



Teoría General de los Sistemas GPR

Alán Tiscareño Robledo

General theory of GPR systems

Recibido: mayo 11, 2009

Aceptado: julio 22, 2009

Palabras clave: Radar de penetración; pruebas no-destructivas; GPR

Abstract:

Ground penetration radar (GPR by its acronym in English) provides a method for non-destructive and non-invasive ground investigation, which offers efficient exploration work, mainly in the field of civil construction, forensics, archeology, among others. This article refers to the basic theory of GPR systems for buried object detection. We present briefly the history of the GPR system, its basic components and operation, and the influence of material characteristics in propagation and frequency detection depth of energy reflected from the edges of objects buried.

Keywords: Penetration radar; non-destructive testing; GPR

U

N sistema GPR es un dispositivo usado principalmente para exploración de suelos. Para su diseño se estudian técnicas utilizadas en electromagnetismo, medios de propagación con pérdidas, antenas de banda ancha, diseño de sistemas de radar, procesamiento de forma de onda y procesamiento de imágenes.

El rango de aplicaciones para métodos de GPR es completo y la sofisticación de técnicas de recuperación de señales y diseño de equipo ha estado creciendo como una tecnología madura.

Este artículo presenta en forma breve la historia del sistema GPR, sus componentes básicos y su funcionamiento, y la influencia de las características del material de propagación y la frecuencia en la profundidad de detección de energía reflejada de los bordes de objetos sepultados.

HISTORIA

La posibilidad de detectar objetos sepultados ha fascinado a la humanidad durante siglos [1]. Las técnicas que pueden hacer claramente visible el interior del suelo están basadas en ingeniería y métodos científicos. Se han desarrollado

equipos GPR de manera comercial desde las décadas de los años 1960's. El radar de impulso de onda ha sido el diseño más exitoso usado hasta la fecha. Históricamente se tienen los siguientes desarrollos:

- En 1904, Hñilsmeyer utiliza señales electromagnéticas para determinar si hay objetos metálicos enterrados.
- Hñilsenberck en 1926, desarrolla un trabajo aplicando técnicas de pulsos para determinar la estructura de objetos enterrados.
- En 1930, fueron desarrolladas nuevas técnicas de pulsos, utilizadas principalmente en agua fresca, verificación de profundidades en hielo, depósitos de sales, desiertos de arena y formaciones rocosas.
- En 1972, Rex Morey y Art Drake comienzan Geophysical Survey Systems Inc. para vender de forma comercial sistemas de penetración de suelos.
- En México tan sólo existe una empresa dedicada a hacer estudios de pavimentos y socavaciones con tecnología GPR: RadarTech de México SA de CV.

La humanidad siempre ha estado fascinada con la posibilidad de detectar objetos sepultados

Los campos de aplicación del sistema GPR se han incrementado con el avance de la tecnología y de algoritmos de procesamiento de datos. Algunos de los campos de aplicación son:

- Arqueología
- Construcción
- Detección de minas terrestres
- Ciencia forense
- Localización de tumbas
- Localización de fugas
- Caminos, carreteras y pavimentos
- Sedimentos
- Detección de túneles
- Agricultura
- Minería
- Hundimientos

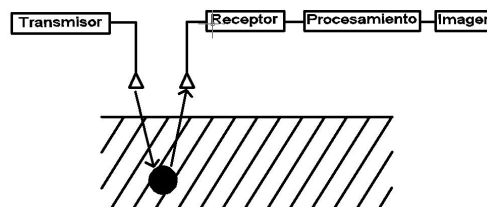


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema GPR.

ELEMENTOS BÁSICOS DEL SISTEMA GPR

El sistema está conformado como se muestra en la Figura 1 donde se presentan tres etapas principales: dispositivos electrónicos, antenas y medio de propagación [2].

El transmisor de la señal tiene como característica principal emitir impulsos del orden de nanosegundos, o de producir un amplio rango de tipos de modulación.

En el suelo se puede presentar cualquier discontinuidad dieléctrica. Los diferentes objetivos que podrían ser encontrados bajo la superficie pueden ser clasificados de acuerdo a su geometría: largo, objetos delgados, objetos cúbicos o esféricos.

Un sistema de recepción y procesamiento es capaz de localizar un tipo dado de objetivo y de producir una imagen de dicho objetivo.

La atenuación de la señal a la frecuencia de operación deseada, es el principal factor a ser considerado cuando se evalúa la utilidad de un radar en un material dado, como regla, el material que tiene un alto valor de conductividad a baja frecuencia tendrá una gran atenuación de la señal en su trayectoria de propagación.

El rango de aplicaciones para métodos de GPR es completo y la sofisticación de técnicas de recuperación de señales y diseño de equipo ha estado creciendo como una tecnología madura

Transmisión y recepción

El transmisor de la señal puede emitir en amplitud, frecuencia, modulación de fase y alta señal a ruido. La selección de frecuencia, ancho de banda; la tasa de repetición y energía dependerán de las pérdidas en el trayecto, dimensiones de los objetivos, requerimientos de resolución y profundidad, los cuales influyen en la elección de la técnica de modulación y por lo tanto en el diseño del sistema. Existe una serie de parámetros a considerar en el diseño de un sistema GPR, los más importantes serán mencionados a continuación .

Velocidad de propagación

Si la velocidad de propagación puede ser medible, se puede hacer una medida de profundidad o grosor para materiales homogéneos. La velocidad de propagación (en metros sobre segundos) está definida como:

$$v_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

y la medida de la profundidad o grosor está dada (en metros) por:

$$d = v_r \frac{t}{2} \quad (2)$$

donde ϵ_r es la permitividad relativa, t es el tiempo transcurrido desde que la energía penetra el suelo hasta que toca el objetivo. Si se incrementa la permitividad relativa, la velocidad de propagación decae, la longitud de onda λ dentro del material también decae con la siguiente proporción:

$$\lambda_m = \frac{v_r}{f} \quad (3)$$

Rango

El rango (alcance¹) de un GPR es gobernado por la pérdida total en el trayecto y sus tres principales contribuciones son: pérdida por tipo de material, pérdida de propagación y pérdida por dispersión.

La señal que es detectada por el receptor sufre varias pérdidas en el trayecto desde el transmisor hasta el receptor. El total de la pérdida en el trayecto es:

$$L_t = L_e + L_m + L_{t1} + L_{t2} + L_s + L_a + L_{sc} \quad (4)$$

donde:

L_e =Pérdida de eficiencia de la antena (dB)

L_m =Pérdida de desigualdad de la antena (dB)

L_{t1} =Pérdida por transmisión a través del aire (dB)

L_{t2} =Pérdida por retransmisión a través del aire (dB)

L_s =Pérdida por propagación de la antena (dB)

L_a =Pérdida por atenuación en material (dB)

L_{sc} =Pérdida por dispersión en el objeto (dB).

Un sistema de recepción y procesamiento es capaz de localizar un tipo dado de objetivo y de producir una imagen de dicho objetivo

Desorden

El desorden que afecta un sistema GPR es definido como todas esas señales que no son relacionadas con las características de dispersión de los objetivos, pero ocurren en la misma ventana de tiempo y tienen características espectrales similares que las reflejadas por el objetivo.

Este tipo de señal de desorden puede ser causada por el lapso entre transmitir y recibir así como múltiples reflexiones entre la antena y el suelo. El desorden varía de acuerdo con el tipo de configuración de la antena, es más significativo a cortos rangos de tiempo y disminuyen en tiempos más grandes.

La antena receptora debe manejar las modulaciones adecuadas y un rango dinámico para pérdidas de trayecto. El ancho de banda B del receptor puede ser determinado considerando la energía del espectro recibido, la cual resulta de la transformada de Fourier de la señal wavelet recibida.

Si se tienen varias capas en el medio de propagación, la señal reflejada desde la interfase, regresará combinada con otras longitudes, como se muestra en la Figura 2. En algunas circunstancias es necesario utilizar un proceso de deconvolución para reconocer las respuestas de cada interfase.

¹ Nota del editor.

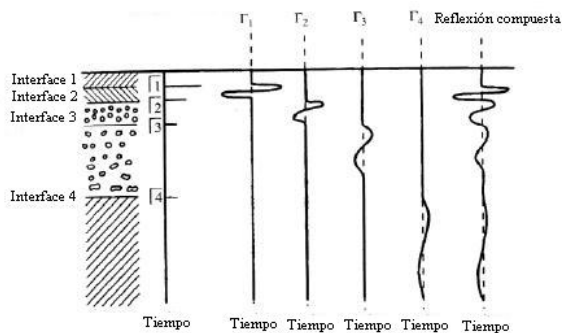


Figura 2. Convolución de interfase con múltiples reflexiones.

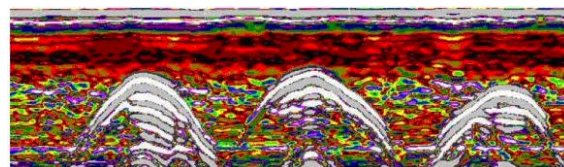


Figura 3. Procesamiento de señal de dispersión de tres objetos



Figura 4. Planta de radiación de una fuente isotrópica.

Los campos de aplicación del sistema GPR se han incrementado con el avance de la tecnología y de algoritmos de procesamiento de datos

- Una adecuada relación profundidad-objetivos.

Otra aplicación de GPR es la medición de capas terrestres. Es posible determinar la profundidad, midiendo el tiempo transcurrido entre el primer borde de la señal recibida y un tiempo de referencia.

Se requiere una señal con un gran ancho de banda para poder distinguir entre varios objetivos y poder mostrar su estructura.

Una gran resolución de profundidad es alcanzada en materiales líquidos para un ancho de banda transmitido; para materiales como tierra con un significativo contenido de agua, tiende a tener altas propiedades de atenuación. Estas características disminuyen el ancho de banda efectivo de modo que, la resolución es aproximadamente independiente de la pérdida dentro del material de propagación.

Resolución de planta

El efecto de la resolución de planta sobre la tierra puede ser vista en la Figura 4, donde se tienen varias imágenes de planta paralelas horizontalmente, las cuales fueron muestreadas a 5 cm de separación. Para alcanzar una resolución de planta aceptable se requiere una alta ganancia de antena, significativa apertura en la más baja frecuencia transmitida y un eficiente procesamiento. Estas técnicas típicamente requieren mediciones usando pares de receptores y transmisores, a un número determinado de posiciones para así poder generar una apertura sintética. La resolución de planta se mejora a medida que incrementa

Es importante definir los parámetros de los objetos a ser analizados ya que hay una considerable diferencia de respuesta entre diferentes objetivos tales como: tubería, mina, hueco, etc. Este es el mayor impacto sobre el diseño de la antena así como el estado de la polarización, propiedades de los materiales y las estrategias del procesamiento de señales. El desplegado en pantalla de imágenes necesita un procesamiento de señal diferente que el requerido por el procesamiento para identificación y clasificación de objetos. Una imagen típica de un sistema GPR se muestra en la Figura 3. En esta imagen se muestra la propagación de la señal electromagnética pasando por la sección transversal de tres diferentes objetos sepultados. El procesamiento de señales debe tomar en cuenta las necesidades del usuario y existe la consideración de que el proceso de interpretación de señales debe ser automático. Para operar eficientemente se deben tener en cuenta cuatro aspectos:

- Relación de señal-dispersión.
- Relación señal a ruido.
- Una adecuada resolución espacial de objetivos.

la atenuación, asumiendo que hay suficiente señal para discriminar bajo condiciones de alto desorden.

Método de diferencias finitas en dominio del tiempo

Este método (FDTD por sus siglas en inglés, finite-difference time domain) es utilizado para modelar el campo de propagación de un sistema GPR típico [5]. Este método ofrece la posibilidad de investigar el rendimiento de un amplio rango de antenas operando en presencia de suelo a cierta distancia, el cual ofrece la ventaja de reducir significativamente el trabajo de procesamiento. Para problemas de propagación de ondas electromagnéticas, FDTD tiene ciertas ventajas sobre algunos modelados numéricos, tales como:

- No requiere de la solución de funciones de Green.
- Implementa directamente las ecuaciones de Maxwell de campo electromagnético para tres dimensiones sin la necesidad de evaluar potenciales eléctricos o magnéticos.
- Permite diferentes tipos de respuestas a modelar: dispersión, propagación, efectos de superficie, corrientes, densidad de energía.
- Incorpora cambios en las propiedades de los materiales sin necesidad de cambiar el esquema de descripción matemático.
- Incluye la geometría en tres dimensiones, características de materiales y diseño sofisticado de antenas, así como el uso de diferentes tipos de ejes y diseños.

El modelo es subdividido en células de campo en tres dimensiones (ortogonales) Δx , Δy , Δz . El campo eléctrico y magnético dentro de cada célula esta descrito por componentes cartesianas $E(x, y, z)$ y $H(x, y, z)$ de campo vectorial escalonado en el espacio en una forma referida como célula Yee [3] como se muestra en la Figura 5. Con el uso de aproximación de diferencia finita para la forma diferencial de las ecuaciones de campo electromagnético de Maxwell, es posible calcular el campo eléctrico en cualquier punto del espacio. Para simular la superficie física, se toman en cuenta las propiedades del material (permeabilidad, permitividad y conductividad) y la geometría de la estructura, por grupos de células que comparten las mismas propiedades.

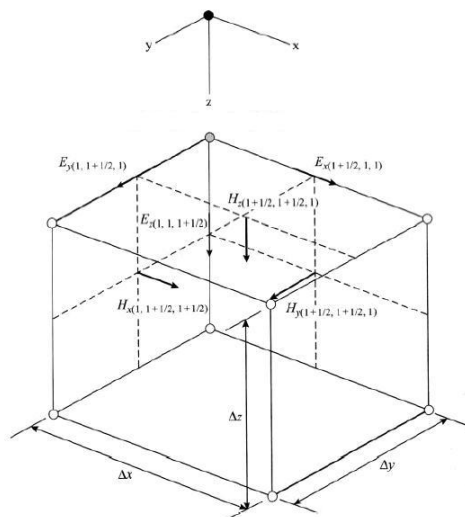


Figura 5. Célula Yee con componentes cartesianas magnéticas y eléctricas escalonadas en el espacio.

Tabla 1. Características dieléctricas de varios materiales a 100MHz.

Material	Conductividad S/m	Permeabilidad reactiva
Aire	0	1
Asfalto seco	$10^{-2} : 10^{-1}$	2-4
Asfalto humedo	$10^{-3} : 10^{-1}$	6-12
Concreto seco	$10^{-3} : 10^{-2}$	4-10
Concreto humedo	$10^{-2} : 10^{-1}$	10-20
Arena seca	$10^{-7} : 10^{-3}$	2-6
Arena humeda	$10^{-3} : 10^{-2}$	10-30
Agua de mar	10^2	81

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

La atenuación de radiación electromagnética se incrementa con la frecuencia. A una frecuencia dada los materiales húmedos exhiben una mayor pérdida que los materiales secos [4]. La velocidad de propagación es gobernada por la permitividad relativa del material, la cual depende del contenido de agua. La Tabla 1 muestra el rango de las características dieléctricas para diferentes materiales a una frecuencia central de 100 MHz.

Para simular la superficie física, se toman en cuenta las propiedades del material (permeabilidad, permitividad y conductividad) y la geometría de la estructura, por grupos de células que comparten las mismas propiedades

Los materiales que contienen una cantidad aceptable de humedad se comportarán como conductores dieléctricos, especialmente si el agua está ionizada. En el espacio libre la susceptibilidad magnética y la permitividad eléctrica son constantes.

La velocidad de propagación está definida

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (5)$$

donde:

μ =Susceptibilidad magnética absoluta del medio $\mu = \mu_0\mu_r$.

ϵ =Permitividad eléctrica absoluta $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$.

μ_0 =Susceptibilidad magnética absoluta del espacio libre ($1.26 \times 10^{-6} \text{Hm}^{-1}$).

ϵ_0 =Permitividad eléctrica absoluta del espacio libre ($8.86 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$).

μ_r =Susceptibilidad magnética relativa.

ϵ_r =Permitividad relativa.

La impedancia intrínseca de los materiales está dada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (6)$$

Una onda propagada en dirección positiva del eje z en un dieléctrico perfecto puede ser descrita por:

$$E(z) = E_0 e^{-jkz} \quad (7)$$

donde la constante de fase es

$$k = \frac{\omega}{v} = v\sqrt{\mu\epsilon} \quad (8)$$

la cual se considera como una constante del medio para una frecuencia particular, o como el factor de propagación para el medio.

Para materiales dieléctricos con pérdidas, la absorción de radiación electromagnética es causada por conducción y efectos dieléctricos. No es posible distinguir las componentes separadas de pérdidas para cada material por medio de mediciones a una única frecuencia.

Para la mayoría de materiales la respuesta magnética es débil y necesita ser considerada como una cantidad compleja. La permitividad compleja (ϵ) y la conductividad compleja (σ) están expresadas por

$$\epsilon = \epsilon - j\epsilon \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma - j\sigma. \quad (10)$$

Para conductores dieléctricos, los parámetros serán la permitividad y la conductividad aparente

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_e - j\epsilon_e \quad (11)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_e - j\sigma_e. \quad (12)$$

La propagación de un campo electromagnético E_0 con $z = 0$ y $t = 0$ en un conductor dieléctrico puede ser descrito por:

$$E(z,t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j(\omega t - \beta z)}. \quad (13)$$

La primera exponencial de la función es el término de atenuación y el segundo es el término de propagación. Para el término de atenuación a una distancia $z = 1/\alpha$ la atenuación es $1/e$, esta distancia es conocida como profundidad capilar, la cual indica cuál es la penetración de un sistema GPR.

En cualquier estimación de nivel de señal recibida es necesario considerar los coeficientes de reflexión y transmisión, así como los pasos a través de los dieléctricos hasta el objetivo como se muestra en la Figura 6. Para esto se necesita considerar la impedancia intrínseca de diferentes materiales. En el límite de una segunda capa, cierta energía será reflejada y el resto transmitida. La fuerza de campo reflejada esta dada por:

$$r = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \quad (14)$$

donde η_1 y η_2 son las impedancias de los medios 1 y 2 respectivamente.

La amplitud de la señal reflejada por el objetivo es afectada por la propagación dieléctrica del material, las características geométricas del objetivo y sus parámetros dieléctricos.

El comportamiento de materiales creados por el hombre generalmente es complicado ya que muestra propiedades dieléctricas y conductivas. Sus características electromagnéticas son controladas por el comportamiento a micro escala de los elementos que componen el material.

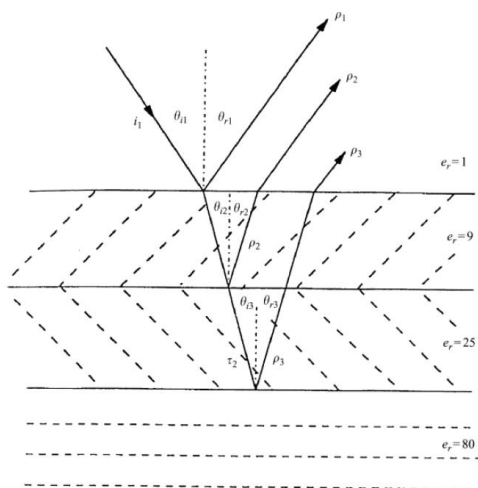


Figura 6. Dieléctrico multicapa

Tabla 2. Aplicaciones para diferentes frecuencias centrales.

Frec. (MHz)	Prof. (m)	Aplicación
2000	0 – 0.75	Evaluación de asfalto
2300	0.4	Pruebas sobre concreto
900	0 – 1	Detección de minas, huecos
270	0 – 6	Huecos, tuberías, geología
100	2 – 15	Tuberías, geología, minería

FRECUENCIAS Y PROFUNDIDAD

Los sistemas GPR varían según su frecuencia central de operación. Dependiendo la frecuencia (ver Tabla 2) se tiene una profundidad de penetración y aplicación [6].

CONCLUSIONES

En este artículo se revisó brevemente la teoría básica e introductoria para el entendimiento del funcionamiento del sistema GPR. El sistema consta de un transmisor que emite una onda electromagnética a cierta frecuencia cuya amplitud y fase cambia dependiendo de las propiedades eléctricas del medio de propagación. Parte de la energía de la onda electromagnética es reflejada hacia el receptor del sistema GPR que debe ser procesada para la detección e identificación de las propiedades físicas del objeto sepultado. Esta tecnología es muy útil cuando es necesario investigar objetos sepul-

tados sin la necesidad de perturbar el medio en el que se encuentra encerrado. Una aplicación muy importante en la que se está trabajando es la identificación y estado de los elementos de la red de agua potable de la Ciudad de Zacatecas en el suelo con un máximo de 4 metros de profundidad sin la necesidad de hacer excavaciones costosas. Este sistema es realmente un método de investigación no-destructivo y no-invasivo con una amplia gama de campos de aplicación.

Bibliografía

- [1] David J. Daniels, Ground Penetrating Radar, 2th edition, 2004, pp: 5-9.
- [2] <http://wi-fiplanet.webopedia.com/TERM/G/GPR.html>
- [3] Yee, K. S.: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media, IEEE Trans. Antennas Propag., 1966, 14 (2), pp. 302-307.
- [4] Pelinski, N. R., Ulaby, F. T., and Dobson, M. C.: Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3 GHz range, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1995, pp. 803-807.
- [5] Gousui, L., Hong, G., and Weimin, S.: Development of random signal radars, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1999, pp. 770-777.
- [6] <http://www.metalfind.net/en/index.php?page=productsgeorada>

Acerca del autor o autores

Alán Tiscareño Robledo es estudiante de la Maestría en Ingeniería con orientación en Procesamiento Digital de Señales, de la Fac. de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Su interés se centra en el estudio y desarrollo de los sistemas GPR para resolver problemas de distribución de agua potable en la región.