



HAL
open science

Ce poster présente une nouvelle modélisation asymptotique de la diffusion électromagnétique cohérente par des milieux multi-couches contenant des interfaces rugueuses. Elle résulte de l'extension de l'approximation de Kirchhoff scalaire à un empilement d'interfaces. Ce modèle permet de simuler de façon rapide et réaliste le signal GPR (Ground Penetrating Radar), en prenant en compte la rugosité des interfaces du milieu multi-couches. Des comparaisons avec une méthode numérique de référence basée sur la méthode des moments (MmM) permettent de valider ce modèle.

Nicolas Pinel, Cédric Le Bastard, Christophe Bourlier

HAL Id: hal-02421542

<https://hal.science/hal-02421542>

Submitted on 20 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

► **To cite this version:**

Nicolas Pinel, Cédric Le Bastard, Christophe Bourlier. Ce poster présente une nouvelle modélisation asymptotique de la diffusion électromagnétique cohérente par des milieux multi-couches contenant des interfaces rugueuses. Elle résulte de l'extension de l'approximation de Kirchhoff scalaire à un empilement d'interfaces. Ce modèle permet de simuler de façon rapide et réaliste le signal GPR (Ground Penetrating Radar), en prenant en compte la rugosité des interfaces du milieu multi-couches. Des comparaisons avec une méthode numérique de référence basée sur la méthode des moments (MmM) permettent de valider ce modèle.. Conférence plénière biennale du GDR ONDES, Oct 2019, Gif-sur-Yvette, France. pp40-41, 2019. hal-02421542

Introduction

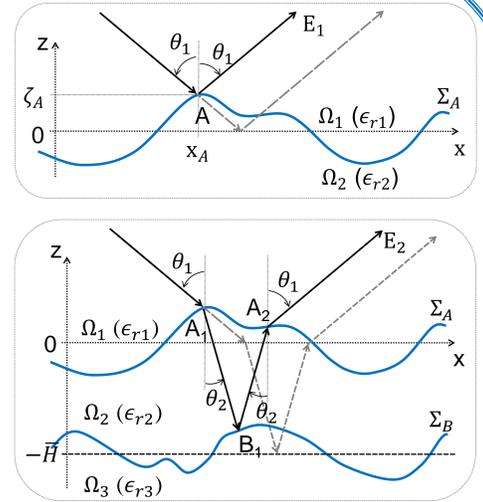
But : Calcul rapide de la diffraction par un empilement d'interfaces rugueuses

- Approximation de Kirchhoff scalaire → Calcul du « champ cohérent » (direction spéculaire)
- Extension du modèle (dit aussi modèle d'Ament) à un milieu multi-couches

Approximation de Kirchhoff scalaire (modèle d'Ament)

Approximation de Kirchhoff-plan tangent scalaire → Principe et développements :

- Chaque point de la surface remplacé localement par son plan tangent infini (surface localement plane) → Valide pour des rayons de courbure $R_c \gg \lambda$ (angles modérés)
 - Approximation scalaire → Faibles pentes ($\sigma_s \ll 1$) et faibles angles ($|\theta_i| \ll \pi/2$)
 - Calcul du « champ cohérent » → Diffraction uniquement dans la direction spéculaire (surface infinie)
- Physiquement : Variations de phase $\delta\phi_k$ uniquement de l'onde diffractée E_1, E_2, \dots (direction spéculaire) dues à la rugosité de la surface :



$$E_1 = E_0 r_{12}(\theta_1) e^{i(\phi_0 + \Delta\phi_1)}$$

$$E_2 = E_0 t_{12}(\theta_1) r_{23}(\theta_2) t_{21}(\theta_2) e^{i(\phi_1 + \Delta\phi_2)}$$

$$E_3 = E_0 t_{12}(\theta_1) t_{23}(\theta_2) r_{34}(\theta_3) t_{32}(\theta_3) t_{21}(\theta_2) e^{i(\phi_1 + \Delta\phi_3)}$$

$$E_4 = E_0 t_{12}(\theta_1) t_{23}(\theta_2) t_{34}(\theta_3) r_{45}(\theta_4) t_{43}(\theta_4) t_{32}(\theta_3) t_{21}(\theta_2) e^{i(\phi_1 + \Delta\phi_4)}$$

$$E_k = E_0 \left[\prod_{p=1}^{k-1} t_{p(p+1)}(\theta_p) t_{(p+1)p}(\theta_{p+1}) \right] r_{k(k+1)}(\theta_k) e^{i(\phi_1 + \Delta\phi_k)}, \quad k \geq 2$$

Surfaces rugueuses aléatoires → terme de phase : $\Delta\phi_k = \overline{\Delta\phi_k} + \delta\phi_k$, avec $\overline{\Delta\phi_k}$ sa moyenne statistique (= cas plan) et $\delta\phi_k$ les variations autour de $\overline{\Delta\phi_k}$: $\phi_k = 2\kappa_{kz}\delta\zeta_k + \sum_{p=1}^{k-1}(\kappa_{pz} - \kappa_{(p+1)z})(\delta\zeta_p + \delta\zeta_{p'})$, où κ_{pz} est la composante verticale du vecteur de propagation dans le milieu Ω_p .

→ Calcul de la diffusion cohérente ⇒ $\langle e^{j\delta\phi_k} \rangle$ – Hypothèse : Les hauteurs des rugosités $\{\delta\zeta_1; \delta\zeta_2; \dots; \delta\zeta_k\}$ sont des variables aléatoires indépendantes

$$\langle e^{j\delta\phi_k} \rangle = e^{-2Ra_{rk(k+1)}^2} \prod_{p=1}^{k-1} e^{-4Ra_{tp(p+1)}^2}$$

avec $Ra_{tp(p+1)} = |\kappa_{pz} - \kappa_{(p+1)z}| \sigma_{hp} / 2$ le paramètre de rugosité dit de Rayleigh en transmission du milieu Ω_p dans le milieu Ω_{p+1} à travers l'interface Σ_p , et $Ra_{rk(k+1)} = \kappa_{kz} \sigma_{hk}$ le paramètre de rugosité de Rayleigh en réflexion dans le milieu Ω_k sur l'interface Σ_k avec le milieu Ω_{k+1} .

→ **Modèle EM asymptotique multi-couches temps réel (pas d'intégration numérique)**

Résultats numériques – Validation par méthode numérique rigoureuse

Validation numérique (GPILÉ) : 3 interfaces :

$\epsilon'_r = \{1; 4.5; 3; 7\}$, $\sigma = \{0; 1; 10; 5\} \times 10^{-3}$ S/m, $\bar{H} = \{20; 40\}$ mm,

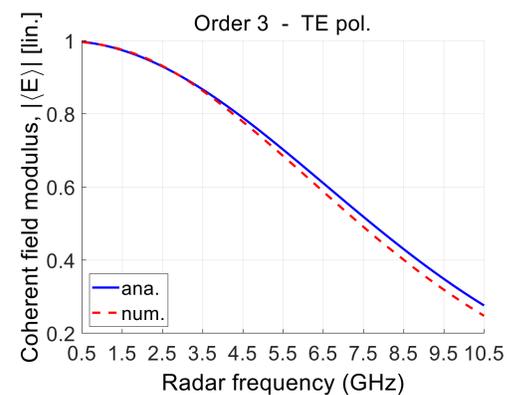
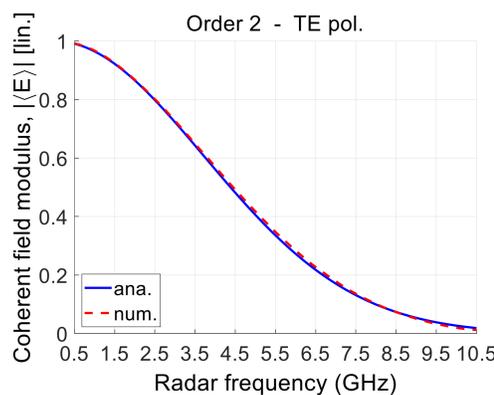
$L = 5$ m, $\sigma_h = \{1; 3; 2\}$ mm, $L_c = \{10; 30; 30\}$ mm ;

$\theta_i = 0^\circ$, pol. TE, $f \in [0.5; 10.5]$ GHz

→ Très bon accord en module (Bon accord en phase)

→ Faible contraste diélectrique

⇒ 1 seule réflexion dans chaque couche à prendre en compte



Résultats numériques → Signaux GPR : 5 interfaces :

Réponse à une impulsion de type « Ricker » – $f \in [0.5; 4.5]$ GHz

Medium #	\bar{H} (mm)	ϵ'_r	σ (S/m)	σ_h (mm)
1	∞	1	0	1.0
2	40	4	5×10^{-3}	2.0
3	150	5	1×10^{-2}	2.3
4	75	4	1×10^{-2}	4.0
5	150	9	1×10^{-2}	4.0
6	∞	11	1×10^{-2}	-

→ Influence des pertes et de la rugosité sur les réponses

↔ Inversion du milieu multi-paramètres (épaisseurs, permittivités, pertes, + rugosités)

