



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Titre (français) : Créer de l'ordre dans un milieu aléatoire : le retournement temporel généralisé et ses applications potentielles

Title (English): Creating order out of random media : generalized time-reversal and its potential applications

*Andrea. Cozza**, *Florian Monsef***

* Département de Recherche en Electromagnétisme, Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S), UMR 8506 SUPELEC– Univ Paris-Sud - CNRS, 3 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon, 91192, Gif sur Yvette, E-mail: andrea.cozza@ieee.org

** Département de Recherche en Electromagnétisme, Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S), UMR 8506 SUPELEC– Univ Paris-Sud - CNRS, 3 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon, 91192, Gif sur Yvette, E-mail: florian.monsef@lss.supelec.fr

Mots-clefs :

Milieux complexes, retournement temporel, synthèse fronts d'onde, chambres réverbérantes, sources synthétiques.
Complex media, time reversal, wavefront synthesis, reverberation chamber, synthetic sources.

Résumé

La contraposition actuelle entre moyens d'essai de type anéchoïques et réverbérants est remise en question par l'introduction récente d'un nouveau moyen d'essai, la TREC (Time-reversal electromagnetic chamber), basé sur le développement d'une technique de retournement temporel généralisée. Cette technique permet d'émuler une propagation simple dans un environnement complexe : nous avons donc pu réunir les avantages respectifs des chambres anéchoïques, réverbérantes et des techniques d'ouverture synthétique. Cette nouvelle technique permet d'envisager des applications de test non facilement réalisables aujourd'hui, basées sur la génération temps-réel de fronts d'onde arbitraires avec un nombre très limité de sources, idéalement une seule. Nous rappelons le parcours qui nous a conduit à ce développement, les propriétés assurées par cette technique et les applications que nous comptons développer prochainement.

Introduction

La plus part des milieux rencontrés dans la nature sont de type complexe; par ce terme nous considérons toute configuration où une onde, à l'occurrence électromagnétique, initialement décrite par un front d'onde simple, se retrouve à interagir un nombre important de fois avec le milieu, générant une multitude de nouvelles ondes diffractées se propageant le long de directions différentes de celle initiale. C'est le cas, par exemple, de la propagation des ondes radio à l'intérieur des bâtiments, des véhicules, de leur interaction avec des surfaces rugueuses; ces type de réponse est observée à toute échelle, affectant les ondes radio et, encore plus largement, la lumière. Des telles configurations permettent, si le milieu est suffisamment complexe, de représenter la propagation des ondes électromagnétiques comme des processus aléatoires, suivant certaines lois de probabilité. Cette représentation prend une forme particulièrement simple et générale dans le cas de milieux diffusifs, où le résultat de l'interaction d'une onde avec ces milieux est la génération d'un nombre idéalement infini d'ondes se propageant le long de toute direction, sans privilégier une polarisation parmi les autres. Ce cas s'avère très répandu en optique, notamment pour la lumière naturelle.

Dans ce contexte qui pourrait paraître comme particulier, mais qui en réalité correspond à un grand nombre de scénarii d'interaction onde matière, les grandes cavités, aussi appelées chambres réverbérantes, sont un moyen de reproduire les conditions de propagation d'ondes électromagnétiques dans des milieux complexes, tout en restant dans le périmètre du laboratoire. Il ne s'agit pas de se limiter à reproduire des configurations de propagation naturelles: ces milieux sont en effet propices à des applications de métrologie, surtout si configurés de telle sorte à générer un champ diffus.

La contraposition entre chambres réverbérantes et anéchoïques ne pourrait donc pas être plus spectaculaire, avec leurs comportements intuitivement regardés comme mutuellement incompatibles.

En pratique, cette contraposition a un impact direct sur le choix d'un moyen d'essai par rapport à l'autre. Deux des éléments clés contraposant chambres anéchoïques et réverbérantes sont le contrôle de la génération de fronts d'onde et le rendement énergétique ; comme il est bien connu, ces deux propriétés sont mutuellement exclusives dans les chambres anéchoïques et réverbérantes.

Il serait donc intéressant de pouvoir conjuguer les avantages de ces deux moyens d'essai, afin de disposer d'une génération fiable et déterministe de fronts d'onde tout en profitant d'un bon rendement. C'est dans ce contexte que s'insère le travail de recherche mené au L2S depuis plusieurs années, visant à émuler dans une chambre réverbérante la propagation simple observée dans une chambre anéchoïque [1-5].

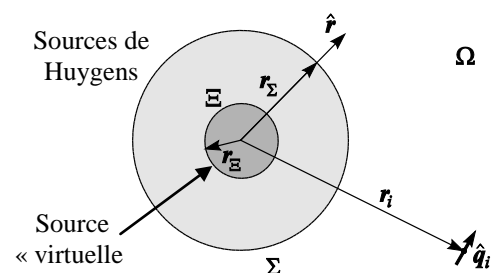


Fig. 1: virtualisation d'une source par l'introduction de sources équivalentes [7].

1. Simplifier la génération de fronts d'onde : le retournement temporel de sources virtuelles

Pour ce faire, nous avons introduit une technique de retournement temporel généralisée. Le retournement temporel, dans sa version la plus classique [6], exploite l'invariance de l'équation d'Helmholtz au retournement temporel, valable dans tout milieu, même complexe, où les pertes par dissipation sont négligeables. Il devient alors possible de générer des fronts d'onde simples à l'aide d'une phase initiale où une source physique est excitée générant un front d'onde divergent, dont l'évolution temporelle est enregistrée par des capteurs, constituant un miroir à retournement temporel (MRT). Les signaux ainsi collectés, après avoir traversé et interagit avec le milieu, seront utilisés par la suite, "joués à l'envers", pour générer le même front d'onde, qui se reconstituera vers sa forme initiale aux alentours de la position de la source.

Si nous souhaitons appliquer cette technique pour la définition d'un nouveau moyen d'essai, il serait alors nécessaire de disposer d'une collection de sources, pour tout type de front d'onde désiré, et surtout de répéter ces deux phases pour chaque changement de source, direction d'arrivée, polarisation, dépendance temporelle, ce qui rend clairement inenvisageable son application pratique.

La solution que nous avons apportée permet de contourner cette difficulté grâce à la virtualisation des sources, basée sur l'utilisation du théorème d'équivalence (Fig. 1). Sans rentrer dans les détails, il en résulte la possibilité de synthétiser directement les signaux à appliquer au MRT,

$$V_i(\omega) \propto \int_{\Sigma} N_{\text{eq},i}(\mathbf{r}, \omega) \cdot E_{\text{wf}}(\mathbf{r}, \omega) d^2\mathbf{r} \quad (1)$$

afin de produire un front d'onde $E_{\text{wf}}(\mathbf{r}, t)$ quelconque, à partir des fonctions de transfère entre le MRT et la surface des sources équivalentes. Les détails de cette procédure sont disponibles dans [7]. L'implémentation pratique de cette procédure est nommée TREC (time-reversal electromagnetic chamber) [1,3].

2. Des avantages propres de la TREC

L'intérêt de la TREC ne se limite pas à la génération de fronts d'ondes avec un fort rendement énergétique. Le fait qu'elle soit basée sur l'utilisation d'un milieu diffusif implique d'autres propriétés. Tout d'abord, les seules vraies sources qui rayonnent activement de la puissance sont les antennes du MRT. L'analogie avec les antennes d'émission utilisées pour la synthèse de fronts d'onde en chambre anéchoïque serait trompeuse : dans un milieu diffusif, les propriétés statistiques du champ généré ne dépendent pas de la position ou l'orientation de ces antennes, ni de leurs caractéristiques radiatives (directivité, polarisation, etc.). On s'affranchi donc de l'imposition existante pour les techniques de synthèse de fronts d'onde actuelles, où la tolérance de positionnement des sources est une grandeur fondamentale à la robustesse de la procédure.

Encore plus important, il ne faut plus imaginer chaque source comme uniquement capable d'exciter un spectre d'ondes planes limité à un secteur angulaire, avec une polarisation aussi limitée à certaines configurations. En effet, dans un milieu diffusif idéal, une seule source est capable de se coupler en moyenne à un spectre d'ondes planes portant sur toutes les directions et polarisations possibles. Il devient alors envisageable d'utiliser une seule source pour générer tout type de front d'onde. Cette propriété n'est certes pas possible si on observe le rayonnement d'une source dans un milieu diffusif à une simple fréquence : le spectre d'ondes planes ainsi excité serait aléatoire et non contrôlable. Mais l'utilisation de signaux à bande non étroite permet de contrôler le résultat final, en jouant sur la faible cohérence spatiale du milieu, ce qui permet de profiter d'une propriété autrement connue comme auto-moyennage. Il devient alors possible de générer des ondes se propageant le long de n'importe quelle direction et polarisation, indépendamment de la position et typologie de source.

Il pourrait être rétorqué qu'une telle procédure n'est rien d'autre qu'une version plus complexe de retournement temporel, où la source initiale dont on retourne le front d'onde rayonné est substituée par un réseau de sources élémentaires. La différence fondamentale avec une telle procédure et justement l'absence de rayonnement des sources équivalentes. En effet, ces dernières se limitent à intervenir en tant qu'intermédiaires dans la synthèse des signaux d'excitation. Il serait plus correct de les appeler sources auxiliaires. Il s'agit donc d'une véritable généralisation du principe du retournement temporel, qui s'affranchi des contraintes imposées par sa version standard. Celles-ci ne sont certes pas anodines : il suffit de penser aux difficultés pratiques dans l'excitation d'un tel réseau de sources équivalentes, notamment des câbles, sans que ces derniers modifient la propagation d'un front d'onde se focalisant par la suite.

Le grand intérêt de la TREC n'est pas uniquement de pouvoir émuler une propagation simple dans un milieu couramment regardé comme aléatoire, ni de pouvoir profiter du fort rendement énergétique des chambres réverbérantes : la synthèse directe de fronts d'onde permet d'envisager un nouveau mode de caractérisation où des fronts d'onde arbitraires pourront être générés sans besoin de disposer d'une source physique capable de les produire directement. Nous pensons notamment à ce qui est couramment fait dans les techniques d'ouverture synthétique, où les résultats de la génération de fronts d'ondes idéaux sont facilement accessibles, sans pour autant avoir besoin d'un ensemble de sources qui serait tout simplement irréalisable.

La Fig. 2 illustre l'idée de synthèse de fronts d'onde déterministes dans une chambre réverbérante. Il apparaît que la distribution de champ dans la zone focale est pratiquement indépendante de la direction d'arrivée, ce qui prouve une robustesse intrinsèque de la technique proposée.

3. Perspectives d'application

Plusieurs applications potentielles ont été identifiées. Le cadre applicatif d'origine est celui des essais CEM, où la capacité de générer des sollicitations résolues dans l'espace apporterait un grand avantage, la capacité à identifier des voies de couplages discrète dans un système sous test. Un exemple de fronts d'onde générés dans une TREC est donné en Fig. 3, montrant des résultats obtenus à Supélec. Ces résultats montrent comment il est possible de générer une tâche focale qui peut être déplacée en modifiant simplement les signaux d'excitation, comme indiqué dans (1). Cette approche a été appliquée dans [10] pour identifier la présence d'une fente dans un boîtier, grâce à une analyse polarimétrique de la fonction de couplage du boîtier.

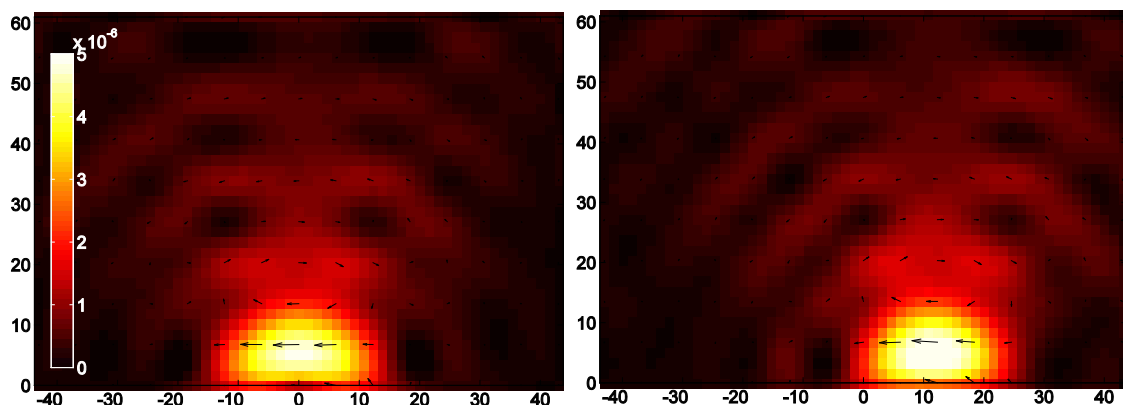


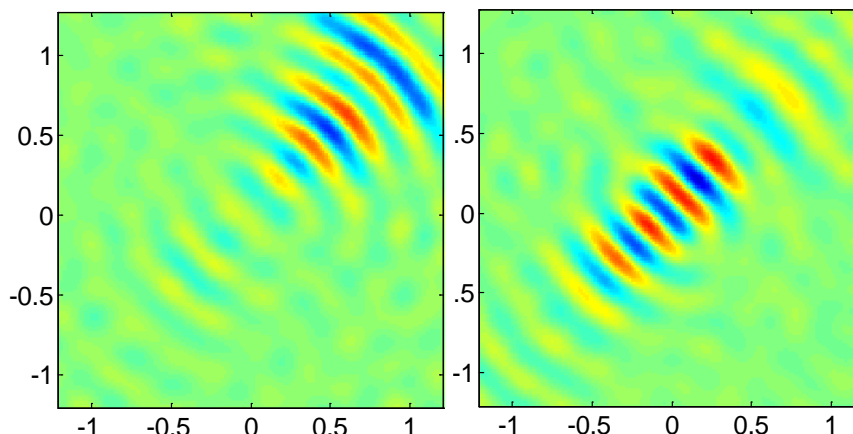
Fig.3 – Validation expérimentale de la précision de contrôle d'une tâche focale (position et polarisation) générée dans une TREC [10].

Une autre application envisageable est la caractérisation rapide d'antennes, une thématique proposée en [8-9], où une chambre réverbérante ne se limiterait plus à la mesure du rendement de rayonnement d'une antenne, mais deviendrait un véritable moyen de caractérisation de sources, comme une chambre anéchoïque. La différence fondamentale serait à nouveau l'utilisation d'un milieu diffusif : idéalement une seule sonde serait capable de collectionner toutes les données nécessaires à la caractérisation de la source, sans nécessiter de déplacements mécaniques des sondes ni leur

multiplication. Un exemple est montré en Fig. 4, où l'on voit un front d'onde optimisé afin de générer une zone de champ d'amplitude constante, le long d'une section planaire. Une telle capacité est l'ingrédient indispensable à la définition d'un moyen de caractérisation d'antennes [11].

Fig.4 – Résultats numériques concernant la génération d'une zone tranquille en TREC pour la caractérisation d'antennes large bande en domaine temporel (cf. [9]). L'image de gauche montre le front d'onde responsable de la génération de la zone tranquille, montrée à droite.

Les variations relatives de l'amplitude du champ sont inférieures à 10 %, comme requis dans les pratiques actuelles dans une chambre anéchoïque.



Conclusions

Nous avons rappelé les motivations qui ont amené à l'introduction d'une technique généralisée de retournement temporel. Cette technique permet de réunir les avantages relatifs des chambres anéchoïques et réverbérantes, tout en introduisant des nouvelles propriétés exploitant la complexité de la propagation des ondes dans un milieu diffusif.

Notre motivation est de montrer que cette technique ne constitue pas une version plus complexe du retournement temporel standard, mais répond au contraire à une limitation intrinsèque de ce dernier : le lien de dépendance entre une source physique et les fronts d'onde qui peuvent être générés est ainsi brisé. Les premières applications en cours d'étude se concentrent autour de la CEM et de la caractérisation d'antennes, avec le but d'en réduire la durée.

Références bibliographiques

- [1] H. Moussa, A. Cozza, M. Caeterman, "Experimental demonstration of directive pulsed wavefront generation in reverberation chambers", *IET Electronics Letters* **46**, 9 (2010).
- [2] A. Cozza, "Increasing peak-field generation efficiency of reverberation chamber", *IET Electronics Letters* **46**, 9 (2010).
- [3] A. Cozza, H. Moussa, "Procédé de contrôle de la directivité et la polarisation de distributions cohérentes de champ dans un milieu réverbérant", WO 2010/112763. Oct. 2010.
- [4] A. Cozza, H. Moussa, "Enforcing a deterministic polarization in a reverberating environment", *IET Electronics Letters* **45**, 25 (2009).
- [5] A. Cozza, "Statistics of the performance of time reversal in a lossy reverberating medium", *Physical Review E* **80**, 5 (2009).
- [6] M. Fink. "Time reversal of ultrasonic fields : part I. Basic principles," *IEEE Trans. Ultrason. Ferro-elect. Freq. Control*, **39**, 5 (1992).
- [7] A. Cozza, "Emulating an Anechoic Environment in a Wave-Diffusive Medium through an Extended Time-Reversal Approach", *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, **60** (8), 2012.
- [8] A. Cozza, A. Abou-El-Aileh, "Accurate Radiation-Pattern Measurements in a Time-Reversal Electromagnetic Chamber", *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **52**, 2 (2010).
- [9] P. Meton, F. Monsef, A. Cozza, M. Lambert, C. Joly, "Analysis of Wavefront Generation in A Reverberation Chamber for Antenna Measurements", *EuCAP 2013, Göteborg, Suède*.
- [10] A. Cozza, C. Galle, J.-P. Brasile, C. Carel, "Sensing coupling paths in an equipment", 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Singapour.
- [11] O.M Bucci et al. "Plane-Wave Generators: Design Guidelines, Achievable Performances and Effective Synthesis", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, in press.