

Cela revient à dire que cette unique antenne à 200 degrés de liberté fréquentiels est capable de focaliser un signal à large spectre avec la même qualité que 200 antennes réparties dans l'espace qui fonctionneraient avec une unique fréquence (monochromatique).

Ainsi, une seule antenne exploitant une large diversité de fréquences, et donc beaucoup de degrés de liberté fréquentiels, est suffisante pour focaliser un rayonnement ayant traversé un milieu diffusant. À chaque point de l'espace correspond un signal temporel unique. Une fois connu l'ensemble des signaux correspondant à tous les points d'une zone, on peut soit focaliser sur chacun des points, soit utiliser cette banque de signaux pour localiser des sources quelconques ou pour faire l'image d'une source complexe à partir du signal enregistré par une unique antenne.

Cavités et autres pièges

Le succès des techniques de retournement temporel vient du fait qu'il existe de nombreuses situations dans la vie courante où l'on observe le même type d'effet que dans les milieux diffusants. C'est le cas chaque fois qu'une onde se propage dans un milieu entouré de parois réfléchissantes. On est alors dans une situation analogue à celle qui se produit dans un kaléidoscope, où un petit objet semble se répéter de façon périodique selon certaines directions. De même, pour un observateur situé au sein d'une cavité réfléchissante ou à l'intérieur des parois d'un guide d'ondes, chaque transducteur

d'un petit miroir à retournement temporel apparaît comme accompagné d'une multitude de transducteurs virtuels créés par les parois réfléchissantes. On a ainsi l'impression d'avoir un grand miroir à retournement temporel formé de beaucoup de transducteurs.

En 2002, William Kuperman et ses collègues de l'Institut américain de recherche SCRIPPS ont observé cet effet spectaculaire en mer. Ils ont conçu un miroir acoustique à retournement temporel de 98 mètres de longueur, formé de 29 transducteurs fonctionnant autour d'une fréquence centrale de trois kilohertz (soit à une longueur d'onde de 50 centimètres). Ils l'ont immergé au large de l'île d'Elbe dans une zone où la profondeur est de l'ordre d'une centaine de mètres. En modulant le signal envoyé par le miroir à retournement temporel, ils ont focalisé un message sonore à dix kilomètres de distance qui n'était capté que par un plongeur situé à l'emplacement de la tache focale ! Cette technique a donné lieu à de nombreux développements dans le domaine des communications sous-marines et, récemment, une équipe japonaise a réalisé des communications sur plus de 1 000 kilomètres par retournement temporel.

Peut-on conserver une bonne focalisation en réduisant les 29 transducteurs du miroir à retournement temporel à un unique transducteur ? Pas si l'on reste dans la mer, qui se comporte comme un guide d'ondes acoustiques dans lequel les ondes sont réverbérées entre le fond de la mer et la surface de l'eau, mais peuvent « fuir » latéralement. En effet, un guide d'ondes

présente peu de degrés de liberté fréquentiels. La solution consiste à travailler avec une cavité fermée, où les ondes sont piégées. On sait qu'un champ ondulatoire enfermé dans une cavité peut toujours s'écrire comme la superposition d'un certain nombre de « modes de vibration » dont les fréquences sont parfaitement définies. Pour chaque mode, tous les points du milieu vibrent avec la même fréquence temporelle, mais avec des phases et des amplitudes différentes.

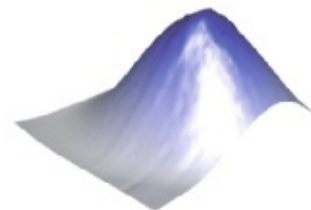
Certains points vibrent avec une certaine phase, d'autres en opposition de phase. Les points situés aux nœuds des modes ne vibrent pas du tout, alors que ceux situés aux ventres vibrent beaucoup. À chaque mode est associée une figure de vibration et la distance la plus petite entre un nœud et un ventre est égale à la demi-longueur d'onde des ondes acoustiques vibrant à la fréquence du mode. Par ailleurs, deux modes de fréquences différentes ont des figures d'oscillations indépendantes, qui sont les analogues de deux figures de tavelures décorrelées.

Si une source unique, située dans une cavité au point A, émet une impulsion brève à large spectre, elle peut exciter de nombreux modes de cette cavité, et un simple transducteur situé en un point quelconque B de la cavité peut servir de miroir à retournement temporel. Au point B, le transducteur mesure un signal, superposition de tous les modes produits par le point A, qui s'étale sur un temps très grand. Après retournement temporel, le signal est réémis dans la cavité et refocalise au point A. La refocalisation spatio-temporelle sera d'autant plus



3. UN « CRISTAL » DE 49 CANETTES DE SODA peut osciller suivant 49 modes de vibration différents dont les fréquences s'étalent entre 340 et 420 hertz, alors qu'une canette isolée oscille à 420 hertz. Quand l'une des canettes reçoit un signal acoustique de quelques millisecondes, tous les modes du cristal sont excités et des transducteurs éloignés reçoivent la superposition de ces modes. Après retournement temporel, le signal se concentre sur l'unique canette où était située la source. La résolution atteint $\lambda/25$.

Tache focale sans les canettes



Tache focale avec les canettes

