

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

БУКІН ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.396.96+537.226

БАГАТОЧАСТОТНЕ КОГЕРЕНТНЕ РАДІОЗОНДУВАННЯ
ПІДПОВЕРХНЕВОГО СЕРЕДОВИЩА

01.04.03 - радіофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Харків - 2018

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник **Сугак Володимир Григорович**,
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України, м. Харків,
ТВО провідного наукового співробітника
відділу статистичної радіофізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Горобець Микола Миколайович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
завідувач кафедри прикладної електродинаміки

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Павліков Володимир Володимирович,
Харківський національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,
декан факультету радіотехнічних систем літальних апаратів

Захист відбудеться 6 грудня 2018 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН
України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту радіофізики та
електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків,
вул. Академіка Проскури, 12.

Автореферат розісланий 1 листопада 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

Актуальність теми. В інженерній геофізиці, при проведенні інженерно-геологічних, меліоративних, гідрогеологічних, екологічних, археологічних робіт одним з найбільш важливих завдань є визначення фізичної структури ґрунту по глибині, пошуку прихованих об'єктів, які знаходяться під його поверхнею. Інтенсивне будівництво житлових і нежитлових будівель, доріг, гребель, аеродромів з різним покриттям, аварії підземних трубопроводів, техногенні катастрофи – все це потребує методів, що дозволяють оперативно визначати стан ґрунту в розрізі по глибині. Одним з методів, що використовуються в даний час, є радіозондування підповерхневого середовища. Підповерхнєве 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. Радіолокатор, за допомогою якого здійснюють підповерхнєве зондування, називається георадаром.

При проведенні підповерхневого радіозондування електромагнітна хвиля поширюється в ґрунті, який характеризується частотною дисперсією діелектричної проникності складових його компонентів. Електрофізичні параметри ґрунту, такі як діелектрична проникність і погонне загасання, визначаються на основі відомих електричних моделей змішування. Проведеними дослідженнями було виявлено, що відомі електричні моделі змішування, які є в основному емпіричними або напівемпіричними, не відповідають експериментальним даним, що отримані при натурних вимірюваннях. Якщо в структурі ґрунту фізичні зміни відбуваються повільно (наприклад, при збільшенні або зменшенні вологості ґрунту по глибині), то відповідно і радіолокаційна контрастність розрізу ґрунту по глибині буде слабка. Виявити ці зміни, застосувавши «класичний» метод радіозондування, в основі якого лежить аналіз часу затримки та амплітуди відбитого зондуючого сигналу, складно, тому що в «радіояскравісному» зображенні, отриманому в результаті зондування, ці зміни будуть практично непомітні. Таким чином, невідповідність електричних моделей ґрунту експериментальним даним та складність інтерпретації результатів підповерхневого радіозондування в разі повільної зміни фізичних характеристик ґрунту зробили створення нового радіофізичного методу визначення структури ґрунту актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є узагальненням результатів досліджень, які проводилися у відділі статистичної радіофізики ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України з 2004 р. по 2017 р. в рамках держбюджетних тем: « Дослідження та розробка моделей впливу природного середовища на випромінювання, поширення та розсіяння електромагнітних хвиль з метою розвитку методів дистанційного зондування» (шифр «Радикал») 2004-2006 рр. (номер держ. реєстрації 01.03U002264); «Створення спеціалізованого георадара «Скануючий георадар» для виявлення в ґрунті на глибинах до 20 ... 30м шарів, забруднених, зокрема, нафтопродуктами, пустот та інших утворень природного і антропогенного походження» (шифр «Геосфера-2») 2005-2006 рр. (номер держ. реєстрації Р.01.05.U005549);

«Дубосарська ГЕС. Радіофізичне обстеження відкосу греблі радіолокатором підповерхневого зондування «Скануючий георадар»» (шифр «Дністр») 2010 р. (номер держ. реєстрації 01.U004354); «Вивчення властивостей та розробка методів опису електромагнітних полів у природних неоднорідних середовищах з межами розподілу стосовно завдань дистанційного зондування та радіолокації» (шифр «Сакура») 2007-2011 рр. (номер держ. реєстрації 0107U001080); «Розробка нових моделей і методів вивчення тонкої структури електромагнітних полів у діапазонах частот від одиниць мегагерц до десятків гігагерц в природних, неоднорідних, анізотропних середовищах та поблизу поверхонь їх розділу для задач дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «Теразонд») 2012-2014 рр. (номер держ. реєстрації 0111U010476); «Дослідження властивостей природних середовищ, їх поверхонь розподілу та структурних неоднорідностей методами дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «Сенсорика») 2015-2017 рр. (номер держ. реєстрації 0115U002003). Автор є одним з виконавців наведених тем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування і розвиток радіофізичного методу багаточастотного когерентного підповерхневого радіозондування, що дозволяє оцінювати фізичні характеристики підповерхневої 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, і діагностувати їх стан.

Для досягнення поставлених цілей в роботі вирішено наступні завдання:

1. Досліджено шляхи підвищення інформативних ознак зонduючого багаточастотного радіолокаційного сигналу зі ступінчастою зміною його несучої частоти, зокрема фазової структури відбитого сигналу, для отримання даних про фізичні характеристики підповерхневої структури ґрунту в умовах існування частотної дисперсії його діелектричної проникності.

2. Встановлено зв'язок характеристик фазової структури відбитих зонduючих 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 застосування 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'єкт дослідження — розсіювання електромагнітних сигналів неоднорідностями підповерхневого середовища.

Предмет дослідження — моделі впливу електрофізичних характеристик порід ґрунту на характеристики відбитих сигналів, а також математичні

алгоритми обробки цих сигналів, що дозволяють одержувати інформацію про фізичні властивості підповерхневої структури ґрунту.

Методи дослідження, які застосовуються в роботі, полягають в поєднанні аналізу даних експериментального зондування з використанням розроблених георадарів, методів і алгоритмів цифрової обробки відбитих підповерхневими об'єктами зондуючих сигналів, на основі модельних уявлень про взаємозв'язок характеристик відбитих сигналів з характеристиками підповерхневої структури ґрунту.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано методику застосування фазової структури відбитих зондуючих 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 урахуванням 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 одержаних результатів полягає в наступному:

1. Запропонований метод радіофізичного багаточастотного зондування підповерхневого середовища дає змогу діагностики під поверхневої 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 ґрунту 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 і слабкої радіолокаційної контрастності розрізу ґрунту. Дослідження проводилися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України протягом низки років особисто здобувачем та в співавторстві.

В опублікованих наукових працях здобувач брав участь: у постановці задачі, 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 зондуючих сигналів при підповерхневому радіозондуванні [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, 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 науково-технічна 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, додатка, її повний обсяг становить 160 сторінок. У дисертації наведено 68 рисунки, 3 таблиці, список використаних джерел, що складається з 164 найменувань на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, взаємозв'язок проведених досліджень з науковими програмами, планами і темами, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача, дані про апробацію та публікацію результатів дисертаційної роботи.

У **розділі 1** зроблено аналітичний огляд сучасного стану та тенденцій розвитку підходу до радіозондування підповерхневого середовища.

Наведено опис і порівняльний аналіз найбільш поширених методів підповерхневого радіозондування: відеоімпульсного та багаточастотного. Наведено опис та порівняльний аналіз відомих електричних моделей змішування ґрунту які відображають взаємозв'язок між фізичними і електричними характеристиками ґрунту.

Проведений аналіз показав, що застосування підповерхневого радіозондування в умовах слабкої радіолокаційної контрастності розрізу ґрунту і дисперсії діелектричної проникності ґрунту обмежено методами

підповерхневого радіозондування, які використовуються на даний час. Для розв'язання цієї задачі пропонується новий метод підповерхневого радіозондування, який базується на комплексному застосуванні багаточастотного когерентного підповерхневого радіозондування та скоригованої, на підставі проведених натурних вимірювань електричної моделі ґрунту.

У розділі 2 наводиться обґрунтування вибору методу підповерхневого радіозондування. Функціонально, відповідно до пропонованого методу радіозондування, застосований георадар є багаточастотним радіолокатором зі ступінчастою зміною частоти зонduючого сигналу, частота якого поступово змінюється в заданих межах за лінійним законом. Форма сигналу є послідовністю N когерентних радіоімпульсів, частота яких збільшується від імпульсу до імпульсу з застосуванням фіксованого збільшення частоти Δf за період часу T , як наведено на рис. 1.

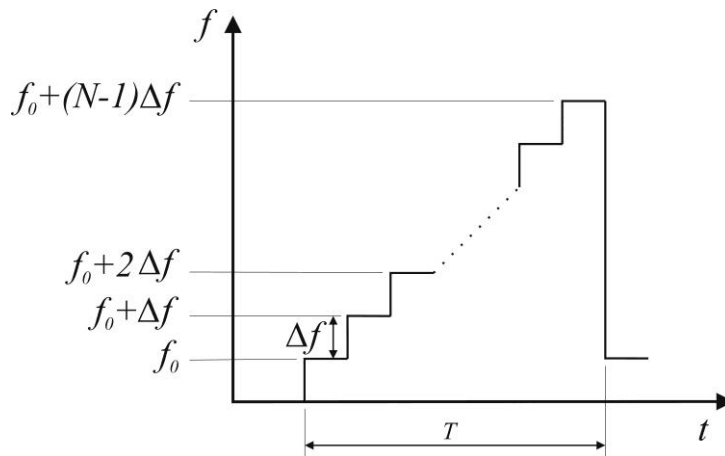


Рисунок 1 - Послідовність N когерентних радіоімпульсів

Приймач радіолокатора є квадратурним фазовим детектором, на один вхід якого подається опорний сигнал генератора поточної робочої частоти, а на другий — прийнятий сигнал. При проходженні від передавальної антени до об'єкта і від об'єкта до приймальної антени (на кожному частотному кроці) радіосигнал набуває певної фазової затримки по відношенню до опорного сигналу. З використанням фазового детектора фазова затримка перетворюється в постійну напругу, яка пропорційна цій затримці на поточній робочій частоті. Прийнятий сигнал перетворюється у комплексний низькочастотний сигнал $I(t)+jQ(t)$ шляхом його змішування з опорним сигналом і пропусканням отриманого низькочастотного сигналу через фільтр низької частоти.

На рис. 2 наведено структурну схему багаточастотного георадара зі ступінчастою зміною несучої частоти зонduючого сигналу.

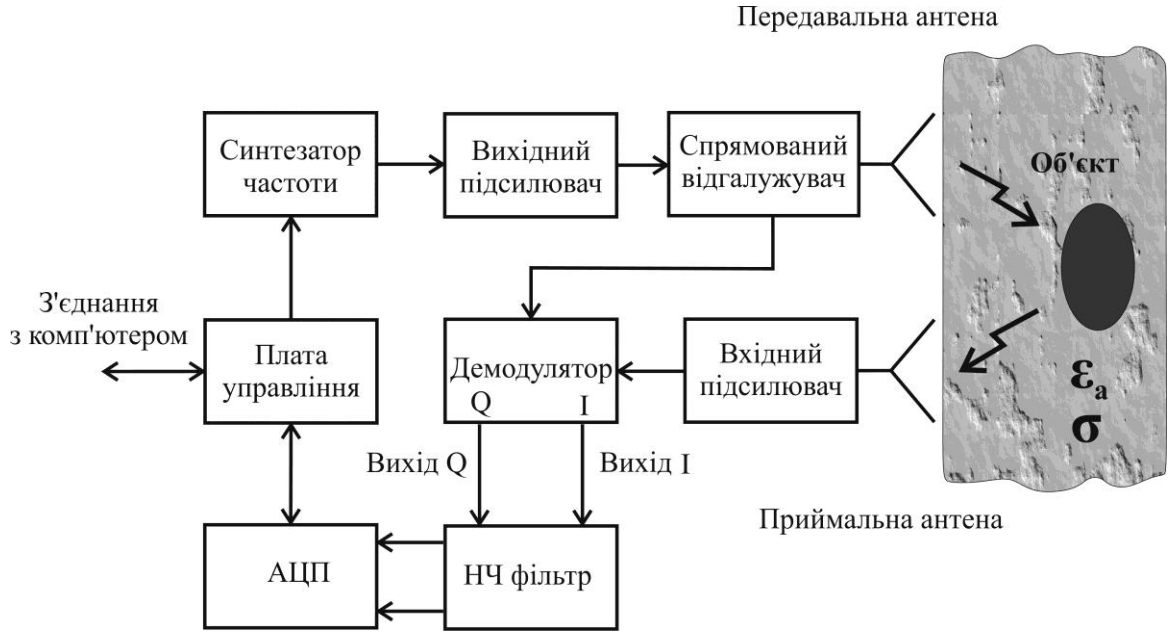


Рисунок 2 - Структурна схема багаточастотного георадара зі ступінчастою зміною несучої частоти зондуючого сигналу

В роботі доведено, що при обробці відбитих зондуючих сигналів до радіолокаторів підповерхневого зондування зі ступінчастою зміною несучої частоти можна використовувати пряме перетворення Фур'є для переходу в частотну область, у якій частота пропорційна значенням глибини.

При передачі N дискретних частот в діапазоні $B = f_{N-1} - f_0$, так що поточна частота $f_n = f_0 + (N-1)\Delta f$, отримуємо дискретизовану напругу на виході приймача георадара зі ступінчастою зміною несучої частоти:

$$u^r[n] = K(\omega) \sum_{p=1}^{P-1} \exp[-2\alpha_m(\omega)d_p] \times \exp[-j2\beta_m(\omega)d_p], \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f_n$ – кругова частота; $K(\omega)$ – коефіцієнт передачі системи на поточній частоті; $\alpha_m(\omega)$ – коефіцієнт загасання радіохвиль в ґрунті; $\beta_m(\omega)$ – фазовий коефіцієнт поширення радіохвиль у ґрунті; P – число дискретних точок розсіювання об'єкта; p – дискретна розсіююча точка об'єкта, яка розташована на відстані d_p .

Фазовий коефіцієнт поширення радіохвиль в середовищі з втратами записується наступним чином:

$$\beta_m = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon_a}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon_a} \right)^2} + 1 \right]}, \quad (2)$$

де μ – магнітна проникність середовища; ε_a – абсолютна діелектрична проникність середовища; σ – питома провідність середовища.

Для ґрунту:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \ll 1. \quad (3)$$

Розклавши в ряд Маклорена $\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a}\right)^2}$ і застосувавши результат до (1), отримаємо:

$$u^r[n] = K(\omega) \sum_{p=1}^{P-1} \exp[-2\alpha_m(\omega)d_p] \times \exp\left[-j\left(2\pi(f_0 + n\Delta f)\sqrt{\mu\varepsilon_a}2d_p + \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \sqrt{\mu}}{2\pi(f_0 + n\Delta f)\varepsilon_a \sqrt{\varepsilon_a}} 2d_p\right)\right]. \quad (4)$$

Коефіцієнт загасання амплітуд коливань протягом часу розгортки сигналу визначається частотною залежністю $\alpha_m(\omega)$. На кожній дискретній частоті (що відповідає певній глибині) відбитий сигнал містить як основну інформаційну складову гармонійне коливання, частота якого визначається цією глибиною, фазовою швидкістю поширення радіохвиль в середовищі і дискретним значенням кроку зміни несучої частоти зондувального сигналу. При зміні несучої частоти в заданому діапазоні, в сигналі присутня складова фази, яка при зміні глибини зростає лінійно, і низькочастотна складова фази, що призводить до спотворень фазової структури сигналу. Показано, що фазова структура сигналів, відбитих від під поверхневих неоднорідностей, і сигналів, які пройшли шари ґрунту, визначається виразом, в якому фазовий множник $\Delta\Phi(\omega)$ визначає залежність фазочастотного спектру від електричних властивостей середовища при кожному дискретному значенні глибини, та, відповідно, визначається роздільною здатністю зонduючого сигналу:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{4} \frac{\sigma(\omega)^2 \sqrt{\mu}}{2\pi(f_0 + n\Delta f)\varepsilon_a(\omega)\sqrt{\varepsilon_a(\omega)}} 2d_p = \Delta\Phi(\omega)d_p, \quad (5)$$

де $\Delta\Phi(\omega)$ - фазовий множник.

У кожній спектральній складовій сигналу, на виході фазового детектора приймача георадару присутня фазова складова, яка лінійно залежить від глибини (частоти). Швидкість наростання по глибини (частоти) цієї складової визначається електричними характеристиками середовища.

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:

$$\dot{S}(\Omega) = |\dot{S}(\Omega)| \exp(j\varphi(\Omega)), \quad (6)$$

де $|\dot{S}(\Omega)|$ – модуль спектральної площини; $\varphi(\Omega)$ – фазочастотний спектр відбитих сигналів.

Фазочастотну складову спектру характеризує залежність фази спектральних компонент сигналів, відбитих від неоднорідностей в підповерхневому середовищі, 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 (6) з урахуванням наступних обмежень:

$$\Delta d = \nu / 2N\Delta f, \quad (7)$$

$$\Delta\Omega = 2\Delta f \Delta d / N\nu, \quad (8)$$

де ν – фазова швидкість поширення радіохвилі в ґрунті; Δd – елемент розділу по глибині; $\Delta\Omega$ – елемент розділу по частоті.

Вираз для комплексної спектральної області може бути записаний таким чином:

$$\dot{S}(p\Delta\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{u}[n] \exp\left(j2\pi \frac{n}{N} p\Delta\Omega\right), \quad (9)$$

де $n = 0, \dots, N-1$; $p = 0, \dots, N-1$.

Вираз (6) може бути записаний таким чином:

$$\dot{S}(p\Delta\Omega) = |\dot{S}(p\Delta\Omega)| \exp(j\varphi(p\Delta\Omega)). \quad (10)$$

Фазовий спектр характеризує частотну залежність спектральної фази $\varphi(p\Delta\Omega)$, яка пропорційна глибині. У цьому випадку співвідношення між $\Delta\Omega$ та Δd визначається формулою (8).

На рис. 3 наведено криві, що характеризують залежність постійного фазового коефіцієнту, який є множником дискретного значення глибини, від об'ємної вологості W . Моделлю, що описує електричні характеристики породи ґрунту, була взята модель Беренцвейга. Склад твердої фракції: пісок – 70%, глина – 30%.

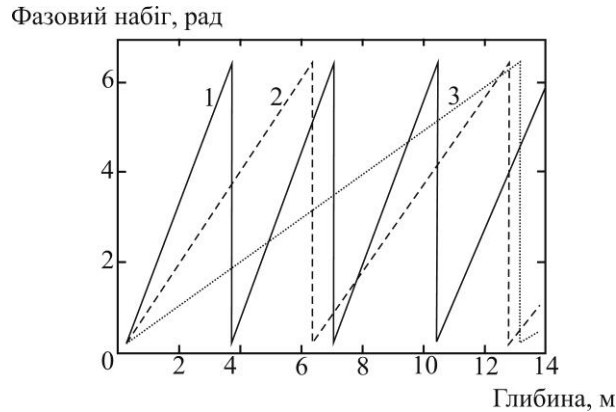


Рисунок 3 - Фазовий набіг по глибині в залежності від вологості ґрунту
1 – $W=21\%$, 2 – $W=14\%$, 3 – $W=7\%$

Оскільки при обчисленні фазочастного спектра використовуються стандартні функції обчислення аргументу комплексної функції, лінійне наростання фази буде тільки в діапазоні від 0 до 2π . Швидкість наростання фазового зсуву визначається електричними характеристиками середовища.

Візуалізацію отриманих фазочастотних спектрів (форма їх подання на моніторі або на папері) запропоновано робити так, що, при якому зображенням відповідають чорні ділянки, які відповідають значенням фазових зрушень рівним $k \times 2\pi$ (де k – натуральне число), розташованих періодично по глибині. При наявності локальних зон або шарів ґрунту, через які виникають зміни в фазовій швидкості поширення радіохвиль, буде спостерігатися зміщення положення цих максимумів по глибині. Як приклад, на рис. 4 наведено зображення фазової структури відбитих сигналів за трасою руху георадару. Зондування здійснювалося в діапазоні частот 140-270 МГц.

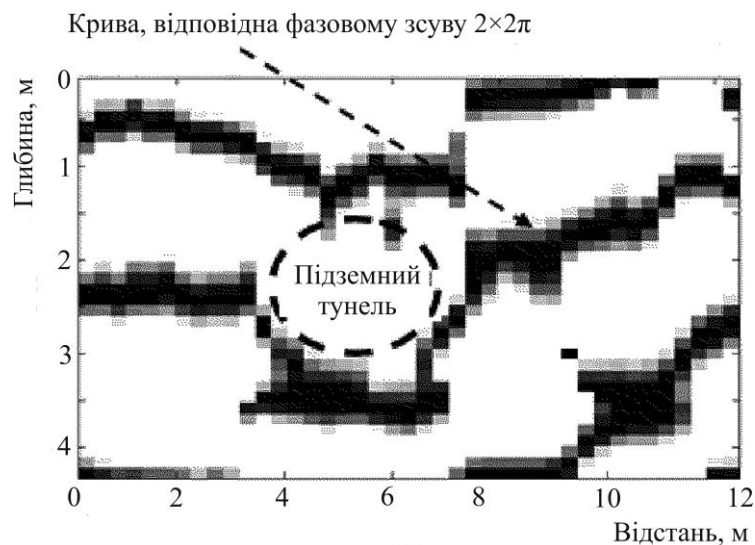


Рисунок 4 - Фазова структура відбитих сигналів за трасою руху георадару, що перетинає підземний тунель

На рис. 5 наведено два зображення, що відповідні результатам зондування по одному перетину ґрунту уздовж профілю руху георадара.

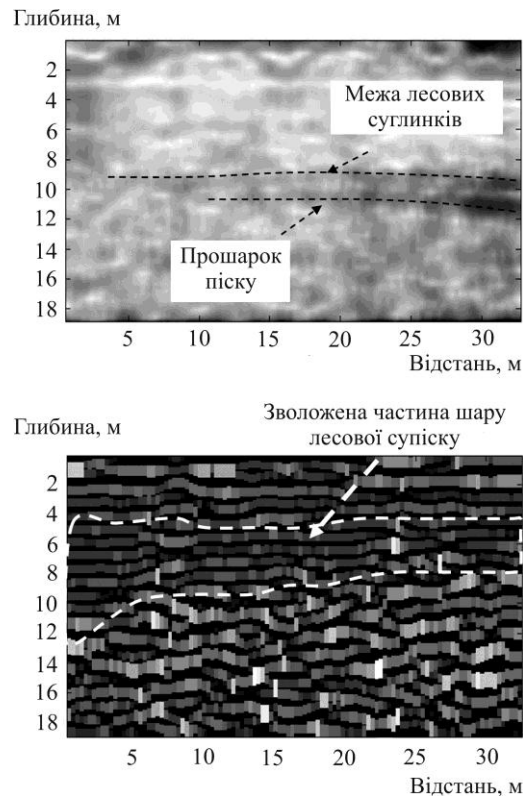


Рисунок 5 - Радіолокаційні зображення перетину ґрунту

Верхній рисунок є "радіояскравим" зображенням результатів зондування, в якому ступінь затемнення окремих зон пропорційна амплітуді зондуючих сигналів, відбитих підповерхневими неоднорідностями. На нижньому зображенні представлено фазову структуру сигналів по глибині цього ж профілю. Темними кривими показано ізолінії фазової структури сигналів, які побудовано відповідно до методу візуалізації, описаному вище. Відстань між сусідніми ізолініями обернено пропорційно ступеню зволоження ґрунту, тобто об'ємної вологості. Ступінь затемнення зазначених областей прямо пропорційний вологості.

Порівнюючи ці зображення, ми бачимо, що нижнє зображення фазової структури відбитого зондуючого сигналу більш інформативне з точки зору оцінки фізичної структури ґрунту. На ньому помітні ділянки підвищеної вологості, які практично непомітні на верхньому зображенні.

У розділі 3 наведено зіставлення результатів моделювання електричних характеристик ґрунту з даними підповерхневого зондування. Була проведена корекція електричної моделі ґрунту за результатами натурних вимірювань. Запропоновано ітераційний метод оцінки фізичної структури ґрунту за результатами підповерхневого радіозондування.

Як було зазначено раніше, за електричну модель ґрунту, за якою здійснювалися розрахунки у цій роботі, була взята модель Беренцвейга. Для розрахунку іонної провідності використовувалася електрична модель, в якій ґрунт розглядається як суміш піску, глини, мулу, води з розчищеною сіллю і повітря, а водяну фракцію представлено у вигляді двох шарів: шар Штерна (який розташовано в безпосередній близькості від частинок ґрунту, і в якому іони води знаходяться у зв'язаному стані з іонами частки ґрунту), та шар Гуї (вода знаходиться в слабкому зв'язку з частинками ґрунту). Було проведено зіставлення розрахункових результатів, отриманих на основі цієї моделі, з натурними вимірюваннями, які зроблено із застосуванням експериментальних георадарів, що працюють в діапазоні частот 90-300 МГц. За результатами проведених вимірювань, з метою отримання відповідних експериментальним даним дисперсійних залежностей, електричну модель ґрунту було скориговано. Функціональні залежності діелектричної проникності та питомої провідності ґрунту від частоти, що отримані в результаті розрахунку, множилися на множники: $K_\epsilon(\omega) = (\omega_0/\omega)^{\text{degr1}}$ та $K_\sigma(\omega) = (\omega_0/\omega)^{\text{degr2}}$ відповідно, де ω_0 – початкова частота зонduючого сигналу, degr1 та degr2 – показники ступеня, величини яких в залежності від типу ґрунту коливаються в межах від 0,7 до 0,9 та від 0,3 до 0,5, відповідно. При коригуванні моделі значення питомої провідності зменшувалися в 1,5-2 рази. У підсумку загальне загасання, частотна залежність погонного загасання і частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту стали відповідати результатам, які одержано при зондуванні в реальних середовищах.

На рис. 6 та рис. 7 наведено результати розрахункової та скоригованої моделі. Фізичні параметри суміші ґрунту: пісок – 60%; глина – 40%; пористість ґрунту – 0,25. Криві відповідають наступним значенням об'ємної вологості: 21%, 14%, 7%. Солоність ґрунту – 0,1%.

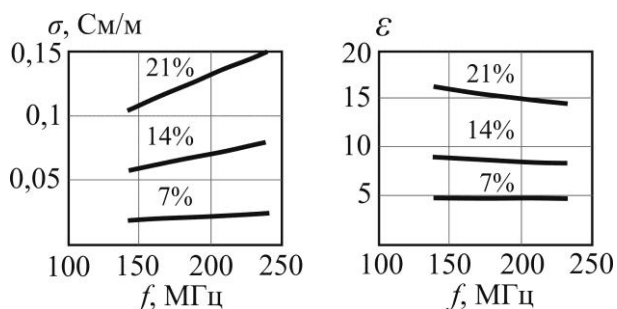


Рисунок 6 - Розрахункова залежність питомої провідності і відносної діелектричної проникності суміші від частоти при різних об'ємній вологості

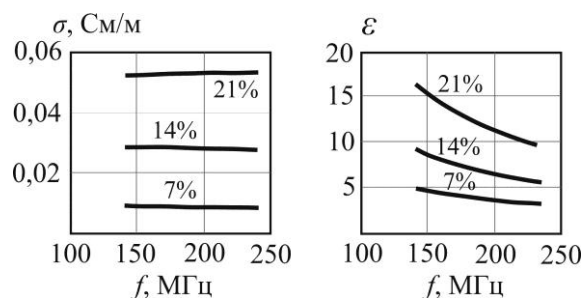


Рисунок 7 - Скоригована залежність питомої провідності і відносної діелектричної проникності суміші від частоти при різних об'ємній вологості

Радіолокаційна контрастність розрізу ґрунту пропорційна відношенню діелектричної проникності між шарами, що мають різні електричні характеристики. Виявити ці зміни при низькій радіолокаційній контрастності з

застосуванням "класичного" метода радіозондування, в основі якого лежить аналіз часу затримки і амплітуди відбитого зондуючого сигналу, складно, тому що в "радіояскравісному" зображенні, отриманому в результаті зондування, ці зміни будуть практично непомітні. Додатковою проблемою є те, що частотна дисперсія діелектричної проникності ґрунту проявляється, в основному, саме у вологому ґрунті (за наявності води). Запропонований метод визначення фізичної структури підповерхневого розрізу ґрунту засновано на комплексному використанні скоригованої електричної моделі ґрунту, аналізі фазової структури відбитих зондуючих сигналів, застосуванні запропонованого способу візуалізації фазової структури відбитого сигналу. Для визначення фізичної структури ґрунту в розрізі, зокрема, визначення об'ємної вологості по глибині, пропонується наступний ітераційний алгоритм, блок-схема якого наведена на рис. 7.



Рисунок 7 - Алгоритм визначення об'ємної вологості за результатами підповерхневого зондування

В основу алгоритму покладено ітераційний метод підбору значення об'ємної вологості ґрунту стосовно до електричної моделі ґрунту. Використовуючи скориговану модель розрахунку електричних параметрів ґрунту, та змінюючи фізичні параметри ґрунту (відсотковий вміст піску і глини, об'ємну вологість, солоність, температуру, діапазон частот і т. д.), проводиться моделювання процесу поширення радіохвиль в заданому шарі ґрунту. З сигналом, в процесі моделювання, необхідно зробити ті ж перетворення, які відбуваються у приймачі георадара (перемноження з опорним сигналом і низькочастотна фільтрація). Методом ітерацій об'ємна вологість підбирається так, щоб відстань між сусідніми ізолініями фазової структури сигналу (крутизна фазочастотної характеристики), отриманої при моделюванні процесу поширення радіохвиль у ґрунті, і відстань між сусідніми ізолініями фазової структури відбитого сигналу, яка отримана в результаті георадарного зондування, збігалися.

У розділі 4 представлені практичні результати, які отримані при проведенні підповерхневого зондування.

Для визначення рівня ґрунтових вод і картографування територій, що забруднені нафтопродуктами, був застосований багаточастотний георадар, що працює в діапазоні 100-450 МГц. Приклад результатів зондування наведено на рис. 8 та рис. 9.

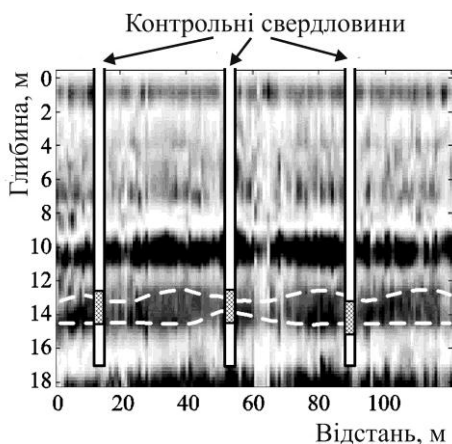


Рисунок 8 - Радіолокаційне зображення перетину ґрунту

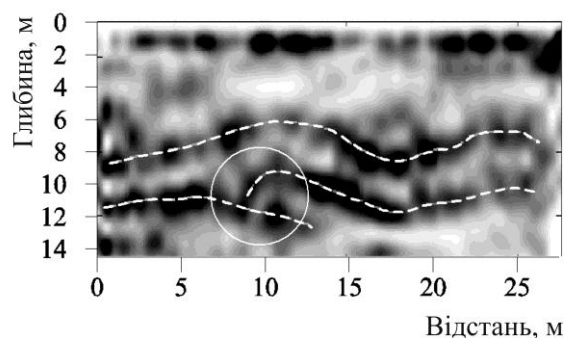


Рисунок 9 - Радіолокаційне зображення перетину ґрунту на ділянці зі зсувом

Для визначення ступеню обводнення верхніх шарів ґрунту річкової дамби було застосовано георадар, який працює у діапазоні частот 500-900 МГц. Основним завданням даного обстеження було визначення локальних зон дамби, які мають розушільнення та підвищення обводнення та визначення ступеня обводнення ґрунту верхніх шарів греблі Дубосарської ГЕС. Візуалізацію отриманих результатів зондування було представлено у вигляді фазової структури сигналів за трасою руху георадара вздовж відкосу греблі. Таке представлення результатів проведеного георадіолокаційного зондування дозволило визначити ділянки розушільнення ґрунту дамби, що викликано

гідрологічним впливом води. Приклад результатів зондування наведено на рис. 10. На основі алгоритму визначення об'ємної вологості за результатами підповерхневого зондування було побудовано розподіл об'ємної вологості по глибині для двох перетинів ґрунту, яке наведено на рис. 11.

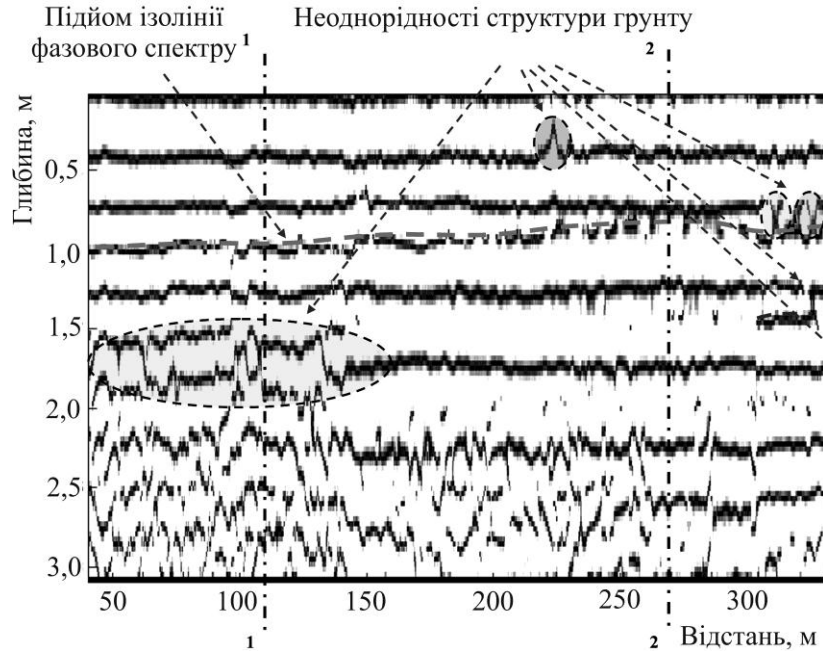


Рисунок 10 - Зображення фазової структури сигналів, відображених підповерхневими неоднорідностями вздовж траси руху георадару

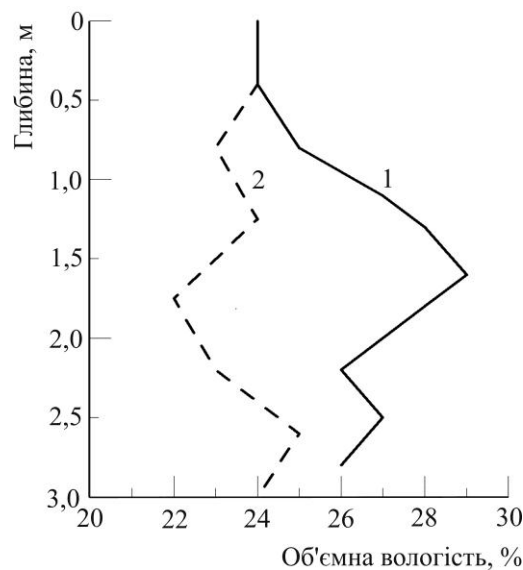


Рисунок 11 - Розподіл об'ємної вологості ґрунту по глибині для двох перетинів ґрунту

Одним з актуальних напрямків у георадіолокації є дослідження по застосуванню георадару для пошуку мін. Дослідження щодо застосування георадару для виявлення макетів металевих і неметалевих мін проводилися нами як на близькій (до 1 м), так і більший (до 12 м) відстані. Експерименти по застосуванню георадару для пошуку закопаних в ґрунт макетів металевих і пластикових мін були проведені з використанням двох багаточастотних георадарів, які працюють, відповідно, перший у 500-900 МГц, другий у 1200-1800 МГц діапазонах частот. Результати дослідження показали, що представлення результатів зондування у вигляді фазової структури відбитих сигналів дозволяє виявити місце, де були закопані макети мін та зробити припущення про тип закопаних макетів мін (метал або пластик). Приклад результатів зондування наведено на рис. 12.

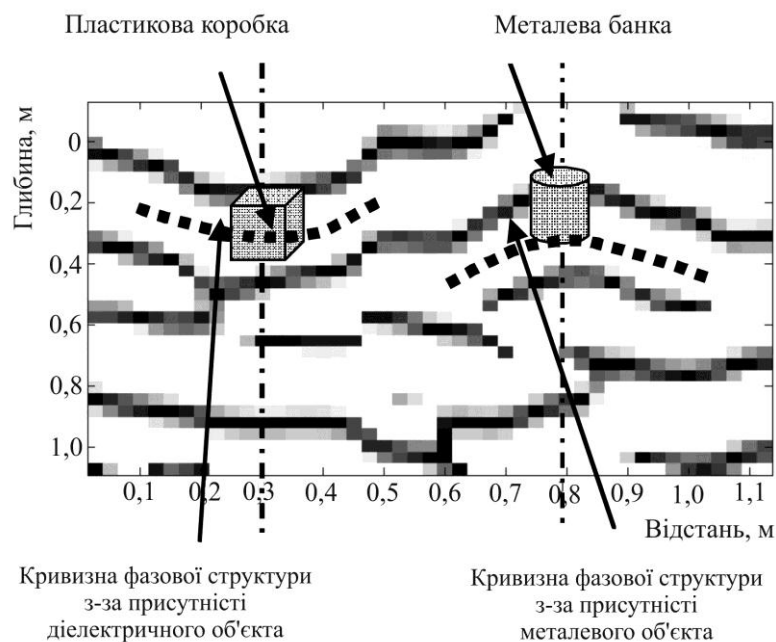


Рисунок 12 - Зображення фазової структури відбитого сигналу за трасою руху георадару, що перетинає два підповерхневіх об'єкта

На цьому рисунку наведено зображення фазової структури відбитого сигналу уздовж площини, де розташовано закопані об'єкти. В області, де розташовано діелектричний об'єкт, ізолінії зігнуто униз, тому, що навколишнє середовище має відносну діелектричну проникність та питому провідність більше, ніж зазначений об'єкт. В околиці металевого об'єкта, ці ж ізолінії відхиляються вгору, що свідчить про те, що питома провідність об'єкта істотно більша, ніж у навколишнього середовища. Ступінь кривизни залежить від взаємного розташування антени георадару і об'єктів. Таким чином, доведено, що застосування фазової структури сигналу дозволяє розпізнавати та розрізняти металеві та діелектричні об'єкти (наприклад, макети мін), що знаходяться під поверхнею ґрунту.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи запропоновано новий метод обробки та інтерпретації результатів підповерхневого радіозондування в умовах слабкої радіолокаційної контрастності розрізу ґрунту 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 ґрунту, 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 може бути ефективно використано для моніторингу та картографуванні рівня ґрунтових вод у зонах підтоплення та ділянок підповерхневого забруднення нафтопродуктами, а так само, для пошуку закопаних макетів мін. 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 ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в українських та міжнародних фахових журналах

1. Радиолокатор со ступенчатым изменением частоты для обнаружения и распознавания малогабаритных объектов под поверхностью земли / В. Г. Сугак, А. В. Букин, Е. М. Васильева, О. А. Овчинкин, Ю. А. Педенко, Ю. С. Силаев, Е. В. Тарнавский, В. Н. Бормотов, А. В. Сугак // 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. Джадуйей // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 197–203.
3. Использование георадиолокатора для определения уровня грунтовых вод и картографирования территорий, загрязненных нефтепродуктами / В. Г. Сугак, А. В. Букин, О. А. Овчинкин, Ю. А. Педенко, Ю. С. Силаев // Радиофизика и электроника: Сб. научных трудов ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины. – Харьков, 2005. – Т. 10, № 2. – С. 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.

Патенти

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

Публікації в матеріалах конференцій

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 електрон. опт. диск (CD-ROM) – IEEE Catalog Number: CFP16780-CDR. – ISBN: 78 1 5090 2266 3.

9. Сугак В. Г. Застосування радіолокатора підповерхневого зондування для виявлення мін на далекій (більш безпечній) відстані / В. Г. Сугак, А. В. Букин, Е. М. Васильєва // X Міжнародна науково-технічна конференція "Метрологія та виміррювальна техніка" (Метрологія – 2016) Тези доповідей. – Харків, 2016. – с. 79.

Додаткові публікації

10. Сугак В. Г. Применение специализированного георадиолокатора в задачах инженерной геологии, гидрогеологии и экологии / В. Г. Сугак, А. В. Букин, О. А. Овчинкин, Ю. А. Педенко, Ю. С. Силаев // 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. Васильєва, В. Г. Сугак // Український метрологічний журнал. – 2014. – № 4. – С. 34–37.

АНОТАЦІЯ

Букін О. В. Багаточастотне когерентне радіозондування підповерхневого середовища. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних 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, які пов'язані з елементами інженерних конструкцій, та діагностувати їх стан.

У роботі зроблено аналітичний огляд існуючих на даний момент методів радіолокаційного підповерхневого зондування. Основну увагу було приділено проблемам, що обмежують застосування цих методів. У роботі наведено обґрунтування застосування багаточастотного когерентного сигналу зі ступінчастою зміною несучої частоти як зонduючого сигналу при радіозондуванні підповерхневого середовища. Запропоновано новий ітераційний метод відновлення фізичних характеристик ґрунту, в якому використовується залежність фазової структури відбитих радіосигналів від фізичних характеристик підповерхневої структури ґрунту, та скориговано математичну модель електричних характеристик ґрунту. Представлено

практичні результати, які отримано при проведенні багаточастотного когерентного підповерхневого радіозондування.

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

АННОТАЦІЯ

Букин А. В. Многочастотное когерентное радиозондирование подповерхностной среды. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2018.

Диссертационная работа посвящена обоснованию радиофизического метода многочастотного когерентного радиозондирования подповерхностной среды, позволяющего оценивать физические характеристики подповерхностной структуры грунта, обнаруживать изменения физических свойств этой структуры, а также отдельные объекты, связанные с элементами инженерных конструкций, и диагностировать их состояние.

В работе сделан аналитический обзор существующих, на данный момент, методов радиолокационного подповерхностного зондирования. Основное внимание уделено проблемам, ограничивающим применения этих методов. В работе приведено обоснование применения многочастотного когерентного сигнала со ступенчатым изменением несущей частоты в качестве зондирующего сигнала при радиозондировании подповерхностной среды. Предложен новый итерационный метод восстановления физических характеристик грунта, в котором используется зависимость фазовой структуры отраженных радиосигналов от физических характеристик подповерхностной структуры грунта, а также скорректированная математическая модель электрических характеристик грунта. Представлены практические результаты, полученные при проведении многочастотного когерентного подповерхностного радиозондирования.

Ключевые слова: георадар, структура грунта, многочастотный когерентный сигнал, фазовая структура сигнала, преобразование Фурье, электрические характеристики грунта, радиолокационная контрастность.

ABSTRACT

Bukin O. V. Multifrequency coherent radar sensing of subsurface environment. The 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 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 paper presents the rationale for the use of multi-frequency coherent signal with a step change in the carrier frequency as a probing signal for radiosonding subsurface environment. 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.

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.