



HAL
open science

AMELIORATION DE LA RESOLUTION SPATIALE DE SCAN CHAMP PROCHE EN INJECTION

Alexandre Boyer

► **To cite this version:**

Alexandre Boyer. AMELIORATION DE LA RESOLUTION SPATIALE DE SCAN CHAMP PROCHE EN INJECTION. 18e Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique CEM2016, Jul 2016, Rennes, France. hal-01403886

HAL Id: hal-01403886

<https://hal.science/hal-01403886>

Submitted on 28 Nov 2016

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.

AMELIORATION DE LA RESOLUTION SPATIALE DE SCAN CHAMP PROCHE EN INJECTION

A. Boyer¹

¹CNRS, LAAS, 7 avenue du colonel Roche, F-31400 Toulouse, France
Univ. de Toulouse, INSA, LAAS, F-31400 Toulouse, France
alexandre.boyer@laas.fr

Résumé. L'injection en champ proche est une méthode prometteuse pour l'analyse de la susceptibilité des cartes et composants électroniques aux interférences électromagnétiques. Les cartographies ou scans résultantes de ces injections fournissent une localisation précise des zones sensibles aux interférences électromagnétiques. Un paramètre essentiel est la résolution spatiale des scans, qui dépend de la taille des sondes d'injection et de la distance sonde-dispositif sous test. Cet article présente une méthode de post-traitement dédiée à l'amélioration de la résolution spatiale des scans d'immunité, validée sur des cas d'étude au niveau carte électronique et circuit intégré.

I. INTRODUCTION

Le scan champ proche est devenue une méthode courant pour diagnostiquer les problèmes de CEM au niveau circuit imprimé (PCB) et circuit intégré (CI). Elle consiste à mesurer à l'aide d'une antenne miniature ou sonde champ proche les champs électriques et magnétiques en zone de champ proche, créés localement au-dessus des pistes de PCB, des interconnexions des boîtiers et des CI, afin de déterminer l'origine des problèmes d'émission électromagnétique. La méthode peut aussi être utilisée de manière inverse et on parle alors d'injection champ proche. Une sonde champ proche est placée à proximité d'un composant électronique ou d'une piste PCB et est excitée par un signal transitoire de forte amplitude afin de produire un champ électrique ou magnétique intense localement. Le couplage du champ sur les lignes PCB ou composants sous test peuvent induire des fluctuations de tensions suffisantes pour déclencher des défaillances [1] - [5]. Ces deux méthodes fournissent des cartographies en deux dimensions de l'émission locale (cartographie de l'émission) ou l'amplitude des défaillances induites par la sonde d'injection sur le dispositif sous test (DUT) (cartographie de l'immunité) en fonction de la position. La qualité du diagnostic réalisée à partir de ces méthodes dépend de la résolution spatiale de la cartographie, c'est-à-dire la capacité à localiser précisément les sources d'émission en champ proche ou les zones de couplage à l'origine des défaillances. La résolution est non seulement liée à la distance entre la sonde champ proche et le DUT, mais aussi aux dimensions géométriques de la sonde. En raison de sa taille, une sonde d'injection produit un champ

considérable à l'intérieur d'un large volume et qui se couple sur une large surface du DUT. De nombreux travaux ont été réalisés pour réduire les dimensions des sondes champ proche et améliorer leur résolution spatiale. Cependant, le principal inconvénient de cette miniaturisation est sous la dégradation de la sensibilité de la sonde lorsqu'elle est utilisée en réception, soit la réduction du champ produit localement par la sonde. Ces dernières années, de nombreux travaux ont montré une amélioration des résolutions spatiales des cartographies en émission par des techniques de post-traitement. Elles consistent à compenser les caractéristiques en réception de la sonde champ proche, c'est-à-dire compenser le fait que la sonde mesure le champ sur une surface donnée. Trois types de méthodes ont été proposés, basées sur la théorie de la décomposition en spectre d'onde plane (Plane Wave Spectrum PWS) [6] [7], sur des techniques de restauration d'image comme l'utilisation d'un filtrage de Wiener [8] [9], ou sur l'utilisation de réseau de neurones [10]. La résolution d'une cartographie en émission peut ainsi être considérablement améliorée même si la mesure a été réalisée à partir d'une sonde de grandes dimensions.

Cependant, ce type de méthodes de post-traitement n'a jamais été utilisé pour améliorer la résolution d'une cartographie en immunité. Contrairement au post-traitement des cartographie en émission, l'objectif n'est pas de compenser les caractéristiques en réception de la sonde de mesure et de déterminer la distribution du champ produit par le DUT. Le but est d'extraire les caractéristiques en réception du DUT afin de mieux localiser les zones de couplage du champ proche produit par la sonde d'injection. Ce papier propose de réutiliser la théorie PWS pour améliorer la résolution d'une cartographie en immunité, et démontrer la faisabilité sur des cas pratiques au niveau PCB et CI. Bien que la méthode soit applicable pour des injections en champ électrique et magnétique, des études précédentes [14] ont montré expérimentalement que les sondes magnétiques fournissaient de meilleures résolution et efficacité d'injection. Pour cette raison, le papier n'adresse que des injections en champ magnétique.

II. PRESENTATION DE LA METHODE

Soit une sonde d'injection en champ proche excitée par un signal sinusoïdale créant un champ électrique ou

magnétique en tout point noté $F(x_s, y_s, z_s)$. Dans le cas d'une injection CI ou PCB, seule la distribution de champ F sur un plan horizontal (x_s, y_s) situé à une distance constante h_s sous la sonde d'injection, ou altitude de scan, nous intéresse. Cette distribution est appelée le profil spatial du champ F . Le résultat d'un scan en injection est une cartographie 2D donnant pour chaque position (x_p, y_p) de la sonde d'injection placée à l'altitude de scan h_s au-dessus du dispositif sous test (DUT). Il s'agit de la réponse S du DUT à l'injection en champ proche. En raison de la large surface sur laquelle la sonde produit un fort champ, la réponse S fournit une image indirecte et distordue des zones de couplage des perturbations externes sur le DUT. La localisation précise des zones de couplage n'en est pas facilitée.

Le profil spatial S est relié au profil de champ F par une propriété intrinsèque du DUT, appelée caractéristique de réception R (1). Elle donne une information directe sur les zones de couplage du DUT et de sa sensibilité à une composante du champ F .

$$S(x_p, y_p) = R * F(x_p, y_p) \quad (1)$$

$$= \iint R(x_p - x_s, y_p - y_s) F(x_s, y_s) dx_s dy_s$$

La caractéristique R se détermine plus simplement dans le domaine spectral, en utilisant la théorie de la décomposition en spectre d'onde plane (PWS). Le champ est décomposé en une superposition d'une infinité d'ondes planes se propageant dans les directions x et y , en fonction de nombres d'onde k_x et k_y . Les équations (2) et (3) donnent les relations de passage entre les représentations spatiales et spectrales F et \tilde{F} du champ, basées sur une transformée de Fourier.

$$\tilde{F}(k_x, k_y, z) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, y, z) e^{j\alpha x} e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dx dy \quad (2)$$

$$F(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{F}(k_x, k_y, z) e^{j\alpha x} e^{jk_x x} e^{jk_y y} dk_x dk_y \quad (3)$$

La caractéristique de réception R du DUT peut être déterminée à partir de l'équation (4). Elle correspond au rapport de la réponse du DUT sur le champ produit par la sonde d'injection. Il est nécessaire de noter que ces différentes grandeurs sont des nombres complexes, nécessitant l'extraction de leurs phases.

$$\tilde{R}(k_x, k_y, z) = \frac{\tilde{S}(k_x, k_y, z)}{\tilde{F}(k_x, k_y, z)} \quad (4)$$

En résumé, l'extraction de la caractéristique de réception consiste en cinq étapes :

- 1. acquisition de la cartographie d'immunité du DUT $S(x_p, y_p, h_s)$ avec une sonde d'injection
- 2. Acquisition du profil spatial du champ produit par la même sonde d'injection $F(x, y, h_s)$
- 3. Calcul de \tilde{S} et \tilde{F} par FFT 2D
- 4. Calcul de \tilde{R} à partir de (4)

- 5. Calcul de R par FFT 2D inverse.

En pratique, cette méthode est limitée par les erreurs de positionnement de la sonde d'injection, le bruit de la mesure, les erreurs de troncations propres à la FFT (effet de Gibbs) et à l'influence du DUT sur la sonde d'injection. Le filtrage des composantes spectrales bruitées et l'utilisation d'un fenêtrage adapté (Blackman par exemple) permettent de réduire l'influence de ces sources d'erreur.

III. EXTRACTION DU PROFIL SPATIAL DU CHAMP MAGNÉTIQUE ÉMIS PAR UNE SONDE D'INJECTION

Dans les prochaines parties, la méthode est validée sur des structures couplant principalement la composante tangentielle du champ magnétique. Au préalable, il est nécessaire de déterminer la distribution spatiale de la composante tangentielle du champ magnétique produit par la sonde d'injection.

III.1. Description de la sonde d'injection

La sonde d'injection utilisée dans cette étude est décrite à la Fig. 1. Il s'agit d'un bobinage de trois tours monté au bout d'un câble coaxial semi-rigide. Celle-ci produit un champ magnétique tangentiel local important. L'augmentation du nombre de tours accroît le champ magnétique mais dégrade la résolution de la cartographie en immunité. Son profil d'émission en champ magnétique H est extrait par mesure sur une structure de calibration et validé par simulation. L'objectif des tests est de montrer que même en utilisant une sonde d'injection de larges dimensions, il est possible d'améliorer la résolution spatiale en utilisant la méthode précédente.

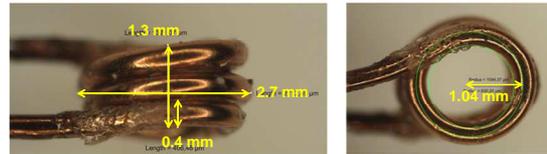


Fig. 1. Géométrie de la sonde d'injection utilisée

III.2. Simulation du champ magnétique émis par la sonde d'injection

Le profil de champ H produit par la sonde peut être obtenu expérimentalement ou par simulation. L'avantage de la simulation est la rapidité d'obtention du résultat et l'absence de bruit de mesure. un modèle géométrique de la sonde est construit et simulé à l'aide du logiciel FEKO et de la méthode des moments [11]. Cependant, la mesure est nécessaire pour valider la pertinence des résultats de mesure (Fig. 2). Celle-ci consiste à mesurer le coefficient de couplage S_{21} entre la sonde d'injection et une sonde de mesure calibrée dont la caractéristique de réception a été déterminée au préalable sonde la méthode décrite dans [6] ou [7]. Cette dernière est déplacée sur un plan horizontal situé à une hauteur de scan h_s constante de la sonde d'injection. La mesure est réalisée entre 10 MHz et

1 GHz pour une hauteur de scan comprise entre 0.5 et 2 mm. Si la sonde de mesure est suffisamment petite pour être considérée comme ponctuelle, sa caractéristique de réception est directement donnée par son facteur de performance PF. Celui-ci lie le champ H émis par la sonde d'injection et le coefficient de couplage S12 à partir de l'équation (5).

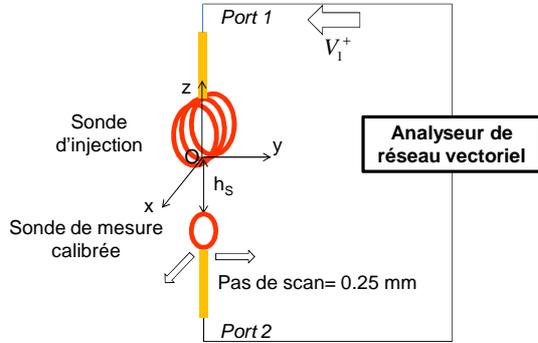


Fig. 2. Mesure du profil spatial du champ magnétique produit par la sonde d'injection

$$H(x, y, -h_s, f) = -j \frac{S_{21}(x, y, -h_s, f)}{PF(f)} V_1^+ \quad (5)$$

où f est la fréquence et V_1^+ l'amplitude de l'onde incidente excitant la sonde d'injection. La Fig. 3 montre la comparaison entre la mesure et la simulation du coefficient de couplage S12 entre les deux sondes séparées par 1 mm. Mesures et simulations sont en accord jusqu'à 800 MHz. Les différences observées au-delà sont liées aux transitions coaxial-fil qui ne sont pas modélisées.

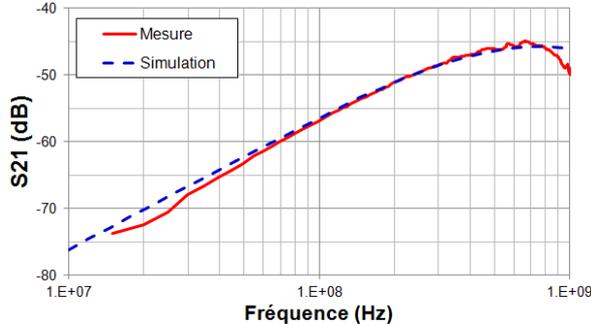


Fig. 3. Comparaison entre la simulation et la mesure du couplage entre les sondes d'injection et de réception

La Fig. 4 compare les profils spatiaux mesurés et simulés du champ H tangentiel émis par la sonde d'injection le long de l'axe X pour $h_s = 1$ mm. La sonde d'injection est excitée par un signal sinusoïdal de 400 MHz et d'une amplitude de 1 V. Le profil mesuré est affecté par du bruit et un effet de fenêtrage sur les bords introduit par la méthode de compensation. De plus, le profil mesuré n'est pas parfaitement symétrique en raison des erreurs de montage et de positionnement de la sonde. Cependant, les profils mesurés et simulés sont en accord, confirmant la pertinence de la simulation. Dans les prochaines parties,

le profil simulé sera utilisé pour compenser les cartographies d'immunité.

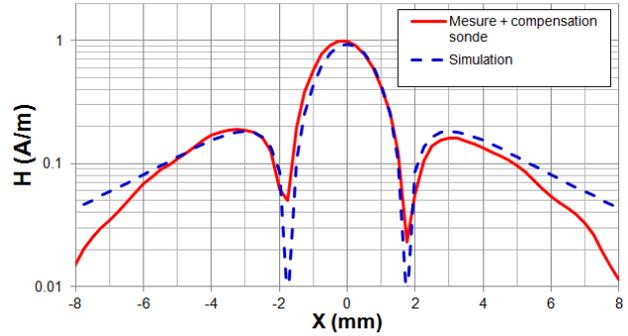


Fig. 4. Comparaison entre la mesure et la simulation du champ H produit par la sonde d'injection

IV. AMELIORATION DE LA RESOLUTION AU NIVEAU CARTE ELECTRONIQUE

IV.1. Description des structures de test

Plusieurs pistes PCB ont été réalisées pour valider la méthode. Le tableau ci-dessous donne leurs caractéristiques. Le protocole expérimental est décrit à la Fig. 5. La tension induite sur la piste sous test est déduite du coefficient de couplage mesuré. A partir des profils spatiaux du champ H émis par la sonde d'injection et de la tension couplée sur la ligne sous test, la caractéristique de réception de la ligne sous test est extraite à partir de la méthode présentée dans la partie II. Les résultats présentés dans les prochains paragraphes ont été obtenus pour une injection harmonique à 400 MHz et une hauteur de scan h_s de 1 mm.

Table 1. Description des pistes PCB sous test

Noms	Caractéristiques
Ligne micro ruban étroite	50 Ω , largeur = 0.15 mm, longueur = 50 mm
Lignes micro ruban couplées	Deux lignes séparées de 1 mm, largeur = 0.15 mm, longueur = 50 mm

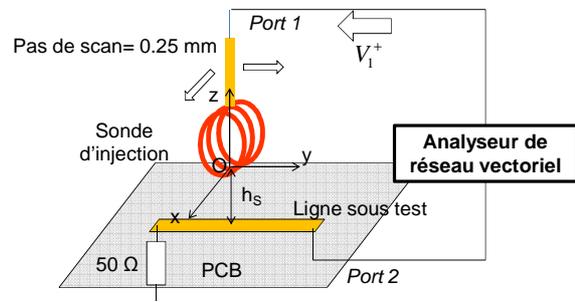


Fig. 5. Mesure du couplage entre la sonde d'injection et une ligne PCB

IV.2. Résultats

Le premier cas d'étude concerne la ligne micro ruban courte. La figure 6-a présente l'évolution du coefficient de couplage S_{12} en fonction de la position de la sonde à 400 MHz. Le couplage est maximal au-dessus d'une zone relativement large autour de cette piste, réduisant la précision de l'identification de la zone de couplage. A partir de cette mesure et du profil d'émission de la sonde, la fonction caractéristique de réception R du DUT est extraite. Celle-ci est présentée à la figure 6-b. Il apparaît clairement que la zone de couplage sonde-DUT apparaît plus nettement. En considérant la résolution spatiale comme la largeur à mi-hauteur des lobes observés sur les profils spatiaux, les résolutions spatiales extraites de ces deux mesures sont égales à 2.5 et 1.25 mm. L'utilisation de la caractéristique de réception permet une division par 2 de la résolution spatiale.

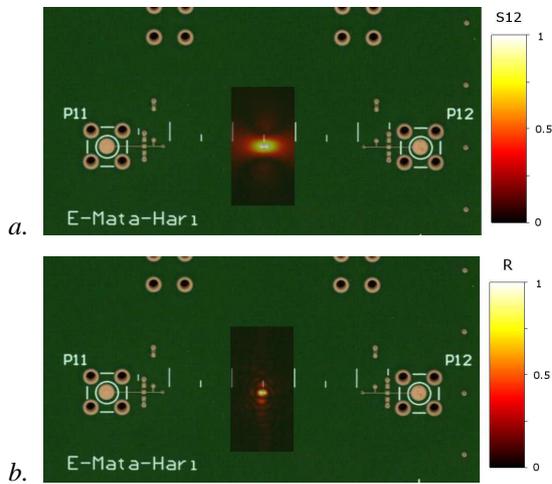


Fig. 6. Profils spatiaux (a) du couplage sonde - DUT; (b) de la caractéristique de réception du DUT

Le second cas concerne les deux lignes micro ruban voisines et a pour but de vérifier si le post-traitement d'une cartographie de l'immunité et l'extraction de la caractéristique de réception facilite l'identification des zones de couplage d'une perturbation champ proche. La Fig. 7 compare les profils spatiaux des tensions induites sur chacune des deux lignes voisines issus (la cartographie en immunité) et les caractéristiques de réception extraites par post-traitement. La caractéristique de réception de chacune des lignes présente un lobe plus étroit que celui observé sur le profil spatial de la tension induite. La séparation des zones de couplage sur chacune des deux lignes s'en trouve ainsi facilitée. La localisation des lignes responsables du couplage d'une perturbation est simplifiée lorsque l'on considère une cartographie de la caractéristique de réception.

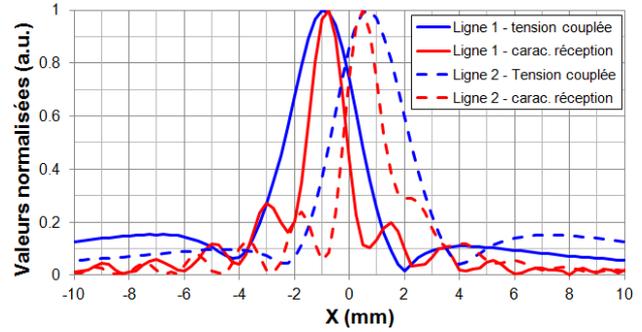


Fig. 7. Comparaison entre les profils spatiaux des tensions induites sur chacune des lignes micro ruban couplées et de leurs caractéristiques de réception

V. AMELIORATION DE LA RESOLUTION AU NIVEAU CIRCUIT INTEGRE

V.1. Description des structures de test

Ce cas d'étude présente une injection au niveau circuit intégré. Un circuit de test a été spécialement conçu pour étudier le couplage de perturbations en champ proche sur des interconnexions de circuits intégrés. Ce circuit intègre différents motifs d'interconnexions élémentaires, terminées par des capteurs de tension sur puce dédiés à une reconstruction précise des allures temporelles des signaux couplés sur les interconnexions [12].

Le circuit de test a été réalisé à l'aide d'une technologie Freescale® 0.25 μm SMARTMOS8 dédié à l'étude de l'injection en champ proche sur des structures d'interconnexions et de bus. Vingt quatre capteurs sur puce ont été placés en terminaison de lignes pour mesurer le profil temporel des fluctuations de tension produites par l'injection champ proche. Ce capteur est capable de mesurer des profils temporels sur des nœuds inaccessibles avec une précision temporelle de 100 ps, une bande passante de 2.7 GHz, tout en restant faiblement invasif. Le principe d'acquisition est basé sur un échantillonnage séquentiel à temps équivalent, qui fournit une bande passante virtuelle large malgré un sous-échantillonnage [12]. Afin de limiter le bruit couplé directement sur les capteurs, ceux-ci sont alimentés par un régulateur de tension interne et sont isolés du substrat de la puce par une caisson N-well. En outre, ils sont routés à l'aide de trois niveaux de métaux, le quatrième et dernier niveau servant de blindage. Plus de détails sur la réalisation de ce capteur et ses performances sont disponibles dans [13].

Le circuit de test est monté en boîtier CQFP64 ouvert afin de placer la sonde d'injection au plus près de la surface de la puce. Des études antérieures ont été réalisées sur ce circuit montrant le couplage important de la composante tangentielle du champ H [14]. La Fig. 8 présente le protocole expérimental de mesure des tensions induites sur la puce par l'injection champ proche. La sonde d'injection est déplacée au-dessus du circuit de test et est excitée par un signal harmonique. Le capteur connecté à l'extrémité d'une interconnexion silicium mesure la tension induite pour chaque position de la sonde

d'injection. Le signal mesuré par le capteur est ensuite transmis à une carte d'acquisition externe, filtré et traité pour reconstruire le profil temporel du signal. Trois broches sont associées au capteur : sa sortie, son alimentation et sa référence de masse, placées sur le même côté du boîtier.

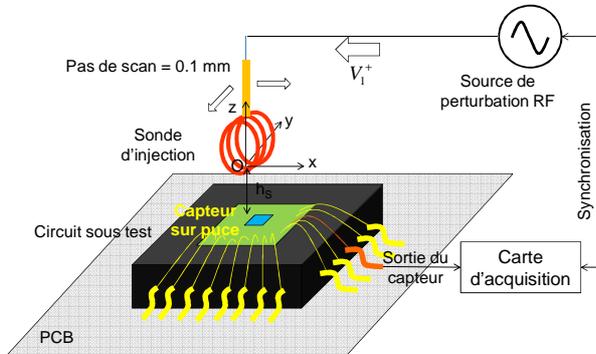


Fig. 8. Protocole de mesure au capteur sur puce des tensions induites sur le circuit de test par la sonde d'injection

V.2. Résultats expérimentaux

Un premier scan a été réalisé au-dessus des broches du capteur. La sonde d'injection est excitée par un signal harmonique de 200 MHz et est placée à 500 μm au-dessus des broches. Le pas de déplacement de la sonde est fixé à 0.11 mm. L'évolution de la tension mesurée par le capteur en fonction de la position de la sonde et la caractéristique de réception du capteur sur puce est présentée sur la Fig. 9. Les valeurs sont normalisées afin de les comparer. La localisation des broches du capteur est aussi précisée.

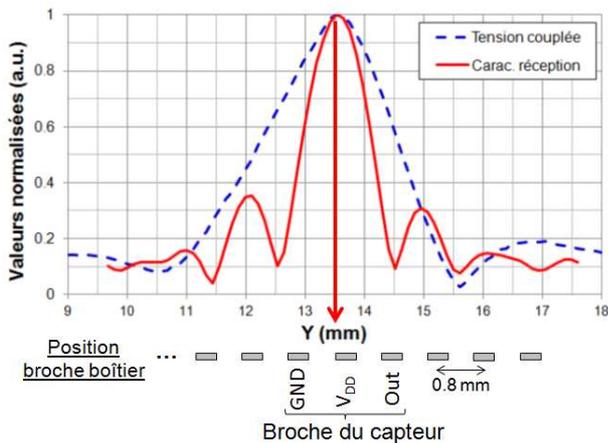


Fig. 9. Comparaison entre les profils spatiaux de la tension mesurée par le capteur sur puce en fonction de la position de la sonde d'injection, et sa caractéristique de réception

Les deux profils spatiaux présentent un lobe principal de demi-largeurs égales à 2.4 et 1.2 mm respectivement. La résolution spatiale associée à la caractéristique de réception est donc deux fois plus faible que celle du profil spatial de la tension induite. Ces lobes sont centrés au-dessus des broches du capteur, mais la caractéristique de

réception est clairement centrée au-dessus de la broche d'alimentation. La cartographie de la caractéristique de réception permet de conclure que la broche d'alimentation est responsable du couplage sur la sortie du capteur d'une perturbation RF à 200 MHz.

Un second scan est réalisé sur un des côtés de la puce. La Fig. 10 présente la position de l'interconnexion étudiée, du capteur sur puce, ainsi que la trajectoire suivie par la sonde d'injection le long de l'axe Y. Son orientation et sa taille relative par rapport au circuit sont aussi indiquées. Il apparaît clairement que la taille de la sonde est relativement grosse par rapport au circuit testé. La sonde est placée à 700 μm au-dessus de la surface de la puce, et la sonde est excitée par un signal sinusoïdale de 200 MHz.

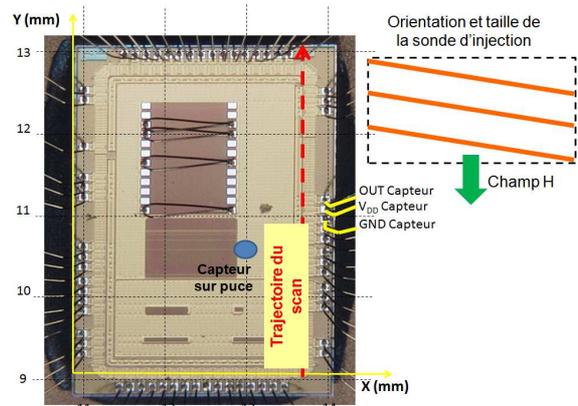


Fig. 10. Zone scannée sur le circuit de test

La Fig. 11 compare l'évolution du profil de l'amplitude de la tension couplée sur l'interconnexion en fonction de la position de la sonde le long de l'axe Y, avec la caractéristique de réception R de cette interconnexion, déduite du profil d'émission de la sonde d'injection et de la mesure du profil spatial de la tension couplée. Afin de comparer ces deux profils, les deux graphiques sont normalisés par rapport à leur valeur maximale. Les deux profils présentent un lobe principal situé au-dessus de l'interconnexion considérée, mais celui de la caractéristique de réception est plus étroit. La résolution spatiale issue de la caractéristique de réception est de 1 mm, alors que celle issue du profil spatial de tension est de 3 mm. L'utilisation de la caractéristique de réception permet une amélioration d'un facteur 3 de la résolution spatiale, et donc une meilleure localisation de la zone de couplage de la perturbation champ proche.

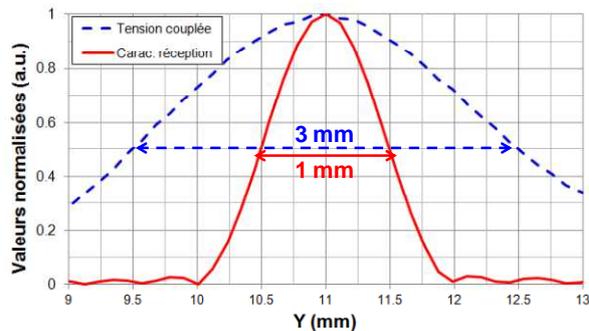


Fig. 11. Comparaison entre les profils spatiaux de tension couplée sur une interconnexion et sa caractéristique de réception

VI. CONCLUSION

L'injection en champ proche est une méthode prometteuse pour l'analyse de la susceptibilité des cartes électroniques et des circuits intégrés. La localisation des zones de couplage dépend de la résolution spatiale observée sur les cartographies d'immunité résultantes des scans en injection. Ce papier a montré que la miniaturisation des sondes d'injection n'est pas l'unique moyen d'améliorer la résolution spatiale des cartographies en immunité. L'application de méthode de post-traitement pour extraire la caractéristique de réception du dispositif sous test peut améliorer l'identification des zones de couplage des perturbations. Des exemples d'injection au niveau circuits imprimés et intégrés ont montré qu'un gain d'un facteur 2 à 3 de la résolution spatiale était possible. Nous insistons sur le fait qu'il ne s'agit pas d'une méthode alternative à la miniaturisation des sondes. Il s'agit plutôt d'une méthode additionnelle pour améliorer la résolution spatiale, notamment lorsque l'injection utilise une sonde relativement large.

Dans ce papier, la caractéristique de réception a été extraite à partir des mesures de la tension induite par la sonde d'injection. Cependant, dans la plupart des tests d'immunité, ce type de mesure ne constitue pas le seul critère de défaillance. D'autres études sont donc nécessaires pour valider cette méthode quelque soit le critère d'immunité mesuré.

REFERENCES

[1] S. Zaky, K.G. Balmain, G.R. Dubois, "Susceptibility Mapping", in Proc. Int. Symp. on EMC, 1992, pp. 439-442.

[2] O. Kroning, M. Krause, M. Leone, "Near field-Immunity Scan on Printed Circuit Board Level", in Proc. SPI, 2010, pp. 101-102.

[3] A. Boyer, E. Sicard, S. Bendhia, « Characterization of the Electromagnetic Susceptibility of Integrated Circuits using a Near Field Scan », Electronic Letters, vol. 43, no. 1, pp. 15-16, 4th Jan. 2007.

[4] T. Dubois, S. Jarrix, A. Penarier, P. Nouvel, D. Gasquet, L. Chusseau, B. Azaïs, "Near-Field Electromagnetic Characterization and Perturbation of Logic Circuits", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 11, pp. 2398 - 2404, Nov.2008.

[5] G. Muchaidze, J. Koo, Q. Cai, T. Li, L. Han, A. Martwick, K. Wang, J. Min, J. L. Drewniak, D. Pommerenke, "Susceptibility Scanning as a Failure Analysis Tool for System-Level Electrostatic Discharge (ESD) Problems", IEEE Trans. on EMC, vol. 50, no. 2, pp. 268-276, May 2008.

[6] J. Shi, M. A. Cracraft, K. P. Slattery, M. Yamaguchi, R. E. DuBroff, "Calibration and Compensation of Near-Field Scan Measurements", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 47, no 3, August 2005.

[7] A. Tankielun, "Data Post-Processing and Hardware Architecture of Electromagnetic Near-Field Scanner", Shaker Verlag, 2007.

[8] C. Labarre, F. Costa, C. Gautier, "Wiener Filtering applied to Magnetic Near Field Scanning", Progress In Electromagnetics Research, PIER 96, 63-82, 2009.

[9] A. Tankielun, U. Keller, W. John, H. Garbe, "Complex Deconvolution for Improvement of Standard Monopole Near-Field Measurement Results", 16th Int. EMC Zurich Symposium, February 2005.

[10] R. Brahimi, A. Kornaga, M. Bensetti, D. Baudry, Z. Riah, A. Louis, B. Mazari, "Postprocessing of Near-Field Measurement Based on Neural Networks", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 60, no 2, February 2011.

[11] FEKO, Comprehensive Electromagnetic Solutions, <http://www.feko.info/> for more information.

[12] S. Ben Dhia, E. Sicard, F. Caignet, "A new method for measuring signal integrity in CMOS ICs", Microelectronic Int. Journal, vol. 17, no. 1, Jan. 2000.

[13] S. Ben Dhia, A. Boyer, B. Vrignon, M. Deobarro, T. V. Dinh, "On-Chip Noise Sensor for Integrated Circuit Susceptibility Investigations", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 61, no. 3, pp. 696-707, Mar. 2012.

[14] A. Boyer, B. Vrignon, M. Cavarroc, "Modeling Magnetic Near-Field Injection at Silicon Die Level", IEEE Trans. on EMC, vol. 58, no 1, pp. 257-268, Feb. 2016.