою та періодом співвідношеннями



$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (1.5)$$

і вимірюється в рад/с. (Часто пишуть  $1/\text{с}$  або  $\text{с}^{-1}$ ).

Використання частоти, замість періоду, дозволяє записати рівняння коливань більш компактно:

$$\xi(t) = A\cos(2\pi\nu t + \varphi_0) \text{ або } \xi(t) = \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1.6)$$

Якщо коливання описуються функцією синуса, то

$$\xi(t) = A\sin(2\pi\nu t + \varphi_0) \text{ або } \xi(t) = A\sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1.6a)$$

Задля зручності в теорії найчастіше використовують частоту  $\omega$  і відповідні рівняння (1.6) або (1.6a).

З рівнянь гармонічних коливань також видно, що при заданій амплітуді  $A$  величина  $\xi(t)$  у кожен момент часу визначається аргументом гармонічної функції, що називається *фазою коливань*  $\varphi$ . Отже,

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0 \quad (1.7)$$

Відповідно, величина  $\varphi_0$  називається *початковою фазою*. Одиницею фази є радіан (1 рад).

Слід зауважити, що термін “фаза” вживається не лишень у вказаному формальному сенсі, а й для словесної характеристики стадії коливального процесу або узгодженості коливань – згадаймо такі знайомі вислови, як “фази Місяця” або “коливання відбуваються в однакових (чи протилежних) фазах”.

## 1.2 Зображення гармонічних функцій

При розгляді декількох гармонічних коливань, які відбуваються одночасно, доводиться додавати відповідну кількість гармонічних функцій вигляду. Це потребує громіздких перетворень, а при великій кількості коливань може стати технічно нездійсненним без використання комп'ютера. Тому при аналізі коливань часто використовують штучні математичні прийоми, а саме: векторне та комплексне зображення гармонічних функцій.

Векторне зображення гармонічних функцій

Цей спосіб ґрунтується на існуванні відповідності між гармонічними коливаннями та обертальним рухом. Нехай маємо вектор з модулем  $A$ , який обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  навколо свого початку (рис. 1.1). Якщо в початковий момент часу цей вектор складає з деякою віссю  $OX$  кут  $\varphi_0$ , то в довільний момент  $t$  кут між ним і віссю буде рівним

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0.$$

Відповідно, якщо проекцію такого обертового вектора  $A_x = A\cos\varphi$  на вісь  $OX$  позначити як  $\xi$ , то отримаємо:

$$\xi(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

що збігається з (1.6.), а спроектувавши цей вектор на вісь OY, отримаємо рівняння (1.6 а). Таким чином, кожному гармонічному коливанню можна поставити у відповідність вектор із модулем, рівним амплітуді коливань A, який обертається з кутовою швидкістю, рівною циклічній частоті коливань  $\omega$ , і в початковий момент часу складає з вибраною віссю кут, рівний початковій фазі коливань  $\varphi_0$ .

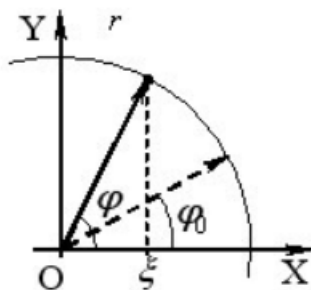


Рисунок 1.1

Доречі, саме через збіг величини  $\omega$  із швидкістю обертання вказаного вектора вона й має назву “циклічної”, або “колової” частоти коливань.

Таким чином, гармонічні коливання можна зображувати відповідними векторами на рисунку, який називається векторною діаграмою, і оперувати не безпосередньо гармонічними функціями, а векторами, що їх зображують.

Комплексне зображення гармонічних функцій

З математики відомо, що комплексне число  $z = a + ib$  ( $i = \sqrt{-1}$ ) можна записати або в показниковій формі, як  $z = Ae^{i\varphi}$ , або в тригонометричній формі у вигляді

$$z = A \cos \varphi + i A \sin \varphi \quad (1.8)$$

де модуль A та аргумент  $\varphi$  комплексного числа визначаються співвідношеннями

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \cos \varphi = \frac{a}{A}, \quad \sin \varphi = \frac{b}{A}$$

Тому, згідно з (1.8) і (1.6), рівняння гармонічних коливань  $\xi(t)$  можна розглядати як дійсну частину комплексної функції

$$\tilde{\xi} = Ae^{i\omega t + \varphi_0} = \tilde{A}e^{i\omega t} \Rightarrow \xi(t) = \text{Re}(\tilde{\xi}(t)). \quad (1.9)$$

При цьому комплексне число  $A = Ae^{i\varphi_0}$  називається комплексною амплітудою коливань. Дійсна (істинна) амплітуда визначається через квадрат модуля комплексної амплітуди на основі тотожності

$$A^2 = |\tilde{A}|^2 = \tilde{A} \cdot \tilde{A}^* = Ae^{i\varphi} \cdot Ae^{-i\varphi} \quad (1.10)$$

(Нагадаємо, що спряженою до комплексної величини  $z$  називається величина  $z^*$ , що створюється заміною уявної одиниці  $i$  у виразі  $z$  на  $-i$ .)

Указана відповідність (1.9) зберігається для всіх лінійних математичних операцій: множення на константу, додавання або віднімання, диференціювання, інтегрування. У цьому легко переконатися прямими обчисленнями. Через це розглянутий підхід є дуже продуктивним, оскільки оперувати з експонентами набагато зручніше, ніж із тригонометричними функціями. Зокрема, поширена задача про накладання декількох коливань однакової частоти та напрямку зводиться просто до додавання комплексних чисел (комплексних амплітуд).

### 1.3 Додавання гармонічних коливань

На початку говорилося про те, що складні коливальні процеси можна трактувати як суперпозицію (накладання), гармонічних коливань. Цей прийом широко застосовується в оптиці, техніці передачі сигналів та інших областях для аналізу та формування сигналів необхідної форми. Розглянемо найпростіші випадки – додавання двох гармонічних коливань, які відбуваються в одному та у взаємно перпендикулярних напрямках.

#### Додавання коливань одного напрямку

Розглянемо рух тіла (матеріальної точки), яке бере участь одночасно у двох гармонічних коливаннях одного напрямку. Прикладом можуть бути вертикальні коливання кульки на пружині, прикріпленій до стелі салону автомобіля, який теж коливається на ресорах у вертикальному напрямку. Рух кульки відносно землі складається з коливань відносно автомобіля та коливань автомобіля відносно землі. Відповідно, закон руху кульки буде визначатися сумою рівнянь цих двох коливань. Аналіз показує, що результат такого додавання суттєво залежить від того, однакові чи ні частоти складових коливань.

**Частоти однакові.** Нехай точка бере участь у двох рухах уздовж однієї осі  $Ox$  відповідно до рівнянь:

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega t + \alpha_1), \tag{1.11}$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$$

Для визначення рівняння результуючого руху  $x(t)=x_1(t)+x_2(t)$  скористаємося векторним способом зображення гармонічних функцій (1.12). Для цього зобразимо їх в момент  $t=0$  за допомогою векторів  $\vec{A}_1$  і  $\vec{A}_2$ , що обертаються навколо осі  $O$  з кутовою швидкістю  $\omega$ .

На отриманій векторній діаграмі

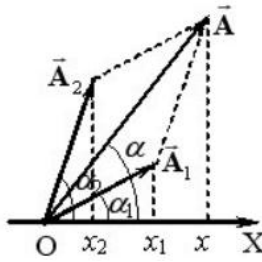


Рисунок 1.2

(рис. 1.2) результуючий рух точки зображується вектором  $\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2$ , модуль якого за теоремою косинусів задається виразом:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (1.12)$$

а кут з віссю OX, як впливає з рисунка:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_1 \sin \alpha_1 + A_2 \sin \alpha_2}{A_1 \cos \alpha_1 + A_2 \cos \alpha_2} \quad (1.13)$$

Таким чином, результатом додавання двох гармонічних коливань однакової частоти та напрямку є гармонічні коливання тієї самої частоти, амплітуда  $A$  та початкова фаза  $\alpha$  яких визначаються виразами (1.12) і (1.13). Слід зауважити, що при цьому амплітуда результуючих коливань не дорівнює сумі амплітуд коливань, які додаються. Залежно від початкових фаз  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  вона може мати будь-яке значення в межах від  $A_1 + A_2$  до  $|A_1 - A_2|$ .

**Частоти різні.** Розглянемо тепер випадок, коли точка бере участь у двох коливаннях однакового напрямку, але різної частоти  $\omega_1$  і  $\omega_2$ . Якщо для спрощення викладок прийняти  $A_1 = A_2$  і  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ , то рівняння цих коливань мають вигляд:

$$x_1 = A_1 \cos \omega_1 t, \quad x_2 = A_1 \cos \omega_2 t. \quad (1.14)$$

Рівняння результуючого руху точки  $x_1(t) + x_2(t)$  запишемо, скориставшись відомою формулою тригонометрії:

$$x(t) = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right). \quad (1.15)$$

Це рівняння описує складний коливальний процес, наочне уявлення про який можна отримати, побудувавши графік функції (1.15), або шляхом безпосереднього графічного додавання функцій (1.14). На рисунку 1.3 показано результат такого додавання для випадку  $\alpha = 0$  функцій

$$x_1 = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad x_2 = A_1 \cos 2\omega t.$$

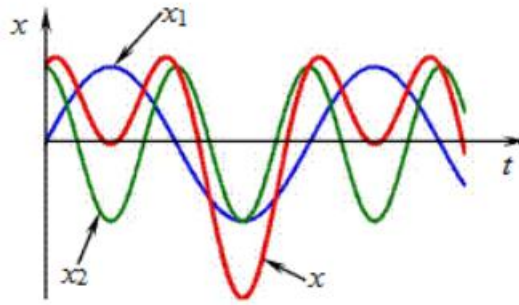


Рисунок 1.3

Як для теорії, так і для практики окремий інтерес являє випадок, коли частоти  $\omega_1$  і  $\omega_2$  є близькими й відрізняються від певного значення  $\omega$  на величину  $\Delta\omega \ll \omega$  так, що  $\omega_1 = \omega + \Delta\omega$  і  $\omega_2 = \omega - \Delta\omega$ . У такому разі рівняння набуває вигляду:

$$x(t) = (2A_1 \cos\Delta\omega t) \cos\omega t. \quad (1.16)$$

У цьому рівнянні величина  $\cos\Delta\omega t$  змінюється з періодом  $T = 2\pi/\Delta\omega$ , тобто в  $\omega/\Delta\omega$  разів повільніше, ніж величина  $\cos\omega t$ , період зміни якої  $T = 2\pi/\omega$ . При  $\Delta\omega \ll \omega$  за час  $T_0$  відбувається багато коливань величини  $x$  частотою  $\omega$ , як показано на рисунку 1.4 а для випадку  $\Delta\omega = \omega/10$ . Тому в (1.16) вираз у дужках можна трактувати як залежну від часу амплітуду  $A(t)$  і розглядати рух точки як гармонічні коливання з частотою  $\omega$ , амплітуда яких змінюється теж за гармонічним законом із частотою  $\Delta\omega$ :

$$x(t) = A(t) \cos\omega t, \quad A(t) = 2A |\cos\Delta\omega t|. \quad (1.16 \text{ а})$$

Графік  $A(t)$  показаний на рисунку 1.4б.

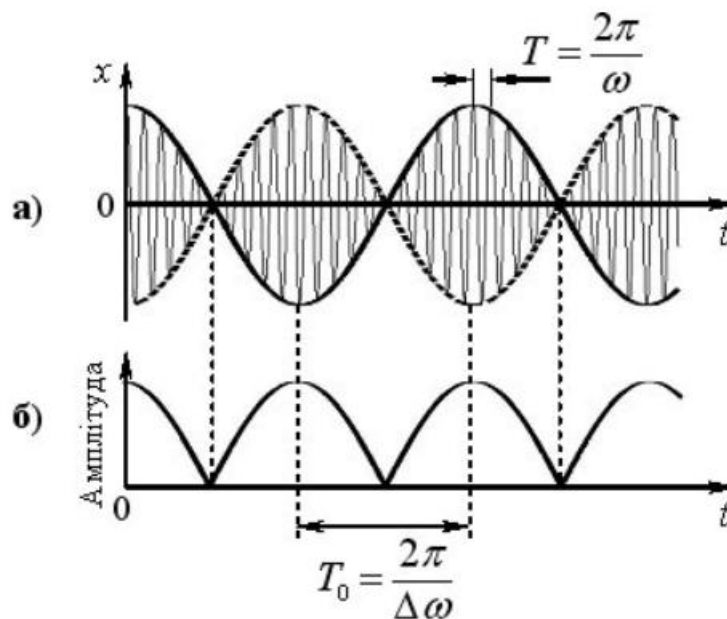


Рисунок 1.4

Розглянуті коливання називають *биттями*. При накладанні акустичних коливань з близькими частотами  $\omega_1$  і  $\omega_2$  биття створюють відчуття (не завжди приємне) звукових

пульсацій, які повторюються з частотою  $|\omega_1 - \omega_2|$ . Биття за відповідних умов виникають і при накладанні коливань не механічної природи, зокрема – напруг і струмів у електричних або електронних пристроях.

**Додавання взаємно перпендикулярних коливань**

Якщо точка одночасно здійснює гармонічні коливання у двох взаємно перпендикулярних напрямках, то на загал її рух не є коливальним і відбувається по складній траєкторії. Зокрема, траєкторія може виявитися незамкненою і ніколи не проходить через одну точку двічі. Проте, коли відношення частот коливань виражається відношенням цілих чисел, тіло рухається по замкненій траєкторії, форма котрої визначається співвідношенням частот, амплітуд і початкових фаз складових коливань.

**Частоти однакові.** Найпростішим є випадок додавання взаємно перпендикулярних коливань однієї частоти. Якщо коливання точки відбуваються вздовж координатних осей ОХ і ОУ, то їх можна описати рівняннями:

$$x = a \cos \omega t, y = b \cos(\omega t + \alpha), \quad (1.17)$$

де початкова фаза коливань координати  $x$  вважається нульовою. Ото ж  $\alpha$  по суті є різницею фаз цих двох коливань. Аби одержати рівняння траєкторії точки, тобто залежність  $y(x)$ , з рівнянь (1.17) треба виключити час. Для цього за допомогою відомих формул тригонометрії перетворимо друге рівняння (1.15) наступним чином:

$$\frac{y}{b} = (\cos \omega t \cos \alpha - \sin \omega t \sin \alpha) \Rightarrow \frac{y}{b} (\cos \omega t \cos \alpha - \sqrt{1 - \cos^2 \omega t} \cdot \sin \alpha).$$

Підставивши сюди вираз  $\cos \omega t = x/a$ , який випливає з першого рівняння (1.18), отримаємо:

$$\frac{y}{b} = \frac{x}{a} \cos \alpha - \sin \alpha \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}.$$

Після піднесення до квадрату і нескладних перетворень одержимо шукане рівняння траєкторії:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2 \alpha. \quad (1.18)$$

З математики відомо, що рівняння (1.18) є рівнянням еліпса. Отже, на загал точка рухається по еліптичній траєкторії, параметри та просторова орієнтація котрої залежать від амплітуд  $a, b$  і різниці фаз  $\alpha$  складових коливань. Розглянемо деякі окремі випадки.

1)  $\alpha=0$ . З (1.18) випливає, що

$$y = \frac{b}{a} x,$$

тобто еліпс вироджується у відрізок прямої. Отже, точка здійснює гармонічні коливання, напрямки яких пролягає в першій і третій чвертях і визначається відношенням амплітуд складових коливань.

2)  $\alpha=\pi$ . У цьому випадку ситуація подібна – з (1.18) маємо:

$$y = -\frac{b}{a}x$$

Тож у такому випадку точка теж здійснює гармонічні коливання, але вздовж лінії, що лежить у другій та четвертій чвертях.

Отримані результати дозволяють розглядати гармонічні коливання вздовж певного напрямку як суму (суперпозицію) двох гармонічних коливань тієї самої частоти, котрі відбуваються у взаємно перпендикулярних напрямках і мають різницю фаз  $\alpha$ , або  $\pi$ . Такий підхід плідно використовується, зокрема, в оптиці.

3)  $\alpha = \pi/2$ . При такій різниці фаз рівняння (1.18) набуває вигляду:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Це означає, що при не однакових амплітудах складових коливань точка рухається по еліпсу, осі котрого орієнтовані вздовж осей координат. При  $a=b$  еліпс вироджується в коло з центром у початку координат. Знак різниці фаз  $\alpha$  визначає один з двох можливих напрямів руху точки по траєкторії.

*Фігури Ліссажу.* Якщо точка здійснює взаємно перпендикулярні коливання з різними частотами, що співвідносяться, як цілі числа, траєкторіями руху є складні замкнені криві, що називаються *фігурами Ліссажу*.

У простих випадках рівняння фігур Ліссажу можна отримати за формулами тригонометрії. Наприклад, нехай складові коливання описуються рівняннями  $x = A \sin \omega t$  та  $y = A \sin 2\omega t$ . Тоді

$$y = 2A \sin \omega t \cdot \cos \omega t = 2A \sin \omega t \sqrt{1 - \sin^2 \omega t},$$

де  $\sin \omega t = x/A$ . Зробивши таку заміну, дістанемо рівняння траєкторії точки:

$$y = 2x \sqrt{1 - (x/A)^2}$$

Її вигляд показує рисунок 1.5.

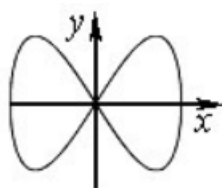


Рис 1.5

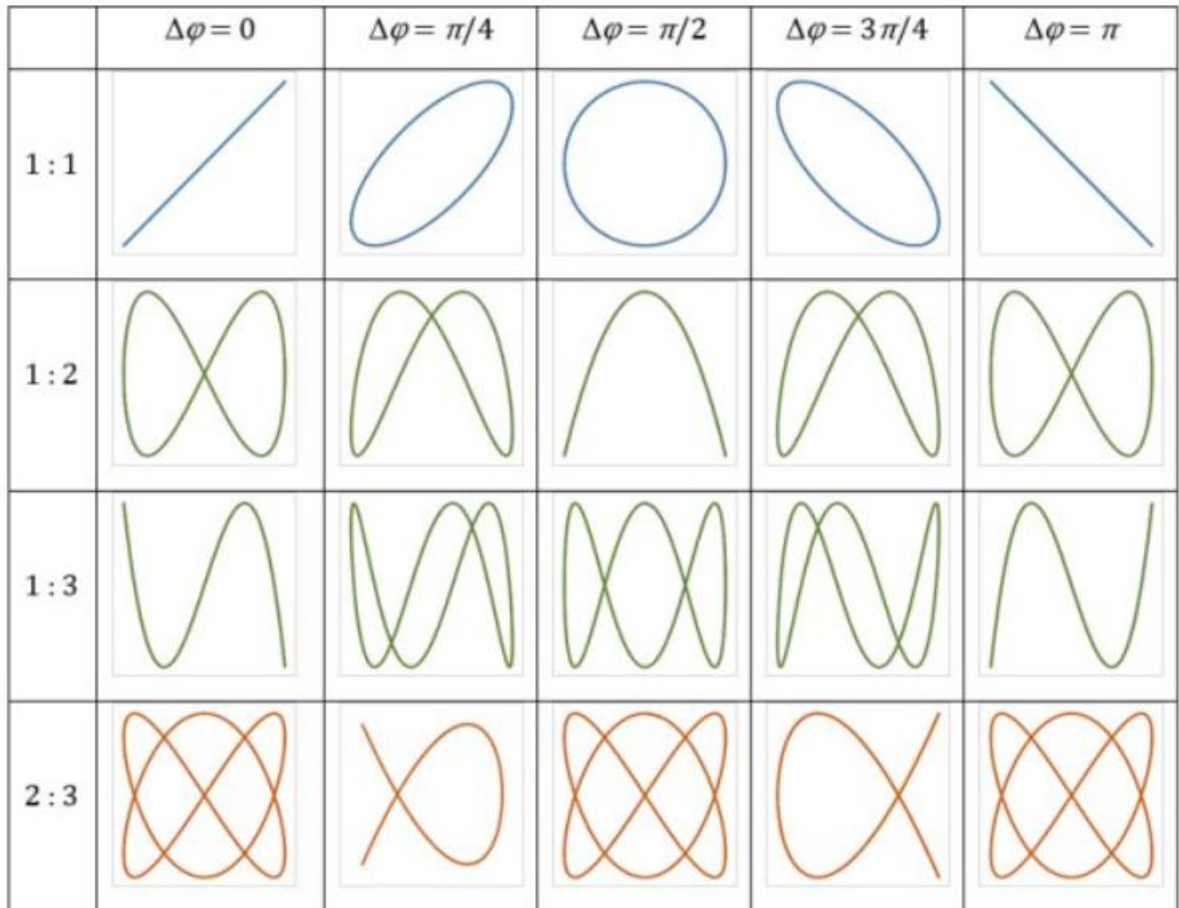


Рисунок 1.6

Фігури Ліссажу для деяких інших співвідношень частот і зсувів фаз  $\Delta\varphi$  коливань представлені на рисунку 1.6. Зазначимо, що фігури Ліссажу при додаванні електричних коливань легко спостерігати на екрані осцилографа. Це використовують на практиці для вимірювання та налаштування частот електричних сигналів.

#### 1.4 Диференціальне рівняння гармонічних коливань

Незалежно від умов і фізичної природи величини  $\zeta(t)$  рівняння гармонічних коливань 1.6 є розв'язком єдиного диференціального рівняння. Його можна установити, знайшовши першу та другу похідні функції  $\zeta(t)$ :

$$\frac{d\xi}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi_0) \Rightarrow \frac{d^2\xi}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Як видно, вираз другої похідної містить вихідну функцію (1.6), отже,

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = -\omega^2 \xi. \quad (1.19)$$

Отримане співвідношення є критерієм (достатньою умовою) гармонічних коливань: якщо в будь-який момент часу друга похідна даної величини по часу виявляється прямо пропорційною самій величині і має протилежний знак, то ця величина здійснює гармонічні коливання, а коефіцієнт пропорційності дорівнює квадратові циклічної частоти коливань.



Мовою математики вираз (1.19) є звичайним однорідним диференціальним рівнянням другого порядку із постійними коефіцієнтами, яке прийнято записувати у вигляді:

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + \omega^2\xi = 0. \quad (1.20)$$

У математиці доводиться, що розв'язками такого рівняння можуть бути тільки гармонічні функції. Тому рівняння (1.20) є *диференціальним рівнянням гармонічних коливань*.

### 1.5 Хвилі

Колівання як такі є локальним процесом, місце протікання якого обмежується розташуванням і розмірами коливальної системи, до прикладу, маятника чи коливального контура. Але за відповідних умов коливання та інші збурення від місця виникнення поширюються по всіх доступних напрямках, охоплюючи все більшу область простору.

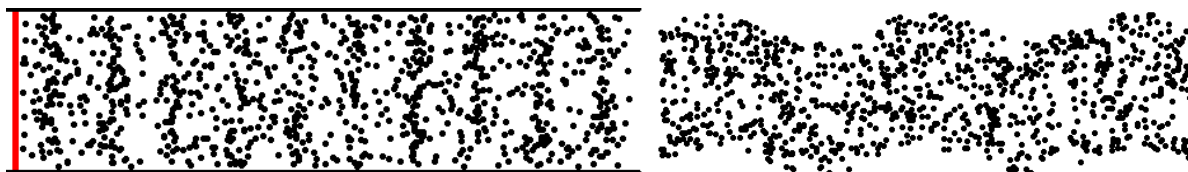
Поширення збурень у просторі з плином часу називається хвильовим процесом, або просто хвилею.

(Примітка. Збуреннями називаються різкі локальні відхилення системи від рівноважного тану).

Визначальною властивістю хвиль є їхня здатність переносити енергію. Достатньо вказати, що цій властивості ми завдячуємо самим своїм існуванням. В усьому іншому хвилі мають багато спільного з локальними коливаннями. Зокрема, хвилі різної природи мають спільні загальні властивості й описуються за допомогою єдиного математичного апарату.

#### Загальні властивості гармонічних хвиль

При єдності загальних властивостей хвилі можуть мати істотні відмінності, пов'язані з їхнім походженням і фізикою процесів, які в них відбуваються. Тому в теорії хвилі класифікуються за відповідними ознаками. До прикладу, окремо розглядають механічні хвилі, з якими, зокрема, пов'язаний звук, та електромагнітні хвилі, що є відповідальні за світло. Крім того, властивості хвиль істотно залежать від умов поширення і можуть бути складними. В даному посібнику розглядаються хвилі в *ізотропних середовищах*, де характеристики хвиль не залежать від напрямку поширення.



## 1.6 Характеристики та рівняння гармонічних хвиль

Одним з класифікаторів хвилі є напрям коливань, що відбуваються в ній. За цією ознакою хвилі поділяють на поздовжні та поперечні. При цьому, *в поздовжній хвилі коливання в кожній точці відбуваються вздовж напрямку поширення.*

Відповідно, *в поперечній хвилі коливання відбуваються перпендикулярно до напрямку поширення.*

Теорія і дослід свідчать, що електромагнітні хвилі можуть існувати і в речовині, й у вакуумі, і завжди є поперечними. Натомість механічні хвилі, котрі є можливі тільки в речовині, можуть бути як поперечними, так і поздовжніми. При цьому тип хвиль, які можуть виникати, залежить від взаємодії між молекулами середовища. *У твердому тілі, де сили зв'язку між атомами є пружними, виникають хвилі обох типів. Проте в об'ємі рідини, де сили взаємодії між молекулами ними є непружними, та в газі, де їх практично немає, можуть існувати лише поздовжні хвилі. Але на поверхні рідини між молекулами діють споріднені з пружними сили поверхневого натягу. Через це на поверхні рідини виникають і поперечні хвилі, які кожен бачив на водоймах.*

Нижче наведена “жива картинка”, що схематично зображує поздовжню та поперечну хвилю в середовищі. Якщо уважно до неї придивитися, можна помітити важливу деталь: точки-частинки середовища, не рухаються в напрямку поширення хвилі, а лише здійснюють коливання навколо фіксованих положень. Отже, *у хвилі відбувається не перенесення речовини, а перенесення коливань.*

## Тема 2 Системи координат та системи часу

### 2.1 Системи координат

Для функціонування навігаційних супутникових систем необхідні дані про параметри обертання Землі, фундаментальні ефемериди Місяця і планет, дані про гравітаційне поле Землі, про моделі атмосфери, а також високоточні дані про системи координат і часу, які використовуються.

Геоцентричні системи координат - системи координат, початок яких збігається із центром мас Землі. Їх також називають загальноземними чи глобальними. Для побудови та підтримки загальноземних систем координат використовуються чотири основні методи космічної геодезії:

- радіоінтерферометрія з наддовгою базою,
- лазерна локація (SLR),
- доплерівські вимірювальні системи (DORIS),
- навігаційні виміри КА ГЛОНАСС та інших ДПСС.

Міжнародна земна система координат ITRF є еталоном земної системи координат. У сучасних навігаційних супутникових системах використовуються різні, як правило, національні системи координат:

Навігаційна система	Система координат
Система координат ГЛОНАСС	ПЗ-90 (Параметри Землі 1990 року)
Система координат GPS	WGS-84 (World Geodetic System)
Система координат Galileo	GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame)
Система координат Beidou	CGCS2000 (China Geodetic Coordinate System 2000)
Система координат QZSS	JGS (Japanese geodetic system)
Система координат NavIC	WGS-84 (World Geodetic System)

## 2.2 Системи часу

Основне завдання супутникової навігації по визначенню координат полягає у вирішенні зворотньої просторової засічки, де за вихідні пункти приймаються супутники, а координати, що визначаються – на поверхні землі.

Координати супутників передаються на ГНСС-приймач у навігаційному повідомленні у вигляді ефемерид, а відстань до супутників ми вимірюємо за часом проходження сигналу. Але, разом з тим, супутники перебувають у постійному русі, тому координати та відстані обов'язково мають бути прив'язані до одного моменту часу.

Відповідно до розв'язуваних завдань використовуються *два типи систем часу: астрономічні та атомні.*

Системи астрономічного часу базуються на добовому обертанні Землі. Еталоном для побудови шкал астрономічного часу є сонячна або зоряна доба, залежно від точки небесної сфери, по якій проводяться вимірювання часу.

*Всесвітній час UT (Universal Time) – середній сонячний час на грінвічному меридіані.*

*Всесвітній координований час UTC синхронізований з атомним часом та є міжнародним стандартом, на якому базується цивільний час. Для прив'язки навігаційних сигналів до шкали часу всі супутники оснащені атомним стандартом годинника. На даний момент атомна тимчасова шкала є найточнішою у світі.*

### **Атомний час (TAI)**

Атомний час (TAI) – час, основою виміру якого покладено електромагнітні коливання, випромінювані атомами чи молекулами під час переходу з одного енергетичного стану до іншого. У 1967 році на Генеральній конференції західів і терезів було прийнято, що атомна секунда являє собою перехід між надтонкими рівнями  $F=4, M=0$  і  $F=3, M=0$  основного стану  $2S_{1/2}$  атома цезію-133, не збуреного зовнішніми полями, і що частоті цього переходу приписується значення 9192631770 Гц.

TAI - Temps Atomique International - Атомний час - 1 атомна секунда дорівнює 9192631770 періодам випромінювання атома Цезію-133 і є одиницею міжнародної системи СІ. Початок відліку системи атомного часу - 1 січня 1958 року о 00:00 год.

Раніше існував час GMT – Greenwich Mean Time – Середній час за Гринвічем, який був прив'язаний до астрономічних явищ (зміна дня та ночі), але був недостатньо точним.

Щоб зв'язати GMT і TAI було введено час UTC – Coordinated Universal Time – Всесвітній координований час, що ґрунтується на атомному стандарті, але прив'язаний до обертання Землі шляхом додавання або віднімання 1 секунди. Стабільність атомного годинника порядку  $10^{-14}$  а значить похибка в 1 секунду буде досягнута тільки через мільйони років.

Однак, встановлення атомного годинника в приймач користувача неможлива через його неймовірну дорожнечу. Тому в ГНСС-приймачах використовується кварцовий генератор, стабільність якого становить  $10^{-7}$ , а похибка становить 3-5 сек. на рік. Таким чином, шкала часу ГНСС-приймача набагато менш точна. Щоб це компенсувати, в сервісних повідомленнях супутникових сигналів передаються параметри часового полінома, які використовуються для прив'язки шкали часу приймача до шкали супутникової системи з точністю 20нс (у приймачах геодезичного класу).

Супутникова радіонавігаційна система є просторово-часовою системою із зоною дії, що охоплює весь навколосемний простір, та функціонує у власному системному часі. Важливе місце у ГНСС відводиться проблемі тимчасової синхронізації підсистем, і, яка важлива для забезпечення заданої послідовності випромінювання сигналів всіх навігаційних супутників. Вона обумовлює можливість застосування пасивних далекомірних (псевдодалекомірних) методів вимірювань.

Наземний командно-вимірювальний комплекс забезпечує синхронізацію шкал часу всіх НКА шляхом їх повірки та корекції (безпосередньої та алгоритмічної).

### Тема 3. Електронна віддалеметрія

#### 3.1 Часовий метод вимірювання віддалей

Визначення віддалей за допомогою електромагнітних хвиль є можливе тому, що ці хвилі розповсюджуються із задалегідь визначеною швидкістю. Якщо виміряти проміжок часу, за який електромагнітні хвилі пройшли шлях  $d$ , то можна визначити його довжину за відомою з фізики формулою  $d=v\cdot\tau$ . Тут  $\tau$  – час проходження хвилями шляху  $d$ , а  $v$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль.

Швидкість електромагнітних хвиль велика і становить біля 300000 км/с. Тому проміжки часу проходження хвилями ліній, які зустрічаються в геодезичних роботах, є дуже малими. Так, лінію довжиною 6 км електромагнітні хвилі проходять за  $2\cdot 10^{-5}\text{с} = 20$  мкс. Для визначення цього проміжку часу потрібно зафіксувати моменти проходження хвилями початку та кінця шляху, тобто віддалені між собою точки. Це важливо здійснити при такому проміжку часу та потрібній точності його визначення (порядку  $1\cdot 10^{-10}\text{с} = 0,1$  нс).

Набагато простіше визначити такий малий проміжок часу, коли його початок і кінець фіксується практично в одній точці. Це є можливе, коли електромагнітні коливання проходять лінію 2 рази: з одного кінця лінії до другого, а потім повертаються назад. Тому на одному кінці ліній хвилі повинні відбиватись. Тоді довжина лінії  $S$ , яку ми вимірюємо, дорівнює половині шляху електромагнітних хвиль. Якщо хвилі проходять весь шлях за час  $\tau$ , то довжина лінії  $S$  визначається за формулою

$$S = \frac{d}{2} = \frac{v\cdot\tau}{2} \quad (3.1)$$

Тепер неважко уявити, з яких основних вузлів складаються електронні віддалеміри. Очевидно, що на одному кінці, позначимо його як А, вимірюваної лінії в них є передавач електромагнітних хвиль, їх приймач та вимірювальний пристрій, а на другому кінці В – відбивач (рис. 3.1). Ці вузли у віддалемірі є основними.

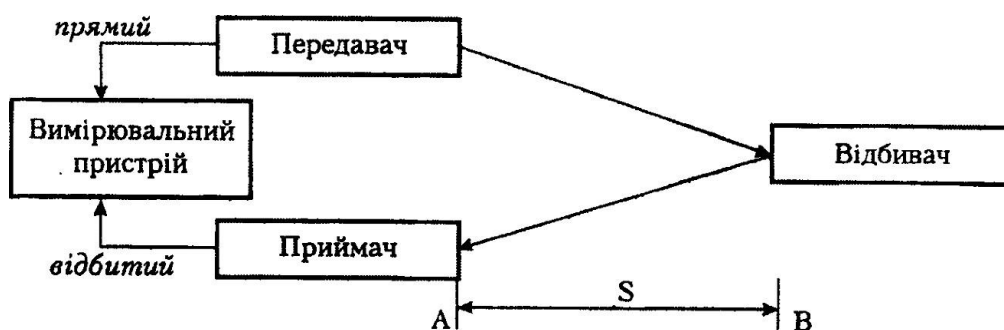


Рисунок 3.1 – Основні вузли електронного віддалеміра

Замість проміжку часу  $\tau$  можна виміряти зміну відомої функції часу, яка відбулася за час дворазового проходження хвилями вимірюваної лінії. Це приводить до змін в

конструкції та функціонуванні віддалеміра. У зв'язку з цим класифікацію методів вимірювання ліній за допомогою електромагнітних хвиль проводять за тією фізичною величиною, зміну якої визначає вимірювальний пристрій. Тому і розрізняють три основні методи вимірювання віддалей: часовий, фазовий і частотний.

Часовий метод найбільш наочний. При цьому методі передавач випромінює імпульси електромагнітних коливань. Тому його нерідко називають імпульсним. Невелику частину кожного імпульсу, випромінюваного передавачем в напрямку відбивача, подають на вимірювальний пристрій. Цю частину називаємо прямими, або опорними імпульсами. Основна частина імпульсів проходить два рази вимірювану лінію: від передавача до відбивача і від відбивача до приймача, який їх приймає і передає на вимірювальний пристрій.

Вимірювальний пристрій визначає час  $\tau$  запізнення приходу на нього відбитих імпульсів відносно прямих. Визначивши час  $\tau$ , за формулою (3.1) обчислюють довжину вимірюваної лінії. Ця формула є *основною формулою часового методу*. Отже, для отримання лінії потрібно виміряти час  $\tau$  та знати швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль в повітрі під час проведення вимірювань.

Нерідко визначення часу  $\tau$  виконують за допомогою електронно-променевої трубки, на лінійній або круговій розгортці якої отримують помітки під впливом прямих і відбитих імпульсів. Період розгортки  $T_{роз}$  є завжди більшим від часу, який потрібний хвилям на проходження подвійної вимірюваної лінії максимальної довжини, тобто  $T_{роз} > \tau_{max}$ . За віддалю між цими помітками визначають час запізнення відбитих імпульсів відносно прямих.

Похибка у визначенні часу  $\tau$  приводить до похибки  $M_\tau$  довжини лінії, обчисленої згідно (3.1). З цієї формули випливає, що похибка

$$M_\tau = \frac{v \cdot \tau}{2} \quad (3.2)$$

Як бачимо, похибка  $M_\tau$  не залежить від довжини лінії, вона є прямопропорційною до помилки визначення часу  $\tau$ .

В польових умовах час  $\tau$  визначають з точністю  $1 \cdot 10^{-8} \text{с} = 10 \text{ нс}$ . Згідно (3.2) ця похибка визначення часу дасть похибку в довжині лінії 1,5 м. Таке значення похибки матиме місце на довгих і коротких лініях, що обмежує застосування імпульсних віддалемірів в геодезії. Вказана точність може задовільнити геодезистів тільки при вимірюванні ліній не коротших 100 км. Лінії такої довжини вимірюють радіогеодезичні та супутникові системи, тому в деяких з них використовують цей метод.

До переваг часового методу треба віднести велику потужність в випромінюваному імпульсі при порівняно низькій потужності живлення віддалеміра. Тому при однаковій потужності живлення радіус дії імпульсно-віддалеміра є завжди більшим від віддалеміра з

безперервним випромінюванням. Значна потужність імпульсу дозволяє при випромінюванні порівняно коротких ліній працювати без відбивача, тобто використовувати імпульс, відбитий тим об'єктом, до якого визначають віддаль. Так працюють радіовисотоміри, приймач яких приймає імпульси, відбиті від поверхні землі. Тепер знаходять застосування лазерні імпульсні віддалеміри, які дозволяють вимірювати з невисокою точністю значні відстані до будь-якого об'єкта.

Імпульсні віддалеміри знайшли застосування при визначеннях відстаней до Місяця та штучних супутників Землі (ШСЗ). В них джерелом короткочасних імпульсів електромагнітних коливань є рубінові лазери, а проміжки часу  $\tau$  визначають стаціонарними високоточними методами з точністю порядку  $1 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 1 \text{ нс}$ , що відповідає віддалі 15 см. Для вимірювання віддалей до Місяця на останньому був встановлений кутниковий відбивач. Передавач, приймач і вимірювальний блок з високоточним кварцовим годинником встановлюють в обсерваторіях.

### 3.2 Фазовий метод вимірювання віддалей

*Фазовий метод* вимірювання вимагає того, щоб передавач віддалеміра безперервно випромінював вздовж лінії вимірювання гармонічні коливання. Нагадаємо, що гармонічні коливання – це група періодичних коливань, які описуються рівняннями

$$x = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_0) \text{ або } x = A \cdot \cos(2\pi ft + \varphi_0),$$

де  $A$  – амплітуда гармонічного коливання, а аргумент синуса або косинуса – його поточна фаза, яка є лінійною функцією часу і визначає стан гармонічно змінюваної величини в момент часу  $t$ . Фаза вимірюється в кутових величинах. Величини  $\varphi_0$  і  $\varphi_0'$  називають початковими фазами. Їх значення обумовлене вибором початку відріку часу. Фаза коливань є пропорційною до частоти коливань.

Частота  $f$  – це кількість циклів коливань, які здійснюються за одну секунду. Одиницею частоти є герц ( $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$ ). Частота коливань є оберненою пропорційною до періоду коливання:  $T = 1/f$ .

Період – це час, за який здійснюється один повний цикл коливання. Відрізок, на який розповсюджується хвиля за час рівний одному періодові, називають довжиною хвилі коливання  $\lambda = v \cdot T = v/f$ .

Коливання, які випромінює передавач, проходять лінію вимірювання, відбиваються, другий раз проходять цю лінію і приймаються приймачем. Коливання з приймача та частина коливань, що випромінює передавач, тобто прямі та відбиті коливання, ідуть на вимірювальний пристрій, роль якого в фазовому методі вимірює фазометр. Він вимірює різницю фаз коливань, які потрапляють на нього.



Знайдемо залежність між вимірною різницею фаз та довжиною лінії  $S$ . Для цього запишемо рівняння фаз коливань, які йдуть на фазометр в момент часу  $t$ . Фаза прямих коливань, які випромінює передавач,  $\varphi_n = 2\pi ft + \varphi_0$ ,

де  $f$  – частота випромінюваних коливань, або вимірювальна частота, а

$\varphi_0$  – їх початкова фаза. В цей же момент часу на фазометр ідуть коливання з приймача. Вони випромінювались передавачем раніше на проміжок часу  $\tau = 2 \cdot S/v$ . Тому їх фаза:

$$\varphi_B = 2\pi f(t - \tau) + \varphi_0.$$

Різницю фаз прямих і відбитих коливань  $\Delta\varphi$  можна представити як

$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_B = 2\pi ft \quad (3.3)$$

Як бачимо, різниця фаз  $\Delta\varphi$  пропорційна до часу  $\tau$  та вимірюваної частоти  $f$ . Визначивши з (3.3) час  $\tau$  і підставивши його значення в формулу (3.1), отримаємо значення довжини вимірюваної лінії  $S$ :

$$S = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{v}{2f} \quad (3.4)$$

Отриманий вираз (3.4) називають основною формулою фазового методу.

Із (3.4) бачимо, що для визначення довжини лінії фазовим методом необхідно виміряти різницю фаз та знати частоту і швидкість розповсюдження коливань в повітрі.

Вимірною різниця фаз містить похибку  $m_{\Delta\varphi}$ . В зв'язку з цим ми згідно (3.4) обчислимо похибку вимірювання довжини лінії  $M_{\Delta\varphi}$ , яку можна визначити за формулою

$$M_{\Delta\varphi} = \frac{m_{\Delta\varphi}}{2\pi} \cdot \frac{v}{2f}$$

Вплив похибки вимірювання різниці фаз на точність визначення  $S$  згідно (3.4) не залежить від довжини лінії, а тільки від частоти, або від половини довжини хвилі вимірюваної частоти. Для зменшення впливу похибки вимірювання різниці фаз на точність визначення довжини лінії потрібно збільшувати частоту.

Фазометри, які використовують в віддалемірах, дозволяють одержати довжини ліній з достатньою для геодезистів точністю при вимірювальних частотах не менших від 10 МГц, тому такі вимірювальні частоти використовують в фазових віддалемірах.

Колівання з частотою порядку 10 МГц розповсюджується в атмосфері непрямолінійно. Тому у віддалемірах вимірювальні частоти переносяться вздовж вимірювальних ліній на надвисокочастотних несучих коливаннях, траєкторією яких в атмосфері можна вважати прямолінійною. У великій групі віддалемірів несучими коливаннями є коливання оптичного діапазону, частота яких є більшою від 1000 ГГц. Ці прилади називають світловіддалемірами. Є група віддалемірів, в яких використовують ультракороткохвильові несучі коливання, частота яких є від 3 до 30 ГГц. Їх прийнято називати

радіовіддалемірами. Вимірювальні коливання модулюють частоту, амплітуду, або інший параметр несучих коливань. Модуляцією називають закономірну зміну будь-якого параметра коливань (її визначення та характеристики ми розглянемо нижче). Частота коливань, які модулюють, повинна бути в багато разів меншою від частоти несучих коливань.

Формулу (3.4) можна записати у вигляді

$$S = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.5)$$

де  $\lambda/2$  – півдовжина хвилі коливання вимірювальної частоти. При такій формі запису видно, що півдовжина хвилі вимірювальної частоти є своєрідною одиницею міри довжини лінії, бо саме з нею порівнюють довжину вимірюваної лінії.

Коефіцієнт  $\Delta\varphi/2\pi$  показує, скільки разів півдовжина хвилі вклалася у вимірюваній лінії, або в скільки разів довжина лінії вимірювання є більшою від  $\lambda/2$ . При  $f=10$  МГц півдовжина хвилі дорівнює 15 м. Лінії, які вимірюють віддалеміром, є, як правило, більшими від 15 м. Вони можуть містити в собі десятки, сотні і навіть тисячі 15-ти метрових відрізків. Отже різниця фаз теж містить в собі десятки, сотні, а навіть і тисячі цілих періодів. Тому різницю фаз можна записати у виді

$$\Delta\varphi = (N+\delta) \cdot 2\pi, \quad (3.6)$$

де  $N$  – ціле число,  $\delta$  - дробова частина періоду, яку називають фазовим доміром. Підставивши значення різниці фаз  $\Delta\varphi$  з (3.6) в (3.5), отримуємо

$$S = (N + \delta) \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2} + l, \quad (3.7)$$

де  $l = \delta \cdot \lambda/2$ . Цю величину називають лінійним доміром. Це є залишок, отриманий після того, як в лінії помістити ціле число  $N$  півдовжин хвиль вимірювальної частоти. Очевидно, що завжди  $l < \lambda/2$  коливань тієї частоти, на якій вимірюється фазовий домір.

Фазометри віддалемірів дозволяють вимірювати різницю фаз тільки в межах одного періоду, тобто вони вимірюють тільки фазовий домір. Ціле число  $N$  фазометри не визначають. При різниці фаз, наприклад,  $25^\circ$ ,  $385^\circ$ ,  $3625^\circ$  покази фазометра є однаковими і рівними  $25^\circ$ . Коли змінити довжину лінії на півдовжину хвилі, то різниця фаз зміниться на один період, а показ фазометра залишиться без змін. Це є причиною того, що, провівши вимірювання різниці фаз на одній частоті, ми маємо багатозначність, тобто багато значень довжини вимірюваної лінії, які відрізняються між собою на півдовжини хвилі вимірювальної частоти. Це великий недолік фазового методу. Для виключення багатозначності потрібно виконати вимірювання на двох, або більше вимірювальних частотах.

Якщо довжина вимірюваної лінії є меншою від  $\lambda/2$ , то фазовий віддалемір виміряє її однозначно. Тому  $l_{\text{одн}} = \lambda/2$  називають однозначно визначуваною віддаллю на даній вимірювальній частоті.

Незважаючи на цей недолік, фазовий метод знайшов дуже широке застосування. Він використовується практично у всіх світло- і радіовіддалемірах, а також в радіогеодезичних і супутникових системах.

Фазометри мають шкалу, з якої під час вимірювань знімають відліки. Вони є фазовими домірами в поділках шкали. Щоб отримати фазовий домір в частинах періоду, що необхідно для обчислень довжин ліній за формулою (13), потрібно зчитаний з фазометра відлік  $a$  поділити на ціну всієї шкали фазометра  $A_{\text{шк}}$ . Наприклад, якщо відлік  $a$  в градусах, то фазовий домір в періодах дорівнює відліку, поділеному на 360, коли ж відлік  $a$  в градах, то його слід ділити на 400. В загальному  $\delta = a/A_{\text{шк}}$ .

Існує різновидність фазового методу, в якій вимірювальними коливаннями є самі електромагнітні коливання оптичного діапазону. Тому їх не модулюють. Цей метод вимірювань названо інтерференційним.

### 3.3 Виключення багатозначності при фазовому методі вимірювання віддалей

При фазовому методі вимірювання ліній виникає багатозначність, яка викликана двома причинами. Перша з них пов'язана з тим, що фазометри дозволяють вимірювати різницю фаз тільки в межах одного періоду. Другою причиною є те, що для досягнення потрібної точності вимірювання ліній використовують вимірювальні частоти, при яких різниця фаз містить в собі певну кількість цілих періодів, які фазометром визначити не можна.

Для визначення кількості цілих періодів  $N$ , тобто виключення багатозначності, необхідно проводити вимірювання різниці фаз на декількох частотах. При цьому змінювати частоту можна плавно або дискретно. Цим двом способам змінювання частоти відповідають два способи виключення багатозначності: одноступеневий і багатоступеневий.

Одноступеневий спосіб застосовують, коли вимірювальна частота у віддалемірах змінюється плавно в заданому діапазоні. В цьому діапазоні вибирають не менше двох частот  $f_1$  і  $f_k$ , на яких вимірюють фазові доміри.

При виведенні формули виключення багатозначності цим способом

припустимо, що  $f_1 < f_k$ . Виходячи з формули (3.7) можемо записати два рівняння довжини лінії:

$$S = (N_i + \delta_i) \cdot \frac{v}{2 \cdot f_i} \quad \text{та} \quad S = (N_k + \delta_k) \cdot \frac{v}{2 \cdot f_k} \quad (3.8)$$

де  $\delta_i$  і  $\delta_k$  – фазові доміри, визначені фазометром відповідно на частоті  $f_i$  і  $f_k$ , а  $N_i$  і  $N_k$  – кількість цілих періодів, що міститься в різницях фаз відповідно  $\Delta\varphi_i$  та  $\Delta\varphi_k$  на цих частотах. В записаних рівняннях є три невідомі величини, а саме  $S$ ,  $N_i$  і  $N_k$ .

Нагадаємо, що різниця фаз визначається за формулою  $\Delta\varphi = 2\pi f t$  і, очевидно,

знаходиться в лінійній залежності від частоти. При плавному збільшенні частоти плавно збільшується різниця фаз, а також покази фазометра. Якщо частоту збільшити плавно на стільки, щоб різниця фаз збільшилась на один період, тобто кількість цілих періодів збільшити на 1, то покази фазометра пройдуть всі можливі значення і повернуться до початкового значення, тобто пройде один цикл зміни показів фазометра. Порахувавши кількість циклів зміни показів фазометра при переході від частоти  $f_i$  до частоти  $f_k$ , будемо знати, на скільки відрізняється число  $N_k$  від числа  $N_i$ , тобто будемо знати величину їх різниці

$$N_{ki} = N_i - N_k. \quad (3.9)$$

Підставимо в друге рівняння системи (3.8) значення  $N_k$ , одержане із (3.9), і прирівняємо праві частини рівнянь. З цієї рівності отримаємо значення  $N_i$

$$N_i = \frac{n_{ki} f_i}{f_k - f_i} + \frac{\delta_{k f_i} - \delta_{i f_k}}{f_k - f_i} \quad (3.10)$$

Таким чином згідно (3.10) ми отримали загальну формулу виключення багатозначності одноступеневим способом.

Для виключення багатозначності в формулу (3.10) підставляємо виміряні значення фазових домірів та частот. Ці величини містять в собі похибки вимірювання. Тому із обчислень маємо не ціле число, а змішане. Точне значення числа  $N_i$  матимемо, коли результат обчислень закруглимо до найближчого цілого. Відхилення від цілого обчисленого значення числа  $N_i$  дозволяє зробити висновок про точність проведених вимірювань. При якісних вимірюваннях вони не перевищують величину 0,1 - 0,2.

Щоб похибки вимірювання фазових домірів та частот якнайменше спотворювали результат обчислень, різниця частот  $f_k - f_i$ , тобто знаменник в (3.10), має бути якомога більшою. Тому рекомендують проводити фазові вимірювання на частотах, які є близькими до меж діапазону зміни частоти у віддалемірі. Величина  $(f_k - f_i) / n_{ki} = \delta f$  є змінною вимірювальної частоти, яка приводить до зміни фаз рівно на один період. Покажемо, що ця величина є функцією довжини вимірюваної лінії. Припустимо, що на частоті  $f_1$  різниця фаз дорівнює  $\Delta\varphi_1$ . Коли друга частота  $f_2 = f_1 + \delta f$ , то різниця фаз на цій

частоті  $\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_1 + 2\pi$ . Згідно (3.3)

$$\Delta\varphi_1 = 2\pi \cdot f_1 \cdot \tau \quad \text{і} \quad \Delta\varphi_2 = 2\pi \cdot f_2 \cdot \tau$$

Віднімемо від першого рівняння друге і отримаємо

$$\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 2\pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot \tau.$$

Підставивши в останнє рівняння значення  $\tau = 2 \cdot S / v$  і  $f_2 - f_1 = \delta f$ , отримаємо

$$\Delta f = \frac{v}{2S} \quad (3.11)$$

Звідси випливає, що півдовжина хвилі частот  $\delta f$  дорівнює довжині вимірюваної лінії.

Одноступеневий спосіб виключення багатозначності використовують у всіх віддалемірах з компенсаційною коміркою Керра. В них фіксують фазові доміри, що дорівнюють нулю, тобто  $\delta_i = \delta_k = 0$ . Тому формула (3.10) виключення багатозначності спрощується і приймає вигляд:

$$N_i = \frac{n_{ki} f_i}{f_k - f_i} = \frac{f_i}{\delta f} \quad (3.12)$$

Зазначимо, що при одноступеневому способі виключення багатозначності в комплекті віддалеміра потрібно мати прилад для вимірювання частоти. Недоліком цього способу є також те, що нижня межа довжин ліній, які можна вимірювати віддалеміром, залежить від діапазону зміни частоти, яка визначається як

$$S_{min} = \frac{v}{2Df}, \quad (3.13)$$

де  $S_{min}$  – найкоротша лінія, яку може виміряти віддалемір з діапазоном зміни частоти  $Df$ .

Багатоступеневий спосіб виключення багатозначності вимагає, щоб у віддалемірах було декілька постійних вимірювальних частот. Їх значення повинні бути вказані в паспорті віддалеміра. На кожній з частот проводять вимірювання фазових домірів. Маючи значення частот та фазових домірів, можемо скласти для кожної частоти рівняння довжини лінії у вигляді (3.8). Таким чином отримуємо систему рівнянь, кількість яких дорівнює кількості частот, що є у віддалемірі. В кожному з цих рівнянь невідомим є кількість цілих періодів  $N_i$ . А крім цього невідома сама довжина лінії  $S$ . Отже кількість невідомих величин є на 1 більша від кількості рівнянь в системі. Для розв'язання цієї системи рівнянь потрібно мати додаткову вихідну величину, якою є наближене значення довжини лінії  $S_{набл}$ .

При виключенні багатозначності найчастіше ставлять собі за мету визначити кількість цілих періодів для однієї, найбільш стабільної з вимірювальних частот, яку називають основною. На ній найточніше визначають фазові доміри (найбільшою кількістю вимірювань).

Кількість цілих періодів, що міститься в різниці фаз на основній частоті визначають не відразу за однією формулою, а прирівнюють її до багаточлена, в якому поступово визначають невідомі коефіцієнти. Звідси і пішла назва цього способу виключення багатозначності. Кількість членів в багаточлені дорівнює кількості частот, які є у віддалемірі. Коли у віддалемірі є чотири частоти, багаточлен має вигляд

$$N_1 = \frac{f_1}{f_4} \cdot a + \frac{f_1}{f_3} \cdot b + \frac{f_1}{f_2} \cdot c + d \quad (3.14)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$  - невідомі коефіцієнти, які мають бути цілими додатними числами. При цьому їх значення знаходяться в межах

$$0 \leq d \leq \frac{f_1}{f_4} - 1, 0 \leq c \leq \frac{f_2}{f_3} - 1, 0 \leq b \leq \frac{f_3}{f_4} - 1, 0 \leq a$$

Для того, щоб багаточлен був простим, вимірювальні частоти вибирають так, щоб всі відношення частот в (3.14) та значення меж коефіцієнтів  $b$ ,  $c$  і  $d$  були цілими числами. Тому другу вимірювальну частоту вибирають в ціле число разів меншою від основної, тобто першої, третю частоту – в ціле число разів меншою від другої частоти, а також від першої і т.д. Тому другу вимірювальну частоту вибирають в ціле число разів меншою від основної, тобто першої, третю частоту – в ціле число разів меншою від другої частоти, а також від першої і т.д.

Для прикладу наведемо значення частот, які зустрічаються в сучасних віддалемірах:  $f_1 = 15\,000$  кГц,  $f_2 = f_1/10 = 1\,500$  кГц,  $f_3 = f_2/10 = f_1/100 = 150$  кГц,  $f_4 = f_3/10 = f_2/100 = f_1/1000 = 15$  кГц. При цих значеннях частот багаточлен приймає такий вигляд

$$N_1 = 1000 \cdot a + 100 \cdot b + 10 \cdot c + d \quad (3.15)$$

В цьому випадку число  $N_1$  практично подане в десятковій системі, кожний невідомий коефіцієнт може приймати значення від 0 до 9 і є цифрою

у відповідному розряді цього числа. Так, при  $N_1 = 1453$ , коефіцієнти відповідно мають значення  $a = 1$ ,  $b = 4$ ,  $c = 5$ ,  $d = 3$ .

Кількість періодів в різницях фаз на частотах  $f_2$ ,  $f_3$  і  $f_4$  можна виразити через коефіцієнти багаточлена (3.13). Число  $N_i$  є цілою кількістю укладень в довжині лінії півдовжини хвилі вимірювальної частоти  $f_i$ . Якщо частота  $f_i$  є в  $k$  разів меншою від першої частоти, то півдовжина хвилі цієї частоти є в  $k$  разів більшою. Тому ціла кількість укладень півдовжини хвиль цієї частоти є в  $k$  разів меншою від  $N_1$  і  $N_i$  дорівнює цілій частині від результату ділення  $N_1$  на  $k$ . Отже для отримання  $N_2$  потрібно  $N_1$  поділити на  $f_1/f_2 = k$ , для отримання  $N_3$  потрібно  $N_2$  поділити на  $f_2/f_3$ , а для одержання  $N_4$  потрібно  $N_3$  поділити на  $f_3/f_4$  і в кожному випадку відкинути дробову частину. Таким чином

$$N_2 = \frac{f_1}{f_2} \cdot a + \frac{f_2}{f_3} \cdot b + c, \quad N_3 = \frac{f_3}{f_4} \cdot a + b, \quad N_4 = a. \quad (3.16)$$

Для наведених в прикладі частот

$$N_2 = 100 \cdot a + 10 \cdot b + c, \quad N_3 = 10 \cdot a + b, \quad N_4 = a. \quad (3.17)$$

Тепер перейдемо до визначення невідомих коефіцієнтів багаточлена.

Для отримання значення коефіцієнта  $d$  використаємо результати вимірювань на першій і другій частотах. В рівняння віддалі (3.7) підставимо замість  $N_1$  багаточлен (3.14), а замість  $N_2$  перший із багаточленів (3.16)

$$S = \left( \frac{f_1}{f_4} \cdot a + \frac{f_1}{f_3} \cdot b + \frac{f_1}{f_2} \cdot c + d + \delta_1 \right) \cdot \frac{v}{2f_1}$$

$$S = \left( \frac{f_2}{f_4} \cdot a + \frac{f_2}{f_3} \cdot b + c + \delta_2 \right) \cdot \frac{v}{2f_2} \quad (3.18)$$

Прирівняємо праві частини цих рівнянь, отриману рівність помножимо на  $2/v$  і

відкриємо дужки. Після скорочення, отримаємо

$$\frac{1}{f_1} \cdot d + \frac{1}{f_1} \cdot \delta_1 = \frac{1}{f_2} \cdot \delta_2.$$

В цьому рівнянні є тільки одна невідома величина – коефіцієнт  $d$ .

Визначимо його

$$d = \frac{f_1}{f_2} \cdot \delta_2 - \delta_1 \quad (3.19)$$

Записавши рівняння віддалі для частот  $f_2$  і  $f_3$  і повторивши такі ж дії, як вище, отримаємо

$$c = \frac{f_2}{f_3} \cdot \delta_3 - \delta_1 \quad (3.20)$$

Таким же шляхом отримаємо

$$b = \frac{f_3}{f_4} \cdot \delta_4 - \delta_3. \quad (3.21)$$

Для визначення коефіцієнта  $a$  використаємо рівняння віддалі для частоти  $f_4$ , яке прирівняємо до наближеного значення довжини лінії.

$$S = (a + \delta_4) \cdot \frac{v}{2f_4} \cong S_{\text{табл}}$$

Звідси

$$a = \frac{S_{\text{табл}}}{\frac{v}{2f_4}} - \delta_4. \quad (3.22)$$

Для частот, які наведені в прикладі, формули для визначення коефіцієнтів мають вигляд

$$d = 10 \cdot \delta_2 - \delta_1, c = 10 \cdot \delta_3 - \delta_2, b = 10 \cdot \delta_4 - \delta_3, a = \frac{S_{\text{табл}}}{10_{\text{км}}} - \delta_4. \quad (3.23)$$

Із обчислень отримуємо значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$ , які є змішаними числами. Для отримання точних значень цих коефіцієнтів потрібно одержані із обчислень значення заокруглити до найближчого цілого. Щоб коефіцієнт  $a$  визначався надійно, похибка наближеного значення довжини лінії не повинна бути більшою від одної восьмої частини довжини хвилі найменшої частоти. Для наведених в прикладі значень частот наближене значення довжини лінії потрібно знати з точністю до 2.5км. Визначення наближеного значення довжини лінії з такою точністю не викликає труднощів. Значення коефіцієнтів, заокруглені до цілого, підставляємо в многочлен (3.14) і обчислюємо значення  $N_1$ , тобто виключаємо багатозначність. Аналогічно виключають багатозначність, коли у віддалемірі є інша кількість частот. Наприклад, коли є три вимірювальні частоти, то багаточлен має вигляд

$$N_1 = \frac{f_1}{f_3} \cdot a + \frac{f_1}{f_2} \cdot b + c$$

Невідомі коефіцієнти визначають за формулами

$$c = \frac{f_1}{f_2} \cdot \delta_2 - \delta_1, b = \frac{f_2}{f_3} \cdot \delta_3 - \delta_2, a = \frac{S_{\text{табл}}}{2f_3} \cdot \delta_4$$

При багатоступеневому способі потрібні вимірювальні частоти, які відрізняються між собою в десятки, сотні і тисячі разів, тобто високі, середні та низькі частоти. Для генерування кожної з тих частот необхідний окремий генератор, що збільшує масу та габарити віддалеміра.

Близькі за значенням вимірювальні частоти можна отримувати з одного генератора, послідовно під'єднуючи до нього один із декілька коливних контурів. В цьому випадку відліки з фазометра на середніх і низьких частотах отримують посередньо, тобто обчислюють за відліками, знятими на близьких за значеннями високих частотах, які є у віддалемірі.

Припустимо, що у віддалемірі крім основної частоти  $f_1$  є близька до неї частота  $f_1'$  і що  $f_1 > f_1'$ . Різниці фаз в періодах на цих частотах можна записати у виді

$$\frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} = f_1 \cdot \tau = N_1 + \delta_1, \frac{\Delta\varphi'_1}{2\pi} = f'_1 \cdot \tau = N'_1 + \delta'_1. \quad (3.24)$$

Віднімемо від верхнього рівняння нижнє і отримаємо

$$\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi'_1}{2\pi} = (f_1 - f'_1)\tau = (N_1 - N'_1) + (\delta_1 - \delta'_1). \quad (3.25)$$

Із рівняння (3.25) бачимо, що різниця фаз, отриманих на двох різних високих частотах  $f_1$  і  $f'_1$ , дорівнює різниці фаз на частоті, що дорівнює різниці цих двох частот, тобто на середній чи низькій частоті  $f_i = f_1 - f'_1$ . При цьому кількість цілих періодів в різниці фаз на низькій частоті дорівнює різниці цілих чисел періодів, які містились в різниці фаз на кожній з високих частот. Фазовий домір на середній чи низькій частоті можна обчислити, взявши різницю фазових домірів, отриманих на двох високих частотах. Фазовий домір – це показ фазометра. Він не може бути від'ємним. Коли фазовий домір на першій частоті є меншим від фазового доміру на частоті  $f'_1$ , то перед відніманням до фазового доміру на першій частоті слід додати 1, тобто збільшити його на один період. При цьому на 1 зменшиться кількість цілих періодів в різниці фаз.

Аналогічними будуть дії, коли фазові доміри є в поділках фазометра. Коли різниця відліків, отриманих на високих частотах, є від'ємною, то до неї потрібно додати ціну всієї шкали фазометра. Наприклад, нехай на частоті  $f_1 = 15$  МГц отримано показ фазометра 124, а на частоті  $f'_1 = 13.5$  МГц – 301.

На шкалі фазометра є 400 поділок. Показ фазометра на частоті 1.5 МГц дорівнює  $124 - 301 + 400 = 223$ .

Фазовий домір в періодах на цій частоті є рівним  $223/400 = 0.5578$ .

Ми припустили, що перша частота є більшою від  $i$ -ої частоти. Але може бути і



навпаки, тобто може мати місце нерівність частоті  $f_1 < f_i$ . В цьому випадку від фазового доміру на частоті  $f_i$  потрібно віднімати фазовий домір на першій частоті. При обчисленні фазових домірів на середніх та низьких частотах дотримуються правила, що від фазового доміру на більшій частоті завжди віднімають фазовий домір на меншій частоті.

Вияснимо, як отримати значення допоміжних високих частот при застосування посереднього способу визначення фазових домірів. Коли для виключення багатозначності нам потрібна частота, наприклад  $f_1/10$ , то у віддалемірі можна мати замість неї частоту рівну  $0.9 \cdot f_1$ , або  $1.1 \cdot f_1$ . Так само у випадку коли потрібна частота  $f_1/100$ , то її можна замінити частотою  $0.99 \cdot f_1$ , або  $1.01 \cdot f_1$ . В загальному вигляді можна написати, що для отримання посереднім шляхом фазового доміру на частоті  $f_1/k$  потрібно крім першої частоти мати у віддалемірі одну з двох частот:  $f_i = f_1 + f_1/k$  або  $f_i = f_1 - f_1/k$ .

Позитивною стороною багатоступеневого способу виключення багатозначності є те, що при ньому нема нижньої межі вимірюваних віддалеміром довжин ліній. Крім цього процес виключення багатозначності цим способом можна автоматизувати. Але фазометр мусить вимірювати будь-яке значення різниці фаз в межах періоду, не так як при одноступеневому способі, коли фазометр може реєструвати лиш якесь одне постійне значення фазового доміру.

Існує спосіб виключення багатозначності, який об'єднує в собі додатні сторони одно- і багатоступеневого способів. Його називають *способом плавальної частоти*. Цей спосіб використаний в світловіддалемірах Distomat фірми Vild. В них є дві постійні вимірювальні частоти  $f_1$  і  $f_2$ . Їх значення є відомими. При цьому передбачена можливість плавного переходу від однієї до другої частоти, під час якого лічильник реєструє кількість обертів стрілки фазометра. Таким чином визначається  $n_{12} = N_2 - N_1$ . На обидвох частотах з фазометра зчитують покази, за якими отримують фазові доміри  $\delta_1$  і  $\delta_2$ . Вони можуть мати будь-яке значення в межах одного періоду. В віддалемірах Distomat не треба знати наближеного значення довжини лінії і нема нижньої межі довжин ліній, вимірюваних віддалеміром.

### 3.4 Частотний метод вимірювання віддалей . Ефект Доплера

Частотний метод може ґрунтуватися на двох різних принципах: один на використанні частотно-модульованих несучих коливань, а другий – ефекту Доплера.

В першому варіанті цього методу несучу частоту модулюють так, щоб вона змінювалась згідно лінійного закону, тобто так, щоб була простою залежність між зміною частоти та часом, за який ця зміна відбулася. Половина періоду частоти модуляції несучих коливань  $T/2 = 1/2 f$  повинна бути більшою від часу проходження електромагнітними хвилями подвійної лінії у всьому радіосі дії віддалеміра, тобто щоб  $T/2 > 2 \cdot S_{\max}/v$ .

Коливання, які два рази пройшли вимірювану лінію, приймає приймач і разом з частиною прямих коливань передає їх на вимірювальний пристрій. У вимірювальному пристрої визначають різницю частот прямих і відбитих коливань, тобто  $\Delta f = f_n - f_v$ , де  $f_n$  – частота коливань, які випромінює передавач в момент часу  $t$ , а  $f_v$  – частота коливань, які приймає приймач в цей же момент часу. Різниця частот залежить від довжини лінії або часу  $\tau$ .

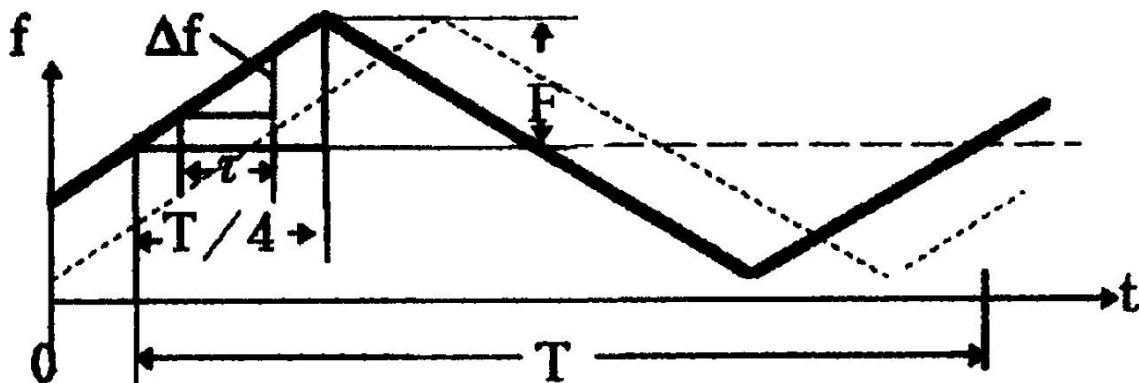


Рисунок 3.3 – Графік зміни частоти в частотному віддалемірі

На рисунку 3.3 суцільною лінією показаний графік зміни частоти прямих коливань, модульованих за законом «трикутника». Штриховою лінією нанесений графік зміни частоти відбитих коливань. Як видно з рисунка, різниця частот прямих і відбитих коливань є постійною, за винятком дуже малого проміжку часу, чим нехтують. На підставі рисунка можна записати таку рівність

$$\frac{\tau}{\Delta f} = \frac{T}{4F},$$

де  $\Delta f$  – вимірне значення різниці частот,  $F$  – амплітуда зміни частоти,  $T$  – період частоти модуляції несучих коливань. З цієї рівності визначимо час проходження коливаннями подвійної вимірюваної лінії

$$\tau = \frac{\Delta f}{4 \cdot F \cdot f},$$

де  $f = 1/T$ .

Підставивши значення  $\tau$  у формулу (3.1) величину вимірюваної відстані можна представити як

$$S = \frac{v \cdot \Delta f}{8 \cdot F \cdot f} \quad (3.26)$$

Це є основна формула частотного методу при модуляції несучих коливань за законом трикутника. При іншому законі модуляції формула є також інша.

Варіант частотного методу з модульованими коливаннями застосовують в радіовисотомірах, а також в системах м'якої посадки космічних апаратів.

Другий варіант частотного методу базується на ефекті Доплера. Його використовують тільки в тих випадках, коли віддаль між передавачем і приймачем швидко

змінюється. Він передбачає, що рухомий передавач безперервно випромінює електромагнітні коливання постійної частоти  $f_в$ . Отже, при цьому методі не модулюють коливання, які випромінює передавач.

Нерухомий приймач на поверхні землі приймає ці коливання. Через те, що віддаль між передавачем і приймачем швидко змінюється, частота коливань, які приходять на приймач, відрізняється від частоти випромінюваних передавачем коливань. Ця зміна частоти є виявленням ефекту Доплера. Частота прийнятих приймачем коливань визначається як

$$f_n = f_в \cdot \frac{1 \pm \frac{V_{\text{пер}} \cdot \cos \theta}{v}}{\sqrt{1 - \frac{4 \cdot V_{\text{пер}}^2}{v^2}}}, \quad (3.27)$$

де  $f_в$  – частота коливань, які випромінює передавач;  $V_{\text{пер}}$  – швидкість передавача;  $\theta$  – кут між напрямком руху передавача та напрямком випромінювання з передавача на приймач;  $v$  – швидкість електромагнітних коливань. У зв'язку з тим, що швидкість  $V_{\text{пер}}$  передавача, навіть у випадках його розміщення на штучних супутниках Землі (ШСЗ), в багато разів менша від  $v$ , то значення підкорінного виразу є дуже близьким до 1. Величина  $V_{\text{пер}} \cdot \cos \theta$  є складовою швидкості передавача в напрямі на приймач, або радіальною швидкістю  $V$ . Приймаючи до уваги все вище сказане, можемо записати

$$f_n = f_в \pm f_в \cdot \frac{V}{v},$$

або

$$f_n \pm f_в = f_d = \pm f_в \cdot \frac{V}{v}. \quad (3.28)$$

Різницю частот  $f_d$  коливань, випромінюваних передавачем та тих, які приходять до приймача, називають частотою Доплера. Цю різницю вимірює частотомір на наземній станції віддалеміра.

Знак частоти Доплера залежить від напрямку руху передавача відносно приймача. Якщо він рухається до приймача, то віддаль між передавачем і приймачем зменшується, тому значення частоти Доплера має знак плюс. Якщо він віддаляється від приймача, то значення частоти Доплера є від'ємним.

Схема доплерівського віддалемірного пристрою відрізняється від загальної схеми електронного віддалеміра (рис. 1.4). В ньому нема відбивача, а передавач і приймач розташовані на віддалі  $S$ : передавач може бути встановленим на літаку, кораблі, або на супутнику, а приймач – на наземній станції (рис. 1.4). Слід зазначити, що доплерівський віддалемір може працювати теж з відбивачем. Але в наш час частотний метод, оснований на ефекті Доплера, широко застосовують в супутникових системах, в яких відбивач відсутній. Тому розглядаємо саме таку схему (рис.1.4).

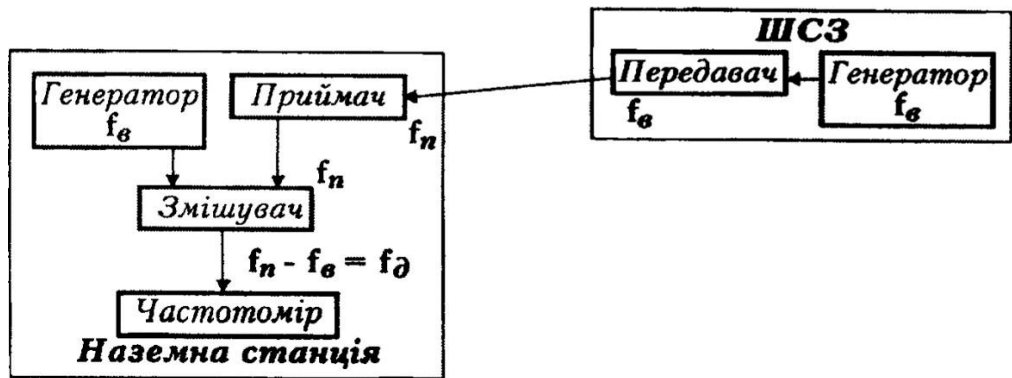


Рисунок 1.4 – Схема доплерівського віддалемірного пристрою

Для визначення частоти Доплера на наземній станції є генератор, який генерує коливання такої ж частоти, яку випромінює передавач, тобто  $f_c$ . Коливання з приймача частотою  $f_n$  і з генератора ідуть на змішувач. З нього отримують коливання, частота яких дорівнює різниці частот  $f_n - f_c = f_d$ .

Частоту цих коливань вимірює частотомір.

Знаючи частоту Доплера, можна, виходячи з (3.28), визначити радіальну швидкість передавача відносно приймача

$$V = \pm \frac{v}{f_B} \cdot f_d = \pm \lambda_B \cdot f_d \quad (3.29)$$

Ця швидкість дозволяє отримати зміну віддалі  $\Delta S$  між передавачем та приймачем, яка відбулася за проміжок часу  $\tau$  за формулою

$$\Delta S = \pm \int_{t=0}^{\tau} V(t) dt = \pm \frac{v}{f_B} \cdot \int_{t=0}^{\tau} f_d(t) dt = \pm \frac{v}{f_B} \cdot$$

Зміни віддалей практично отримують чисельним інтегруванням, визначаючи середні значення частоти Доплера в коротких інтервалах часу.

### 3.5 Перетворення гармонійних коливань. Модуляція. Демодуляція.

#### Гетередування.

*Модуляція.* Модуляцією називається зміна параметрів коливання в часі за певним законом. Відповідно до того, який параметр модулюється ( $A$ ,  $\omega$  або  $\phi_0$ ), розрізняють відповідно амплітудну (АМ), частотну (ЧМ) і фазову (ФМ) модуляцію. В світлових даламірах іноді використовують ще один вид модуляції – поляризаційну (ПМ), при якій змінюється стан поляризації світлових коливань. Коливання, параметр якого модулюється, називається несучим коливанням, а його частота  $f = \omega/2\pi$  – несучою частотою. Модуляція полягає в тому, що вибраний параметр піддається дії модулюючого коливання, яке задає закон зміни параметра. В найпростішому випадку модуляція здійснюється за гармонійним законом. При цьому модульований параметр  $P$  представляється у вигляді

$$P(t) = P_0 + \Delta P \cos \Omega t = P_0(1 + m \cos \Omega t), \quad (3.30)$$

де  $P_0$  – відповідний параметр немодульованого коливання,  $\Delta P$  – амплітуда зміни параметра,  $\Omega = 2\pi F$  – кругова частота модуляції ( $F$  – частота модуляції, тобто частота модулюючого коливання). Величину  $m = \Delta P/P_0$  називають коефіцієнтом модуляції. Частота модуляції завжди набагато менша несучої частоти, тобто  $F \ll f$  (відповідно  $\Omega \ll \omega$ ).

В наземних віддалемірних пристроях найбільш часто застосовується амплітудна модуляція за гармонійним законом. Розглянемо цей випадок докладніше.

Хай немодульоване (несуче) коливання має вигляд в якому для простоти приймемо початкову фазу як  $\varphi_0 = 0$ :

$$S = A_0 \cos \omega t \quad (3.31)$$

При гармонійній амплітудній модуляції амплітуда коливання у відповідності з (3.30) змінюється в часі (3.32) і прийме вид, представлений на рисунку 3.5.

$$A(t) = A_0 + \Delta A \cos \Omega t = A_0(1 + m \cos \Omega t), \quad (3.32)$$

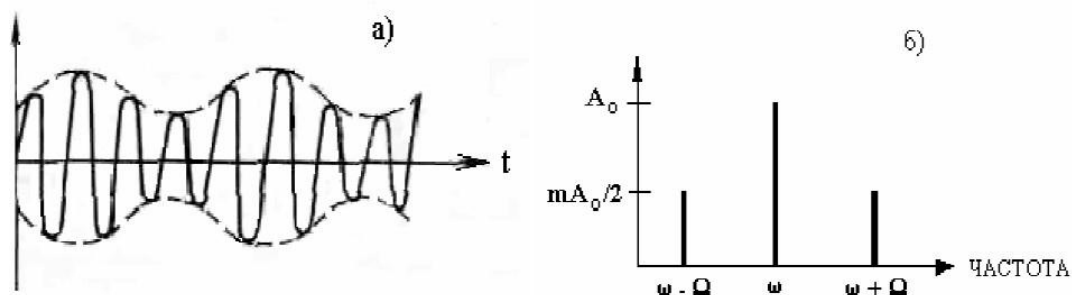


Рисунок 3.5– а) АМ-коливання, в якому амплітуда змінюється за гармонійним законом, б) Частотний спектр АМ-коливання

Відповідно значення величини АМ коливання буде

$$S_{AM} = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t \quad (3.33)$$

Графік такого коливання і показаний на рисунку 3.5. Застосувавши до (3.33) відому з тригонометрії формулу для добутку косинусів:

$\cos \alpha \cdot \cos \beta = (1/2) [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$  Графік такого коливання і показаний на рисунку 3.5. Застосувавши до (3.33) відому з тригонометрії формулу для добутку косинусів:

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = (1/2) [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

можна представити величину сигналу у вигляді

$$S_{AM} = A_0 \cos \omega t + (mA_0/2) \cos(\omega - \Omega)t + (mA_0/2) \cos(\omega + \Omega)t \quad (3.34)$$

Формула (3.33) показує, що АМ-коливання – це коливання однієї (несучої) частоти  $\omega$ , але із зміною амплітуди  $A_0(1 + m \cos \Omega t)$ , величина якої міняється в часі з частотою модуляції  $\Omega$ . А з формула (3.34) випливає, що АМ-коливання складається з трьох гармонійних складових з частотами  $\omega$ ,  $\omega - \Omega$ ,  $\omega + \Omega$  і постійними амплітудами ( $A_0$ ,  $mA_0/2$ , і

$mA_0/2$  відповідно).

Питання «що ж є АМ-коливання насправді?» некоректне: обидва уявлення еквівалентні. В одних випадках доцільно використовувати запис (3.33), в інших (3.34).

Вираз (3.34) показує частотний характер спектру АМ-коливання. Частоти  $\omega - \Omega$  і  $\omega + \Omega$  називаються боковими частотами. Таким чином амплітудно-модульоване коливання складається в загальному випадку з несучої частоти і двох бокових частот.

Цікавим окремим випадком є биття, про яке згадувалося вище, яке є результатом складання двох близьких частот  $\omega_1$  і  $\omega_2$ . Биття – це теж АМ- коливання, але його спектр складається з двох частот.

Окрім гармонійної модуляції, часто використовується модуляція по прямокутному закону, коли значення модульованого параметра стрибкоподібно міняється від  $P_1$  до  $P_2$  і через деякий час повертається назад, і цей процес повторюється через однакові або різні інтервали часу.

Модуляцію по прямокутному закону називаються маніпуляцією. Маніпуляція фази використовується, наприклад, в глобальних супутникових навігаційних системах.

*Демодуляція.* Демодуляцією або детектуванням називається процес, в результаті якого з складного модульованого коливання виділяється модулююче коливання, Це процедура, зворотна модуляції. Існують детектори АМ-, ЧМ- і ФМ-коливань. Звичайно ЧМ- і ФМ-коливання перетворюються в АМ-коливання, яке детектується в найбільш просте. Детектування АМ-коливання є нелінійною операцією, в процесі якої відбувається перемноження цього коливання або на несуче коливання, або саме на себе. Перший варіант називають синхронним детектуванням, другий – квадратичним детектуванням. В обох випадках в результаті перемноження виходить сума додатків (спектр), один з яких і буде коливанням модулюючої частоти, яке виділяють за допомогою відповідного фільтру, що пропускає тільки цю частоту.

*Гетеродинування.* Так називають операцію перетворення частоти коливання з метою отримання коливання іншої частоти. Зазвичай ця операція використовується для пониження частоти. Для здійснення гетеродинування початкове коливання частоти  $f$  змішується в радіотехнічному змішувачі з коливанням, частота якого відрізняється від  $f$  на невелику величину  $\Delta f$ . Це коливання одержують від гетеродина – допоміжного генератора. Під змішуванням звичайно розуміється перемножування коливань. В результаті перемножування утворюється спектр частот, що містить, зокрема, коливання різницевої частоти  $\Delta f$ , яке можна виділити за допомогою фільтру. Таким чином, коливання високої частоти  $f$  перетвориться в коливання низької частоти  $\Delta f$ . При цьому фаза низькочастотного коливання дорівнює різниці фаз змішуваних коливань.

Гетеродинування широко використовується в геодезичних фазових віддалемірах, в яких виникає задача вимірювання різниці фаз двох високочастотних сигналів.

Розглянемо це на наступному прикладі. Хай є два коливання однакової частоти  $f$ , які можна представити, як:

$$S_1 = A_1 \cos(2\pi f t + \varphi_1) \quad (3.35)$$

та

$$S_2 = A_2 \cos(2\pi f t + \varphi_2), \quad (3.36)$$

різниця фаз  $\varphi$  яких становить

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (3.37)$$

Змішавши кожне з цих коливань з коливаннями гетеродина частоти

$$f_r S_r = B \cos(2\pi f_r t + \varphi_r) \quad (3.38)$$

в змішувачах  $C_{m1}$  і  $C_{m2}$  і направивши вихідні сигнали змішувачів в підсилювачі низької частоти 1 і 2 (рис.3.6), отримаємо на виходах підсилювачів коливання різницевої частоти  $|f - f_r| = \Delta f$  у вигляді

$$S_1 = C_1 \cos[2\pi \Delta f t + (\varphi_1 - \varphi_r)] \quad (3.39)$$

і

$$S_2 = C_2 \cos[2\pi \Delta f t + (\varphi_2 - \varphi_r)] \quad (3.40)$$

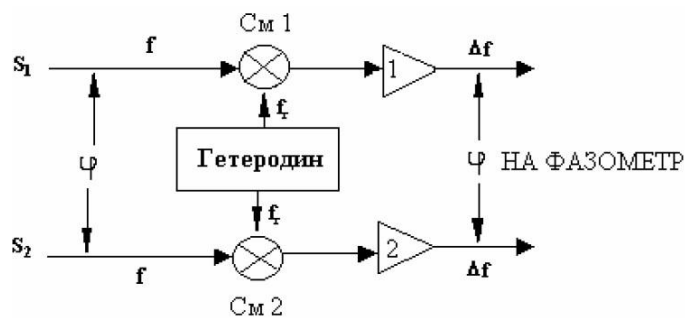


Рисунок 3.6 – Гетеродинна схема вимірювання різниці фаз

Різниця фаз цих коливань

$$(\varphi_2 - \varphi_r) - (\varphi_1 - \varphi_r) = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi, \quad (3.41)$$

тобто різниця фаз коливань низької (різницевої) частоти  $\Delta f$  дорівнює різниці фаз початкових коливань високої частоти  $f$ , або, іншими словами, при гетеродинуванні фазові співвідношення не змінюються. Цей вельми важливий висновок говорить про те, що вимірювання різниці фаз двох коливань високої частоти можна, застосувавши гетеродинування, замінити вимірюванням різниці фаз двох низькочастотних коливань, що виконується технічно простіше і точніше.

## Тема 4 Атмосфера та її вплив на радіогеодезичні вимірювання

Усі геодезичні виміри повністю чи частково виконують у атмосфері. Стан атмосфери впливає точність вимірів. Фізика атмосфери цікавить геодезиста саме з цього погляду.

При вивченні матеріалу даного розділу з величезного обсягу інформації з фізики атмосфери вирахуємо те, що визначає характер і ступінь впливу атмосфери на результати геодезичних вимірів; є основою методів обліку впливу атмосфери; позначається на ефективності методів обліку впливу атмосфери, що знайшли застосування у геодезичному виробництві.

### 4.1 Загальні відомості про атмосферу Землі

Поняття атмосфери. Загальноприйнято атмосферою називати газову оболонку Землі. Суперечки викликає лише розуміння верхньої межі атмосфери, яке визначає її товщину. Якщо вважати атмосферою ту область навколо Землі, в якій газове середовище обертається разом із Землею як єдине ціле, то межа між атмосферою і міжпланетним простором розташовується в екзосфері, що починається на висоті близько 700 км від поверхні Землі, і може умовно проводитися по висоті 1300 км.

Під екзосферою (сферою розсіювання) розуміють зовнішній, найбільш розріджений шар атмосфери, де довжини вільного пробігу частинок такі великі, що частки можуть дисипувати (розсіюватися) у міжпланетний простір.

За визначенням, запропонованим Міжнародною Авіаційною Федерацією, кордон атмосфери та космосу проводиться по лінії Кишені, розташованої на висоті близько 100 км, де аеронавтика внаслідок розрідженості атмосфери стає повністю неможливою (швидкість літального апарату, необхідна для створення достатньої підйомної сили, стає швидкістю). NASA використовує як межу атмосфери позначку в 122 км, недавні експерименти уточнюють межу атмосфери Землі, що знаходиться на висоті 118 км.

Хімічний склад. На думку вчених, атмосфера виникла близько 4 млрд. років тому на ранніх стадіях розвитку Землі. У вихідному стані атмосфера складалася з газів, що виділяються при вулканічних виверженнях. Пізніше у її формуванні взяли участь водні простори, живі організми та продукти їхньої життєдіяльності. Сумарна маса повітря в атмосфері -  $(5,1-5,3)10^{18}$ . З них маса сухого повітря становить  $(5,1352 \pm 0,0003)10^{18}$ , загальна маса водяної пари в середньому дорівнює  $1,27 \cdot 10^{16}$ .

Атмосфера Землі складається з газів (табл.4.1) та різних домішок (пил, краплі води, кристали льоду, морські солі, продукти горіння тощо) (табл. 4.2).



Таблиця 4.1 – Склад сухого повітря поблизу земної поверхні[1]

Газ	Вміст за об'ємом, %
Азот N <sub>2</sub>	78,084
Кисень O <sub>2</sub>	20,946
Аргон Ar	0,934
Вуглекислий газ CO <sub>2</sub>	3,5·10 <sup>-2</sup>
Неон Ne	1,82·10 <sup>-3</sup>
Гелій He	5,2·10 <sup>-4</sup>
Криптон Kr	1,14·10 <sup>-4</sup>
Водень H <sub>2</sub>	5·10 <sup>-5</sup>
Ксенон Xe	8,7·10 <sup>-6</sup>
Озон O <sub>3</sub>	10 <sup>-6</sup> –10 <sup>-5</sup>

Таблиця 4.2 –Середній вміст домішок

Домішка	Вміст за об'ємом, %
Метан CH <sub>4</sub>	1,5·10 <sup>-4</sup>
Окис вуглецю CO	от 0 до слідів
Сірчистий газ SO <sub>2</sub>	от 0 до 10 <sup>-4</sup>
Оксид азоту N <sub>2</sub> O	5·10 <sup>-5</sup>
Двоокис азоту	от 0 до 2·10 <sup>-4</sup>
Радон Rn	6·10 <sup>-18</sup>
Йод I <sub>2</sub>	от 0 до 10 <sup>-6</sup>

Основні гази у сухому повітрі містяться практично постійно. У порівняно широких межах змінюється вміст вуглекислого газу CO<sub>2</sub>.

У ХХ столітті була відзначена стійка тенденція до підвищення концентрації вуглекислого газу в атмосфері (від 0,029% у 1900 р. до 0,033% у 1980 р. ). У 2013 р. вміст вуглекислого газу в атмосфері Землі коливався в межах від 0,0393 до 0,0397%.

#### 4.2 Вплив атмосфери на процеси дистанційного зондування Землі

Вплив земної атмосфери спричинює значні спотворення інформації, отриманої із сенсорних пристроїв, які встановлені на літаючих апаратах. Розглянемо основні фактори, що спричинюють спотворення при ДЗЗ. Ефект Фарадея. Внаслідок ефекту Фарадея виникає фазова дисперсія сигналів. Ефект Фарадея пов'язаний із тим, що при проходженні через

атмосферу лінійно поляризована хвиля під дією магнітного поля Землі розщеплюється на дві складові, які поширюються в іоносфері із різними швидкостями. У результаті додавання цих складових у точці прийому, площина поляризації результуючої хвилі буде повернута на певний кут. Величина цього кута залежить від концентрації електронів в іоносфері та напруженості геомагнітного поля вздовж шляху проходження радіохвиль в іоносфері.

Поглинання в гідрометеорах. У діапазонах частот вище 500 МГц основне поглинання визначається газами тропосфери – киснем і водяними парами, а також дощем, снігом, туманом та іншими опадами. Інфрачервоне випромінювання, проходячи через атмосферу, вибірково поглинається, в зв'язку із чим теплову зйомку можна вести тільки у зоні розміщення так званих "вікон прозорості" (рис. 4.1) - місць пропускання інфрачервоних променів. Дослідним шляхом виділено чотири основних вікна прозорості (в мкм): 0,74-2,40; 3,40-4,20; 8,0-13,0; 30,0-80,0. Деякі дослідники виділяють більше число вікон прозорості. У першому вікні (до 0,84 мкм) використовується відбите сонячне випромінювання.

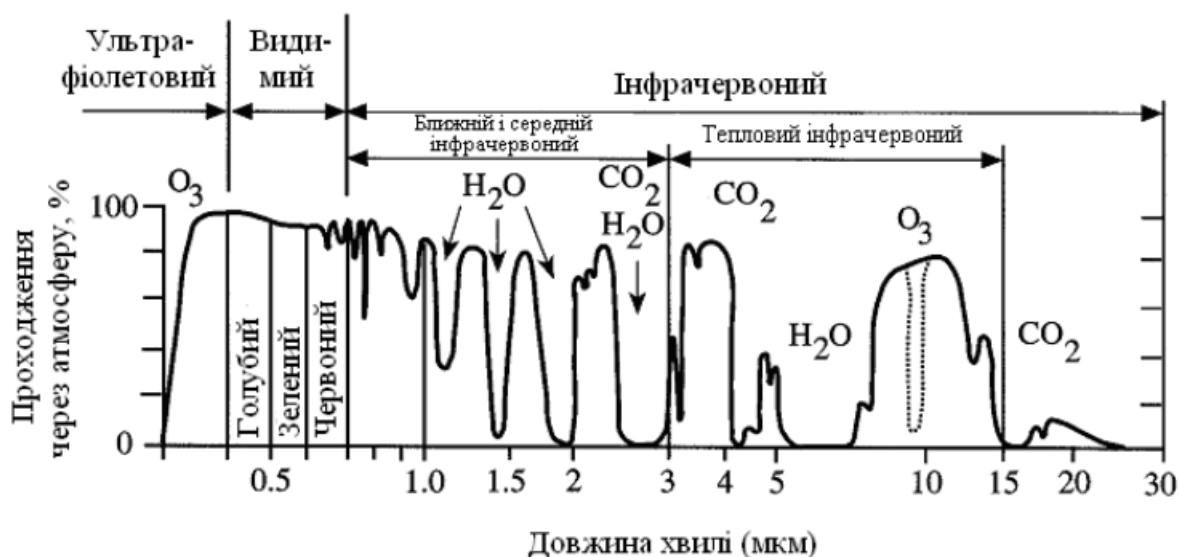


Рисунок 4.1 – Спектр затухання електромагнітних хвиль в атмосфері

В оптичному діапазоні найбільші завади виникають через хмарність. Як правило, в кожен момент часу вона покриває більше 50% поверхні земної кулі. Для планування часу проведення зйомок складають карти, які характеризують глобальний розподіл зон стійкої хмарності. Відносна дисперсія виникає внаслідок проходженні через іоносферу широкопasmового сигналу, який спотворюється внаслідок поширення його спектральних складових із різною швидкістю. Це призводить до виникнення різниці затримок між нижньою та верхньою частотами спектру сигналу. Розсіювання променів в атмосфері. Даний ефект полягає у відбитті чи заломленні випромінювання частинками молекул газів (аерозолів) та гідрометеорами (водяні каплі, сніг, град, тощо). Найбільше вплив розсіювання проявляється у синій та голубій зонах видимого спектру від 0,38 мкм до 5 мкм. При цьому

знижується контрастність зображення, спотворюються кольори об'єктів. Саме внаслідок переважаючого впливу розсіювання в цій ділянці діапазону небо набирає синього забарвлення. У залежності від довжини хвилі розрізняють розсіювання Мі, Релея та неселективне. Рефракція – атмосферно-оптичне явище, яке виникає внаслідок заломлення світових променів в атмосфері. Рефракція призводить до викривлення траєкторії сигналу при його проходженні через атмосферу. Іоносферна рефракція обернено-пропорційна квадрату частоти і стає дуже малою на частотах, менших 5 ГГц. Тропосферна рефракція не залежить від частоти. Прикладами рефракції є сплюснута форма дисків Місяця та Сонця.

#### **4.3 Показник заломлення та його градієнт як «геодезичні» параметри атмосфери**

Сучасні засоби геодезичних вимірів засновані на визначенні тим або іншим методом двох геометричних характеристик траєкторії поширення електромагнітного випромінювання.

При кутових вимірах об'єктом вимірів служить напрямок поширення випромінювання, при лінійних - його дальність.

У процесі проходження в атмосфері електромагнітне випромінювання зазнає наступних змін:

- 1) зменшується його інтенсивність (потужність);
- 2) змінюються швидкість та напрямок.

Зниження потужності (загасання) сигналу в атмосфері обумовлено двома основними процесами: поглинанням та розсіюванням випромінювання молекулами повітря та атмосферними домішками.

У запиленому середовищі, при тумані тощо. згасання електромагнітних хвиль може бути значним, інтенсивність випромінювання падає.

Зменшення інтенсивності сигналу призводить до зниження точності як кутових, так і лінійних вимірів.

У процесі проходження в атмосфері електромагнітне випромінювання зазнає наступних змін:

- 1) зменшується його інтенсивність (потужність);
- 2) змінюються швидкість та напрямок.

Зниження потужності (загасання) сигналу в атмосфері обумовлено двома основними процесами: поглинанням та розсіюванням випромінювання молекулами повітря та атмосферними домішками. У запиленому середовищі, при тумані тощо. згасання електромагнітних хвиль може бути значним, інтенсивність випромінювання падає. Зменшення інтенсивності сигналу призводить до зниження точності як кутових, так і

лінійних вимірів. Послабити вплив загасання сигналу в атмосфері на точність вимірювань дозволяють методичні та апаратурні рішення. Зупинимось докладніше на механізмі впливу змін швидкості та напрямки поширення випромінювання.

Відповідно до принципу Ферма світло поширюється найкоротшим оптичним шляхом. Тобто. тим шляхом, проходження якого займе найменший час.

При поширенні в однорідних середовищах випромінювання розповсюджується по прямій із незмінною швидкістю. У неоднорідній атмосфері густина повітря змінюється від точки до точки. Відповідно до принципу Ферма, електромагнітний промінь відхиляється у напрямку менш щільних шарів, де швидкість вища, а час поширення менше. Явище заломлення електромагнітних променів в атмосфері називають атмосферою кутовою рефракцією. Явище зміни швидкості поширення випромінювання, що спотворює результати лінійних вимірювань, наз. далекомірною рефракцією. Кутова рефракція впливає точність як кутових, і лінійних вимірів. При кутових вимірах в неоднорідній атмосфері промінь неодноразово змінює свій напрямок і являє собою просторову криву, що отримала назву рефракційної кривої. Спостерігач бачить об'єкт по дотичній до останнього елементу рефракційної кривої в точці спостереження А (рис.4.2).

Кут між напрямком на справжнє В і здається В' положення об'єкта спостережень називають кут рефракції.

Кут рефракції  $r$  застосовують як основну кількісну характеристику кутової рефракції. Геодезиста ж цікавлять проекції кута рефракції на горизонтальну та вертикальну площину – кути горизонтальної (бічної) та вертикальної рефракції. При лінійних вимірах кутова рефракція проявляється через рефракційне подовження траєкторії.

Шлях променя довший за вимірювану відстань. Вплив рефракційного подовження траєкторії в порівнянні з впливом зміни швидкості настільки незначний, що в переважній більшості випадків їм нехтують.

Надалі, говорячи про вплив атмосфери на точність лінійних вимірювань, маємо на увазі лише вплив далекомірної рефракції. Пояснимо вплив далекомірної рефракції на точність вимірювань відстаней. У світло- і радіодальнометрії визначають час  $\tau$  поширення випромінювання по дистанції. У випадку, коли джерело випромінювання є об'єктом спостережень (супутникове позиціонування), відстань  $D$  отримують як добуток швидкості  $v$  на час  $\tau$ :

$$D = v \cdot \tau \quad (4.1)$$

В електронній тахеометрії, коли джерело і приймач випромінювання знаходяться на одному кінці дистанції, а на другому розташовується відбивач:

$$D = (v \cdot \tau) / 2 \quad (4.2)$$

Дальномірна рефракція призводить до помилки визначення результуючої для дистанції швидкості, яка використовується у формулах (4.1) і (4.2). Далекомірна та кутова рефракція мають однакову природу: виникають внаслідок зміни щільності атмосфери.

Щільність середовища характеризує показник його заломлення:

$$n = c / v \quad (4.3),$$

де  $c$  - швидкість світла у вакуумі, що дорівнює 299 792 458 м/с;

$v$  — швидкість випромінювання у середовищі з показником заломлення  $n$ .

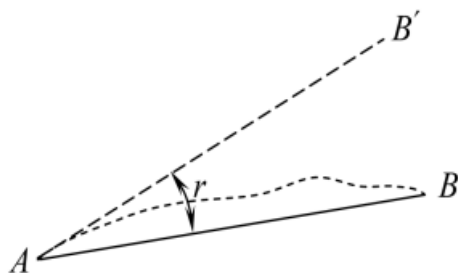


Рисунок 4.2 – Кут рефракції

До відома. Говорячи про показник заломлення, слід уточнювати про яке значення швидкості  $v$  йдеться у формулі (4.3). Жоден електромагнітний сигнал не можна розглядати як строго монохроматичне випромінювання (потік хвиль однієї частоти). Електромагнітний сигнал є сукупністю хвиль різної частоти, кожна з яких поширюється зі своєю швидкістю.

У цьому вся полягає дисперсії електромагнітних хвиль.

Можна сміливо стверджувати, що проблема обліку впливу атмосфери на результати кутових і лінійних вимірів виникає лише за наявності градієнта показника заломлення.

При лінійних вимірюваннях показник заломлення необхідний для визначення швидкості:  $v = c/n$ , визначити його в однорідному середовищі нескладно, проблема ж полягає в обліку його змін уздовж траєкторії.

При лінійних вимірах у неоднорідній атмосфері стоїть завдання визначення середньоінтегрального (результуючого для траси) значення показника заломлення:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{D} \int_0^D n(x) dx, \quad (4.4)$$

де  $n(x)$  - значення показника заломлення у поточній точці траєкторії.

Таким чином, показник заломлення та його градієнт визначають характер та ступінь впливу атмосфери на результати геодезичних вимірів.

Всі процеси в атмосфері, закономірності у розподілі метеовеличин цікавлять геодезиста в тій мірі, в якій вони впливають на просторову та тимчасову мінливість показника заломлення його градієнта.

#### 4.4 Вимоги до точності визначення показника заломлення та його градієнта при геодезичних вимірах.

##### Лінійні виміри

Відповідно до формул (4.2) і (4.3):

$$D = \frac{v\tau}{2} = \frac{c\tau}{2\langle n \rangle}. \quad (4.5)$$

У формулі (4.5) з метою спрощення точності розрахунків показник заломлення вздовж візирного променя вважатимемо постійним, тобто  $\langle n \rangle = n = \text{const}$ .

Якщо виразити залежність (4.5) у диференціальному вигляді, то можна отримати уявлення про характер впливу змін  $\Delta n$  показника заломлення на виміряну дальність  $D$ , для наочності інші аргументи функції (8) вважатимемо постійними:

$$\Delta D = \frac{dD}{dn} \Delta n = -\frac{c\tau}{2n^2} \Delta n = -\frac{c\tau}{2n} \cdot \frac{1}{n} \Delta n \approx -D \cdot \Delta n. \quad (4.6)$$

Згідно з формулою (4.6) збільшення показника заломлення ( $\Delta n > 0$ ) призведе до зменшення відстані, що пройдена за час  $\tau$ ; при зменшенні показника заломлення ( $\Delta n < 0$ ), швидкість зростає, і за час  $\tau$  сигнал пройде більшу відстань. Вплив змін показника заломлення прямо пропорційне довжині траєкторії  $D$ .

Скориставшись формулою середньої квадратичної помилки функції загального виду, отримаємо формулу, що зв'язує середні квадратичні помилки визначення показника заломлення  $m_n$  та відстані  $m_D$ :

$$m_D = \sqrt{\left(\frac{dD}{dn}\right)^2 m_n^2} = D m_n. \quad (4.7)$$

Для вимірювання відстані з точністю  $m_D$  показник заломлення слід визначати із середньої квадратичної помилки:

$$m_n = \frac{m_D}{D}. \quad (4.8)$$

Формула (4.8) дає можливість оцінити вимоги до точності визначення показника заломлення, якщо задані вимоги до точності лінійних вимірювань, і приблизно відома довжина вимірюваної дистанції.

Показник заломлення та його градієнт як функції метеопараметрів

Як було зазначено вище, проблема обліку впливу атмосфери виникає внаслідок неоднорідності атмосфери, вважаючи при цьому, що визначення показника заломлення в однорідному середовищі – нескладна задача, яка зводиться до визначення показника заломлення в точці.

Для визначення показника заломлення використовують результати точкових вимірювань метеовеличин, які функціонально пов'язані з показником заломлення. В оптичному діапазоні показник заломлення є функцією температури, тиску, вологості повітря

та довжини хвилі випромінювання. При вимірюваннях у широкому діапазоні світлових хвиль формула для визначення ефективного групового індексу заломлення має вигляд:

$$N = (n - 1)10^6 = 83,11 \frac{p}{T} - 11,4 \frac{e}{T}, \quad (4.9)$$

де  $T$ ,  $p$  і  $e$  — температура, тиск і вологість (парціальний тиск водяної пари) повітря К і гПа. При супутникових вимірах використовують радіохвилі. У верхніх шарах атмосфери показник заломлення радіохвиль, які у супутниковому позиціонуванні, залежить від концентрації електронів.

Залежність індексу заломлення від метеопараметрів у радіодіапазоні описує формула Фрума-Ессена:

$$N = (n - 1)10^6 = 73,63 \frac{p}{T} - 12,92 \frac{e}{T} + 371914 \frac{e}{T^2}. \quad (4.10)$$

Зміна метеовеличин призведе до зміни показника заломлення:

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial N}{\partial p} \Delta p + \frac{\partial N}{\partial e} \Delta e. \quad (4.11)$$

Точність визначення показника заломлення в точці залежить від точності вимірювання температури, тиску та вологості повітря. Скористаємося формулою середньої квадратичної помилки функції загального виду для того, щоб виразити помилку визначення індексу заломлення через помилки визначення аргументів  $T$ ,  $p$  і  $e$ :

$$m_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial T}\right)^2 m_T^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial p}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial e}\right)^2 m_e^2}. \quad (4.12)$$

Визначивши за формулами (4.9) і (4.10) часткові похідні індексу заломлення, можна отримати уявлення про його залежність від температури, тиску та вологості повітря, а також про ступінь мінливості показника заломлення в реальній атмосфері. Значення часткових похідних (табл. 4.3) обчислені для нормальних умов ( $T$  - 293,15 К,  $p$  - 1013,25 гПа,  $e$  - 13,33 гПа).

Аналіз даних, наведених у таблиці 4.3, показує, що зміна температури на один градус призведе до зміни показника заломлення на 1 N-од., зміна тиску на 1 гПа - до зміни показника заломлення на 0,3 N-од., вплив вологості в оптичному діапазоні на два порядки менше, ніж у радіодіапазоні, і в ряді випадків їм можна знехтувати.

Замінивши прирости у формулі (4.12) градієнтами отримаємо наближену формулу, що виражає градієнт показника заломлення світлових хвиль через градієнти метеовеличин за нормальних умов (скористаємося другою графою табл. 4.3):

$$gradn = -1 \cdot 10^{-6} gradT + 0,3 \cdot 10^{-6} gradp - 0,04 \cdot 10^{-6} grade. \quad (4.14)$$

Таблиця 4.3 – Значення часткових похідних показника заломлення в оптичному та радіодіапазонах

Похідна	Оптичний діапазон	Радіодіапазон
$\partial n/\partial T$	$-1 \cdot 10^{-6}/\text{К}$	$-1,3 \cdot 10^{-6}/\text{К}$
$\partial n/\partial p$	$0,3 \cdot 10^{-6}/\text{гПа}$	$0,3 \cdot 10^{-6}/\text{гПа}$
$\partial n/\partial \epsilon$	$0,3 \cdot 10^{-6}/\text{гПа}$	$4,3 \cdot 10^{-6}/\text{гПа}$

Виразимо середню квадратичну помилку визначення градієнта показника заломлення  $m_{gradn}$  через помилки градієнтів метеовеличин:

$$m_{gradn} = \sqrt{\left(\frac{\partial(gradn)}{\partial(gradT)}\right)^2 m_{gradT}^2 + \left(\frac{\partial(gradn)}{\partial(gradp)}\right)^2 m_{gradp}^2 + \left(\frac{\partial(gradn)}{\partial(grade)}\right)^2 m_{grade}^2} \quad (4.15)$$

Часткові похідні у формулі (4.15) дорівнюють коефіцієнтам при наступних аргументах лінійної функції (4.14):

$$m_{gradn} = \sqrt{(-1 \cdot 10^{-6})^2 m_{gradT}^2 + (0,3 \cdot 10^{-6})^2 m_{gradp}^2 + (-0,04 \cdot 10^{-6})^2 m_{gradT}^2} \quad (4.16)$$

#### 4.5 Вплив температури на результати геодезичних вимірів.

Температура та її зміни в часі та просторі визначають формування полів показника заломлення в оптичному діапазоні та в значній мірі впливають на характер поширення радіохвиль. Статистичні закономірності у розподілі температури використовують у геодезії для послаблення впливу атмосфери на точність вимірів. Розподіл температури в атмосфері характеризується значною мінливістю. На відміну від тиску температура з висотою може зростати і падати, яскраво виражені місцеві (мікромасштабні) неоднорідності у розподілі температури по горизонталі, мають місце періодичні та неперіодичні зміни. У свою чергу, перебіг температури в часі і просторі залежить від двох основних факторів — надходження тепла в атмосферу та інтенсивності теплообміну в ній.

##### Тепловий баланс атмосфери . Сонячна радіація

Земна атмосфера і Земля в цілому отримують тепло за рахунок внутрішніх та зовнішніх джерел. Основними внутрішніми постачальниками тепла до земної поверхні ,це-розпад радіоактивних елементів і гравітаційна диференціація Землі, які супроводжуються виділенням енергії. Однак частку внутрішніх джерел припливу енергії до земної поверхні припадає лише близько 0,023%.

До зовнішніх джерел відносяться потоки енергії, що надходять від Сонця та інших зірок і космічних тіл. Однак тепло, що надходить від Сонця, у 30 млн разів потужніше, що дозволяє вважати сонячну радіацію основним зовнішнім джерелом тепла для Землі та атмосфери. При середній відстані від Землі до Сонця на поверхню, розташованій на верхній



межі атмосфери перпендикулярно до сонячних променів, надходить 1367 Вт/м<sup>2</sup> сонячної радіації (1 астрономічна одиниця = 149 597 870 700 м). Цю величину називають сонячною сталою. Залежно від напрямку поширення в атмосфері розрізняють пряму, розсіяну та відбиту сонячну радіацію.

Прямою радіацією називають потік паралельних променів, направлений від Сонця до поверхні Землі. До зміни напрямку потоку сонячної радіації призводить розсіювання та відображення сонячних променів молекулами повітря, водяної пари, льоду, атмосферними домішками та власне поверхнею Землі.

Відбита радіація направлена до зовнішньої межі атмосфери. Розсіяна радіація разом із прямою становлять сумарну радіацію, яка поглинається частково атмосферою, частково земної поверхнею і витрачається, переважно, на їх нагрів.

### **Радіаційний баланс атмосфери.**

Під радіаційним балансом  $R_A$  атмосфери розуміють співвідношення потоків радіації, що поглинаються та випромінюються атмосферою.

Випромінювання атмосфери поділяється на два потоки - зустрічне випромінювання, спрямоване до земної поверхні, і потік довгохвильового випромінювання в космічний простір.

Випромінювання земної поверхні з відрахуванням зустрічного випромінювання атмосфери називають ефективним випромінюванням  $E_{ef}$ .

Ефективне випромінювання земної поверхні та поглинена атмосферою частина прямої сонячної радіації  $\Delta Q$  забезпечують прихід радіації в атмосферу.

До втрат радіації призводить потік випромінювання атмосфери в космічний простір  $E_\infty$ :

$$R_A = (\Delta Q + E_{ef}) - E_\infty.$$

Якщо прийняти приплив радіації на зовнішню границю атмосфери за 100 одиниць, то, в середньому, на частку поглиненої атмосферою сонячної радіації  $\Delta Q$  припадає +20 одиниць, ефективне випромінювання земної поверхні  $E_{ef}$  становить близько +15 одиниць, а втрати радіації рахунок випромінювання  $E_\infty$ , що йде, будуть рівні -65.

У середньому радіаційний баланс атмосфери негативний і дорівнює -30. Втрати тепла на 75% компенсуються за рахунок виділення тепла при конденсації водяної пари в атмосфері та на 25% за рахунок турбулентного перенесення тепла від підстилаючої поверхні в атмосферу. У середньому тепловий баланс атмосфери наближається до нуля.

Підсумовуючи сказане, виділимо основні джерела тепла в атмосфері:

- пряма та розсіяна сонячна радіація, яка поглинається атмосферою;
- випромінювання від земної поверхні;

- енергія, що виділяється від конденсації водяної пари в атмосфері;
- тепло, що надходить внаслідок турбулентного теплообміну.

Атмосфера втрачає тепло за рахунок:

- відбиття сонячної радіації;
- поглинання сумарної радіації земною поверхнею;
- зустрічного випромінювання атмосфери;
- випромінювання у космічний простір.

Горизонтальний градієнт температури

Наявність горизонтальних градієнтів температури позначається точності вимірювань у планових геодезичних мережах.

У кутових вимірюваннях горизонтальний градієнт температури – основний фактор формування полів бічної рефракції.

У лінійних вимірюваннях горизонтальний градієнт температури у напрямге поширення сигналу призводить до помилки визначення показника заломлення.

Залежно від характеру та механізму виникнення розрізняють широтні, синоптичні, регіональні та місцеві горизонтальні градієнти температури (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Горизонтальні градієнти температури і відповідні помилки геодезичних вимірювань

Умови вимірювань	Висота над поверхнею	Час	Градієнт "С/м	Напрямок градієнта	$\Delta D$ , в мм	$r''$
Місцеві градієнти						
Над берегом річки Дністер, літо, ясно, штиль	1,5 м над берегом,	8 год	0,004	До берега		0,4
	5,0 м над водою (на одному рівні)	14 год	0,018	До річки		1,9
		20 год	0,002	До берега		0,2
Над межею бетону і травянистого поля аеродрому	1,0 м	(22-23)год	0,020	Від бетону		2,1
	1,5 м		0,025			2,6
Над межею рідкого сухого лісу і болота, літо, штиль, ясно	1,5 м	В день	0,10	До болота		10,3
		В ночі	0,08	До лісу		8,3
Поблизу нагрітої стіни будівлі, ясно, слабкий вітер	0,4 м від стіни	16 ч	1,7	Від стіни		175
	1 м від стіни	опівдні	0,27	Від стіни		28

Регіональні градієнти						
У передгір'ях північного Кавказу			$0,11 \cdot 10^{-4}$	В сторону гір	$0,11 \cdot 10^{-4}$	0,001

продовження табл 4. 4

Над берегом Ладозького озера	2 м	7 год 13 год	$1,54 \cdot 10^{-4}$ $1,45 \cdot 10^{-4}$	До берега До озера	$1,54 \cdot 10^{-4}$ $1,45 \cdot 10^{-4}$	0,016 0,015
Синоптичні градієнти						
Фронтальна зона між теплим і холодним повітрям	У вільній атмосфері		$1,0 \cdot 10^{-4}$		$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,010
Широтний градієнт						
Середньорічний широтний градієнт	У вільній атмосфері		$0,07 \cdot 10^{-4}$	До півночі	$0,07 \cdot 10^{-4}$	0,0007

Розподіл приходу сонячної радіації на земній кулі утворює широтні градієнти температури. Широтні градієнти визначають зональність глобального поля температури. Регіональні градієнти виникають межі розділу різко відмінних за теплофізичними властивостями великих поверхонь (берегова лінія морів і океанів, передгір'я великих гірських систем, тощо.). Широтні та регіональні градієнти виявляються під час аналізу багаторічних даних про розподіл температури Землі.

При лінійних вимірюваннях на відстані 5 км (дальність дії електронних тахеометрів) регіональний градієнт температури порядку  $10^{-4}$  призведе до помилки визначення показника заломлення, що дорівнює  $10^{-4}$  N-од (див. табл. 4.4), відповідна помилка при визначення відстані, згідно з формулою (4.7), дорівнює:

$$\Delta D = \pm D \cdot \Delta n = \pm 5000 \text{ м} \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-6} = 0,5 \text{ мм.}$$

Для оцінки впливу регіональних та широтних градієнтів на точність вимірювання горизонтальних кутів скористаємося формулами (4.14) та (4.2):

$$\text{grad } n = -1 \cdot 10^{-6} \text{ grad } T = -10^{-6} \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м} = 10^{-4} N_{\text{од}} / \text{м}$$

$$\text{Тоді : } r'' = -(\rho'' \cdot D) / 2 \cdot \text{grad } n = -(206265'' \cdot 5000 \text{ м}) / 2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-6} / \text{м} = 0,05''.$$

Результати обчислень показують, що врахування широтних і регіональних градієнтів необхідний лише у протяжних геодезичних мережах, де вплив цього виду горизонтальних градієнтів температури позначиться в силу його систематичного характеру.

На формування місцевих (локальних) горизонтальних температурних градієнтів впливають мікромасштабні фактори, які розглянемо в Темі 6. Тут зазначимо лише, що місцеві градієнти за абсолютною величиною перевершують макромасштабні градієнти на порядки і досягають кількох градусів на метр (див. табл. 4.4).

На формування місцевих (локальних) горизонтальних температурних градієнтів впливають також і мікромасштабні фактори. Зазначимо, що місцеві градієнти по абсолютній величині перевершують макромасштабні градієнти на порядки і досягають кількох градусів на метр (див. табл. 4.4).

Їх вплив на точність вимірювання відстаней і горизонтальних кутів може бути помітним навіть на незначних відстанях і обов'язково має прийматися до уваги при проектуванні геодезичних мереж.

Типовим місцевим температурних градієнтів є виражений добовий хід.

Наприклад, на кордоні водойма-суша: вдень градієнти спрямовані у бік водної поверхні, яка холодніша за нагріту берегову лінію; вночі — вода, яка за день акумулювала значну кількість тепла, віддає його приповерхневому шару повітря, як наслідок — повітря над водоймою тепліше, градієнт направлений у бік берега.

#### **Вплив тиску атмосферного повітря.**

Зміна тиску повітря з висотою використовується при барометричному нівелюванні. Велика та не постійна мінливість тиску повітря в горизонтальному та вертикальному напрямках знижує точність барометричного нівелювання. Для обліку мінливості тиску влаштовують барометричні станції, де ведеться безперервне спостереження зміною тиску одному місці у районі робіт. Залежність між атмосферним тиском та висотою точок місцевості виражається спрощеною формулою Б. Бабіне, що застосовується при геофізичній розвідці:

$$h = 7991 \cdot \frac{\Delta p}{p_{cp}} (1 + \alpha t^0), \quad (4.17)$$

де  $h$  - різниця висот двох точок,  $\Delta p$  - різниця атмосферного тиску між ними,  $p_{cp}$  - середній тиск для двох точок,  $\alpha$  - коефіцієнт розширення повітря, рівний 0,004,  $t^0$  - середня температура для двох точок.

Вплив вітру. Сильний вітер впливає на стійкість інструментів та рейок. Піднімаючи пил, пісок та сніг, він знижує дальність видимості. Працюючи на сигналах доводиться вводити поправку на вітер, оскільки навіть вітер порівняно невеликої швидкості призводить до коливання сигналів, що знижує точність геодезичних вимірів.

Вплив вологості повітря та опадів. Дуже висока відносна вологість, а також опади можуть викликати пошкодження інструментів, таких як іржа, дуже низька відносна вологість може призвести до висихання мастила та розтріскування дерев'яних частин інструментів.

Коливання вологості призводить до деформації аерознімків, величина якої може досягати 1%. Сказане вище змушує вживати відповідних профілактичних заходів для збереження інструментів та матеріалів у робочому стані.

Опади унеможливають польові роботи, тому необхідно враховувати за кліматичними показниками середню кількість днів з опадами в районі робіт, на час яких планувати камеральні роботи.

Вплив хмарності. Хмарність може перешкодити виконанню аерофотозйомки. Тому при плануванні аерофотозйомки необхідно вивчити річний та добовий хід хмарності в районі робіт та підрахувати кількість аерофотознімальних днів. Якщо виходити із середньодобової хмарності, то для підрахунку числа аерофотознімальних днів можна використовувати формулу П. А. Молчанова, запропоновану ще 1932 р.:

$$m = q[S - (n + p)] + n, \quad (4.18)$$

де  $m$  - число аерофотознімальних днів,  $n$  - число ясних днів,  $p$  - число напівясних днів,  $S$  - число днів у місяці,  $q$  - коефіцієнт, що вказує частину погожих днів, придатних для аерофотозйомки. Останню величину можна підрахувати, якщо з-поміж днів із загальною хмарністю виключити число днів із нижньою хмарністю, дані по якій можна знайти в кліматичних довідниках.

Підсумовуючи, сформулюємо деякі загальні принципи організації геодезичних вимірів, дотримання яких дозволить послабити вплив атмосфери. Точність геодезичних вимірів залежить від ступеня неоднорідності атмосфери вздовж вимірюваної дистанції. Неоднорідність атмосфери по відношенню до характеру поширення електромагнітного випромінювання характеризує градієнт показника заломлення. Точність лінійних вимірювань знижується за наявності градієнта показника заломлення вздовж вимірюваної дистанції.

Точність кутових вимірів залежить від величини градієнта показника заломлення в площині вимірів у напрямку нормальному до візирного променя. Усі методи обліку впливу атмосфери, які знайшли застосування в геодезичному виробництві, базуються на статистичних закономірностях просторового та тимчасового розподілу параметрів атмосфери. Врахувати можливі зміни стану атмосфери вздовж вимірюваної дистанції вони не дозволяють. У прикордонному шарі атмосфери зміни показника заломлення вздовж вимірюваної дистанції виникають внаслідок зміни характеру поверхні, і висоти візирного променя над нею.

При тригонометричному нівелюванні слід пам'ятати, що помилки за вертикальну рефракцію можна зменшити, якщо зменшити протяжність траси, збільшити висоту візирного променя над поверхнею та здійснювати вимірювання в хмарну і вітряну погоду.

На симетричних за властивостями трасах хороші результати дає використання одночасного двостороннього нівелювання (коефіцієнти рефракції в прямому та зворотному напрямку в цьому випадку практично рівні, що дозволяє виключити вплив рефракції).

У точному і високоточному геометричному нівелюванні при нівелюванні з середини слід уникати такої підстановки приладу, при якій траси у напрямку на задню і передню рейку різко відрізняються висотою візирного променя і характером підстилаючої поверхні.

Для зменшення впливу горизонтальної рефракції при проектуванні кутових і лінійно-кутових планових мереж слід уникати розташування протяжних візирних ліній уздовж кордону кардинально різних поверхонь. При високих вимогах до точності наземних лінійних вимірювань, лише у випадку однорідної підстилаючої поверхні та відсутності перепадів рельєфу можна обмежитися вимірюваннями температури та тиску в точці стояння прибору .

Надійність обліку впливу атмосфери при супутникових вимірюваннях підвищується за рахунок використання відносного методу супутникових вимірів та двочастотних приймачів.

## Тема 5. Геодезична інтерферометрія

### 5.1 Основні положення

Подібно до лазерного сканування на базі літаків, радіолокаційне дистанційне зондування на основі супутника є активним методом дистанційного зондування і відрізняється тим, що його можна використовувати незалежно від часу доби, умов освітлення та стану атмосфери (хмарність, опади). Радіолокаційна зйомка забезпечує отримання зображень земної поверхні та об'єктів, розташованих на ній, незалежно від погодних умов, у денний та нічний час завдяки принципу активної радіолокації.

Радіолокаційні методи дистанційного зондування Землі активно розвиваються протягом кількох останніх десятиліть. В останні роки досягнуто метрову та субметрову просторову роздільну здатність зображень, зйомка здійснюється в різних діапазонах спектру радіохвиль, збільшується кількість знімальних режимів, у тому числі й у декількох (двох чи чотирьох) поляризаціях одночасно.

Розроблено безліч алгоритмів перетворення радіолокаційних даних, які дозволяють отримувати похідні зображення, що виявляють окремі характеристики об'єктів місцевості.

При всіх перевагах радіолокаційні дані значно меншою мірою використовуються в географічних дослідженнях, ніж дані оптичного діапазону, основною причиною чого є їх висока вартість, складність обробки і дешифрування.

Разом з тим, ефективність застосування радіолокаційних даних у широкому спектрі галузевих завдань наук про Землю, поширення програмних засобів їх обробки, поява у 2014 р. вільно поширюваних даних із супутника Sentinel-1A, а в 2016 р. - Sentinel-1B, зумовлюють актуальність їх застосування.

Взагалі радар можна розуміти як метод, за допомогою якого інформація про віддалені об'єкти може бути отримана у мікрохвильовому діапазоні із відображених або автоматично відображених електромагнітних хвиль або хвиль, які автоматично повертаються .

Розрізняють первинні радари (Primärradar) , або так звані радарні системи (Radaranlagen), які працюють виключно по принципу радару і в яких відбувається тільки пасивне відображення на цільовому об'єкті і вторинні радари, які працюють із активними об'єктами цілі.

Також розрізняють активні та пасивні методи дистанційного зондування.

У той час як пасивні системи вимірюють випромінювання, що випромінюється відповідною поверхнею ділянки в мікрохвильовому діапазоні, активні системи посиляють мікрохвилі, що генеруються безпосередньо системою запису, на поверхню ділянки і зареєструють відбите випромінювання.

Надалі в цій темі будемо розглядати лише активні мікрохвильові системи.

На відміну від оптичних систем, використання спектра мікрохвильового випромінювання (довжина хвилі: 1-100 см) дає можливість отримувати дані, незалежні від часу доби і майже незалежних від погоди, оскільки мікрохвилі проникають у хмари, туман та дим. Тільки краплі води можуть послабити мікрохвилі.

Таким чином, спосіб забезпечує стабільний та безперервний процес збору даних. На основі аналізу часових рядів можна зробити висновки про зміни деяких параметрів на земній поверхні. Ще однією перевагою є значно більша глибина проникнення мікрохвиль у порівнянні з оптичним випромінюванням на поверхню ділянки.

Залежно від довжини хвилі та кута падіння випромінювання та певних властивостей поверхні місцевості, можна отримати інформацію про поверхню в шарі від декількох міліметрів до метрового діапазону.

Крім того, електричні властивості матеріалу земної поверхні впливають на поширення мікрохвиль і, відповідно, на випромінювання та відбиття. Ці властивості можна описати за допомогою так званої діелектричної проникності, і, як приклад, отримати інформацію про вологість поверхні.

В основі радіолокаційної системи лежить так званий ехо-принцип. Передача електромагнітних хвиль у вигляді імпульсів відбувається через передавальну антену. Сигнал частково відбивається на цільовому об'єкті залежно від властивостей матеріалу. Частина відбитих хвиль реєструється в антені як сигнал і автоматично визначається амплітуда, фаза, поляризація та час транзиту (проходження). На основі цих відображень зворотнього розсіювання можна отримати інформацію про природу земної поверхні.

Оскільки сигнал пов'язаний із складними процесами розсіювання і поглинання, то, коли він попадає на цільовий об'єкт, вимірювання амплітуди дає можливість зробити висновок про вид і стан зворотнього розсіювання. Вимірювання фази також дає можливість стверджувати про положення зворотнього розсіювання в тривимірному просторі, і уможливорює опис топографії. Обов'язковою умовою цього є використання SAR - інтерферометрії

## **5.2 Технологія радіолокаційної зйомки**

Радіолокаційна зйомка – це вид аерокосмічної зйомки, що здійснюється радіолокатором – активним мікрохвильовим датчиком, здатним випромінювати та приймати відбиті від земної поверхні поляризовані радіохвилі у певному діапазоні довжин хвиль (частот).



Тобто на радіолокаційних знімках яскравістю закодовано кількість відображеного випромінювання, яке створює радіолокатор, але не сонячного, як на звичних для нас знімках у видимому діапазоні.

Довжина та частота радіохвиль при зйомці земної поверхні

Авіаційна та космічна радіолокаційна зйомка здійснюється у міліметровому, сантиметровому та дециметровому діапазонах довжин хвиль ( $\lambda$ ).

Поряд із довжиною хвилі використовують поняття частоти ( $\nu$ ). Обидві ці величини пропорційні швидкості світла у вакуумі:  $c = \lambda\nu$ .

Для позначення діапазонів зйомки застосовуються спеціальні латинські сполучення букв:

Таблиця 5.1

Назва діапазону	Довжина хвилі (см)	Частота (ГГц)
Ka	0,75 - 1,18	40,0 - 26,5
K	1,19 - 1,67	26,5 - 18,0
Ku	1,67 - 2,4	18,0 - 12,5
X	2,4 - 3,8	12,5 - 8,0
C	3,9 - 7,5	8,0 - 4,0
S	7,5 - 15,0	4,0 - 2,0
L	15,0 - 30,0	2,0 - 1,0
P	30,0 - 100,0	1,0 - 0,3

Радіохвилі здатні проникати крізь хмари, що дозволяє отримувати радіолокаційні зображення незалежно від погодних умов.

У деяких випадках можливе отримання відбитого сигналу від об'єктів, розташованих нижче рівня поверхні, при цьому проникаюча здатність радіосигналу зростає зі збільшенням довжини хвилі. Так, на знімках радіолокацій під товщею пухких ґрунтів, наприклад піску, можуть бути виявлені ґрунтові води або деякі геологічні структури. При зондуванні деревної рослинності в X -діапазоні відбиття відбувається від крон дерев, а при збільшенні довжини хвилі - від гілок та стовбурів та від ґрунтового покриву

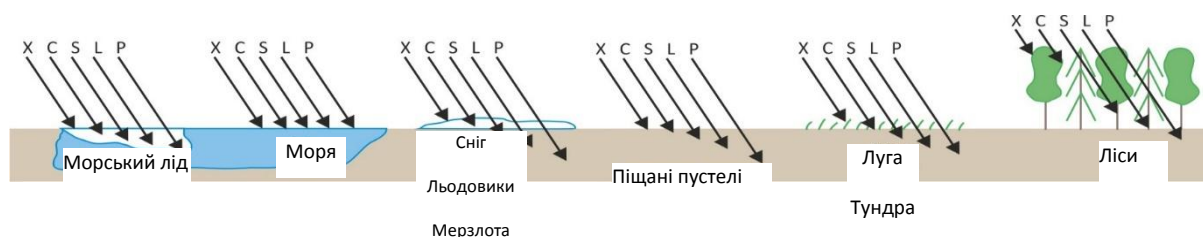


Рисунок 5.1 – Проникна здатність радіохвиль

## Поляризація сигналу

Поляризація електромагнітної хвилі визначається орієнтацією вектора напруженості електричного поля у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі.

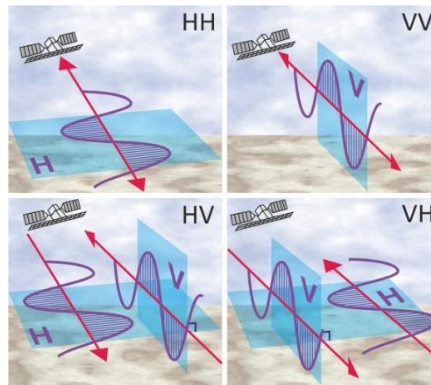


Рисунок 5.2 – Поляризація хвиль

Сигнал, який надсилається та приймається антеною радіолокатора, -поляризований: електричний вектор коливається, як правило, в одному з двох напрямків: горизонтальному  $H$  або вертикальному  $V$  (іноді при випромінюванні використовують кругову поляризацію). Розрізняють поляризацію узгоджену, при якій сигнал, що посилається і приймається поляризовані однаково ( $HH$ ,  $VV$ ), і перехресну (або крос-поляризацію), при якій напрями поляризації в надісланому і прийнятому сигналах взаємно перпендикулярні ( $HV$ ,  $VH$ ).

Поляризація хвилі може змінюватися по-різному внаслідок взаємодії з різними об'єктами місцевості, що дозволяє виявляти нові її властивості.

## 5.3 Геометрія радіолокаційної зйомки

Особливості геометричних властивостей зображень радіолокацій обумовлені нахилом зондуючого променя до поверхні.

У процесі польоту супутника по орбіті (напрямок руху носія радіолокаційної системи називають азимутом зйомки) антена з його борту випромінює радіохвилі у бік земної поверхні під кутом до неї (напрямок випромінювання називають дальністю).

Радіолокаційне зображення формується шляхом реєстрації відбитого поверхнею (зворотнього) сигналу по похилій дальності (цим терміном прийнято називати відстань від антени до поверхні).

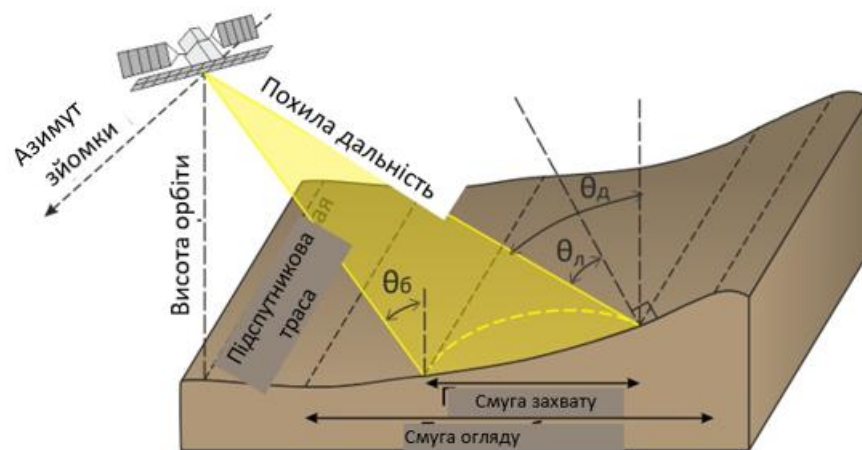


Рисунок 5.3 – Геометрія радіолокаційної зйомки

Похилою дальністю  $D$  називається відстань по прямій від радіолокаційної станції (РЛС) до цілі  $M$ . В активних РЛС основним методом визначення похилої дальності до цілі є вимірювання затримки відбитого сигналу порівняно з сигналом підсвічування – ця затримка дорівнює подвійній похилій відстані, розділеній на швидкість розповсюдження радіосигналу.

Зйомку безпосередньо під носієм (в Надір) не здійснюють, оскільки в цьому випадку дальності незначно відрізняються, зворотні сигнали від близьких об'єктів місцевості повертаються до радіолокатора майже одночасно і на знімку ці об'єкти практично не можливо розпізнати.

Кутом зйомки зазвичай називають кут падіння  $\theta$  (в англійській літературі прийнято використовувати термін *incidence angle*) - це кут між напрямком надісланого радіосигналу і відвісною лінією, яка проведена через точку, в яку направлений сигнал. Ділянки місцевості, що знімається, найменш віддалені від надиря, називають ближньою зоною, а найбільш віддалені – дальньою зоною.

Відповідні їм кути падіння -  $\theta_б$  і  $\theta_д$

У випадку нахиленої поверхні зондування розрізняють локальний кут падіння  $\theta_л$  – кут між напрямком радіохвилі та нормаллю до схилу.

Кут падіння хвилі для сучасних космічних радіолокаційних систем може варіюватись у великих межах: напр., для Radarsat-2 – від  $10^\circ$  до  $60^\circ$ , для ALOS-2/PALSAR-2 - від  $8^\circ$  до  $70^\circ$ . Весь діапазон кутів падіння визначає ширину полоси обзору – полюсу на земній поверхні, в межах якої може здійснюватися знімання. Більш вузька полюса на поверхні Землі, знімання якої здійснюється при дійсному положенні променя, називають полюсою охоплення .

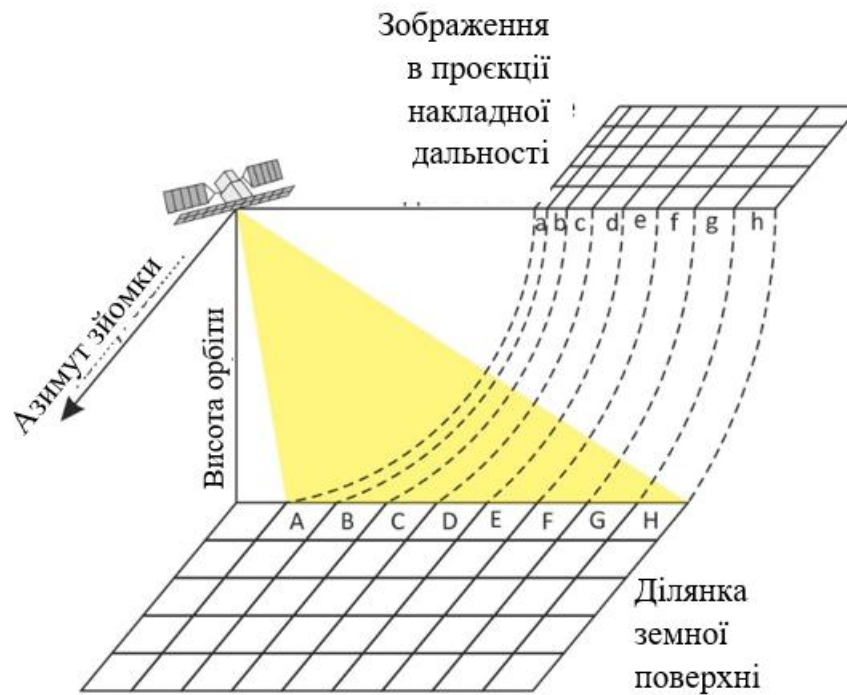


Рисунок 5.4 – Похила та наземна дальність

Якщо вихідні радіолокаційні зображення представлені в проєкції похилої дальності, то об'єкти, які розташовані ближче до радіолокатора, будуть виглядати більш стиснутими в порівнянні з об'єктами, розташованими далі від нього. Для правильного відображення місцевості зображення із проєкції похилої дальності перераховують в проєкцію наземної дальності.

Просторова роздільна здатність радіолокаційних зображень визначається властивостями антени і різниться у напрямку дії антени (дальності) та у напрямку руху супутника (азимуту).

Роздільна здатність по похилій дальності  $\rho_{sr}$  (в напрямку, перпендикулярному напрямку польоту) пропорційна тривалості імпульсу: чим коротший імпульс, тим вища роздільна здатність і обчислюється за формулою :

$$\rho_{sr} = \tau c / 2,$$

де  $\tau$  - тривалість імпульсу,  $c$  - швидкість світла у вакуумі.

При роботі зі знімками велике значення має просторова роздільна здатність (або розмір елемента роздільної здатності) на земній поверхні  $\rho_{gr}$ , яка визначається через роздільну здатність за похилою дальністю по формулі:

$$\rho_{gr} = \rho_{sr} / \cos(90 - \theta) = \rho_{sr} / \sin \theta,$$

де  $\theta$  - кут падіння хвилі .

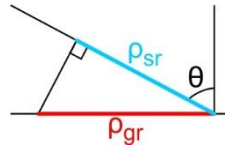


Рисунок 5.5 – Просторова роздільна здатність по похилій і наземній дальності

Просторова роздільна здатність радіолокаційних зображень по азимуту  $\rho_a$  легко визначається для радіолокаторів бічного огляду (РБО) за формулою  $\rho_a = S_{rd}\lambda/L$ , де  $S_{rd}$  - похила дальність до поверхні,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $L$  – горизонтальний розмір реальної антени.

Для таких систем можливості підвищення просторової роздільної здатності обмежуються розмірами антени.

Так, для космічних РБО, що здійснюють зондування в  $X$ -діапазоні ( $\lambda \approx 3$  см), при розмірах реальної антени 10 метрів і похилій дальності в декілька сотень кілометрів, роздільна здатність азимуту становитиме близько 2 км.

Найбільш високий просторовий дозвіл забезпечують радіолокатори із синтезованою апертурою (РСА).

Принцип їх роботи заснований на реєстрації та подальшої когерентної обробки сигналів, прийнятих від об'єкта місцевості А в процесі руху носія на ділянці орбіти, що називається інтервалом синтезування ( $L_{synt}$ ).

У загальному випадку дозвіл РСА за азимутом обчислюється за такою формулою:  
 $\rho_a = S_{rd}\lambda/2L_{synt}$ .

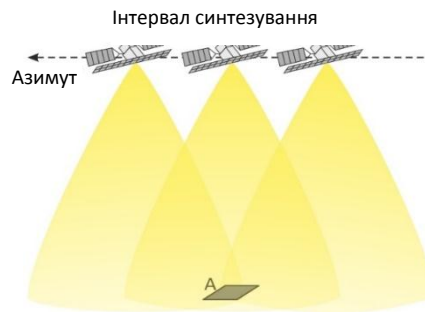


Рисунок 5.6 – Радіолокатор з синтезованою апертурою

Найбільш високу просторову роздільну здатність забезпечують радіолокатори із синтезованою апертурою (РСА). Принцип їх роботи заснований на реєстрації та наступній когерентній обробці сигналів, прийнятих від об'єкта місцевості А у процесі руху носія на ділянці орбіти, який називається інтервалом синтезування ( $L_{synt}$ ).

У загальному випадку просторова роздільна здатність РСА по азимуту обчислюється за формулою:  $\rho_a = S_{rd}\lambda/2L_{synt}$ .

На даний час вся радіолокаційна зйомка Землі з космосу здійснюється радіолокаторами із синтезованою апертурою.

## 5.4 Режими огляду космічних РСА

Радіолокаційна зйомка Землі здійснюється при різних режимах огляду місцевості: широкозахватному (*ScanSAR*), маршрутному (*StripMap*) і прожекторному (*SpotLight*).

Ці режими відрізняються технологією отримання зображень, їх просторовим охопленням та роздільною здатністю.

При широкозахватному режимі широкую смугу захоплення одержують шляхом послідовного перемикування імпульсу у напрямку зйомки. У цьому режимі смуга захоплення може досягати сотень кілометрів, проте просторова роздільна здатність низька - десятки і сотні метрів.

При маршрутному режимі зйомка здійснюється в межах однієї смуги, ширина якої сягає десятків кілометрів. Просторова роздільна здатність у такому випадку досягає кількох метрів.

При прожекторному режимі знімання в процесі руху супутника промінь антени багаторазово направляють у центр ділянки, яку знімають. При такому режимі отримують мінімальне просторове охоплення, проте найвищу просторову роздільну здатність - до часток метра).

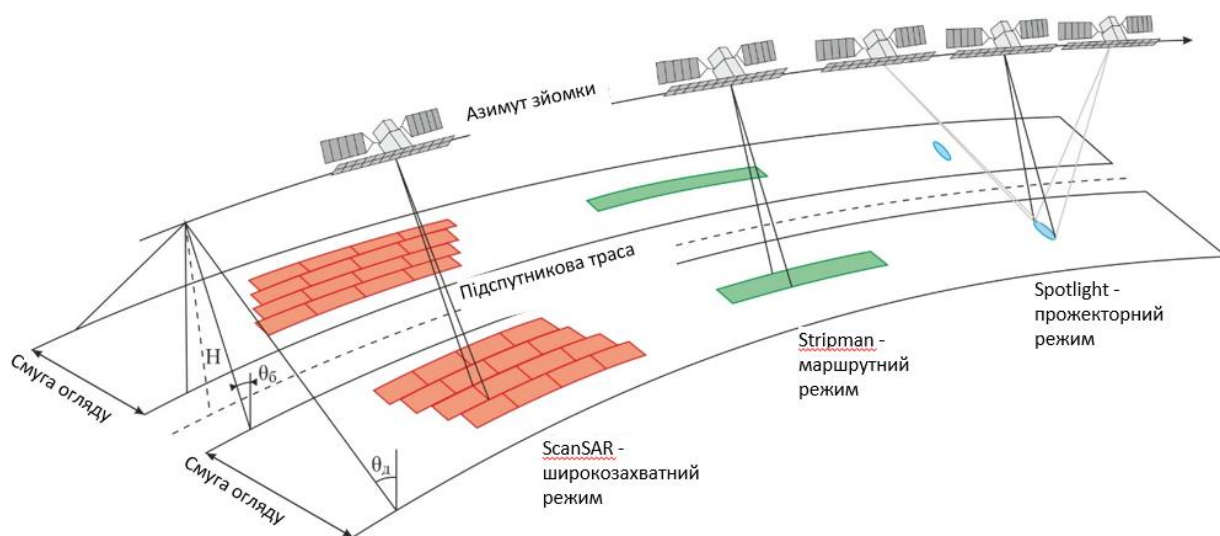


Рисунок 5.7 – Режими огляду космічних радіолокаторів із синтезованою апертурою



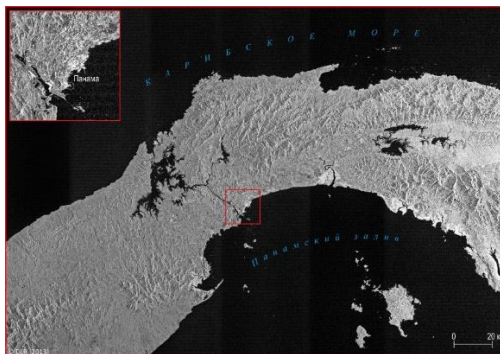


Рисунок 5.8 – TerraSAR-X, Панамський канал. Режим зйомки Wide ScanSAR: просторова роздільна здатність 40 м, ширина полоси знімання 270 км



Рисунок 5.9 – TerraSAR-X, Відкрита стоянка музею військових літаків . Режим зйомки Staring SpotLight: просторова роздільна здатність <1 м, розмір ділянки зйомки 4 км



Рисунок 5.10 – TerraSAR-X, г. Сендай, Японія. Режим зйомки StripMap: просторова роздільна здатність 3 м, ширина полоси знімання 30 км

## 5.5 Режими роботи космічних РСА

Поляриметричний режим: отримання радіолокаційних зображень одночасно при різній поляризації радіохвиль.

Така зйомка здійснюється не всіма системами і залежить від технічних особливостей конкретної знімальної апаратури. Зйомка можлива в скороченому режимі (комбінації  $HH$  і  $HV$ ,  $VV$  і  $VH$  або  $HH$  і  $VV$ ) або повному поляриметричному режимі (одночасно  $HH$ ,  $HV$ ,  $VH$  і  $VV$ ).

В останні роки набули поширення знімальні системи (наприклад, *Risat-1*), здійснюють зйомку як в режимі так званої компактної поляриметрії, коли сигнал, що посилається в напрямку земної поверхні, має кругову поляризацію.

Багаточастотний режим: отримання радіолокаційних знімків одночасно при різних довжинах радіохвиль. Наразі така зйомка з космосу не здійснюється. Унікальною у своєму роді можна назвати систему *SIR-C/X-SAR*, яка здійснювала зйомку одночасно у трьох діапазонах:  $X$ ,  $C$  та  $L$ .

У найближчій перспективі планується створення канадської багаточастотної системи радіолокаційного спостереження Землі *OptiSAR* (діапазони  $X$  та  $L$ ) та індійсько-американської *NISAR* ( $S$ ,  $L$ ).

Інтерферометричний режим: повторне радіолокаційне знімання однієї і тієї ж ділянки місцевості при дотриманні наступних умов:

- 1) зондування ідентичною апаратурою при однакових параметрах,
- 2) зондування з близько розташованих точок орбіти, відстань між якими називається *інтерферометричною базою*.

Розрізняють *поздовжню, поперечну та тимчасову інтерферометричні бази*, які визначають взаємне положення радіолокаторів у часі та просторі. Різні види інтерферометричної бази використовуються для вирішення різних завдань: поздовжня - для виявлення рухомих об'єктів, поперечна - для побудови цифрових моделей рельєфу, тимчасова - для виявлення змін як окремих об'єктів, так і зсувів земної поверхні.

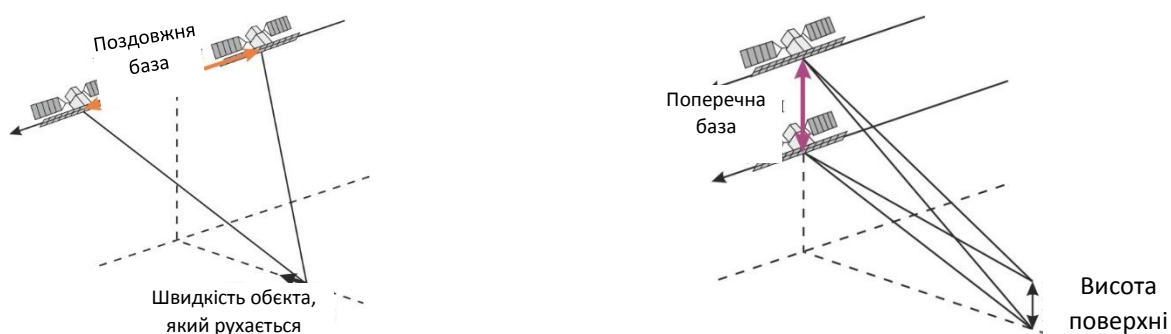


Рисунок 5.11 – Види інтерферометричної бази



Повторність зйомки однієї і тієї ж території при інтерферометричному режимі реалізується різними шляхами:

1) синхронно, коли на літальному апараті встановлено два радіолокатори на певній відстані, один з яких працює і на випромінювання, і на прийом сигналу, а другий - тільки на прийом (*інтерферометрія з "жорсткою" базою*) (приклад такої зйомки - *Shuttle Radar Topography Mission*)

2) в режимі "тандем" - двома ідентичними радіолокаторами при русі космічних апаратів-носіїв по близько розташованим паралельним орбітам (один з різновидів *інтерферометрії з "м'якою" базою*) (наприклад, *TerraSAR-X/TanDEM-X*)

3) послідовно - перша зйомка виконується в момент часу  $t$ , наступні зйомки - з цього ж супутника (або аналогічного) на повторному витку орбіти через інтервал часу  $\Delta t$ , кратний періоду повторення траси польоту (іноді такий варіант зйомки також називають інтерферометрією з "м'якою" базою) (наприклад, повторна зйомка з супутника *Radarsat-2* можлива з інтервалом 24 дні, з супутника *ALOS-2* - 14 днів).

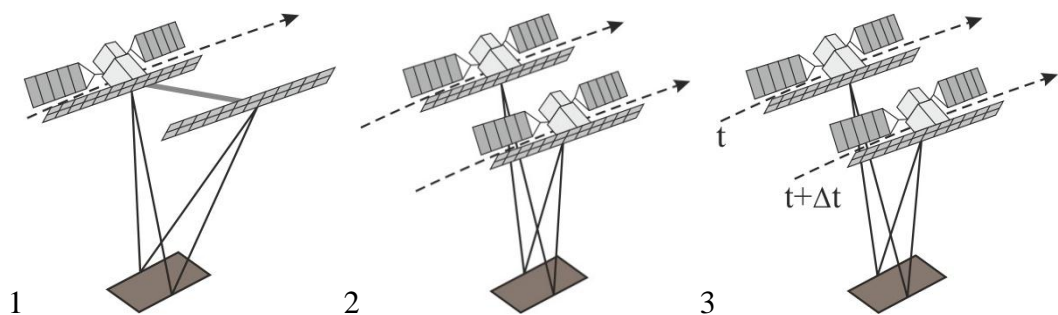


Рисунок 5.12 – Варіанти проведення інтерферометричних зйомок

Останнім часом спостерігається тенденція до збільшення кількості знімальних режимів роботи космічних радіолокаторів.

Так, системою *Radarsat-1* здійснювалася зйомка в 7-ми, а *Radarsat-2* – вже в 17 -ти режимах з наступною комбінацією параметрів: просторова роздільна здатність, ширина смуги захоплення, діапазон кутів зйомки та набір поляризаційних каналів.

## 5.6 Властивості об'єктів, що впливають на характер радіолокаційного зображення

Розглянуті питання:

- Шорсткість поверхні
- Діелектричні властивості поверхні
- Механізми розсіювання радіохвиль

## Шорсткість поверхні

Інтенсивність відбитого сигналу  $i$ , відповідно, яскравість ділянки на радіолокаційному знімку в значній мірі залежить від шорсткості поверхні (розмірів нерівностей щодо довжини радіохвилі) -  $h$ : чим вище шорсткість поверхні, тим більша потужність зворотнього сигналу. Згідно із критерієм Релея, поверхня вважається гладкою при розмірах шорсткості  $h < \lambda / 8 \cos \theta$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі, що використовується при зйомці, а  $\theta$  - кут падіння хвилі.

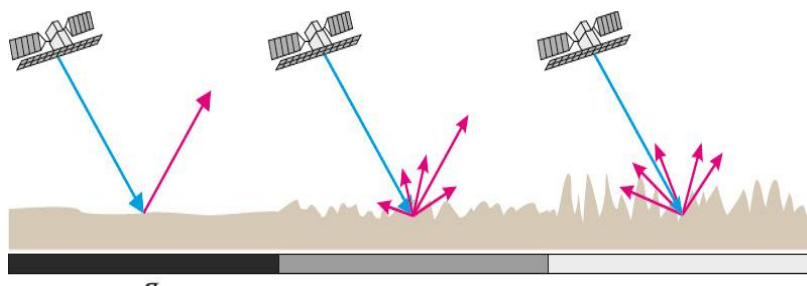


Рисунок 5.13 – Яскравість пікселів радіолокаційного знімка

Схематичне представлення впливу шорсткості поверхні на інтенсивність зворотнього сигналу

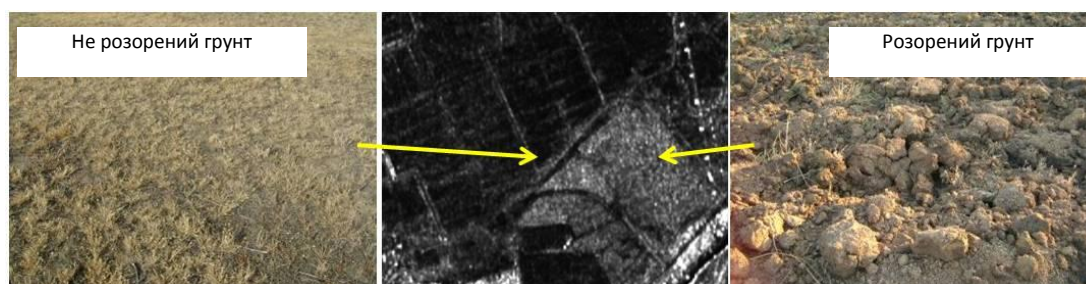


Рисунок 5.14. – Ділянки розораного та нерозораного ґрунту на радіолокаційному знімку Radarsat-2

## Діелектричні властивості поверхні

Діелектричні властивості впливають на здатність об'єктів до відображення у радіохвильовому діапазоні надають за рахунок здатності змінювати вхідне електромагнітне випромінювання. Діелектричні властивості прийнято кількісно коефіцієнтом відносної діелектричної проникності  $\epsilon$ . Відомо, що сухі ґрунти мають значення від 3 до 8, а вода - 80. Чим менше значення  $\epsilon$ , тим на більшу глибину проникають радіохвилі і менша здатність поверхні до відображення.

Саме з більшою глибиною проникнення пов'язано те, що сухі ґрунти дають менший зворотний сигнал (більш темніші на радіолокаційному зображенні), ніж зволожені ґрунти.

Аналогічна ситуація спостерігається і для рослинності: чим вищий рівень вмісту вологи в частинах рослин, тим вище інтенсивність зворотнього розсіювання сигналу.

#### Механізми розсіювання радіохвиль

Радіохвилі, які досягнули земної поверхні від радіолокатора, по-різному взаємодіють із розташованими на ній об'єктами. Виділяють 3 основні види такої взаємодії, які називають *механізмами розсіювання*: 1 - однократне, 2 – двократне, 3 - об'ємне.

При однократному розсіюванні хвилі дзеркально відображаються у бік, протилежний радіолокатору. Об'єкти, які характеризуються однократним розсіюванням, мають рівну поверхню (наприклад, водна гладь, відкритий ґрунт та ін.) і на радіолокаційному зображенні відображаються найтемнішими. Двократне розсіювання властиво вертикально орієнтованим об'єктам, наприклад, будівлям. Вони мають найвищу яскравість на знімках. При об'ємному розсіюванні відбувається багатократне відображення радіохвиль від частин об'єктів (наприклад, від листя, гілок та стовбурів дерев). Об'єкти, які характеризуються об'ємним розсіюванням, мають проміжні значення яскравості.

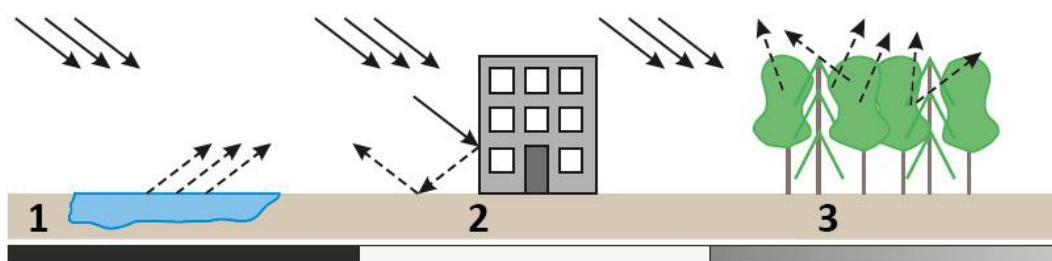


Рисунок 5.15 – Схематичне представлення механізмів розсіювання радіохвиль

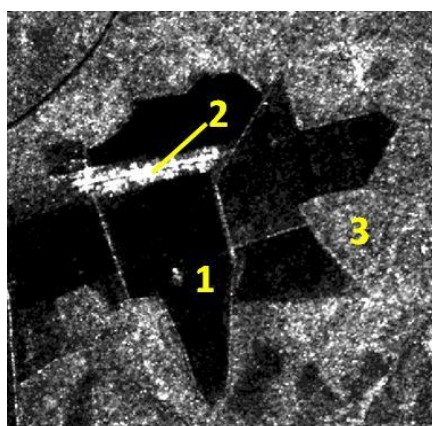


Рисунок 5.16 – Радіолокаційний знімок ALOS/PALSAR. Об'єкти, що характеризуються різними видами розсіювання:

- 1 – ділянка без лісу(однократне),
- 2 - населений пункт (двократне),
- 3 - ліс (об'ємне)

## 5.7.Радіолокаційні знімки

Форма записи радіолокаційного сигналу

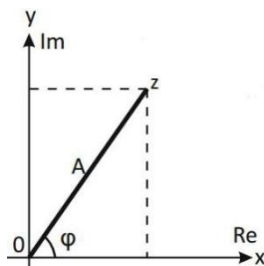


Рисунок 5.17 – Графічне представлення комплексного числа

Радіолокаційні дані містять у собі дві характеристики радіохвилі: її амплітуду та фазу.

Ці компоненти сигналу записуються у вигляді комплексного числа, що складається з двох частин: дійсної  $Re$  і уявної  $Im$ . У графічному вигляді комплексне число представляють наступним чином: по осі абсцис відкладається дійсна частина, а по осі ординат - уявна.

В алгебраїчній формі комплексне число  $z$  записується рівнянням виду  $z=x+iy$ , де  $i$  - уявна одиниця ( $i^2 = -1$ ), а в тригонометричній формі-  $z=A(\cos\varphi+isin\varphi)$ :

Виходячи з цього, амплітуда сигналу обчислюється за формулою  $A=\sqrt{x^2+y^2}$ , а фаза  $\varphi=\arctg(y/x)$ .

Відмінності в амплітуді дозволяють розпізнавати об'єкти або їх стан на радіолокаційних знімках.

Фазова складова радіосигналу є основною при визначенні відстані від радіолокатора до ділянки місцевості і визначення висот і зміщень поверхні.

Залежно від завдань, які стоять перед користувачем, у постачальника даних можуть бути замовлені знімки різного рівня початкової обробки: для візуального дешифрування часто достатньо амплітудної інформації.

Для створення цифрових моделей рельєфу та карт зміщень радіолокаційні дані повинні обов'язково включати і амплітудну, і фазову інформацію.

Залежність радіолокаційного зображення від довжини хвилі та поляризації сигналу

При зондуванні в короткохвильових діапазонах ( $X, C$ ) можливе отримання найбільш високого (метр і менше) просторової роздільної здатності радіолокаційних знімків .

При використанні довгохвильових діапазонів ( $S, L$ ) контраст у зображенні місцевості на радіолокаційних знімках вище, ніж при короткохвильових ( $X, C$ ) діапазонах. Як правило, яскравість знімків і величина питомої ефективної площі розсіювання у узгоджених поляризаціях ( $VV$  та  $HH$ ) вища, ніж у перехресних ( $VH$  та  $HV$ ). Особливо яскраво ця різниця проявляється на зображеннях щодо рівних поверхонь (наприклад, бриж на поверхні води).

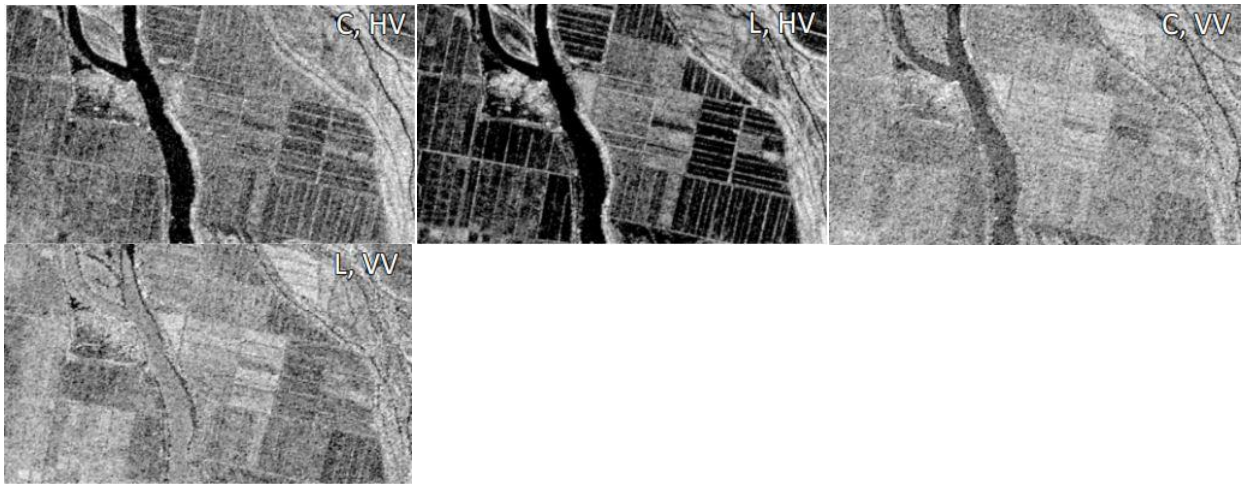


Рисунок 5.18 – Радіолокаційні знімки ділянки дельти Волги, отримані знімальною системою SIR-C/X-SAR при різних комбінаціях довжин хвиль і поляризації

Зображення антропогенних та природних об'єктів на радіолокаційних знімках

Зображення різних об'єктів на радіолокаційних знімках залежить як від властивостей самих об'єктів, так і від параметрів знімання .

Населені пункти на радіолокаційних знімках характеризуються найбільшою яскравістю. Поєднання горизонтальних та вертикальних поверхонь створює кутове відображення, спрямоване у бік радіолокатора, завдяки чому від будинків надходить потужний зворотній сигнал. Посиленню сигналу сприяють металеві об'єкти (опори ЛЕП, стовпи та ін.).



Рисунок – 5.19 Зображення урбанізованої забудови на радіолокаційному знімку Radarsat-2 (зліва) і знімок у видимому діапазоні (справа)

*Залізничні шляхи* дають сильний зворотний сигнал (і через це високу яскравість на знімку) рахунок металевих рейок, а автомобільні дороги та інші об'єкти з рівним асфальтовим або бетонним покриттям – малу потужність зворотнього сигналу і внаслідок цього низьку яскравість на знімку.



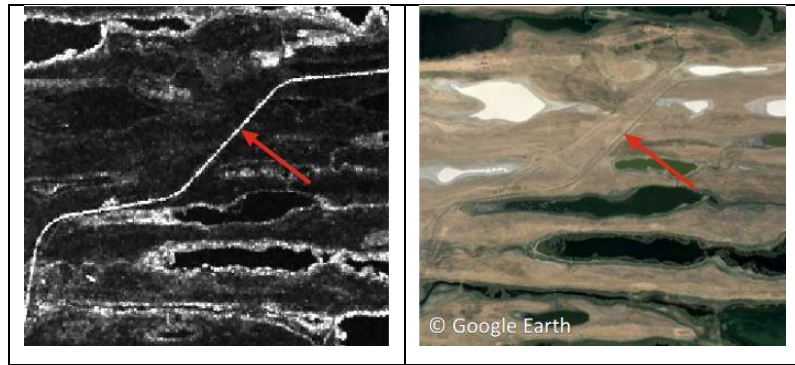


Рисунок 5.20 – Зображення залізниці (вказує червона стрілка) на радіолокаційному знімку Radarsat-2 (ліворуч) і на знімку у видимому діапазоні (справа)

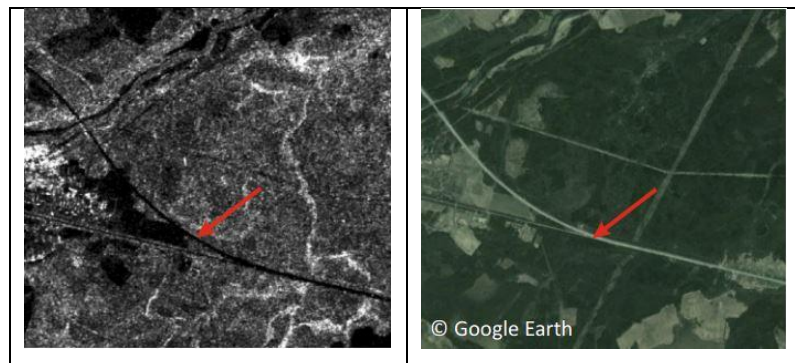


Рисунок 5.21 – Зображення асфальтованої дороги (вказує червона стрілка) на радіолокаційному знімку ALOS/PALSAR (ліворуч) і на знімку у видимому діапазоні (справа)

Сільськогосподарські угіддя зображуються на радіолокаційних знімках по-різному залежно від їх поточного стану. Відкритий сухий ґрунт має низьку яскравість, його підвищення може бути викликане збільшенням вмісту вологи ґрунту або якщо угіддя виоране. Найсвітлішими відображаються поля, зайняті рослинністю, що вегетує. Як правило, потужність зворотнього сигналу зростає зі збільшенням вологовмісту рослин та їх фітомаси.

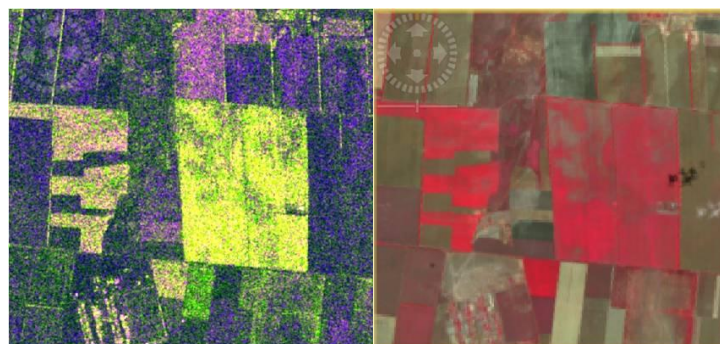


Рисунок 5.22 – Зображення сільськогосподарських угідь на радіолокаційних знімках Sentinel-1 від 28.06.2017 р. (колірний синтез: R - поляризація VV, G - VH, B - VV/VH)

(ліворуч) та знімку Landsat-8 від 25.06.2017 р. (колірний синтез ближнього інфрачервоного, червоного та зеленого каналів)

Висока і густа природна рослинність дає досить потужний зворотній сигнал і, завдяки цьому, має підвищену яскравість на зображенні порівняно з фоном: відкритим ґрунтом та низькорослою трав'янистою рослинністю.

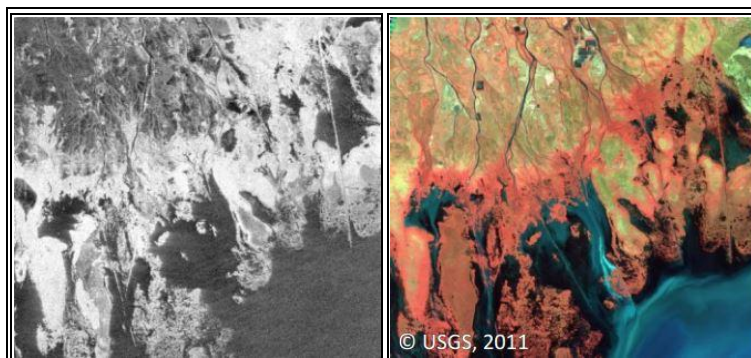


Рисунок 5.23 – Зображення високорослої рослинності на радіолокаційному знімку Radarsat-1 (ліворуч) і знімку Landsat-5 (синтез ближнього інфрачервоного, червоного і зеленого каналів) (справа).

Найбільш яскравим на радіолокаційному знімку і червоним на синтезованому знімку в оптичному діапазоні відображається рослинний пояс вздовж морського краю

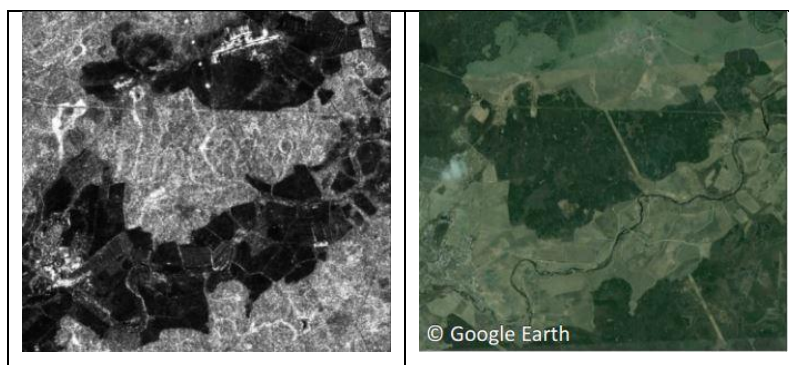


Рисунок 5.24 – Зображення лісової рослинності на радіолокаційному знімку ALOS/PALSAR (ліворуч) і на знімку у видимому діапазоні (справа).

Ділянки лісу виражені найбільш яскравими на радіолокаційному знімку і темно-зеленими на знімку у видимому діапазоні.

Об'єкти гідрографії за відсутності хвиль або брижів дають найменший зворотній сигнал і, як наслідок, низьку яскравість на радіолокаційних знімках. Хвилювання на водній поверхні може спричинити значне підвищення зворотнього сигналу і яскравості на знімку,

отриманому при поляризації  $VV$  та  $HH$ . На знімку у крос-поляризації це підвищення, як правило, не спостерігається.

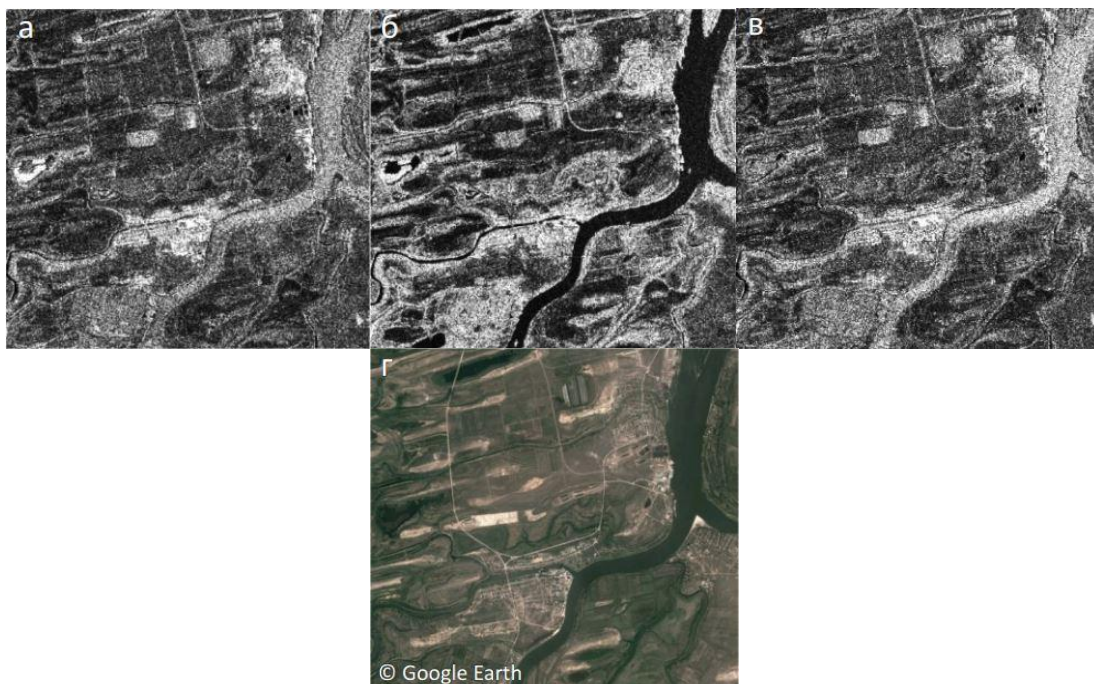


Рисунок 5.25 – Зображення об'єктів гідрографії: а - на радіолокаційному знімку Radarsat-2 в поляризації  $HH$ , б -  $HV$ , в -  $VV$ , г - на знімку у видимому діапазоні

Спотворення яскравості і геометричні спотворення на радіолокаційних зображеннях

Відмінна риса радіолокаційних зображень - зернистість, викликана хаотичним чергуванням світлих і темних пікселів, яка називається "спекл-шумом". Утворення спекл-шумів пов'язане з тим, що когерентні хвилі, які випускаються радіолокатором, після відбиття від земної поверхні інтерферують, що призводить до посилення або ослаблення амплітуди прийнятого сигналу.

Наявність спекл-шуму ускладнює процес дешифрування радіолокаційних зображень.

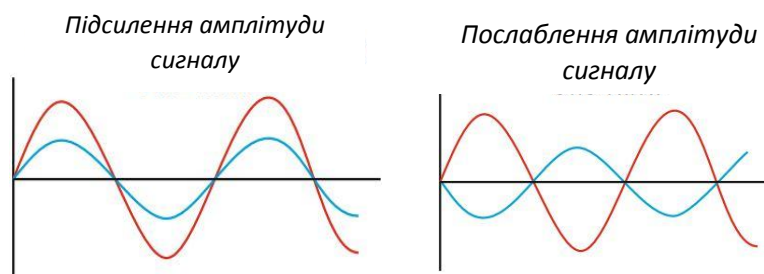


Рисунок 5.26 – Інтерференція хвиль





Рисунок 5.27 – Збільшений фрагмент радіолокаційного знімка, на якому чітко видно спекл-шум

Інша властивість знімків – нерівномірність розподілу яскравості, обумовлена нахилом (відхиленням від Надиру) зонduючого променя. Зображення в ближній зоні (ближче до надиру) у загальному випадку має більш високу яскравість, ніж у дальній зоні.

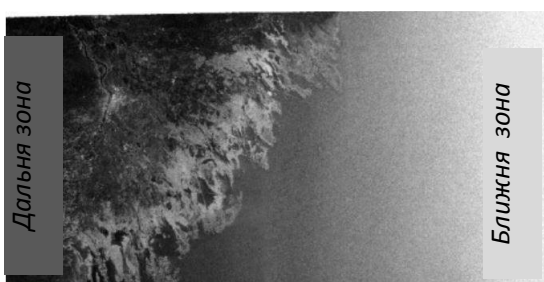


Рисунок 5.28 – Радіолокаційний знімок Radarsat-1 із яскраво вираженою нерівномірністю яскравості в ближній і дальній зоні

Радіолокаційним зображенням властиві геометричні спотворення і спотворення яскравості, які проявляються одночасно, і які обумовлені рельєфом місцевості і параметрами зйомки (напрямок і кути візування). На знімках можуть бути спотворення трьох видів: стиснення/розтягування схилів (*foreshortening*), перенакладання (нашарування) вершини і основи схилу (*layover*) і радіолокаційна тінь (*radar shadow*).

Стиснення/розтягування зображення схилів формується наступним чином (див. схему): схил АВ, нахилений у бік радіолокатора, на зображенні виглядає коротшим і яскравішим у порівнянні зі схилом ВС, нахиленим у протилежний бік від нього бік.

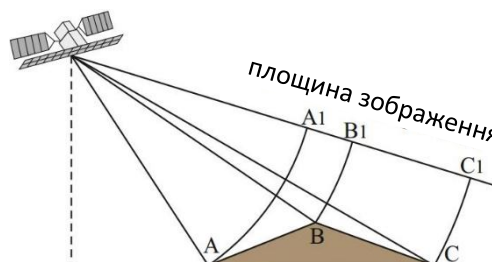


Рисунок 5.29 – Схема формування розтягу і стиснення зображення схилів



Рисунок 5.30 – Гірська

територія на північ від м. Софія, Болгарія, знімок у видимому діапазоні

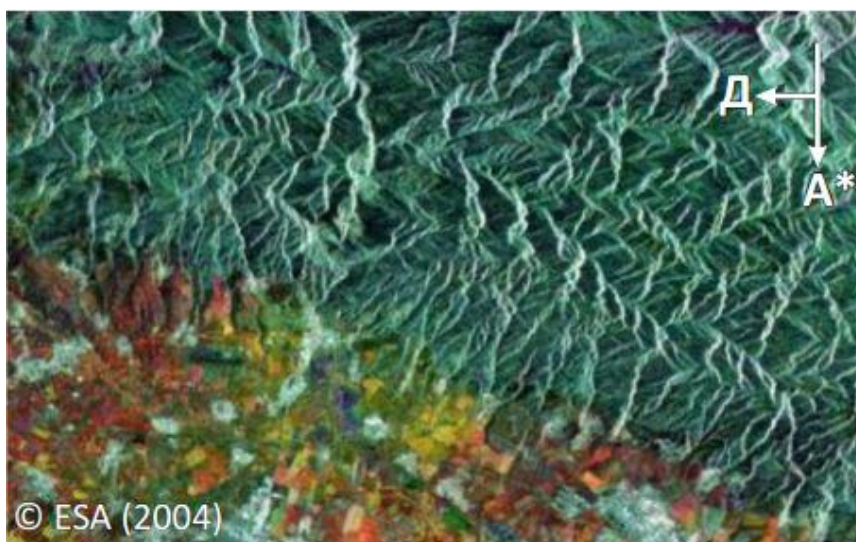


Рисунок 5.31 –

Багаточасовий радіолокаційний знімок ERS-2. \*Тут і далі на знімках: А - азимут - напрямок руху супутника, Д - дальність – напрямок зйомки



Рисунок 5.32 – Австрійські

Альпи на південний схід від м. Інсбрук, знімок у видимому діапазоні

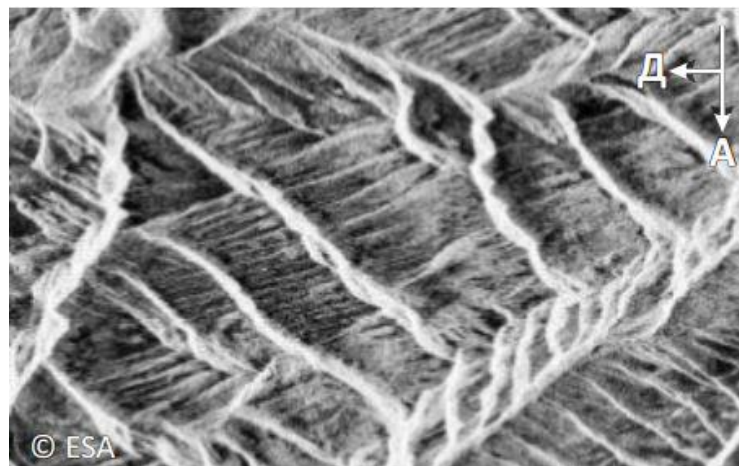


Рисунок 5.33 – Радіолокаційний знімок ERS-2, кути зйомки 24-26°. Стиснення і розтяг зображень схилів значно виражені

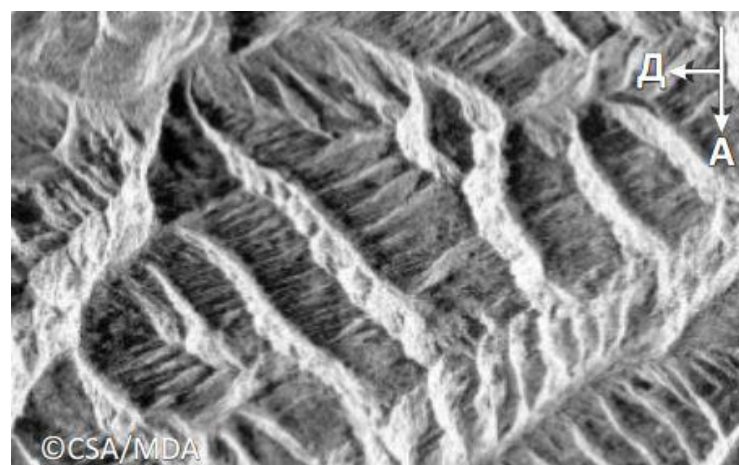


Рисунок 5.34 – Радіолокаційний знімок Radarsat-1, кути зйомки 41-44°. Стиснення і розтяг зображень схилів виражено слабше, ніж при менших кутах зйомки



Рисунок 5.35 – Найбільший у світі кар'єр по видобутку мідної руди Чукіамата Чілі, (довжина - 4,3 км, ширина - 3 км, глибина - 850 м), знімок у видимому діапазоні



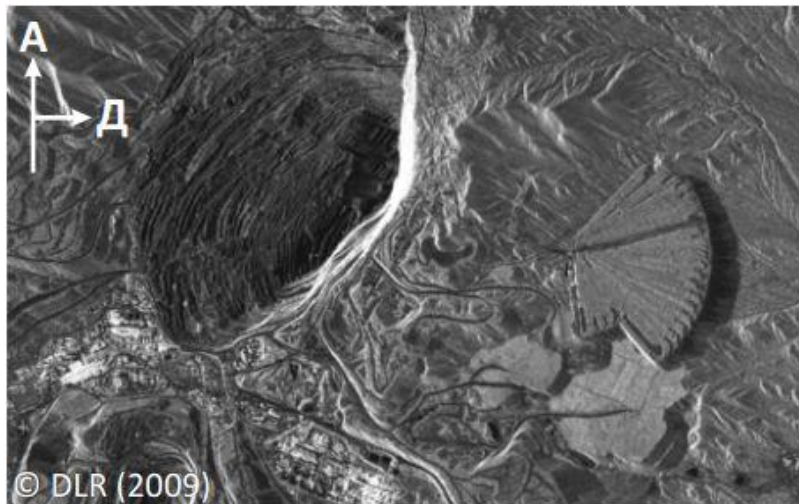


Рисунок 5.36 – Радіолокаційний знімок TerraSAR-X, отриманий на висхідному витку орбіти: більш яскравим і стисненим відображається східний борт кар'єру

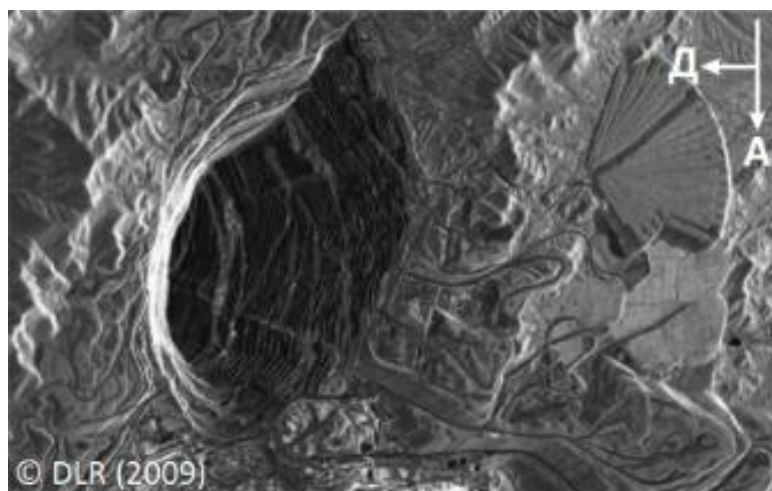


Рисунок 5.37 – Радіолокаційний знімок TerraSAR-X, отриманий на впадаючому витку орбіти: більш яскравим і стисненим відображається західний борт кар'єру

Перенакладення (нашарування) вершини та підніжжя схилу на зображенні утворюється через те, що радіосигнал досягає вершини схилу В раніше, ніж його підніжжя А, у зв'язку з чим на зображенні спостерігається ефект “перекидання” гір у напрямку радіолокатора.

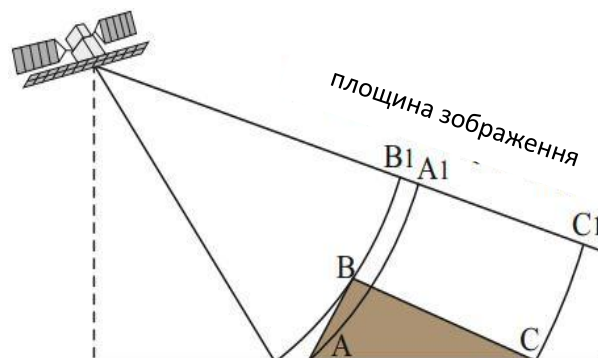


Рисунок 5.38 – Схема формування перенакладання вершини та підніжжя схилу



Рисунок 5.39 – Гори Вірунга, ( на кордоні Руанди и Демократичної республіки Конго, знімок у видимому діапазоні

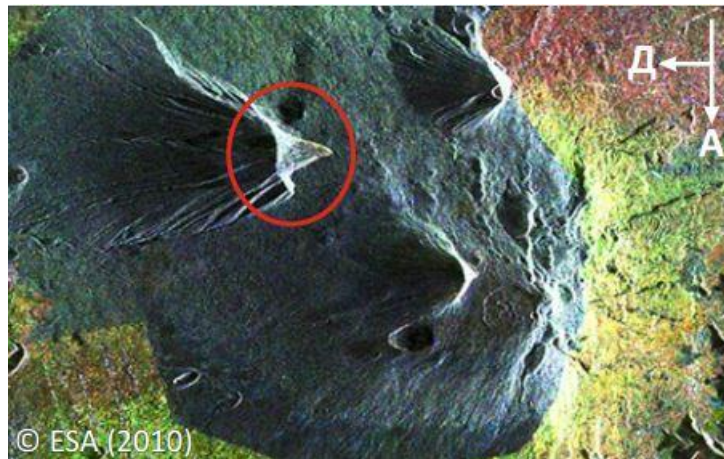


Рисунок 5.40 – Багаточасовий радіолокаційний знімок ENVISAT/ASAR.

Область перенакладання виділена червоним кольором

Ефект перенакладання дуже добре помітний не тільки на ділянках з вираженим рельєфом, а й у населених пунктах з багатоповерховою забудовою та іншими у вертикальними спорудами і конструкціями (телевежі, опори мостів, ліній електропередач та ін.)



Рисунок 5.41 – Торонто, Канада, район із багатоповерховими будівлями, знімок у видимому діапазоні

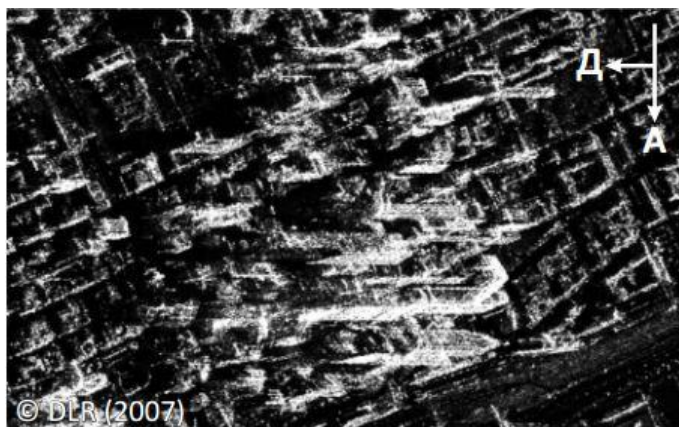


Рисунок 5.42 – Радіолокаційний знімок TerraSAR-X

Радіолокаційна тінь виникає так: ділянка  $BD$  недоступна для поширення радіосигналу через високу крутість схилу. На знімку ділянки  $BID1$  та  $EIG1$  відображені чорним. Зазначимо, що розмір радіотіні збільшується зі збільшенням кутів зйомки. На відміну від тіней на знімках в оптичному діапазоні, які можуть бути напівпрозорими, радіотіні повністю приховують інформацію про об'єкти, розташовані в затінених областях.



Рисунок 5.43 – Схема формування радіолокаційної тіні





Рисунок 5.44 – Піраміди Хефрена (ліворуч) і Хеопса (справа) в Гизе, Єгипет, знімок у видимому діапазоні



Рисунок 5.45 – Радіолокаційний знімок TerraSAR-X, західні грані пірамід знаходяться в області радіолокаційної тіні

### 5.8 Обробка радіолокаційних зображень

Обробка знімків радіолокаційних зображень виконується як для поліпшення їх властивостей для візуального сприйняття, так і для підвищення ефективності їх при подальшій комп'ютерній обробці.

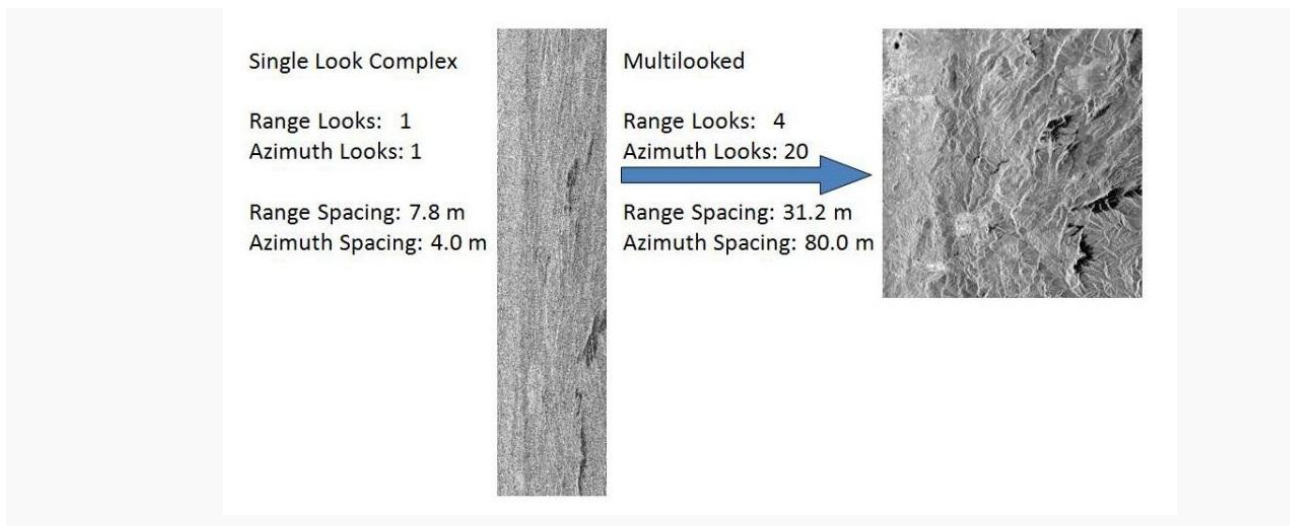
Етапи та види обробки можуть відрізнятися в залежності від рівня обробки вихідних даних, що виконується їх постачальником та від особливостей задачі, що розв'язується.

#### Некогерентне накопичення (Multilooking)

Некогерентне накопичення (multilooking) може бути використане для отримання продукту з умовним розміром пікселів зображення.

Некогерентне накопичення може бути сформоване шляхом усереднення роздільної здатності пікселів по дальності та/або по азимуту, підвищуючи радіометричний дозвіл, але погіршуючи просторовий дозвіл.

Відмінності в просторовій роздільній здатності по азимуту і дальності виявляються в різних масштабах радіолокаційного знімка: знімок буде витягнутий у напрямку більш вищої роздільній здатності. Процедура некогерентного накопичення створить квадратний піксель дальності до землі, використовуючи 1 вид у дальності та 3 види по азимуту.



Приведення горизонтального та вертикального розмірів пікселя до близьких значень виконується процедурою некогерентного накопичення при одночасному заданні різних значень коефіцієнтів усереднення по азимуту і дальності. Розмір пікселя перетвореного знімка приводиться до більшого значення, внаслідок чого просторова роздільна здатність виявляється нижчою, при цьому також знижується рівень спекл-шуму.

Некогерентне накопичення є обов'язковим етапом, оскільки не потрібно, коли зображення коригується територією.

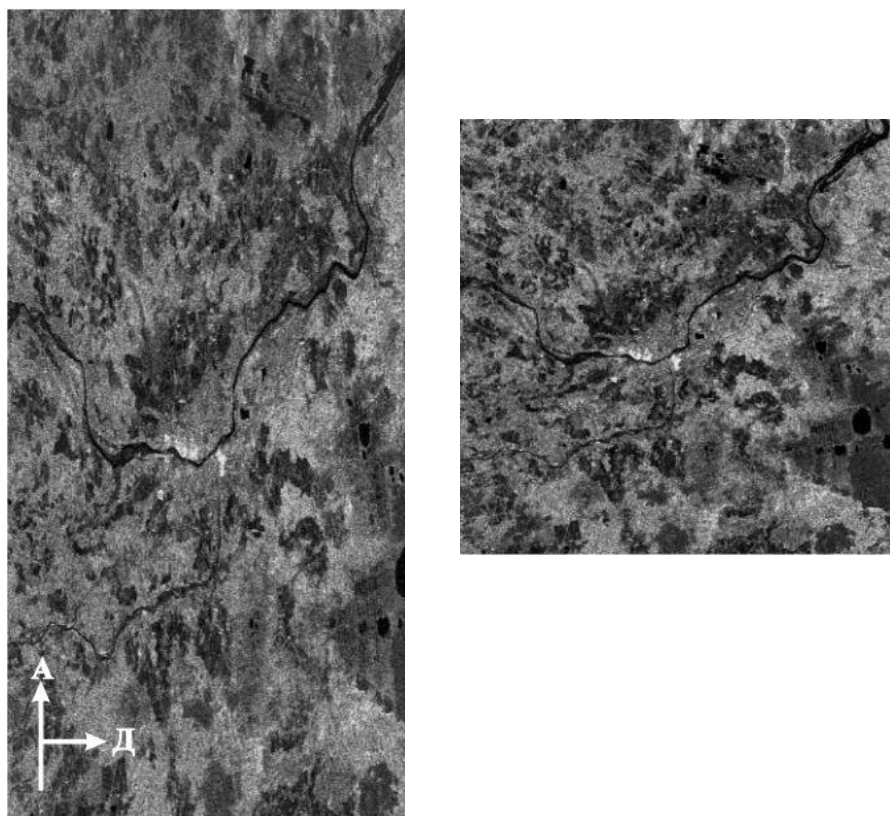


Рисунок 5.46 – Просторова роздільна здатність вихідного зображення ALOS PALSAR (зліва) - 3,1x7,5 м (азимут x дальність).



При некогерентному накопиченні із коефіцієнтами усереднення 2x1 перетворене зображення (справа) має роздільну здатність 6,2x7,5м.

Автоматична коресстрація різночасних радіолокаційних знімків

Під автоматичною коресстрацією розуміють точне просторове суміщення декількох різночасних зображень, отриманих однією знімальною системою (або декількома ідентичними) при подібних параметрах зйомки, для їх подальшої спільної обробки.

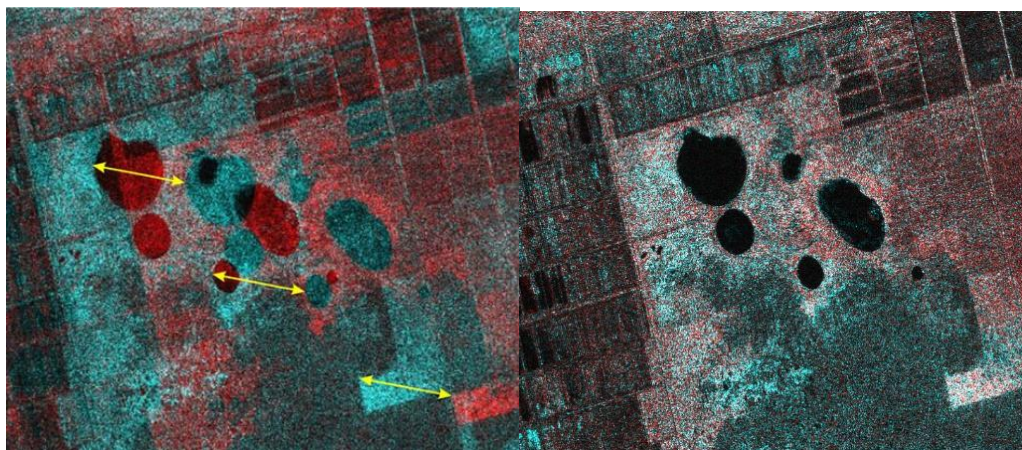


Рисунок 5 47 – Колірний синтез різних у часі зображень ALOS/PALSAR (R – 24.12.2006 р., G та B – 08.02.2007): до коресстрації – ліворуч, після коресстрації – праворуч.

У першому випадку добре помітний зсув зображень (відмінність у положенні ідентичних об'єктів на різночасних знімках показано жовтими стрілками), у другому випадку зсув зображень відсутній

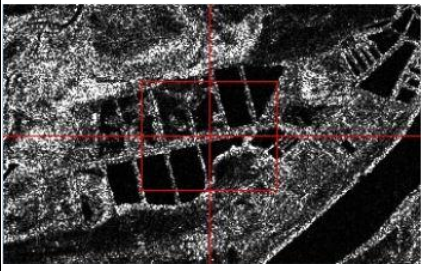
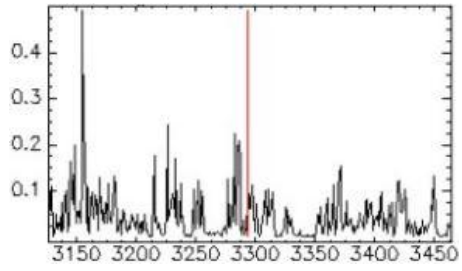
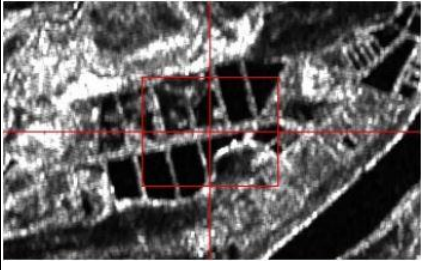
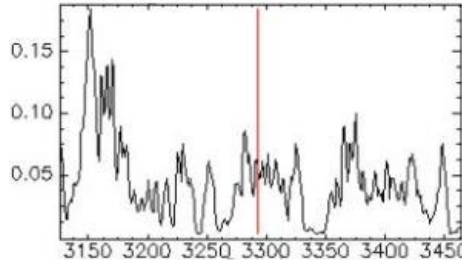
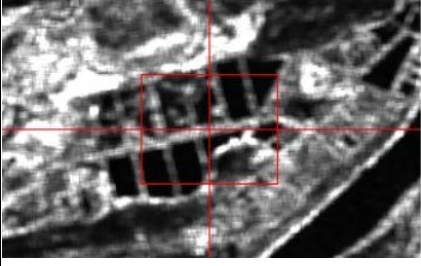
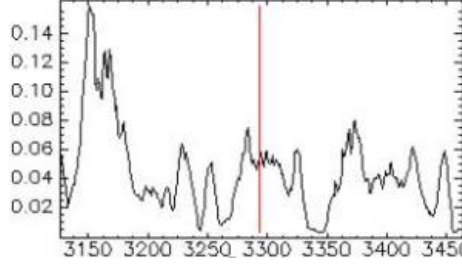
### **Фільтрація спекл-шуму**

Спекл викликаний випадковою конструктивною та деструктивною інтерференцією, що породжує шум, немовби "сіль та перець" по всьому зображенню і ускладнює їх сприйняття. Спекл-шум виникає через когерентне перенакладання багаторазових відображень радіосигналу, які характеризують один і той самий піксель радарного знімка.

Спекл-фільтри можуть бути застосовані до даних зменшення кількості спекл-шуму за рахунок розмиття деталей або зменшення дозволу.

Рівень спекл-шуму зменшують, використовуючи різні методи фільтрації, які згладжують зображення. Фільтри поділяються на адаптивні (Frost, Lee та ін), що враховують характер розподілу значень пікселів, та неадаптивні (Mean, Median), які цей характер не враховують. Фільтри працюють переважно в межах ковзаючого вікна. При збільшенні розміру вікна фільтра зображення сильніше згладжується, але при цьому зникає багато деталей зображення.

Таблиця 5.1

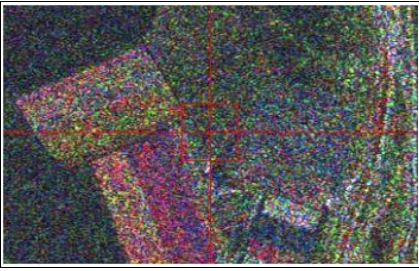
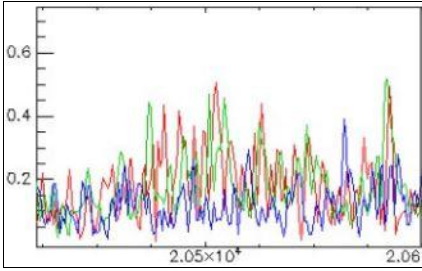
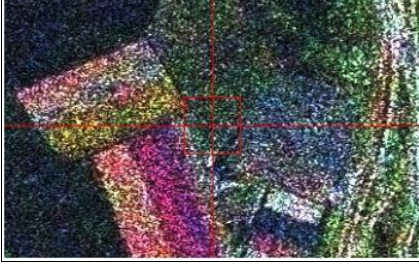
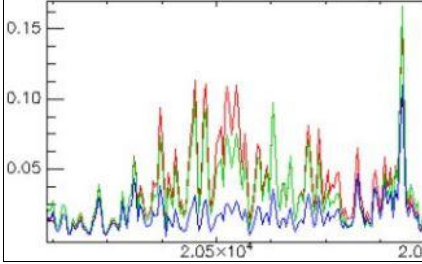
	Фрагмент знімка	Профіль значень $\sigma_0$
Вихідний знімок		
Фільтр Mean, вікно 3x3 піксела		
Фільтр Mean, вікно 7x7 пікселів		

Результатом застосування фільтрів є значно згладжене зображення, що видно на самих знімках, так і на профілях значень  $\sigma_0$  в рядку знімка.

Добре помітно, що збільшення розміру ковзаючого вікна призводить до розмивання кордонів на зображенні.

При формуванні та подальшій обробці багаточасових знімків застосовується багаточасова фільтрація - зменшення спекл-шуму на серії просторово узгоджених зображень, отриманих при однакових параметрах зйомки.

Таблиця 5.2

	Фрагмент знімка	Профіль значень $\sigma_0$
Вихідний знімок		
Знімок після багаточасової фільтрації		

Колірний синтез різночасних зображень Radarsat-2 (R – 11.09.2011, G – 5.10.2011, B – 29.10.2011). Багаточасова фільтрація призводить до взаємного узгодження максимумів та мінімумів  $\sigma_0$  на зображеннях, отриманих у різні терміни

### Геокодування та ортотрансформування

Порядок запису значень зворотнього сигналу при радіолокаційному зондуванні земної поверхні залежить від напрямку руху супутника і напрямку візування, в результаті чого не завжди вдається отримати правильно орієнтовані відносно сторін світу оригінальні знімки.

**Геокодування** (Коректування по місцевості) – називається координатна прив'язка вихідного або перетвореного знімка радіолокації без усунення спотворень за рельєф.

Коригування по місцевості геокодує зображення, виправляючи геометричні спотворення із використанням цифрової моделі висот (DEM) та представляє його у картографічній проекції.

Геокодування коригує зображення із геометрії похилої дальності або відстані до землі в картографічну систему координат.

Геокодування по місцевості включає використання цифрової моделі висот (DEM) для корекції геометричних ефектів, властивих РСА, таких як ефект складки (foreshortening), перенакладання (layover) і тіні (shadow).

#### Ефект складки

- Період часу, в якому схил опромінюється імпульсом енергії, яка передається радаром і визначає довжину ухилу на радарному знімку.
- Це призводить до зменшення схилу місцевості на знімку радара у всіх випадках за винятком, коли локальний кут ( $\theta$ ) близький до  $90^\circ$ .

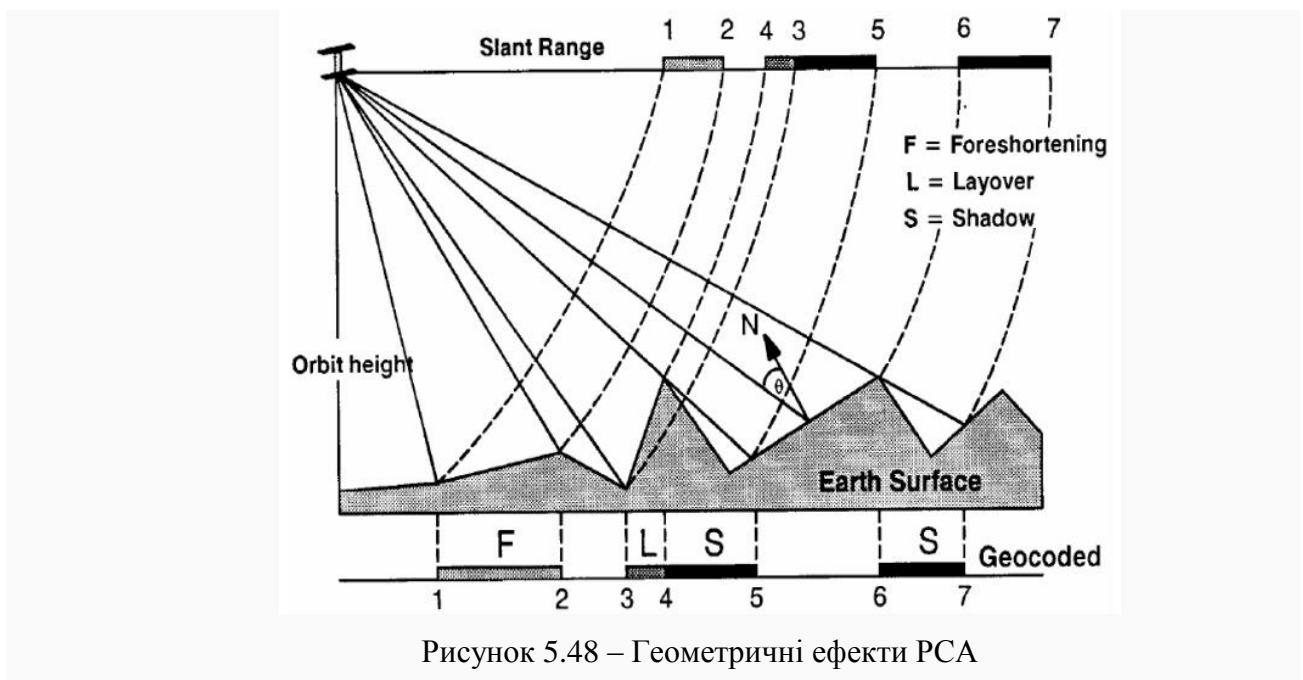
#### Перенакладання

- Коли верхня частина схилу місцевості ближче до радарної платформи, ніж нижня,- вона буде записана раніше.
- Послідовність, в якій зображуються точки вздовж місцевості, утворює зображення, яке виходить перевернутим.
- Перенакладання радара залежить від різниці у відстані похилої дальності між верхньою та нижньою частинами елемента.

Тіні

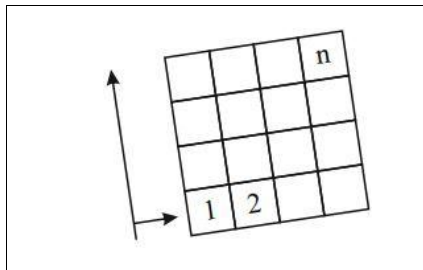
- Задня частина схилу загороджується від відбитого променя, породжуючи відсутність області, що повертається, тобто. радарну тінь.

Наслідки цих спотворень можна побачити нижче. Відстань між 1 і 2 можуть виявитися коротшими, ніж насправді, і повернення для 4 може статися до повернення для 3 з-за висоти

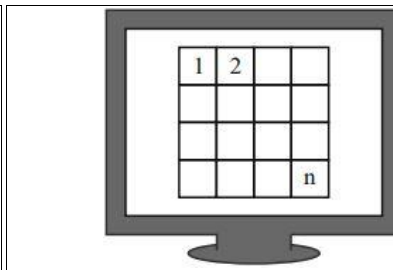


Ортотрансформування включає в себе не тільки координатну прив'язку, а й усунення спотворень, пов'язаних з рельєфом місцевості, для цього використовується цифрова модель рельєфу. Як правило, геокодування та ортотрансформування радіолокаційних знімків виконується за орбітальними даними.

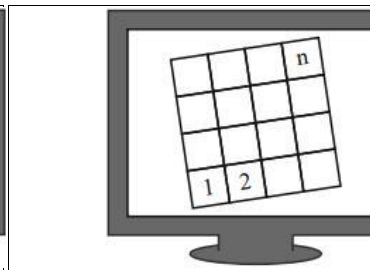




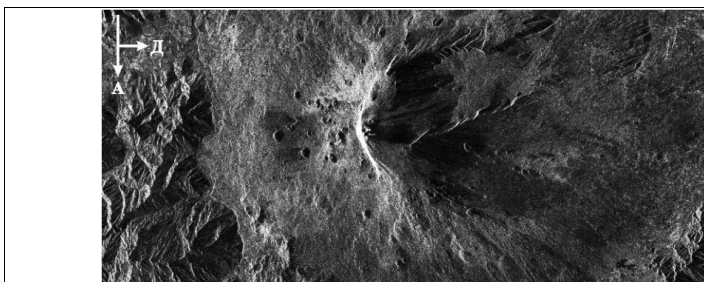
Порядок нумерації пікселів знімка при польоті супутника на восхідному витку при правосторонньому візуванні



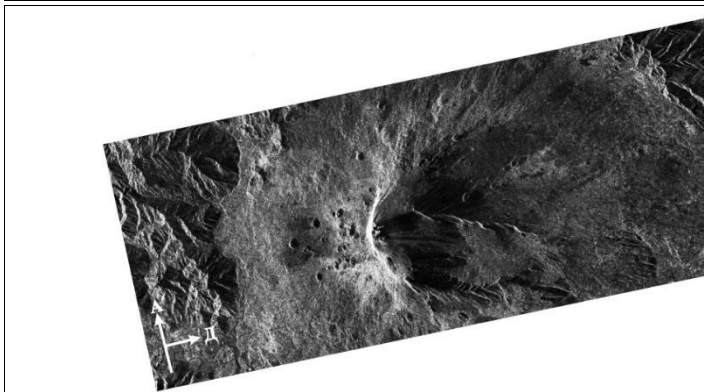
Файлові координати (ряд-колонка) вихідного знімка на моніторі комп'ютера



Геокодований (прив'язаний) знімок на моніторі комп'ютера



ERS-1, вулкан Етна, Італія. Вихідний знімок в файлових координатах растра: Північ - вниз, Південь - зверху



Геокодований (прив'язаний) знімок (проекція UTM, зона 33): Північ - зверху, Південь - знизу. Спотворення за рельєф не усунені



Ортотрансформований знімок (проекція UTM, зона 33): Північ - зверху, Південь - знизу. Спотворення за рельєф усунені

### Радіометричне калібрування та нормалізація

Потужність зворотнього сигналу, що приймається радіолокатором, визначається величиною ефективної площі розсіювання (ЕПР) об'єкта  $\sigma$ :  $\sigma = 4\pi P_s / W$  [м<sup>2</sup>], де  $P_s$ , [Вт] –

потужність сигналу, розсіяного об'єктом у напрямку радіолокатора,  $W$  [Вт/м<sup>2</sup>] – щільність потоку потужності сигналу, що опромінює об'єкт.

ЕПР відповідає площі деякої ідеальної поверхні, розташованої по нормалі до радіохвилі, що поширюється, і дає еквівалентне реальному об'єкту місцевості відображення.

При зніманні радіолокації відбиваючу здатність поверхні зондування характеризують безрозмірним коефіцієнтом зворотного розсіювання, або питомою ефективною площею розсіювання (ПЕПР)  $\sigma_0$ :  $\sigma_0 = \sigma / [\rho_x \rho_y]$ , де  $\rho_x$  и  $\rho_y$  – роздільна здатність елемента зображення по азимуту і дальності.

Зазвичай УЕПР виражають в децибелах (дБ):  $\sigma_{0dB} = 10 \lg \sigma_0$ .

Для забезпечення можливості кількісного порівняння значень зворотнього розсіювання від різних ділянок поверхні або його часових змін необхідне проведення радіометричного калібрування, яке дозволяє перейти від «сирих» значень пікселів ( $DN$ , *digital number*) до значень з питомою ефективною площею розсіювання.

Сучасні програми обробки радіолокаційних даних, зазвичай, включають можливість калібрування даних більшості космічних радіолокаторів, зчитуючи всю необхідну інформацію з супровідних файлів.

Під радіометричною нормалізацією мається на увазі вирівнювання величини коефіцієнта зворотного розсіювання в ближній та дальній зонах знімка (усунення градієнта яскравості)

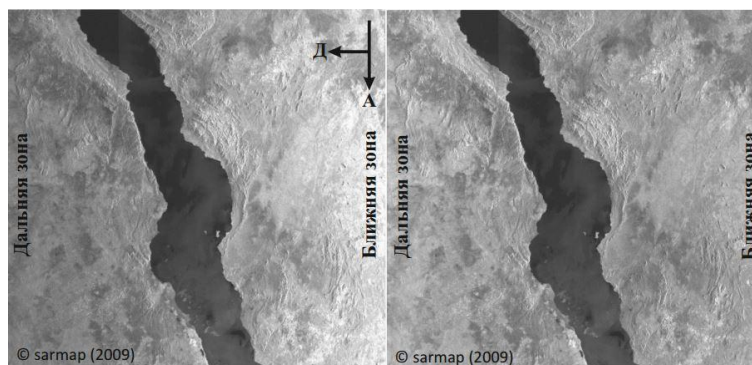


Рисунок 5.49 – ENVISAT/ASAR, Малави. Зліва – вихідний знімок, на якому видно різну яскравість в ближній (яскравість вище) і дальньої (нище) знімальних зонах.

Для знімка з права проведена радіометрична нормалізація, в результаті якої градієнт яскравості був усунутий.

Ліворуч - вихідний знімок, на якому видно відмінності яскравості у ближній (яскравість вище) та дальній (нижче) зонах знімання. Для знімку праворуч здійснена радіометрична нормалізація, внаслідок якої було усунуто градієнт яскравості .

### Розрахунок когерентності

Працюючи з інтерферометричною парою комплексних радіолокаційних зображень можливий розрахунок похідного із них зображення когерентності, яке характеризує їх узгодженість (подібність). При розрахунку когерентності використовується інформація як про амплітуду, так і про фазу сигналу.

Когерентність приймає значення від 0 до 1. Значення, близькі до нуля, відповідають слабкій подібності пари зображень, що може бути пов'язано зі зміною властивостей поверхні зондування, із появою або зникненням об'єктів за період між зйомками. Такі ділянки зображення мають низьку яскравість.

Значення, близькі до одиниці, навпаки, характеризують сильну схожість двох зображень, обумовлену стабільністю поверхні зондування за період між зйомками.

Ділянки, що характеризуються високою когерентністю, мають високу яскравість зображення.

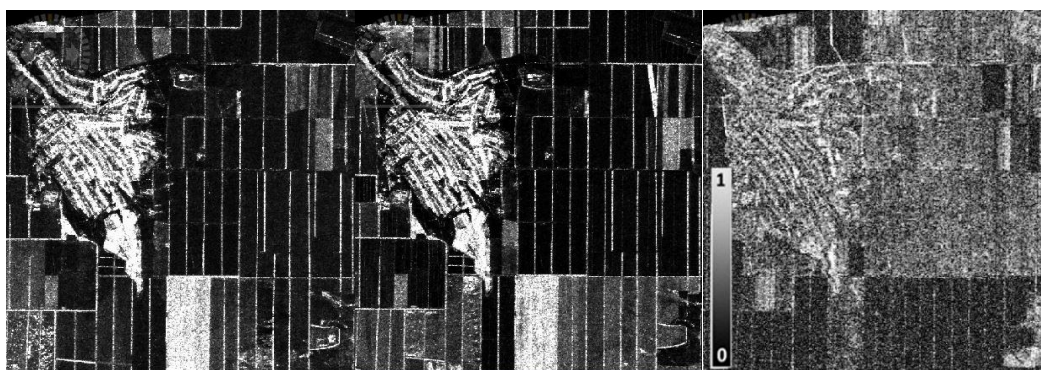


Рисунок 5.50 – ALOS/PALSAR: ліворуч – амплітудний знімок, 21.06.2009 р., у центрі – амплітудний знімок, 06.08.2009 р., праворуч – зображення когерентності, отримане на основі пари цих знімків.

Високі значення когерентності характерні для населеного пункту, полів під паром, а низькі - угіддям, на яких відбувалися різні зміни, наприклад, вегетація сільськогосподарських культур

### **Поляриметрична декомпозиція**

При роботі з набором комплексних поляризованих даних (від 2-х до 4-х зображень) поширеним методом є поляриметрична декомпозиція, тобто виділення на основі сумарних сигналів, представлених на зображеннях в різних поляризаціях, ділянок, де переважає певний відомий механізм розсіювання сигналу: основне - одноразове, дворазове та об'ємне. Відомо багато алгоритмів здійснення декомпозиції, які отримали названі, переважно, іменами своїх авторів, і їхнє виконання забезпечується програмними комплексами обробки радіолокаційних даних. В результаті декомпозиції одержують 3-4 нових зображення, де більшим або меншим значенням яскравості закодовані фізичні властивості об'єктів



місцевості. Ці властивості виявляються у різних кольорах зображення при колірному синтезі окремих компонентів.

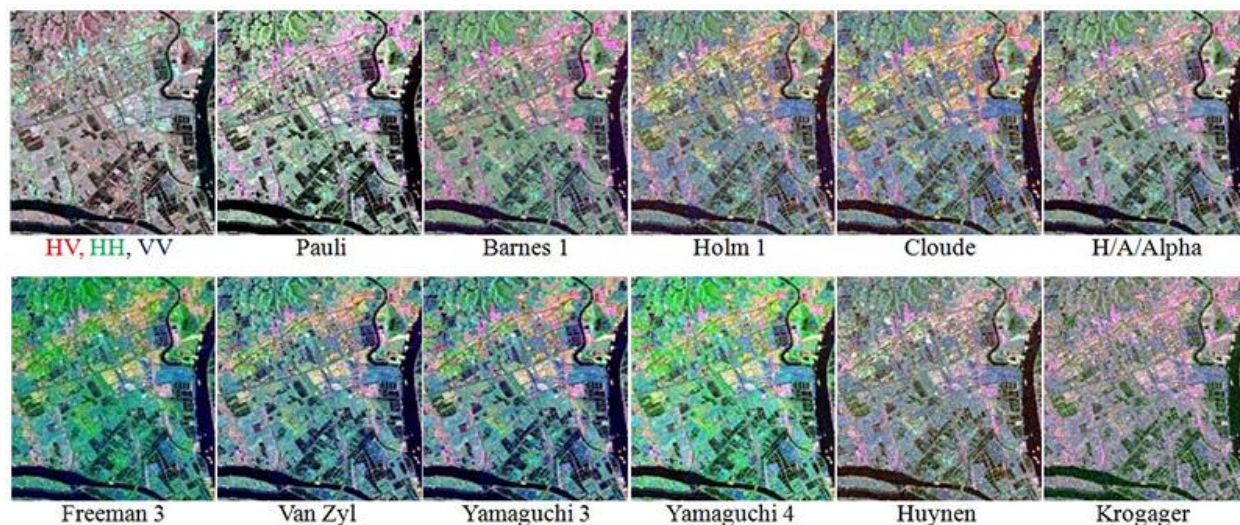


Рисунок 5.51 – Приклади кольорових синтезованих зображень, отриманих із компонентів поляриметричних декомпозицій (Qi, Yeh, Zhang, 2010)

### 5.9 Системи зйомки Землі із космосу

У своєму розвитку радіолокаційна зйомка Землі пройшла кілька етапів.

Перші системи радіолокаційного спостереження розміщувалися на літаках і по типу огляду поверхні відносились до панорамних. Вони характеризувалися низькою просторовою роздільною здатністю по азимуту (сотні метрів) і використовувалися виявлення і супроводу точкових об'єктів, цілей навігації та інших.

На зміну їм прийшли радіолокатори бічного огляду (РБО), встановлені на літаках. Зйомка здійснювалася вздовж – фюзеляжними антенами довжиною 5-6 м, при цьому просторова роздільна здатність по азимуту досягала 30-50 м.

Матеріали такої зйомки використовувалися для спостереження за станом льодовиків (наприклад, РБО «Торос» на початку 1970-х рр.), геологічної розвідки та різноманітних наукових досліджень.

Перші космічні РБО використовувалися з метою морської розвідки (наприклад, 28 космічних апаратів УС-АМ, 1971-1988 рр.).

Розширення функцій космічних РБО було досягнуто у рамках програми «Океан»: у 1983 р. було запущено перший космічний апарат (КА) «Космос-1500», матеріали зйомки з якого використовувалися для дослідження Світового океану, морських льодів та ін. Всього в рамках програми "Океан" існувало 7 КА, кожен з яких був оснащений радіолокаційною системою бокового огляду, останній апарат припинив функціонувати в 2000 році.



В даний час космічна зйомка Землі в радіохвильовому діапазоні здійснюється з використанням радіолокаторів із синтезованою апертурою (РСА), основною відмінністю яких від РБО є можливість досягнення високої просторової роздільної здатності шляхом когерентної обробки сигналів, прийнятих у процесі руху космічного апарату.

Історія зйомки Землі з космосу РСА почалася із запуску американської системи Seasat в 1978 р. З того часу відбувалося швидке збільшення числа систем, що ведуть зйомку радіолокації: різними країнами був проведений запуск більше десяти супутників. У таблиці наведено відомості про космічні радіолокатори із синтезованою апертурою, дані яких широко застосовуються в дослідженнях Землі.

На даний час на орбіті запуснені наступні супутники радіолокаційного спостереження Землі :

- PAZ з РСА Х-діапазону (Іспанія, 2017 г.)
- NovaSAR-S з РСА S- діапазону (Великобританія, 2018 г.)
- SAOCOM-1A, -1B, -CS з РСА L-діапазону (Аргентина, 2018 г.)
- TerraSAR-X Next Generation з РСА Х-діапазону (Німеччина, 2018 г.)
- Radarsat Constellation Mission з РСА С-діапазону (Канада, 3 супутники, 2018 г.)
- COSMO-SkyMed 2nd Generation з РСА Х-діапазону (Італія, 2 супутники - 2018, 2019 гг.)
- Кондор-ФКА з РСА S-діапазону (росія, 2 супутники - 2019 и 2020 гг.)
- OptiSAR з РСА Х- і L-діапазонів (Канада, група з восьми супутників радіолокаційного і 8 супутників оптичного спостереження- 2019, 2020 гг.)
- Kompsat-6 з РСА Х-діапазону (Республіка Корея, 2020 г.)
- BIOMASS з РСА Р-діапазону (ЕС, 2021 г.)
- Обзор-Р з РСА Х-діапазону(росія, 3 супутники - 2021, 2023, 2024 гг.)
- NISAR з РСА S- і L-діапазонів (США, Індія, 2021 г.)
- Tandem-L з РСА L-діапазону (Німеччина, 2022 г.)

Існують плани із запуску великих угруповань малих космічних апаратів зйомки радіолокації Землі (Iceye, XpressSAR та ін.).

### **5.10 Радіолокаційна зйомка небесних тіл**

Окремо варто зазначити, що зйомка радіолокації використовується не тільки для дослідження поверхні Землі, але і для вивчення і картографування інших небесних тіл, що мають щільну атмосферу (Венера, Титан), яка обмежує можливість застосування знімальних систем оптичного діапазону.

Радіолокаційна зйомка Венери здійснювалася космічними апаратами Pioneer Venus Orbiter (США, 1978-1992 рр.), Венера-15, -16 (СРСР, 1983-85 рр.), Magellan (США, 1989-1994 рр.). За результатами зйомки у 1989 р. було видано Атлас поверхні Венери, що включає гіпсометричні, геоморфологічні та інші карти.

За матеріалами зйомки радіолокації місії Cassini-Huygens (США, ЄС та Італія, 1997-2017) на поверхні супутника Сатурна Титан були виявлені вуглеводневі озера. Для нього також було складено ряд карт: висоти поверхні, тектонічна, геоморфологічна та інші.

Радіолокаційна зйомка Венери здійснювалася космічними апаратами Pioneer Venus Orbiter (США, 1978-1992 рр.), Венера-15, -16 (СРСР, 1983-85 рр.), Magellan (США, 1989-1994 рр.). За результатами зйомки радянськими апаратами у 1989 р. було видано Атлас поверхні Венери, що включає гіпсометричні, геоморфологічні та інші карти.

За матеріалами зйомки радіолокації місії Cassini-Huygens (США, ЄС та Італія, 1997-2017) на поверхні супутника Сатурна Титан були виявлені вуглеводневі озера. Для нього також було складено ряд карт: висоти поверхні, тектонічна, геоморфологічна та інші.

### 5.11 Области застосування радіолокаційної зйомки Землі

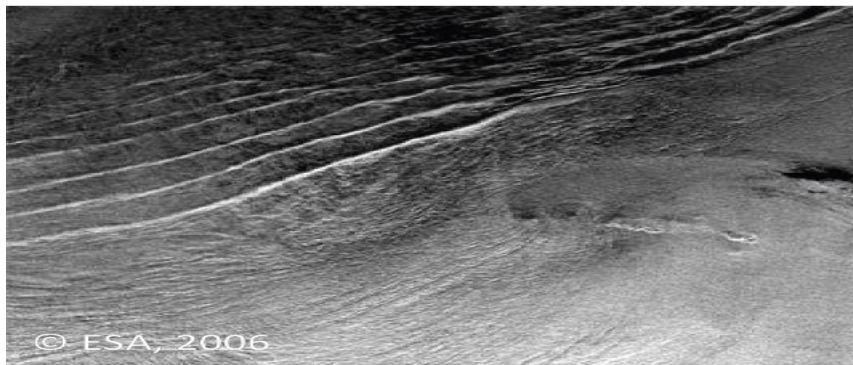
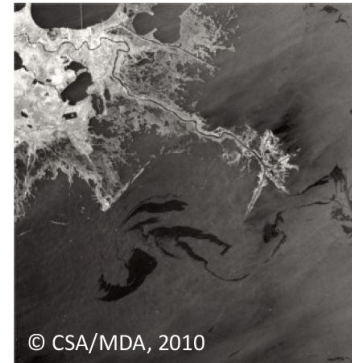
Активний розвиток орбітальної групи супутників радіолокаційного зондування Землі сприяє розширенню областей застосування радіолокаційних даних. Спочатку радіолокаційні дані найактивніше використовувалися при картографуванні тропічних лісів і приполярних областей, вивченні океанічних явищ. Нині вони знаходять широке застосування під час вирішення завдань у найрізноманітніших областях: гідрологія та океанологія, геологія та вулканологія, сільське та лісове господарство, видобувна промисловість та транспорт та ін.



Топографічне  
картографування Приклад  
1, приклад 2

Виявлення плівкових забруднень акваторій і виявлення їх джерел

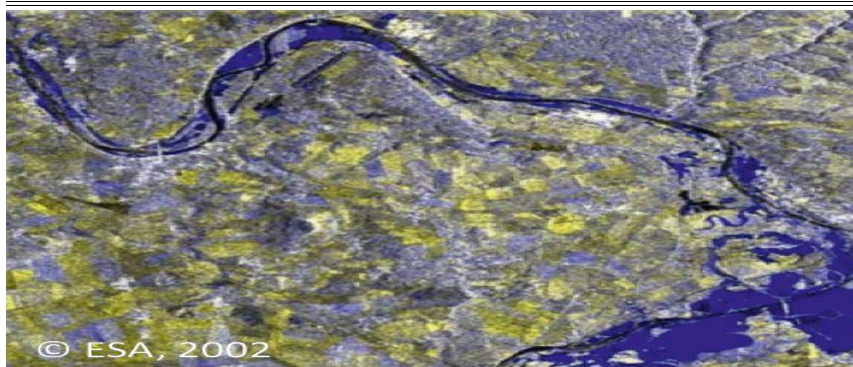
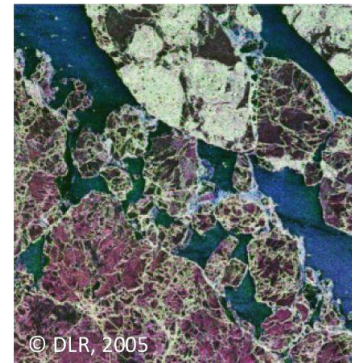
*Приклад 1, приклад 2, приклад 3*



Вивчення океанічних явищ : внутрішніх хвиль, вихрів на водною поверхнею і т.д.  
*Приклад 1, приклад 2*

Вивчення властивостей морських льодовиків: визначення положення кромки льодовиків, їх щільності, віку і т.д.

*Приклад 1, Приклад 2, приклад 3*

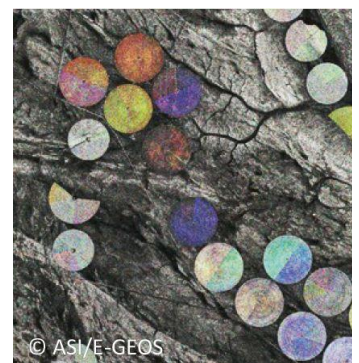


Виявлення можливих зон затоплення.

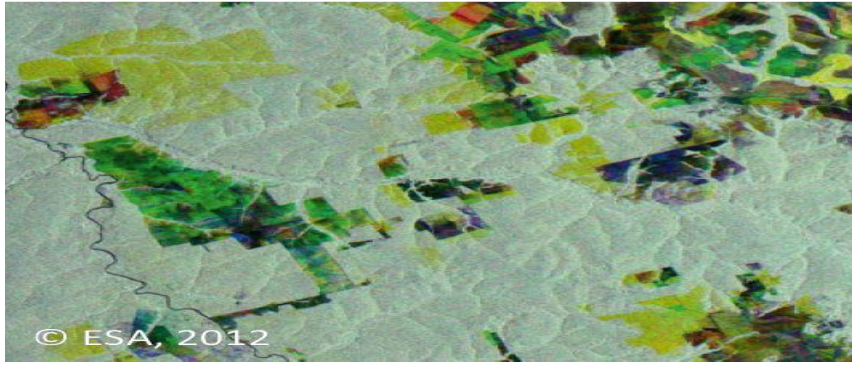
*Приклад 1, Приклад 2*

Вирішення задач сільського господарства: класифікація культур і визначення стадій їх розвитку, оцінка урожайності, визначення вологості ґрунтів і т.д.

*Приклад 1, Приклад 2*

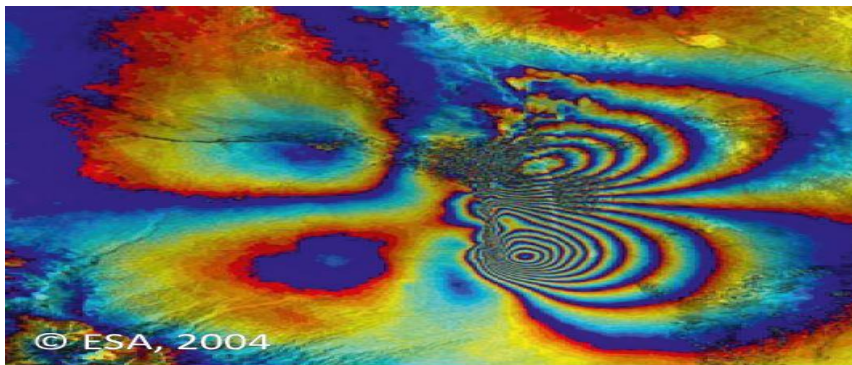
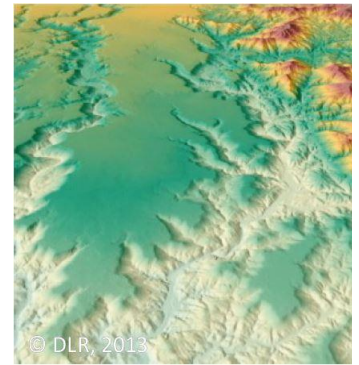






Вирішення задач лісового господарства: виявлення вирубок, визначення запасів фітомаси, висоти лісового фонду та ін.  
*Приклад 1, Приклад 2, Приклад 3*

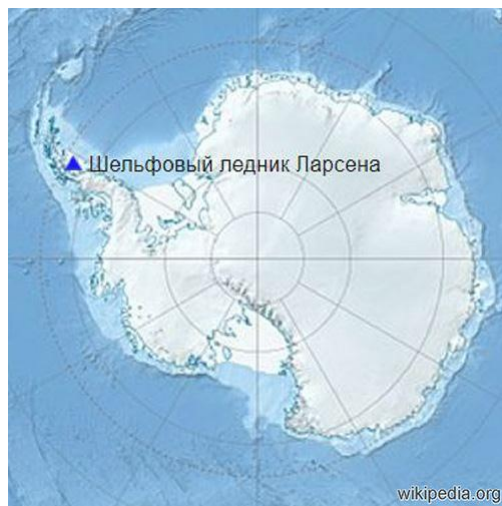
Побудова високоточних цифрових моделей рельєфу методами радіолокаційної інтерферометрії і радарграмметрії  
*Приклад 1, Приклад 2*



Виявлення зміщень земної поверхні і об'єктів, розміщених на ній, викликаних внаслідок землетрусів, просіданням ґрунту в місцях видобутку корисних копалин та під спорудами і т.д.  
*Приклад 1, Приклад 2*

### 5.12 Приклади практичного застосування радіолокаційних даних

На прикладі різних районів наводяться приклади вирішення прикладних інженерних завдань із використанням радіолокаційних даних, отриманих різними знімальними системами.



В період із 10 по 12 липня 2017 року від шельфового льодовика Ларсена в Антарктиді відколовся айсберг площею близько 6 тис. км<sup>2</sup>. Знімки, які регулярно отримують космічні апарати Sentinel-1 незалежно від хмарності та сонячного освітлення, дозволяють простежити за рухом цього айсберга..

Затоплення територій внаслідок цунамі у Японії 11 березня 2011 р (знімки TerraSAR-X.11)



11 березня 2011 р. біля східного узбережжя острова Хонсю стався землетрус магнітудою 9.

Епіцентр землетрусу визначений у точці, розташованій у Тихому океані на відстані 70 км від узбережжя, гіпоцентр знаходився на глибині 32 км. Землетрус викликав сильне цунамі, що призвело до значних руйнувань на північних островах Японського архіпелагу. Для досягнення узбережжя хвилі цунамі знадобилися від 10 до 30 хвилин. Найближче велике місто – Сендай – розташоване за 130 км від епіцентру землетрусу. В результаті цунамі було затоплено території міста та околиць на відстані 10 км від узбережжя.

Для виявлення затоплених територій використано два різночасні радіолокаційні знімки TerraSAR-X, отримані 20 жовтня 2010 р. та 12 березня 2011 р. землетрус викликав сильне цунамі, що призвело до значних руйнувань на північних островах Японського архіпелагу. Для досягнення узбережжя хвилі цунамі знадобилися від 10 до 30 хвилин. Для виявлення затоплених територій використано два різночасні радіолокаційні знімки TerraSAR-X, отримані 20 жовтня 2010 р. та 12 березня 2011 р.г.

Попередня обробка даних включала наступні етапи: радіометричне калібрування, некогерентне накопичення, кореєстрацію, фільтрацію спекл-шуму та ортотрансформування із використанням цифрової моделі рельєфу SRTM.

Складено багаточасове синтезоване зображення, в якому зелений колір присвоєно знімку, отриманому під час затоплення (12.03.2011 р.), синій - знімку, отриманому до затоплення (20.10.2010 р.), а червоний - зображенню Ratio ( $Ratio = \sigma_{01} / \sigma_{02}$ , де  $\sigma_{01}$  - коефіцієнт зворотнього розсіювання, записаний у пікселях знімка, отриманого до затоплення, а  $\sigma_{02}$  - знімка, отриманого після затоплення).



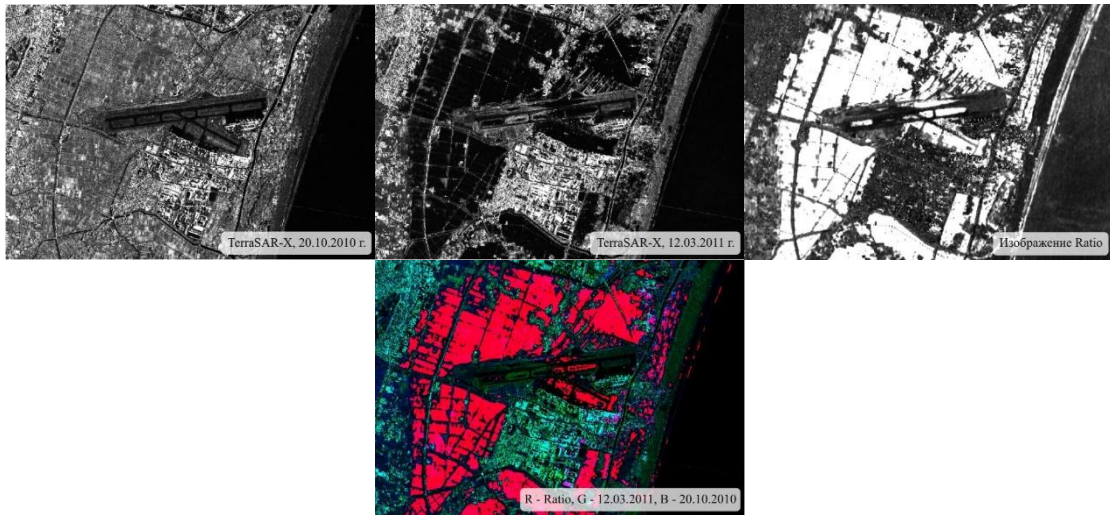


Рисунок 5.52 – Створення кольорового синтезованого зображення

Водні поверхні на обох радіолокаційних знімках зображуються чорним кольором (коефіцієнт зворотнього розсіювання цих ділянок  $\sigma_0$  близький до нуля через дзеркальне відображення).

На знімку, отриманому під час затоплення, помітно значне збільшення площ таких ділянок. На зображенні Ratio затоплені ділянки зображуються білим. Високу яскравість в такому випадку дає розподіл значення коефіцієнта зворотнього розсіювання, близькі до нуля.

Інші ділянки відображаються різними відтінками сірого. На складеному синтезованому зображенні затопленим ділянкам відповідають червоний (за рахунок високих значень яскравості на зображенні Ratio, якому при синтезі присвоєний червоний колір) і яскраво-рожевий кольори (за рахунок високої яскравості на зображенні Ratio і амплітудному знімку від 20. 10.2010 , якому при синтезі присвоєні червоний і синій кольори відповідно).

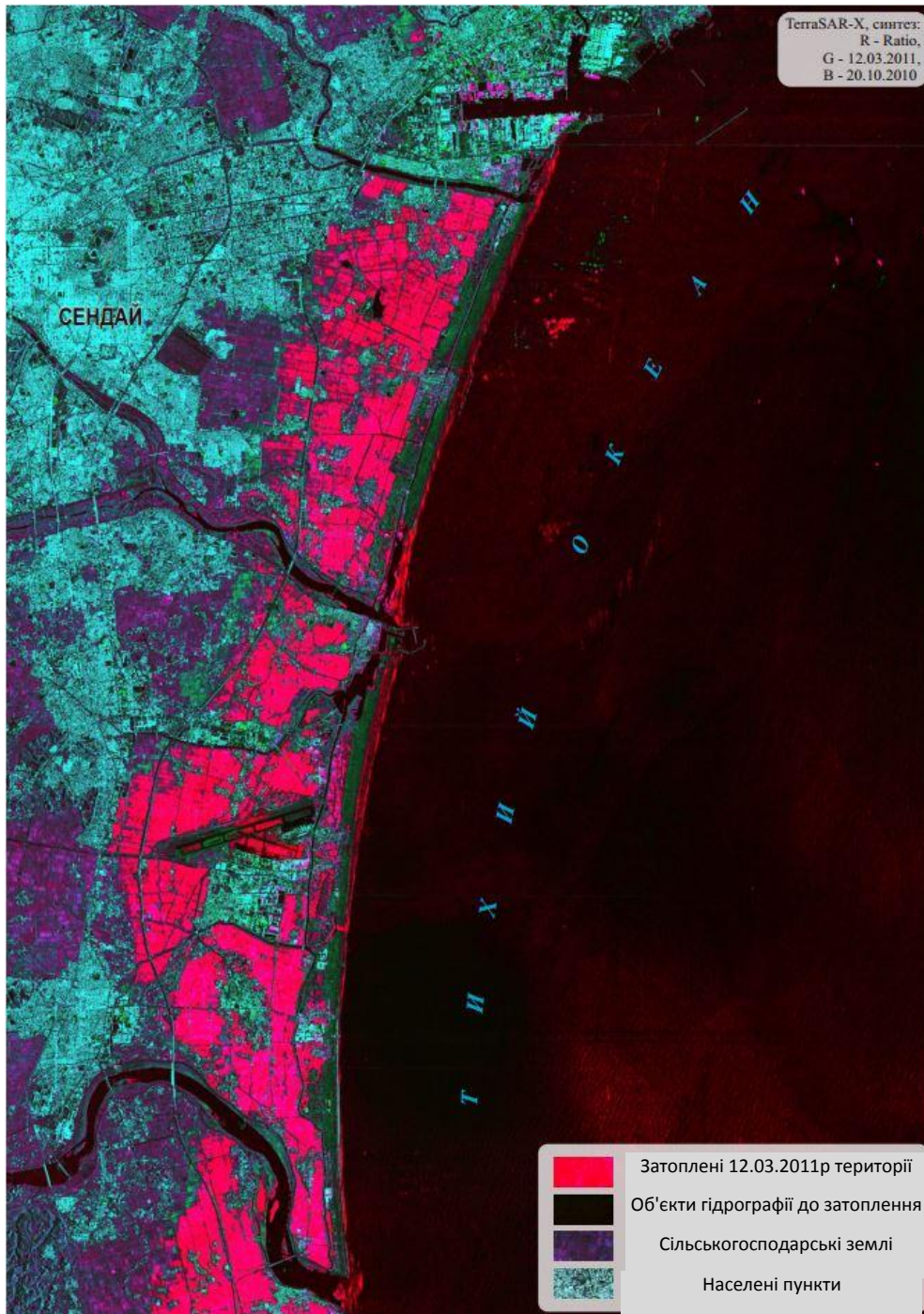


Рисунок 5.53 – Метод радіолокаційної інтерферометрії для картографування рельєфу місцевості

Радіолокаційна інтерферометрія – багатоступінчастий метод обробки комплексних радіолокаційних даних, що передбачає використання набору (двох і більше) радіолокаційних зображень досліджуваної території, отриманих за умов спостереження, що визначаються інтерферометричною базою.

Аналіз когерентних сигналів, що поступають до радіолокаторів, віддалених у просторі на інтерферометричну базу, дозволяє розрахувати різницю фаз для кожного пікселя зображення, яка потім перераховується у значення висот або зсувів поверхні.



З використанням методу радіолокаційної інтерферометрії було отримано цифрову модель рельєфу (ЦМР) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), що охоплює сушу в діапазоні широт  $60^{\circ}$  пн.ш. -  $54^{\circ}$  пд.ш. Вихідна інформація для її створення була отримана в ході 11-денної зйомки з борту космічного шатла Endeavour в лютому 2000 р. системами радіолокації C-RADAR (довжина хвилі 5,6 см) і X-RADAR (3,1 см) в режимі інтерферометрії з "жорсткою" базою.

В даний час ЦМР поширюється на безоплатній основі і має такі характеристики: просторовий дозвіл 30 м (для моделей, отриманих за даними обох частотних діапазонів), відносна точність по висоті - не гірше 10 і 6 м для моделей, складених за даними С і Х діапазонів відповідно, абсолютна – не гірша за 16 м.

Недоліками ЦМР, створеної за даними Х-діапазону, є неповне покриття суші в межах зазначеного вище діапазону широт та велика кількість шумів, особливо на поверхні водойм та водотоків. Проведений різними фахівцями аналіз ЦМР SRTM показав, що з рівнинному і горбистому рельєфі місцевості цю модель можна використовувати для побудови горизонталей на топографічних картах, починаючи з масштабів 1:50 000 – 1:100 000.

В даний час ЦМР поширюється на безоплатній основі і має такі характеристики: просторовий дозвіл 30 м (для моделей, отриманих за даними обох частотних діапазонів), відносна точність по висоті - не нижче 10 і 6 м для моделей, складених за даними С і Х діапазонів відповідно, абсолютна – не нижче 16 м. Недоліками ЦМР, створеної за даними Х-діапазону, є неповне покриття суші в межах зазначеного вище діапазону широт та велика кількість шумів, особливо на поверхні водойм та водотоків.

Проведений різними фахівцями аналіз ЦМР SRTM показав, що з рівнинному і горбистому рельєфі місцевості цю модель можна використовувати для побудови горизонталей на топографічних картах, починаючи з масштабів 1:50 000 – 1:100 000.

Наступним кроком щодо створення глобальної ЦМР методом радіолокаційної інтерферометрії стало здійснення повторних тандемних зйомок групами космічних апаратів TerraSAR-X та TanDEM-X у період з 2010 по 2014 роки.

В результаті цієї зйомки була сформована ЦМР WorldDEM, що охоплює поверхню всієї суші Землі і має унікальні в своєму роді характеристики точності: просторова роздільна здатність - 12 м, абсолютна точність по висоті - 4 м, відносна - 2 м. В даний час ця ЦМР поширюється тільки на комерційній основі.

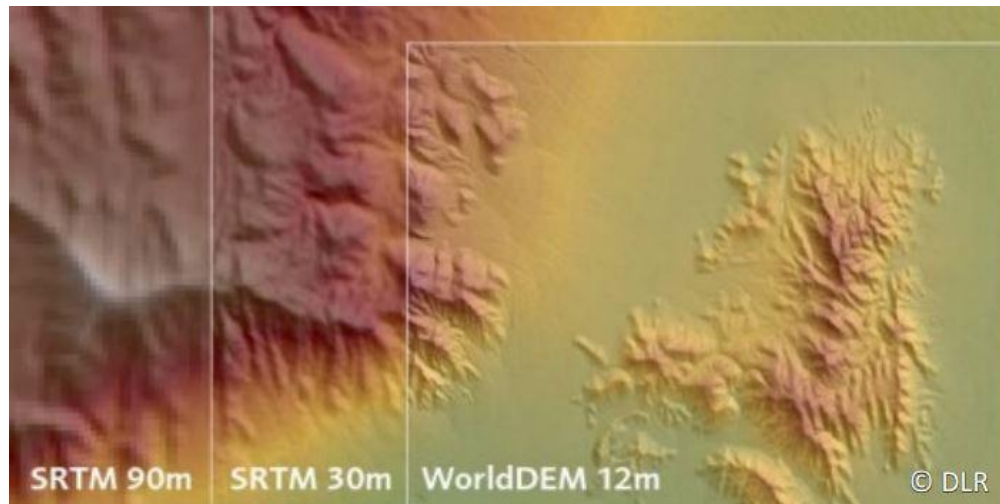


Рисунок 5.54 – Порівняння ЦМР SRTM з роздільною здатністю 90 м і 30 м і WorldDEM з роздільною здатністю 12 м

Окрім побудови ЦМР, радіолокаційна інтерферометрія використовується для виявлення та визначення величин зсувів земної поверхні та розташованих на ній об'єктів.

Цей метод називається диференціальною інтерферометрією. Перелік досліджуваних цим методом об'єктів досить широкий, до них належать льодовики, зсуви, вулкани, ділянки місцевості в зонах землетрусів, видобутку з корисними копалинами, ділянки підтоплення підземних льодовиків та інших..

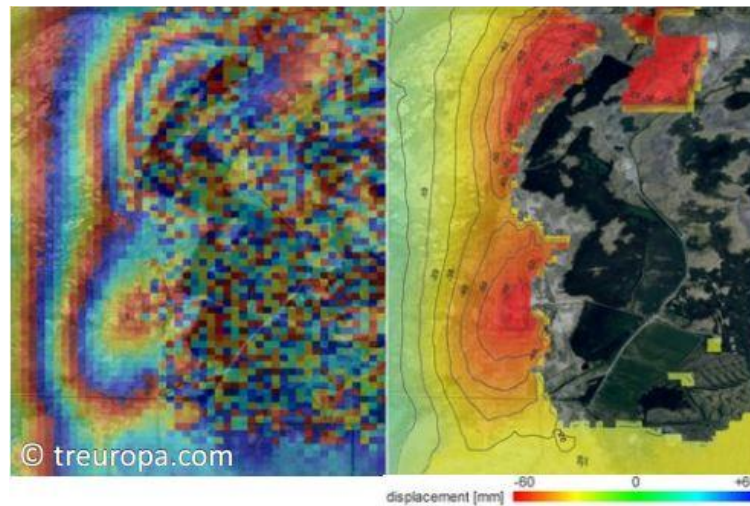


Рисунок 5.55 – Результат обробки радіолокаційних даних методом DInSAR: ліворуч - диференціальна інтерферограма, праворуч - карта зсувів

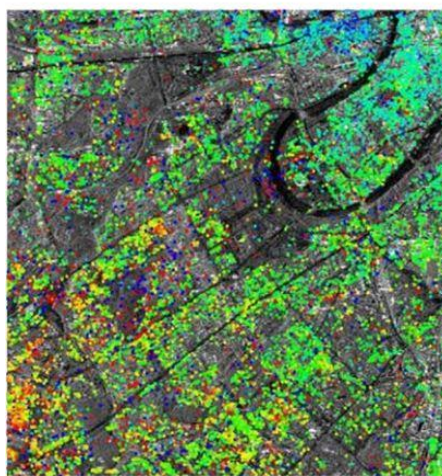
Розроблена наприкінці 1990-х років різновидність методу диференціальної інтерферометрії, метод постійних розсіювачів PSInSAR (permanent/persistent scatterer interferometry) дозволяє досягати дуже високої (міліметрової) точності вимірювання зсувів.

Цей метод базується на використанні ділянок місцевості, що стійко розсіюють радіосигнал – спеціально споруджені кутові відбивачі або подібні до них об'єкти. Для

обробки цим методом потрібні значні в часі серії даних, отриманих в інтерферометричному режимі зйомки.

Так, розробники програми SARscape рекомендують використовувати щонайменше 30 результатів таких зйомок. Цей метод часто використовується з метою оцінки стабільності будівель і споруд, трубопроводів, виявлення зсувів поверхні внаслідок підземного будівництва тощо.

Результати обробки радіолокаційних серій даних методом постійних розсіювачів, як правило, представляють собою набір точок, для кожної з яких визначені величини або швидкості зсувів за період спостережень.



Результат обробки радіолокаційних даних. Кольором показані швидкості зміщень об'єктів.

Рис 5.56 – Цифрова модель рельєфу за даними TerraSAR-X.



Рисунок 5.57 – Улуру, Австралія

Скальний масив Улуру (Айерс-Рок) розташований в Австралії в адміністративному районі Північна територія і є одним з найбільших масивів, що височіють над плоскою рівниною.

Він має довжину близько 3,6 км, ширину 3 км і висоту 348 м. Основна порода масиву - пісковик, що містить оксиди заліза, які надають йому червоного відтінку.

Розташований у пустельній зоні, масив піддається значним добовим перепадам температури, що призводить до виникнення численних тріщин на його поверхні.

Для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) у програмі SARscape використовувалася інтерферометрична пара знімків, отриманих системою TerraSAR-X (параметри даних охарактеризовані в таблиці нижче).

Набір даних представлений на сайті оператора супутникової системи TerraSAR-X/TanDEM-X Airbus Defence and Space.

Як і потрібно для інтерферометричної обробки дані, отримані при ідентичних параметрах зйомки і представлені в комплексному вигляді, що забезпечує наявність як амплітудної, так і фазової складових радіосигналу.

Крім того, досить вдало обрано територію: масив Улуру знаходиться в пустельній зоні, де практично відсутні рослинність та опади, які можуть призвести до зниження когерентності радіолокаційних даних.

Таблиця 5.3 – Характеристика даних по масиву Улуру

Знімальна система	TerraSAR-X
Дата зйомки	12 и 23 лютого 2009 г.
Режим зйомки	SpotLight
Поляризація	HH
Розмір пікселя, м	1
Кут падіння випромінювання, град.	45,6 - 46,1
Виток орбіти	Нисходящий
Рівень початкової обробки даних	SLC - Single Look Complex

Процес створення ЦМР у SARscape досить автоматизований, проте якість кінцевого результату багато в чому залежить від обраних параметрів обробки. Основні етапи обробки представлені на нижче схемі.

### 5.13 Технологічна схема інтерферометричної обробки радіолокаційних даних

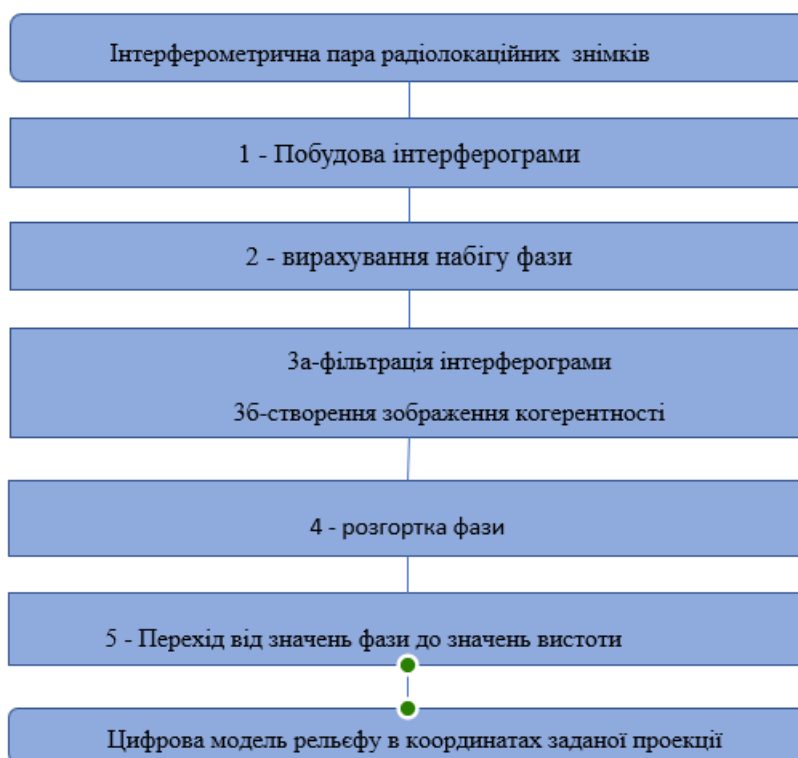


Рисунок 5.58 – Схема основних етапів обробки

Комплекс багатофункціональних модулів ENVI SARscape від компанії sarmap SA (Швейцарія) для обробки даних радіолокаційної зйомки, виконаної радаром із синтезованою апертурою (SAR).

Результати обробки радарних даних у модулях SARscape знаходять широке застосування в таких областях: моніторинг зсувів та деформацій земної поверхні та споруд, створення цифрових моделей місцевості та рельєфу (ЦММ та ЦМР), картування кількісних параметрів лісу та виявлення вирубок лісу, класифікація сільгоспкультур, оцінка наслідків, всепогодний моніторинг судноплавства, виявлення нафторозливів на водній поверхні, моніторинг льодової обстановки в акваторіях і т.д.

На сьогоднішній день модулі SARscape працюють у середовищі QGIS (вільної кросплатформової геоінформаційної системи).

Технологічна схема інтерферометричної обробки радіолокаційних даних у програмі SARscape наступна:

1 - Перший етап обробки полягає в розрахунку інтерферограми, яка є результатом послідовного комплексного перемноження основного зображення (master) і зображення, комплексно-спряженого до допоміжного (slave), в результаті чого формується картина різниць фаз поверхні, яка складається з «фрінгів» - смуг, обмежених двома сусідніми лініями рівної фази.

2 - Етап усунення набігу фази , під яким розуміють видалення інтерферометричних смуг, які утворюються за рахунок похилого зондування , в тосу числі і на плоскій поверхні.

3а – Фільтрація інтерферограми проводиться з метою її згладжування та усунення шуму, що складається з шумів радіолокаційної апаратури, каналу поширення радіохвиль, системи обробки та просторово-часового порушення когерентності знімків.

3б - Когерентність характеризує узгодженість (подібність) пари зображень: близькі до одиниці значення когерентності відповідають високій узгодженості, близькі до нуля - низькій. Когерентність є показником фазових шумів на інтерферограмі і необхідна для оцінки її якості та виконання деяких наступних операцій.

4 - Інтерферометрична фаза набуває значення від  $0$  до  $2\pi$ , проте, її дійсна величина може виходити за ці межі. Розгортка фази дозволяє відновити її абсолютні значення шляхом додавання або віднімання кратного  $2\pi$  числа до деякого початкового значення.

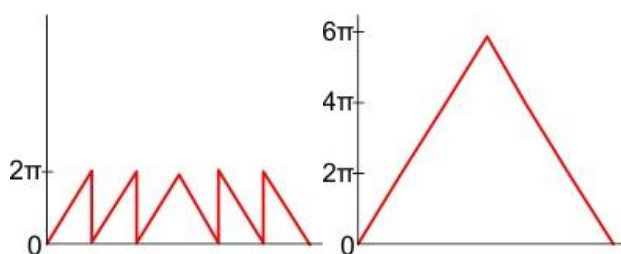


Рисунок 5.59 – Нерозгорнута і розгорнута фази

5 - На останньому етапі проводиться перерахунок значень абсолютної фази в абсолютні висоти поверхні, для чого необхідно задати декілька точок з відомими координатами  $(x, y, z)$ , які визначають перевищення місцевості над опорним еліпсоїдом. Для вибору точок використано загальнодоступну цифрову модель рельєфу SRTM. Результатом перерахунку є матриця висот, трансформована на задану картографічну проекцію.

Результати основних етапів інтерферометричної обробки наведено нижче. Для порівняння наведено дві цифрові моделі рельєфу по даним TerraSAR-X і SRTM (90 м) для аналогічної ділянки.



Рисунок 5.60 – Амплітудний радіолокаційний знімок масиву УЛуру

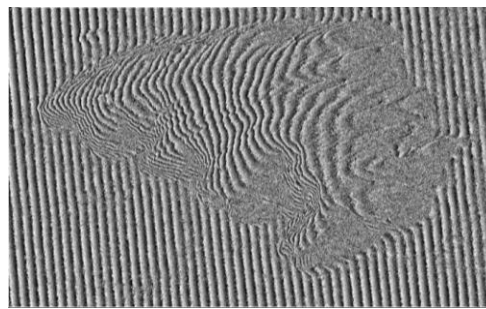


Рисунок 5.61 – Вихідна інтерферограма





Рисунок 5.62 – Інтерферограма з усуненим набігом фаз

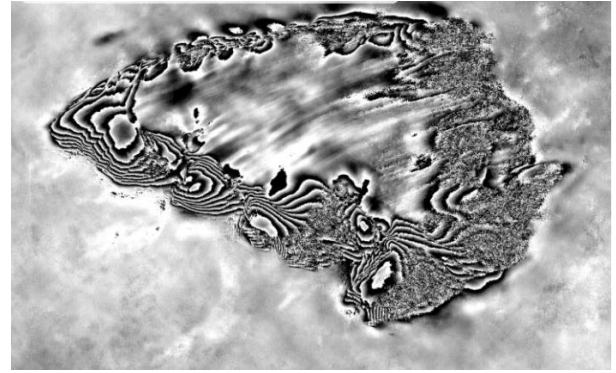


Рисунок 5.63 – Інтерферограма після фільтрації

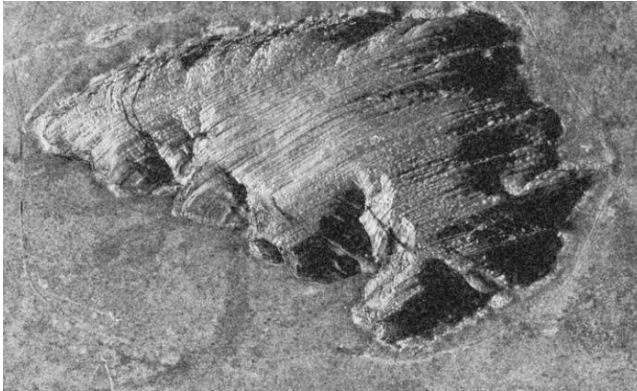


Рисунок 5.62 – Зображення когерентності

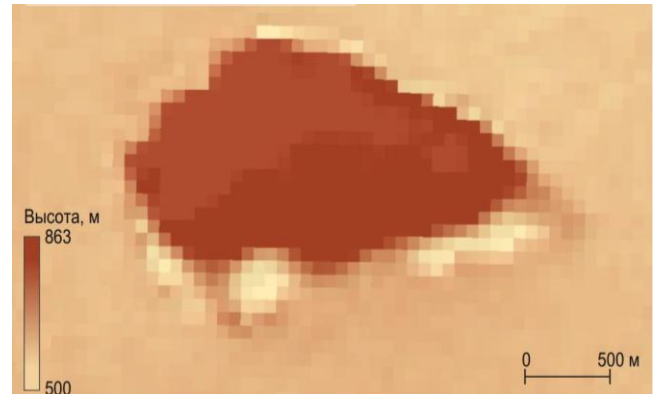


Рисунок 5.63 – Цифрова модель рельєфу SRTM

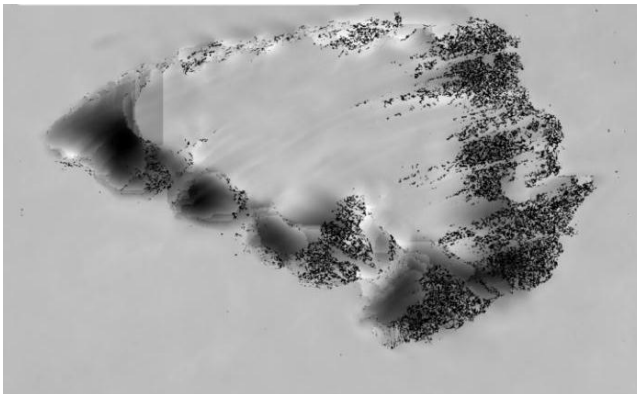


Рисунок 5.64 – Зображення абсолютної фази

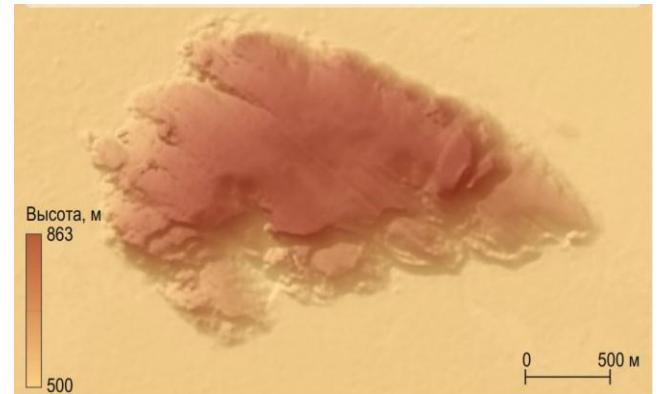


Рисунок 5.65 – Цифрова модель рельєфу, створена за даними Terra SAR-X



## Тема 6 Глобальні системи позиціонування

### 6.1 Основні аспекти глобальних навігаційних супутникових систем – GNSS

Революційну роль в розвитку геодезії, зокрема існуючих методів визначення місцеположення географічних об'єктів, мала поява Глобальних навігаційних супутникових систем (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) координатно – часового забезпечення. За їх допомогою стало можливим з високою точністю і оперативністю визначати координати пунктів спостережень, в тому числі їхню висотну складову.

Використання GNSS для вирішення геодезичних задач є найбільш поширеним і масовим методом в геодезії. GNSS – це комплексна електронно-технічна система, що складається з сукупності наземного та космічного обладнання, та призначена для позиціонування, визначення точного часу та параметрів руху (швидкості та напрямку руху) для наземних, водних та повітряних об'єктів. GNSS – термін, що відноситься до ряду супутникових систем, які належать, виникли або розробляються різними країнами світу і використовуються (або будуть використовуватися) для надання даних навігації та позиціонування до певного рівня точності для внутрішніх, комерційних, військових та дослідницьких цілей. Всі вони пропонують глобальне обслуговування користувачів, тобто забезпечення визначення місцеположення практично в будь-якій точці Землі. На сучасному рівні розвитку супутникових вимірювань, виникає новий термін – мульти-GNSS, що характеризується доступністю даних не лише з багатьох супутникових систем, але й на багатьох частотах.

На сьогодні повнофункціональними GNSS являються американська Глобальна система позиціонування (Global Positioning System, GPS) та російська Глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система, ГЛОНАСС). На етапі розвитку до повного оперативного потенціалу знаходяться європейська навігаційна система Galileo та китайська навігаційна система Бейдоу (БeiДou Navigation Satellite Сystem, BDS). Наприкінці 2016 року було надано офіційну заяву про те, що Galileo знаходиться на етапі надання первинних послуг. Очікується, що Galileo і BDS до кінця 2020 р. досягнуть повної завершеності своїх сузір'їв.

Тим часом, GPS також модернізує свою інфраструктуру, замінивши супутники моделями наступного покоління, що забезпечують нові сигнали. Крім того, система ГЛОНАСС планує модернізувати свої супутники, додавши нову частоту. Таким чином, наявність супутників при спостереженнях значно покращується. Це особливо корисно в тих областях, де середовище встановлює обмеження на видимість.

Також існують системи супутникової навігації на регіональному рівні. Регіональна супутникова система забезпечує обслуговування певного географічного положення на Землі,

збільшує доступність супутників у цих регіонах. Однією з таких регіональних систем є Індійська регіональна супутникова система навігації (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS), а інша - Японська квазі-зенітна супутникова система (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS).

Існує також третя категорія систем супутникової навігації, які забезпечують інформаційні сигнали для користувачів. Системи посилення супутникового зв'язку (Satellite Based Augmentation System, SBAS) складаються з геостаціонарних супутників, що забезпечують регіональне посилення через їх сигнали. Ці системи використовуються для підвищення точності позиціонування GNSS-приймачів. До списку систем SBAS входять:

- Система підвищення точності GNSS широкої зони дії (Wide Area Augmentation System, WAAS), яка керується Федеральною авіаційною адміністрацією США (Federal Aviation Administration, FAA); Європейська геостаціонарна служба навігаційного покриття (European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS), яка експлуатується Європейською космічною агенцією (European Space Agency, ESA);

- Російська система диференціальної корекції і моніторингу (System for Differential Corrections and Monitoring, SDCM);

- Японська багатофункціональна система диференціальної корекції супутникового базування (Multi-functional Satellite Augmentation System, MSAS)

- Індійська регіональна супутникова система диференціальної корекції (GPS Aided Geo Augmented Navigation system, GAGAN).

Всі GNSS відрізняються сигналом, кількістю супутників, що одночасно знаходяться на орбіті, орбітальними параметрами проходження супутників. Практично всі супутники передають сигнали як цивільного (відкриті сигнали), так і військового призначення (закриті сигнали). На момент написання даної дисертації робочими були 31 GPS, 23 ГЛОНАСС, 22 Galileo і 39 BDS на орбітах.

Враховуючи ці чотири системи GNSS, а також усі супутникові системи доповнення та регіональної навігації еволюція кількості супутникових сузір'їв представлена на Рисунок 1.1.

Згідно даного рисунку, до 2023 запланована кількість GNSS-супутників сягає 140.

Архітектура GNSS складається з трьох основних сегментів (Рисунок 1.2) :

- космічний сегмент (GNSS-супутники);
- контрольний сегмент (наземні контрольні станції);
- сегмент користувачів (GNSS-приймачі).

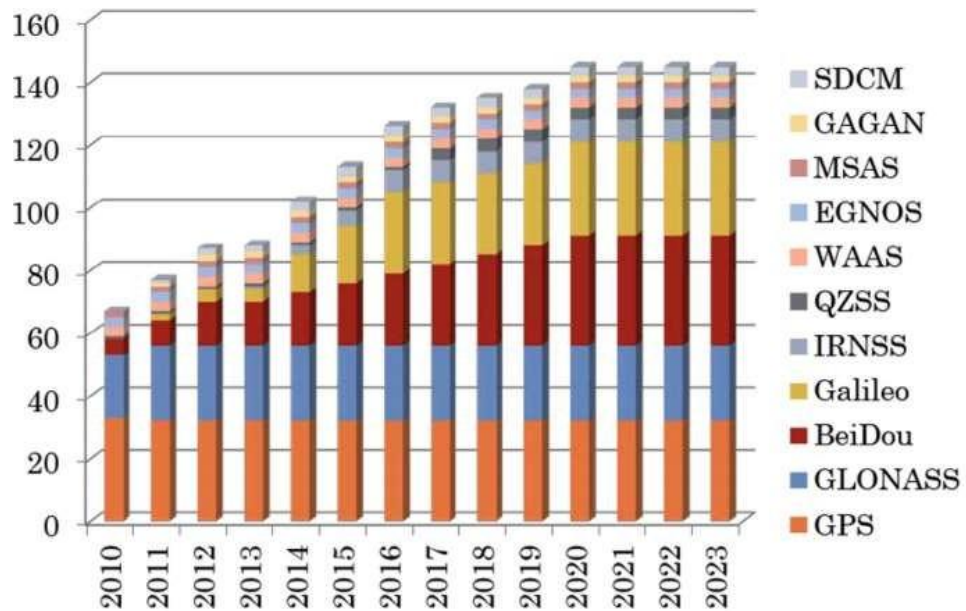


Рисунок 6.1 – Еволюція кількості GNSS-супутників

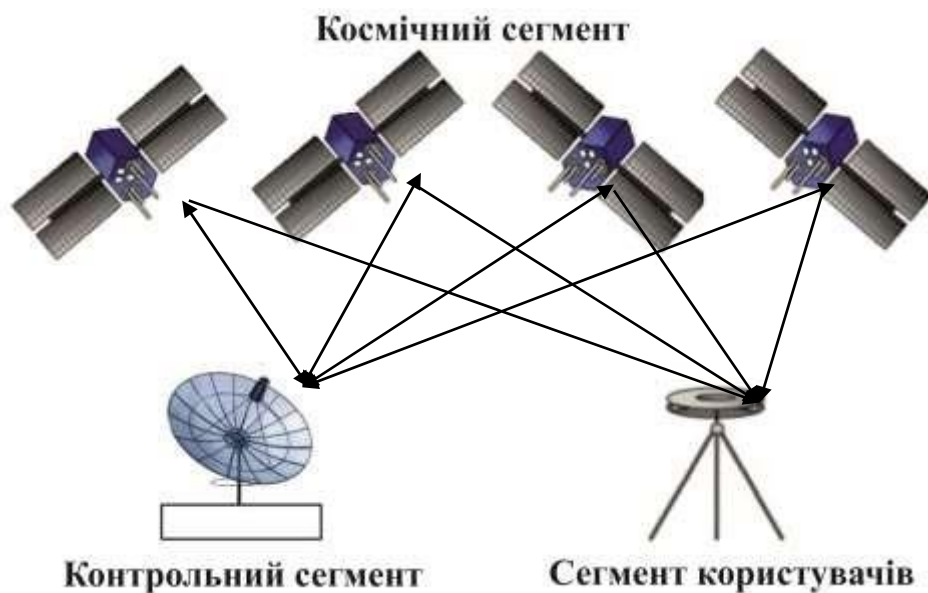


Рисунок 6.2 – Архітектура GNSS

Космічний сегмент складається з сузір'їв супутників, що обертаються по еліптичних орбітах навколо Землі. Проте, кількість супутників, що перебувають у обслуговуванні на певну дату, може змінюватись залежно від операцій, визначених сегментом управління. Сузір'я організовується від 24 до 30 основних супутників відповідно до системи для забезпечення глобальної доступності GNSS, що передбачає наявність принаймні чотирьох супутників, видимих із поверхні землі у всьому світі. На орбіті завжди більше супутників, щоб підтримувати повне охоплення цих місць навіть у разі відмови. Супутники мають на борту радіоелектронну апаратуру, яка випромінює в напрямку Землі шумоподібні

безперервні радіосигнали, що містять інформацію необхідну для проведення навігаційних визначень за допомогою апаратури користувача. До прикладу, на Рисунок 1.3 зображено сузір'я мульти-GNSS супутників на 01.01.2020 відносно словацької GNSS- станції GANP.



Рисунок 6.3 – Сузір'я мульти-GNSS

Контрольний сегмент включає в себе мережу з декількох станцій на Землі. Він складається з головної станції управління (Master Control Station, MCS) та станцій контролю (Control Stations, CS), які виконують функції визначення, прогнозування і уточнення руху супутників, тобто визначення і передбачення орбіт, годинникової синхронізації супутників та передачі даних насупутники, а також інші контрольні та профілактичні функції. Даний сегмент відповідає про утримання супутників, а також про їх функціонування.

Сегмент користувачів включає в себе приймальне обладнання та пристрої користувача □ GNSS-приймачі, які приймають супутникові сигнали, що надсилаються з супутників космічного сегменту, для визначення користувачем позиції, швидкості та часу.

Для здійснення вимірювання часу розповсюдженого радіосигналу кожен супутник навігаційної системи випромінює сигнали точного часу, використовуючи точно синхронізований з системним часом атомний годинник. При роботі супутникового приймача його годинник синхронізується з системним часом, і при подальшому прийомі сигналів обчислюється затримка між часом випромінювання, що містяться в самому сигналі, і часом прийому сигналу. Володіючи цією інформацією, навігаційний приймач обчислює координати антени. Всі інші параметри руху (швидкість, курс, пройдена відстань) обчислюються на основі вимірювання часу, який об'єкт витратив на переміщення між двома або більше точками з певними координатами.

Кожен GNSS-супутник передає радіосигнали на двох несучих частотах L1 і L2. На частоті L1 передається радіосигнал стандартної точності, радіосигнал високої точності і службова інформація; на частоті L2 - радіосигнал високої точності і службова інформація.

На рисунку 6.4 показано смуги частот, які використовуються різними GNSS.

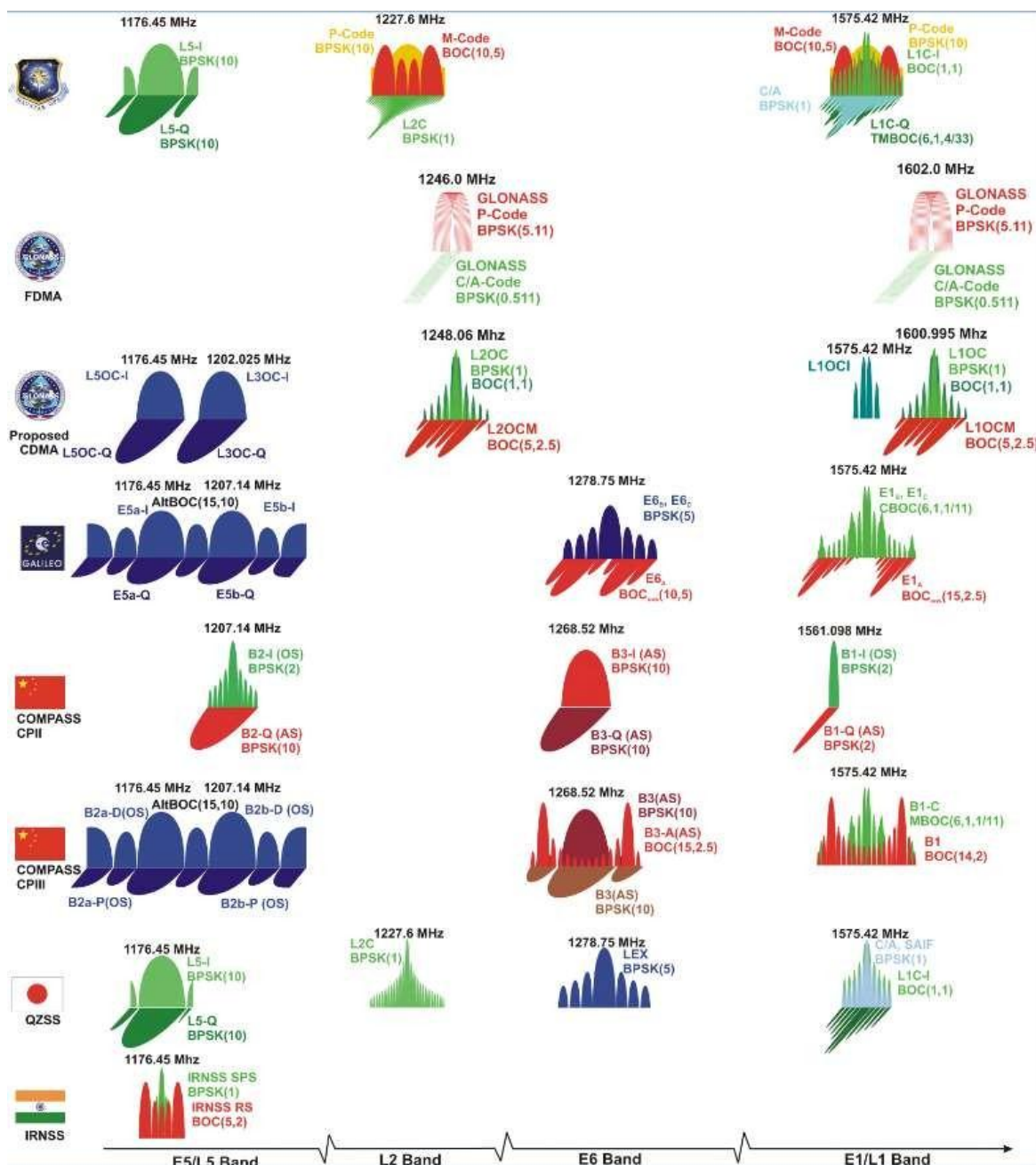


Рисунок 6.4 – Узагальнена характеристика існуючих GNSS-сигналів.

В таблиці 6.1 представлені основні характеристики відкритих кодів GNSS-сигналів.

Таблиця 6.1 – Основні характеристики кодів GNSS-сигналу

GNSS	Діапазончастот	Канал/Код	Спостереження	
			<i>Кодова псевдовідстань</i>	<i>Фазова псевдовідстань</i>
GPS	L1/1575, 42	C/A	C1C	L1C
		L1C (D)	C1S	L1S
		L1C (P)	C1L	L1L
		L1C (D+P)	C1X	L1X
		P	C1P	L1P
		Z	C1W	L1W
	L2/1227, 60	C/A	C2C	L2C
		L2C (M)	C2S	L2S
		L2C (L)	C2L	L2L
		L2C (M+L)	C2X	L2X
		P	C2P	L2P
		Z	C2W	L2W
ГЛОНАСС	G1/1602+k*9/16K=- 7...+12	C/A	C1C	L1C
		P	C1P	L1P
	G2/1246+k*716	C/A (ГЛОНАСС M)	C1C	L2C
		P	C2P	L2P
Galileo	E1/1575, 42	C	C1C	L1C
		B+C	C1X	L1X
	E5a/1176, 45	I F/NAV OS	C5I	L5I
		Q	C5Q	L5Q
		I+Q	C5X	L5X
	E5b/1207, 14	I F/NAV OS	C7I	L7I
		Q	C7Q	L7Q
		I+Q	C7X	L7X
	BDS	B1/1561, 098	I	C2I
Q			C2Q	L2Q
I+Q			C2X	L2X
B2/1207, 14		I	C7I	L7I
		Q	C7Q	L7Q
		I+Q	C7X	L7X

В таблиці 6.2 узагальнено основні технічні характеристики різних GNSS.

Таблиця 6.2 – Основні технічні характеристики GNSS

	GPS	ГЛОНАСС	Galileo	BDS
Країна	США	Росія	Європейський союз	Китай
Кількість супутників	32	24	27	35
Кількість орбіт	6 MEO	3 MEO	3 MEO	3 MEO 3 IGSO 1 GEO
Висота орбіти	20 180 км	19 140 км	23 222 км	23 150 км 35 816 км 35 816 км
Період орбіти	11 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup>	11 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>	14 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup>
Нахил орбіти	55°	64.8°	56°	55° 55° 0°
Спосіб передачі сигналів	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA
Система координат	WGS-84 (World Global System)	ПЗ-90 (Параметри Землі 1990)	GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame)	CGCS2000 (China Geodetic Coordinate System)
Несучі частоти радіосигналів, МГц	L1=1575.42 L2=1227.60	L1= ~1602.5625 L2= ~1246.4375	E1=1575.42 E5A=1176.45 E5B=1207.14	B1=1561, 098 B2=1207, 14
Reference time system	UTC + 16 с.	UTC + 3 год.	UTC + 16 с.	UTC ± 100 нс.

Можливість GNSS-приймача приймати і опрацьовувати декілька частот з декількох сузір'їв при обчисленні положення є важливим для оптимального вирішення помилок. Так, мульти-GNSS приймач може отримувати доступ до різних сигналів з декількох сузір'їв: GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BDS. Використання на додаток до GPS інших сузір'їв призводить до того, що в полі зору з'являється більша кількість супутників, що має такі переваги:

- зменшення часу отримання сигналу;
- зменшення проблем, викликаних перешкодами, такими як будівлі та листя;



– поліпшення просторового розподілу видимих супутників, що призведе до випадку мульти-GNSS приймач повинен відстежувати п'ять супутників, принаймні один з яких повинен знаходитись від супутника в іншому сузір'ї, щоб приймач міг визначати зміщення часу між сузір'ями.

## 6.2 Принцип методу високоточних координатних визначень PPP

Загальні відомості про методи високоточних координатних визначень

Спостережуваними величинами GNSS є доплерівські вимірювання, кодові псевдовідстані та фази сигналу.

Доплерівські вимірювання базуються на ефекті Доплера, що є явищем зсуву частоти електромагнітного сигналу, викликаного відносним рухом супутника та приймача. Вимірний доплерівський зсув - це не сам вихідний вимір, а відхилення від того, яке було б вимірювання внутрішнього осцилятора, без наявності доплерівського зсуву.

Кодові псевдовідстані – це вимірювання відстані або діапазону між GNSS-супутником та GNSS-приймачем, точніше відстані між антеною приймача та антеною супутника. Ці значення необхідні для обчислення позиції, де для вимірювання псевдовідстані може використовуватися або C/A-код, або P-код.

Фазові псевдовідстані – це вимірювання різниці фаз між прийнятим супутниковим сигналом і генерованим приймачем сигналом несучої в момент прийому. Діапазон у цьому вимірюванні є "просто" сумою загальної кількості повних циклів несучих плюс дробові цикли на приймачі та супутнику, помноженому на довжину хвилі несучої, де цикл  $\lambda$  це повна хвиля несучої, а неоднозначне ціле число циклів при вимірюванні несучої фази називається неоднозначністю. Через те, що довжина хвилі несучої фази набагато менша, ніж довжина хвилі для кодів, вимірювання несучої фази є більш точним.

Кодові псевдовідстані  $P$  та фазові псевдовідстані  $L$  відстані можуть бути виражені наступними співвідношеннями:

$$P = \rho + c(t_r + t^s) + T + I + e, \quad (6.1)$$

$$L = \rho + c(t_r + t^s) + T - I + \lambda N + e, \quad (6.2)$$

де  $\rho$  – геометрична відстань між GNSS-станцією та супутником;

$c$  – швидкість світла у вакуумі;

$t_r$  – покази годинника на станції;

$t^s$  – покази годинника супутника;

$T$  – тропосферна затримка сигналу;

$I$  – іоносферна затримка сигналу;

$e$  – невраховані ефекти (шум приймача, багатошляховість променя тощо);

$\lambda$  – довжина хвилі сигналу;

$N$  – фазова неоднозначність.

Фазова неоднозначність складається з трьох частин:

$$N = n + \delta\Phi^s - \delta\Phi_r, \quad (6.3)$$

де  $n$  – ціле число неоднозначності;

$\delta\Phi^s$  – невідкалібрована фазова затримка супутника;

$\delta\Phi_r$  – невідкалібрована фазова затримка приймача

Невідкалібрована фазова затримка не є цілим числом, що ускладнює розв'язок неоднозначності. Однак вона добре визначається за утвореними подвійними різницями між двома супутниками та двома приймачами.

З формул (6.1-6.2) бачимо, що існують різні фактори, які впливають на GNSS-спостереження, у вигляді помилок у визначенні положення. Природа цих помилок різна. Це можуть бути як систематичні похибки, так і випадковий шум, спричинений апаратурою або середовищем, через яке проходить сигнал. Їх можна умовно розділити на три групи:

1. супутникові помилки:
  - помилки обчислення орбіт;
  - помилки показів годинника супутника;
2. помилки, пов'язані з приймачем:
  - помилки показів годинника приймача;
  - помилки багатопроменевої променя;
  - шум приймача;
3. атмосферні помилки:
  - іоносферна затримка;
  - затримка, викликана вологою і сухою компонентами тропосфери.

*Помилки обчислення орбіт (ефемерид)* – це різниця між очікуваним та фактичним розташуванням GNSS-супутника на орбіті, де очікуване розташування визначається MCS на основі моніторингу окремих сигналів чотирма CS. Обчислені параметри орбіт завантажуються MCS на кожен супутник, який потім передає дані користувачам через навігаційне повідомлення. Якщо цей прогноз невірний і супутник знаходиться не у передбаченому місці, то вимірювання відстані від антени приймача до супутника буде містити помилку. Загальноприйняте для роботи GPS середнє значення даної групи помилок коливається в межах 1-2 м..

*Помилки показів годинників супутника та приймача.* Кожен із GNSS- супутників використовує власний атомний годинник, задля управління синхронізації часу передачі сигналу. Помилки можна усунути за допомогою двох приймачів або шляхом застосування корекції показів супутникового годинника у навігаційному повідомленні. Однак застосування поправок у навігаційному повідомленні залишає помилку порядку декількох наносекунд, що означає помилку в кілька метрів у визначеннях [28]. З іншого боку, приймачі використовують недорогі годинники, які менш точні, ніж атомні годинники на супутниках, що робить помилки показів годинника приймача набагато більшими, ніж помилки супутникового годинника. Однак, оскільки навігаційне рішення вже включає корекцію помилки супутникового годинника, помилку приймача можна усунути, взявши різницю між двома супутниками [28, 48]. Загальноприйняте для роботи GPS середнє значення помилок показів годинників супутника коливається в межах 1-2 м [104], а приймача – в межах мм-см.

*Багатошляховість променя* виникає коли сигнал GPS надходить до антени GNSS-приймача двома або більше шляхами. Сигнал супутника поширюючись в сторону приймача потрапляє в найближчий об'єкт і відбивається в напрямку антени, створюючи похибки вимірювання. Такі багатошляхові копії сигналу спотворюють кореляційну функцію між отриманим композитним (прямим) сигналом та локально згенерованою кодовою послідовністю в приймачі. Вони також спотворюють композитну фазу отриманого сигналу, вводячи помилки в вимірах псевдодальності та фази несучої, які відрізняються для сигналів різних супутників і, таким чином, створюють помилки в визначенні положення, швидкості та часу. Існує кілька методів, які дозволяють зменшити помилку через *багатошляховість променя*. Один з найпростіших – встановити антену якомога далі від потенційно відбиваючих поверхонь. Загальноприйняте для роботи GPS середнє значення даної групи помилок коливається в межах 1-2м.

*Помилки за атмосферу.* Як було зазначено раніше, на шляху від супутника до наземного приймача, GNSS-сигнал проходить через різні шари атмосфери Землі і його поширення зазнає низки ефектів. Атмосфера в даному випадку спричиняє наступні ефекти:

- іоносферна затримка;
- затримка, викликана вологою і сухою компонентами тропосфери.

Загальноприйняті для роботи GPS середні значення помилок за іоносферну затримку (при використанні двохчастотних спостережень) коливається в межах дм-м, а за тропосферну затримку – дм рівні .

Кожен з цих ефектів впливає на сигнал, і вносить певні помилки у визначення положення. Основним джерелом помилок GNSS є затримка тропосфери, яка викликана тропосферною рефракцією. Вплив тропосфери спричиняє затримки поширення GNSS-

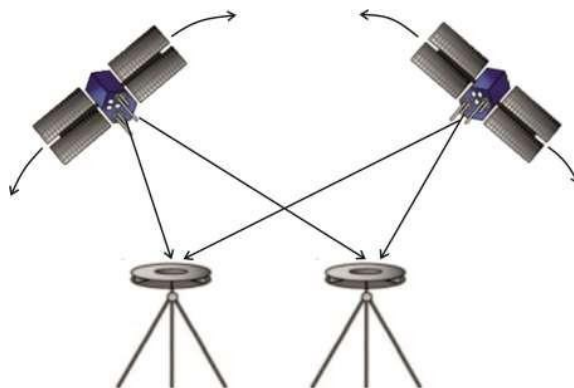
сигналу, тому він повинен бути оцінений у геодезичних областях високої точності.

Врахування всіх членів в рівнянні GNSS-спостережень дозволяє отримувати високоточні геодезичні параметри. Тому, для підвищення точності позиціонування слід застосовувати метод позиціонування, який усуває або принаймні мінімізує вплив цих джерел помилок.

Принцип роботи GNSS-спостережень полягає у вимірюванні відстані від антени на об'єкті спостережень (координати якого необхідно отримати) до супутників, положення яких в поточний проміжок часу відомо з високою точністю.

Залежно від рівня, цілей і регіону проведення GNSS-спостережень застосовують два основні методи: відносний метод (Double Difference, DD) та абсолютний метод точного позиціонування (Precise Point Positioning, PPP).

DD-метод — це стратегія визначення координат для базової лінії відносно станції з добре відомими координатами. Рівняння для розв'язання координат формуються шляхом взяття різниць між приймачами та супутниками. На рисунку 6.5 схематично зображено



принцип DD.

Рисунок 6.5 – Схематичне зображення принципу DD

Для визначення координат невідомої точки необхідно одночасне спостереження одних і тих же супутників на двох пунктах. Результати таких спостережень містять практично однакові похибки. В такому випадку різниця цих результатів буде вільна від таких похибок. У зв'язку з цим для підвищення точності супутникових вимірювань визначають не абсолютні координати кожного пункту, а координати одного пункту щодо іншого (тобто різниці координат).

DD-метод — це ефективний спосіб опрацювання даних GNSS-спостережень, який набув широкого застосування. Проте на сучасному рівні розвитку науки, даний метод становить певні недоліки. Так, наприклад, використання DD-методу для вирішення задач моніторингу, в тому числі і атмосфери, не дає достовірних результатів, опускаючи абсолютні значення цих впливів в певній досліджуваній області. До кінця 1990-х рр. практично всі програми опрацювання GNSS-спостережень використовували саме DD-метод. Більшість

комерційних програм все ще використовує його, оскільки забезпечує точність на міліметровому рівні.

PPP – це метод отримання координат за допомогою лише одного приймача. З моменту свого введення в 1997 році, цей метод представляє привабливу альтернативу для GNSS. Підхід даного методу використовує недиференційований, подвійний псевдодіапазон і фазові спостереження разом з точними орбітами супутників і показів годинників, для отримання точності від декількох міліметрів до декількох сантиметрів при статичному або кінематичному позиціонуванні. Таким чином, даний метод використовує високоточну еферидно-часову інформацію (параметри орбіти та поправки годинників супутників), що доступна тільки через 2 тижні після проведення супутникових вимірювань та моделювання систематичних ефектів в рамках опрацювання, що впливають на визначення псевдовідстаней між супутниками та приймачами, забезпечують цю точність позиціонування лише з одним GNSS-приймачем. На рисунку 6.6 схематично зображено принцип PPP.

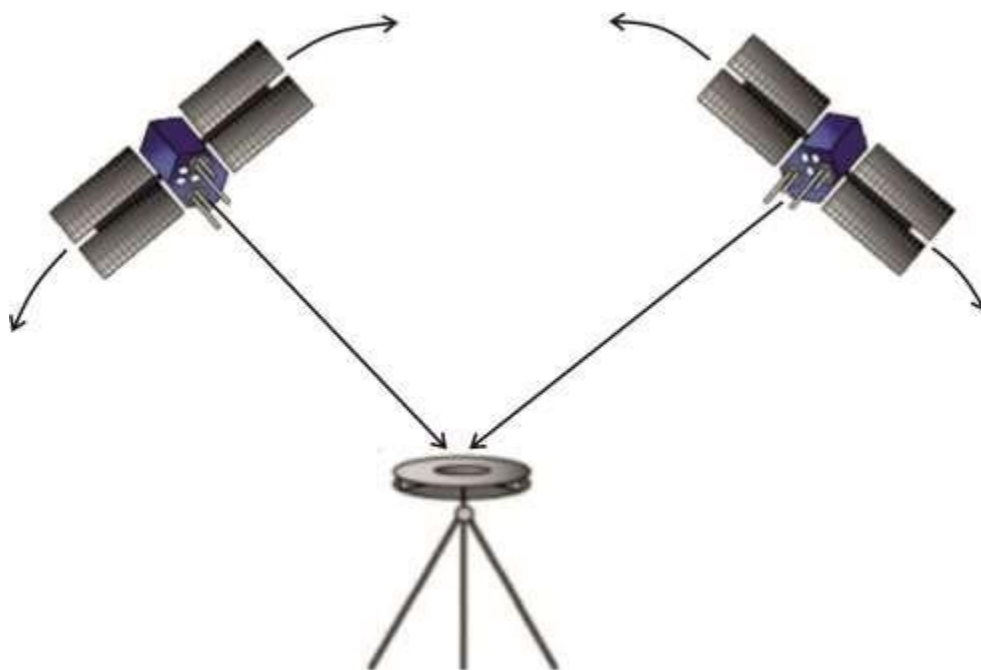


Рисунок 6.6 – Схематичне зображення принципу PPP

У реальній практиці, необхідні спостереження від, як мінімум, чотирьох супутників для виключення часових варіацій. Додавання більшої кількості супутникових діапазонів забезпечить більшу точність у визначенні місцезнаходження. Однак, точність, отримана PPP-методом, залежить від багатьох факторів, в тому числі, розташування та якості GNSS-приймача, тривалості спостереження, геометричного взаємного розташування супутників щодо антени приймача [30].

PPP не потребує синхронних спостережень із сусідньої GNSS-станції, але може відтворювати точність позиціонування з високою обчислювальною ефективністю, тоді як для опрацювання DD-методом потрібні щонайменше спостереження з двох станцій. Суть PPP-методу полягає у використанні високоточних супутникових орбіт, поправок до годинника супутників і більш досконалих геофізичних моделей в режимі пост-опрацювання. Даний метод не набув широкого застосування, через свою чутливість до всіх джерел похибок: похибки в координатах супутників, вплив середовища розповсюдження сигналу і інших зовнішніх впливів. На даний час цей метод в режимі пост-опрацювання може забезпечити міліметрову точність результатів опрацювання і бути використаним для вирішення різних задач моніторингу, в тому числі і атмосфери.

Теорія PPP-методу швидко розвивалася. Даний метод характеризується наступними особливостями:

- не вимагає базових станцій з відомими координатами або прив'язки спостережень до GNSS-станцій, на відміну від DD. Це робить його відмінним від методу позиціонування в режимі реального часу (Real Time Kinematic, RTK), який вимагає доступу до спостережень з однієї або більше базових станцій;

- використовує спостереження за фазою носіїв (здатну забезпечити дуже високу точність позиціонування), як головну можливість спостереження для визначення місцеположення. Це робить його відмінним від методу стандартного позиціонування точок (Single Point Positioning, SPP), який використовує лише коди або згладжування по фазі для визначення позиції; потребує точних супутникових орбіт та цілодобової інформації для корекції помилок годинника.

Основними перевагами PPP-методу по відношенню до DD є:

- один GNSS-приймач (індивідуальний підхід опрацювання кожної GNSS-станції);
- відсутність загального впливу GNSS-станцій мережі (ефекти розв'язків однієї GNSS-станції не спотворюють інші розв'язки);
- чутливість до тропосферних явищ;
- тощо.

До недоліків можна віднести:

- повільний час конвергенції;
- для високої точності є необхідним застосування високоточних моделей поправок багатьох явищ та ін.

Перший з недоліків усувається за рахунок збільшення тривалості проведення GNSS-

спостережень. Щодо другої групи недоліків, то для забезпечення високої точності опрацювання супутникових вимірювань PPP- методом також вимагає використання ряду нетрадиційних поправок для виправлення систематичних помилок, які можуть досягати декількох сантиметрів.

### 6.3 Точність методу PPP

З початку 2000-х рр. і до сьогодні PPP-метод пройшов еволюцію точності від дециметрів до міліметрів, використовуючи спостереження від одного GNSS-приймача. З технологією PPP отримані координати точки спостереження автоматично «прив'язуються» до високоточної однорідної глобальної міжнародної наземної системи ITRF, що і забезпечує на сучасному етапі розвитку даної технології високу точність позиціонування в режимі пост-опрацювання. Крім того, точність позиціонування прямо пропорційна часу спостереження. Так результати опрацювання добових GNSS-спостережень з використанням точної ефемеридно-часової інформації та удосконалених геофізичних моделей дає середню квадратичну помилку на рівні до 1 см. Фактична точність залежить від якості корекцій та способів їх застосування. Так, з метою отримання високої точності опрацювання супутникових вимірювань PPP-методом для виправлення систематичних помилок необхідним є використання ряду нетрадиційних поправок, до яких відносять наступні.

*Набіг фази або компонент фазової поляризації* (англомовні терміни carrier phase wind-up або carrier phase wrap-up). Цей ефект з'являється через те, що спостереження фаза несучої залежить від орієнтації антен передавача і приймача, а також від напрямку лінії візування. При русі супутника (або спостерігача) дія цього ефекту накопичується. У PPP даний ефект може погіршити вимірювання несучої фази до однієї довжини хвилі. Тому його корекцію треба обов'язково застосовувати.

*Зсув між центром супутникової антени та центром мас супутника* може бути отриманий з файлів ANTEX, наданих IGS в системі координат, фіксованої супутником.

*Припливи земної поверхні.* Гравітаційні сили Сонця і Місяця викликають певні зміни на земній корі через те, що Земля не є реальним твердим об'єктом і діє як пружне тіло. Це явище називається припливами земної поверхні і спричиняє зміщення до 5 сантиметрів в горизонтальному плані і до 30 сантиметрів у вертикальному.

*Океанічні припливи.* Гравітаційні сили Місяця і Сонця також викликають океанічні припливи. Цей ефект перерозподіляє масу води, яка деформує морське дно та поверхню суміжних земель. Океанічні припливи можуть бути змодельовані як гармонійний ряд основних складових припливів. До основних припливних складових належать напівдобові, добові та тривалі періодичні компоненти. Кожна основна складова припливів має свої



амплітуди та фази. Їх величина від місця розташування станції. Для оцінки амплітуд та фаз цих основних припливних компонентів використовується, наприклад, глобальна модель припливного океану, така як FES2004.

Таким чином при опрацюванні даних GNSS-спостережень PPP- методом важливо враховувати зміщення антени, а також ефекти зміни координат станції внаслідок геодинамічних процесів (припливи земної поверхні, океанічні навантаження). Ці ефекти найчастіше не враховуються при DD-методі. У таблиці 1.3 наведено типи корекцій та чи слід їх враховувати при опрацюванні даних GNSS-спостережень в PPP-, DD-методах задля отримання високоточного результату.

Таблиця 6.3 Перелік корекцій при опрацюванні даних GNSS-спостережень PPP- і DD-методами

<b>Типи корекцій</b>		<b>PPP</b>	<b>DD</b>
Помилки супутників	Високоточні корекції показів годинників супутників	√	×
	Високоточні корекції обчислення орбіт супутників	√	×
	Зсув між центром супутникової антени та центром мас супутника	√	√
	Набіг фази антени	√	×
	Релятивістські ефекти	√	×
Помилки приймачів	Зсув фазового центру антени приймача	√	√
	Набіг фази приймача	√	×
Помилки моделей геофізичних явищ	Припливи земної поверхні	√	×
	Океанічні припливи	√	×
	Полюсні припливи	√	×
	Рух тектонічних плит	√	×
Помилки атмосферних моделей	Тропосферна затримка	√	×
	Іоносферна затримка	√	√

При врахуванні вищенаведених помилок, а також з використанням високоточних GNSS-продуктів, точність опрацювання даних GNSS- спостережень PPP-методом в режимі пост-опрацювання може досягати до 1 см. Таким чином, PPP набуває все більшої популярності в науковій спільноті GNSS. Деякі університети та науково-дослідні інститути розробили програмні реалізації даного методу та онлайн-послуги з опрацювання PPP-методом.

## Література :

1. Коваленко Ю. Л. Метеорологія і кліматологія : конспект лекцій (для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання за спеціальностями 101 – Екологія та 183 – Технології захисту навколишнього середовища) / Ю. Л. Коваленко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 65 с.
2. Проценко Г.Д. Метеорологія та кліматологія. – К.: НПУ ім. Драгоманова, 2007. – 265 с.
3. Кобрін В.М. Метеорологія і кліматологія. – Х.: ХАІ, 2006. – 355 с.
4. Калинич І.В., Радиш І.П., Ваш Я.І. Електронні геодезичні прилади. Конспект лекцій–Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2021р. – 156 с.
5. Іщенко, М. В. (2012). Зведена обробка спостережень регіональної GPS-мережі та її результати: дис. к. т. н., Київ, Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 146 с
6. Карпінський Ю.О. Геопросторовий аналіз: навч. посіб. /Карпінський Ю.О., Лященко А.А., Кравченко Ю.В. – К.: КНУБА, 2016.-184с.
7. Кейк Д. Геоінформаційні технології та інфраструктура геопросторових даних: у шести томах. Том 2: Системи керування базами геоданих для інфраструктури просторових даних. Навчальний посібник /Кейк Д., Лященко А.А., Путренко В.В., Хмелевський Ю., Дорошенко К.С., Говоров М. – К.: Планета-Прінт, 2017. – 456 с.
8. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.
9. Говоров М. Геоінформаційні технології та інфраструктура геопросторових даних: у шести томах. Том 3: Просторові кадастрові інформаційні системи для інфраструктури просторових даних. Навчальний посібник /Говоров М., Лященко А.А., Кейк Д., Зандберген, П. М.А. Молочко, Л. Бевайніс, Л.М. Даценко, Путренко В.В. – К.: Планета-Прінт, 2017. – 520 с.
10. Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C., Grinter T. (2012). Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End? Paper presented at the Proceedings of FIG Working Week 2012, 6-10 May 2012, Rome, Italy, 17 p
11. Nistor, S., Buda, A. S. (2016). The influence of zenith tropospheric delay on ppp-rtk. Journal of applied engineering sciences, Volume 6 (19), pp. 71- 76.
12. Trimble GNSS Planning Online [online] Available at: <https://www.gnssplanning.com/#/settings> [Accessed 01 03 2020]
13. Savchuk, S., Kablak, N., Khoptar, A. (2018). Comparison of approaches to zenith tropospheric delay determination based on data of atmosphere radio sounding and GNSS

observation. Interdepartmental scientific and technical collection «Geodesy, Cartography and Aerial Photography, Volume 88, pp. 24-32.

14. Xu, G., Xu, Y. (2007). GPS–Theory, Algorithms and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 489 p
15. Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, [online] Available at: <http://www.gps.gov/> [Accessed 01 03 2020].
16. Misra, P., Enge, P. (2006). Global Positioning System: Signals, Measurement, and Performance, Second Edition, Ganga-Jamuna Press, 206 p
17. Grewal, M. S., Weill, L. R and Andrews, A. P. (2007). Global Positioning Systems, Inertial navigation and integration. New Jersey: Second Edition, John Wiley & Sons, Inc, 525
18. Cai C., Gao Y., Pan L., Zhu, J. (2015). Precise point positioning with quadconstellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. Advances in Space Research, Volume 56 (1), pp. 133-143.
19. Gutjahr, K. (2002) INSAR-Blockausgleich. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Digitale Bilorschungsgesellschaft Joanneum Research.
20. Knabe,temustern in semiariden Gebieten mittels ERS-1/2 InSAR Zeitreihen. Dissertation, Technischen Universität Wien, Fakultät für Mathematik und Geoinformation
21. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar // IEEE Geoscience and remote sensing magazine, 2013, p. 6-43

#### **Електронні ресурси:**

1. European GNSS Service Centre, “Constellation Information”, [online] Available at: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellationinformation> [Accessed 01 03 2020].
35. European Space Agency, [online] Available at: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/What\\_is\\_Galileo](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo) [Accessed 01 03 2020].
2. ESA navipedia, [online] Available at: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_signal](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal) [Accessed 01 03 2020].
32. EUREF Permanent GNSS Network, [online] Available at: <http://epncb.oma.be/> [Accessed 01 03 2020].
3. European Commission, “Galileo goes live!”, Press release, December 14th, 2016, Brussels, [online] Available at: [http://europa.eu/rapid/pressrelease\\_IP-16-4366\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/pressrelease_IP-16-4366_en.htm) [Accessed 01 03 2020]
4. <http://www.eco-paper.kpi.ua>

#### **Сайти і презентації:**

1. [Descartes Labs: Maps](#) - глобальна мозаїка, складена на основі знімків Sentinel-1
2. [Browse Document Library - Earth Online - ESA](#) - електронна бібліотека документів Європейського космічного агентства, в т.ч. по радіолокаційному зондуванню

3. [Documentation | PolSARpro | ESA](#) – навчальні матеріали Європейського космічного агентства по радіолокаційній поляриметрії
4. [Educational Resources for Radar Remote Sensing](#) - презентація Канадського центру дистанційного зондування по с
5. [Educational Resources | Natural Resources Canada](#) - навчальні матеріали Канадського центру дистанційного зондування, в т.ч. по радіолокаційному зондуванню
6. [ERS Radar Courses - ESA Operational EO Missions - Earth Online - ESA](#) - навчальні матеріали Європейського космічного агентства по радіолокаційному зондуванню
7. [Radar Basics](#) -електронна енциклопедія, присвячена принципам і технологіям радіолокації
8. [SAR-EDU](#) - набір презентацій, присвячених радіолокаційному зондуванню
9. [Satellite Missions Directory – Earth Observation Missions – eoPortal](#) - ресурс Європейського космічного агентства, присвячений опису космічних систем, в т.ч. радіолокаційного спостереження
10. [Sentinel Online - ESA](#) - сайт Європейського космічного агентства, в якому міститься інформація про програмі дистанційного зондування Землі Sentinel

**Джерела радіолокаційних даних:**

1. [Airbus Defence and Space](#) – тестові дані TerraSAR- и TanDEM-X
2. [Alaska Satellite Facility](#) - архів знімків Sentinel-1, ALOS/PALSAR, Radarsat-1, ERS-1 и - 2, JERS-1, SEASAT
3. [Copernicus Open Access Hub](#) - архів знімків Sentinel-1
4. [EarthExplorer](#) - архів знімків SIR-C
5. [Japan Aerospace Exploration Agency \(JAXA\)](#) - тестові дані ALOS-2
6. [MacDonald, Dettwiler and Associates \(MDA\)](#) - тестові дані Radarsat-2
7. [National Remote Sensing Centre](#) - тестові дані Risat-1
8. [Supersites](#) – набори радіолокаційних та інших даних на деякі райони виникнення надзвичайних ситуацій

**Відкрите та комерційне програмне забезпечення для обробки радіолокаційних даних:**

1. [DORIS](#)
2. [GAMMA](#)
3. [PCI Geomatics - Radar Suite](#)
4. [Photomod radar](#)
5. [RADAR Analyst Workstation](#)
6. [SARPROZ](#)

7. SARscape
8. SNAP (Sentinel application platform)