

# ELETROMAGNETISMO COMPUTACIONAL

## TRABALHO COMPUTACIONAL 4

### Propagação de ondas

**Objetivo:** Nesse trabalho, iremos verificar o comportamento das ondas eletromagnéticas apresentado em sala e analisar como tal comportamento pode ser utilizado na realização de ensaios não destrutivos para a caracterização de solos e objetos enterrados.

### 1. INTRODUÇÃO

GPR é a sigla para Ground Penetrating Radar (cuja tradução é “Radar de penetração no solo”), às vezes conhecido como georradar, e se trata de um método geofísico que usa ondas eletromagnéticas na faixa de radiofrequência (10 - 3000 MHz), produzidas e captadas por antenas. Os princípios básicos desse método podem ser entendidos pelo fenômeno de propagação de ondas da Fig. 1. Como se sabe, uma onda que trafega em um meio com determinadas propriedades eletromagnéticas, ao encontrar uma descontinuidade (i.e., um meio com ao menos uma das propriedades diferente), tem uma parte de sua energia transmitida para o outro meio, e outra fração refletida. Captando-se essa porção refletida, e medindo-se o tempo gasto para isso (ida e volta), é possível ter uma noção de que há “alguma coisa lá em baixo” (como um objeto enterrado, uma mudança de camadas etc.) e, possivelmente, a profundidade em que isso se encontra.



FIGURA 1. Princípio de medição de um sistema GPR [1]

Um sistema GPR é composto por uma unidade de controle, que envia um sinal à antena transmissora, a qual, por sua vez, transmite-o ao meio. Uma antena receptora que capta as ondas refletidas, e mede sua amplitude e o tempo (de ida e

volta) gasto para recebê-lo, e envia-o novamente à unidade de controle para outras operações (como digitalização, armazenamento para pós-processamento etc.).

Ecos do sinal emitido pela antena transmissora são percebidos pela antena receptora em instantes de tempo distintos (devido aos diferentes caminhos das ondas refletidas). Esboçar as amplitudes lidas como função do tempo resulta em um traço. A Fig. 2a ilustra um exemplo. As “curvas” mais pronunciadas ocorrem nos pontos de maior amplitude do sinal, o qual é traçado como tensão (ou campo elétrico) como função do tempo. Sinais que consistem de apenas um traço são chamados de A-scan. Eles são coletados mantendo-se as antenas (transmissora e receptora) em posições fixas. Quando as antenas são movimentadas ao longo de uma linha, obtêm-se vários traços do solo, os, quais, em conjunto, formam um radargrama. Nesse caso, cada traço é disposto lado a lado como uma imagem, de modo que a cor (ou a tonalidade) dependa do valor relativo do sinal em cada ponto (Fig. 2b). Sinais assim são chamados B-scan. Por fim, é possível estender as ideias para sinais de três dimensões, os chamados C-scan.

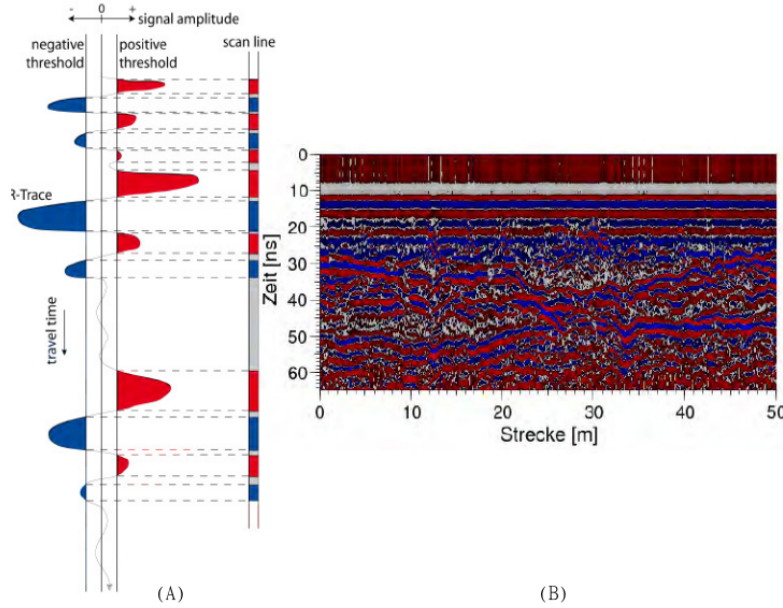


FIGURA 2. Exemplo de medidas realizadas com um GPR - (a) Traço único (A-scan), (b) Radargrama (B-scan)

## 2. O GPRMAX

Para as simulações desse trabalho, utilizaremos a parte bidimensional do programa GprMax [2]. O GprMax é um programa gratuito de cálculo de campos eletromagnéticos baseado no método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) especialmente desenvolvido para aplicações de GPR. Todas as informações necessárias para o uso do programa estão disponíveis no manual [2] que se encontra dentro da pasta do programa no portal da disciplina. Leia cuidadosamente os capítulos 1, 2, 3 e 5 (apenas exemplo 1) do manual, juntamente com os apêndices A,

B e C. Como o GPRMAX não tem interface gráfica, os resultados obtidos deverão ser exportados para o matlab para serem analisados. Felizmente, a pasta “Tools” do programa disponibiliza a função “gprmax.m” que importa automaticamente os resultados gerados pelo GprMax. Outra questão importante diz respeito ao tipo de fonte utilizada para gerar os campos elétricos. No caso bidimensional, o campo é gerado por uma linha infinita de corrente. Assim, a onda eletromagnética gerada não será uma onda plana e sim uma onda cilíndrica. Como consequência, a intensidade dos campos diminui à medida que nos afastamos da fonte. Quando a distância é muito maior que o comprimento de onda da fonte, os campos são proporcionais a  $1/\sqrt{kd}$  onde  $k$  é o número de onda e  $d$  é a distância radial em relação à fonte.

### 3. SIMULAÇÕES

Utilizando os mesmos domínio, discretização, janela de tempo e tipo de fonte do problema do vergalhão imerso no concreto presente no manual, faça as seguintes simulações correlacionando os resultados obtidos com o comportamento das ondas estudado no cap 7 de [3].

**3.1. Propagação no espaço livre.** Assuma que o domínio do problema é completamente preenchido por ar e que a fonte está no centro do domínio. Para esse problema faça:

- Utilize quatro receptores (Rx) igualmente distribuídos ao longo de círculo de raio igual a  $0,1m$ . Plote os traços dos campos elétrico e magnético e encontre o vetor de Poynting em cada ponto (amplitude e orientação).
- Modifique o modelo anterior colocando a fonte na posição  $(x = 0,1m; y = 0,15m)$  e os receptores nos pontos  $(0,1m; 0,15m)$ ,  $(0,2m; 0,15m)$ ,  $(0,3m; 0,15m)$  e  $(0,4m; 0,15m)$ . Mostre como você estimaria a velocidade de fase e a impedância intrínseca do meio a partir dos traços obtidos. Comente os resultados

**3.2. Propagação em um dielétrico com perdas.** Repita a letra b) do problema anterior substituindo o espaço livre por água do mar. Quais as principais diferenças você pode observar em relação ao problema anterior?

**3.3. Reflexão e transmissão na interface entre materiais dielétricos.** Assuma que a parte superior do domínio é composta por ar enquanto a parte inferior é preenchida com uma mistura de concreto com características ( $\epsilon_r = 6.2$ ,  $\mu_r = 1.0$ ,  $\sigma = 0.0$ ). Imagine que você não saiba o valor de  $\epsilon_r$  à priori mas conhece as demais características do material. Posicionando a linha de corrente no centro da camada de ar, desenvolva um procedimento para obter o valor de  $\epsilon_r$  a partir das medições obtidas. Utilize quantos receptores Rx você julgar necessário. Lembre-se que em aplicações reais com o GPR, não seria possível colocar os receptores dentro do concreto. Logo, não serão aceitas soluções que utilizem receptores dentro do concreto.

**3.4. Reflexão em materiais condutores perfeitos.** Repita a geometria do problema anterior substituindo a região composta por concreto por um condutor elétrico perfeito e o pulso por uma onda senoidal pura a 900 MHz. Estime as regiões onde a interferência entre a onda incidente e a onda refletida será máxima e mínima. Utilize os receptores para gerar os traços na vizinhança dessas regiões (no mínimo três curvas próximas de um ponto de máximo e outras três próximas no ponto de mínimo).

**3.5. Análise de um radargrama.** Deseja-se encontrar uma tubulação metálica enterrada em um solo de propriedades desconhecidas. Embora a localização e profundidade da tubulação sejam desconhecidas, a direção da tubulação é bem definida. Adicionalmente, sabe-se que o solo na região de interesse é bem homogêneo e possui condutividade elétrica e características magnéticas desprezíveis. Com essas informações, um engenheiro realizou uma varredura com um GPR ao longo de uma linha de 10 m de comprimento (ortogonal à suposta orientação da tubulação) e obteve o radargrama disponível no arquivo *analysismodel.sca*. As configurações utilizadas no ensaio foram:

- altura da antena em relação ao solo igual a 0.30 m,
- espaçamento entre os pontos de medição 0.20 m,
- posição do primeiro ponto ( $x_1$ ) igual a 0.20 m,
- número de amostras igual a 49,
- tipo de antena: linha de corrente (usada tanto com Tx quanto Rx)
- tipo de pulso: Ricker (900 MHz).

Como a antena transmissora é também a antena receptora, não é possível utilizar receptores arbitrários (como realizado na seção 3.3). Dessa forma, para se obter o valor do  $\epsilon_r$  do solo foi realizado um pré-ensaio de calibração [4]. O ensaio consiste em colocar uma placa metálica sobre a superfície de interesse e obter o traço correspondente. Assumindo que a superfície se comporta como um condutor perfeito com espessura desprezível, o traço fornecerá uma medida da onda incidente (dada a reflexão total) que percorre a mesma distância do sinal refletido pelo solo. Os dados obtidos desse pré-ensaio encontram-se no arquivo *calibration.sca*

Baseado nas informações anteriores, descreva como obter o valor do  $\epsilon_r$  do solo a partir dos ensaios realizados. Utilize essa informação, aliada aos dados do radargrama, para calcular a posição da tubulação enterrada.

Escreva um relatório coeso com as informações obtidas, salve o arquivo no formato PDF e envie pelo Moodle.

#### REFERÊNCIAS

- [1] “MALA Geoscience.” <http://www.malags.com/innovation/gpr-explained>. Accessed: 2014-10-23.
- [2] “Gprmax2d/3d user’s manual - version 2.0.” University of Edinburgh. 2005.
- [3] N. Ida and J. P. A. Bastos, *Electro Magnetism and Calculation of Fields*. Springer Science & Business Media, 1997.
- [4] A. Loizos and C. Plati, “Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches,” *{NDT} E International*, vol. 40, no. 2, pp. 147 – 157, 2007.