HAL open science

Statistiques universelles du champ électromagnétique dans une chambre réverbérante chaotique

O. Legrand, U. Kuhl, F. Mortessagne, Jean-Baptiste Gros, Elodie Richalot

To cite this version:

O. Legrand, U. Kuhl, F. Mortessagne, Jean-Baptiste Gros, Elodie Richalot. Statistiques universelles du champ électromagnétique dans une chambre réverbérante chaotique . Assemblée générale du Groupement de Recherche Ondes “Interférences d’Ondes” , Oct 2015, Lyon, France. hal-01310731

HAL Id: hal-01310731

https://hal.science/hal-01310731v1

Submitted on 3 May 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.

Statistiques universelles du champ électromagnétique dans une chambre réverbérante chaotique

O. Legrand[1], U. Kuhl[1], F. Mortessagne[1], J.-B. Gros[2], E. Richalot[3]
[1] : *Université Nice-Sophia Antipolis, CNRS, LPMC, UMR 7336, 06100 Nice, France*
[2] : *Université du Maine, CNRS, LAUM, UMR 6613, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France*
[3] : *Université Paris-Est, ESYCOM, UPEMLV, ESIEE-Paris, CNAM, 77454 Marne-la-Vallée, France*
olivier.legrand@unice.fr

Résumé
Ce papier présente les résultats d'études concernant les statistiques de la réponse électromagnétique des chambres réverbérantes (CR) chaotiques en présence de pertes. Ces résultats découlent du caractère universel des statistiques spectrales et spatiales des modes de la cavité qu'on peut décrire à partir de la théorie des matrices aléatoires appliquée au formalisme du hamiltonien effectif développé dans les systèmes ondulatoires ouverts. On présente des résultats expérimentaux obtenus dans une chambre réverbérante à brassage de modes rendue chaotique. Ces résultats illustrent comment les propriétés universelles de telles CR permettent notamment de valider le critère d'uniformité proposé par la norme IEC 61000-4-21, ceci même au voisinage de la fréquence minimale d'utilisation (LUF acronyme de lowest useable frequency en anglais).

1. Introduction

Les CR électromagnétiques (EM) sont couramment utilisées pour des tests de compatibilité électromagnétique (CEM) [1]. Grâce à divers types de brassage et à la présence de mécanismes de pertes produisant du recouvrement modal, le champ résultant est supposé statistiquement isotrope, uniforme et dépolarisé. Ces propriétés sont bien comprises et décrites par les hypothèses de Hill lorsque la fréquence de travail est très supérieure à la LUF [2]. Cependant, au voisinage de la LUF, le champ EM peut n'être ni uniforme ni isotrope statistiquement en dépit du brassage. Dans ce régime, les CR conventionnelles présentent un comportement statistique dépendant fortement de la géométrie comme de la disposition des antennes ou de l'objet sous test. A partir d'un modèle basé sur la théorie des matrices aléatoires appliqué aux systèmes ondulatoires ouverts, nous avons montré comment une amélioration importante du comportement statistique de la réponse EM d'une CR est obtenue, même au voisinage de la LUF, en la rendant chaotique [3, 4, 5]. Dans une CR chaotique, la plupart des modes considérés individuellement présentent toutes les caractéristiques statistiques attendues pour une « bonne » CR. Par la suite, nous utiliserons le terme d'*ergodicité* pour qualifier ce comportement générique des modes. Les mécanismes de dissipation liés aux pertes ohmiques ou autres couplages avec les antennes conduisent à transformer le spectre discret d'une cavité fermée associé à des modes propres réels en un ensemble de résonances complexes associés à des modes propres eux-mêmes complexes et non orthogonaux [5]. Ainsi le comportement ergodique des modes d'une CR chaotique permet d'établir une réponse statistiquement uniforme du champ pour des fréquences d'excitation bien inférieures à celles où les hypothèses de Hill sont valides.

En particulier, on montre que, pour des fréquences proches de la LUF, un critère proposé dans la norme [1] pour évaluer l'uniformité de la distribution du champ, est valide dans une CR chaotique alors qu'il ne l'est pas dans une CR conventionnelle. Ces résultats découlent du caractère universel des statistiques du champ dans une CR chaotique, en opposition complète avec ce qui est obtenu à basse fréquence dans une CR conventionnelle où les détails spécifiques de la chambre conduisent à un comportement statistique imprévisible.

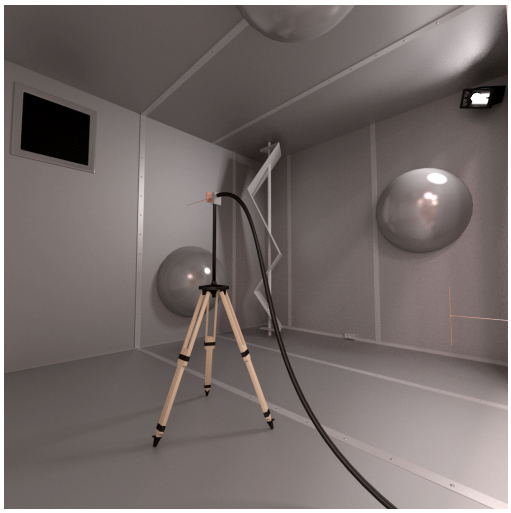

Figure 1. Vue d'artiste de la chambre réverbérante rendue chaotique par l'adjonction de 3 hémisphères.

2. Statistiques de la réponse dans des CR chaotiques

Les résultats présentés ici ont été obtenus dans la CR représentée dans la figure 1. Une CR commerciale équipée d'un brasseur vertical est rendue chaotique par l'adjonction de 3 ou 6 hémisphères métalliques (de rayon

40 cm) sur les murs, le sol et le plafond. Dans les 2 configurations chaotiques aussi bien que la CR non modifiée, le volume est d'environ 20 m^3 et les mesures ont été effectuées entre deux antennes monopoles pour 30 positions de brasseur espacées de 12 degrés et 8 différentes positions de l'antenne de mesure dans le volume de test. Deux gammes de fréquences ont été explorées : une autour de 400 MHz (avec 3 hémisphères), l'autre autour de 250 MHz (avec 6 hémisphères). En utilisant comme unique paramètre le recouvrement modal moyen mesuré dans les deux gammes de fréquence, nous avons pu, à l'aide de la théorie des matrices aléatoires appliquée aux CR chaotiques, prédire la distribution de l'intensité des composantes du champ et la comparer avec succès aux histogrammes déduits des mesures sur près de 3 ordres de grandeur [6,7].

Nous avons également estimé les fluctuations des maxima de l'amplitude du champ via la quantité [1]:

$$\sigma_{i,dB} = 20 * \log\left(\frac{\sigma_i + \left\langle \vec{E}_{i\max} \right\rangle}{\left\langle \vec{E}_{i\max} \right\rangle}\right) \qquad (1)$$

pour laquelle, en 8 points de mesure, pour 30 positions du brasseur, on a extrait l'amplitude de la composante *i* du champ et gardé la valeur maximale dont la moyenne et l'écart type interviennent dans l'expression (1). Selon la norme [1], on peut considérer le champ comme uniforme si $\sigma_{dB} < 3$ dB au-dessus de la LUF (par exemple autour de 400 MHz) tandis que $\sigma_{dB} < 4$ dB est requis pour des fréquences voisines ou inférieures à la LUF (par exemple autour de 250 MHz). La comparaison des distributions des σ_{dB} des trois configurations (échantillons comprenant 1251 fréquences d'excitation dans l'intervalle [220 MHz, 270 MHz] et de 1024 fréquences dans l'intervalle [390, 410]) mettent en évidence que ces critères sont beaucoup mieux vérifiés dans les cas chaotiques que dans la CR conventionnelle. Ainsi, autour de 250 MHz, le critère n'est pas respecté pour 20% de l'échantillon dans la CR conventionnelle et seulement pour 8% dans la CR chaotique à 6 hémisphères. Autour de 400 MHz, la CR chaotique à 3 hémisphères vérifie à 94% le critère tandis que la CR conventionnelle échoue à le vérifier sur environ 30% de l'échantillon.

Pour interpréter correctement ces résultats, il est important de remarquer d'abord que, selon des simulations numériques des chambres étudiées ici, les fréquences auxquelles le critère n'est pas vérifié correspondent presque toujours à des réponses dont la distribution spatiale n'est manifestement pas *ergodique*. De surcroît, en augmentant le nombre de points de mesures indépendants dans la chambre, on observe numériquement que les histogrammes de σ_{dB} tendent à se concentrer au-dessous des 3 dB autour de 400 MHz [6] et bien au-dessous des 4 dB autour des 250 MHz dans les configurations chaotiques alors qu'aucune tendance similaire n'est observée dans la CR conventionnelle. Au contraire, en augmentant le nombre de points de mesure indépendants, on peut même observer que le critère (1) se trouve souvent beaucoup moins bien vérifié. Ainsi, la raison profonde de ces différences de comportement réside dans l'*ergodicité* de la réponse d'une CR chaotique qui conduit à des statistiques universelles qu'on peut complètement décrire à l'aide des propriétés universelles de la théorie des matrices aléatoires appliquée aux systèmes ondulatoires chaotiques ouverts [5].

3. Conclusion

Dans ce papier, nous présentons une étude expérimentale de la statistique de la réponse EM dans une chambre réverbérante rendue chaotique en ajoutant des éléments hémisphériques sur ses murs. Une approche théorique basée sur la théorie des matrices aléatoires appliquée aux systèmes ondulatoires chaotiques ouverts nous permet de prédire la distribution de l'intensité normalisée de la réponse en fonction d'un paramètre unique, à savoir le recouvrement modal moyen. Cette prédiction est comparée avec succès à nos mesures dans la CR chaotique, confirmant ainsi le rôle clé du caractère *ergodique* de la réponse de la CR chaotique pour améliorer son comportement statistique au voisinage de sa LUF. En particulier, ces résultats démontrent que le critère proposé par la Norme pour évaluer l'uniformité de la distribution spatiale du champ EM, lorsqu'il est utilisé près de la LUF et dans un régime de recouvrement modal modéré, n'est pertinent que si la CR est chaotique.

4. Remerciements

L'ensemble de ces travaux a été soutenu par l'ANR dans le cadre du projet CAOREV. Nous tenons à remercier Philippe Besnier avec lequel nous avons eu des discussions fructueuses.

5. Bibliographie

[1] CISPR/A and IEC SC 77B, IEC 61000-4-21, « Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and Measurement Techniques - Reverberation Chamber Test Methods », International Electrotechnical Commission (IEC) International Standard.

[2] D. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories*, IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory, IEEE; Wiley, 2009.

[3] J.-B. Gros, O. Legrand, F. Mortessagne, E. Richalot, K. Selemani, "Universal behaviour of a wave chaos based electromagnetic reverberation chamber", *Wave Motion* 51: 664, 2014.

[4] J.-B. Gros, « Statistiques spatiales des cavités chaotiques ouvertes : Applications aux cavités chaotiques électro-magnétiques », *PhD thesis*, 2014.

[5] J.-B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, and F. Mortessagne, « Lossy chaotic electromagnetic reverberation chambers: Universal statistical behavior of the vectorial field », soumis à *Phys. Rev. E*, et disponible sur http://arxiv.org/abs/1509.06476.

[6] J. B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, F. Mortessagne, O. Picon, and E. Richalot, "Statistics of the electromagnetic response of a chaotic reverberation chamber," (2014), soumis à *Advanced Electromagnetics* (AEM) et disponible sur arXiv:1409.5863.

[7] J.-B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, and F. Mortessagne, and E. Richalot, « Universal intensity statistics in a chaotic reverberation chamber to refine the criterion of statistical field uniformity. » *Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2015 IEEE*, Jun 2015, Benevento, Italy. IEEE Xplore – Metrology for Aerospace, pp.225-229, 2015.