

В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

ГЕОРАДАРИ

© *Правда В. І., Мрачковський О. Д., Абрамович А. О., 2015*

Описано принципи побудови сучасних георадарів. Георадари використовуються для здійснення неруйнівного контролю стану дорожніх покриттів, у геологічних та археологічних розвідках. Георадари мають істотні переваги порівняно із іншими приладами контролю стану інженерних конструкцій. Наведено характеристики найпоширеніших приладів. Вказано переваги та недоліки кожного із принципів. Проаналізовано перспективні напрями і методи для створення нових георадарів.

Ключові слова: георадари, імпульсний метод, метод електромагнітної індукції.

V. I. Pravda, O. D. Mrachkovskyj, A. O. Abramovych
NTUU “KPI”, Kyiv, Ukraine

GROUND PENETRATING RADARS

© *Pravda V. I., Mrachkovskyj O. D., Abramovych A. O., 2015*

Georadars – a modern geophysical instrument, the use of which for non-destructive research allows monitoring environment at shallow depths with high detail, making it unique among other geophysical equipment.

The method is the reflection of electromagnetic waves radiated from the interface layers with different dielectric constants.

These limits can be both geological features and local heterogeneity of various origins (voids). Georadars consists of three main parts: antenna unit (consisting of the transmitting and receiving antennas), received signal processing unit and computing unit for visualization and interpretation of data. The maximum depth of 50 meters is limited research in the environment of low attenuation (dry soil).

Georadars working on the following principles:

- **Method of electromagnetic induction**
- **Pulse method**

The article is a description of existing principles of building modern ground penetrating radar, an indication of the positive and negative characteristics of each of them, prompting the current lineup and analysis of promising directions and methods for creating new ground penetrating radar.

Pulse method

Ground penetrating radar, built on this principle, using short duration pulses for remote sensing. In reflection of the heterogeneity of the study is a change of the signal depending on the electrical properties of heterogeneity. Used pulses of 100 nsec (low resolution at depths - 10-40 m) to 0.5 nsec (with high resolution up to 0.5 m).

Method of electromagnetic induction

Electromagnetic induction method can detect metal objects around them when creating an alternating electromagnetic field.

Use two sensor coils in the search, one of which is radiating, and the second - selection. Availability between metal coils changes inductive connection between them, therefore there is a difference signal in the receiving coil. The signal reflected from the metal changes its phase.

One of the most widely used ground penetrating radar device type is takoho company Schiebel AN19 / 2. Ground penetrating radar detects this type of 0.15 g of black metal to a depth of 10 cm and a typical anti-tank mine in a metal casing to a depth of 50 cm.

Further studies on the subject are as ground penetrating radar to develop methods for processing the received signal to be able to classify the type of target that is hidden in a dielectric medium.

Key words: ground penetrating radar, pulse method, method electromagnetic induction.

Вступ

Георадар – це сучасний геофізичний прилад, застосування якого для досліджень дає змогу проводити неруйнівний моніторинг середовища на малих глибинах з високою деталізацією, що робить його унікальним серед іншого геофізичного обладнання.

Основою методу георадіолокації є відбиття випромінюваної електромагнітної хвилі від межі поділу шарів з різною діелектричною проникністю. Такими межами можуть бути як геологічні об'єкти, так і локальні неоднорідності різного походження (пустоти).

Георадар складається з трьох основних частин: антенного блока (що складається з передавальної та приймальної антен), блока обробки отриманих сигналів та обчислювального блока для візуалізації та інтерпретації даних. Максимальна глибина досліджень обмежується 50 метрами в середовищі із малим загасанням сигналу (сухий ґрунт).

Георадари працюють за такими принципами:

- Метод електромагнітної індукції.
- Імпульсний метод.

Метою статті є опис принципів побудови сучасних георадарів, зазначення позитивних та негативних характеристик кожного з них, наведення їх модельного ряду та аналіз перспективних напрямів і методів для створення нових георадарів.

Імпульсний метод

Георадар, побудований за цим принципом, використовує імпульси малої тривалості для дистанційного зондування. У разі відбиття від досліджуваної неоднорідності відбувається зміна параметрів сигналу залежно від електричних властивостей неоднорідності. Використовуються імпульси тривалістю від 100 нс (з низькою роздільною здатністю на глибинах – 10–40 м) до 0.5 нс (з високою роздільною здатністю до 0.5 м). Комерційні георадари часто використовують ТЕМ – антени та “bow-tie” (“краватка-метелик”) антени [1]. За винятком окремих випадків (авіаційні радари), антена у більшості георадарів прилягає до землі. Експлуатаційні характеристики системи залежать від того, наскільки точно в блоці обробки враховується зміна форми імпульсів під час проходження через шар повітря–ґрунт [2]. Проникність радара обмежена через електромагнітні ослаблення, в межах від декількох метрів у сильнопровідному шарі до 50 метрів у матеріалах із малою провідністю (менше ніж 1 мСим/м) (пісок, гравій, гірська порода та прісна вода).

Основна обробка сигналів – фільтрація та усереднення форми сигналу – доступна у більшості георадарів і достатня для виконання більшості вимог з побудови зображення із великою деталізацією.

Для достовірного виявлення пустот, труб та інших заглиблених об'єктів значення діелектричної провідності повинно бути відомим для корелювання часової затримки під час проходження імпульсу від об'єкта до антени на різних глибинах.

У експериментах діелектрична проникність оцінюється одночасно з вимірюванням амплітуди та часової затримки з-за відбиття [3].

Георадар за імпульсним методом успішно використовується для розв'язання широкого кола задач:

1. У геології для:

- побудови геологічних розрізів, визначення меж пластів, рівня ґрунтових вод, картографування підземного рельєфу корінних порід;
- визначення меж поширення корисних копалин у кар'єрі, потужності розкриву, вивчення тріщин скельних порід, виявлення порожнин;
- виявлення ділянок розвитку небезпечних геологічних процесів (карсту, пустот, суфозій, зсувів тощо).

2. У комунальних службах:

- пошук і визначення комунікацій та мереж (металевих і пластикових!). Тільки георадаром можна знайти та визначити глибину залягання пластикових водопроводів, газопроводів, систем каналізації. Георадар визначає місця витоків, а також незаконних врізок у трубопроводах.

3. У промисловому і цивільному будівництві:

- для визначення якості та стану бетонних конструкцій (мостів, будівель тощо), виявлення зсувних зон, місця розташування інженерних мереж;
- для виявлення та обстеження арматури, внутрішнього каркаса бетонних конструкцій.

4. В екології та охороні навколишнього середовища:

- для оцінки забруднення ґрунтів, виявлення витоків з нафтопроводів, водопроводів, місць поховання екологічно небезпечних відходів.

5. В археології:

- традиційні археологічні методи не гарантують виявлення об'єкта на великих площах через значні трудовитрати і обмеження за часом. Тому для знаходження археологічних об'єктів, визначення меж їх поширення, обстеження об'єктів історичної та культурної спадщини активно використовується георадар.

6. У силових структурах:

- для виконання різних завдань, пов'язаних з пошуком і виявленням схованок і поховань, а також виявлення підкопів до особливо важливих об'єктів.

У наш час георадіолокаційний метод є найпродуктивнішим і серед інших геофізичних методів, застосовуваних для розв'язання інженерно-геологічних, гідрогеологічних, екологічних та геотехнічних задач.

Основні переваги:

- 1) можливість проведення досліджень без порушень цілісності ґрунту;
- 2) можливість виконання робіт на різних поверхнях – лід, сніг, асфальт, фундаменти, підвали будинків, пересічена місцевість тощо;
- 3) побудова тривимірних моделей зображень;
- 4) мінімальна кількість обслуговного персоналу – 1–2 ос.;
- 5) визначення та картографування підповерхневих неоднорідностей в режимі реального часу;
- 6) виявлення пустот.

Основний недолік:

- 1) імпульсні георадари не можуть ідентифікувати матеріал мішені (метал, дерево, пластик), що обмежує їх використання під час археологічних та геофізичних розвідок, а також у силових структурах.

Метод електромагнітної індукції

Метод електромагнітної індукції дозволяє виявляти металеві об'єкти завдяки створенню навколо них змінного електромагнітного поля.

Використовуються дві котушки у пошуковому датчику: одна випромінювальна, а друга приймальна. Котушки налаштовуються так, щоб на вході приймальної котушки рівень наведеного сигналу від передавальної котушки був мінімальним. Зменшення рівня сигналу у приймальній котушці від передавальної впливає на чутливість приладу до металевих об'єктів. Наявність металу між котушками змінює індуктивний зв'язок між ними, внаслідок цього з'являється різницевий сигнал у приймальній котушці. Сигнал, який відбивається від металу, змінює свою фазу [2].

Такі георадари здатні до селекції металів за типом – чорний, кольоровий. Через різні магнітні та електричні властивості чорних та кольорових металів фаза прийнятого синусоїдального сигналу змінює значення. Завдяки вимірюванню фази прийнятого сигналу можна класифікувати метал за типом – чорний, кольоровий.

Одним з найпоширеніших у світі георадарів такого типу є прилад фірми Schiebel AN19/2. Георадар цього типу виявляє 0,15 г чорного металу на глибині до 10 см, а типову протитанкову міну в металевому корпусі на глибині до 50 см.

Георадари, побудовані за таким принципом, масово виробляють різні фірми. Найкращі серійні зразки можуть фіксувати мідну монету діаметром 25 мм на відстані 40 см, а також їх легко можна відстроїти від впливу землі та металевого сміття. Прилади працюють на звукових частотах – одиниці, рідше десятки кілогерц [4].

Основна перевага:

1. Георадари можуть класифікувати мішень за типом металу (чорний або кольоровий метал).

Основні недоліки:

1. Високий рівень помилкових спрацювань через наявність різноманітного металевого сміття у ґрунті, а також іржа, високий рівень мінералізації окремих ділянок ґрунтів.

2. Неможливо використовувати такі георадари у тісному просторі, оскільки сканування полягає в розмахуванні антеною над досліджуваною поверхнею.

Модельний ряд георадарів

Розробленням георадарів нині займається порівняно велика кількість розробників. За тематикою георадарів регулярно проходять міжнародні конференції.

У табл. 1 наведено модельний ряд переносних імпульсних георадарів та характеристики антен, що використовуються.

У табл. 2 наведено модельний ряд георадарів методу електромагнітної індукції та характеристики їхніх антен.

Таблиця 1

Технічні параметри деяких найпоширеніших георадарів імпульсного методу

Фірма-виробник	Модель	Тип та характеристики антени		
1	2	3		
MALA	• Easy Locator • ProEx	Центральна частота, МГц	Глибина сканування, м	Роздільна здатність, см
		Easy Locator		
		350	2.5	3
		500	4	5
		ProEx		
		350	4	5
		500	2.5	3
“ГЕОЛОГО - РАЗВЕДКА”	• ТР-ГЕО-01-08 • Мирадор • ТР-ГЕО-02	Центральна частота, МГц	Глибина сканування, м	Роздільна здатність, см
		ТР-ГЕО-01-08		
		110-150	20	5-20
		Мирадор		
		1000	1	3-5
		ТР-ГЕО-02		
		300	2-5	10-20

1	2	3		
Utsi electronics	• Groundvue 2 • Groundvue 3 • Groundvue 5 • Groundvue 5C • Groundvue 6 • Groundvue 7	Центральна частота, МГц	Глибина сканування, м	Роздільна здатність, см
		Groundvue 2		
		30-100	20	20
		Groundvue 3		
		250	10	8
		400	5	4
		1000	1.5	2
		1500	1	1.5
		Groundvue 5		
		4000	0.5	0.5
		Groundvue 5C		
		6000	0.4	-
		Groundvue 6		
		10-30	200	-
		Groundvue 7		
		40	100	-

[7]

Таблиця 2

Технічні параметри найпоширеніших георадарів методу електромагнітної індукції [8]

Фірма-виробник	Назва моделі	Дальність виявлення на повітрі (монети діам. 25 мм / каски), см	Компенсація впливу мінералізації ґрунту: ручна / авто/ фіксована
АКА	Юниор	40/180	+/-/-
Minelab	Musketeer	30/80	+ /+/-
Garrett	ACE 250	20/60	-/-/+
Tesoro	Compadre	17/100	- /+/-
Fisher	1270	25/75	- /+ /+

Нові математичні методи обробки сигналів

Метод моментів використовується для розв'язування диференціальних та інтегральних рівнянь, він не потребує розділення області на малі частини однакової форми та розміру. Метод успішно працює для структур розміром не більше від декількох довжин хвиль, що суттєво обмежено обчислювальними ресурсами, необхідними для реалізації методу. Метод моментів зводить знаходження невідомої функції з операторного рівняння до розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Прагнення використати переваги різних обчислювальних процедур привело до створення гібридних методів обробки сигналів та використання асимптотичного наближення.

Гібридний метод моментів – фізичної оптики.

Використовується для моделювання складних структур великих розмірів. Метод моментів потребує значних обчислювальних затрат і використовується для моделювання резонансних об'єктів структури, а метод фізичної оптики використовується для моделювання об'єктів структури великих розмірів.

Основою для цього гібридного методу є інтегральні рівняння електричного та магнітного полів відносно невідомої поверхневої густини струму на поверхні ідеально провідного тіла.

Якщо поверхня S збігається з поверхнею ідеально провідного тіла, то на видимій частині S поверхневий електричний струм беруть такий самий, як і у випадку збудження нескінченної ідеально провідної площини, що дотична до поверхні тіла у цій точці, а на тінювій стороні приймають, що струм дорівнює нулю.

Гібридний метод моментів – геометричної оптики.

Цей метод використовується для визначення поля, відбитого від великих, порівняно із довжиною хвилі, об'єктів з достатньо плоскою поверхнею. Основна ідея полягає у припущенні, що промінь (хвиля), що падає, відбивається і розсіюється в кожній точці, як від площини.

Гібридний метод моментів – геометричної теорії дифракції.

Теорія геометричної дифракції – це один із найефективніших методів асимптотичного розв'язання задач дифракції на тілах складної конфігурації, розміри яких великі порівняно із довжиною хвилі. Ця теорія ґрунтується на представленні розсіяної від провідного тіла хвилі (променів) у вигляді суми відбитих і заломлених променів. Геометрична оптика враховує промені, що відбиті від плоских точок поверхні, а заломлені промені (хвилі) – розсіяні хвилі на ребрах, вершинах, кутах і дотичних до поверхні точках. Амплітуди і фази заломлених хвиль визначаються із розв'язання канонічних задач дифракції на сфері, конусі, параболоїді та інших тілах [9].

Висновки

За допомогою імпульсних георадарів обстежуються ділянки на виявлення пустот, здійснюється діагностика бетонних масивів на наявність вологості, виявляються дефекти залізничних магістралей та злітних смуг. Імпульсні георадари ефективні для виявлення металевих та неметалевих схованих мін, труб та інших об'єктів у ґрунті.

Георадари за методом електромагнітної індукції розвиваються у напрямку покращення класифікації типу металу мішені (залізо, мідь), що дуже актуально у геофізичних розвідках, а також для археологів та працівників міліції під час пошуків схованок з кольоровими металами.

Розроблення та вдосконалення георадарів актуальні й перспективні. Ведуться роботи з підвищення ймовірності виявлення мішеней, збільшення роздільної здатності приладів, покращення здатності розрізняти об'єкти між собою та підвищення швидкості обробки інформації. Це потребує розроблення нових алгоритмів обробки сигналу.

1. Congedo F., Monti G., Tarricone L. *Modified bowtie antenna for GPR applications* // IEEE Ground Penetrating Radar (GPR), 2010 13th International Conference. 2. Grinev A. Yu., Temchenko V. S., Ilyin E. V., Bagno D. V. *The restoration of road coats and related objects parameters based on method of computation diagnostics – Ground Penetrating Radar antennas dipole approximation* // IEEE Ground Penetrating Radar (GPR), 2010 13th International Conference. 3. Ihamouten A., Dérobert X., Villain G. *Electromagnetic dispersion estimated from multi-offset, ground-penetrating radar* // IEEE Ground Penetrating Radar (GPR), 2010 13th International Conference. 4. Щербачов Г. Н. *Выбор электромагнитного метода зондирования для поиска объектов в толще укрывающих сред* // Радиотехника. – 2005. – № 3. – С. 77–79. 5. Products // веб-сайт компанії “MALA” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.malags.com/products> (20.02.2015). – Мова англ. 6. Главная // веб-сайт компанії ООО “ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://trgeo.ru/> (20.02.2015). – Мова рос. 7. Products // веб-сайт компанії “Utsi Electronics Ltd”. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.utsielelectronics.co.uk/> (20.02.2015). – Мова англ. 8. Главная // веб-сайт компанії “detector” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://detector.kiev.ua/> (20.02.2015). – мова рос. 9. Гринев А. Ю. *Численные методы решения прикладных задач электродинамики: учеб. пособие.* – М.: Радиотехника, 2012. – 336 с.:ил.