

Une nouvelle façon d'acquérir les signaux

EDISON CRISTOFANI

Ingénieur et doctorant, Edison CRISTOFANI est collaborateur scientifique au département CISS (*Communication, Information, Systems & Sensors*) de l'École royale militaire depuis 2010 et développe des algorithmes pour le traitement des signaux. Depuis 2015, il est représentant national pour la Belgique au *NATO Research Task Group SET-RTG-236* en tant qu'expert en *compressed sensing*.

Tijdens het voorbije decennium zag een nieuwe theorie voor signaalacquisitie het levenslicht: compressed sensing. De voordelen van deze nieuwe techniek komen vaak van pas in vele wetenschappelijke gebieden, onder meer bij hoogfrequente radarsensoren. Door deze nieuwe ontwikkeling kan het oorspronkelijke signaal gereconstrueerd worden met een fractie van willekeurige monsters en dit bijna zonder verliezen. Deze nieuwe aanpak zorgt niet alleen voor een reductie van de datavolumes, die door data-intensieve systemen gegenereerd worden, maar ook voor de vereenvoudiging van de hardware van de sensoren door een aanpassing ervan aan dit nieuwe en minder belastende bemonsteringsschema. Een onderzoeksgroep van de Koninklijke Militaire School voert onderzoek naar de toepassingen van deze theorie op het gebied van defensie.

Dans l'histoire relativement courte de l'acquisition des données, développée en 1948 par les ingénieurs américains Harry Nyquist et Claude Shannon, on s'est appuyé sur la notion – et en même temps restriction – de l'utilisation obligatoire d'une fréquence d'échantillonnage au moins deux fois plus élevée que celle qui représente la bande passante du signal acquis. En d'autres termes, pour acquérir un signal avec 100 hertz de bande passante, il faudrait utiliser un capteur à 200 échantillons équidistants par seconde, voire davantage, pour obtenir une reconstruction parfaite des données originales. Sur cette base, tous les appareils scientifiques ou domestiques, quel qu'en soit le prix, capables d'envoyer ou de recevoir des données avec ou sans fil répondent au fameux théorème de Nyquist-Shannon ou théorème d'échantillonnage.



122 Dans les années 50, l'Union internationale des télécommunications (UIT), par sa recommandation UIT-R V.431, considérait que la bande allant de 3 à 30 mégahertz se situait dans le domaine haute fréquence (ou HF). Au cours du temps, cette définition est devenue obsolète – bien que toujours exacte – en conséquence des découvertes et progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de haute fréquence, qui ont permis de développer des appareils jusqu'à des fréquences de fonctionnement extrêmement élevées à des prix abordables et d'ouvrir la voie vers des applications inédites.

Au sein de la Défense, des capteurs et des appareils scientifiques sont utilisés pour de nombreuses applications, certaines présentant de très hautes exigences de performance par rapport aux besoins civils ou commerciaux. Citons à titre d'exemple les systèmes d'imagerie radar, pour lesquels la capacité de distinguer une cible est directement liée à la bande passante. Plus celle-ci est large, meilleure est la résolution en distance donnée. La bande passante est donc un paramètre clé pour concevoir ou acquérir un radar selon l'application souhaitée. Certes, la technologie actuelle nous permet d'accéder à des radars à très haute résolution, mais il faut encore évaluer si l'application visée pourra gérer le volume de données correspondant, en termes de transfert, d'enregistrement et de traitement

Dans ce domaine d'application, l'unité de recherche THz (RUTHz) du département CISS de l'École royale militaire a acquis le *know-how* en exploitant des capteurs à fréquences extrêmement élevées après avoir été *team leader* et collaborateur technique du projet DOTNAC¹. Ce projet, issu du prestigieux septième programme-cadre de recherche et de développement technologique (FP7) de l'Union européenne, coordonné par onze partenaires provenant de cinq pays, a exploré toutes les possibilités de la technologie térahertz (THz, soit mille GHz ou mille milliards de hertz) pour l'inspection de matériaux aéronautiques. Étant donnée la quantité gigantesque de données acquises, la question de réduire substantiellement l'échantillonnage s'est posée, avec comme solution l'acquisition comprimée de données (*compressive ou compressed sensing* en anglais). Cette technique se distingue de la compression de données utilisée en photographie ou en vidéo (les standards JPEG ou MPEG et similaires). Alors que la compression de données prend tous les échantillons nécessaires selon le théorème d'échantillonnage et utilise ensuite des algorithmes pour trouver des motifs de similarité et pour éliminer les redondances, l'acquisition comprimée prend moins d'échantillons, réduisant ainsi le volume des données à traiter, et par conséquent le coût du dispositif électronique.

¹ DOTNAC project: "Development and Optimization of THz non-destructive testing on Aeronautics Composite Multi-layered Structure"

123 Cette nouvelle technique, développée en 2004 par Candès et Donoho et publiée en 2006², a adapté une théorie mathématique existante pour récupérer des groupes incomplets de données. Par exemple, dans un vecteur ou une séquence de données, des algorithmes sont utilisés pour reconstituer les données originales. L'une des conditions nécessaires pour pouvoir utiliser l'acquisition comprimée avec succès est la suivante : les données doivent contenir un nombre restreint d'éléments différents de zéro. Autrement dit, on trouvera un petit nombre d'éléments importants avec de grandes valeurs dans la séquence de données et les autres éléments seront nuls, quasi nuls ou correspondront à du bruit. Prenons l'exemple d'un électrocardiogramme, qui présente des pics permettant de déterminer des caractéristiques de fonctionnement du cœur du patient. Un électrocardiogramme peut être considéré comme un signal parcimonieux (*sparse*, en anglais). Il arrive toutefois qu'un signal ne soit pas parcimonieux dans sa forme obtenue directement du capteur, auquel cas, il faut trouver une représentation équivalente dans un espace mathématique qui favorise le caractère parcimonieux, moyennant une transformation. Lorsque cela est possible, le signal obtenu pourra effectivement être reconstruite en utilisant l'acquisition comprimée.

Quelle est l'influence de cette nouvelle méthode d'échantillonnage sur les capteurs existants ? Suivant la théorie adaptée à l'électronique actuelle, l'échantillonnage doit être aléatoire et non équidistant afin de pouvoir appliquer l'acquisition comprimée d'une façon efficace. Conformément à cette règle, nous pouvons envisager deux possibilités. Premièrement, toutes les données sont mesurées en temps réel et l'on ne garde que quelques échantillons choisis aléatoirement. En second lieu, on crée des capteurs qui prélèvent des échantillons de façon aléatoire et non équidistante. Bien entendu, la deuxième possibilité réduit la complexité du *hardware* ainsi que le volume des données. Or, des systèmes adaptés à l'acquisition comprimée doivent être implémentés et cela aurait un coût initial très élevé pour les entreprises spécialisées en capteurs. Ce coût initial devrait se voir compensé si finalement l'industrie adopte les systèmes d'acquisition comprimée en tant que standard.

Au sein du RUTHz, les premières expériences relatives à l'acquisition comprimée ont démarré en 2011 et gagné en complexité avec le temps. Actuellement, deux des axes de recherche sont le contrôle non destructif et le radar à pénétration de sol. L'objectif est le même dans ces deux cas : atteindre une qualité d'image générée avec le l'acquisition comprimée comparable à celle obtenue au moyen de techniques d'inspection conventionnelles, avec l'avantage que le coût est moindre.

² D. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, Apr. 2006

CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DE MATÉRIAUX

L'inspection à partir des ondes térahertz, qui facilite la possibilité d'accéder à la structure interne des matériaux multicouche sans devoir les découper, ouvre un éventail de possibilités, seulement limité par le type de matériel inspecté. De petits problèmes pendant la production des matériaux peuvent engendrer des défauts et mettre en danger l'intégrité d'une structure ou limiter fortement sa durabilité. Les matériaux dont l'inspection non destructive est possible avec des ondes térahertz sont principalement des diélectriques, comme les fibres de verre et les aramides (spécialement intéressant pour l'aéronautique), le bois (industrie des aérogénérateurs), les polymères tels que le téflon ou l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène), le papier ou le carton (voir Figure 1). Par contre, les matériaux ferreux ou conducteurs, comme les structures multicouches en fibre de carbone, ne peuvent être inspectés que superficiellement, car ils sont opaques aux ondes térahertz (et aussi aux micro-ondes).

Dans le cadre d'une collaboration entre l'École royale militaire et le département d'électronique et d'informatique (ETRO) de la Vrije Universiteit Brussel (ETRO-VUB), le professeur Johan Stiens a ouvert les portes de son laboratoire qui utilise des capteurs à très haute fréquence pour la recherche scientifique, notamment dans le domaine des applications d'imagerie de précision. Sous la direction du professeur Nikos Deligiannis (ETRO-VUB), expert en acquisition comprimée, le RUTHz est parvenu à mesurer des défauts dans des matériaux polymères en utilisant une fraction des échantillons normalement nécessaires. Les défauts dans les structures multicouches sont généralement très petits, ne mesurant que quelques millimètres, et génèrent des variations au niveau des valeurs diélectriques. En d'autres termes, il se produit des changements de matériaux entre couches ou entre couche et défaut. Pour avoir une image suffisamment détaillée, la bande passante du capteur doit être extrêmement large, ce qui génère des volumes de données élevés. Grâce à l'acquisition comprimée, la réduction du volume de données obtenue (dans le cas des mesures basées sur le balayage point par point en fréquence) permet d'atteindre des mesures jusqu'à 80 % plus rapides, ce qui équivaut à multiplier par cinq l'efficacité opérationnelle du capteur.

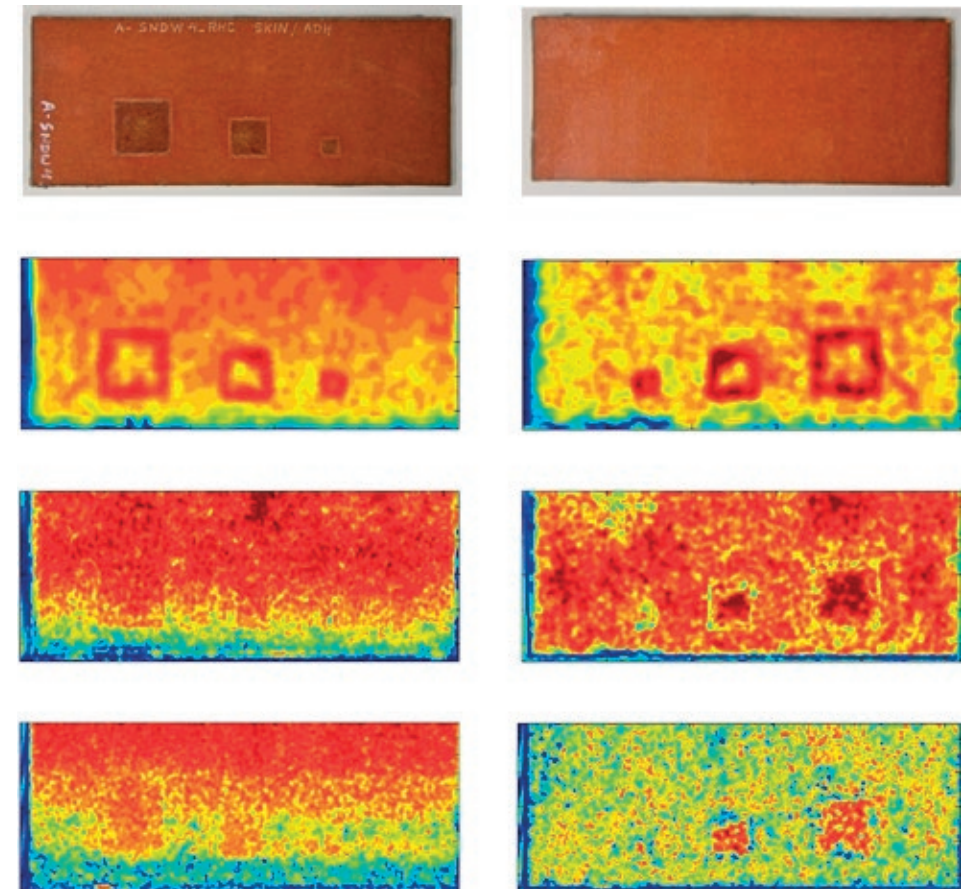


Figure 1 : Un panneau sandwich en fibre de verre avec des défauts artificiels (photo) est inspecté recto-verso en utilisant trois fréquences : 100, 150 et 300 GHz. Les performances des capteurs sont ainsi comparées et évaluées visuellement.

RADARS À PÉNÉTRATION DE SOL

Dans la bande de fréquence des gigahertz, les radars permettent également de voir à travers des matériaux. Dans ce cas-ci, ce ne sont pas des fibres ou polymères qui sont l'objet de l'observation, mais bien le sol. La fréquence du capteur doit être adaptée aux besoins de l'application visée. Généralement, pour voir à travers des sols de différentes natures, les fréquences utilisées ne seront pas supérieures à une dizaine de gigahertz, car au-delà de cette bande de fréquence, le pouvoir pénétrant est fortement atténué.

126 Pour le radar à pénétration de sol (RPS) ou géoradar, le taux d'humidité du sol en raison de la pluie, les différentes couches de substrats et les interactions entre l'antenne et l'interface entre le sol et l'air libre sont critiques pour ce type de mesure hors laboratoire. L'une des applications les plus populaires du RPS dans le domaine de la défense est la détection de menaces dans une zone de déploiement : des mines, qu'elles soient antipersonnel ou antichar, ainsi que des infrastructures cachées, comme des tunnels.

Les surfaces inspectées au moyen d'un RPS peuvent être des terrains ou des routes. Les mesures réalisées dans ce genre d'application produisent des volumes de données considérables. L'utilisation de l'acquisition comprimée et d'algorithmes appropriés permet d'identifier, par exemple le type d'une mine détectée, tout en réduisant substantiellement le volume de données. À cet égard, le RUTHz collabore avec le professeur Lambot de l'Université catholique de Louvain (UCL). Grâce aux RPS mis à la disposition de l'UCL et à un système innovateur pour aborder la modélisation d'antennes, le RUTHz a obtenu des résultats encourageants qui réduisent non seulement le nombre d'échantillons mesurés, mais également le nombre de positions mesurées par le géoradar sur le sol (voir Figure 2). En d'autres termes, le groupe a obtenu des mesures potentiellement moins coûteuses en hardware et 60 % plus rapides, ce qui maximise la performance du système et minimise l'exposition des techniciens manipulant le RPS.

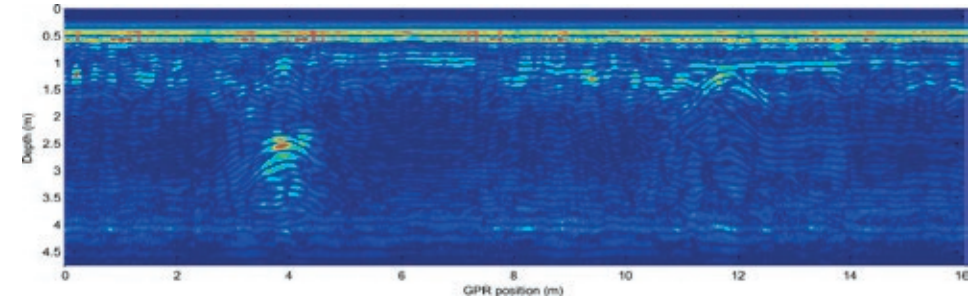


Figure 2 : Un système RPS portable est opéré dans la grande cour de l'Ecole royale militaire. Les mesures réalisées au long des 16 m sur la cour montrent la présence d'une cible (un petit tunnel de service) après 4 m de parcours et enfouie à environ 2 m de profondeur.

L'ACQUISITION COMPRIMÉE, UNE TECHNIQUE POUR L'AVENIR

L'avenir de l'acquisition comprimée est prometteur. En témoignent la multitude de nouvelles applications qui ont vu le jour au cours de ces dernières décennies, le nombre de plus en plus important de publications scientifiques, les conférences internationales ou les groupes de recherche spécifiques. La Défense, à travers le RUTHz, participe à un groupe de recherche de l'OTAN (*NATO Research Task Group SET-RTG-236*) créé en 2016 après le groupe exploratoire NATO SET-ET-093 et chapeauté par l'Organisation pour la science et la technologie de l'OTAN (STO). Avec des partenaires provenant des pays de l'OTAN, ses membres étudient des questions telles que les avantages et limites de l'acquisition comprimée pour les applications de défense, la combinaison optimale de plusieurs capteurs pour améliorer la capacité de reconnaissance des menaces, ou encore la réduction du coût et du temps pour obtenir des données fiables pour les analystes et, finalement, pour appuyer efficacement le processus de prise de décision. <