Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національна академія наук України

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національна академія наук України

> Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Букін Олександр Володимирович

УДК 621.396.96+537.226

### **ДИСЕРТАЦІЯ**

# БАГАТОЧАСТОТНЕ КОГЕРЕНТНЕ РАДІОЗОНДУВАННЯ ПІДПОВЕРХНЕВОГО СЕРЕДОВИЩА

## 01.04.03 – радіофізика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,

результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_О. В. Букін

Науковий керівник Сугак Володимир Григорович доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Харків - 2018

#### **АНОТАЦІЯ**

Букін О. В. Багаточастотне когерентне радіозондування підповерхневого середовища. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізикоматематичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено обґрунтуванню радіофізичного методу багаточастотного когерентного радіозондування підповерхневого середовища, що дозволяє оцінювати фізичні характеристики підповерхневої структури ґрунту, виявляти зміни фізичних властивостей цієї структури, виявляти окремі об'єкти, пов'язані з елементами інженерних конструкцій, та діагностувати їх стан.

Об'єктом дослідження є електромагнітні сигнали, розсіяні неоднорідностями підповерхневої структури ґрунту.

Предметом дослідження є моделі взаємозв'язку електрофізичних характеристик порід ґрунту з характеристиками відбитих сигналів, а також математичні алгоритми обробки цих сигналів, що дозволяють отримувати інформацію про фізичні властивості підповерхневої структури ґрунту.

У роботі зроблено аналітичний огляд існуючих на даний момент методів радіолокаційного підповерхневого зондування. Основну увагу було приділено проблемам, що обмежують застосування цих методів. Як основну проблему підповерхневого зондування розглядається частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту. Так само проблемою є те, що при дослідженні підповерхневої фізичної структури ґрунту, яка має слабку радіолокаційну контрастність розрізу, визначити фізичні зміни у розрізі використовуючи відомі методи підповерхневого зондування, складно. У роботі наведено порівняльний аналіз електричних моделей змішування, на підставі яких визначаються електричні характеристики ґрунту. Електричні моделі змішування відображають взаємозв'язок між фізичними та електричними характеристиками грунту. Встановлено, що основні електричні моделі змішування є емпіричними або напівемпіричними, і залежать від фізичних характеристик грунту, які в більшості випадків є апріорно невідомими.

У роботі наведено обґрунтування застосування багаточастотного когерентного сигналу зі ступінчастою зміною несучої частоти як зондуючого, та прямого перетворення Фур'є при обробці відбитих зондуючих сигналів.

Встановлено залежність між фазовою структурою відбитих сигналів, електричними характеристиками порід ґрунту, та, відповідно до електричної моделлю змішування, фізичними характеристиками ґрунту. На підставі цього запропоновано використовувати залежність фазової структури сигналів відбитих від неоднорідностей підповерхневого структури ґрунту, для діагностики підповерхневої структури ґрунту, зокрема, що має слабку радіолокаційну контрастність розрізу.

Запропоновано новий спосіб візуалізації результатів радіозондування за трасою руху георадару, який дозволяє оцінювати просторову зміну фізичних властивостей порід ґрунту.

На підставі аналізу результатів натурних георадарних зондувань було отримано дані, які свідчать про відміну частотної дисперсії діелектричної проникності в різних ґрунтах і частотної залежності погонного загасання радіохвиль у порівнянні з розрахунковими даними, що отримуються в результаті моделювання електричних характеристик ґрунту. На цій підставі було скориговано математичну модель електричних характеристик ґрунту.

Запропоновано новий ітераційний метод відновлення фізичних характеристик ґрунту, в якому використовано залежність фазової структури відбитих сигналів від фізичних характеристик підповерхневої структури ґрунту, а так само скориговано математичну модель електричних характеристик ґрунту.

Представлено практичні результати, які отримані при проведенні багаточастотного когерентного підповерхневого радіозондування. Для цього було розроблено та виготовлено спеціалізовані георадари метрового і діапазонів 100 - 450 МГц; дециметрового частот: 500 - 900 МГц; обробці 1200 - 1800 МГц. При даних зондування використовувався запропонований ітераційний метод відновлення фізичних характеристик грунту. Експериментально підтверджено, що багаточастотні георадари можуть ефективно використовуватися для: оцінки об'ємної вологості по глибині розрізу; визначення рівня ґрунтових вод; пошуку підповерхневих "лінз", що містять рідкі нафтопродукти; діагностики ділянок схильних до ділянок розущільнення **3CVBV**; визначення ґрунту дамби, викликані гідрологічним впливом води.

Було проведено експерименти по застосуванню багаточастотного підповерхневого радіозондування для пошуку закопаних макетів металевих і пластикових мін. Результати експериментів, які проводилися в лабораторних та польових умовах, показали, що з допомогою багаточастотного підповерхневого радіозондування можна визначати як місце установки мін, так і їх тип.

#### Наукова новизна одержаних результатів

• Вперше запропоновано методику використання фазової структури відбитих зондувальних сигналів для визначення підповерхневої структури ґрунту.

• Запропоновано та апробовано скориговану математичну модель електричних характеристик ґрунту, що враховує частотну дисперсію його діелектричної проникності.

• Розроблено та експериментально перевірено новий ітераційний метод визначення фізичних характеристик підповерхневого середовища з фазової структури відбитого сигналу з використанням запропонованої моделі електричних параметрів ґрунту.

• Вперше, з використанням розроблених макетів георадарів метрового і дециметрового діапазонів частот, експериментально підтверджено можливість використання фазової структури відбитих сигналів для оцінки фізичних характеристик підповерхневої структури ґрунту і окремих об'єктів як штучного, так і природного походження.

#### Практичне значення одержаних результатів

В результаті проведених досліджень запропоновано новий радіофізичний метод багаточастотного когерентного радіозондування підповерхневого середовища, який може бути використаний для діагностики структури ґрунту із залежною від частоти діелектричною проникністю ґрунту і слабкою радіолокаційною контрастністю розрізу.

Ключові слова: підповерхневе радіозондування, георадар, структура грунту, багаточастотний когерентний сигнал, перетворення Фур'є, фазова структура сигналу, електричні характеристики ґрунту, електрична модель грунту, радіолокаційна контрастність.

#### ABSTRACT

*Bukin O. V.* Multifrequency coherent radar sensing of subsurface environment. – Qualification research work is a manuscript.

Thesis for Candidate Degree of Physical and Mathematical Sciences in speciality 01.04.03 - radiophysics. O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the substantiation of the radiophysical method of multifrequency coherent radar sensing of subsurface environment, that allows to evaluate the physical characteristics of the subsurface soil structure, to reveal changes in the physical properties of this structure, to detect individual objects associated with the elements of engineering structures, and to diagnose their condition.

The object of the study is electromagnetic signals scattered inhomogeneities of the subsurface structure of the soil.

The subject of the study are models of the relationship of electrophysical characteristics of soil rocks with the characteristics of the reflected signals, as well as mathematical algorithms for processing these signals, allowing to extract information about the physical properties of the subsurface structure of the soil.

The paper presents an analytical review of the currently existing methods of radar subsurface sensing. The main attention was paid to the problems limiting the application of these methods. The frequency dispersion of the dielectric permittivity of the soil is considered as the main problem. It is also a problem that when studying the physical structure of a soil with a weak radar contrast of a crosssection, it is difficult to determine the physical changes in soil structure by widely used subsurface sensing methods. The paper presents a comparative analysis of electric mixing models, on the basis of which the electrical characteristics of the soil are determined. Electric mixing models reflect the relationship between the physical and electrical characteristics of the soil. It is established that the main electric mixing models are empirical or semiempirical, and depend on the physical characteristics of the soil, which in most cases are a priori unknown.

The paper presents the rationale for the use of multifrequency coherent signal with a step change in the carrier frequency as a sensing, and direct Fourier transform in the processing of reflected sensing signals.

A relationship was established between the phase structure of the reflected signals, the electrical characteristics of the soil rocks, and, in accordance with the electrical mixing model, the physical characteristics of the soil. On the basis of this, it was proposed to use the dependence of the phase structure of the signals of the subsurface soil structure reflected from the inhomogeneities, to diagnose the physical structure of the soil, in particular, for a cross-section having a weak radar contrast.

A new method was proposed for visualizing the results of radar sensing on the profile of the movement of ground-penetrating radar, which makes it possible to estimate the spatial variation of the physical properties of the soil rocks. Based on the analysis of the results of field ground-penetrating radar sensing data were obtained, which show the difference between the frequency permittivity dispersion in various soils and the frequency dependence of the linear attenuation of radio waves as compared with the calculated data obtained by modeling the electrical characteristics of the soil.

A new iterative method for restoring the physical characteristics of the soil is proposed, which uses the relationship between the phase structure of the reflected signal and the physical characteristics of the subsurface structure of the soil, as well as an adjusted mathematical model of the electrical characteristics of the soil.

Presents the results obtained when carrying out multi-frequency coherent subsurface radio sensing. To this end, specialized ground-penetrating radar of meter and decimeter frequencies were developed and manufactured: 100-450 MHz; 500-900 MHz; 1200-1800 MHz. The proposed iterative method of restoring the physical characteristics of the soil was used in the processing of sensing data. It has been experimentally confirmed that multifrequency groundpenetrating radars can be effectively used to: estimate the volumetric moisture content in the depth of the section; determination of groundwater level; search for subsurface "lenses" containing liquid petroleum products; diagnostics of sites subject to landslide formation; determination of the decompaction areas of the dam ground caused by the hydrological action of water.

Experiments were conducted on the use of multifrequency subsurface radar sensing to search for buried models of metal and plastic mines. The results of experiments that were conducted in laboratory and field conditions showed that using multifrequency ground-penetrating radar it is possible to determine both the location of the mines and their type.

As a result of the research, a new radiophysical method of multifrequency coherent radar sensing of the subsurface medium is proposed, which can be used to diagnose the structure of the soil with a frequency-dependent permittivity dispersion of the soil and a weak radar contrast of the section. **Keywords**: ground penetrating radar, soil structure, multifrequency coherent signal, Fourier transform, phase structure of the signal, electrical characteristics of the soil, electric soil model, radar contrast.

#### Список публикацій за темою дисертації

1. Радиолокатор со ступенчатым изменением частоты для обнаружения и распознавания малогабаритных объектов под поверхностью земли / В. Г. Сугак, А. В. Букин, Е. М. Васильева [и др.] // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т. 1(15), № 3. – С. 92–97.

2. Сугак В.Г. Корреляционная функция зондирующего сигнала со ступенчатым изменением несущей частоты в условиях подповерхностного зондирования / В. Г. Сугак, А. В. Букин, А. Али Джадуей // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 197–203.

3. Использование георадиолокатора для определения уровня ґрунтовых картографирования территорий, вод И загрязненных / В. Г. Сугак, А. В. Букин, Ю. А. Педенко [и др.] // нефтепродуктами Радиофизика и электроника: Сб. трудов ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2005. - T.10, № 2. - C. 240–247.

4. Sugak V. G. SFCW GPR Sensor with Phase Processing for Buried Small Objects Detection and Recognition / V. G. Sugak, A.V. Bukin, A.V. Sugak // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol.74, № 19. – P. 1755–1766.

5. Sugak V. G. Forward Looking Ground Penetrating Radar with Synthetic Antenna Aperture for Buried Explosive Hazards Detection / V. G. Sugak, A. V. Bukin, N. G. Reznichenko // Telecommunications and Radio Engineering.–2017.– Vol. 76, № 13.– P. 1149–1160.

6. Щілинна антенна для радіолокаторів підповерхневого зондування
: пат. 103381 Україна. № а201113332; заявл. 14.11.2011; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19. 5с.

7. Сугак В. Г. 0 противоречии данных подповерхностного зондирования теоретическим моделям диэлектрических характеристик пород В. Г. Сугак, А. В. Букин, И. С. Бондаренко, А. В. Сугак // ґрунта / Международный радиолектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2011. Сб. научн. тр. т.1, ч.1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. - С. 281-284.

8. Sugak V. G. Forward Looking Ground Penetrating Radar with Synthetic Antenna Aperture for Buried Explosive Hazards Detection / V.G. Sugak, A. V. Bukin, N. G. Reznichenko, Ali Djadooei // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016 Proceedings). – Kharkiv, Ukraine, June 21-24, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – IEEE Catalog Number: CFP16780-CDR. – ISBN: 78-1-5090-2266-3.

9. Сугак В. Г. Застосування раділокатора підповерхневого зондування для виявлення мін на далекій (більш безпечній) відстані / В. Г. Сугак, А. В. Букін, Е. М. Васильева // Х Міжнародна науково-технічна конференція "Метрологія та вимірювальна техніка" (Метрологія – 2016) Тези доповідей. – Харків, 2016. – С.79.

Сугак В. Г. Применение специализированного георадиолокатора
 в задачах инженерной геологии, гидрогеологии и экологии / В. Г. Сугак,
 А. В. Букин, О. А. Овчинкин [и др.] // Наука та інновації. – 2005. – Т.1, № 2. –
 С. 32–43.

11. Букин А. В. Экспериментальная щелевая антенна с изменяемой поляризацией на излучение и прием в составе макета георадара дециметрового диапазона / А. В. Букин, Е. М. Васильева, В. Г. Сугак // Український метрологічний журнал.–2014.–№ 4.–С. 34–37.

## **3MICT**

ВСТУП11
РОЗДІЛ 1 Огляд та аналіз літератури 20
1.1 Основні етапи розвитку підповерхневого радіозондування 20
1.2 Відеоімпульсний метод підповерхневого радіозондування
1.3 Багаточастотний метод підповерхневого радіозондування 24
1.4 Фізичні та електричні характеристики ґрунту
1.5 Моделі електричних характеристик ґрунту
1.6 Пов'язана вода. Глина. Подвійний електричний шар. Йонна провідність 39
1.7 Експериментальне визначення комплексної діелектричної проникності грунту
Висновки до розділу 1
РОЗДІЛ 2 Зондування підповерхневого середовища багаточастотним радіосигналом зі ступінчастою зміною несучої частоти
2.1 Багаточастотний підповерхневий радіолокатор зі ступінчастою зміною несучої частоти зондуючого сигналу 50
2.2 Обгрунтування застосування прямого перетворення Фур'є 54
2.3 Представлення сигналу на виході приймача багаточастотного георадару зі ступінчастою зміною несучої частоти зондуючого сигналу
2.4 Методи обробки сигналів, що враховують їх фазову структуру 63
2.5 Інтерпретація і візуалізація фазової структури відбитого сигналу при багаточастотному когерентному радіозондуванні
Висновки до розділу 276
РОЗДІЛ З Ітераційний метод оцінки підповерхневої структури ґрунту 77

3.1 Зіставлення результатів моделювання електричних характеристик ґрунту
з даними підповерхневого зондування77
3.2 Коригування електричної моделі ґрунту 86
3.3 Ітераційний метод оцінки підповерхневої структури ґрунту в реальному
завданні виявлення підповерхневих водоносних шарів
Висновки до розділу 3105
РОЗДІЛ 4 Практичні результати, які отримано при радіозондуванні
багаточастотним сигналом підповерхневого середовища 107
4.1 Використання радіолокатора підповерхневого зондування для визначення
рівня ґрунтових вод та картографування територій, які забруднено
нафтопродуктами107
4.2 Обстеження укосу греблі Дубосарської ГЕС радіолокатором
підповерхневого зондування118
4.3 Застосування радіолокатора підповерхневого зондування для пошуку
закопаних у грунт макетів мін 125
Висновки до розділу 4138
ВИСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 142
ДОДАТОК А Список публикацій за темою дисертації 159

#### ВСТУП

Підповерхневе середовище являє собою ґрунт, в товщі якого можуть міститися природні або штучні включення. В інженерній геофізиці, при проведенні інженерно-геологічних, меліоративних, гідрогеологічних, екологічних, археологічних робіт, одним з найбільш важливих завдань є визначення фізичної структури ґрунту по глибині, пошук прихованих об'єктів, які знаходяться під його поверхнею [1-4]. Інтенсивне будівництво житлових і нежитлових будівель, доріг, гребель, аеродромів з різним покриттям, аварії підземних трубопроводів, техногенні катастрофи – все це потребує методи, що дозволяють оперативно визначати стан ґрунту в розрізі по глибині. Розмінування мінних полів, що містять міни різних типів, так само потребує методи, які роблять цю роботу більш ефективною і менш небезпечною [10]. Для вирішення цих завдань застосовуються комплексні методи [1, 6]. Одним з методів, що використовуються в даний час, є радіозондування підповерхневого середовища [5, 7-9, 11, 12]. Застосування радіолокаційного зондування для пошуку будь-яких об'єктів під поверхнею землі, отримало назву підповерхневе радіозондування (радіолокаційне зондування) або георадіолокація [13]. Радіолокатор, який використовується з цією цілью, називається георадіолокатором або георадаром [13, 14]. Підповерхневе радіозондування відноситься до радіофізичних методів неруйнівного контролю і застосовується для дослідження геологічної структури Землі, діагностики стану дорожніх покриттів, фундаментів будівельних споруд, виявлення прихованих в ґрунті об'єктів [13-16]. Метод георадіолокації засновано на явищі відбиття радіохвиль від меж розділу (меж неоднорідностей), різні електрофізичні середовищ ЩО мають властивості [13-16].

У традиційній радіолокації радіохвилі випромінюються у вільний (повітряний) простір. У вільному просторі загасання радіохвиль, в основному, обумовлено сферичної розбіжністю енергії електромагнітних хвиль після їх випромінювання антеною та їх відбиття від об'єкта, а так само впливом погодних умов: дощ, сніг, туман [16]. При підповерхневому електромагнітна зондуванні, ХВИЛЯ поширюється в середовищі, яка характеризується великим загасанням радіохвиль. Глибина підповерхневого зондування залежить від електрофізичних параметрів середовища і може складати від десятків сантиметрів (наприклад, у вологому глиноземі), і до сотень метрів (в товщі льоду) [13-15, 18]. Підповерхневе середовище може являти собою шарувату структуру з відповідними електрофізичними характеристиками кожного шару і знаходяться в будь-якому шарі (або в шарах) об'єктів, електричні декількох локальних властивості яких відрізняються від властивостей навколишнього середовища [14,15]. Завдання. вирішуються із застосуванням георадіолокаціі, які можна розділити на два напрямки (без пріоритету). Перший напрямок полягає в оцінці фізичної структури ґрунту по глибині (в розрізі), наприклад: визначення рівня ґрунтових вод; знаходження "лінз", що утворилися в товщі грунту при витоку нафтопродуктів; визначення розподілу вологості ґрунту по глибині; діагностика дорожнього покриття. Другий напрямок полягає у виявленні прихованих локальних (природних або штучних) об'єктів, що розташовано у товщі ґрунту, наприклад: пошук в товщі ґрунту металевих та пластикових трубопроводів; проведення археологічних робіт; пошук (розмінування) закопаніх у ґрунт металевих та пластикових мін.

При під поверхневому радіозондуванні, радіохвилі поширюючись в підповерхневому середовищі взаємодіють з компонентами, які входять до складу ґрунту. Процес цієї взаємодії і визначає можливості підповерхневого радіозондування. Електричні характеристики середовища, а саме, діелектрична проникність і питома електропровідність, мають складну функціональну залежність від таких параметрів, як склад та об'ємне співвідношення компонентів, які є складовими досліджуваного середовища [17, 18]. Названі вище параметри в більшості випадків є апріорно невідомими. У реальності, середовище в якій відбувається радіозондування, може являти собою комбінацію ґрунту, асфальту, бетону, будівельних конструкцій і т. п. В середовищі можуть перебувати металеві включення, порожнини, що містять якісь гази, порожнини, заповнені якоюсь рідиною. Стан самого грунту характеризується складом включених в нього мінералів, його вологістю, рівнем ґрунтових вод [1-4, 17]. Як буде показано далі, в георадіолокації використовується частотний діапазон від десятків мегагерц до одиниць гігагерц [18, 20]. Відомо, що в цьому частотному діапазоні ґрунт дисперсією діелектричної характеризується частотною проникності складових ґрунту, яка визначається різними механізмами взаємодії електромагнітної хвилі зі складовими ґрунту [19, 27-30]. Під частотною дисперсією ґрунту розуміють частотну залежність (під впливом змінного електричного поля) значень діелектричної проникності і погонного затухання електромагнітної хвилі в ґрунті [18, 19, 27-30]. Частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту впливає на результати підповерхневого зондування, тому що фазова швидкість електромагнітної хвилі у ґрунті залежить від значення діелектричної проникності ґрунту. Власне кажучи, характер цього впливу і є тією інформацією, на підставі якої можна робити висновки про електрофізичні та, відповідно, фізичні характеристики підповерхневого середовища.

#### Актуальність теми

Дисертацію присвячено вирішенню завдання по створенню методу радіозондування підповерхневого середовища в умовах частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту та слабкої радіолокаційної контрастності розрізу ґрунту. Вирішення цієї задачі дозволить створювати радіолокаційні пристрої підповерхневого зондування, які здатні більш ефективно виявляти як фізичні зміни в під поверхневій структурі ґрунту, так і штучні або природні включення, що розташовано в його товщі. Для вирішення цього завдання необхідно визначити зв'язок між характеристиками відбитих зондуючих сигналів і електричними характеристиками ґрунту. Електричні характеристики ґрунту визначаються на основі електричних моделей змішування [81]. Проведеними дослідженнями встановлено, що відомі електричні моделі змішування, які є в основному емпіричними або напівемпиричними, та не відповідають експериментальним даним, отриманим при натурних вимірах [137].

У структурі ґрунту фізичні зміни можуть відбуватися плавно, без різких стрибків, наприклад, збільшення або зменшення вологості ґрунту по глибині в зоні аерації (до рівня ґрунтових вод). У цьому випадку радіолокаційна контрастність розрізу ґрунту по глибині буде слабка, і, відповідно, виявити цi зміни. застосувавши класичний метод радіозондування, в основі якого лежить аналіз часу затримки і амплітуди відбитого зондувального сигналу складно, т. к. в "радіояркістному" зображенні, отриманому в результаті зондування, ці зміни будуть практично непомітні. Додатковою проблемою є те, що частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту в основному проявляється саме у вологому ґрунті (за наявності води). Перераховані вище проблеми обмежують застосування підповерхневого радіозондування.

невідповідність Таким чином, електричних моделей ґрунту експериментальними даними, з одного боку, і складність інтерпретації результатів підповерхневого радіозондування у разі плавної зміни фізичних характеристик ґрунту, 3 іншого боку, зробили створення нового радіофізичного методу визначення структури ґрунту актуальним завданням.

Запропонований новий метод засновано на комплексному застосуванні багаточастотного когерентного підповерхневого радіозондування та електричної моделі ґрунту, в якій враховується частотна залежність його діелектричної проникності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами Дисертаційна робота є узагальненням результатів досліджень, які проводилися у відділі статистичної радіофізики IPE ім. А. Я. Усикова НАН

України з 2001 по 2017 рр. в рамках держбюджетних тем: "Створення спеціалізованого георадара "Скануючий георадар" для виявлення в грунті на глибинах до 20 ... 30 м шарів, забруднених, зокрема, нафтопродуктами, пустот та інших утворень природного і антропогенного походження" (шифр "Геосфера-2") 2006 p. (номер держ. реєстрації P.01.05.U005549); "Дубосарська ГЕС. Радіофізичне обстеження укосу греблі радіолокатором підповерхневого зондування "Скануючий георадар" (шифр "Днестр") 2010 р. ( номер держ. реєстрації 01.U004354); "Вивчення особливостей і розробка методів опису електромагнітних полів В природних неоднорідних середовищах з межами розділу стосовно завдань дистанційного зондування і радіолокації" (шифр "Сакура") 2011 р. (номер держ. реєстрації 01060011977); "Розробка нових моделей i методів вивчення тонкої структури електромагнітних полів в діапазонах частот від одиниць мегагерц до десятків гігагерц в природних, неоднорідних, анізотропних середовищах і поблизу поверхонь їх розділу для задач дистанційного зондування і радіолокації" "Теразонд") 2014 р. (номер держ. реєстрації 0111U010476); (шифр "Дослідження властивостей природних середовищ, їх поверхонь розподілу та структурних неоднорідностей методами дистанційного зондування i (шифр "Сенсорика") 2017 р. радіолокації" (номер держ. реєстрації 0115U002003). Автор є одним з виконавців наведених тем.

#### Мета і завдання дослідження

Метою роботи є наукове обґрунтування і розвиток радіофізичного методу багаточастотного когерентного підповерхневого радіозондування, що дозволяє оцінювати фізичні характеристики підповерхневого структури ґрунту, виявляти зміну фізичних властивостей цієї структури в результаті техногенного впливу або природних геологічних процесів; виявляти окремі об'єкти, пов'язані з елементами інженерних конструкцій, та діагностувати їх стан.

Для досягнення поставлених цілей в роботі вирішені наступні завдання:

1. Досліджено шляхи підвищення інформативних ознак зондувального багаточастотного радіолокаційного сигналу зі ступінчастою зміною несучої частоти, зокрема його фазової структури, для отримання даних про фізичних характеристиках підповерхневої структури ґрунту в умовах прояву частотної дисперсії його діелектричної проникності.

2. Встановлено зв'язок характеристик фазової структури відбитих зондуючих сигналів з електричними і фізичними характеристиками основних порід ґрунту, зокрема, з його об'ємною вологістю.

3. Розроблено і виготовлено макети георадарів зі ступінчастою зміною несучої частоти метрового (120-240 МГц) і дециметрового (500-900 МГц, 1200-1800 МГц) діапазонів з можливістю вимірювання фазової структури відбитих сигналів.

4. Проведено серію лабораторних та польових експериментів з підповерхневого зондування для відпрацювання нових методів отримання даних про фізичні характеристики підповерхневої структури ґрунту та окремих неоднорідностей на основі використання інформації про фазову структуру відбитих сигналів.

*Об'єктом* дослідження в роботі є електромагнітні сигнали, розсіяні неоднорідностями підповерхневої структури ґрунту.

Предметом дослідження є моделі взаємозв'язку електрофізичних характеристик порід ґрунту з характеристиками відбитих сигналів, а також математичні алгоритми обробки цих сигналів, що дозволяють отримувати інформацію про фізичні властивості підповерхневої структури ґрунту.

**Методи дослідження**, які використовуються в роботі, засновані на поєднанні аналізу експериментального зондування з застосуванням розроблених георадарів, методів і алгоритмів цифрової обробки відбитих

підповерхневими об'єктами сигналів, на основі модельних уявлень про взаємозв'язок характеристик розсіяних сигналів з характеристиками підповерхневої структури ґрунту.

#### Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше запропоновано методику використання фазової структури відбитих зондувальних сигналів для визначення підповерхневої структури ґрунту.

2. Запропоновано та апробовано скориговану математичну модель електричних характеристик ґрунту, що враховує частотну дисперсію його діелектричної проникності.

3. Розроблено та експериментально перевірено новий ітераційний метод визначення фізичних характеристик підповерхневого середовища з фазової структури відбитого сигналу з використанням запропонованої моделі електричних параметрів ґрунту.

4. Вперше, з використанням розроблених макетів георадарів метрового і дециметрового діапазонів частот, експериментально підтверджено можливість використання фазової структури відбитих сигналів для оцінки фізичних характеристик підповерхневої структури ґрунту і окремих об'єктів як штучного, так і природного походження.

#### Практичне значення отриманих результатів

1. Запропонований метод радіофізичного багаточастотного зондування підповерхневого середовища може бути використаний для діагностики структури ґрунту з залежною від частоти діелектричною проникністю і слабкою радіолокаційною контрастністю розрізу ґрунту.

2. Залежність фазової структури відбитих зондуючих радіосигналів від фізичних характеристик ґрунту дозволяє удосконалювати методи обробки цих сигналів. 3. Запропонована математична модель електричних характеристик грунту служить вихідною моделлю при проведенні георадіолокаційних робіт в умовах частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту.

4. Створені георадари метрового і дециметрового діапазонів, які призначені для багаточастотного зондування, можуть бути використані як основа для подальших розробок систем підповерхневого зондування.

#### Особистий внесок здобувача

У дисертаційній роботі представлені узагальнені результати теоретичних і експериментальних досліджень з розробки радіофізичного методу багаточастотного зондування підповерхневого середовища в умовах частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту i слабкої радіолокаційної контрастності розрізу ґрунту. Дослідження проводилися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України протягом ряду років особисто здобувачем і в співавторстві.

В опублікованих наукових працях здобувач брав участь: у постановці задач, розробці вузлів георадару, експериментальних дослідженнях [1]; в розробці методики проведення вимірювань [2, 7]; в обробці отриманих результатів, розробці вузлів георадару [3]; в обґрунтуванні використання фазової структури відбитих зондувальних сигналів при підповерхневому зондуванні [4]; в розробці вузлів георадару, в проведенні натурних вимірювань, в обробці отриманих результатів [5, 8, 9]; в розробці антени [6, 11]; в експериментальних дослідженнях [10].

#### Апробація матеріалів дисертації

Наукові результати та основні положення роботи доповідалися і обговорювалися на семінарах ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України, семінарах відділу статистичної радіофізики ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України, наступних міжнародних конференціях: 4-й Міжнародний Радіоелектронний форум "Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку" МРФ- 2011; IX Міжнародна науково-технічна конференція "Метрологія-2014"; 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016); X Міжнародна науковотехнічна конференція "Метрологія-2016".

#### Публікації

Результати дисертаційної роботи відображено в 11 роботах, з них: 5 статей в наукових фахових виданнях України та іноземному журналі; 1 патент України на винахід; 3 тези доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій; 2 статті, які додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Повний обсяг дисертації становить 160 сторінок. Робота містить 68 рисунки, 3 таблиці, список з 164 використовуваних джерел на 17 сторінках.

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Основні етапи розвитку підповерхневого радіозондування

У 1910-1911 рр. Г. Лови та Г. Леймбах висловили припущення про "радіопрозорість" гірських порід [14, 15]. У 1912 р. вони запропонували використовувати інтерференційний спосіб для пошуку руд і води, застосовуючи передачу і прийом безперервного сигналу на одній частоті між двома антенами, розташованими у вертикальній свердловині. Г. Лови і Г. Леймбах використовували решітку дипольних антен, розміщених у вертикальних свердловинах, і порівнювали амплітуду сигналів у двох диполів, один з яких випромінював, а другий – приймав сигнали. Вони ж запропонували альтернативний метод, в якому використовувалися окремі антени, розташовані на поверхні ґрунту, для того щоб виявляти відбиття від підповерхневого межі, обумовленої рівнем ґрунтових вод. Даний метод давав можливість визначати глибину таких меж за результатом інтерференції між відбитої хвилі і прямим сигналом між випромінюють і приймають диполем.

Першою роботою, в якій згадується використання радіоімпульсного зондуючого сигналу визначення властивостей підповерхневого ЛЛЯ структури ґрунту, була робота Хельсенбека [19]. Він зазначав, що будь-які діелектричні зміни, не обов'язково пов'язані з зміною провідності, можуть також призводити до відбиття радіохвиль, і що цей метод завдяки його простоті має переваги над сейсмічними методами. Перше радіолокаційне визначення глибини льодовика було проведено в Австрії В. Штерном в 1929 р. [7]. Радіоімпульсний метод зондування розвивався, починаючи з 1930-х років як засіб зондування на значні глибини в товщі льоду [20, 21], чистій воді, покладів солі [22], пустельних пісків і твердих порід [23, 24]. Крім того, досліджувався також можливості зондування порід вугілля [25 - 27], незважаючи на те, що значне затухання в цих речовинах означало, що глибини більше декількох метрів були недосяжними. Більш детальний

виклад історії розвитку радіолокаторів підповерхневого зондування наведено в роботі [22]. Надалі, роботи з підповерхневого зондування проводилися для визначення товщини льодовиків у Гренландії та Антарктиді [14, 15]. При здійсненні місячної експедиції Apollo 17 був застосований спеціально розроблений георадар для зондування поверхні Місяця [7]. У міру розвитку теорії цифрової обробки сигналів, вдосконалення радіоелементної бази, зокрема високочастотної, і обчислювальної техніки, георадіолокація почала швидко розвиватися.

#### 1.2 Відеоімпульсний метод підповерхневого радіозондування

Історично склалося так, що в експериментах з підповерхневої радіолокації застосовувалася стандартна радіолокаційна апаратура. Тому, аж до 70-х – 80-х років минулого століття, розвиток методів радіолокаційного підповерхневого зондування здійснювалося, в основному, на основі радіоімпульсного зондувального сигналу. При зондуванні льодовиків, сухих пісковиків, вапняків, такий підхід виправданий. Однак виробляти радіозондування товстих шарів інших земних порід подібним способом практично неможливо через велике погонне загасання радіохвиль у ґрунті.

Вихід було знайдено в застосуванні радіоімпульсів без високочастотного заповнення. Це імпульс без несучої, що включає один або кілька періодів коливання, і має відносну смугу спектра, близьку до одиниці [21]. Даний спосіб був запропонований в 1956 р. Дж. Куком [21]. Він запропонував збуджувати широкосмугову антену різким перепадом напруги, що викликає одне, або кілька коливань струму в антені. Такий метод отримав назву "метод ударного збудження" [21]. Як правило, тривалість випромінюваних імпульсів становить від одиниць до десятків наносекунд.

Альтернативним що до вищевикладеного, є метод, при якому зондування здійснюється монохроматичним сигналом, частота якого змінюється плавно або стрибкоподібно [23, 29, 30]. Розглянемо обидва методи. На рис. 1 наведено блок-схему підповерхневого радіозондування, яка є загальною для згаданих вище методів.



Рисунок 1.1 - Блок-схема процесу підповерхневого радіозондування

Відеоімпульсний метод передбачає випромінювання коротких електромагнітних імпульсів та прийому відбитих імпульсів від меж розділу або від неоднорідностей. Період повторення імпульсів вибирають виходячи з критерію однозначного визначення відстані (глибини) [15, 27]. Замикання входу приймача (бланкування) синхронізовано з часом роботи передавача. Вимірювання товщини шару або відстані до об'єкта засноване на визначенні інтервалу часу  $\Delta t$  відбитого від меж шару або об'єкта:

$$h = \frac{v_{cp}\Delta t}{2},\tag{1}$$

де *h* – товщина шару або відстань до об'єкта; *v*<sub>*cp*</sub> – швидкість поширення радіохвилі в середовищі.

Ширину і форму випромінюваного радіоімпульса вибирають виходячи з глибини зондування і необхідного розділу по глибині.

Амплітуда відеоімпульсів, з міркувань збільшення "глибинності" зондування, повинна бути близько декількох сотень вольт, від 200 в. і вище (обмеження – електрична міцність передавальної антени) [28, 29]. Для формування такої амплітуди застосовуються різні технічні рішення. Якщо подібні відеоімпульси сформувати з достатньою точністю форми сигналу, наприклад з допомогою ЦАПа, потім підсилити до сотень вольт, то потрібен широкосмуговий підсилювач на кілька кіловат (і більше). Подібний радіолокатор описано в [37]. Цей радіолокатор призначався для вимірювання товщини льоду в Антарктиді з борту вертольота. Пікова потужність локатора становила 1,5 кВт, ширина імпульсу – 12/60/600 нс, центральна частота – 150 мГц, частота повторення імпульсів – 20 кГц. Описаний локатор є унікальним, тому що він був зроблений під конкретну задачу.

Для формування високовольтних імпульсів може бути застосовано: діод з накопиченням заряду – ДНЗ, дрейфовий діод з різким відновленням – ДДРВ, діод з затримкою лавинного пробою, або швидкодіючі транзистори в ключовому режимі [20]. Діод (або транзистор) з'єднується безпосередньо з (схематично і конструктивно), т. ч. антена антеною ДЛЯ нього € навантаженням. Основними вузлами відеоімпульсного георадара є формувач високовольтних імпульсів – передавач (зазвичай конструктивно поєднаний з передавальною антеною), стробоскопічний перетворювач з АЦП та антени (передавальна і приймальна). У технічному плані, обробка сигналу в відеоімпульсному георадарі являє собою стробоскопічне перетворення спектру сигналу в область низьких частот, де і відбувається реєстрації (фіксація) і візуалізація отриманих результатів [15, 21, 27-30].

В ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України розробкою та теоретичним обґрунтуванням застосування відеоімпульсних георадарів тривалий час займається відділ радіофізичної інтроскопії [35, 36].

#### 1.3 Багаточастотний метод підповерхневого радіозондування

Розвиток нових методів обробки сигналів, які дозволяють виділяти більше інформації фізичні властивості значно про середовища та об'єктів, підповерхневих дало поштовх широкому застосуванню радіолокаторів підповерхневого зондування як видеоимпульсных, так і з застосуванням більш складних, багаточастотних зондувальних сигналів, зокрема, на основі плавної або ступінчастої зміни несучої частоти [29-32]. Використовуючи сучасні СВЧ елементи і спеціалізовані схеми управління, було розроблено синтезатори частоти, які дозволяють встановлювати потрібну частоту випромінюваного сигналу. На даний час відеоімпульсний метод підповерхневого зондування набув найбільш широкого поширення, налагоджено промислове виробництво відеоімпульсних георадарів. Другий метод, в основному, використовується в дослідницьких цілях.

Багаточастотні георадари за типом модуляції вихідного сигналу і обробці відбитого сигналу поділяються на два типи. Це ЛЧМ (безперервна лінійна частотна модуляція) георадари та георадари з дискретною, ступінчастою зміною несучої частоти. Працює ЛЧМ георадар наступним чином. Формусться широкосмуговий зондуючий ЛЧМ сигнал, що змінюється за пилкоподібним законом [28-30]. Сформований сигнал поділяється на опорну і зондуючу складові за допомогою дільника потужності і підводиться до гетеродинного входу змішувача і передавальної антени. Сигнал, відбитий від об'єкта приймається приймальною антеною і надходить на сигнальний вхід змішувача, де перемножується з опорною складовою. У результаті виділяються частотні компоненти биття, які пропорційні відстані до об'єктів [28-30]. Основними недоліками такого методу є вимоги до лінійності модуляції генератора, оскільки нелінійність модуляційної частотної характеристики збагачує спектр сигналу на виході змішувача приймача, що може призвести до неприпустимо великих погрішностей у визначенні глибини залягання підповерхневих об'єктів [28-30]. У цьому методі, як і у відеоімпульсному дуже складно врахувати вплив дисперсії діелектричної проникності ґрунту [28-30]. Внаслідок цього, інтерпретувати результати зондування з урахуванням впливу частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту, не можливо.

Однією з перших знакових публікацій присвячених багаточастотному, дискретному, підповерхневому зондуванню стала стаття [114, 115]. В ній описано метод та апаратура підповерхневого радіозондування, де в ролі зондуючого сигналу застосований ступінчасто змінний багаточастотний сигнал. Поступово змінний сигнал являє собою послідовність когерентних зондуючих монохроматичних радіоімпульсів. Обробка відбитих зондуючих сигналів була проведена із застосуванням прямого перетворення Фур'є.

У роботах [110, 112] більш предметно описано подібний спосіб підповерхневого зондування. У цих роботах наведено обґрунтування (перевага) застосування методу багаточастотного підповерхневого по відношенню до відеоімпульсного методу, виходячи з зондування технічних можливостей, таких як: застосування цифрової обробки сигналу на більш низькій частоті, ніж у видеоимпульсного георадара; збільшення випромінюваної потужності; відсутність необхідності середньої високовольтних імпульсних вихідних каскадів; збільшення динамічного діапазону; узгодження смуги випромінюваних частот з відповідною смугою робочих частот антенної системи. Однак, у згаданих вище роботах, при обробці відображених зондувальних сигналів, вплив частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту на результати зондування, авторами не враховувався.

Одна багаточастотного 3 основних переваг когерентного підповерхневого радіозондування перед відеоімпульсним ЛЧМ та радіозондуванням полягає в можливості враховувати спотворення відбитого зондуючого сигналу, які обумовлені частотною дисперсією діелектричної проникності ґрунту. Урахування частотної дисперсії ґрунту відбувається шляхом застосування відповідних моделей електричних характеристик

грунту при обробці даних підповерхневого зондування на кожному кроці зміни частоти зондуючого сигналу.

У дисертаційній роботі розглядається багаточастотний когерентний метод підповерхневого радіозондування, в основі якого є комплексне використання електричної моделі ґрунту та когерентних зондувальних монохроматичних радіоімпульсів. Такий метод, з точки зору вирішення зворотної задачі, а саме – визначення фізичних характеристик ґрунту за результатами радіозондування, на даний час є більш інформативним, ніж відеоімпульсний та ЛЧМ методи.

Дані, підповерхневому радіозондуванні, ЩО одержувано при відображають результат взаємодії зондуючого радіосигналу 3 під поверхневою фізичною структурою ґрунту та відповідними до цій структури електричними характеристиками ґрунту. Фізичні властивості ґрунту можна пов'язати з його електричними властивостями за допомогою електричної моделі ґрунту, яка є моделлю змішування компонентів ґрунту з урахуванням їх об'ємного вмісту та електричних характеристик [57]. Таким чином, достовірність електричної моделі ґрунту є визначальною при інтерпретації результатів підповерхневого зондування.

#### 1.4 Фізичні та електричні характеристики ґрунту

Під назвою підповерхнева среда, стосовно георадіолокації, мається на увазі ґрунт, що складається з суміші гірських порід, води та органічних речовин [41, 52]. Ґрунт являє собою дисперсну систему, що складається з двох або більше фаз (тіл, які не змішуються і не реагують один на одного хімічно) [41]. Подібна дисперсна система є гетерогенною, так як кожна фаза поверхню розділу безперервності властивостей від інших [41]. має Компонентами ґрунту є власне частинки ґрунту, повітря, вода в різних агрегатних станах, водні розчини солей і домішки [40]. Компонентами грунта, обладающие В OCHOBHOM, являются вещества, свойствами диэлектриков, которые, как известно обладают свойством поляризоваться

под действием электрического поля [42-45]. Механизмы пляризации диэлектриков описаны в соответствующей литературе [46, 47]

Механізм поглинання та утримання ґрунтом вологи залежить від величини та форми порового простору ґрунту. Вода в грунті може знаходитися у вільному або зв'язаному стані [1, 39, 40, 53, 54]. Вільна вода, це вода, яка перебуває в порах і тріщинах породи, що утримується капілярними силами або силою гравітації. Пов'язана вода утримується в грунті за рахунок хімічних або фізико-хімічних сил, що діють з боку поверхні Пов'язану воду ділять на міцнозв'язану та рихлозв'язану. частинок. Міцнозв'язана вода ділиться на: хімічно пов'язану (що входить до складу мінералів), абсорбовану (поглинену 3 розчинів частинками ґрунту, гигроскопичну (поглинену частинками грунту з повітря) [1, 39, 40, 53, 54]. Міцнозв'язана вода переміщається у ґрунті тільки при його нагріванні або ущільненні. Рихлозв'язана вода - це вода, що обволікає частинки ґрунту плівкою різної товщини. Вся вода, за винятком хімічно пов'язаної може бути видалена з грунту при нагріванні його до температури вище 105 °C [53, 54].

Під вологістю ґрунту розуміється об'ємна або вагова кількість води. При збільшенні вологості ґрунту вода переходить з пов'язаного стану у вільний. Цей процес супроводжується зміною її діелектричних властивостей [1, 40, 55].

Діелектрична проникність ґрунту залежить від діелектричних властивостей складових його компонентів та їх об'ємного співвідношення і температури [56, 81]. Діелектрична проникність мінералів, що складають основу ґрунту, лежить в межах 2-10 відносних одиниць [51]. Електричні властивості води відрізняються при неґативних та позитивних температурах. У води, яка є хімічно чистою, при 20 °С діелектрична проникність становить ≈ 81 (залежить від частоти прикладеного електричного поля) [38-40]. Таким чином, значення діелектричної проникності ґрунту визначається, перш за все, об'ємним вмістом води. Діелектричну проникність води визначає дипольна (орієнтаційна) релаксаційна поляризація [38-40]. Залежність відносної діелектричної проникності води від частоти прикладеного електричного поля наведено на рис. 1.2 [40].

На частотах вище 1 ГГц діелектрична проникність води зменшується (початок прояву дисперсії), досягаючи на частоті 100 ГГц величини 2-3 одиниць. При зниженні температури, час діелектричної релаксації збільшується з 9 · 10<sup>-12</sup> с при 25 °С, до 6 · 10<sup>-5</sup> с при −10 °С [40].



Рисунок 1.2 - Залежність відносної діелектричної проникності вільної води від частоти прикладеного електричного поля [40]

Склад мінеральних складових ґрунту, під впливом зовнішніх факторів залишається практично постійним, на відміну від вмісту повітря і вільної води, які займають по́ровий простір. Ґрунт може складатися з декількох шарів (горизонтів), які відмінні один від одного, як за змістом мінеральних речовин, так і по об'ємному вмісту води [1, 33, 39, 52, 57, 58]. Відмінності можуть бути по температурі шарів, та відповідно, по температурі води, що міститься в шарі. Під текстурою, або механічним вмістом ґрунту, розуміють вміст у грунті елементарних частинок різного розміру. Метод визначення розмірів частинок полягає в поділі їх на кілька діапазонів за розміром [33, 57]:

a) 2.0 мм > пісок >0.05 мм;

b) 0.05 мм > мул > 0.002 мм;

c) глина < 0.002 мм.

На рис. 1.3 наведено порівняльні розміри частинок піску, мулу і глини, що входять в тверду фазу ґрунту:



Рисунок 1.3 - Порівняльні розміри частинок піску, мулу і глини [33]

Частинки, що мають розмір більше ніж 2 мм, називаються гравієм.

Пісок зазвичай складається кварцу з додаванням польового шпату і слюди. У більшості випадків піщані зерна мають більш-менш рівномірні розміри.

Мул складається з частинок, проміжних за розміром між піском і глиною. Минералогично та фізично мулові частки зазвичай нагадують частинки піску, але вони менші та мають велику площу поверхні на одиницю маси та часто вкриті адгезивної глиною, тому можуть певною мірою проявляти деякі фізико-хімічні властивості глини [33, 57].

Фракція глини з частинками в діапазоні від 2 мкм та менше, являє собою колоїдну фракцію. Частинки глини зазвичай пластинчасті або голкоподібні та відносяться до групи мінералів, які відомі під назвою

алюміносилікат [18, 61]. З-за більшої площі поверхні на одиницю маси та її фізико-хімічної активності, глина являє собою фракцію з найбільшим впливом на поведінку ґрунту. Частинки глини адсорбують воду і гідрат, тим самим змушуючи ґрунт набухати при змочуванні. Частинки глини зазвичай несуть негативний заряд і при гідратації утворюють електростатичний подвійний шар з обмінними іонами в навколишньому розчині [18, 59, 60, 61].

Співвідношення частинок в ґрунті може відрізнятися, відповідно кількість утримуваної вологи теж. До складу ґрунту входять частинки різного розміру. Залежно від їх процентного вмісту ґрунт ділиться на три групи: піски, суглинки та глини. На рис. 1.4 наведено зв'язок між назвою ґрунту та процентним вмістом його складових [33, 57]:



Рисунок 1.4 - Текстурний трикутник [33, 57]

Між частинками знаходяться взаємопов'язані по́ри, які можуть значно відрізнятися за розміром та формою. У сухому ґрунті всі по́ри заповнені повітрям, в повністю вологому ґрунті всі по́ри заповнені водою. У реальних умовах весь по́ровий простір заповнений водою та повітрям в пропорціях, що залежать від погодних умов. Відношення обсягу ґрунту, не зайнятого твердою фазою, до загального обсягу ґрунту, має назву по́ристістю [64]:

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t},\tag{1.26}$$

где:  $\Phi$  – по́ристість;  $V_p$  – обсяг пір;  $V_t$  – загальний обсяг ґрунту.

Значення по́ристості коливаються від 0,1% для щільного вапняку до більш, ніж 80% для деяких видів вулканічних порід [64]. Дрібні частинки можуть заповнити простір пір між великими частинками і таким чином зменшити по́ристість. Частина води пов'язана з поверхнею твердої частинки шляхом адгезії. Цю воду називають пов'язаною водою [54, 55, 69]. Кількість пов'язаної води визначається питомою (віднесеної до одного грама ґрунту) поверхнею порового простору. Велика кількість зв'язаної води знижує ефективну по́ристість. Ефективна по́ристість являє собою різницю між по́ристістю та об'ємом пов'язаної води. Типовими значеннями ефективної по́ристості є: глина <5%, дрібний пісок 10-20%, великий пісок 15-30%.

На рис. 1.5 наведено схематичний рисунок структури ґрунту з відповідним внеском складових в його частотну та температурну залежність [51]:



Рисунок 1.5 - Структура грунту [51]

Частина ґрунту, що розташовано між поверхнею Землі та рівнем грунтових вод (рівень карстових вод), прийнято називати зоною аерації (синоніми: водозна зона, зона верхніх ґрунтових вод) [31-33]. Вода в зону аерації надходить, в основному, вигляді атмосферних опадів (гравітаційна вода, що заповнює пори). Так само ґрунт в зоні аерації містить плівкову і капілярну води.

Визначення електричних характеристик підповерхневої структури ґрунту за даними георадарного зондування не може мати точного математичного рішення, бо більшість параметрів, що входять до моделі електричних характеристик типових ґрунтів, можна отримати тільки в результаті безпосередніх вимірювань.

У процесі розвитку уявлень про фізичні явища, що відбуваються в зоні аерації, та накопиченні експериментальних результатів радіофізичного підповерхневого зондування її структури, стало зрозуміло, що стандартні геофізичні методи зондування та класичні алгоритми обробки сигналів не зможуть вирішити всі проблеми. Зокрема, головним обмежуючим фактором цих методів і алгоритмів є те, що в моделях сигналів не закладені спотворення, обумовлені частотною дисперсією електричних характеристик грунту, яка несе основну інформацію про його електрични характеристики.

#### 1.5 Моделі електричних характеристик ґрунту

Як було показано вище, для підповерхневого зондування найбільш важливими електричними характеристиками ґрунту є: діелектрична проникність, магнітна проникність, провідність. Від значення діелектричної проникності залежить швидкість поширення електромагнітної хвилі в підповерхневому середовищи, коефіцієнти відбиття на межах розділу фізичних властивостей ґрунту, роздільність по вертикалі та горизонталі. Діелектрична проникність являє собою функцію, що містить дійсну та уявну компоненти [48-50]. Діелектрична проникність ґрунту залежить від складу мінералів, по́ристості, рідини в по́рах, текстури, електрохімічного взаємодії між компонентами грунту, частоти діючого на грунт електромагнітного поля [74, 75]. Окремо виміряні значення діелектричної проникності фракцій, що входять до складу ґрунту, дозволяють визначити діапазон ймовірних значень діелектричної проникності, але не дозволяють адекватно визначити їх в конкретних польових умовах. Уявна частина діелектричної проникності являє собою діелектричні втрати, які визначають загасання та частотну дисперсію [48-50]. Вплив магнітної проникності незначний, якщо її значення є близьким до єдиниці.

Моделювання діелектричного змішування компонентів ґрунту є основним методом прогнозування ймовірних значень об'ємної діелектричної проникності ґрунту [65, 68, 70-72]. Модель повинна враховувати вплив різних факторів на діелектричні властивості ґрунту. Такими факторами є об'ємна щільність ґрунту, текстура, композиційні властивості (розподіл розміру частинок та їх мінералогія), об'ємна концентрація водних компонентів (зазвичай, у вигляді вільної та зв'язаної води), повітря, ступінь солоності і температури [66, 67].

Створення моделі електричних характеристик ґрунту, що представляє собою дисперсну гетерогенну систему, яка складається з двох або більше фаз, що включають в себе різні діелектричні речовини, є складним теоретичним завданням. Діелектрична проникність ґрунту не є лінійною комбінацією діелектричних проникностей складових його компонентів [57, 81]. На даний момент не існує універсальної моделі діелектричної проникності дисперсних середовищ, яка б дозволяла визначити діелектричну проникність суміші через діелектричні проникності та об'ємні частки окремих компонент [81].

Одним з перших, хто зробив аналіз існуючих моделей діелектричної проникності сумішей, що містять різні діелектрики, був Reynolds (1957 р.) [78]. У його роботі проведено аналіз моделей сумішей, які було запропоновано різними авторами (від Mosotti (1850), Lorentz (1880), Релей (1892), до Bruggeman (1935), Lichtenecker (1931), Odelevskii (1951) de Loor

(1954)). Для спрощення моделі він обмежується розглядом властивостей суміші що містять два компоненти. У роботах [79, 80] представлені результати з розрахунку діелектричної проникності многопериодической (впорядкованої) структурою неоднорідність

На даний момент відомі різні моделі змішування. Knoll у своїй роботі розділив їх на п'ять категорій [81]:

- 1. емпіричні моделі;
- 2. феноменологічні моделі;
- 3. формули об'ємного змішування;
- 4. теорія ефективного середовища;
- 5. напівемпіричні моделі.

**Емпіричний підхід** засновано на виборі функціонального співвідношення між діелектричною проникністю та іншими, вимірюваними властивостями матеріалу [81, 84, 85]. У 1980р. G. Topp, J. Davis, A. Annan опублікували роботу [82], в якій, на підставі проведених ними експериментів, встановили поліноміальний зв'язок третього порядку між діелектричною проникністю суміші і об'ємним вмістом води:

$$\varepsilon = 3,03+9,30(\theta_{\nu})+146,00(\theta_{\nu})^2-76,70(\theta_{\nu})^3, \qquad (1.35)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність суміші,  $\theta_{\nu}$  – об'ємний вміст води в суміші. Це рівняння було визначено з регресійного аналізу за даними чотирьох мінеральних ґрунтів в діапазоні вмісту глини від 9% до 66% по відношенню до маси. Основною перевагою цього рівняння є те, що воно не вимагає визначення будь-яких параметрів ґрунту, крім діелектричної постійної. Для рівняння немає фізичного обґрунтування і його застосування не було продемонстровано для всього діапазону можливого вмісту води, вмісту глини та по́ристості [81,83]. Феноменологічні моделі [81, 86, 87]. Даний підхід засновано на відношенні частотно-залежної поведінки вологого грунту до розподілу часів релаксації. Вхідні дані моделюються без урахування властивостей компонентів та їх геометричних співвідношень. Зазвичай це моделі Дебая і Коула-Коула.

Формули об'ємного змішування [81]. Даний підхід до моделювання діелектричних властивостей полягає в співвідношенні об'ємної діелектричної проникності багатофазної суміші з діелектричними постійними і передбачуваними об'ємними частками її складових. Одним з найвідоміших є рівняння Lichtenecker-Rother [81]:

$$\varepsilon^{\alpha} = \sum_{i=1}^{N} \theta_{i} \varepsilon_{i}^{\alpha}, \qquad (1.43)$$
$$-1 \le \alpha \le 1,$$

де  $\varepsilon^{\alpha}$  – об'ємна діелектрична проникність багатофазної суміші;  $\varepsilon_i$  – діелектрична проникність *i*-го компоненту;  $\theta_i$  – об'ємна частка *i*-го компоненту;  $\alpha$  – "геометричний" фактор, який пов'язує напрямок розшарування компонентів з напрямком прикладеного електричного поля.

R.P. Wharton и др. [88] запропонували свою модель для опису діелектричної проникності двофазної суміші ( $\alpha = 0,5$ ) — води та твердої фракції, що отримала назву "рефракторної":

$$\sqrt{\varepsilon} = \theta_w \sqrt{\varepsilon_w} + \theta_s \sqrt{\varepsilon_s} , \qquad (1.44)$$

де  $\varepsilon_w$  – діелектрична проникність води,  $\varepsilon_s$  – діелектрична проникність твердої фракції,  $\theta_w$  – об'ємна частка води,  $\theta_s$  – об'ємна частка твердої фракції.
Розглянуті моделі не враховують геометрію компонентів і електрохімічні взаємодії, які можуть виникнути між компонентами.

**Теорія ефективного середовища.** Запропонована в роботах Bruggeman (1935), Hanai (1961), Sen (1981) [81]. Ці теорії можуть включати в свій формалізм певні геометричні фактори. Основна ідея полягає в тому, щоб обчислити властивість матеріалу шляхом послідовних підстановок. Процес починається з припущення про однорідний фоновий матеріал. Невелика кількість цього матеріалу потім замінюється іншим матеріалом і за допомогою аналітичного виразу визначається діелектрична проникність суміші. Це рішення використовується як фон для наступного етапу Процес триває до того часу, поки не буде досягнута бажана заміщення. об'ємна частка кожного компонента. Таким чином, необхідно зробити вибір щодо кількості компонентів, вихідного фонового матеріалу, порядку вкладення, виду i форми включень та аналітичного виразу, використовуваного ДЛЯ обчислення. Шi змінні форму визначають остаточного рівняння змішування.

Напівемпіричні моделі [81, 85, 89, 90]. В основі цієї моделі лежать як геометричні, так і об'ємні дані, які містяться в суміші фракцій [74-76].

Кожен метод має певні переваги і недоліки, які засновано на припущеннях властивих кожної моделі. Феноменологічний метод і метод ефективного середовища використовують для роботи з однорідними складовими (наприклад, з льодом), але вони менш ефективні для більш складних гетерогенних матеріалів. Емпіричні та напівемпіричні моделі можуть більш точно передбачити значення діелектричної проникності суміші на підставі даних включають в себе діелектричну проникність окремих мінералів, пористість, водо насиченість.

Цікавими публікаціями, присвяченими розрахунку електричних параметрів піщано-глинистих ґрунтів на метрових і сантиметрових хвилях з використанням моделей змішування є роботи [91, 92]. Як стверджують автори, розрахунки моделей змішування підтверджені вимірами (на жаль, тільки лабораторними). У цих роботах ґрунт розглядається як статистична суміш твердих частинок, повітря, плівкової вологи і порового електроліту. Для вираження ефективної КДП цієї суміші через діелектричну проникність та об'ємну концентрацію компонент  $V_i$ , де  $V_i$  – відношення обсягу компоненти до повного об'єму зразка, використовувалася формула Беренцвейга, яка, як це випливає з літературних джерел, характерізується наближенням з експериментальними даними [91]:

$$\varepsilon = \overline{\varepsilon} + \frac{\sum_{i=0}^{k} V_i \frac{\varepsilon_i - \overline{\varepsilon}}{\varepsilon_i + 2\overline{\varepsilon}}}{\sum_{i=0}^{k} V_i \frac{1}{\varepsilon_i + 2\overline{\varepsilon}}},$$
(1.59)
$$\overline{\varepsilon} = \sum_{i=0}^{k} V_i \varepsilon_i;$$
(1.60)

 $\kappa$  – кількість фаз в суміші ( $\kappa = 2$  для трифазної суміші);  $V_0 = \phi - V_1 -$ об'ємний вміст повітря;  $\phi$  – по́ристість ґрунту;  $V_1$  – об'ємна вологість;  $V_2 = 1 - \phi$  – об'ємний вміст твердої фази;  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність повітря;  $\varepsilon_1$  – діелектрична проникність електроліту та плівкової вологи, що представляє алгебраїчну собою суму двох доданків:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{\text{дис вод}} - j\varepsilon_{\text{пот}}, \qquad (1.61)$$

де  $\varepsilon_{\text{дис вод}}$  – діелектрична проникність дистильованої води, яку визначено формулою Дебая;  $\varepsilon_{\text{пот}}$  – втрати, зумовлені іонною провідністю  $\sigma$ . Їх величина виражається формулою:

$$\varepsilon_{\text{nor}} = 60\sigma\lambda, \qquad (1.62)$$

де λ – довжина хвилі.

Ю. І. Лещанским було проведено вимірювання дійсної та уявної частин КДП глини та піску (на п'яти довжинах хвиль: 3,17; 10; 30; 90 та 226 см) при значеннях вологості, що дорівнює 0, 5, 10 і 15%. На рис. 1.6 та 1.7 наведено дисперсійні криві глини та піску при різних значеннях вологості.



Рисунок 1.6 - Дисперсійні криві глини при різних значеннях вологості

[91]



Рисунок 1.7 - Дисперсійні криві піску при різних значеннях вологості

Для глини, при довжині хвиль більше 10 см, починає позначатися іонна провідність.

Для визначення діелектричних характеристик піщаного або глинистого грунту, автори рекомендують спочатку розрахувати діелектричні характеристики кожної складової (вологого піску і глини) користуючись методикою наведеною в цій роботі, а потім, знаючи відносний вміст в ньому піску і глини, розрахувати його діелектричні характеристики за формулою (1.59) для двофазної суміші.

В роботі [93] наведені емпіричні формули, більш точно описують значення уявної частини КДП, яка визначається іонною провідністю глини та піску, довжиною хвилі та об'ємною вологостю:

для глини 
$$\varepsilon'' = 306, 6p^{1.6}/\lambda^{0.5};$$
 (1.63)

для піску 
$$\varepsilon'' = 8,634 p^{1,1} \lambda;$$
 (1.64)

де p – вологість;  $\lambda$  – довжина хвилі.

### 1.6 Пов'язана вода. Глина. Подвійний електричний шар. Йонна провідність

Пов'язаної водою називають воду, яка зазнає з боку поверхні твердої фази мінералів "зв'язувальний" вплив різної природи та інтенсивності, що змінює її структуру та надає їй властивості, які відмінні від звичайної, вільної води [53, 54]. Вільна вода може вільно переміщатися в порах під дією сили тяжіння або напору та володіє звичайними для води фізичними властивостями. Пов'язана вода знаходиться та утримується силами різної природи поблизу поверхні твердої фази ґрунту у вигляді тонких, т. зв. граничних шарів. Експериментально встановлено [54], що такі властивості, як щільність, в'язкість, діелектрична проникність та ін. відрізняються від властивостей звичайної, вільної води. Тверді частинки більшості мінералів,

що входять до складу ґрунту мають на поверхні заряд статичної електрики (зазвичай негативний). Молекули води, які представляють собою диполі, під дією сил електростатичного тяжіння орієнтовані нормально до твердої поверхніта покривають поверхню частинки монослоем молекул води.

Пов'язана вода, яка утримувана (адсорбована) на поверхні частинок, називається міцнозв'язаною. Міцнозв'язана вода може складатися з одного або декількох шарів. Міцнозв'язана вода не відділяється від частинок при впливі сил, які в тисячі разів перевищують сили земного тяжіння.

Діелектрична проникність (статична) зв'язаної води менше, ніж у вільної, і дорівнює 3 ÷ 40 в залежності від товщини плівки води (кількості моношарів молекул води).

Між пов'язаною і вільною водою знаходиться вода перехідного типу (від пов'язаної до вільної). Деякі автори відносять її до пов'язаної води і називають її рихлозв'язаною (54). Через незначний вплив на неї поверхневих сил, її властивості близькі до вільної води. Вода перехідного типу складається з "осмотично" поглиненої води внаслідок виборчої дифузії в напрямку поверхні частинок (поверхневий осмос) і позитивно заряджених катіонів водню, натрію, калію, кальцію та ін., що містяться у вільній воді, які притягують негативно заряджені тверді частинки. Негативно заряджені іони (аніони), відштовхуються негативно зарядженими частинками, відповідно, їх концентрація в міру видалення від частки збільшується. Шар рихлозв'язаної води називають також дифузним [53]. Таким чином, на поверхні негативно частинки утворюється подвійний електричний зарядженої шар. ЩО складається з двох частин – внутрішньої, званого адсорбційним шаром і зовнішнього, званого дифузним. Концентрація катіонів експоненціально збільшується в напрямку до поверхні частинки, що викликає "осмотичний" рух молекул води з порового простору, що містить вільну воду, в область подвійного електричного шару [53]. На рис. 1.8 наведено розташування подвійного електричного шару на поверхні твердої, негативно зарядженої частинки.

Кількість води, що міститься в молекулярному шарі, прилеглому до частинок ґрунту, прямо пропорційно загальній площі поверхні частинок ґрунту. Кількість пов'язаної води визначається питомою (віднесеної 1 граму ґрунту) поверхнею по́рового простору.



Рисунок 1.8 - Подвійний електричний шар на поверхні твердої, негативно зарядженої частинки: а – катіони; b – аніони; c – адсорбційний шар (прочносвязанная вода); d – дифузний шар (осмотична вода); e – вільна вода [53]

Частинки з невеликими розмірами мають високу питому поверхню. Наприклад, глина – до 100 м<sup>2</sup>/г, мул до 1 м<sup>2</sup>/г, пісок до 0,1 м<sup>2</sup>/г [64]. У роботі [53] стверджується, що глини (монтморилоніти) можуть мати питому поверхню до 600÷800 м<sup>2</sup>/г. Тому в глині міститься найбільше пов'язаної води. Якщо в глині присутня тільки адсорбційна вода, глина являє собою породу твердої консистенції. При наявності осмотичної і капілярної води вона стає пластичною. При наявності в глині вільної води вона стає текучою [53].

Дослідження показали, що більшість глинистих частинок в природному стані заряджені негативно [59]. Глинисті частинки в основному гідрофільні [61, 63]. Вони мають пластинчасту або голчасту форму, при цьому співвідношення довжини до товщини частинок може перевищувати десятки разів [62, 95]. Пластинчасті глинисті частинки утворюють скупченнямікроагрегати глинистих частинок [18, 60]. У зв'язаній воді, що знаходиться в проміжку між глинистими частинками знаходяться обмінні катіони. Висока провідність глинистих частинок пояснюється наявністю вільної води і великою концентрацією обмінних катіонів [18, 61]. Кількість глинистих мінералів (в основному монтморилоніту), визначає загасання електромагнітних хвиль з-за іонної провідності, обумовленої обмінними катіонами. На рис.1.9 наведено схематичний вигляд системи глини і води.



Рисунок 1.9 - Схематичний вигляд системи глини і води [60]

Частотні залежності діелектричної проникності пов'язаної води знаходяться між частотними залежностями діелектричних проникностей льоду та вільної води, проте вони знаходяться ближче до вільної води, ніж до льоду [54, 96]. Зі збільшенням товщини плівки води (більше 10 мономолекулярних шарів), діелектричні властивості зв'язаної води наближаються до діелектричних властивостей вільної води.

Для розрахунку іонної провідності можна використовувати модель, описану в роботах [89, 97], в якій ґрунт розглядається як суміш піску, глини, мулу, води з розчиненою сіллю і повітря, водяна фракція представляється у вигляді двох шарів. Перший шар розташовується в безпосередній близькості від частки ґрунту, іони води в якому знаходяться в пов'язаному стані з іонами частки грунту. У другому шарі вода знаходиться в слабкому зв'язку з молекулами частки ґрунту. У сухому ґрунті адсорбовані катіони утримуються поверхнями негативно заряджених частинок, утворених в основному частинками глини. Надлишкові катіони і пов'язані з ними аніони знаходяться в соляному осаді. Коли вода потрапляє в систему, соляний осад розчиняється, і адсорбовані катіони частково дифундують в розчин в безпосередній близькості від поверхні частинок. Однак електростатичне поле, яке визначається частинками, перешкоджає цій дифузії, і результуючий розподіл зарядів визначається рівняннями Пуассона-Больцмана. Згідно моделі подвійного електричного шару Штерна - Гуі [89, 94], щільність зарядів на порівняно великих поверхнях частинок збільшує концентрацію іонів в основному об'ємі розчину. Залежність розподілу іонів від відстані визначається поверхневою густиною зарядів, типом адсорбованих катіонів, солоністю основного об'єму розчину, температури і т. д.

Передбачається рівномірний розподіл зарядів, при цьому їх поверхнева щільність визначається величиною ємності катіонного обміну (ЄКО). Під ЄКО розуміють загальну кількість катіонів одного роду, які утримувано грунтом в обмінному стані при стандартних умовах та здатних до обміну на катіони взаємодіючого з ґрунтом розчина.

Так як катіони шарів Штерну і Гуї повинні компенсувати поверхневу щільність заряду, то можна записати наступний вираз:

$$\sigma_{mw} = \sigma_1 + \sigma_2, \tag{1.72}$$

де індекси 1 і 2 відносяться до шарів Штерну і Гуї, відповідно.

Макроскопічні діелектричні властивості ґрунту (при позитивній температурі, T > 0 °C), можна уявити сумішшю чотирьох компонент: сухих

частинок ґрунту, слабо пов'язаної води в шарі Гуї, сильно пов'язаної води в шарі Штерну і повітря.

У результуючій формулі для КДП (комплексної діелектричної проникності) води, тільки вираз для діелектричної проникності слабо пов'язаної води в шарі Гуї є частотно залежним, що визначається дебаєвським типом релаксації [54]:

$$\varepsilon_{fw}^{*} = \varepsilon_{fw}' + j\varepsilon_{fw}'' = \left[\varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{s} - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2\pi f\tau_{w})^{2}}\right] + j\left[\frac{2\pi f\tau_{w}(\varepsilon_{s} - \varepsilon_{\infty})}{1 + (2\pi f\tau_{w})^{2}} + \frac{\sigma_{mw}}{2\pi\varepsilon_{s}f}\right], (1.73)$$

де:

 $\varepsilon_{fw}^*$  – КДП води;

 $\varepsilon'_{fw}$  – дійсна частина відносної діелектричної проникності води;

 $\varepsilon''_{fw}$  – уявна частина відносної діелектричної проникності води;

 $\varepsilon_{\infty}$  – граничне високочастотне значення діелектричної проникності води;

 $\varepsilon_s$  – діелектрична проникність води при постійному струмі;

 $\tau_w$ – час релаксації молекул води;

 $\sigma_{mw}$  – ефективна питома провідність води, що визначається подвійним електричним шаром Штерна-Гуі;

f – частота в Гц.

При негативній температурі грунту необхідно враховувати фазовий перехід стану води (рідка вода – лід) в районі 0 ÷ -4 °С [39].

Як було показано вище, частотна дисперсія діелектричної проникності грунту, в діапазоні, що використовується для георадіолокації, залежить від форми стану води в ґрунті. В роботі [78, 98] схематично показані області частотної дисперсії для різних форм води (із змінами А. А. Аузина [40]). У самій низькочастотної області лежить область дисперсії кристалізаційної води, далі льоду. Область дисперсії, яка обумовлена міжфазної поляризацією, званої ефектом Максвелла-Вагнера, знаходиться в смузі частот  $10^3 - 10^7 \Gamma$ ц. Ефект Максвелла-Вагнера викликаний накопиченням вільних зарядів на межах розділу компонентів гетерогенного середовища, що володіють різними електропровідностями [18, 40]. На рис. 1.10 наведено області дисперсії діелектричної проникності різних форм стану води.



Чим більше відмінності в електропровідності, тим більше проявляється внесок цього типу поляризації. В глинах зменшення провідності та зростання дійсної частини відносної діелектричної проникності зі зменшенням частоти, що обумовлено ефектом Максвелла-Вагнера, спостерігаються в діапазоні частот від одиниць МГц і нижче до сотень МГц, і навіть до 1 ГГц. Частоти релаксації Максвелла-Вагнера розподілено в широкому діапазоні частот від декількох МГц (і нижче) до сотень МГц [18].

На низьких частотах багато ефектів взаємно накладаються, що унеможливлює їх поділ. На частотах понад 1 ГГц, в основному, проявляється дисперсія, обумовлена дипольної поляризацією вільної води.

Таким чином, в частотному діапазоні 10-2000 МГц, проявляється частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту, яку викликано поляризацією води, яка може перебувати в різних формах (кристалізаційна вода, лід, зв'язана вода, вільна вода) та ефектом Максвелла-Вагнера, або їх комбінацією.

# 1.7 Експериментальне визначення комплексної діелектричної проникності ґрунту

Теоретичний спосіб визначення комплексної діелектричної проникності (КДП) ґрунту передбачає створення моделей електричних характеристик ґрунту на підставі електричних та фізичних характеристик речовин, що входять до його складу. При експериментальному визначенні КДП ґрунту, зразки ґрунту поміщено в установку, застосовуючи яку, можливо визначити діелектричну проникність і провідність ґрунту на певних частотах.

На частотах від 100 Гц до 1 МГц застосовують конденсаторний метод [51, 100], з використанням плоского конденсатора, що складається з металевих обкладок, між якими міститься зразок ґрунту. Порівнюючи значення ємності конденсатора до заповнення його досліджуваним зразком ґрунту і після заповнення, визначають значення діелектричної проникності зразка ґрунту (усередненого за його обсягом).

Вимірювання імпедансу конденсаторної клітинки в діапазоні частот 0,01-1,0 Мгц проводилося як з допомогою векторного аналізатора, так і з допомогою вимірювача імітансу, що дозволяє вимірювати: ємність, активний опір, реактивне опір, провідність, тангенс кута втрат, добротність, кут фазового зсуву комплексного опору.

Як пишуть автори, зробленим вимірюванням доведено, що значення, одержувані конденсаторній комірці з допомогою векторного аналізатора і вимірювача імітансу, у частотній області 0.3-1,0 МГц, а також за допомогою векторного аналізатора у конденсаторної та коаксіальної осередках, в частотній області 30-80 МГц, відрізняються один від одного на величину, що не перевищує похибку вимірювань.

При вимірюванні в діапазоні від 500 КГц до 4 ГГц зразок ґрунту поміщався в коаксіальну комірку і визначався комплексний коефіцієнт передачі  $S_{12}$  за допомогою векторного аналізатора. Зразки ґрунту представлено комбінацію піску, бентонітової глини (бентоніт), сольового

розчину води та нафти. Розрахунок комплексної діелектричної проникності проводився за методикою, яка описана в [73, 99, 100]. Схему вимірювання наведено на рис. 1.19. Зразок 2 поміщався в коаксіальну комірку між двома фторопластовими шайбами 1 і 3.



Рисунок 1.10 - Схема вимірювання КДП зразків грунту [100]

Застосовувалося комірки довжиною від 2 до 38, 5 см. Короткі комірки було застосовано у високочастотної частини діапазону (вище 1 ГГц) та при високих значеннях дійсної і уявної частин КДП, Довгі - в низькочастотної (нижче 2 ГГц) та при малих значеннях КДП. Для стабілізації температури використовувалося температурну камеру. Зразки зважувалися на електронних вагах. Для визначення КДП зразка грунту вимірювався комплексний коефіцієнт передачі – S<sub>12</sub> [100]. Експериментальні результати вимірювань порівнювалися з рефракційною моделлю змішування [101]. За результатами вимірювань, автори роблять висновок, що у випадку взаємодії компонентів суміші між собою (бентоніт – нафта – сольовий розчин, бентоніт - нафта, бентоніт - сольовий розчин), спостерігалося істотна відмінність виміряних значень діелектричної проникності від розрахункових. У разі відсутності взаємодії компонентів між собою (пісок – нафта – сольовий розчин, пісок – нафта і пісок – сольовий розчин), експериментальні та розрахункові дані збігаються в межах помилки вимірювання (похибка є' не перевищує 6 %, σ — 11 %).

Подібний спосіб експериментального визначення КДП ґрунту не враховує тиск, який відчуває ґрунт в залежності від його розташування по глибині та, відповідно, його щільність.

### Висновки до розділу 1

1. При проведенні підповерхневого радіозондування застосовується кілька методів. Основні – це відеоімпульсний метод та багаточастотний метод. Відеоімпульсний метод найбільш поширений. Багаточастотний метод поділяється на методи з безперервною ЛЧМ та ступінчастою модуляцією і застосовується, в основному, для дослідницьких цілей.

2. Відеоімпульсний метод та метод з безперервної ЛЧМ модуляцією не враховують вплив на результати зондування частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту.

3. Грунт є дисперсною гетерогенною системою та являє собою суміш мінеральних складових, органічних включень, води у різних агрегатних станах та повітря. Всі перераховані складові є діелектриками та схильні до різних видів поляризації.

4. У діапазоні частот, що найчастіше застосовується в георадіолокації – 100-2000 МГц, з компонентів, що входять до складу ґрунту, найбільший внесок у прояв частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту вносить вода (в залежності від її форми). Присутність у воді розчинених солей так само вносить вклад в частотну дисперсію води (відповідно й ґрунту). Це обумовлено іонної провідністю, що проявляється у вигляді частотно-залежних втрат.

5. Аналіз найбільш відомих електричних моделей змішування, стосовно до ґрунту, показав, що на даний момент не існує універсальної моделі для дисперсних середовищ, яка б дозволяла коректно визначити діелектричну проникність суміші через діелектричні проникності та об'ємні частки окремих компонентів. 6. Показано, що зв'язана вода (вода, яка зазнає з боку поверхні твердої фази мінералів "зв'язувальний" вплив) має змінену структуру, що надає їй властивості відмінні (в тому числі і електричні) від звичайної, вільної води. Частотні залежності діелектричної проникності пов'язаної води знаходяться між частотними залежностями діелектричних проникностей льоду та вільної води. Вплив пов'язаної води на електричні характеристики ґрунту тим значніше, чим більше питома поверхня ґрунту. Найбільшу питому поверхню має глина, тому в ній міститься найбільше пов'язаної води.

7. Описано способи експериментального визначення (з застосуванням лабораторних приладів) комплексної діелектричної проникності ґрунту. Експериментальні результати вимірювань порівнювалися з рефракційною моделлю змішування. Стверджується, що в разі відсутності взаємодії компонентів між собою, експериментальні і розрахункові дані збігаються в межах помилок вимірювання. Наведений спосіб експериментального визначення КДП ґрунту не враховує вплив навколишнього середовища, зокрема, тиск, який відчуває ґрунт в залежності від його розташування по глибині та, відповідно, його щільність.

#### **РОЗДІЛ 2**

### ЗОНДУВАННЯ ПІДПОВЕРХНЕВОГО СЕРЕДОВИЩА БАГАТОЧАСТОТНИМ РАДІОСИГНАЛОМ ЗІ СТУПІНЧАСТОЮ ЗМІНОЮ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ

# 2.1 Багаточастотний підповерхневий радіолокатор зі ступінчастою зміною несучої частоти зондуючого сигналу

В основу роботи багаточастотного під поверхневого радіолокатора зі ступінчастою зміною частоти зондуючого сигналу покладено наступний принцип: передавальна антена радіолокатора випромінює радіочастотний сигнал певної потужності, частота якого поступово змінюється в заданих межах за лінійним законом [102-107, 129]. При наявності будь-якого об'єкта, розміри якого можуть викликати розсіювання падаючої на нього радіохвилі, частина відбитого від цього об'єкта сигналу потрапляє на приймальну антену радіолокатора. З приймальної антени сигнал надходить на вхід приймача радіолокатора. Приймач радіолокатора являє собою квадратурний фазовий детектор, на перший вхід якого подається опорний сигнал генератора поточної робочої частоти, на другий подається відбитий сигнал. По шляху проходження від передавальної антени до об'єкта і від об'єкта до приймальної антени зондувальний радіосигнал набуває певну фазову затримку по відношенню до опорного сигналу. З використанням фазового детектора фазова затримка перетворюється в постійну напругу, яка пропорційна цій затримці на поточній робочій частоті.

Форма сигналу [102, 103, 107] являє собою послідовність N когерентних радіоімпульсів, несуча частота яких збільшується від імпульсу до імпульсу шляхом фіксованого збільшення частоти  $\Delta f$ , як наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - Послідовність N когерентних радіоімпульсів

*T* – період проходження радіоімпульсів.Частоту *n* – го можно записати як [102, 103, 107]:

$$f_n = f_0 + n\Delta f , \qquad (2.1)$$

де  $f_0$  – початкове значення несучої частоти.

Послідовність радіоімпульсів *x*(*t*) математично може бути представлена як [108]:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \operatorname{Re}\left\{\exp(j2\pi(f_L + i\Delta f)t)\right\} \operatorname{rect}\left(\frac{t - iT - T/2}{T}\right), \qquad (2.2)$$

де  $rect(\bullet)$  – прямокутне часове вікно,  $f_L$  – початкове значення частоти,  $\Delta f$  – крок збільшення частоти, T – період радіоімпульсу, n – число кроків зміни несучої частоти.

На рис. 2.2 наведено структурну схему багаточастотного радіолокатора зі ступінчастою зміною несучої частоти зондуючого сигналу.  $\varepsilon_a$  – абсолютна діелектрична проникність ґрунту,  $\sigma$  – провідність ґрунту.



Рисунок 2.2 - Структурна схема багаточастотного радіолокатора зі ступінчастою зміною несучої частоти зондуючого сигналу

Розглянемо одиничну точкову ціль у якої коефіцієнт відбиття дорівнює  $\Gamma = |\Gamma| e^{j\phi}$ , та відповідною затримкою відбитого сигналу  $\tau$  в середовищі без втрат у всьому діапазоні робочих частот.

Прийнятий сигнал перетворюється в комплексний низькочастотний сигнал I(t)+jQ(t) шляхом його змішування з опорним сигналом та пропусканням отриманого низькочастотного сигналу через фільтр низької частоти (передбачається, що  $T \gg \tau$ ):

$$I(t) + jQ(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \left| \Gamma \right| e^{j\phi} \exp(-j2\pi (f_L + i\Delta f)\tau) rect\left(\frac{t - iT - T/2}{T}\right).$$
(2.3)

Сигнал *s*(*t*), який дискретизує послідовність комплексного опорного сигналу, може бути описано як:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \delta(t - iT - T/2).$$
(2.4)

Множачи s(t) на I(t)+jQ(t), отримуємо дискретний комплексний масив:

$$C(k) = \left| \Gamma \right| e^{j\phi} \exp(-j2\pi (f_L + k\Delta f)\tau), \ k = 0, 1, 2, ..., n-1.$$
(2.5)

Кожен елемент цього масиву являє собою дискретне значення амплітуди комплексного опорного сигналу для кожного радіоімпульсу. Далі, він може бути виражений як частотно-дискретний масив *C*(*f*):

$$C(f) = \left| \Gamma \right| e^{j\phi} \exp(-j2\pi (f_L + f)\tau), \ f = 0, \ \Delta f, \ 2\Delta f, \dots, (n-1)\Delta f.$$
(2.6)

Аналоговий низькочастотний сигнал з виходу квадратурного фазового детектора може бути піддано інверсії після аналого-цифрового перетворення [103, 109-113]. Це здійснюється шляхом додавання n – елементного C(f) массиву в N – елементный D[f] массив з тим же частотним інтервалом  $\Delta f$ . Решта елементів масиву, включаючи негативні частоти, заміщено нульовими значеннями сигналу. Результуючий масив стає рівним:

$$D[f] = \begin{cases} 0, & f = 0, \Delta f, 2\Delta f, \dots, f_L - \Delta f \\ |\Gamma| e^{j\phi} \exp(-j2\pi\tau), & f = f_L, f_L + \Delta f, \dots, f_L + (n-1)\Delta f \\ 0, & f = f_L + n\Delta f, f_L + (n+1)\Delta f, \dots, N \end{cases}$$
(2.7)

Дискретна функція частоти цього масиву може бути записано наступною формулою з використанням значення центральної частоти *fc* смуги частот сигналу:

$$D[f] = \left| \Gamma e^{j\phi} rect \left[ \frac{f - f_c}{B} \right] e^{-j2\pi f\tau} \right|.$$
(2.8)

Зворотне дискретне перетворення  $\Phi$ ур'є застосовується для перетворення функції з частотної області D[f] у часову область d[t]:

$$d[t] = IDFT \left\{ D[f] \right\} = \left| \Gamma \right| e^{j\phi} B \operatorname{sinc}(B(t-\tau)) e^{j2\pi f_c(t-\tau)}.$$
(2.9)

В результаті виходить синтезований часовий радіоімпульс, що містить коефіцієнт відбиття від цілі та час затримки [105, 106, 109, 113]. Алгоритм зворотного дискретного перетворення Фур'є це фільтр, який стискає прийнятий сигнал, формуючи синтезований часовий сигнал d[t] з високою роздільною здатністю. Для множинних цілей, зворотне дискретне перетворення Фур'є стискає відображені часові сигнали, при цьому когерентно підсумовуючи напруги від кожної цілі в їх часовому проміжку у синтезований профіль.

Таким чином, при класичному підході значення I та Q сигналу, які отримано на кожному кроці зміни частоти, буде записано у масив комплексних частот (I+jQ) довжиною N. Ці частотні дані перетворюються у часову область для того, щоб сформувати синтезований імпульс [104, 105, 107, 109, 113]. Розташування синтезованого імпульсу на часовій осі відповідає часу запізнювання сигналу, відбитого від цілі, що дозволяє визначити відстань до цієї цілі.

#### 2.2 Обґрунтування застосування прямого перетворення Фур'є

Для визначення відстані до цілі з використанням багаточастотного радіолокатора зі ступінчастою зміною несучої частоти можливо застосування не тільки зворотного перетворення Фур'є, але й використовування прямого перетворення Фур'є стосовно до сигналів, які отримано на виході приймача радіолокатора [114-119]. Для уявлення відбитого сигналу зручно використовувати фазор – вектор, який обертається на комплексній площині, що має модуль який дорівнює А та швидкість обертання  $\omega$  рад/с. У будь-який

момент часу сигнал може бути представлено у вигляді x(t) = a + jb, де a -дійсна частина сигналу і b -уявна частина сигналу. В полярних координатах сигнал може бути записано таким чином:  $x(t) = Ae^{j\omega t}$ . На рис. 2.3 наведено розташування фазора у комплексній площині.



Рисунок 2.3 - Фазор на комплексній площині

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} , \qquad (2.10)$$

$$\varphi = \omega t = \operatorname{arctg}\left(\frac{b}{a}\right),\tag{2.11}$$

где *а* – дійсна частина сигналу, *b* – уявна частина сигналу. Результат виразу (2.11) повинен відповідати квадранту комплексної площини.

Значення *a* та *b* відповідають значенням сигналу на синфазному та квадратурному виходах фазового детектора багаточастотного радіолокатора. При кожній фіксованій зміні значення робочої частоти радіолокатора, зміна фазового кута від дальньої межи більша, ніж від ближньої. Тому фазор дальньої межи обертається швидше, ніж від ближньої межи. Таким чином, відстань до межи можна визначити виходячи з радіальної швидкості обертання фазора.

Припустимо, що втрати в середовищі поширення відсутні, а передавальна та приймальна антени радара суміщені.

Сигнал, який випромінюється радіолокатором, запишемо таким чином:

$$x(t) = E_0 e^{-j\omega t}$$
. (2.12)

Якщо присутня одна ціль, то відбитий від цілі сигнал можна записати так:

$$H_0 = \frac{E_0}{d^2} s e^{j(2\beta d - \omega t)}, \qquad (2.13)$$

де d – відстань до цілі; s – ЕПР цілі;  $\beta$  – стала поширення;  $E_0$  – напруженість поля сигналу, що передається. Всі інші константи, пов'язані з випромінюючою системою, можна вважати одиничними.

Сигнал  $H_0$  можна уявити у вигляді фазора. Уявімо, що робоча частота поступово змінилася на один крок  $\Delta f$ , то стала поширення  $\beta$  зміниться на  $\Delta\beta$ . Тоді фазор  $H_0$  повернеться на величину  $2\Delta\beta d$ . Ця величина повороту є пропорційна відстані d. Залежність дійсної або уявної частин  $H_0$  від  $\beta$  є синусоїдною. Період цієї синусоїди є пропорційним відстані d.

Якщо є кілька цілей, то результуючий фазор  $\sum_{n} H_{n}$  являє собою суму всіх фазорів, пов'язаних з цими цілями. При зміні частоти зондування, фазор кожного прийнятого сигналу, обертається зі швидкістю, яка пропорційна відстані радара від цілі. Кут повороту кожного фазора дорівнює  $2\Delta\beta d_{n}$ , де  $d_{n}$  – відстань до *n*-й цілі. Фазор прийнятого сигналу від дальньої цілі обертається швидше, ніж від ближньої. Якщо дійсна або уявна частина отриманого сигналу побудовано по відношенню до  $\beta$ , крива являє суперпозицію *n* синусоїдальних кривих, які мають *n* різних періодів, в залежності від відстані  $d_{n}$ .

Вид результуючого фазора 
$$\sum_{n} H_{n}$$
 наведено на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 - Представлення результуючого фазора  $\sum_{n} H_{n}$  як суми декількох фазорів [114]

Для визначення відстані до кожної із цілей пропонується використовувати перетворення Фур'є, за допомогою якого можна виділити кожен *n* компонент з певним періодом із ансамблю синусоїдальних кривих. Це не перетворення Фур'є за часом, а по відношенню до частоти *n* кроків.

Приймемо  $s_k$  – коефіцієнт ЕПР цілі, що розташовано на глибині  $z_k$ . Робоча частота радіолокатора  $f_n$  дорівнює:

$$f_n = f_0 + n\Delta f, \qquad n = 0, 1, 2, ..., N - 1,$$
 (2.14)

де  $f_0$  – початкова частота;  $\Delta f$  – крок збільшення частоти; N – число кроків частоти.

Сигнал, який прийнято радіолокатором на робочій частоті, є сумою сигналів від усіх цілей:

$$H_{n} = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{s_{k} E_{0}}{z_{k}^{2}} e^{j4\pi \left[ (f_{0} + n\Delta f)/c \right] z_{k}}, \qquad (2.15)$$

де *с* – швидкість світла. В отриманому вираженні фактор часу відсутній. Якщо відстань вимірюється від початкової точки *z*<sub>0</sub> (фазовий центр антени – поверхня ґрунту), тоді маємо:

$$z_k = z_0 + k\Delta z \,. \tag{2.16}$$

Відповідно, вираз (2.15) можна записати як:

$$H_{n} = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{s_{k} E_{0}}{z_{k}^{2}} e^{j4\pi \left[ (f_{0} + n\Delta f)/c \right] (z_{0} + k\Delta z)}.$$
(2.17)

Позначим  $h_k$  як:

$$h_{k} = \frac{Ns_{k}E_{0}}{z_{k}^{2}}e^{j(4\pi/c)(kf_{0}\Delta z)},$$
(2.18)

та

$$\beta_n = 2\pi f_n / c = 2\pi (f_0 + n\Delta f) / c.$$
(2.19)

Накладемо умову:

$$\frac{2\Delta fN}{c}\Delta z = 1. \tag{2.20}$$

Запишемо вираз (2.17) так:

$$H'_{n} = H_{n}e^{-j2\beta_{n}z_{0}} = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}h_{k}e^{j2\pi(kn/N)}, \qquad (2.21)$$

де  $e^{-j2\beta_n z_0}$  – поворот фазора  $H_n$  на величину, що відповідає відстані  $z_0$ . Права частина виразу (2.21) має вигляд зворотного ДПФ. Відповідно, значення  $h_k$  може бути знайдено з ДПФ:

$$h_{k} = \sum_{n=0}^{N-1} \left( H_{n} e^{-j2\beta_{n} z_{0}} \right) e^{-j2\pi(kn/N)} =$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} H_{n}' e^{-j2\pi(kn/N)}$$
(2.22)

Фізично це означає, що прийнятий сигнал  $H_n$  на частоті  $f_n$  є зворотним ДПФ ансамблю комплексних чисел  $h_k$ . Тому, якщо амплітуди  $H_n$ відомі з вимірювань, то значення  $h_k$  можна отримати за допомогою ДПФ з значеннь  $H_n$ . При виборі значення N кратне 2, застосовуватися ШПФ. Якщо на квантованій глибині  $z_k$  величина розсіювання  $s_k$  більше нуля, то з'явитися сплеск у відображенні спектрального розподілу  $h_k$ , вказуючи положення цілі [114].

При вимірюванні глибини, антена георадара може перебувати на деякій відстані від поверхні ґрунту. Якщо цю відстань враховувати при обробці сигналу, то це зменшить роздільну здатність при вимірюванні глибини. Реалізується це зміщенням точки відліку на відстань, рівну висоті розташування антени георадару над поверхнею ґрунту. Фазовий кут, який відповідає необхідному зміщенню, може бути вирахуваний з відбитого сигналу перед обробкою ШПФ. Множник  $e^{-j2\beta_n z_0}$  у рівнянні (2.22) може бути розглянуто як обертання фазора  $H_n$  на величину, пов'язану з відстанню  $z_0$  зміщення до виконання операції ШПФ.

Величина квантованої відстані (роздільна здатність по дальності) в повітрі дорівнює:

$$\Delta z_{air} = \frac{c}{2\Delta fN}, \qquad (2.23)$$

у середовищі, відмінному від повітря:

$$\Delta z_{soil} = \Delta z_{air} / \sqrt{\varepsilon_r} , \qquad (2.24)$$

де  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища.

# **2.3** Представлення сигналу на виході приймача багаточастотного георадару зі ступінчастою зміною несучої частоти зондуючого сигналу

Нехай якийсь об'єкт розташовано під поверхнею грунту на глибині *d*. Схематично, спрощену блок-схему підповерхневого радіозондування грунту, в товщі якого є об'єкт, який розташовано на глибині *d*, наведено на рис. 2.5.



Приймальна антена

Рисунок 2.5 - Об'єкт у товщи ґрунту

Електричне поле поблизу приймальної антени георадара для однієї поляризації може бути записано в наступному вигляді [110]:

$$E^{r}(\omega,d) \approx \operatorname{Re}\left\{\frac{sE^{t}}{d^{2}}\exp\left[-2\alpha_{m}(\omega)d\right]\exp\left[j\omega t - 2\beta_{m}(\omega)d\right]\right\}, \qquad (2.25)$$

де *s* – коефіцієнт відбиття об'єкту;  $E^t$  – електричне поле в розкриві передавальної антени;  $\alpha_m(\omega)$  – погонне загасання радіохвиль у ґрунті;  $\beta_m(\omega)$  – фазовий коефіцієнт поширення радіохвиль у ґрунті [110]:

$$\alpha_m(\omega) \approx \alpha_m \frac{\omega}{\nu}, \qquad (2.26)$$

$$\beta_m(\omega) \approx \beta_m \frac{\omega}{v},$$
 (2.27)

де *w* – кутова частота; *v* – фазова швидкість поширення радіохвилі у ґрунті.

Якщо розміри об'єкта більше ніж довжина електромагнітної хвилі, цей вираз можна записати таким чином, щоб враховувалися тільки домінуючі центри розсіювання, які розташовано у дискретних точках об'єкту:

$$E^{r}(\omega) \approx \sum_{p=1}^{P} E^{r}(\omega, d_{p}), \qquad (2.28)$$

де P – число дискретних точок розсіювання об'єкту;  $E^r(\omega, d_p)$  – вклад електричної складової поля від p-й дискретної відбитої точки об'єкта, розташованої на відстані  $d_p$ .

Електричне поле на вході приймальної антени для *Р* – дискретних відбивачів можна визначити замінивши рівняння (2.25) на рівняння (2.29):

$$E^{r}(\omega) \approx \sum_{p=1}^{P} \operatorname{Re}\left\{\frac{(s_{p})E^{t}}{d_{p}^{2}} \exp\left[-2\alpha_{m}(\omega)d_{p}\right] \exp\left[j\omega t - 2\beta_{m}(\omega)d_{p}\right]\right\}, \qquad (2.29)$$

Отримане електричне поле  $E^{r}(\omega)$  потім перетворюється в напругу приймачем. У квадратурному демодуляторі приймача сигнал змішується з сигналом гетеродина. На виході квадратурного демодулятора отримуємо синфазну - I та квадратурну - Q компоненти прийнятого сигналу. Оскільки прийнятий сигнал є обмеженим по частоті, канали I та Q може бути об'єднано для подання у формі аналітичного сигналу [125]. Включення ефектів теплового шуму на вході в радіолокаційний приймач можна промоделювати гауссовим шумом з нульовим середнім значення n(f), з урахуванням якого, прийнятий сигнал на виході приймача може бути представлено у формі [110, 125]:

$$u^{r}(f) \approx G_{s}(f)G_{t}(f)G_{r}(f) \times u^{t} \sum_{p=1}^{P} \frac{s_{p}}{d_{p}^{2}} \times \exp\left[-\frac{4\pi f}{v}\alpha_{m}d_{p}\right] \times , \qquad (2.30)$$
$$\exp\left[-j\frac{4\pi f}{v}\beta_{m}d_{p}\right] + n(f)$$

де  $G_s(f)$  – коефіцієнт посилення приймача;  $G_t(f)$  та  $G_r(f)$  – коефіцієнти посилення передавальної та приймальної антен, відповідно.  $u^t$  – напруга на клемах передавальної антени; f – частота. Для усунення впливу частотних характеристик передаючої та приймальних антен, а також апаратури приймальної частини радара, прийнятий сигнал нормировано:

$$u''(f) \approx \frac{u''(f)}{u'G_s(f)G_t(f)G_r(f)},$$
 (2.31)

Розглянемо передачу N дискретних частот у діапазоні  $B = f_{N-1} - f_0$ , так що поточна частота  $f_n = f_0 + n\Delta f$ . Підставляючи ці значення частоти в рівняння (2.30) і (2.31), отримуємо дискретизовану напругу на виході приймача георадару зі ступінчастою зміною несучої частоти [110, 125]:

$$u^{\prime\prime}[n] \approx \sum_{p=1}^{P-1} \frac{s_p}{d_p^2} \exp\left(-\frac{4\pi \left(f_0 + n\Delta f\right)}{v} \alpha_m d_p\right) \times \exp\left(-j \frac{4\pi \left(f_0 + n\Delta f\right)}{v} \beta_m d_p\right) + n'[n]$$
(2.32)

#### 2.4 Методи обробки сигналів, що враховують їх фазову структуру

сучасних радіолокаційних систем підповерхневого Застосування зондування в таких областях, як інженерна геологія, гідрогеологія та екологія, стикається як з трудністю інтерпретації результатів, так і з відсутністю можливості отримання інформації про фізичних характеристиках підповерхневого структури ґрунту [121, 122]. Головна причина цього полягає в тому, що в відеоімпульсних георадарах використовується інформація тільки про амплітуду сигналів, відбитих від неоднорідностей цієї структури або від підповерхневих об'єктів. Застосування георадару з зондувальним сигналом із ступінчастою зміною несучої частоти показало, що при наявності квадратурних сигналів на виході фазового детектора приймача георадару, можна істотно збільшити інформативність даних, якщо буде враховувано інформацію про частотні залежності загасання і фазової швидкості поширення радіохвиль у породах ґрунту [121-123]. У цьому випадку за вказаними залежностями, шляхом вирішення сингулярного нелінійного інтегрального рівняння, відновлюються електричні характеристики порід грунту. Однак точність оцінювання цих характеристик не висока, внаслідок того, що необхідно мати добре відбиваючий об'єкт на певній глибині, що не завжди має місце при польових зондуваннях [124].

Кращі результати виходять при використанні фазової структури зондуючих сигналів, відбитих від підповерхневих об'єктів (неоднорідностей), яка визначається їх фазочастотним спектром [125-127].

У багаточастотному георадарі відстань до об'єкта визначається шляхом вимірювання амплітуди та фази радіолокаційних відбиттів, що надходять на вхід приймального пристрою георадару при кожному кроці зміни несучої частоти [103]. Для цього потрібно вимірювати квадратурні складові сигналу на виході фазового детектора приймача. У світовій літературі приділено достатньо уваги методиці обробки сигналів стосовно такого зондуючого сигналу [110, 112, 114, 115, 128, 129]. Зокрема, приклад використання фазової структури сигналів при їх обробці описано у роботі [110]. У цій роботі описано застосування спектрального методу, який в літературі отримав назву метод пучка матриць [130, 131]. Квадратурні складові сигналів при цьому методі використовуються для збільшення роздільної здатності по глибині та оцінки параметрів спектральних компонент, що відповідають відбиттю від досліджуваних об'єктів в підповерхневому просторі. Однак, спроби використовувати такий підхід для вирішення практичних завдань інженерної геології виявилися невдалими внаслідок частотної дисперсії загасання та фазової швидкості поширення радіохвиль у шарах ґрунту, що призводять до появи паразитної амплітудної та, що особливо несприятливо, частотної модуляції сигналів на виході фазового детектора приймача георадару [110].

Фазова структура сигналів використовується при синтезі апертури антени, що починає впроваджуватися в область підповерхневого радіолокаційного зондування [132, 133]. Однак підхід, який застосовано в цьому випадку, залишається таким самим, який було розроблено для класичної радіолокації, коли середовище вважається однорідним, а об'єкт знаходиться в далекій зоні.

Таким чином, при розробці математичних алгоритмів обробки сигналів стосовно підповерхневого радіолокації, необхідно мати квадратурні складові прийнятих приймачем георадару сигналів, враховуючи при цьому те, що фазова швидкість поширення радіохвиль під сусідніми точками зондування (при переміщенні антени георадара вздовж поверхні землі) може істотно змінюватися [120, 125-127].

Основною перешкодою використання інформації про фазу стосовно радіоімпульсним систем підповерхневого зондування є технічні труднощі, що виникають в отриманні опорного сигналу зі зсувом фази на дев'яносто градусів у дуже широкій смузі частот. При використанні багато частотного зондуючого сигналу застосовується перехід на фіксовану проміжну частоту, на якій реалізується квадратурний фазовий детектор. Для цього застосовуються два синтезатора частот, що працюють синхронно, але з невеликим зсувом по частоті, рівним значенню проміжної частоти. Така побудова вимірювальної системи ускладнює структуру георадара, але дозволяє реалізувати додаткові можливості [106], зокрема, вимірювання не тільки амплітуди сигналів, відбитих неоднорідностями в підповерхневому просторі, але і їх фазової структури. В даний час з'явилися мікросхеми, що реалізують квадратурний фазовий детектор в дуже широкій смузі частот, що дозволило істотно спростити схему георадару [129].

Розглянемо основні прийоми обробки й подання результатів при використанні фазової структури сигналів [125, 147]. При застосуванні перетворення Фур'є до квадратурних складових сигналів на виході фазового детектора, яке необхідно для переходу в частотну область подання сигналів в якій частота пропорційна значенням глибини, ми отримуємо вираз для комплексної спектральної щільності [110, 125]:

$$\dot{S}(\Omega) = S(\Omega) | \exp(j\varphi(\Omega)) ,$$
 (2.33)

де  $|\dot{S}(\Omega)|$  - модуль спектральної щільності,  $\varphi(\Omega)$  - фазочастотний спектр відбитих сигналів.

У цьому виразі фазочастотная складова спектру характеризує залежність фази спектральних компонент сигналів, відбитих від неоднорідностей в підповерхневому просторі, від частоти (яка в даному випадку пропорційна глибині).

Після застосування дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) до квадратурних компонентів сигналів на виході фазового детектора, ми представляємо сигнали в частотній області, в якій значення частоти пропорційно глибині. ДПФ може бути визначено з (2.32) шляхом накладення наступних обмежень:

$$\Delta d = \nu/2N\Delta f , \qquad (2.34)$$

$$\Delta\Omega = 2\Delta f \,\Delta d / N \nu \,, \tag{2.35}$$

де  $\Delta d$  – елемент роздільності по глибині. Значення  $\Delta \Omega$  відповідає частотній роздільності  $\Delta d$ .

Таким чином, ми можемо отримати наступний вираз для комплексної спектральної щільності:

$$\dot{S}(p\Delta\Omega) \approx \sum_{n=0}^{N-1} \dot{u}[n] \exp\left(j2\pi \frac{n}{N}p\Delta\Omega\right),$$
 (2.36)

де n = 0, ..., N-1, и p = 0, ..., N-1.

Далі:

$$\dot{S}(p\Delta\Omega) = \left|\dot{S}(p\Delta\Omega)\right| \exp(j\varphi(p\Delta\Omega))$$
 (3.37)

де  $|\dot{S}(p\Delta\Omega)|$  – модуль сигналу спектру Фур'є, а  $\varphi(p\Delta\Omega)$  – його фазовий спектр.

Фазовий спектр характеризує частотну залежність спектральної фази  $\varphi(p\Delta\Omega)$ , яка в нашому випадку є пропорційна глибині [110, 125]. В цьому випадку співвідношення між  $\Delta\Omega$  та  $\Delta d$  визначається формулою (2.35).

Для виділення інформації з фазової структури сигналів, розглянемо фазовий коефіцієнт поширення радіохвиль в середовищі з втратами, які згідно [110, 125] може бути записано наступним чином:

$$\beta = \frac{\omega}{v} \sqrt{1 - tg\delta} , \qquad (2.38)$$

де  $tg\delta$  - тангенс діелектричних втрат, що визначається як

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \ll 1, \tag{2.39}$$

 $\sigma$ - питома провідність середовища,

 $\varepsilon_a$  – абсолютна діелектрична проникність середовища,

 $\omega$  – кругова частота,

v – фазова швидкість поширення радіохвилі, яка визначається виразом:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_a \mu}},\tag{2.40}$$

*µ* - магнітна проникність середовища.

Застосувавши розкладання в ряд Маклорена до виразу (2.41), отримаємо:

$$\beta = \frac{\omega}{\nu} \left( 1 - \frac{1}{2} j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} + \frac{1}{8} j \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2 + \dots \right).$$
(2.42)

Застосувавши вирази (2.30-2.32), (2.42) і відповідно до [110, 125, 147], напруга на виході приймача георадара зі ступінчастою зміною несучої частоти може бути записано таким чином:

$$\dot{u}[n] = \sum_{p} U_{p} \exp\left(-4\pi\alpha_{m} \frac{f_{0} + n\Delta f}{\nu} d_{p}\right) \times \exp\left(-j\left(4\pi \frac{f_{0} + n\Delta f}{\nu} d_{p} + \frac{1}{8}\left(\frac{\sigma}{(f_{0} + n\Delta f)\nu\varepsilon_{a}} d_{p}\right)^{2}\right)\right),$$
(2.43)

де  $U_p$  – амплітуда сигналу відображення від об'єкта розташованого на глибині  $d_p$ ; n – число дискретних значень зондуючого сигналу;  $\Delta f$  – дискретний крок зміни несучої частоти. Перший експонентний член в (2.43) характеризує залежність коефіцієнта загасання сигналу від частоти у робочій смузі частот георадару. Другий член складається з двох частин. Перший визначає низьку частоту відбитого сигналу, значення якої залежить від розташування по глибині об'єкта та діелектричних властивостей ґрунту. Друга частина характеризує додатковий фазовий зсув, який визначається частотною дисперсією ґрунту. Вихід фазового детектора багаточастотного георадару містить суму гармонійних коливань сигналів зворотного розсіювання. Коефіцієнт загасання амплітуд коливань протягом часу сигналу визначено частотною залежністю  $\alpha_m$ . Частоти розгортки гармонійних коливань визначаються значеннями d<sub>n</sub>, v и  $\Delta f$  [125]. Коли частота зондуючого сигналу змінюється, фаза сигналу, яка відбита об'єктом, також змінюється. Таким чином, на кожній дискретній частоті (або глибини) відбитий сигнал містить як основну інформаційну складову гармонійне коливання, частота якого визначається цією глибиною, фазовою швидкістю поширення радіохвиль в середовищі і дискретним значенням кроку перебудови несучої частоти зондувального сигналу. При зміні несучої частоти в заданому діапазоні в ньому присутня постійна складова фази, яка при зміні глибини зростає лінійно, і порівняно низькочастотна складова фази, яка призводить до спотворень фазової структури сигналу [125, 127].

В цій же роботі показано, що фазова структура зондуючи сигналів відбитих від неоднорідностей підповерхневого структури ґрунту та які пройшли скрізь шари ґрунту, визначається виразом, в якому фазовий множник ΔΦ визначає залежність фазочастотного спектра від електричних властивостей середовища при кожному дискретному значенні глибини  $d_p$ , відповідно, визначається роздільною здатністю зондуючого сигналу:

$$\Phi(d_p) = d_p \Delta \Phi.$$
 (2.44)

Розглянемо більш докладно постійну добавку фази, що є множником *d*<sub>*p*</sub>. Її можна записати в наступному вигляді:

$$\Delta \Phi = \frac{1}{8} \frac{\sigma^2 \sqrt{\mu}}{(f_0 + \Delta f) \sqrt{\varepsilon_a} \varepsilon_a}.$$
(2.45)

Видно, що фазова добавка визначається електричними характеристиками середовища і при зміні глибини відбувається лінійне наростання фази [125, 127].

Таким чином, у кожної спектральної складової сигналу на виході фазового детектора приймача георадара присутній фазова складова, яка лінійно залежить від глибини (частоти). Швидкість наростання по глибини (частоти) цієї складової визначається характеристиками середовища. Як видно з виразу (2.45), основний внесок у цю добавку вносить питома провідність середовища, так як вона входить в степені 2, в той час як діелектрична проникність – тільки в степені 3/2 [125, 127].

### 2.5 Інтерпретація і візуалізація фазової структури відбитого сигналу при багаточастотному когерентному радіозондуванні

Розглянемо результати, які отримано моделюванням залежності електричних характеристик ґрунту від його літологічного складу (процентний вміст глинистої та піщаної фракцій у суміші) і його вологості та, відповідно, залежність фазової добавки, обумовленої цими причинами і глибиною. Модель, що описує електричні характеристики породи ґрунту, описана в роботах [91, 92] та детально викладена в першому розділі.

На рис. 2.8 наведено залежність фазового коефіцієнта від частоти в діапазоні частот від 120 до 240 МГц. Представлено три криві які відповідні об'ємної вологості 1%, 12% і 24%, відповідно.



Рисунок 2.8 - Залежність значення фазового коефіцієнта від частоти у діапазоні від 120 до 240 МГц

Ці криві характеризують залежність постійного фазового коефіцієнта, який є множником дискретного значення глибини, від об'ємної вологості. Кожна крива відповідає певному типу ґрунту, який характеризується процентним вмістом піщаної та глинистої фракцій.

Крутизна кривої практично не залежить від частоти при низькій вологості (W = 1 - 12%) і починає збільшуватися при збільшенні вологості (W = 24%). Таким чином, фазочастотный спектр компонент сигналу, що характеризує залежність фазової добавки від глибини, буде характеризуватися лінійною залежністю, швидкість наростання якої визначається електричними характеристиками середовища.

На рис. 2.9 наведено криві, що характеризують залежність постійного фазового коефіцієнта, який є множником дискретного значення глибини, від об'ємної вологості. Кожна крива відповідає певному типу ґрунту, який характеризується процентним вмістом піщаної і глинистої фракцій.



Рисунок 2.9 - Залежність значення фазового коефіцієнта від вологості

Співвідношення сухої частини суміші: 1 – пісок 30%, глина – 70%; 2 – пісок 50%, глина 50%; 3 – пісок 70%, глина 30%. Якщо структура ґрунту однорідна по глибині, то фазочастотний спектр характеризується лінійним наростанням фази по глибині. Так як при обчисленні фазочастного спектру використовується стандартні функції обчислення аргументу комплексної
функції, то лінійне наростання фази буде тільки в діапазоні від 0 до  $2\pi$  [125, 127]. Швидкість наростання фазового зсуву визначається електричними характеристиками середовища або швидкістю поширення радіохвиль в середовищі. Наприклад, крива 1 на рис. 2 відповідає середовищі, в якому вологість вище, а швидкість поширення радіохвиль менше, ніж для середовища, якої відповідає крива 2.

Аналогічно поданням інформації про результаті підповерхневого зондування у вигляді радиояркостного зображення перерізу ґрунту за профілем руху георадара, можна уявити і зображення фазою структури сигналів.

На рис. 2.11 наведено результати моделювання фазового набігу в залежності від глибини при різній вологості породи шару ґрунту W: 1 - W =23%; 2 - W =13,5%; 3 - W =9%. Для даного випадку була обрана порода, що містить 70% піщаної фракції і 30% - глинистої.



Рисунок 2.11 - Залежність фазового набігу від глибини при різній вологості ґрунту

З наведеного малюнка видно, що швидкість зростання фазового зсуву залежить від вологості ґрунту. Використовуючи інформацію про фазову структуру сигналу по всьому профілю руху георадару, можна порівнювати результати в сусідніх точках зондування або на обмежених ділянках профілю. При зміні структури ґрунту за трасою руху георадару або при наявності локальних ділянок, що відрізняються, наприклад, підвищеною або зниженою вологістю, будуть спостерігатися зміни фазового зсуву у фазочастотному спектрі відбитих сигналів.

Візуалізація отриманих фазочастотних спектрів (форма їх подання на моніторі або на папері), вимагає певного підходу. Найбільш відомий спосіб результатів представлення підповерхневого зондування полягає В двовимірному відображенні квадратів амплітуд спектральних компонент відбитих сигналів, отриманих по всьому профілю руху. На цих зображеннях по осі ординат вказані значення глибини, по осі абсцис – відстань вздовж профілю, а квадрат амплітуди сигналів представляється у вигляді зачерненных ділянок, ступінь чорніння яких залежить від значень зазначених амплітуд. Подібне уявлення доцільно застосувати і для представлення фазочастотних спектрів. При такому ж способі представлення, зображення показуються у вигляді зачернених ділянок, що відповідають максимумам фазових зрушень рівним  $k \times 2\pi$  (де k – натуральне число), розташованих періодично по глибині. При наявності локальних зон або шарів грунту, через які виникають зміни в фазовій швидкості поширення радіохвиль, буде спостерігатися зміщення положення цих максимумів по глибині [125, 129].

Як приклад на рис. 2.12 наведено зображення фазової структури сигналів за трасою руху георадару, що перетинає підземний тунель на території державного заповідника «Софія-Київська». Зондування здійснювалося в діапазоні частот 140-270 МГц [144, 147].



Рисунок 2.12 - Фазова структура відбитих сигналів за трасою руху георадару, що перетинає підземний тунель

З малюнка видно, що в місці розташування підземного тунелю ізолінія фазової структури відображених сигналів викривляється вниз, що свідчить про наявність розущільненого простору. Невелике викривлення в ту ж сторону ізолінії, що лежить вище можна пояснити тим, що розташована нижче її порожнина, сприяє відтоку вологи з вище лежачих шарів ґрунту, внаслідок чого їх діелектрична проникність і питома провідність стають менше.

На рис. 2.13 наведено радіолокаційні зображення перетину ґрунту вздовж траси руху георадару [135, 147]. Верхній рисунок являє собою "радіояскравісне" зображення результатів зондування, в якому ступінь затемнення окремих зон пропорційна амплітуді відображених підповерхневими неоднорідностями сигналів. При проходженні шарів ґрунту сигнал спотворюється внаслідок горизонтальної неоднорідності ґрунту. Так само на амплітуду сигналу впливає відбиття від меж шарів ґрунту. На цьому рисунку пунктирними лініями виділено межу лесових суглинків та прошарок піску.



Рисунок 2.13 - Радіолокаційні зображення перетину ґрунту вздовж траси руху георадару

На нижньому малюнку наведено зображення фазової структури відбитих сигналів по глибині цього ж профілю. Темними кривими показано ізолінії фазової структури сигналів, які побудовано відповідно до методу, описаному вище.

Відстань між сусідніми ізолініями обернено пропорційно ступеня зволоження ґрунту, тобто об'ємної вологості. Проміжна область між сусідніми ізолініями забарвлюється в темний колір, інтенсивність якого обернено пропорційна відстані між цими лініями. Ступінь затемнення зазначених областей прямо пропорційна вологості. Порівнюючи ці зображення, ми бачимо, що нижнє зображення, на якому відображена фазова структура відбитого зондуючого сигналу більш інформативно. На ньому видно ділянки підвищеної вологості, які практично непомітні на верхньому малюнку.

### Висновки до розділу 2

1. Доведено, що при обробці відбитих зондувальних сигналів, стосовно багаточастотного підповерхневого зондування зі ступінчастим зміною несучої частоти, можна використовувати пряме перетворення Фур'є для переходу в частотну область, у якій частота пропорційна значенням глибини.

2. Запропоновано новий метод обробки сигналів відбитих від неоднорідностей підповерхневого структури грунту, який базується на використанні їх фазової структури. Фазова структура відбитих сигналів дозволяє добувати більше інформації про фізичні властивості підповерхневої структури ґрунту, ніж використання тільки амплітуди цих сигналів.

3. Доведено залежність фазової структури георадиолокационных сигналів і крутість наростання фазочастотного спектру по глибині від електричних характеристик порід ґрунту, яка може бути основою для оцінювання фізичних характеристик цих порід, зокрема, їх об'ємної вологості.

4. Запропоновано новий спосіб візуалізації фазової структури сигналів за трасою руху георадару, що дозволяє оцінювати просторову зміну фізичних властивостей порід ґрунту (зокрема, її вологості).

### РОЗДІЛ З

# ІТЕРАЦІЙНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ПІДПОВЕРХНЕВОЇ СТРУКТУРИ ҐРУНТУ

## 3.1 Зіставлення результатів моделювання електричних характеристик ґрунту з даними підповерхневого зондування

Завдання відновлення електричних характеристик підповерхневого структури ґрунту за даними підповерхневого зондування, внаслідок того, що вона належить до зворотних задач, не має точного математичного рішення. В даному випадку вона є особливо некоректною математичною задачею, так як більшість параметрів, що входять до моделі електричних характеристик ґрунту можна отримати тільки в результаті безпосередніх вимірювань. При відсутності інформації про ці параметри задача стає невизначеною.

Для отримання достовірних результатів підповерхневого зондування необхідно враховувати частотну дисперсію в ґрунті, а саме – частотну залежність погонного загасання і фазової швидкості поширення радіохвиль у ґрунті від фізичних та електричних характеристик ґрунту. Для визначення впливу частотної дисперсії використовується комп'ютерне моделювання, в якому використовуються моделі електричних характеристик різних типів грунтів, об'ємна вологість, солоність, текстура, літологичний склад ґрунту. Особливо важливо мати адекватну реальним ґрунтам модель при розробці методів і алгоритмів відновлення фізичних властивостей порід ґрунту за результатами підповерхневого зондування. В літературі описано багато моделей електричних характеристик порід ґрунту [57, 70, 81, 89,]. Описи деяких моделей наведені в першому розділі. Однак, в літературі практично відсутнє порівняння теоретичних моделей з результатами, одержуваними безпосередньо з даних радіолокаційного підповерхневого зондування. Більшість експериментальних даних отримані шляхом вимірювання діелектричних характеристик зразків ґрунту в лабораторних умовах, після їх вилучення з середовища, без урахування впливу навколишнього середовища

на частинки та по́ровий простір вимірюваного зразка [99-101. Тому дослідження частотної дисперсії електричних характеристик реальних грунтів, одержуваних у результаті комп'ютерного моделювання з використанням різних електричних моделей ґрунту, та їх зіставлення з результатами практичного зондування з використанням експериментальних моделей георадарів, є необхідними для правильної інтерпретації результатів підповерхневого зондування. Можливості такого підходу стосовно до оцінювання електричних характеристик ґрунту і окремих підповерхневих об'єктів викладені в роботах [93, 136].

В роботах [137-139] було показано, що в умовах підповерхневого радіолокаційного зондування з використанням багато частотного зондуючого сигналу, виникають суттєві викривлення відбитих сигналів з-за частотнозалежних погонного загасання і фазової швидкості поширення радіохвиль (частотної дисперсії) в ґрунті, які обумовлені частотними залежностями електричних характеристик ґрунту.

Електричної модель грунту, за якою проводилися розрахунки в цих роботах, використовувалася модель Беренцвейга [91, 92], описана в першому розділі. У цій моделі грунт розглядається як статистична суміш твердих частинок, плівкової вологи, по́рового електроліту і повітря. Для вираження ефективної комплексної діелектричної проникності цієї суміші через діелектричну проникність та об'ємні концентрації компонент  $p_i$ , де  $p_i$  – відношення обсягу компонента до повного обсягу зразка грунту. Для розрахунку іонної провідності використовувалася електрична модель, яка описана в [89], і в якій ґрунт розглядається як суміш піску, глини, мулу, води з розчиненою сіллю та повітрям, а водяна фракція представляється у вигляді двох шарів. Перший шар (шар Штерну) розташовується в безпосередній близькості від частинок ґрунту, іони води в якому знаходяться в пов'язаному стані з іонами частки ґрунту. У другому шарі (шар Гуї) вода знаходиться в слабкому зв'язку з частинками ґрунту. Коли вода потрапляє в систему, адсорбовані катіони частково дифундують в розчин в безпосередній

близькості віл поверхні частинок. Результуючий розподіл зарядів визначається рівняннями Пуассона-Больцмана. Залежність розподілу іонів від відстані визначається поверхневою густиною зарядів, типом адсорбованих катіонів, солоністю основного об'єму розчину, температурою.

Поверхнева густина зарядів визначається величиною ємності катіонного обміну (ЕКО), під якою розуміють загальну кількість катіонів одного роду, утримуваних ґрунтом в обмінному стані за стандартних умов і здатних до обміну на катіони, який взаємодіє з ґрунтовим розчином. Макроскопічні діелектричні властивості системи, що описує ґрунт, визначаються сумішшю 4-х компонент: сухих часток ґрунту, слабко зв'язаної води в шарі Пуі, сильно зв'язаної води в шарі Пуі, сильно зв'язаної води в шарі Штерна і повітря.

Було зроблено зіставлення розрахункових результатів, отриманих на основі цієї моделі, з натурними вимірами, зробленими із застосуванням експериментальних георадаров, які працюють в діапазоні частот 90-300 МГц и 500-900 МГц [137, 138].

В результаті проведених вимірювань, було отримано результати, які свідчать про значну частотну залежності фазової швидкості поширення радіохвиль в різних ґрунтах і суттєво меншу частотну залежность погонного загасання радіохвиль у порівнянні з аналогічними розрахунковими даними, що отримуються в результаті моделювання електричних характеристик грунту. Так само спостерігалося менше загасання радіохвиль у ґрунті, ніж це передбачається в теоретичних моделях, що вимагає подальшого уточнення існуючих уявлень до електричних і фізичних характеристик типових ґрунтів в їх природному стані. На рис. 3.1 наведено оброблені сигнали з виходу фазового детектора георадару, які характеризують розподіл відбиттів зондувального сигналу від неоднорідностей підповерхневого середовища по глибині, при проході на відстань більш, ніж 70 м трасою руху георадару. По осі абсцис відкладена глибина, а по осі ординат – відносна амплітуда в логарифмічному масштабі. У реальних шарах ґрунту завжди відбувається відображення у кожному елементі розділення по глибині, які визначаються шириною спектру зондуючого сигналу, за рахунок присутності струмів провідності і зсуву, що обумовлено кінцевою провідністю порід ґрунту і наявністю невеликих неоднорідностей (текстури ґрунту, об'ємної вологості).



Рисунок 3.1 - Спектри сигналів на виході фазового детектора приймача георадару

Коефіцієнт відбиття не відомий, але статистично він розподілений приблизно однаково в кожному елементі розділення. Хід всіх кривих підпорядковується до статечної залежності від глибини з показником ступеня близько -13. На цьому рисунку наведено дві пунктирні прямі, отримані на підставі розрахунку з використанням описаної вище моделі. Ці прямі обмежують область змін загасання радіохвиль у ґрунті, характерні практично для всіх типів суглинку, при значеннях об'ємної вологості від 10% до 15%. Видно, що експериментальні дані лежать трохи вище теоретичних кривих. Так як об'ємна вологість у реальних суглинках зазвичай вище 15%, це означає, що ми не повинні були б бачити відображення на глибинах понад 10-15 м, що суперечить даними зондування в реальних ґрунтах. Враховуючи, що з ростом глибини зростає пляма опромінення елемента розділення, але не пропорційно  $r^2$ , де r – глибина в метрах (причиною цього є загасання радіохвиль в породах ґрунту [136]), то це призведе до дещо більшого

результуючого показника ступеня загасання сигналів від глибини. Однак, загасання радіохвиль у ґрунті, що визначається моделлю, істотно більше, ніж спостерігається в експериментах стосовно до тих же типах ґрунтів. Загасання радіохвиль у ґрунті визначається формулою (3.1), в яку входять як питома провідність, так і діелектрична проникність [28-30]:

$$\alpha = \omega \left[ \frac{\mu \varepsilon}{2} \sqrt{1 + tg^2 \delta} - 1 \right]^{1/2}, \qquad (3.1)$$

де  $tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$  – тангенс діелектричних втрат у ґрунті.

На частотах 0,1-1,0 ГГц основний внесок у величину загасання радіохвиль вносить питома провідність. Для того, щоб теоретична модель відповідала реальним результатам, необхідно зменшувати в 1,5-1,7 рази розрахункові значення питомої провідності.

Частотна залежність погонного загасання радіохвиль у ґрунті, отримана в результаті натурних вимірювань, не відповідає розрахунковим даним. Розглянемо сигнал з виходу фазового детектора приймача багаточастотного георадару, який відповідний відбиттю від будь-якої межі між двома різними шарами ґрунту, наприклад між шаром суглинку та шаром піску, який наведено на рис. 3.2.

На рисунку, вздовж осі абсцис, відкладено зміну частоти зондуючого сигналу. Загасання амплітуди сигналу збігається з ходом кривої, яка визначає частотну залежність загасання радіохвиль в ґрунті. Зміна амплітуди сигналу у діапазоні зміни його несучої частоти становить близько 20 дБ.



Рисунок 3.2. Сигнал, який відповідний відбиттю від межі, що відокремлює шар суглинку та шар піску

Задаючи параметри ґрунту (процентний вміст піску і глини, об'ємну вологість, солоність, температуру, діапазон частот) та використовуючи теоретичну модель розрахунку електричних параметрів ґрунту (формулу Беренцвейга), проводилося моделювання процесу поширення радіохвиль в заданому шарі ґрунту до будь-якої відбивальної поверхні і назад до антени георадару. Над сигналом, в процесі моделювання, необхідно зробити ті ж перетворення, які відбуваються приймачі георадара (перемноження з опорним сигналом та низькочастотна фільтрація). Вираз, що визначає значення вихідної напруги на виході фазового детектора, наведено в другому розділі – (2.42). На рис. 3.3(а) наведено сигнал на виході фазового детектора приймача георадару, який теоретично розраховано, та який відповідає відбиттю від повністю відбивальної поверхні, що розташовано на глибині 6 м, у тому ж діапазоні зміни частот зондувального сигналу, а на рис. 3.3(б) – його амплітуда в логарифмічному масштабі. Параметри грунту обрані таким чином, щоб відповідати експерименту (пісок 90%, глина 10%, об'ємна вологість 15%).

З наведеного рисунку ми бачимо, що затухання амплітуди сигналу навіть при невеликих концентраціях глини, в процесі зміни несучої частоти, становить близько 40 дБ, що на 20 дБ більше, ніж у експериментального результату.



Рис. 3.3. Рассчитанный сигнал на выходе фазового детектора приемника георадара

Частотна залежності фазової швидкості поширення радіохвиль у ґрунті визначається виразом [28-30]:

$$v = \frac{1}{\left[\frac{\mu\varepsilon}{2}\sqrt{1+tg^2\delta} + 1\right]^{1/2}},$$
(3.2)

Для визначення частотної залежності фазової швидкості поширення радіохвиль у ґрунті необхідно порівняти результати експериментальних зондувань і дані, отримані в результаті розрахунків.

Запропонована методика полягає в тому, щоб визначити глибину залягання будь-якого об'єкта за результатами зондування в двох частинах спектру зондуючого сигналу - в низькочастотній та високочастотній. Зміщення залягання об'єкта по глибині в цьому випадку буде прямо пов'язано з впливом частотної дисперсії на фазову швидкість поширення радіохвиль у грунті. Потім, використовуючи модель електричних характеристик ґрунту, необхідно розрахувати при тих же параметрах зондувального сигналу (ширини спектра) і типу ґрунту, наскільки буде зміщуватися автокореляційна функція зондуючого сигналу при відбитті від точкового об'єкта, розташованого на тій же глибині, що і в експерименті. Детально це питання розглянуто в роботі [140].

На рис. 3.4 наведено зображення двох підповерхневих об'єктів, один з яких – підземний колектор, який розташовано на глибині близько 7 м (на лівому рисунку) та на глибині близько 10 м (на правому рисунку), а другий (невідомий) об'єкт – розташовано на глибині близько 17 м на лівому рисунку.



Рисунок 3.4 - Радіолокаційні зображення двох підповерхневих об'єктів, отримані в низькочастотній (а) та високочастотної (б) частинах спектру зондуючого сигналу: а) 140-190 МГц; б) 190-240 МГц

Ліве низькочастотній зображення отримано частині В спектру зондуючого сигналу (діапазон частот 140-190 МГц). a друге y частині (190-240 МГц). високочастотній Спектр зондуючого сигналу поділений на дві половинки, тому роздільна здатність по глибині істотно

зменшилася, але зате добре видно зсув об'єкту по глибині за рахунок частотної залежності фазової швидкості поширення радіохвиль у ґрунті. Так зміщення першого об'єкта (підземний колектор) становить близько 3 м, а другого 6-7 м за рахунок накопичення спотворень з глибиною.

На рис. 3.5 наведено автокореляційні функції зондуючого сигналу при відбитті від точкового підповерхневого об'єкта, що залягає на глибині близько 7 м. Пунктирна крива відповідає низькочастотної складової спектру зондуючого сигналу (діапазон частот 140-190 МГц), а суцільна крива – високочастотної частини (діапазон частот 190-240 МГц). З рисунку видно, що зсув об'єкту по глибині за рахунок частотної залежності фазової швидкості поширення радіохвиль в ґрунті практично відсутній. Цей результат суперечить експериментальним даним, в яких таке зміщення досягає значення близько 2-3 м при тій же глибині залягання підповерхневого об'єкта.



Рисунок 3.5 - Автокореляційні функції зондуючого сигналу при відбитті від то́чкового підповерхневого об'єкта, що залягає на глибині близько 7 м (пунктирна крива - високочастотна частина спектру, суцільна - низькочастотна)

### 3.2 Коригування електричної моделі ґрунту

роботах [93, 136, 140] В було доведено, ЩО при проведенні підповерхневого радіолокаційного зондування, з використанням сигналу зі ступінчастим зміною несучої частоти, при обліку частотних залежностей погонного загасання і особливо фазової швидкості поширення радіохвиль (частотної дисперсії) в ґрунті, які обумовлені частотними залежностями його електричних характеристик, виникають суттєві спотворення сигналів. Ці спотворення не дозволяють розширювати смугу зондування для досягнення прийнятної роздільної здатності по глибині. Спотворення виявляються як у частотно-залежному загасання сигналу, так і в появі паразитної частотної модуляції, що виникає за рахунок частотно-залежної фазової швидкості поширення радіохвиль, що призводить до появи помилкових кордонів на радіолокаційних зображеннях підповерхневих неоднорідностей.

При обробці сигналів в підповерхневій радіолокації застосовується підхід, заснований на використанні кореляційної функції зондуючого сигналу. Він зводиться до перемноження прийнятого з певної глибини відбитого сигналу на опорний сигнал, який являє собою затриману копію випромінюваного сигналу. Це означає, що при обробці не враховуються згадані вище спотворення сигналів, а відбитий сигнал вважається практично затриманої копією зондувального з урахуванням фіксованого (без частотної дисперсії) загасання в середовищі. Це призводить до того, що при збільшенні ширини спектру зондуючого сигналу, георадіолокаційні зображення грунту будуть спотворюватися і можуть з'являтися помилкові межі.

На рис. 3.6 та рис. 3.7 наведені два радіолокаційних зображення перетину ґрунту по одній трасі руху георадару [136], що мають різні ширини спектру зондуючого сигналу. Рис. 5 відповідає ширині спектру 128 Мгц при початковій частоті, що дорівнює 150 МГц, а рис. 6 – ширині спектру 90 МГц.



Рисунок 3.6 - Радіолокаційне зображення перетину ґрунту за трасою руху георадару при ширині спектру зондуючого сигналу 128 МГц



Рисунок 3.7 - Радіолокаційне зображення перетину ґрунту за трасою руху георадару при ширині спектру зондуючого сигналу 90 МГц

З наведених рисунків видно, що на глибині 1 м є межа між двома шарами ґрунту, яка присутня на обох зображеннях. А на глибині 2-2,5 м і глибше спостерігаються спотворення, що виявляються в зсуві видимих кордонів в околиці 2,5 м в бік більших глибин при ширині спектру зондуючого сигналу 90 МГц. На рис. 3.6 видно помилкова межа на глибині близько 2,5 м, якої немає на рис. 3.7. Таким чином, наявність частотної залежності фазової швидкості поширення радіохвиль у ґрунті призводить до суттєвих викривлень радіолокаційних зображень і до появи помилкових сигналів, що свідчить про те, що в кореляційній функції зондуючого сигналу з'являються додаткові моди.

Було проведено чисельне моделювання процесів поширення радіохвиль в шарах ґрунту. В ролі опорного сигналу була застосована затримана копія випроміненого. Основною складовою частиною моделювання є залежності електричних характеристик різних типів ґрунтів від таких характеристик як об'ємна вологість, солоність, текстура, литологический склад ґрунту. Як вихідна модель була застосована модель Беренцвейга [91, 92].

Застосовність даного методу можна оцінити використовуючи двовимірну кореляційну функцію зондуючого сигналу.

Згідно роботі [141] двовимірна кореляційна функція (ДКФ) радіолокаційних  $R_m(\tau, \Omega)$  сигналів визначається виразом:

$$R_m(\tau,\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_m(t) U_m(t+\tau) \exp(-j\Omega t) dt , \qquad (3.3)$$

де *т* – час затримки відбитого сигналу.

Нормована ДКФ має вигляд:

$$\rho(\tau,\Omega) = \frac{R_m(\tau,\Omega)}{R_m(0,0)} = \frac{R_m(\tau,\Omega)}{2E},$$
(3.4)

де E – енергія сигналу.

Модуль нормованої ДКФ називається функцією невизначеності зондуючого сигналу (ФНЗС), позначається  $\chi(\tau, \Omega)$  і використовується для аналізу властивостей зондуючого сигналу. Перетин ФНЗС при  $\Omega = 0$ , тобто

збігається за формою з часовою кореляційною функцією зондуючого сигналу і визначається амплітудно-частотним спектром сигналу.

Розглянемо, як впливають частотна залежність загасання та фазова швидкість поширення радіохвиль в ґрунтах на форму часової кореляційної функції зондуючого сигналу.

На основі моделі Беренцвейга були зроблені розрахунки значень провідності та відносної діелектричної проникності суміші піску та глини (суглинок) в залежності від частоти електромагнітного поля і об'ємної вологості суміші.

На рис. 3.8 наведено розрахункова залежність провідності – *σ* та відносної діелектричної проникності – *ε* суміші:



### Рисунок 3.8 - Розрахункова залежність питомої провідності та відносної діелектричної проникності суміші від частоти при різної об'ємної вологості ґрунту

Параметри суміші: пісок - 60%; глина - 40%; пористість ґрунту - 0,25. Криві відповідають наступним значенням об'ємної вологості: 1 – 21%, 2 – 14%; 3 – 7%. Солоність ґрунту – 0,1%.

Модель було скориговано з метою отримання відповідних до експериментальних даних дисперсійних залежностей. Для цього був змінений нахил кривих, що відображають частотну залежність діелектричної проникності та питомої провідності так, щоб результати були ближчими до спостережуваних експериментальних даних. В результаті функціональні

$$K_{\varepsilon}(\omega) = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{\deg r 1}$$
(3.5)

И

$$K_{\sigma}(\omega) = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{\deg r^2} \tag{3.6}$$

відповідно. Де:  $\omega_0$  – початкова частота зондуючого сигналу, deg r1 и deg r2 – показники ступеня, величини яких в залежності від типу ґрунту варіюється в межах 0.7-0,9 та 0,3-0,5 відповідно [137-139]. При коригуванні моделі значення питомої провідності зменшувалися в 1,5-2 рази. В результаті, загальне затухання, частотна залежність погонного загасання та частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту, стали відповідні до результатів, одержуваних при зондуванні в реальних середовищах. На рис. 3.9 наведено результати скоригованої моделі.



# Рисунок 3.9 - Залежності питомої провідності та відносної діелектричної проникності від частоти при різній об'ємній вологості скоригованої моделі грунту

На підставі описаної моделі електричної характеристики ґрунту можна визначити частотні залежності погонного загасання і фазової швидкості  $v_{ph}(\omega)$  поширення радіохвиль відповідні цьому типу ґрунту [139]:

$$\alpha(\omega) = \omega^2 \sqrt{\frac{\mu\varepsilon(\omega)}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2(\omega)}{\omega^2 \varepsilon^2(\omega)}} - 1 \right]},$$
(3.7)

$$v_{ph}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon(\omega)}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2(\omega)}{\omega^2 \varepsilon^2(\omega)}} + 1\right]}}.$$
(3.8)

Задаючи параметри ґрунту (процентний вміст піску і глини, об'ємну вологість, солоність, температуру, діапазон частот, тощо) можна промоделювати процес поширення радіохвиль в заданому шарі ґрунту до відбивальної межи та назад, до антени георадару.

Далі над сигналом здійснюють ті ж перетворення, які відбуваються в приймачі георадара (перемножування з опорним сигналом і низькочастотна фільтрація). З урахуванням дискретного зміни несучої частоти в заданому діапазоні можна записати вираз сигналу, відбитого від неоднорідності на заданій глибині *h*, на виході фазового детектора георадара в наступному вигляді [110, 120, 139]:

$$\operatorname{Re}\left(\dot{U}_{ph}(t)\right) = \sum_{i=0}^{N-1} U_0 K_r \exp\left(-\alpha\left(\omega_i\right) 2h\right) \times \\ \times \cos\left(\omega_0 \frac{2h}{v_{ph}(\omega_i)} + \frac{\Delta\omega}{N} \frac{2h}{v_{ph}(\omega_i)} + \varphi_r\right)$$
(3.9)

де  $K_r$  – коефіцієнт відбиття;  $\varphi_r$  – набіг фази при відбитті;  $\Delta \omega$  – девіація несучої частоти зондуючого сигналу; N – кількість дискретних значень несучої частоти.

На рис. 3.10 наведено розрахований сигнал на виході фазового детектора приймача георадара, який відповідний відбиттю від повністю

відбивальної межи, що розташовано на глибині 6 м при тому ж діапазоні частот 100-200 МГц [139]. Параметри ґрунту обрані таким чином, щоб відповідати експерименту: пісок-70%, глина-20%, об'ємна вологість-11%.



### Рисунок 3.10 - Розрахований сигнал на виході фазового детектора приймача георадара, який відповідний відбиттю від повністю відбивальної межи, що розташовано на глибині 6 м

З наведеного рисунку видно, що в результаті проходження зондуючого сигналу крізь шар ґрунту з наведеними вище параметрами, його форма зазнає значних спотворень. Це означає, що оптимальний прийом таких сигналів не може здійснюватися стандартним методом, тобто шляхом його множення на опорний сигнал, який одержано простою затримкою частини випромінюваного сигналу.

На рис. 3.11 наведено рисунок ФНЗС (функція невизначеності зондуючого сигналу) при використанні у ролі опорного сигналу частину затриманого випроміненого сигналу та розташуванні відбивальної межи на глибині 10 м та вологості ґрунту 11,5%.

З рисунку видно, що замість одномодової ФНЗС з'явилися два піка, а їх ширина по рівню 0,5 перевищує той мінімум, який визначається шириною спектру зондуючого сигналу (близько 0,5 м).



Рисунок 3.11 - ФНЗС зондуючого сигналу при вологості ґрунту 11,5%

Для того, щоб ширина ФНЗС була мінімальною, опорний сигнал повинен бути спотворений відповідним чином. Необхідно зробити так, щоб його фазові спотворення були в точності такими ж, як у прийнятого відбитого сигналу. Необхідна така процедура, в якій опорний сигнал буде піддаватися аналогічним спотворенням, що і відбитий сигнал, тобто в нього буде вводитися множник, що визначається залежністю фазової швидкості радіохвиль від частоти, а загасання форми сигналу по мірі зміни його несучої частоти, буде якимось чином компенсуватися. На даний момент це можна зробити тільки ітераційною процедурою, змінюючи параметри моделі електричних характеристик ґрунту.

Розглянемо вид ФНЗС при розбіжності параметрів електричної моделі ґрунту з параметрами відбитого сигналу. Для цього скористаємося результатами чисельного моделювання з використанням описаної вище моделі і виразу (3.9), що описує відбитий сигнал на виході фазового детектора георадара. Опорний сигнал буде описуватися аналогічним виразом, при зміні параметрів моделі. Тип ґрунту буде один і той же, а основний параметр – його об'ємну вологість будемо варіювати так, щоб опорний сигнал або відрізнявся від відбитого сигналу, або дорівнював йому. В останньому випадку ширина ФНЗС, яка визначається виразом (3.4), повинна бути мінімальною.

Грунт являв собою суглинок з процентним вмістом піску 70%. Об'ємна вологість варіювалася в межах 2,6-17,7%. Межі зміни глибини зондування були 0-40 м. Відбитий сигнал приходив завжди з глибини 20 м.

На рис. 3.12 наведено вид функції невизначеності зондуючого сигналу-ФНЗС при збігу об'ємної вологості в моделях відбитого та опорного сигналів. З рисунку видно, що форма ФНЗС симетрична, її ширина мінімальна, що свідчить про максимальну роздільну здатність застосованого зондуючого сигналу.



Рисунок 3.12 - ФНЗС при збігу об'ємної вологості в моделях відбитого та опорного сигналів

На рис. 3.13 наведено вид ФНЗС при розбіжності об'ємної вологості в моделі відбитого і опорного сигналів [139]. Об'ємна вологість ґрунту в моделі зондуючого сигналу – 11,5%, в моделі опорного – 7,5%.

З рис. 3.13 ми бачимо, що ширина ФНЗС в даному випадку збільшилася. Спостерігається зміщення її максимуму в бік великих глибин.



Рисунок 3.13 - ФНЗС при розбіжності об'ємної вологості в моделі відбитого та опорного сигналів

На рис. 3.14 наведено вид ФНЗС при ще більшій розбіжності об'ємної вологості ґрунту в моделі відбитого та опорного сигналів: об'ємна вологість ґрунту в моделі зондуючого сигналу – 11,5%, в моделі опорного – 2,6%. Коли значення електричних характеристик моделі ґрунту в опорному сигналі близькі до значень електричних характеристик моделі ґрунту відбитого сигналу, форма часової кореляційної функції є одномодовою. При значних відмінностях електричних характеристик моделей ґрунту спостерігається двомодовий вид ФНЗС. При ще більшій різниці характеристик, форма ФНЗС "розвалюється", що свідчить про неможливість отримувати будь-яку інформацію о підповерхневих неоднорідностях.



Рисунок 3.14 - ФНЗС при великій розбіжності об'ємної вологості грунту в моделі відбитого та опорного сигналів

# **3.3 Ітераційний метод оцінки підповерхневої структури ґрунту в** реальному завданні виявлення підповерхневих водоносних шарів

Пошук і картографування зон залягання ґрунтових вод, контроль рівня грунтових вод представляють складну технічну задачу. Ґрунтові води залягають не суцільним водним шаром, а просочують собою частину ґрунту, який утворює т. зв. водоносний шар [142, 148]. Поверхня ґрунтових вод в більшості випадків варіюється по глибині в залежності від ступеня водопроникності порід ґрунту. До недавнього часу завдання пошуку водоносних шарів вирішувалося за допомогою буріння контрольних свердловин. Розвиток методів електророзвідки ґрунту, зокрема георадіолокаційного методу, дозволило вирішувати це завдання з набагато більшою продуктивністю і оперативністю.

При пошуку водоносних шарів основна складність використання георадарного методу полягає в тому, що верхня межа водоносного шару слабо виражена. Пори ґрунту, що знаходяться над дзеркалом ґрунтових вод, просочені водою в результаті капілярного підняття, висота якого залежить від складу грунту та його текстури, і може змінюватися в межах від декількох сантиметрів в піску до чотирьох метрів у глині [142, 148]. Від верхньої межі водоносного шару до дзеркала грунтових вод об'ємна вологість грунту змінюється плавно. Внаслідок цього, зміна діелектричних характеристик грунту, які відповідні місцю зміни об'ємної вологості грунту, будуть відбуватися так само плавно. Радіолокаційна контрастність підповерхневого розрізу ґрунту пропорційна відношенню діелектричних проникністей між шарами, що мають різні електричні характеристики [13]. Виявити ці зміни, застосувавши "класичний" метод радіозондування, в основі якого лежить аналіз часу затримки і амплітуди відбитого зондуючого сигналу складно, тому що у "радіояскравісному" зображенні, отриманому в результаті зондування, ці зміни будуть практично непомітні. Додатковою проблемою є те, що частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту в основному проявляється саме у вологому ґрунті (за наявності води) [142, 148].

Запропоновано метод визначення фізичної структури під поверхневого розрізу ґрунту, який засновано на комплексному використанні скоригованої електричної моделі ґрунту та аналізу фазової структури відображених зондуючих сигналів, описаному в другому розділі. У першому розділі було показано, що електрична модель ґрунту відображає взаємозв'язок між фізичними та електричними характеристиками ґрунту. У другому розділі показано, що фазова структура відбитого сигналу добре відображає навіть невеликі зміни електричних характеристик ґрунту, а запропонований спосіб візуалізації фазової структури відбитого сигналу дозволяє визначати фізичні зміни структури розрізу ґрунту.

Для визначення фізичної структури ґрунту в розрізі, зокрема визначення об'ємної вологості по глибині, пропонується наступний ітераційний алгоритм, блок-схема якого наведено на рис. 3.15.



Рисунок 3.15 - Алгоритм визначення об'ємної вологості ґрунту

В основу алгоритму покладено ітераційний метод підбору значення об'ємної вологості ґрунту стосовно до електричної моделі ґрунту. Методом ітерацій об'ємна вологість підбирається так, щоб відстань між сусідніми ізолініями фазової структури сигналу (крутизна фазочастотною характеристики) отриманої при моделюванні процесу поширення радіохвиль у ґрунті, і відстань між сусідніми ізолініями фазової структури відбитого отриманої в результаті георадарного збігалися сигналу зондування, [142, 148].

Запропонований ітераційний метод був застосований для пошуку водоносних шарів в сел. Рогівка Харківської обл.

Для зондування було обрано трасу руху георадара, яка починалася у околиці розташування діючого колодязя і простягалася на довжину близько 230 м. Такий вибір профілю необхідний для порівняння георадарних даних, одержуваних при перетині водоносного шару, з якого живиться діючий колодязь, з даними, одержуваними вздовж всієї траси руху георадару.

За результатами підповерхневого зондування отримано зображення фазової структури відбитих зондувальних сигналів за трасою руху георадару.

Зображення наведено на рис. 3.16.



Рисунок 3.16. Зображення фазової структури сигналів за трасою руху георадару

На зображенні виділено чотири характерні зони.

Перша зона – верхній шар ґрунту до глибини близько 2 м, який характеризується відносно однорідною структурою ґрунту. Друга зона – шар грунту на глибині від 2 м до приблизно 8 м. Тут можна виділити порівняно однорідну ділянку (шар), що розташовується на дистанції від приблизно 100 м від початку профілю до 200 м.

Третя зона – шар грунту на глибині від 8 м до приблизно 21 м на цій же ділянці також характеризується відносно однорідною структурою.

Найбільш цікавими з точки зору аналізу є три ділянки, позначені цифрою 4, виділені на рисунку пунктирними лініями і зона під номером 3. Перша з них – починається з глибини приблизно 10 м і розташована на відстань від 20 м до 100 м від початку профілю. Імовірно, ця зона відповідає водоносному шару з якого наповнюється зазначений вище колодязь.

Друга зона розташовується в кінці профілю на глибинах понад 12 - 14 м, та характеризує другий, імовірно водоносний шар грунту (язик), який може представляти інтерес з точки зору видобутку питної води.

У цих зонах спостерігається підйом ізоліній фазової структури сигналів на глибинах від 11 м до 17-20 м. Також присутня значна порізанність фазової структури відбитих сигналів, що може бути пов'язано з наявністю великої кількості локальних неоднорідностей в підповерхневому середовищі і, як наслідок, з великими неоднорідностями за ступенем зволоження ґрунту.

В зоні № 3 спостерігається відносно однорідна структура підповерхневого середовища з поступовим зменшенням відстані між ізолініями фазової структури відбитих сигналів з глибин, починаючи з 13 м, що характеризує однорідно зволожений шар на цих глибинах.

Для переходу до чисельних оцінками об'ємної вологості зазначених зон необхідна інформація про літологічну будову та фізичні характеристики порід ґрунту цих зон і величин відхилень за глибиною відповідних ізоліній фазової структури відбитих сигналів, а також зазначена вище модель електричних характеристик різних ґрунтів. Для цього аналізувалося більш детально фазова структура сигналів на тій частині профілю, яка представляла найбільший інтерес з точки зору наявності водоносних шарів ґрунту. Визначення типу ґрунтів здійснювалося бурінням вручну контрольної спостережної свердловини в околиці другий водоносної зони, тобто на відстані близько 220 м від початку профілю. Опис типів порід ґрунту з цієї свердловини наведено на рис. 3.17.

Далі, використовуючи зазначену вище модель залежності електричних характеристик порід ґрунту від процентного вмісту піщаної та глинистої фракцій, вологи, пористості, температури, було проведено моделювання розповсюдження багато частотного зондуючого сигналу через середовище, параметри якої варіювалися так, щоб результати моделювання збігалися по можливості з даними зондування.



Рисунок 3.17 - Типи порід ґрунту з контрольної свердловини

При моделюванні використовувалися два типи ґрунту відповідно до таб. 4.1 [143]. У першому типі ґрунту процентний вміст піщаної фракції

становив 30%, а в другому типі ґрунту - 40%. При однаковій відстані між ізолініями фазової структури ґрунту об'ємна вологість буде більше для другого випадку, а саме для ґрунту з великим процентним вмістом піщаної фракції.

Порода	Розміри частинок, мм		
	Глинисті	Пилові	Піщані
	0,002	0,002 -0005	0,5 – 2,0
	Вміст фракції, % за вагою		
Глина	>30		Більше, ніж пилуватих
Суглинок	30 - 10		
Супісок	10 - 3		
Пилувата глина	>30	Більше, ніж піщаних	
Пилуватий суглинок	30 - 10		
Пилуватий супісок	10 - 3		

Таблиця 4.1 - Класифікація глинистих грунтів за зерновим складом та змістом фракцій

Для отримання розподілу об'ємної вологості по глибині в заданому перерізі ґрунту використовувався алгоритм, який наведено на рис. 3.17 [136, 140].

Спочатку проводився аналіз зміни відстані між ізолініями фазової структури сигналів по глибині в перетинах "а" і "б". Результат наведено на рис. 3.18.

Потім, з використанням моделі електричних характеристик порід ґрунту та отриманої інформації про залежність відстані між ізолініями фазової структури від глибини, проводився підбір об'ємної вологості вибраних типів порід ґрунту так, щоб результати моделювання збігалися з даними зондування [136, 140].



Рисунок 3.18 - Залежність відстані між ізолініями від глибини: 1 – перетин "а"; 2 – перетин "б"

На рис. 3.19 та 3.20 наведено результати моделювання для обраних трьох зон підповерхневої структури ґрунту"а", "б" і "в". Для кожної зони наведені дві криві розподілу об'ємної вологості по глибині, одна з них відповідає процентному вмісту піщаної фракції 30%, а друга 40%. Можна припустити, що для зазначеного типу ґрунту реальні криві будуть відповідати якомусь проміжному випадку. Для можливого в майбутньому риття колодязя, такої точності визначення об'ємної вологості в принципі досить.

З аналізу рис. 3.19 помітно, що в перетинах "а" і "б" спостерігається велика порізаність фазової структури відбитого сигналу, що пояснюється великими скачками об'ємної вологості по глибині. Це говорить про те, що саме тут відбувається основна фільтрація вологи, так як такі породи ґрунту повинні характеризуватися більшою неоднорідністю структури ґрунту (наявність включень різних порід ґрунту з різними значеннями густини і коефіцієнта фільтрації).



Рисунок 3.19. Розподіл об'ємної вологості в перетинах "а" (суцільні лінії) та "б" (пунктирні лінії). 1, 2 – процентний вміст піщаної фракції 30%; 1', 2' – процентний вміст піщаної фракції 40%

У перетині "в" (рис. 3.21) спостерігається відносна однорідність фазової структури сигналів. Об'ємна вологість збільшується з глибиною і досягає меншого максимуму, що припадає на глибини близько 17-19 м. Таким чином, внаслідок більш однорідною фазової структури відбитих сигналів на протязі всього цього перерізу, можна зробити висновок про те, що ґрунт тут має також порівняно однорідну структуру з великим вмістом глинистої фракції, що перешкоджає фільтрації вологи по цій породі.



Рисунок 3.20. Розподіл об'ємної вологості в перетині "в".

3 – процентний вміст піщаної фракції 30%;

3' – процентний вміст піщаної фракції 40%

### Висновки до розділу 3

1. Після проведення підповерхневого зондування в реальних умовах, було отримано результати, які свідчать про відміну частотної залежності фазової швидкості поширення радіохвиль у різних ґрунтах та частотної залежності погонного загасання радіохвиль у порівнянні з розрахунковими даними, які отримано в результаті моделювання електричних характеристик ґрунту.

2. Для отримання результатів, що відповідають реальним вимірам, необхідно скорегувати розрахункові значення діелектричної проникності та питомої провідності ґрунту, які отримано на основі моделі.

3. При зондуванні на глибини, які перевищують середню довжину хвилі зондуючого сигналу, застосовується традиційний підхід до обробки сигналів, що полягає у використанні у ролі опорного сигналу частини затриманого випромінюваного сигналу. Такий підхід не враховує частотну

залежність фазової швидкості поширення радіохвиль у ґрунті, що призводить до спотворень радіолокаційних зображень і до появи помилкових сигналів.

4. Оцінка застосовності традиційного підходу обробки сигналів була проведена на основі аналізу функції невизначеності зондуючого сигналу. Для цього використовується ітераційна процедура, в якій опорний сигнал піддається тим же спотворенням, що і відбитий сигнал. Ітераційна процедура полягає в зміні параметрів моделі електричних характеристик ґрунту таким чином, щоб отримати мінімальну ширину функції невизначеності зондуючого сигналу.

5. Мінімальна ширина функції невизначеності зондуючого сигналу з'являється в разі збігу спотворення опорного сигналу відповідно з спотвореннями відбитого сигналу. При значній різниці параметрів моделі електричних характеристик ґрунту форма функції невизначеності "розвалюється", зондуючого сигналу шо свідчить про практичну неможливість отримувати інформацію про підповерхневу структуру ґрунту з прийнятих сигналів георадаром.

6. Запропоновано метод розрахунку розподілу об'ємної вологості по глибині на підставі георадиолокаційних даних та з використанням розробленої моделі залежності електричних характеристик основних порід грунту від їх фізичних параметрів. У методі використовується зв'язок між крутизною наростання фазочастотного спектра сигналів і фізичними порід Метод заснований ітераційних характеристиками ґрунту. на процедурах підбору значення об'ємної вологості при розрахунку фазової структури відбитих зондувальних радіосигналів при відомих процентних вміст глинистої та піщаної фракцій та порівнянню її з фазовою структурою відображених зондувальних радіосигналів, отриманої безпосередньо В результаті георадарного зондування.

### **РОЗДІЛ 4**

# ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ, ЯКІ ОТРИМАНО ПРИ РАДІОЗОНДУВАННІ БАГАТОЧАСТОТНИМ РАДІОСИГНАЛОМ ПІДПОВЕРХНЕВОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Використання радіолокатора підповерхневого зондування для визначення рівня ґрунтових вод та картографування територій, які забруднено нафтопродуктами

Метою даної роботи було визначення глибини рівня ґрунтових вод (РГВ), літологічного складу ґрунтів зони аерації (ЗА), глибини залягання і потужності шару рідких нафтопродуктів – пально-мастильних матеріалів (ПММ), розташованого над РГВ, за допомогою багаточастотного георадару підповерхневого зондування [144, 145]. Роботу було проведено на декількох об'єктах: на території двох колишніх військових аеродромів розташованих у Сумській області, на території будівництва культурного центру в м. Суми, а також на ділянці зсуву Генуезької фортеці в м. Судак. Деякі ділянки були обладнані контрольно-вимірювальними свердловинами для спостереження за рівнем ґрунтових вод потужністю шару рідких нафтопродуктів, що дозволило виконати порівняння результатів дослідження з фактичними даними.

Технічні характеристики георадару:

- Діапазон робочих частот 100-450 МГц;
- Випромінювана потужність 3 Вт;
- Роздільна здатність по вертикалі 5-30 см, в залежності від глибини зондування та вологості ґрунту;

Антена георадара розроблена з урахуванням вимоги заглушення випромінювання сигналу у верхній півпростір. Вона виконана у вигляді прямокутного металевого резонатора з прорізаною в його нижній грані
щілиною. Діаграма спрямованості такої антени має ширину, що не перевищує 30 градусів під поверхнею грунту. Зовнішній вид георадара метрового діапазону наведено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 - Зовнішній вигляд георадару метрового діапазону

Обробка результатів зондування проводилася в кілька етапів. На першому етапі проводилася обробка результатів зондування з метою побудови радіолокаційних зображень по кожному маршруту. Для визначення літологічної структури ґрунту, глибини залягання верховодки, зон розущільнення ґрунту і дослідження фундаменту, застосовувалися математичні алгоритми обробки сигналів описані в попередніх розділах.

Необхідність застосування різних математичних алгоритмів визначається такими факторами:

- значна різниця потужності сигналів, відбитих від об'єктів, розташованих на різній глибині в ґрунті (наприклад, від меж літологічних шарів ґрунту);  сильний вплив відбиття від неоднорідностей, розташованих у верхніх шарах ґрунту, на сигнали, які приходять з великих глибин (мультиплікативний ефект);

 залежність фазової швидкості поширення радіохвиль від літологічного складу ґрунту.

Першу серію експериментів проведено на ділянці поблизу колишнього військового аеродрому (сел. Лебедин Сумської обл.), де на РГВ (глибина 7-8 м) була виявлена лінза з авіаційним гасом. Ділянка обладнана мережею контрольно-вимірювальних свердловин. На обраній ділянці було знято 9 профілів з кроком вимірів 2 м. відстань між профілями становило 5 м. Загальна кількість виміряних точок – близько 900. Дані про літологічний склад порід отримані на основі порівняння радіолокаційних зображень з профілями геологічних розрізів, представлених УкрНДІІНТВ м. Суми. При проведенні інтерпретації результатів зондування враховувалася інформація про те, що межі рівня ґрунтових вод (РГВ) і нафтопродукту не є чітко вираженими. Наприклад, зона переходу від сталого максимального рівня вологості в насиченому шарі до сталого рівня природної вологості шару могла досягати 1,2-1,5 м. Аналогічна зона для нафтопродукту трохи менша – 0.5-0.7 м. Тому ці межі на радіолокаційних зображеннях виглядають розмитими. Крім того, рівні води і нафтопродукту в контрольновимірювальних свердловинах розташовані зазвичай нижче рівнів їх залягання в грунті. Ця різниця може бути значною. Тому дані про потужність нафтопродукту, отримані з радіолокаційних даних, як правило, істотно завищені в порівнянні з даними вимірів в контрольно-вимірювальних свердловинах.

Структура зони аерації і літологічний склад порід на розглянутій ділянці наведені на рис.4.2.



Рисунок 4.2 - Структура зони аерації та літологичний склад порід: І – ґрунт суглинок чорний: II – бурий суглинок з домішками рослинних залишків; III – суглинок лессовый тугопластичный з запахом ПММ; IV – пісок дрібний, вологий водонасичений, забруднений ПММ; V – шар, насичений нафтопродуктом; VI – водотривкий шар; VII - контрольно-вимірювальна свердловина; VIII – глибина рівня нафтопродукту; IX – глибина рівня ґрунтових вод; X – потужність нафтопродукту в свердловині.

Аналіз результатів показав, що структура шарів зони аерації на обраній ділянці досить неоднорідна. Дуже добре фіксується межа супісок-пісок, розташована на глибині близько 4-6 м. Впевнено фіксується межа рівня грунтових вод, яка на розглянутій ділянці розташовується на глибині від 7,2 до 8,7 м.

На рис. 4.3 та рис. 4.4 представлено радіолокаційне зображення, що відповідає профілям, відстань між якими становить 20 м. На профілях відзначена межа РГВ і верхня межа нафтопродукту. На першому зображенні межа між РГВ та нафтопродуктом слабо помітна, на другому радіолокаційному зображенні межа між ними видно більш чітко. Те, що рівень ґрунтових вод істотно змінюється (прогинається в результаті впливу лінзи з нафтопродуктом), говорить про присутність нафтопродукту.



Радіолокаційне зображення, що відповідає профілям, відстань між якими становить 20 м. Позначення: 1 – межа суглинок/пісок; 2 – верхня межа нафтопродукту; 3 – межа РГВ

Карти ізоліній потужності нафтопродукту та рівня ґрунтових вод, які побудовано за радіолокаційними даними, представлено на рис. 4.5 (а) та рис. 4.5 (б), відповідно.

Порівняння радіолокаційних зображень та карт ізоліній рівня ґрунтових вод і потужності нафтопродукту показав, що глибина залягання порід зони аерації, рівня ґрунтових вод і нафтопродукту збігаються з даними, отриманими за допомогою контрольно-вимірювальних свердловин.



Рисунок 4.5. Карти ізоліній потужності нафтопродукту та рівня грунтових вод, які побудовано за радіолокаційними даними Позначення: Рис. 4.5 (а) – світліші ділянки відповідають товщинам шару нафтопродуктів близько до нуля, найбільш темні – товщині до 1,7 м. Рис. 4.5 (б) – світліші ділянки відповідають РГВ на глибині 7,6 м, найбільш темні – 8,4 м

Друга серія експериментів проводилася на території будівництва в м. Суми, що знаходиться в зоні підтоплення. Основним завданням було визначення РГВ у верхніх шарах ЗА, так званої верховодки, що представляє собою сильно зволожений шар, розташований на слабо проникною кордоні (водотривкої межі шару з малими значеннями коефіцієнта фільтрації). Джерелами "верховодки" є опади і різного роду витоку води, наприклад, з комунікаційних труб. В табл. 4.1 наведено літологічний склад порід і дані вимірів РГВ в контрольно-вимірювальних свердловинах, обладнаних на цій ділянці.

Номер шару	Склад ґрунту	Глибина, м
1	Грунтово-рослинний шар	от 0 до 0,40,5
2	Супісок сірий, твердий з рослинними залишками	до 0,50,7
3	Супісок лесова, сіра, тверда з запахом ПММ	до 33,5
5	Пісок, жовтувато-сірий, дрібний та пилуватий з прошарками супіски, маловологий, з запахом ПММ	до 6,57
6	Рівень ґрунтових вод	44,5

Таблиця 4.1 - Глибина розташування меж шарів ґрунту

На рис. 4.6 наведено радіолокаційне зображення перетину ґрунту по одній з трас руху георадару на ділянці.



Рисунок 4.6 - Радіолокаційне зображення перетину грунту за трасою руху георадару. Позначення: 1 – межа супісок/пісок; 2 – УГВ; 3 – межа пісок/суглинок; 4 – межа водотривкого шару

З порівняння результатів, представлених на рис. 4.6 та табл. 4.1, помітно, що радіолокаційні дані добре узгоджуються з даними, отриманими за допомогою контрольно-вимірювальних свердловин.

Третя серія експериментів проводилася на території колишнього військового аеродрому в Глухівському районі Сумської області. Під поверхнею цієї аеродрому гідрогеологічної службою УкрНДІНТВ (м. Суми) за допомогою буріння мережі контрольно-вимірювальних свердловин була виявлена і нанесена на карту лінза з авіаційним гасом. Товщина лінзи в області максимуму досягала 3,5 м. В табл. 4.2 наведено літологічний склад порід, дані вимірів (рівень ґрунтових вод розташовано на глибині 13,5-15 м).

Номер шару	Склад ґрунту	Глибина, м
1	Ґрунтово-рослинний шар	от 0 до 0,40,5
2	Супісок сірий, твердий з рослинними залишками	до 0,50,7
3	Супісок лесова, сіра, тверда з запахом ПММ	до 66,3
4	Супісок буриий, з прошарком піску і щебеню, твердий	до 10,210,5
5	Пісок, жовтувато-сірий, дрібний і пилуватий з пршарком супіски, маловологий, з запахом ПММ	до 11,513 м
6	Супісок бура, з прошарками піску, пластична з запахом ПММ	до 1819 м

Таблиця 4.2 - Літологичний склад порід грунту, дані вимірів УГВ та потужності лінзи в контрольно-вимірювальних свердловинах.

На рис. 4.7 (а) наведено ізолінії рівня ґрунтових вод, а на рис. 4.7 (б) наведені ізолінії рівної потужності, побудовані за даними підповерхневого зондування. Місця розташування контрольно-вимірювальних свердловин 7, 8, і 9 Показані на рис. 4.7 (а). На радіолокаційних зображеннях перетинів ґрунту по трасах проходу спостерігалися межі шарів ґрунту різного

характеру, глибина розташування яких практично збігається з даними, які отримано в наслідок буріння мережі контрольно-вимірювальних свердловин.





На рис. 4.8 наведено радіолокаційне зображення перетину грунту за трасою проходу георадіолокатора скрізь контрольні свердловини. На цьому ж малюнку показані місця розташування свердловин, із зазначенням номера свердловини, глибини і змісту авіаційного гасу в них. Вони показані у вигляді заштрихованих смуг, розташованих на глибинах, відповідних даним вимірювань по цих свердловинах. Передбачувані межі (нижня і верхня) лінзи показані пунктирними лініями. Глибина залягання лінзи 12,5-15,5 м. Глибина розташування і потужність лінзи, отримані за радіолокаційними даними, добре узгоджуються з даними вимірів в свердловинах. На зображеннях видно радіолокаційні відображення від меж шарів, зазначених в табл. 4.2.



Рисунок 4.8 - Радіолокаційне зображення перетину ґрунту за трасою руху георадару скрізь контрольні свердловини

Четверта серія експериментів проводилася на території Генуезької фортеці в м. Судак. Досліджувана територія примикає до кріпосної стіни і займала площу  $200 \times 120 \text{ m}^2$ . Ухили поверхні на різних ділянках становили від 3 до 15 градусів. Територія схилу фортеці схильна до дії зсуву, при якому породи, що утворюють частину схилу, знаходяться в стані граничної рівноваги, а зміщення відбуваються по поверхні, яку можна апроксимувати круглоциліндричною поверхнею.

На рис. 4.8 наведено радіолокаційне зображення перетину ґрунту на ділянці з ухилом близько 15 градусів в напрямку максимального ухилу.



Рисунок 4.8 - Радіолокаційне зображення перетину ґрунту в області максимального ухилу: окружністю виділено область складок шарів зсуву

Аналіз радіолокаційних зображень перетинів ґрунту показав існування двох меж ковзання порід, які складають зсув. Перша зачіпає породи розташовані на глибинах 11-12 м, вона чітко виділяється на всіх радіолокаційних зображеннях перерізів грунту на ділянці зондування. Друга межа розташована на глибинах 7-9 м і виявляється рідше. Найбільш інтенсивно зсувні процеси проходять на ділянках з великими ухилами. По лінії ковзання на цих зображеннях спостерігаються характерні складки порід, викликані зсувним механізмом, що призводить до наповзання верхніх порід на нижні. Глибина на даному малюнку вказана щодо поверхні землі. На зображенні добре видно сліди зсувних процесів у вигляді характерних складок як наслідок зминання порід, які розташовані на глибинах від 7 до 9 м та від 10 до 12 м (межі двох шарів).

## 4.2 Обстеження укосу греблі Дубосарської ГЕС радіолокатором підповерхневого зондування

Основним завданням даного обстеження було визначення локальних зон дамби, що мають розущільнення та підвищення обводнення, й визначення ступеня обводнення ґрунту верхніх шарів дамби [146, 147].

Роботи проводилися з використанням багаточастотного георадару. Діапазон робочих частот: 500-900 МГц. Передбачувана максимальна глибина зондування до 4 м. Роздільна здатність у вертикальному напрямку (глибині): 5-25 см (в залежності від складу ґрунту).

На рис. 4.9 наведено фотографію апаратної частини георадару. На місці обстеження дамби ця конструкція встановлювалася у водонепроникний піддон.



Рисунок - 4.9 - Фотографія георадару

Профіль обстеження дамби відповідав плоскій частині укосу в безпосередній близькості від рівня води. Таке розташування профілю було обрано виходячи з необхідної оцінки ступеня обводнення ґрунту на ділянці контакту з водою та виявлення можливого розущільнення ґрунту дамби, викликаного гідрогеологічним впливом води на ґрунт дамби.

На рис. 4.10 наведено зображення фазової структури відбитого сигналу за трасою руху георадару уздовж укосу дамби на висоті близько 0.3 м щодо рівня води. Уздовж осі ординат вказана глибина в метрах щодо поверхні, по якій рухався георадар, а по осі абсцис – відстань у метрах щодо початку руху. Вимірювання проводилися з кроком 0,4 м.

На зображенні можна виділити дві характерні зони. Перша зона розташовується на глибині близько 1 м на початку профілю (відстань від початку вимірювання близько 120 м) до 1,7-2 м, починаючи з відстані 130 м й до кінця профілю.



Рисунок 4.10. Зображення фазової структури сигналів, відображених підповерхневими неоднорідностями за трасою руху георадару

Грунт на глибину до 1 м вздовж всього профілю характеризується порівняно однорідною структурою, за винятком окремих локальних неоднорідностей. Цей висновок можна зробити на підставі того, що ізолінії

фазового спектра в цій галузі практично є прямими лініями з невеликими флуктуаціями в межах кількох сантиметрів по глибині. Окрема локальна неоднорідність спостерігається на відстані близько 230 м від початку профілю на глибині близько 0,3 м. Її протяжність в горизонтальному напрямку близько 1,0-1,5 м. За характером поведінки ізолінії фазового спектру це може бути область, насичена водою, або об'єкт, що містить включення металу.

При наявності локальної зони розущільнення ґрунту, поблизу кордону водної поверхні та розташованої нижче цього рівня, ця зона повинна бути насичена водою. Якби зазначена неоднорідність розташовувалася б вище рівня водної поверхні, висновок був би однозначний – це об'єкт, що містить включення металу. В даному випадку неоднорідність розташовується практично на рівні водної поверхні, тому можна зробити висновок про те, що зазначена неоднорідність є зоною зниженої щільності ґрунту, яка насичена водою.

На глибині більше 0,7-0,8 м (нижче рівня води) спостерігається кілька неоднорідностей під поверхневої структури ґрунту. По характерним вигинів ізоліній фазового спектру поблизу цих неоднорідностей, можна зробити висновок про те, що всі вони являють собою включення більш щільних, порівняно з навколишнім середовищем, об'єктів (це можуть бути великі камені або шматки бетону).

Також присутній плавний підйом ізолінії фазової структури сигналів, розташованої на глибині близько до 1 м спочатку профілю до 0,8 м до відмітки 270 м за трасою руху георадару. Такий підйом свідчить про плавну зміну фізичних характеристик ґрунту уздовж профілю. Це підтверджує рис. 4.11, на якому наведено радіояскравісне зображення перетину ґрунту уздовж цього профілю, відповідне розподілу ступеня відбиваності радіохвиль від неоднорідностей підповерхневої структури ґрунту. На цьому рисунку видно межу між шарами ґрунту з відмінними фізичними властивостями, яка з'являється на відстані приблизно 170 м від початкової позначки і тягнеться до позначки приблизно 320 м. На рисунку ця межа позначена пунктирною лінією. Так як дамба складається з двох типів ґрунтів – намивних і насипних, то цим можна пояснити зміну фізичних властивостей ґрунту на радіолокаційних зображеннях. Структура ґрунту уздовж профілю руху, починаючи з глибини 1 м, істотно змінюється. Приблизно до позначки 130-150 м вздовж траси руху георадару, на глибинах 1-2,5 м спостерігається менша відстань між ізолініями в зображенні фазового спектра.



Рисунок 4.11 - Радіояскравісне зображення перетину ґрунту за трасою руху георадару

Далі, до кінця профілю, структура цього шару стає більш однорідною, а відстань між ізолініями збільшується. Імовірно, це може внаслідок двох причин. Якщо ґрунт в першій половині відрізняється за своїми фізичними властивостями від ґрунту у другій частині дамби, наприклад, ґрунт у першій частині містить більше глинистих фракцій, то при збільшенні його вологості, його діелектрична проникність і питома провідність будуть більше, що і призведе до того, що у фазовому спектрі відстань між ізолініями зменшитися. При однорідному складі ґрунту вздовж усієї дамби така картина може спостерігатися тільки в тому випадку, якщо ступінь обводнення ґрунту в першій частині дамби буде більше, ніж у другій. Про це також свідчить той факт, що флуктуації ізоліній фазового спектра в цій частині суттєво більше, ніж у другій. Остання обставина свідчить про те, що мають місце обидва ефекту – різний ґрунт і велика ступінь обводнення ґрунту на глибині 1-2,5 м на початку дамби (відстань до 130 м) порівняно з другою її частиною.

На рис. 4.12 наведено фазову структуру радіолокаційних сигналів вздовж траси руху георадару, де області, якы розташовано між ізолініями, затемнены таким чином, що ступінь затемнення обернено пропорційний відстані між ізолініями. Це дозволяє побачити ті області структури дамби, в якій ступінь об'ємної вологості вище за умови однорідності складу ґрунту. Аналіз цього зображення підтверджує висновок про різного ступеня обводнення зазначених вище двох ділянок дамби.



Рисунок 4.12 - Зображення фазової структури сигналів за трасою руху георадару (ступінь затемнення пропорційний об'ємної вологості ґрунту)

Області ґрунту нижче за 1 м в першій половині профілю (до позначки 150 м) і нижче за 2 м – в другій її частині, містять локальні зони з різним рівнем обводнення. Флуктуації ізоліній фазової структури відбитих від цих

зон сигналів перевищують 0.5 м. на окремих ділянках. Це свідчить про коливання об'ємної вологості ґрунту в цих зонах, місцями до повного насичення.

Застосовуючи метод, який описано третьому розділі. було V побудовано розподіл об'ємної вологості по глибині для двох перетинів ґрунту (рис. 4.13). Перший розтин розташовувалося в околиці позначки 110 м від початку траси руху георадару, тобто в зоні більш сильного обводнення грунту на глибині від 1 до 2 м, а другий – в околиці позначки 270 м, в зоні, де збільшення вологості спостерігається нижче 2 м. Криві розподілу вологості по глибині на цьому малюнку побудовано на припущенні про те, що склад ґрунту дамби складається з 30% піску і 70% глини. Це припущення відрізнятися від реальної ситуації. Однак, може якщо процентне співвідношення часток піску і глини буде іншим, хід кривих розподілу вологості буде практично таким же. Відмінності проявиться тільки в тому, що ці криві можуть в цілому зміщуватися по осі ординат вправо або вліво.



Рисунок 4.13. Розподіл об'ємної вологості ґрунту по глибині для двох перетинів ґрунту (1-1 і 2-2) за трасою руху георадару

Таким чином, можна припустити, що ґрунт дамби на глибині близько 1,5 м протягом перших 130 м сильно насичений водою. Невелике зростання об'ємної вологості в шарі до 0,7 м до поверхні, можна пояснити тим, що ґрунт всюди передбачався однаковим, в той час як в реальності верхній шар з фізичного складу може істотно відрізнятися від складу ґрунту нижніх шарах.

Для підтвердження висновку про більшу міру насичення ґрунту водою під укосом дамби на початку траси до позначки приблизно 130 м використовувалася методика, суть якої коротко полягає в наступному. Частини спектру зондуючого сигналу по різному реагують на неоднорідності ґрунту. Наприклад, низькочастотна частина спектру зондуючого сигналу краще "pearyє" на флуктуації вологості в шарах ґрунту, але менш "чутлива" до окремих локальних неоднорідностей.

На рис. 4.14 наведено зображення фазової структури відбитих сигналів за трасою руху георадару, яке відповідне низькочастотній частині спектру зондуючого сигналу.



Рисунок 4.14. Зображення фазової структури сигналів за трасою руху георадару, що відповідне низькочастотній частині спектру зондуючого

На рисунку помітно сильні флуктуації ізоліній на глибині нижче 1,5 м до відмітки 130 м, які досягають величин 0,5 м. Це є наслідком значних флуктуацій об'ємної вологості ґрунту на порівняно невеликих відстанях, що не перевищують у деяких випадках 3-4 м.

На цьому ж рисунку видно ту ж неоднорідність ґрунту на глибині близько 0,3 м на позначці близько 230 м, про яку згадувалося вище. Це говорить про те, що ця неоднорідність має розміри співмірні з довжиною радіохвилі або кратна їй, так як вона добре проглядається у всіх частинах спектру зондуючого сигналу.

Таким чином, в наслідок проведеного георадарного зондування правобережного укосу греблі Дубосарської ГЕС можна зробити наступні висновки:

1. Підповерхнева структура ґрунту укосу дамби до глибини 1-2 м є в цілому однорідною без істотних порушень її цілісності.

2. Наявність пустот, безпосередньо під плитами укосу дамби методом підповерхневого зондування, не виявлено.

3. Виявлена неоднорідність ґрунту на глибині 0,3 м на відстані приблизно 225 м від початку траси руху георадару. Ця неоднорідність імовірно є зоною невеликого розущільнення ґрунту, яка нижче по глибині насичена водою.

4. На глибині більше 1 м за трасою руху георадару спостерігається велика кількість неоднорідностей ґрунту, обумовлених різним ступенем насичення водою окремих локальних зон, що мають просторові розміри від 1 до 10 м.

4.3 Застосування радіолокатора підповерхневого зондування для пошуку закопаних у ґрунт макетів мін

На даний час, основним радіотехнічним засобом, що використовуваеться для дистанційного пошуку мін (протипіхотних та інших), є міношукач. Проте їм можна виявити тільки ті міни, які мають металеву оболонку. Міни, що мають неметалеву оболонку або без оболонки подібним міношукачем виявити не можна [149-151]. Одним з актуальних напрямків у георадіолокації є дослідження по застосуванню георадара для пошуку мін [10, 149-155]. У процесі виявлення мін міношукачем, сапер може перебувати в безпосередній близькості від передбачуваного місця їх установки, що являє собою загрозу його життю при їх дистанційному управлінні або застосування спеціальних датчиків підриву. Тому представляє інтерес пошук мін на більш безпечній відстані [156-159]. Дослідження по застосуванню георадару для виявлення макетів металевих і неметалевих мін як на близький (до 1 м), так і більшій відстані (до 12 м), проводилися нами протягом низки років [127, 160, 161].

Для проведення досліджень було обрано частотний діапазон 500-2000 МГц. Вибір цього діапазону було зроблено виходячи 3 передбачуваних лінійних розмірів мін (10-30 см) [10, 155] та глибини їх (до 30 см) [155, 162] установлення та передбачуваних електричних характеристик грунту [10, 156].

На першому етапі був створений макет багаточастотного георадару з такими технічними характеристиками [127, 129]:

- 1. діапазон робочих частот 500-900 МГц;
- 2. випромінювана потужність 0,5 Вт;
- 3. коефіцієнт шуму вхідного підсилювача 1,9 Дб.

Структурна схема макета георадару відповідає структурній схемі яка наведена на рис.2.2.

Приймальна та передавальна антени георадару являють собою магнітну щілинну антену [160], яку створено на основі патенту [163]. Схематично антену наведено на рис. 4.14. Фотографію антени наведено на рис. 4.15.

Запропонована антена дозволяє випромінювати та приймати сигнали в ортогональних поляризаціях, при цьому фазові центри антен суміщені, що

виключає появу додаткових фазових спотворень сигналів за рахунок різних шляхів поширення радіохвиль.



Рисунок 4.14 - Щілинна магнітна антена



Рисунок 4.15 - Фотографія щілинної магнітної антени (вид зверху)

Конструктивно антену зроблено у вигляді металевого резонатора, в площині якого, зверненої до поверхні землі, прорізано дві щілини, які утворено чотирма пелюстками й поверхнею резонатора. Розв'язка між цими двома каналами становить понад 25 дБ. Конфігурація цих щілин схематично наведено на рис. 4.14.

Пелюстки антени 1-4 розташовано на нижній поверхні антени. Попарне з'єднання пелюсток 1-го з 2-м і 3-го з 4-м в місцях, які позначено точками, утворює випромінюючу щілину 6-8.

Аналогічно з попереднім, маємо з'єднання пелюсток 1-го з 4-м і 2-го з 3-м, що утворює щілину 5-7, яка перпендикулярна щілини 6-8. Резонатор антени утворено верхнім екрануючим коробом кругової циліндричної форми 9. Антенна система працює наступним чином. Зовнішній перемикаючий пристрій, який реалізовано на p-i-n-діодах, по черзі замикає пелюстки в поєднаннях, описаних вище. На рис. 4.16 наведено фотографію антени в робочому положенні у складі вимірювального стенду.



Рисунок 4.16 - Фотографія антени у робочому положенні при випробуваннях на вимірювальному стенді

Управління перемикаючим пристроєм здійснюється сигналами, що блоку управління. Застосування однієї приймальнонадходять 3 передавальної антени з електронним перемиканням поляризації на 90° дає випромінювати та приймати сигнали можливість на ортогональних поляризаціях (здійснювати поляризаційну селекцію), що істотно розширює можливості виявлення та розпізнавання невеликих об'єктів на тлі сигналів, повітря-ґрунт. відбитих від меж розділу Випробування георадара проводилося В лабораторних умовах 3 використанням спеціально виготовленого стенду. Стенд складався з діелектричного короби розміром 2,5×1,5 м, який був наповнений піском на висоту близько 1 м, та з механічної системи для переміщення георадару у двох взаємно перпендикулярних напрямках над поверхнею піску. На дні короба, під піском, було розташовано СВЧ поглинач.

На рис. 4.17 наведено радіолокаційні зображення невеликого симетричного об'єкту (металева банка об'ємом близько 0,5 дм<sup>3</sup>, яка вміщена на глибину 50 см), які отримано з двох ортогональних поляризацій випромінювання та прийому. Зображення отримано після застосування двовимірного синтезу апертури антени уздовж руху георадара і заглушення відбиття від оточуючих неоднорідностей структури ґрунту (піску).

Невелике зміщення зображень уздовж дистанції є наслідком відхилення діаграми спрямованості антени з-за відмінності паразитних ємностей поляризаційного комутатора.



Рисунок 4.17. Радіолокаційні зображення металевого об'єкта у двох ортогональних поляризаціях випромінювання та прийому: а) вектор поляризації спрямовано під кутом 45° до дистанції; б) вектор поляризації спрямовано під кутом –45° до дистанції; хрестиком позначено дійсне положення об'єкта

Наступним кроком була установка усіх вузлів георадару в екрануючий металевий короб. Фотографію конструкції наведено на рис. 4.18.

Це було зроблено для запобігання потрапляння паразитного випромінювання від високочастотних вузлів на вхід антени. Було змінено і виконання антени на прямокутну конструкцію. Всі вузли було закріплено на бічних стінках георадару для зручності налаштування. Антену було розташовано знизу, таким чином, що її задня стінка входить до загальної конструкції екрана. Зовні розташовано блок управління та технологічні кріплення.



Рисунок 4.18 - Фотографія макета георадару під час налаштування

На Рис. 4.19. наведено загальний вигляд вимірювальної установки. Конструкція в зборі було розташовано на тягах з таким розрахунком, щоб нижня площина антени знаходилася над піском на висоті 3-5 см. Вгорі тяги закріплено на пристрої, що складається з двох візків, що дозволяє переміщати георадар над всією поверхнею піску. Пісок в коробі може бути насичено водою до глибини 5-10 см для імітації зміни вологості ґрунту з-за дощу.

Макету мін являв собою діелектричний кубик з плексигласу розміром 15×7 см і металева банка розміром заввишки 10 см і діаметром 8 см. Ці два об'єкти було закопано на глибину 25-30 см від межі поділу повітря-пісок на відстані ≈ 50 см один від одного.



Рисунок 4.19 - Загальний вигляд вимірювальної установки

Конструкцію у зборі було розташовано на тягах з таким розрахунком, щоб нижня площина антени знаходилася над піском на висоті 3-5 см. Вгорі тяги закріплено на пристрої, що складається з двох візків, що дозволяє переміщати георадар над всією поверхнею піску. Пісок в коробі може бути насичено водою до глибини 5-10 см для імітації зміни вологості ґрунту з-за дощу.

Результати зондування наведено на рис. 4.20 та 4.21. На відміну від "радіояскравісного" зображення (рис. 4.20), представлення результатів зондування у вигляді фазової структури відбитих зондуючих сигналів (рис. 4.21) дозволяє зробити припущення про електричні властивості закопаних об'єктів.



Рисунок 4.20 - Зображення діелектричного та металевого об'єктів

На рис. 4.21. наведено зображення фазової структури сигналу вздовж площини, в якій розташовані закопані об'єкти. В області, де розташовано діелектричний об'єкт, ізолінії зігнуті вниз, так як навколишнє середовище має відносну діелектричну проникність і питому провідність більше, ніж зазначений об'єкт.

Навколо металевого об'єкта ці ж ізолінії відхиляються вгору, що свідчить про те, що питома провідність об'єкта істотно вище навколишнього середовища. Ступінь кривизни залежить від взаємного розташування антени георадара і власне, об'єктів.

Таким чином, показано, що застосування фазової структури сигналу дозволяє розпізнавати як металеві, так і діелектричні об'єкти (наприклад, макети мін), що знаходяться під поверхнею ґрунту.



Рисунок 4.21 - Зображення фазової структури сигналу по трасі руху георадару, що перетинає два підповерхневих об'єкта

Надалі було розроблено та виготовлено макет геоградару, що працює у діапазоні 1,2-1,8 ГГц [161]. Метою роботи було визначення можливості застосування георадару для дистанційного виявлення встановлених під поверхнею ґрунту макетів мін.

Спочатку було проведено випробування георадару у вимірювальному стенді (Рис. 4.22). Поряд з ящиком, в якому був пісок, було встановлено раму з направляючою, уздовж якої переміщався георадар. Макет міни являв собою металевий циліндр діаметром 30 см і товщиною 4 см.

Приймальна та передавальна антени являти собою пірамідальні рупорні антени з подвійним ригелем. Робочий діапазон використовуваних антен – 0,5-3,0 ГГц, при КСХ ≤ 2,0.



Рисунок 4.22 - Фотографія вимірювального стенду

При обробці результатів зондування було застосовано синтез апертур антен [173]. На рис. 4.23 наведено зображення після процедури синтезу антени. Ціль помітно на відстані близько 1,2 м, що відповідає її реальному місцю розташування.



Рисунок 4.23 - Розташування цілі після процедури синтезу антени

Польове випробування георадару проводилося на великій піщаній ділянці (берегова лінія річки) [170]. Для цього було застосовано спеціальну платформу, на яку було встановлено візок, що дозволяє переміщати георадар уздовж напрямної. У конструкції георадару було застосовано механізм, що дозволяє змінювати кут нахилу антен. Відстань переміщення становило 1,5 м, крок переміщення 5 см. Для дослідження впливу кута опромінення на виявлення об'єктів було використовано дві різні висоти (близько 1 м і 2 м) антен над поверхнею ґрунту.

Макети мін являють собою металевий та діелектричний циліндри діаметром близько 30 см і висотою 4 см. Глибина установки – 30 см.

Для визначення закопаного макета металевої міни на віддаленій відстані від антен, було застосовано спеціальна техніка для збільшення дозволу по азимуту. Після закінчення руху каретки з антенами вся механічна система рухалася вздовж напрямку руху, так що початок наступних вимірювань співпало з кінцем попереднього. Це дозволилило збільшити до трьох разів розміри синтезованої антенної решітки. На рис. 4.24 наведено загальний вигляд георадару на платформі.



Рисунок 4.24 - Загальний вигляд георадару на платформі

На рис. 4.25 наведено фотографія макетів мін.



Рисунок 4.25 - Фотографія макетів мін

Відновлені зображення зондованої ділянки після процедури синтезу антени для двох висот антен наведено на рис. 4.26.



Рисунок 4.26 - Зображення зондованої ділянки: (a) – висота установки антен 1 м; (б) – висота установки антен 2 м.

На рис. 4.27 наведено результат виявлення закопаного на глибину 15 см металевого макета (на відстані близько 13 м від апертури антени).



Рисунок 4.27 - Высота установки 2 м. Макети мін закопані на відстані 12,5 - 13 м

Також на рис. 4.27 помітно відбиття від невеликої канавки, що розташовано на межі між піском та суглинком.

## Висновки до розділу 4

1. Для визначення рівня ґрунтових вод і картографування територій забруднених нафтопродуктами, було застосовано багаточастотний георадар, що працює в діапазоні 100-450МГц. Отримано георадіолокаційні дані про глибину зони аерації, рівень ґрунтових вод і нафтопродуктів, що відповідають даним, отриманим за допомогою контрольно-вимірювальних свердловин.

2. Для визначення ступеня обводнення верхніх шарів ґрунту річкової дамби, було застосовано багаточастотний георадар, що працює у діапазоні 500-900 МГц. Візуалізацію отриманих результатів зондування було представлено у вигляді фазової структури відбитих сигналів за трасою руху георадару вздовж укосу греблі. Дане представлення результатів цього георадиолокационного зондування дозволило визначити ділянки розущільнення ґрунту дамби, які було викликано гідрологічним впливом води.

3. Було проведено експерименти по застосуванню георадару для пошуку закопаних у ґрунт макетів металевих і пластикових мін з використанням двох багаточастотних георадарів, що працюють, відповідно, перший у 500-900 МГц, другий у 1200-1800 МГц діапазонах частот. По дослідження результатам доведено. ЩО представлення результатів зондування у вигляді фазової структури відбитих зондувальних сигналів, дозволяє виявити місце, де було закопано макети мін та зробити припущення про тип закопаних макетів мін (метал або пластик). Застосування спеціальної антени, що дозволяє працювати в ортогональних поляризаціях, розширює можливості георадару з виявлення макетів мін на тлі сигналів, відбитих від неоднорідностей на кордоні повітря-ґрунт. При визначенні можливості з застосування георадара, що працює в діапазоні 1200-1800 МГц для дистанційного виявлення макетів мін, було отримано наступні значення відстані "георадар – місце установки мін": для пластикового макета міни – 3,0 м; для металевого – 12,5 м.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи запропоновано новий метод обробки та інтерпретації результатів підповерхневого радіозондування в умовах слабкої радіолокаційної контрастності розрізу грунту та частотної дисперсії діелектричної проникності ґрунту. Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Запропоновано використовувати залежність фазової структури зондуючих відбитих радіосигналів від фізичних характеристик підповерхневої структури ґрунту та окремих неоднорідностей, що дозволило діагностувати плавні фізичні зміни, зокрема зміну об'ємної вологості, в підповерхневій структурі ґрунту.

2. За результатами проведених георадарних зондувань було скориговано математичну модель електричних характеристик грунту, що враховує частотну дисперсію його діелектричної проникності.

3. Для діагностики фізичних змін в підповерхневій структурі ґрунту, зокрема, розподілу об'ємної вологості по глибині, розроблено ітераційний метод відновлення фізичних характеристик ґрунту, в якому при обробці результатів підповерхневого зондування застосовується скоригована модель електричних характеристик ґрунту, а також залежність між фазовою структурою відбитого радіосигналу і фізичними характеристиками підповерхневої структури ґрунту.

4. Розроблено і виготовлено макети багаточастотних георадарів метрового і дециметрового діапазонів частот, в яких реалізовано можливості вимірювання фазочастотної характеристики відбитих сигналів.

5. Експериментально підтверджено, що багаточастотне когерентне радіозондування підповерхневого середовища бути може ефективно використовано для моніторингу та картографуванні рівня ґрунтових вод у пілтоплення ділянок підповерхневого забруднення зонах та пошуку закопаних макетів мін. нафтопродуктами, а так само, для

Застосування запропонованого методу визначення фізичної структури розрізу ґрунту дозволяє визначати розподіл об'ємної вологості по глибині в умовах плавної зміни фізичних характеристик ґрунту, відповідно, і слабкої радіолокаційної контрастності. В рамках тематичних та госпдоговірних НДР було проведено серію лабораторних та польових експериментів з підповерхневого зондування із застосуванням експериментальних моделей георадарів, в яких використовується багаточастотний когерентний зондуючий сигнал із ступінчастою зміною несучої частоти в діапазонах: 100-450 МГц, 500-900 МГц, 1200-1800 МГц.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Knödel K., Lange G., Voig H.J. Environmental Geology. – Springer, 2007. – 1357p.

2. Milsom J., Eriksen A. Field Geophysics 4nd Edition. – Wiley, 2011. – 287p.

 Everett M.E. Near-Surface Applied Geophysics. – Cambridge University Press, 2013. – 403p.

4. Reynolds J.M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics 2<sup>nd</sup> Edition. – Wiley-Blackwell, 2011. – 696p.

5. Benedetto A., Pajewski L. Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar. – Springer, 2015. – 371p.

6. Нурмагамбетов А., Кульдеев Е.И. Инженерная геофизика: Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ, 2012. – 212с.

7. Olhoeft G.R. Applications and Frustrations in Using Ground Penetrating Radar // IEEE AESS Systems Magazine. – 2002. – Vol.17, №2. – P.12–20.

8. Yelf R.J. Application of Ground Penetrating Radar to Civil and Geotechnical Engineering // Electromagnetic Phenomena. – 2007. – Vol.7, №1. – P.102–117.

9. Slob E., Sato M., Olhoeft G. Surface and borehole ground-penetratingradar developments // Geophysics. – 2010. –Vol.75, №5. – P.103–120.

10. Furuta K., Ishikawa J. Anti-personnel Landmine Detection for Humanitarian Demining. – Springer, 2009. – 211p.

11. Coniers L.B. Ground-Penetrating Radar for Geoarchaeology. – Wiley-Blackwell, 2016. – 147p.

Goodman D., Piro S. GPR Remote Sensing in Archaeology. – Springer,
2013. – 233p.

 Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. – М.: Издательство МГУ, 2004. –153с. 14. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. – М.: Недра, 1986. – 128с.

Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И.
Карпухин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин; – Под ред. М.И. Финкельштейна. –
М.: Радио и связь, 1994. – 216с.

Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. –
2-е изд. – М.: Радио и связь, 1983. – 536с.

17. Шутко А.М. СВЧ – радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М.: Наука, 1986. – 196с.

18. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации. – М.: Горная книга, 2008. – 196с.

19. Davis J.L., Annan A.P. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy // Geophysical Prospecting. – 1989. – Vol.37, N $\circ$ 5. – P.531–551.

20. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416с.

21. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования // А.Е. Резников, В.В. Копейкин, П.А. Морозов и др. – Успехи физических наук. – 2000. – Т.170, №5. – С.565–568.

22. Cook J.C. Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks // Geophysics. – 1975. – Vol.40, №5. – P.865–885.

23. Annan A.P. GPR – History, Trends, and Future Developments // Subsurface Sensing Technologies and Applications.–2002.–Vol.3, №4. – P.253–269.

24. Yelf R., Yelf D., Waleed Al-Nuaimy. Classification System for Ground Penetrating Radar Parameters // Electromagnetic Phenomena. – 2007. – Vol.7, №1. – P.150–157.
25. Обзор технических реализаций систем радиолокационного обнаружения объектов в приповерхностном слое ґрунта // Туров В.Е., Селянская Е.А., Киселева Ю.В., Полубехин А.И., Ильин Е.М. – Вестник СибГУТИ. – 2016. – №3. – С.155–163.

26. Воскресенский Д.И., Гринев А.Ю. Радары подповерхностного зондирования: современное состояние, проблемы, тенденции развития // 12th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2002). – IEEE Catalog Number: 02EX570, 2002. – C.9–12.

27. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. – М.: Советское радио, 1977. – 176 с.

28. Annan A.P. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. – Sensors & Software Inc., 2003. – 278p.

29. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar – 2<sup>nd</sup> Edition. – The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2004. – 734 p.

30. Ground Penetrating Radar Theory and Application / Edited by H.M. Jol.– Elsevier Science, 2009. – 524p.

31. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика. Учебник для вузов – М.: Недра, 1991.–368с.

32. Петрофизика. Учебник для вузов / Г.С. Вахромеев, Л.Я. Ерофеев,
В.С. Канайкин, Г.Г. Номоконова; – Под редакцией Г.С. Вахромеева.–Томск.:
Издательство Томского университета, 1997.– 462с.

33. Hillel D. Environmental Soil Phisics. – Academic Press, 1998. – 801p.

34. Hilhorst M.A. Dielectric Characterisation of Soil. – Publication of the DLO Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Wageningen, The Nitherlands. – 1998. – P.154.

35. Pochanin G. Some Advances in UWB GPR / G. Pochanin // Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. – Springer Netherlands. – 2009. – P.222 – 233.

36. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying / Pochanin G. P., Masalov S. A., Ruban V. P. et al. // Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. – CRC Press - Taylor & Francis Group, London. – 2016. – P.20–65.

37. Eisenburger D., Damm V., Jenett M., Lentz H // Helicopter-borne GPR system for geological application, a comparison between puls radar and stepped-frequency radar. Poster, Workshop Naples, Italy 20/21 September 2001

Ахадов А.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. – М.:
 Издательство стандартов, 1972. – 412с.

39. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – Пущино. ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515с.

40. Аузин А.А., Зацепин С.А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов георадиолокации) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2015. – №4. – С. 122–127.

41. Челидзе Т.Л. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем/ Челидзе Т.Л., Деревянко А.И., Куриленко О.Д. – К.: Наукова думка, 1977. – 231с.

42. Губкин А.Н. Физика диэлектриков. Теория диэлектрической поляризации в постоянном и переменном электрическом поле. Том первый. – М.: Высшая школа, 1971. – 272с.

43. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 439с.

44. Корицкий Ю.В. Основы физики диэлектриков. – М.: Энергия, 1979.– 248с.

45. Nelson S.O. Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications. – Academic Press, 2015. – P.292.

46. Raji G.G. Dielectrics in Electric Fields. – Marcel Dekker, Inc., 2003. – P.581.

47. Поплавко Ю.М. Физика диэлектриков. – К.: Вища школа, 1980.– 400с. 48. Малышкина И.А. Основы метода диэлектрической спектроскопии:
 Учебное пособие. – М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 80с.

49. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии. Учебное пособие. – Казань: Физический факультет КГУ, 2008. – 112с.

50. Физическое материаловедение: в 2 ч. Ч 1. Пассивные диэлектрики: учебное пособие/ В.И. Томилин, Н.П. Томилина, В.А. Бахтина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 280с.

51. Wagner N., Kupfer K., Trinks E. A broadband dielectric spectroscopy study of the relaxation behaviour of subsoil // ISEMA 2007, Proceedings of the 7th International Conference on Electromagnetic. -2007. - P.1-8.

52. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых: Справочник геофизика / Под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455с.

53. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №9. – С.79-85.

54. Боярский Д.А., Тихонов В.В. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв. – М.: Ротапринт ИКИ РАН. – 2003. – 48с.

55. Вода в дисперсных системах / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко и др. – М.: Химия, 1989. – 288с.

56. Remke L. van Dam, Brian Borchers, Jan M.H. Hendrickx. Methods for prediction of soil dielectric properties: a review // Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2005. – V.5794, Issue Part I. – P.188 – 197.

57. Behari J. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soils.-Springer, 2005.-176p.

58. Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic Detection of Soil Moisture: Progress Report // Canadian Journal of Remote Sensing.-1977.-Vol.3, №1.-P.77-86.

59. Saarenketo T. Electrical properties of water in clay and silty soils // Journal of Applied Geophysics. – 1998. – Vol.40. – P.73–88.

60. Le T.M., Fatahi B., Khabbaz H. Viscous Behaviour of Soft Clay and Inducing Factors // Geotechnical and Geological Engineering. -2012. -Vol.30, No.5. -P.1069-1083.

61. Соколов В.Н. Глинистые породы и их свойства // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т.6, №9. – С.59–65.

62. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. Академика Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1989. – 211с.

63. Овчаренко Ф.Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. –
К.: Изд-во АН УССР, 1961. – 275с.

64. Kirsch R. Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology. Second Edition. – Springer, 2009. – P.548.

65. Powers M.H. Modeling frequency-dependent GPR // The Leading Edge. -1997. - Vol.16, №11. - P.1657-1662.

66. Шуваев А.Н., Гензе Д.А. Диэлектрическая проницаемость ґрунтов нарушенной структуры // Вестник ТГАСУ. – 2011. – №1. – С.200–206.

67. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments a combined permittivity and conductivity model // M. Loewer, T. Gunther, J. Igel et al. – Geophys. J. Int. – 2017. – Vol.210. – P.1360–1373.

68. Cihlar J., Ulaby F.T. Dielectric Properties of Soils as a Function of Moisture Content. – The University of Kansas Space Technology Center, 1974. – P.68.

69. Wobschall D. A Theory of the Complex Dielectric Permittivity of Soil Containing Water: The Semidisperse Model // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. – 1977. – Vol.15, №1. – P.49–58.

70. Loor G.P. Dielectric Properties of Heterogeneous Mixtures Containing Water // Journal of Microwave Power. - 1968. - Vol.3, №3. - P.67-73.

71. Wagner N., Kupher K., Trinks E. A broadband dielectric spectroscopy study of the relaxation behaviour of subsoil // Proceedings of the 7th International

Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, ISEMA. – 2007. – P.1–8.

72. High Dielectric Constant Microwave Probes for Sensing Soil Moisture // Birchak J.R., Gardner C.G., Hipp J.E. et al. – Proceeding of the IEEE. – 1974. – Vol.62, №1. – P.93-98.

73. Родионова О.В. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвоґрунтов в широкой полосе частот: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01:04:03 / Омск, 2016. – 136с.

74. Tuncer E. Gubanski S.M. Dielectric relaxation in dielectric mixtures: Application of the finite element method and its comparison with dielectric mixture formulas // Journal of Applied Physics. – 2001. – Vol.89, №12. – P.8092– 8100.

75. Mohamed A.M.O. Principles and Applications of Time Domain Electrometry in Geoenvironmental Engineering. – Taylor & Francis, 2006. – 622p.

76. Sihvola A.H. How Strict are Theoretical Bounds for Dielectric Properties of Mixtures? // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2002. –Vol.40, №4. – P.880–886.

77. Исследование диэлектрических моделей для определения диэлектрической проницаемости связанной воды в грунтах // Т.А. Беляева, А.П. Бобров, П.П. Бобров и др. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – В.2, Т.5. – С.237–242.

78. Reynolds J.A., Hough J.M. Formulae for Dielectric Constant of Mixtures // Proceedings of the Phisical Society. – 1957. – vol. 70, Section B. – P. 769 – 775.

79. Емец Ю.П. Дисперсия диэлектрической проницаемости двухкомпонентных сред // ЖЭТФ. – 2002. – т. 121, вып. 6. – С. 1339 – 1351.

80. Емец Ю.П. Дисперсия диэлектрической проницаемости трех- и четырехкомпонентных матричных сред // ЖТФ. – 2003. – т.73, вып. 3. – С. 42 – 53.

81. Knoll M.D. A Petrophysical Basis for Ground Penetrating Radar and Very Early Time Electromagnetics: Electrical Properties of Sand-Clay Mixtures. – The University of British Columbia, 1996. – 331p.

82. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic Determination of SoilWater Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines // Water Resources Research. – 1980. –Vol.16, №3. – P.574–582.

83. Calibration of Time Domain for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach // Roth K., Schulin R., Fluher H. et al. –Water Resources Reseach. – 1990. – Vol.26, №10. – P.2267–2273.

84. Olhoeft G.R., Strangway D.W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon // Earth and Planetary Science Letters. – 1975. – Vol.24, №3. – P.394–404.

85. Wang J.R., Schmugge T.J. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. -1980. - Vol. GE-18, No. -P.288-295.

86. Hasted J.B. Aqueous Dielectrics. – Chapman and Hall. – 1973. – 302p.

87. Kenyon W.E. Texture effects on megahertz dielectric properties of calcite rock samples // Journal of Applied Physics. -1984. - Vol.55, No. - P.3153–3159.

88. Electromagnetic Propagation Logging: Advances in Technique and Interpretation // Wharton R.P., Hazen G.A., Rau R.N. et al. – SPE-9267-MS. – 1980. – 12p.

89. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil - Part II: Dielectric Mixing Models // Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T. et al. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.-1985.-Vol. Ge-23, №1.-P.35-46.

90. Dirksen C., Dasberg S. Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil Water Content Measurements // Soil Science Society of America Journal. – 1993. – Vol.57, №3. – P.660–667. 91. Лещанский Ю.И., Ульянычев Н.В. Расчет электрических параметров песчано - глинистых ґрунтов на метровых – сантиметровых волнах // Изв. Вузов Радиофизика. – 1980. – Т.ХХІІІ, №5. – С.529–532.

92. Лещанский Ю.И. Георадиолокация и одностороннее радиопросвечивание ґрунтов и сред с поглощением: Автореферат диссертации па соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.04 / Моск. гос. тех. унив. гр. авиации. – М., 1998. – 48с.

93. Овчинкин О. А., Сугак В.Г. Влияние электрических свойств грунта на характеристики сигнала при подповерхностном зондировании // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2001. – 6, № 2–3. – С. 235–241.

94. Блюсс Б.А., Никифорова Н.А., Витушко О.В. Электрокинетические явления при фильтрации жидкости в горных породах // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок. – 2012–2013. – Вип. 106-107. – С. 167-173. – Режим доступу: <u>http://nbuv.gov.ua</u>

95. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И. Механика грунтов: Учебник. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2009. – 264с.

96. Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Y. Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave sensing // Progress In Electromagnetics Research. – 2002. – Vol. 35. – P.251-269.

97. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil- Part I: Empirical Models and Experimental Observations // Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C. et al. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.-1985.-Vol. Ge-23, №1.-P.25-34.

98. Loor G.P. The Dielectric Properties of Wet Materials // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.-1983.-Vol. Ge-21, №3.-P.364-369.

99. Диэлектрическая релаксация в глинистых нефтесодержащих породах // М.И. Эпов, П.П. Бобров, В.Л. Миронов и др. – Геология и геофизика, 2011. – Т.52, №9. – С.1302–1309.

100. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0.05 – 16 ГГц // М.И. Эпов, В.Л. Миронов, П.П. Бобров и др. – Геология и геофизика, 2009. – Т.50, №5. – С.613–618.

101. Миронов В.Л., Бобров П.П., Кондратьева О.В., Репин А.В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости различных форм почвенной влаги в микроволновом диапазоне //Российская научная конференция «Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой», Улан-Удэ, 06.09- 10.09.2010, Электронный сборник докладов, С. 344-355.

102. Ultra-wideband radar technology / edited by J. D. Taylor. – CRC Press LLC. – 2001. – 422p.

103. Jankiraman M. Design of Multi-Frequency CW Radars. – SciTech Publishing Inc. – 2007. – 350p.

104. Nguyen C., Park J. Stepped-frequency radar Sensors.–Springer, 2016.– 129p.

105. Wehner D.R. Higt-Resolution Radar.– Artech House, 1995.–593p.

106. Sheer J.A., Kurtz J.L. Coherent Radar Performance Estimation.– Artech House.–1993.–445p.

107. Levanov N., Mozeson E. Radars Signals. – Wiley. – 2004. – 411p.

108. High resolution GPR and its experimental study // H. Ling, Z. Zhaofa, W. Munan et al.–Applied Geophysics.–2007.–Vol.4, №4.–P.301–307.

109. Seyfried D., Schoebel J. Stepped-frequency radar signal processing // Journal of Applied Geophysics.-2015.-Vol.112.-P.42-51.

110. Langman A. The Design of Hardware and Signal Processing for a Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar, Ph.D. Dissertation.–University of Cape Town.–2002.–195p.

111. Farquharson G., Langman A., Inggs M.R. A 50-800MHz Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar // Communications and Signal Processing. – 1998. – Proceedings of the 1998 South African Symposium.– P.455-460. 112. Noon D.A. Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Ground Penetrating Radar Performance, Ph.D. Dissertation.–The University of Queensland.–1996.–180p.

113. Особенности обработки сигналов в георадаре со ступенчатым изменением несущей частоты зондирующего сигнала // А.В. Сугак, А.А. Зеленский, А.В. Тоцкий и др. – Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2010. – №4(45). – С.7–15.

114. Step-frequency radar // K. Iizuka, A.P. Freundorfer, K.H. Wu et al. – Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol.56, №9. – P.2572–2583.

115. Iizuka K., Freundorfer A.P. Detection of Nonmetallic Buried Objects by a Step Frequency Radar // PROCEEDINGS OF THE IEEE.–1983.–Vol.71, №2.–P.276–279.

116. Measurement of Saline Ice Thickness Using a Step Frequency Radar // K. Iizuka, A.P. Freundorfer, D. Wilson et al.– Cold Regions Science and Technology.–1988.–Vol.15.–P.23–32.

117. Iizuka K., Fujii S. Neural-network laser radar // Applied Optics.–1994.– Vol. 33, № 13.–P.2492–2501.

118. Optical step frequency reflectometer // K. Iizuka, Y. Imai, A.P. Freundorfer et al.–Journal of Applied Physics.–1990.–Vol. 68, №3.–P.932–936.

119. K. Iizuka, A.P. Freundorfer, T. Jwasaki. A Method of Clutter Cancellation for an Underground CW Radar // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.–1989.–Vol. 31, №3.–P.330–332.

120. Сугак В.Г. Особенности обработки сигналов при подповерхностном радиолокационном зондировании в диспергирующей среде // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. - Харьков, 2006.- Т.11, №3.- С.385-392.

121. Сугак В.Г., Кузьмин В.В., Куранов Н.П. Восстановление электрических характеристик слоев грунта и глубины залегания их границ по результатам радиолокационного подповерхностного зондирования //

Проблемы инженерной геоэкологии (ДАР/ВОДГЕО).– Вып. 4, –М.: 2002.– С. 50 – 60.

122. Сугак В.Г., Овчинкин О.А., Сугак А.В. Интерпретация результатов георадиолокационного подповерхностного зондирования в условиях отсутствия априорных данных // Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков.- 2006.– Т.11, №1.– С. 78 – 86.

123. Sugak V.G. Reconstruction of Electrical Constants of Soil and Depth of Subsurface Objects Using Data of Subsurface Sounding // Telecommunications and Radio Engineering.- 2003. – Vol.59, No.1&2.– P. 54 – 63.

124. Сугак Владимир Григорьевич. Георадарное зондирование зоны аэрации : дис... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03 / НАН Украины; Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова. — Х., 2007. — 364с.

125. Sugak V.G., Sugak A.V. Phase Spectrum of Signals in Ground-Penetrating Radar Applications // IEEE TGRS. – 2010. – Vol.48, №4. – P.1760– 1767.

126. Sugak V.G., Sugak A.V. Gpr signal phase structure aplication for estimation of distribution of soil electrical properties on depth// MSMW'2010 Proceedings. - Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – IEEE Catalog Number: CFP10780-CDR. – ISBN: 978 1-4244-7898-9.

127. Sugak V.G., Bukin A. V., Sugak A.V. SFCW GPR Sensor with Phase Processing for Buried Small Objects Detection and Recognition // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol.74, №19. – P.1755–1766.

128. Duc A.N., Phu B.H. A Detail Design and Evaluation of Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar Systems // International Journal of Research in Wireless Systems.–2014.–Vol. 3, №1.–P.1–8.

129. Сугак В. Г., Букин А. В. Васильева Е.Н., Овчинкин О. А., Силаев Ю. С., Тарнавський Е.Ф., Педенко Ю.А., Бормотов В. Н., Сугак А. В. Радиолокатор со ступенчатым изменением частоты для обнаружения и

распознавания малогабаритных объектов под поверхностью Земли // Радиофизика и электроника. – 2010. – т.15, №3.- С. 92 - 97.

130. Hua Y., Sarkar T. K. Generalized pencil-of-functions method for extracting the poles of electromagnetic System from its transient response // IEEE Trans, of Antennas and Propagat.- 1989. - Vol. 37.- P. 229 – 234.

131. Hauschild T. and Menke F. Using the GPOF Algorithm in Ground Penetrating Radar Systems//Proc. IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. (IGARSS'99) Hamburg (Germany). – 1999.

132. Гринев А.Ю., Зайкин А.Е., Чебаков И.А. Восстановление электрофизических параметров сред методом вычислительной диагностики в задачах подповерхностного мониторинга // Вестн. Моск. авиац. ин-та. - 2000. - Т.7, № 2. - С. 75 - 82.

133. Гринев А.Ю., Ильинский А.С., Воронин Е.Н. Восстановление характеристик объектов в неоднородной среде с использованием видеоимпульсных сигналов и синтезирования апертуры // Electromag. and Light Scatter: Theory and Appl.: Proc. 1 Workshop, Moscow.- 1997. - С. 30 - 32.

134. Liu Z. Li J. Implementation of the RELAX algorithm // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System. – 1998. – vol. 34, № 2. – P. 63–89.

135. Кожан Е.А., Сугак В.Г., Сугак А.В. Георадарное зондирование подповерхностной структуры ґрунта Национального заповедника "София-Киевская" на территории Кирилловской церкви // Геофизический журнал. – 2010. – Т. 32, № 3. – С. 43–49.

136. Сугак В. Г. Особенности обработки сигналов при подповерхностном радиолокационном зондировании в диспергирующей среде // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. - Харьков, 2006.- Т.11, №3.- С.385-392.

137. Сугак В. Г. О противоречии данных подповерхностного зондирования теоретическим моделям диэлектрических характеристик пород грунта / В. Г. Сугак, И. С. Бондаренко, А. В. Сугак // Радиофизика и электроника. – 2012. – Т. 3(17), № 1. – С. 19–29.

138. Сугак В. Г., Букин А.В., Бондаренко И.С., Сугак А.В. О противоречии данных подповерхностного зондирования теоретическим моделям диэлектрических характеристик пород ґрунта // 4-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2011, том 1, Конференция "Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии" часть 1, С. 281-284.

139. Сугак В.Г., Букин А.В., Джадуей А. Корреляционная функция зондирующего сигнала со ступенчатым изменением несущей частоты в условиях подповерхностного зондирования // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 197–203.

140. Сугак В. Г. Восстановление электрических характеристик ґрунта и глубины залегания объектов по результатам подповерхностного зондирования // Радиофизика и электроника: Сб. трудов ИРЭ НАН Украины. Харьков.- 2002.- Т. 7, №3.- С. 491 - 497.

141. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Пер. с англ. Под ред. В. С. Кельзона.– М.: Советское радио, 1971. – 558 с.

142. Сугак В. Г. Георадарный метод обнаружения водонасыщенных слоев ґрунта с оценкой их объемной влажности / В. Г. Сугак, О. А. Овчинкин, Ю. С. Силаев, А. В. Сугак // Геофизический журнал. – 2014. – Т.36, №2. – С. 127–137.

143. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения ґрунтовых вод. –
 М:. Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952. – 678с.

144. Сугак В. Г. Использование георадиолокатора для определения уровня ґрунтовых вод и картографирования территорий, загрязненных нефтепродуктами / В. Г. Сугак, А. В. Букин, Ю. А. Педенко [и др.] // Радиофизика и электроника: Сб. трудов ИРЭ НАН Украины. Харьков. – 2005. – Т.10, №2. – С.240–247.

145. Сугак В. Г.Применение специализированного георадиолокатора в задачах инженерной геологии, гидрогеологии и экологии // В. Г. Сугак,

А. В. Букин, О. А. Овчинкин [и др.] – Наука та інновації. – 2005. – Т.1, №2. –
 С.32–43.

146. Дубоссарская ГЭС. Радиофизическое обследование откоса плотины радиолокатором подповерхностного зондирования «Сканирующий георадар»», Отчет о выполнении научно-технической работы (шифр «Днестр»), № Гос. Регистрации 01.U 004354, ИРЭ, Харьков, 2010. - 38с.

147. Изучение особенностей И разработка методов описания электромагнитных полей в естественных неоднородных средах с границами применительно К задачам дистанционного зондирования раздела И радиолокации», отчет о НИР (шифр «Сакура») № Гос. Регистрации 01060011977, ИРЭ, Харьков, 2011. - 179 с.

148. Разработка новых моделей и методов изучения тонкой структуры электромагнитных полей в диапазонах частот от единиц мегагерц до десятков гигагерц в природных, неоднородных, анизотропных средах и вблизи поверхностей их раздела для задач дистанционного зондирования и радиолокации. Отчет о НИР (шифр "Теразонд"), № госрегистрации 0111U010476, ИРЭ, Харьков, 2014. – Т.1. – 100с.

149. Eblagh K. Practical Problems in Demining and Their Solutions // Proceedings of the EUREL Int. Conference on The Detection of Abandoned Landmines, Edinburgh, UK.–1996.–P.1-5, 7-9.

150. Bruschini C. Metal detectors for humanitarian demining: from basic principles to modern tools and advanced developments // Mine'99 Proc., Euro conference on Sensor Systems and Signal Processing Techniques Applied to the Detection of Mines and Unexploded Ordnance, Firenze, Italy.–1999.– P. 24-30.

151. Sun Y., Li J. Time–frequency analysis for plastic landmine detection via forward-looking ground penetrating radar // IEEE Proceeding on Radar Sonar Navigation.–2003.–Vol.150, №4.– P.253–261.

152. Abujarad von M. Sc. F. Ground Penetrating Radar Signal Processing for Landmine Detection, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur.–Fakuleat fur Elektrotechnik und Informationstechnik der Ottovon-Guericke-Universitat Magdeburg. – 2007.–135p.

153. Amiri A. Multi-band and dual-polarised ultra-wide band-horn antenna for landmine detection using ground penetrating radar technique, Ph.D. Dissertation. – The University College London.–2015.–200p.

154. Lee C. P. Mine Detection Techniques Using Multiple Sensors.– The University of Tennessee at Knoxville.–2000.–78p.

155. Youn H. S. Development of Unexploded Ordnances (UXO) Detection and Classification System Using Ultra Wide Bandwidth Fully Polarimetric Ground Penetrating Radar (GPR), Ph.D. Dissertation. – The Ohio State University.–2007.– 218p.

156. Liao D., Dogaru T. Emulation of Forward-looking Radar Technology for Threat Detection in Rough Terrain Environments: A Scattering and Imaging Study.– U.S. Army Research Laboratory.–2012.–30p.

157. Woods W. Detecting Improvised Explosive Devices Via Forward Looking Ground Penetrating Radar.– Bucknell University.–2011.–75p.

158. Kositsky J., Milanfar P. A Forward-Looking High-Resolution GPR System.– University of California Santa Cruz.–1999.–12p.

159. Design of Spectrally Versatile Forward-Looking Ground Penetrating Radar for Detection of Concealed Targets // B. R. Phelan, M. A. Ressler, G. J. Mazzaro et al.–Proceedings of the SPIE.–2013.–Vol.8714, P. 87140B(1-10).

160. Букин А. В., Васильева Е. М., Сугак В. Г. Экспериментальная щелевая антенна с изменяемой поляризацией на излучение и прием в составе макета георадара дециметрового диапазона // Український метрологічний журнал.–2014.–№4.–стр.34–37.

161. Sugak V. G., Bukin A. V., Reznichenko N. G. Forward Looking Ground Penetrating Radar with Synthetic Antenna Aperture for Buried Explosive Hazards Detection // Telecommunications and Radio Engineering.–2017.– Telecommunications and Radio Engineering.–2017.–Vol.76, №13.–P.1149–1160. 162. Teggatz A. The Imaging Capabilities of Ground Penetrating Radar for the Detection of Buried Anti-Personnel Landmines, Ph.D. Dissertation.– Otto-von-Guericke-University of Magdeburg.–2008.–240p.

163. Сугак В. Г., Букін А. В., Васильєва О. М. Щілинна антена для радіолокаторів під поверхневого зондування // Патент № 103381 від 10.10.2013.

164. Fauzia Ahmad, Gordon J. Frazer, Saleem A. Kassam, Moeness G. Amin, "A New Approach for Near-Field Wideband Synthetic Aperture Beamforming" // Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2003 (ICASSP 2003), Volume 5, pages 89-92.

## ДОДАТОК А.

## Список публикацій за темою дисертації

1. Радиолокатор со ступенчатым изменением частоты для обнаружения и распознавания малогабаритных объектов под поверхностью земли / В. Г. Сугак, А. В. Букин, Е. М. Васильева [и др.] // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т. 1(15), № 3. – С. 92–97.

2. Сугак В.Г. Корреляционная функция зондирующего сигнала со ступенчатым изменением несущей частоты в условиях подповерхностного зондирования / В. Г. Сугак, А. В. Букин, А. Али Джадуей // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 197–203.

3. Использование георадиолокатора определения для уровня ґрунтовых картографирования территорий, загрязненных вод И / В. Г. Сугак, А. В. Букин, Ю. А. Педенко [и др.] // нефтепродуктами Радиофизика и электроника: Сб. трудов ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2005. - T.10, № 2. - C. 240–247.

4. Sugak V. G. SFCW GPR Sensor with Phase Processing for Buried Small Objects Detection and Recognition / V. G. Sugak, A.V. Bukin, A.V. Sugak // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol.74, № 19. – P. 1755–1766.

5. Sugak V. G. Forward Looking Ground Penetrating Radar with Synthetic Antenna Aperture for Buried Explosive Hazards Detection / V. G. Sugak, A. V. Bukin, N. G. Reznichenko // Telecommunications and Radio Engineering.–2017.– Vol. 76, № 13.– P. 1149–1160.

6. Щілинна антенна для радіолокаторів підповерхневого зондування
: пат. 103381 Україна. № а201113332; заявл. 14.11.2011; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19. 5с.

7. Сугак В. Г. О противоречии данных подповерхностного зондирования теоретическим моделям диэлектрических характеристик пород грунта / В. Г. Сугак, А. В. Букин, И. С. Бондаренко, А. В. Сугак //

Международный радиолектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2011. Сб. научн. тр. т.1, ч.1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – С. 281-284.

8. Sugak V. G. Forward Looking Ground Penetrating Radar with Synthetic Antenna Aperture for Buried Explosive Hazards Detection / V.G. Sugak, A. V. Bukin, N. G. Reznichenko, Ali Djadooei // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016 Proceedings). – Kharkiv, Ukraine, June 21-24, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – IEEE Catalog Number: CFP16780-CDR. – ISBN: 78-1-5090-2266-3.

9. Сугак В. Г. Застосування раділокатора підповерхневого зондування для виявлення мін на далекій (більш безпечній) відстані / В. Г. Сугак, А. В. Букін, Е. М. Васильева // Х Міжнародна науково-технічна конференція "Метрологія та вимірювальна техніка" (Метрологія – 2016) Тези доповідей. – Харків, 2016. – С.79.

Сугак В. Г. Применение специализированного георадиолокатора
 в задачах инженерной геологии, гидрогеологии и экологии / В. Г. Сугак,
 А. В. Букин, О. А. Овчинкин [и др.] // Наука та інновації. – 2005. – Т.1, № 2. –
 С. 32–43.

11. Букин А. В. Экспериментальная щелевая антенна с изменяемой поляризацией на излучение и прием в составе макета георадара дециметрового диапазона / А. В. Букин, Е. М. Васильева, В. Г. Сугак // Український метрологічний журнал.–2014.–№ 4.–С. 34–37