



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1

UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Titre : Conception et optimisation d'antennes large bande destinées au radar à pénétration de sol dans la bande fréquentielle [0.6GHz, 3GHz]

Title: Design and optimization of wide band antennas for ground penetrating radar in [0.6GHz, 3GHz] frequency band

Paula Aguilera, Mariam Ait ou Kharraz*, Mohammed Serhir**,*

** Majeure Électronique et Communication, Supelec - Campus Gif-sur-Yvette, {prénom.nom}@supelec.fr*

*** DRE, Laboratoire des Signaux et Systèmes (UMR 8506: CNRS SUPELEC-Univ Paris-Sud 11), SUPELEC, 3 Rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, mohammed.serhir@supelec.fr*

Mots-clefs: antennes large bande, spirale, vivaldi, radar à pénétration de sol, gain réalisé,
Cavity backed spiral antenna, vivaldi, ground penetrating radar, realized gain,

Résumé

Nous proposons dans cet article deux prototypes d'antennes large-bande que nous avons optimisé pour la réalisation d'un radar à pénétration de sol fonctionnant dans la bande [0.6GHz 3GHz]. Le choix de cette plage fréquentielle découle de notre objectif qui est d'assurer une profondeur de pénétration de l'ordre du mètre et atteindre une résolution centimétrique. Le premier prototype est une antenne spirale imprimée sur FR4 ($\epsilon_r=4.2$). Le caractère large bande et la facilité de conception des antennes spirales sont des atouts justifiant notre choix. Néanmoins, ces antennes sont dispersives et caractérisées par un rayonnement bidirectionnel. L'antenne spirale retenue permet de contrecarrer ces inconvénients. Le deuxième prototype est une antenne Vivaldi. Elle est caractérisée par une transition progressive de son ouverture assurant une bonne adaptation sur une large bande fréquentielle. La difficulté majeure rencontrée dans la conception des antennes Vivaldi réside dans l'optimisation du système d'excitation assurant à la fois une adaptation de l'antenne en basses comme en hautes fréquences.

Introduction

La rencontre d'une onde électromagnétique avec un objet ayant des dimensions caractéristiques de l'ordre de la longueur d'onde, conduit à la création d'une distribution de courant électrique et magnétique sur ce dernier. Cette distribution est tributaire des propriétés géométriques, diélectriques et magnétiques de l'objet. Le rayonnement de ces courants ainsi créés est responsable de l'apparition d'un champ dit 'diffracté' par l'objet. L'utilisation du champ diffracté pour détecter, localiser et/ou caractériser un objet de manière aveugle s'est donc développée et nous nous intéressons dans cet article plus particulièrement au radar à pénétration de sol.

En effet, le radar à pénétration de sol se base sur le principe décrit plus haut. Il est traditionnellement composé d'une antenne émettrice et d'une ou plusieurs antennes réceptrices. Le radar à pénétration de sol est utilisé dans des applications civiles et militaires pour la mesure des épaisseurs de chaussées sur les ponts ou les routes comme pour détecter des mines antipersonnel.

Le choix des antennes d'émission et de réception est un facteur déterminant concernant la qualité et les performances du radar à pénétration de sol. En effet, la littérature dédiée à l'étude des antennes large bande utilisées dans les radars est riche et les prototypes décrits sont multiples et variés [1]. Nous pouvons citer trois grandes familles d'antennes ultra-large bande, à savoir, les antennes Vivaldi, les antennes dipolaires chargées par des résistances, les antennes papillons (bow-tie antenna) [2] et enfin les cornets nervurés transverses électromagnétiques (ridged TEM horn antenna) [3].

Nous présentons dans cet article deux prototypes d'antennes large-bande que nous avons étudié et optimisé pour la réalisation d'un radar à pénétration de sol dans la bande [0.6GHz 3GHz]. Nous voulons assurer une profondeur de pénétration de l'ordre du mètre et garantir une résolution verticale centimétrique. La première antenne est une antenne spirale imprimée sur un substrat (FR4, $\epsilon_r=4.2$). Cette antenne indépendante de la fréquence est large bande. Sa bande fréquentielle de fonctionnement est parfaitement définie par ses rayons interne et externe. Les antennes spirales sont

largement décrites dans la littérature [4]. Néanmoins, ces antennes sont dispersives et caractérisées par un rayonnement bidirectionnel. Nous présenterons dans la section suivante comment nous avons, par le biais de charges résistives et d'une cavité cylindrique, répondu aux limitations évoquées.

Le deuxième prototype antennaire est une antenne Vivaldi caractérisée par une transition progressive de son ouverture assurant ainsi une bonne adaptation ($S_{11} < -10\text{dB}$) sur une large bande fréquentielle. L'excitation de ces antennes se base sur l'utilisation d'une transition microruban-fente. La difficulté majeure rencontrée dans la conception des antennes Vivaldi réside dans l'optimisation de ce système d'excitation. Par ailleurs, la taille de l'antenne est directement liée à la plus basse fréquence visée. Nous aimerions mettre en place une antenne qui ne dépasse pas 30cm x 30cm et qui garantirait une adaptation dans la bande [0.6GHz, 3GHz]. Il s'agit de trouver le compromis entre une taille raisonnable de l'antenne et l'utilisation des substrats à faibles permittivités. En effet, l'utilisation de substrats à fortes permittivités dégraderait substantiellement l'efficacité de l'antenne.

Résultats des simulations numériques et validations expérimentales

Pour optimiser les modèles d'antennes choisies (Spirale et Vivaldi), nous avons utilisé le logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio. Le prototype final de la spirale est présenté sur la Figure 1. Cette antenne spirale auto-complémentaire est imprimée sur le substrat FR4 d'épaisseur 0.8mm (taille 15cmx15cm). La largeur des pistes définissant les bras de la spirale est de 2mm. Cette antenne est affublée d'une cavité fine assurant un rayonnement unidirectionnel. La cavité a un diamètre de 15cm et une profondeur de 2cm. L'ajout de la cavité engendre une dégradation substantielle des performances (adaptation) de l'antenne spirale. Dans la littérature, d'autres auteurs ont utilisé des cavités avec des antennes spirales [5]. Dans [5], les auteurs optent pour l'utilisation de matériau absorbant à l'intérieur de la cavité pour réduire le couplage entre l'antenne et la cavité. L'absorbant sert à annuler le rayonnement arrière de l'antenne et limite la désadaptation de cette dernière en présence de la cavité.

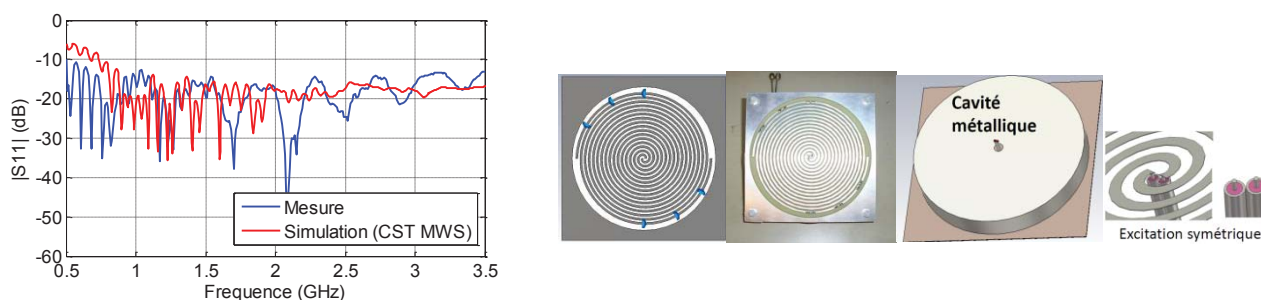


Figure 1. (à gauche) Comparaison des données de simulation et de mesure du S11 de l'antenne spirale. (à droite) antenne spirale en présence des charges résistives (flèches bleues), la cavité métallique sous l'antenne et le système d'excitation utilisé pour l'antenne spirale.

Dans cet article, nous proposons l'approche novatrice qui se base sur l'utilisation de charges résistives au bout des bras de la spirale pour améliorer la cohabitation entre l'antenne spirale et la cavité. En effet, le prototype final a été optimisé en présence de la cavité pour assurer un coefficient de réflexion S11 inférieur à -10dB dans la bande [0.6GHz, 3GHz]. Cette optimisation passe par un choix judicieux des valeurs des résistances à mettre à l'extrémité des bras de la spirale et la profondeur de la cavité qui en découle. L'utilisation des charges résistives permet aussi de corriger le caractère dispersif de la spirale. Dans la Figure 1 nous présentons aussi le système d'excitation symétrique et large bande utilisé pour l'excitation de l'antenne spirale. Ce système simple et bas coût est composé de deux câbles coaxiaux reliés pour former une impédance caractéristique de 100Ω entre les âmes des coaxiaux. Sur l'autre extrémité des câbles nous utilisons un déphaseur 180° pour assurer un courant en opposition de phase entre les deux câbles coaxiaux. Avec ce système simple et symétrique nous assurons une excitation convenable de l'antenne spirale dont le port d'entrée est caractérisé par une impédance caractéristique de 116Ω. Le calcul de l'impédance caractéristique est décrit en détail dans [4].

Nous avons mesuré le coefficient de réflexion S11 du prototype final de la spirale réalisé (spirale + charges résistives + cavité) et nous l'avons comparé avec le S11 issu de la simulation sous CST MWS. Nous présentons dans la Figure 1 le résultat de cette comparaison. Nous pouvons constater le bon accord entre les données simulées et les données mesurées. Nous en concluons que l'antenne spirale présente une excellente adaptation dans la bande fréquentielle qui nous intéresse ([0.6GHz, 3GHz]).

L'autre prototype antennaire optimisé pour le radar à pénétration de sol est l'antenne Vivaldi. Le modèle final est caractérisé par les dimensions $30\text{cm} \times 30\text{cm} = 0.25\lambda_{\min} \times 0.25\lambda_{\min}$ et couvre la bande [0.6GHz 3GHz]. Cette antenne est peu encombrante et est largement étudiée dans la littérature des antennes large bande [6]. Cette antenne possède une polarisation linéaire et un rayonnement arrière très faible, ce qui en fait une candidate parfaite pour le radar à pénétration de sol. Le modèle final de l'antenne réalisée est imprimé sur du FR4 ($\epsilon_r=4.2$) et est décrit sur la Figure 2. Le système d'excitation (radial stub) est le résultat d'optimisation numérique sur le logiciel CST MWS et la comparaison

entre les S11 issus de la simulation et de la mesure sont présentés sur la Figure 2. Nous pouvons constater le bon accord entre les résultats de la simulation et de la mesure. L'antenne réalisée est bien adaptée ($S_{11} < -10\text{dB}$) dans la bande [0.6GHz, 3GHz].

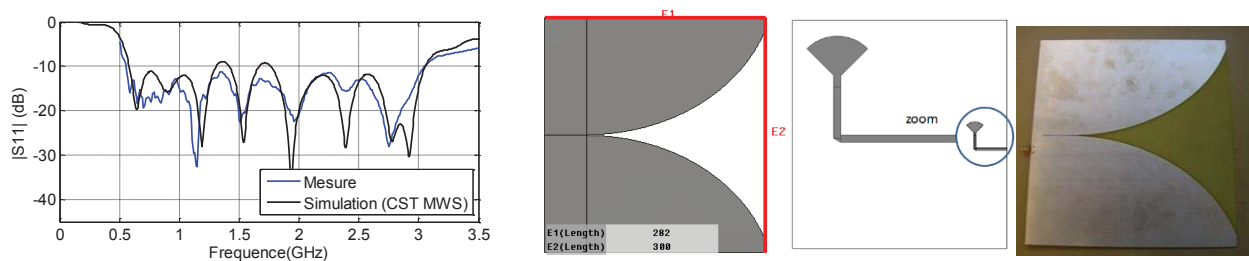


Figure 2. (à gauche) Comparaison des données de simulation et de mesure du S11 de l'antenne Vivaldi. (à droite) présentation des deux faces de l'antenne vivaldi imprimé sur du FR4.

Par ailleurs, nous avons mesuré le champ électrique rayonné par ces deux antennes dans la chambre anéchoïque de Supelec à une distance de 25cm des antennes. Il s'agit d'observer la distribution du champ électromagnétique sur une surface plane située à 25cm des antennes. Cette information, qualifiée aussi de « footprint » dans la littérature, permet d'identifier la distribution du champ incident qui illuminerait le milieu à caractériser lors de l'utilisation du radar. La mesure du champ sur une surface de 1.2m x 1.2m est effectuée en utilisant une sonde miniature que l'on peut considérer comme une source ponctuelle. Ces résultats sont présentés sur la Figure 3.

À partir de la Figure 3 nous constatons que les deux antennes sont caractérisées par des diagrammes complètement différents à la fréquence 1.75GHz, par contre le niveau maximum du champ au centre est comparable. En conséquence, les deux antennes ont des gains comparables à cette fréquence et présentent des taches de « footprint » différentes.

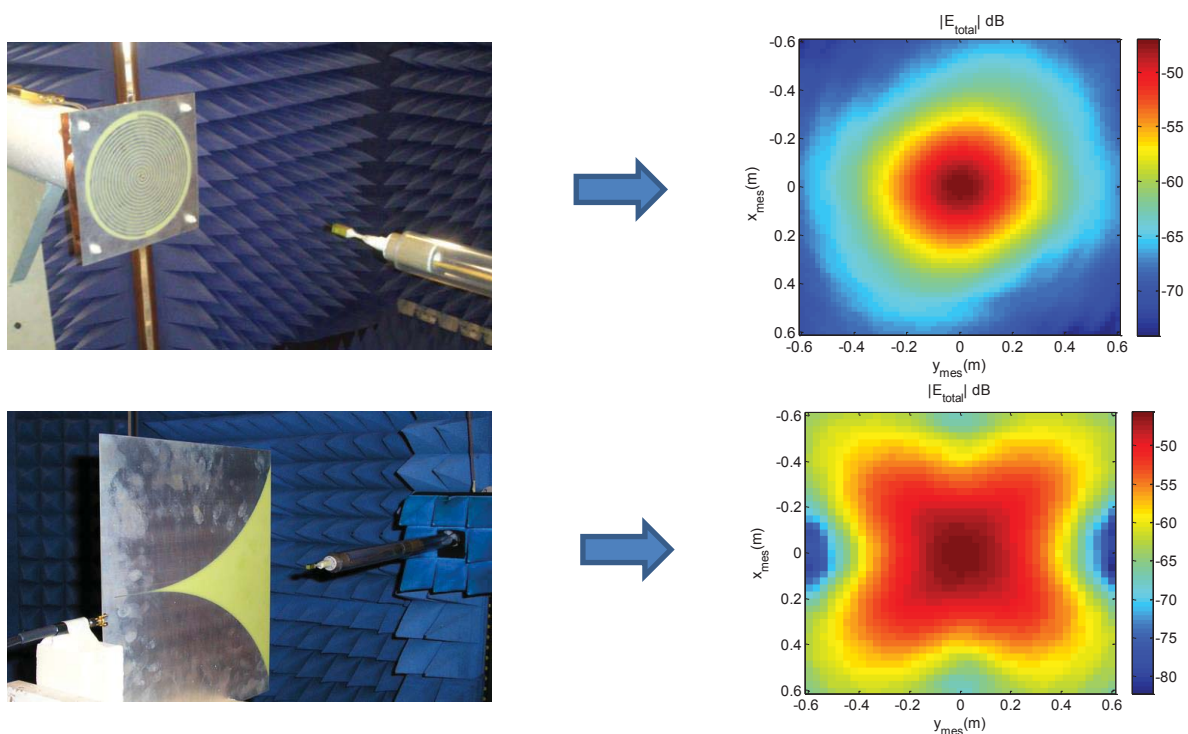


Figure 3. Diagramme de rayonnement des deux antennes mesuré sur une surface plane à 25cm de l'extrémité des antennes à 1.75GHz. (à gauche) Les antennes installées dans le système de mesure de Supelec.

Pour compléter cette étude nous avons mesuré les diagrammes de rayonnement des deux antennes dans la grande chambre de Supelec en utilisant le système de caractérisation sphérique. Dans cette partie, nous nous intéressons au gain réalisé dans la direction frontale des antennes. En effet, les résultats obtenus expérimentalement sont comparés avec les résultats de la simulation sous CST MWS. Les résultats de cette comparaison sont présentés sur la Figure 4. Nous constatons un bon accord entre la simulation et la mesure. Ces deux courbes du gain confirment ce que nous avons observé sur la Figure 3 ; à savoir, que les deux antennes ont des gains comparables à la fréquence 1.75GHz.

Conclusion

L'étude présentée a pour objectif l'optimisation de deux antennes large-bande destinées au radar à pénétration de sol. Le premier prototype antennaire est une antenne spirale à laquelle des charges résistives ont été ajoutées. Ces dernières ont pour objectif de réduire l'impact de la cavité de très faible taille placée sous l'antenne afin de supprimer le rayonnement arrière de l'antenne. La taille de la cavité ou plus précisément la profondeur de la cavité est directement corrélée à la valeur des résistances utilisées. Le résultat présenté dans cet article est issu d'une procédure d'optimisation faisant varier la valeur des résistances, la profondeur de la cavité et la position des résistances sur les bras de la spirale. Le deuxième prototype antennaire est une antenne Vivaldi. Son utilisation dans les systèmes radar à pénétration de sol est assez répandue. Ceci est dû à son bas coût et à la simplicité de son fonctionnement. Néanmoins, la descente en fréquence reste problématique dans la mesure où nous voulons conserver une taille raisonnable sans avoir recours aux substrats de fortes permittivités. Le modèle présenté dans ce papier permet une adaptation qui couvre une bande fréquentielle allant de 600MHz à 3GHz.

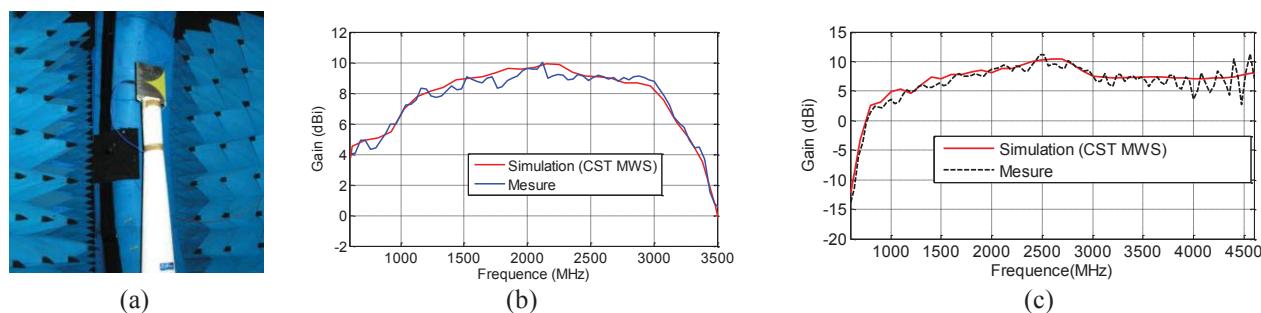


Figure 4. (a) Système de mesure sphérique de Supelec, (b) Gain réalisé pour l'antenne Vivaldi, (c) Gain réalisé pour l'antenne spirale.

Références bibliographiques

- 1- D. J. Daniels, "Surface-Penetrating Radar", London, IEE 1996.
- 2- A. Lestari et al, "A modified Bow-tie antenna for improved Pulse radiation" IEEE transaction on antennas and propagation, Vol. 58 No 7 July 2010.
- 3- K. L. Shlager et al, "Accurate Analysis of TEM horn antennas for pulse radiation" IEEE transaction on electromagnetic compatibility, Vol. 38 No 3 August 1996
- 4- M. McFadden, "Analysis of the equiangular spiral antenna on a dielectric substrate" IEEE transaction on antennas and propagation, Vol. 55 No 11 November 2007
- 5- H. Nakano, Y. Shinma, and J. Yamauchi, "A monofilar spiral antenna and its array above a ground plane formation of a circularly polarized tilted fan beam," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 45, no. 10, pp. 1506–1511, Oct. 1997.
- 6- P. J. Gibson, —The Vivaldi Aerial, Proc. 9th Europe Microwave. Conference., 1979, pp. 101–105