

РАДІОЛОКАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДПОВЕРХНЕВОЇ ЧАСТИНИ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

С.О. МАСАЛОВ, Г.П. ПОЧАНІН, В.П. РУБАН, П.В. ХОЛОД

Ін-т радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова. 61085, Харків-85, вул. Академіка Г.Ф. Проскури, 12. E-mail: ire.kharkov.ua

Проаналізовано вимоги до енергетичних характеристик георадіолокаційної апаратури, які забезпечують виявлення дефектів під поверхню інженерних споруд та вимірювання товщини шарів шаруватого середовища. Запропоновано та теоретично і експериментально досліджено спосіб виявлення підповерхневих тріщин в монолітних блоках. Розроблено програмно керовану циклічну цифрову лінію затримки з розширеним до 200 нс діапазоном затримок. Запропоновано та досліджено способи підвищення енергетичного потенціалу радара за рахунок аналогового накопичення і використання антенної системи з глибокою розв'язкою між передавальним та приймальним модулями. Проаналізовано варіанти цільової цифрової обробки георадіолокаційних даних. Удосконалено і перевірено при моніторингу стану дорожнього одягу експериментальний зразок георадара. Бібліогр. 16, рис. 15.

Ключові слова: надширококутний георадар, радарограма, радіолокаційний моніторинг, енергетичний потенціал, підповерхнева структура

Під час експлуатації інженерні споруди, такі як автомобільні шляхи, залізничні колії та інші бетонні або земляні споруди, зазнають пошкоджень. Найбільшу загрозу становлять приховані дефекти, розташовані всередині споруд. Щоб подовжити термін використання таких споруд, необхідно мати змогу знаходити ці дефекти вчасно, а саме – на початковому етапі їх формування.

Серед перспективних нересурсномістких методів неруйнівного контролю стану інженерних споруд є надширококутний (НШС) георадіолокаційний метод. Особливістю цього методу є те, що він не вимагає багато часу для моніторингу. Тому діагностика стану споруд може виконуватися досить часто, що дозволить забезпечити своєчасне виявлення дефектів.

Апаратура для проведення діагностики надширококутним георадіолокаційним методом називається георадаром. В світі вже існують георадари, які використовуються для моніторингу стану інженерних споруд [1–3]. Більшість з цих приладів достатньо ефективні при пошуках відносно контрастних дефектів–границь, при переході яких діелектрична проникність та електропровідність змінюються на значну величину. До таких можна віднести діелектричні та металеві включення, порожнини, заповнені повітрям, або насичені вологою області (коли підповерхневі зони малої щільності заповнюються водою).

Але, разом з цим, існують дефекти – підповерхневі тріщини та розшліщення матеріалу споруди, які не є контрастними, але їхня поява сигналізує про початок руйнування. Відстеження динаміки розвитку тріщин і аналіз їх стану може дозволити своєчасно і з мінімальними затратами

відновити споруду. Іноді при будівництві та відновленні споруд необхідно точно контролювати товщини досить малих шарів діелектричних матеріалів. Так, наприклад, при будівництві та відновленні доріг потрібно контролювати товщини шарів асфальтобетону в кілька сантиметрів з точністю до 0,5 см.

Така вимірювальна апаратура не є широко представленою на ринку георадарів. Її розробка та виготовлення пов'язані з необхідністю вирішення складних завдань як на стадії пропозиції принципів роботи, так і на стадії конструктивних рішень і виготовлення. Найголовнішим завданнями є покращення енергетичних характеристик георадара: його динамічного діапазону та енергетичного потенціалу. Оскільки георадар складається з набору різних елементів, блоків та систем, бажаний результат може бути досягнуто тільки удосконаленнями, оптимізацією та взаємним узгодженням їх усіх водночас. Разом зі швидкодіючим багаторозрядним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) це надає змогу досягти підвищеної точності вимірювання параметрів сигналів, відбитих досліджуванним середовищем. При цьому важливо залишити надширокою смугу робочих частот радара. Саме вона забезпечує точність вимірювань. Разом з математичною обробкою сигналів така система є основою для вирішення завдань моніторингу стану підповерхневої частини інженерних споруд.

Розробка такого георадара потребує як удосконалення елементної бази, так і методів зондування, і, взагалі, особливих підходів до зондування, що відповідають конкретній задачі виявлення дефектів чи вимірювання товщини шарів і таке інше.

Останніми роками в ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАНУ інтенсивного розвитку набули фундамен-

тальні дослідження з радіофізичної інтроскопії середовищ з поглинанням та дисперсією, результатами яких є низка патентів України [4–7], які застосовано в розробленому георадарі «ОДЯГ» [8], призначеному для моніторингу стану дорожнього покриття.

Головним чином, робота спрямована на удосконалення елементної бази георадарів з метою поліпшення їх енергетичних характеристик, що, відповідно, забезпечує більшу глибину і точність радіолокаційних вимірювань при моніторингу технічного стану підповерхневої частини інженерних споруд.

В теоретичній частині дослідження розглянуто задачі зондування і визначення наявності зон розуцільнення та тріщин в бетонних спорудах. Розрахунки показали, що для результативного пошуку зон розуцільнення в конструкціях доріг при глибинах зондування до 1,5 м і робочій смузі частот георадара від 400 до 1800 МГц (тривалість зонduючого імпульсу $\sim 0,7$ нс) потрібно забезпечити динамічний діапазон більший ніж 46 дБ. Подібні оцінки для пошуку зон розуцільнення на глибинах до 5 м в бетонних конструкціях споруд, таких як греблі, при робочій смузі частот від 100 до 500 МГц (тривалість зонduючого імпульсу $\sim 2,5$ нс) показали, що потрібно забезпечити динамічний діапазон не менше ніж 53 дБ. Поглинання хвиль цього частотного діапазону є меншим ніж у попередньому випадку, тому глибина зондування може бути більшою.

При оцінюванні вимог до динамічного діапазону приймача, які мають забезпечити виявлення наявності тріщини, останню можна було б розглядати як ту саму зону розуцільнення, заповнену повітрям або водою. Але явно виражена спрямованість тріщини дає змогу використати це при організації процесу зондування. В даному випадку коефіцієнт відбиття суттєво залежить від взаємної орієнтації тріщини та вектору поляризації електричного поля зонduючого сигналу. Це стало основою для запатентованого способу визначення місць знаходження підповерхневих тріщин [9].

За результатами виконання завдань теоретичної частини робіт з'ясовано наступне:

- для виявлення підповерхневих розуцільнень в інженерних спорудах потрібні георадари з динамічним діапазоном, не меншим ніж 53 дБ;
- для збільшення глибини виявлення розуцільнень потрібно збільшувати тривалість зонduючого імпульсу з одночасним підвищенням потужності зонduючого сигналу;
- для виявлення тріщин потрібно збільшити динамічний діапазон додатково на 25...30 дБ.

Енергетичний потенціал георадара має бути не меншим ніж 110 дБ.

Моделювання та оптимізація антенної системи. Для вимірювання товщини шарів шаруватого середовища запропоновано використовувати антенну систему, в якій забезпечено глибоку частотно-незалежну розв'язку між передавальним та приймальним модулями. Попередні експерименти з антенною системою [10, 11], виготовленою за принципом [5], продемонстрували, що можливо досягнуто є величина розв'язки, більша ніж 64 дБ. Завдяки розв'язці між передавальним і приймальним модулями антенної системи можна шляхом підвищення потужності збуджуючого сигналу довести енергетичний потенціал георадара до величини, яка забезпечить можливість використання усього динамічного діапазону приймача. При цьому, незважаючи на близьке розташування випромінюючої і приймальної антен, найбільший за амплітудою сигнал буде не той, що проходить напряду із випромінюючої антени в приймальну, а той, що відбивається неоднорідностями досліджуваного середовища.

Розроблено та виготовлено експериментальний зразок антенної системи (рис. 1).

За експериментальними даними оцінено, що при випромінюванні та прийомі енергетичні втрати досягають -28 дБ. Тому для зменшення втрат запропоновано роздільне знімання прийнятих сигналів з лівої та правої половин приймальної антени при використанні надширококутних симетруючих трансформаторів на лініях. У такий спосіб вдається досягти глибокої розв'язки між випромінюючим та приймальним модулями антенної системи і разом з цим краще узгодити приймальну антену з фідерною лінією, вдвічі збільшивши амплітуду прийнятого сигналу на вході приймача, а також зменшити вплив синфазної імпульсної завади.

Двоканальний стробоскопічний приймач з диференційними входами. Максимальна глибина зондування і чутливість георадара є важливими параметрами радіолокаційної системи. Ці параметри визначаються в основному можливостями приймача георадара. Так, глибина зондування за-

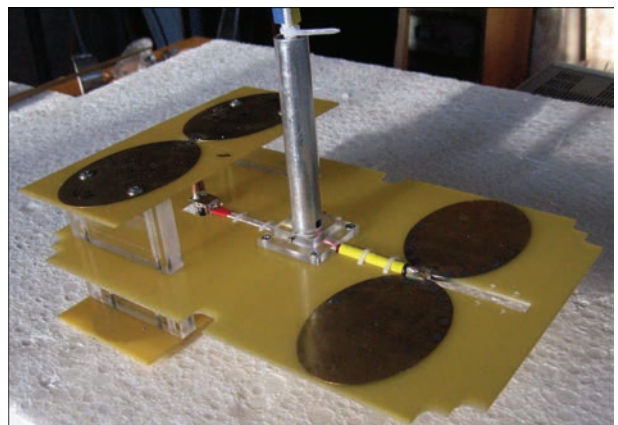


Рис. 1. Зразок антенної системи

лежить від характеристик системи синхронізації та лінії затримки стробімпульса для стробоскопічного перетворювача, а чутливість системи визначається коефіцієнтом перетворення стробоскопічного перетворювача.

Для ефективної роботи стробоскопічного приймача в режимі когерентного накопичення необхідно забезпечити стабільну синхронну роботу генератора коротких імпульсів, що збуджують випромінюючу антену, та цифрової лінії затримки (системи автоматичного зсуву) стробоскопічного перетворювача. У зв'язку з цим важливу роль в синхронізації сигналів відіграє вхідний компаратор запуску системи синхронізації. Від його параметрів залежить часова стабільність (джиттер дискретизації) системи і, відповідно, точність вимірювань параметрів прийнятих сигналів. Також, у зв'язку з тим, що на вхід синхронізації надходить імпульс наносекундної тривалості, компаратор має мати високу швидкодію.

Для вирішення цих завдань розроблено швидкодіючий компаратор на основі емітерно-зв'язаної логіки (ЕЗЛ). Блок-схема компаратора показана на рис. 2.

За параметрами мікросхем, використаних в компараторі, можуть бути визначені його характеристики: спектр вхідного сигналу і, відповідно, робоча смуга вхідного тракту – 8 ГГц, мінімальна тривалість імпульсу – 100 пс, нестабільність не більше 200 фс. Компаратор формує імпульси запуску лінії затримки тривалістю 2 нс, амплітудою 400 мВ (ЕЗЛ – рівні).

Тестування швидкодіючого компаратора проводилось спільно з цифровою лінією затримки і стробоскопічним змішувачем.

Стабільна робота системи синхронізації приймача також забезпечується завдяки малому джиттеру цифрових ліній затримок на основі ЕЗЛ-мікросхем. Їх нестабільність синхронізації (випадковий джиттер) має величину порядку 3 пс. Недоліком такої ЦЛЗ є малий діапазон часових затримок – 10 нс.

Циклічна цифрова лінія затримки. З метою розширення діапазону спостереження (за часом, а відповідно і за глибиною) було запропоновано оригінальний спосіб забезпечення розширеного діапазону затримок строб імпульсів за рахунок циклічності підключення мікросхем фіксованої цифрової лінії затримки. Для реалізації цього способу розроблено експериментальний зразок та

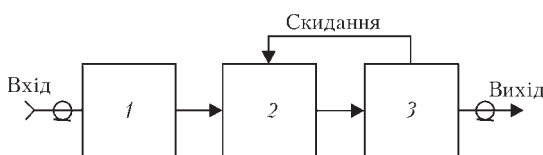


Рис. 2. Схема швидкодіючого компаратора: 1 – вхідний компаратор; 2 – тригер; 3 – розгалужувач сигналів

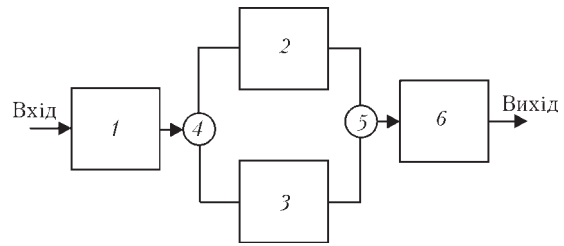


Рис. 3. Схема цифрової лінії затримки з розширеним діапазоном автоматичного зсуву синхроімпульсів: 1–3 – керувані цифрові лінії затримки на діапазон 10 нс; 4 – логічний елемент АБО; 5 – розгалужувач імпульсів; 6 – лічильник сигналів

проведено тестування циклічної цифрової лінії затримки, яке довело її працездатність і разом з тим високу точність задавання необхідних часових інтервалів.

Блок-схема лінії затримки наведена на рис. 3.

Особливість схеми – це циклічне включення цифрових ліній 2 і 3, що дозволяє згенерувати послідовність синхроімпульсів з періодом 20 нс. Після заданої кількості циклів проходження імпульсів через лінії затримки на виході лічильника 6 генерується синхросигнал. Параметри сигналу: амплітуда – 3 В, тривалість – 50 нс.

Оцінка часової нестабільності приймача (джиттера дискретизації) за методикою [12] показала, що середньоквадратичне відхилення склало близько 1 пс. На рис. 4 наведена діаграма розподілу часових помилок реєстрації короткого імпульсу приймачем з швидкодіючим компаратором і цифровою лінією затримки.

З діаграми видно, що часові помилки реєстрації лежать в межах ± 3 пс.

Експериментально досягнуто максимальне значення затримки до 200 нс. Це відкриває можливість прийому радіолокаційних сигналів з глибин, що приблизно дорівнюють 10 м. Слід зазначити, що, незважаючи на розширення діапазону затримок, точність і висока стабільність синхронізації залишилися тими ж самими. Про це свідчить ефективно використання аналогового накопичення при прийомі радіолокаційних сигналів.

Аналогове накопичення. Очевидним є факт, що чим більша чутливість георадіолокаційної апа-

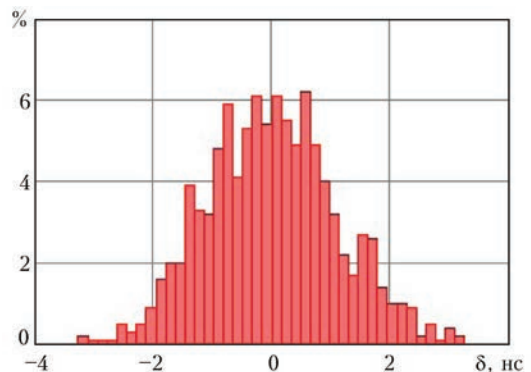


Рис. 4. Діаграма розподілу часових помилок

ратури, тим глибшим може бути зондування, тим менш контрастні дефекти можуть бути виявлені і тим точніше визначена підповерхнева структура. Тому в роботі продовжено теоретичне та експериментальне дослідження шляхів розширення динамічного діапазону георадара та підвищення чутливості стробоскопічного приймача, які базуються на матеріалах патенту № 96241 України [10].

Для розширення динамічного діапазону георадара в стробоскопічному приймачі застосовано аналогове накопичення сигналів. Розрахунки та експериментальні дані показали, що застосування режиму аналогового накопичення в простій схемі стробоскопічного перетворювача без зворотних зв'язків і без скидання накопиченого заряду дозволяє зменшити час наростання перехідної характеристики приймача і відповідно розширити робочу смугу частот [13].

Досліджено характер зміни характеристик перетворювача при використанні накопичення. На рис. 5 показано експериментальні та розрахункові залежності робочої смуги частот ΔF від кількості накопичень I при різних тривалостях вибірок δ (тривалостях стробімпульсів Δt).

Кількісна оцінка показує, що відносне розширення робочої смуги становить 80 % при малих тривалостях вибірки (рис. 6).

Таким чином, з'ясовано методи оптимізації та параметри змішувача, які забезпечують найбільш широкий робочий діапазон частот приймача та зменшення рівня шумів внаслідок накопичення.

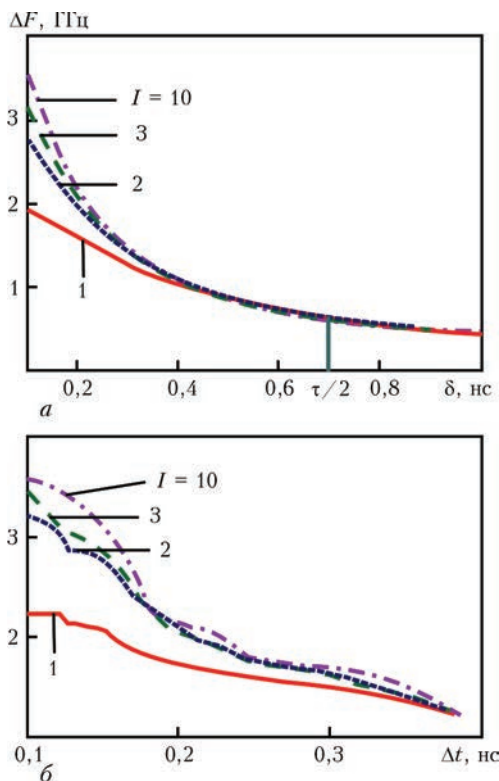


Рис. 5. Залежності робочої смуги частот від числа накопичень I та тривалості вибірки δ (теорія) (а) і тривалості стробімпульсів Δt (експеримент) (б)

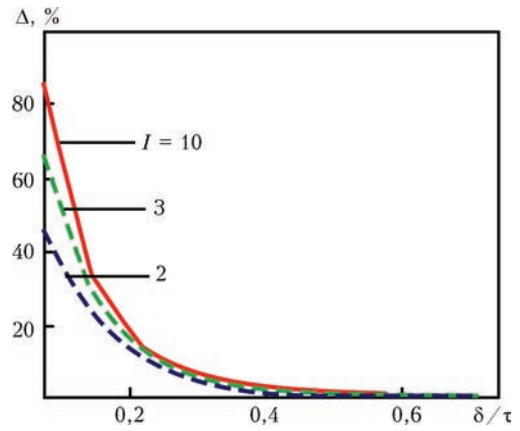


Рис. 6. Вплив аналогового накопичення на ширину робочої смуги частот

Двоканальний АЦП. Для підвищення точності вимірювання амплітудних параметрів приймача розроблено 24-розрядний АЦП (рис. 7) на основі мікросхеми AD7760.

Цифрова обробка результатів зондування. Сучасні алгоритми цифрової обробки радіолокаційних сигналів є продуктивним інструментом, який дає змогу суттєво покращити характеристики радіолокаційної системи. Особливо це стосується георадіолокації, в якій умови поширення сигналів зондування вкрай складні. Серед завдань, які розглядались виконавцями проекту, є визначення товщини шарів шаруватих середовищ (наприклад, задачі неруйнівного контролю стану доріг), виявлення підповерхневих (невидимих з поверхні) тріщин у монолітних блоках, та пошук і визначення габаритів, форми і др. підповерхневих дефектів.

Застосування георадарів з НШС імпульсними сигналами для виявлення та ідентифікації неоднорідностей діелектричної проникності в середовищах зі значним поглинанням і дисперсією накладає ряд специфічних обмежень на методи обробки відбитих сигналів. Зокрема, швидкість поширення радіохвиль в дисперсійних неоднорідних середовищах не є постійною, що зумовлює труднощі у визначенні справжніх відстаней до об'єктів пошуку. Крім того, велика частина ґрунтів складається з середовищ, що мають значну дисперсію та поглинання, які змінюються зі зміною вмісту води в шарах вздовж траси поширення сигналу. Тому для досягнення більшої глибини зондування доводиться застосовувати імпульси наносекундно-

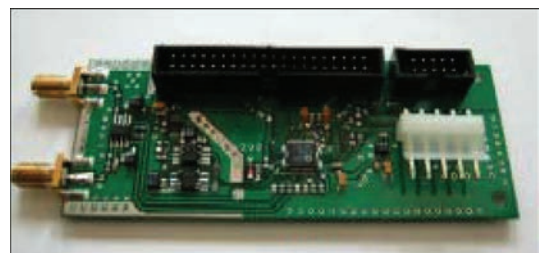


Рис. 7. Експериментальний зразок аналого-цифрового перетворювача

го діапазону тривалості. Ці імпульси мають просторову довжину (тривалість у часі, помножена на швидкість поширення електромагнітної хвилі), яка перевищує відстань між границями шару. Тому при застосуванні таких імпульсів без додаткових прийомів цифрової обробки сигналів роздільна здатність виявляється недостатньою для практичних потреб.

В задачах визначення радіолокаційними методами товщини шарів, товщини яких менше просторової довжини сигналу, у відбитому сигналі спостерігається інтерференційна картина, на якій без додаткових припущень неможливо розділити відбиття від кожної з границь окремо.

Проблема вирішується, якщо врахувати той факт, що відстань від поверхні середовища до його нижньої границі невелика (приблизно одиниці або десятки сантиметрів). При цьому рівень відбитого сигналу на вході приймача георадара на 20...30 дБ перевищує рівень власного шуму приймача. При таких співвідношеннях сигнал/шум виявляється ефективною нелінійна гомоморфна обробка сигналів [14].

Результати обробки сигналів за цим алгоритмом продемонстрували, що за умов великого співвідношення сигнал/шум нелінійна гомоморфна обробка сигналів є перспективною для ідентифікації близько розташованих границь підповерхневих структур. Але при використанні цього алгоритму для визначення границь за результатами експериментів виникли проблеми, обумовлені викривленнями форми відбитих сигналів через слабку контрастність.

Алгоритм пошарового визначення товщини шарів. Під час виконання досліджень на прикладі визначення товщини шарів дорожнього покриття дістав подальшого розвитку алгоритм пошарового визначення товщини шарів [15]. Використання цього методу для обробки георадарних даних, отриманих георадаром «ОДЯГ» при моніторингу відновленого дорожнього асфальтобетонного покриття, довело ефективність його застосування.

Метод мікрохвильової томографії. Радіолокаційні зображення (радарограми) локальних неоднорідностей, якими є тріщини або зони відмінної щільності, мають вигляд, який важко піддається ідентифікації. Це обумовлено способом збору георадарних даних. Для отримання більш зрозумілого зображення використовують алгоритми просторової обробки результатів зондування, до яких можна віднести алгоритм міграції, голографічний або мікрохвильової томографії. Останній був протестований на георадарних даних, отриманих з використанням розробленого експериментального зразка георадара на підготовленому полігоні (рис. 8).

Первинну радарограму (рис. 9, а) було оброблено за алгоритмом томографічної обробки. Ре-

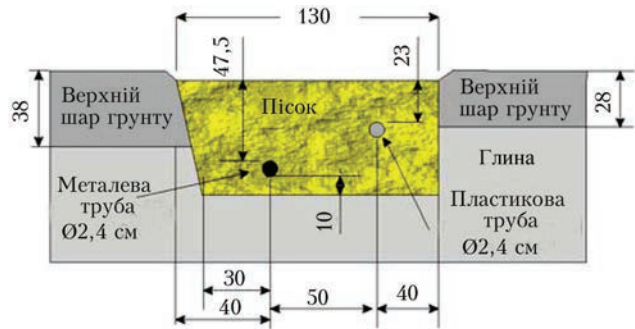


Рис. 8. Підповерхнева структура полігону (схема)

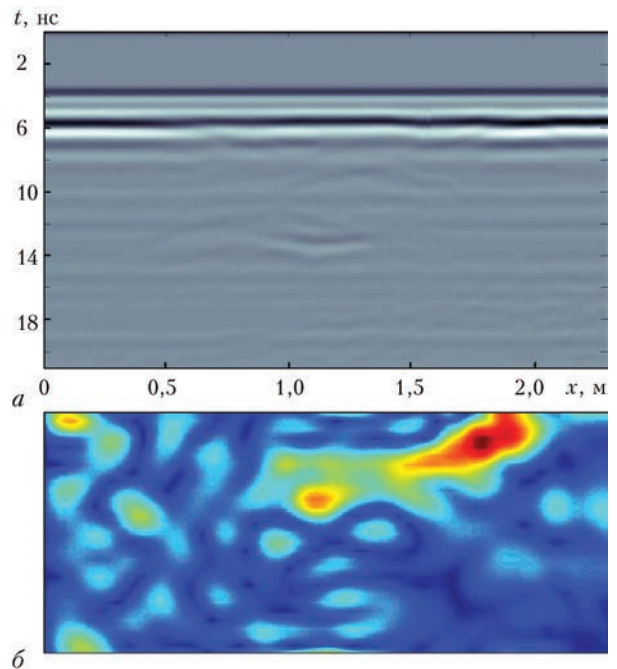


Рис. 9. Необроблена радарограма (а) та результат томографічної обробки (б)

зультат (рис. 9, б) продемонстрував, що зображення металеві труби (контрастного об'єкта) фокусується відносно добре. Помітними є також схили траншеї. Але діелектрична труба залишилась малопомітною.

Таким чином, підхід мікрохвильової томографії є перспективним, але потребує додаткових досліджень, метою яких є відновлення більш реалістичної картини підповерхневої структури об'єктів.

Тестування георадара. Виявлення тріщин. Розпочаті на першому етапі теоретичні дослідження стосовно виявлення тріщин було продовжено експериментально. Для експериментального дослідження з метою впровадження способу виявлення тріщин у асфальтобетонному покритті [9] було виготовлено приймально-передавальну пару надширококутних навантажених антен з експоненціальною щільною, які розміщено на юстирувальній основі (рис. 10). Після тестових випробувань цю антенну систему було застосовано в експериментах, в яких були задіяні асфальтобетонні блоки (рис. 11). З блоків утворювались поверхневі та підповерхневі тріщини різного роз-



Рис. 10. Приемально-передавальна антенна система для виявлення тріщин



Рис. 11. Асфальтобетонні блоки на щебені

криву та на різних глибинах, які в подальшому виявлялись георадіолокаційною апаратурою.

Результати тестування демонструють рис. 12 – рис. 15. Вони показують відбиті сигнали, які формуються при відбитті від тріщин при відповідних орієнтаціях антен та тріщин. Рис. 12 показує, що навіть якщо підповерхнева тріщина розташована вздовж передавальної антени, відбиття існує. Відбитий сигнал спостерігається в часовому інтервалі 1...4 нс. Якщо зорієнтувати передавальну антену під кутом 45° до тріщини, у відбитому сигналі з'являється крос-поляризована компонента, яка зумовлює потужний (до 0,12 В) сигнал (рис. 13) в

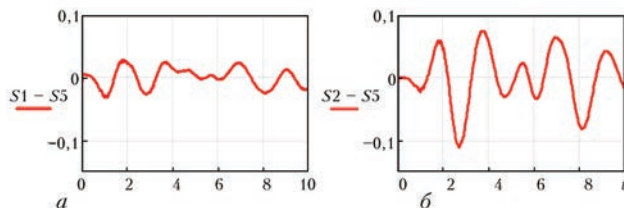


Рис. 12. Передавальна антена вздовж підповерхневої тріщини (а) та під кутом 45° до неї (б)

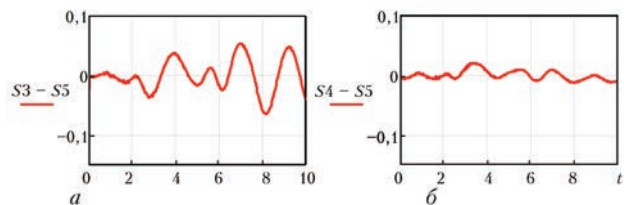


Рис. 13. Передавальна антена під кутом 45° до тріщини (а) та вздовж неї (б) (тріщина на поверхні)

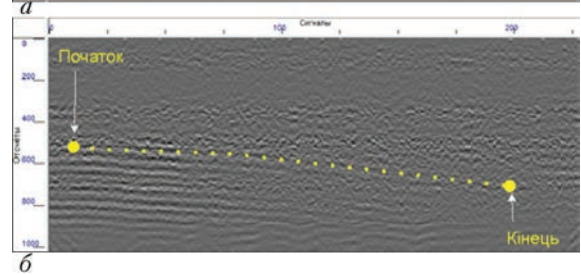
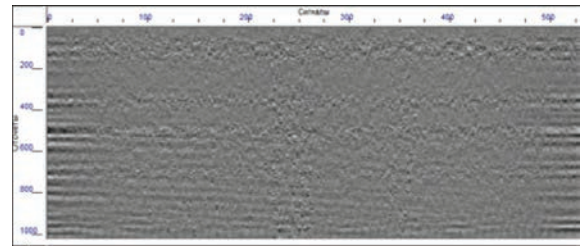


Рис. 14. Радіолокаційні профілі прихованого діелектричного об'єкта при зондуванні: а – без накопичення; б – з накопиченням п'яти сигналів

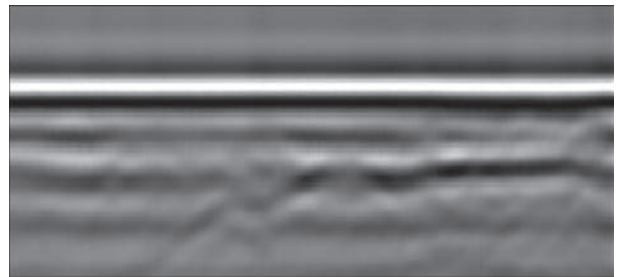


Рис. 15. Зондування та радарограма перетину доріг

приймальної антени. Цього цілком достатньо для виявлення тріщини.

Виявлення слабконтрастних об'єктів. За допомогою георадара, який працює в режимі з аналоговим накопиченням, проведені експерименти з виявлення слабконтрастних, заритих у ґрунті об'єктів [16]. Рис. 14 показує відповідні радарограми, записані в режимі з накопиченням і без накопичення. Помітно, що при накопиченні, зображення об'єктів (лінії, що нахилені) більш контрастні, ніж в радарограмі, записаній без накопичення, що свідчить про ефективність застосування аналогового накопичення.

Моніторинг відновленого та добудованого дорожнього полотна. При виконанні моніторингу структури відновленого та добудованого дорожнього покриття (рис. 15) було визначено, що поверхневий шар є однорідним, рівної товщини 5 см. Під поверхнею на глибині приблизно 0,5 м помітно ущільнення, що відповідає дорожньому полотну, яке існувало до ремонтних робіт.

Висновки

Таким чином, в роботі було виконано дослідження, що дають змогу покращити технічні характеристики георадара: глибину зондування, роздільну здатність, якість обробки та відображення отримуваної георадіолокаційної інформації, а також було проведено роботу щодо впровадження результатів досліджень.

Результати за окремими напрямками робіт:

- проаналізовано можливості методів обробки результатів зондування: гомоморфної ідентифікації границь розділу шаруватих середовищ, поширеного визначення товщини шарів дорожнього покриття, мікрохвильової томографії, та визначено перспективність використання кожного з них для вирішення конкретних завдань підповерхневої радіолокації;
- оптимізовано НШС імпульсну передавально-приймальну навантажену антенну систему з розв'язкою та трансформатор до неї;
- розроблено та перевірено функціонування та характеристики циклічної цифрової лінії затримки з розширеним до 200 нс діапазоном затримок;
- досліджено вплив тривалості вибірки та аналогового накопичення на характеристики стробоскопічного перетворювача, визначено методи оптимізації та параметри змішувача, які забезпечують найбільш широкий робочий діапазон частот приймача, та зменшення рівня шумів внаслідок накопичення;
- розроблений експериментальний зразок георадара перевірено на задачах виявлення підповерхневих об'єктів різних типів.

1. *Ground penetrating radar for road structure evaluation and analysis.* <http://www.geophysical.com/roadinspection.htm>
2. *Concrete & Pavement.* // <http://www.sensoft.ca/Applications/Concrete-and-Pavement.aspx> Engineering geophysical surveys for highways. URL: http://www.geotechru.com/en/filemanager/download/446/road_inspection.pdf
3. *Engineering geophysical surveys for highways.* URL: http://www.geotechru.com/en/file_manager/download/466/road_inspection.pdf
4. *Пат. № 84188* Україна, МПК (2006) G01R 29/08 G01V 3/12. Спосіб визначення швидкості поширення електромагнітної хвилі в ґрунті / Г.П. Почанін, М.М. Головка. Заявл. 27.07.2006; Опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 5 с.
5. *Пат. № 81652* Україна, МПК7 (2006) H 01 Q 9/00 H 01 Q 19/10. Спосіб розв'язки між передавальним і приймаль-

ним модулями антенної системи / Ю.О. Копилов, С.О. Масалов, Г.П. Почанін; Заявл. 17.08.05; Опубл. 25.01.08, Бюл. № 2. – 4 с.

6. *Пат. № 95157* Україна, МПК (2006) H01Q 21/26. Поляриметрична антенна система надширокопосмугового радіолокатора підповерхневого зондування / П.В. Холод, Г.П. Почанін Заявл. 28.12.2009; Опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13, 2011.
7. *Пат. № 96241* Україна, МПК H04B 1/06. (2006.01) Стробоскопічний спосіб реєстрації сигналів / Г.П. Почанін, В.П. Рубан Заявл. 07.12.2010; Опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.
8. *[Електронний ресурс]* / G.P. Pochanin, V.P. Ruban, P.V. Kholod et al. // Журнал радіоелектроніки. – Електрон. журн. – 2013. – № 1. – С. 1–12. – Режим доступу: URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jan13/8/text.pdf>.
9. *Пат. № 81296* Україна, МПК .E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення та визначення місць знаходження у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті / Д.О. Батраков, А.Г. Батракова Г.П. Почанін; Заявл. 08.01.2013; Опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 10 с.
10. *Enlarging of power budget of ultrawideband radar* / G.P. Pochanin, V.P. Ruban, P.V. Kholod et al. // 6th Intern. conf. on «Recent Advances in Space Technologies-RAST2013» June 12–14, 2013. Istanbul (Turkey). – P. 213–216.
11. *UWB antenna with high isolation between transmitting and receiving modules* / G.P. Pochanin, A.A. Orlenko, P.V. Kholod et al. // Proc. of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13) September 16–20, 2013, Odessa, Ukraine. – P. 341–343.
12. *Дудник А.В.* Методы измерения и анализа джиттера в приемниках георадаров // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 1/2. – С. 51–57.
13. *Стробоскопическое преобразование сигналов при аналоговом накоплении* / В.П. Рубан, А.А.Шуба, А.Г. Почанін, Г.П. Почанін // Радиофизика и электроника. – 2014. – 19, № 4.
14. *Сытник О.В.* Textural Analysis of Cepstrum Images of Subsurface Structure // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – 70, № 1. – P. 87–94.
15. *Определение толщин слоев дорожной одежды методом георадиолокационного зондирования* / Батраков Д.О., Батракова А.Г., Головин Д.В. и др. // Физические основы приборостроения. – 2014. – 3, № 2. – С. 46–56.
16. *Analog Signal Processing for UWB Sounding* / V.P. Ruban, O.O. Shuba, O.G. Pochanin et al. // 7th Intern. conf. on «Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals» September 15–19, 2014, Kharkiv, Ukraine. – P. 55–58.

Requirements to energy characteristics of geo-radar equipment were analyzed, which ensure detection of defects under engineering facility surface and measurement of layered medium layer thickness. Method of subsurface crack detection in monolithic blocks was proposed and theoretically and experimentally studied. Program-controlled cyclic digital line was developed with delay range extended up to 200 ns. Method of increasing radar energy potential due to analog accumulation and application of array system with profound decoupling of transmitting and receiving modules was proposed and studied. Variants of targeted processing of georadar data were analyzed. A pilot sample of georadar was retrofitted and tried out at monitoring of the condition of road pavement. 16 References, 17 Figures.

Keywords: ultra-wideband ground penetrating radar, radarogram, radar monitoring, energy potential, subsurface structure

Поступила в редакцию
22.01.2016



**8-я Международная конференция
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

2–3 июня 2016

Тимишоара, Румыния

www.isim.ro