

L'imagerie holographique à synthèse d'ouverture

Identifier un char à 100 km est un des nouveaux enjeux militaires de ces prochaines décennies. Là où les solutions optiques classiques échouent pour améliorer la résolution, on utilise un concept radar associant acquisition et traitement de signal pour dépasser les limites de résolution. Alliant optique et calcul numérique, la synthèse d'ouverture holographique est un exemple typique des nouveaux systèmes optiques "intelligents", comme l'optique adaptative. Le calcul, au coût sans cesse décroissant, réduit les contraintes du système, remplace certaines fonctions optiques encombrantes et ouvre la voie vers de nouvelles fonctions et de nouvelles applications, telle la superrésolution.

L'imagerie radar, un demi-siècle d'avance...

Dès l'avènement du radar lors de la Seconde Guerre mondiale, les systèmes imageurs hyperfréquences ont rapidement fait leur apparition. Une des motivations étant la reconnaissance et l'identification air-sol, les systèmes imageurs radar aéroportés ont été fortement sollicités, et beaucoup d'efforts ont été concentrés sur l'amélioration de ces images, notamment sur leur résolution. Cependant, même avec un système imageur parfait, la résolution des images est limitée par la diffraction. La résolution limite est proportionnelle à la longueur d'onde et inversement proportionnelle à la taille de l'antenne. Or on ne peut agrandir physiquement l'antenne au-delà de l'envergure de l'avion, ce qui est insuffisant pour identifier une cible avec une distance d'observation de sécurité d'environ 100 km. Le problème a été contourné grâce à un traitement de signal spécifique des échos radar. Le système est nommé *Synthetic Aperture Radar* (SAR, ou radar à ouverture synthétique), et exploite le déplacement de l'antenne pour créer une antenne virtuelle de surface égale à celle balayée par l'antenne, donc plus grande, et donnant des images mieux résolues. Cette antenne synthétique est calculée *a posteriori* à partir des mesures succes-

sives acquises pour différentes positions de l'antenne par rapport à la scène.

Les SAR sont depuis 1978 (lancement de Seasat) des systèmes suffisamment robustes pour être mis en orbite terrestre, comme c'est le cas des satellites ERS, JERS, et Radarsat, qui fournissent régulièrement depuis longtemps des images radar de résolution comparable aux systèmes optiques classiques comme SPOT. Ce nouveau type d'imagerie a donné naissance à des applications multiples, telles que l'hygrométrie, la surveillance des vagues, la surveillance des glaciers et des volcans, la mesure des séismes et des déformations du terrain...

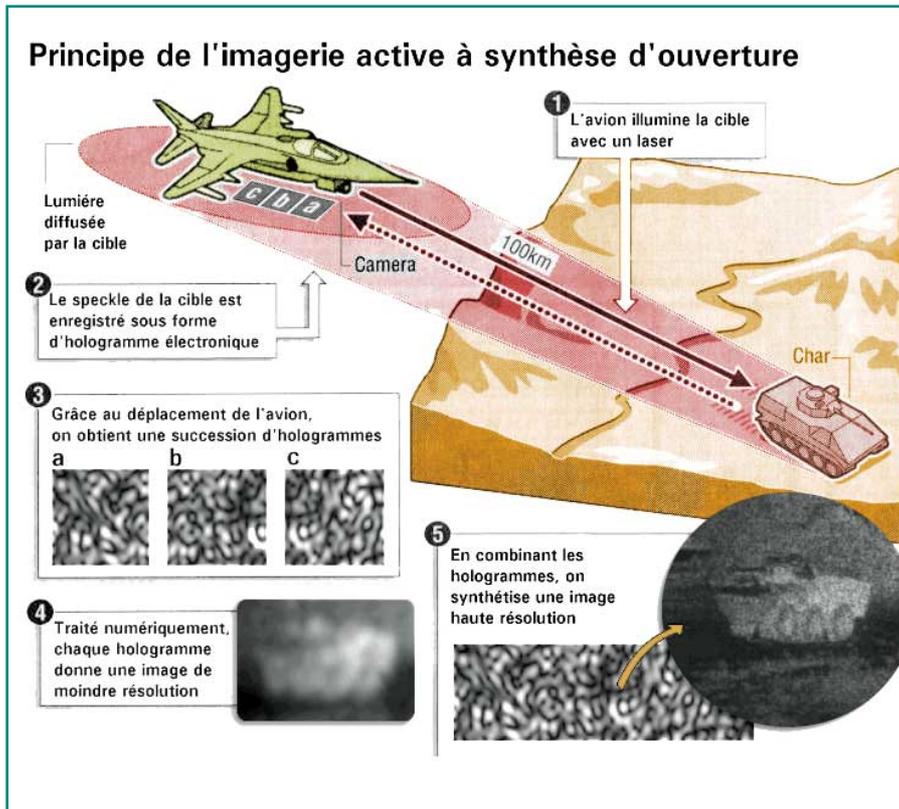
Mais, si les SAR ont permis d'améliorer la résolution des images radar, celle-ci est aujourd'hui insuffisante face aux besoins d'identification longue distance qui ont crû substantiellement dans les années 1990, après la guerre du Golfe et les opérations militaires en Bosnie et au Kosovo. Le concept politique de guerre "propre" contraint les militaires à améliorer leurs systèmes d'identification. La commande de 2,4 milliards de francs passée récemment entre la DGA et Thalès Optronique pour la production de systèmes optroniques de reconnaissance aéroportée témoigne de la situation. La résolution nécessaire pour identifier un char sans faille est maintenant de 10 cm. D'autre part, la distance de sécurité d'observation est d'environ 100 km. Pour un SAR

ayant une longueur d'onde de quelques centimètres, la taille de l'antenne synthétique serait de plus de 10 km ! L'équivalent en optique de l'antenne radar est la pupille du système optique. La résolution angulaire limite est également donnée par la loi de la diffraction, et est proportionnelle au ratio de la longueur d'onde sur la taille de la pupille. La pupille d'un système optique de résolution équivalente à une longueur d'onde de 1 micron serait seulement de 1 mètre. Or, si on considère un système optique classique de 1 mètre de diamètre, on se situe dans la classe des télescopes des astronomes, autrement dit un instrument trop encombrant pour un système aéroporté. De plus, de tels instruments devraient être optiquement parfaits, le tout dans un environnement soumis à des vibrations. Et le coût d'une optique parfaite étant proportionnel au cube de son diamètre, cela écarte définitivement l'option "télescope monolithique". Une solution de type SAR optique serait donc la bienvenue, c'est-à-dire la combinaison d'un petit télescope (peu coûteux et peu encombrant) et du mouvement de l'avion pour synthétiser une pupille d'au moins 1 mètre de diamètre.

L'imagerie holographique à synthèse d'ouverture ou le "SAR" optique

Un aspect fondamental du SAR est la mesure conjointe de l'amplitude et de la phase des échos radar. En optique, le plus simple est d'enregistrer une succession d'hogrammes de la scène tandis que le porteur avance. La scène est illuminée avec un laser, l'onde rétrodiffusée vient battre avec une onde de référence et on enregistre les hologrammes obtenus sous forme numérique. Les hologrammes sont corrigés, positionnés, puis compilés *a posteriori* à l'aide d'un ordinateur qui restitue au final l'image superrésolue (voir encadré).

Principe de l'imagerie active à synthèse d'ouverture

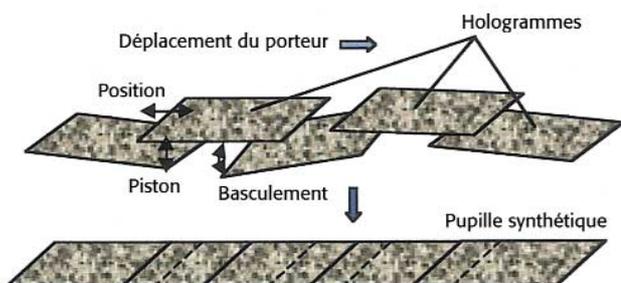


La synthèse des hologrammes

Le problème de la synthèse d'ouverture peut être abordé de cette manière : prenez un beau miroir bien poli, brisez-le en morceaux, et essayez maintenant de former une image avec. Pour aboutir, il faut positionner et orienter chaque morceau de miroir correctement les uns par rapport aux autres pour les "mettre en phase". Dans l'imagerie holographique à synthèse d'ouverture, les hologrammes jouent le rôle des morceaux, et le miroir d'origine est la pupille synthétique. Les hologrammes capturent le front

d'onde de la cible en des endroits distincts. Mais comment connaître *a posteriori* la place de chaque morceau si le déplacement de l'avion n'est pas connu avec une grande précision ? La méthode consiste à superposer partiellement les hologrammes lors de l'acquisition (figure 1). Ainsi, la reconnaissance des hologrammes sur cette zone de recouvrement donne la position relative de ceux-ci. Cette comparaison permet également (et surtout) de corriger les différences de phase relatives (piston et tilt) des hologrammes. Il ne reste plus ensuite qu'à coller numériquement les hologrammes. La synthèse se fait de proche en proche, jusqu'à

Figure 1 : Correction de position et de phase des hologrammes. Pour corriger les erreurs de phase et de positionnement des hologrammes, les hologrammes sont superposés partiellement.



obtention de l'ouverture voulue. Il ne reste plus qu'à calculer l'image super-résolue. Ainsi, repositionnement et comparaison des hologrammes sont réalisés par calcul. Cette souplesse introduite dans le repositionnement des prises de vue est capitale car elle permet de s'affranchir de

la connaissance de la trajectoire de l'avion à la précision d'un dixième de longueur d'onde. En radar, la connaissance de la trajectoire de l'avion n'est pas un réel problème, vu les longueurs d'onde considérées (quelques centimètres).

Restitution de l'image

La restitution de l'image s'obtient à partir de la pupille synthétique, qui n'est rien d'autre qu'un grand hologramme de l'objet. Si la lecture d'un hologramme classique enregistré sur film photographique s'effectue optiquement, la restitution d'un hologramme électronique s'obtient simplement par calcul. En effet, la pupille synthétique est une représentation numérique du front d'onde de l'objet observé, en amplitude et en phase. D'autre part, les lois de propagation de la lumière sont bien connues théoriquement, et moyennant des approximations, le calcul associé est très simple. Il



Figure 2 : Banc d'holographie électronique courte distance pour l'imagerie à synthèse d'ouverture.

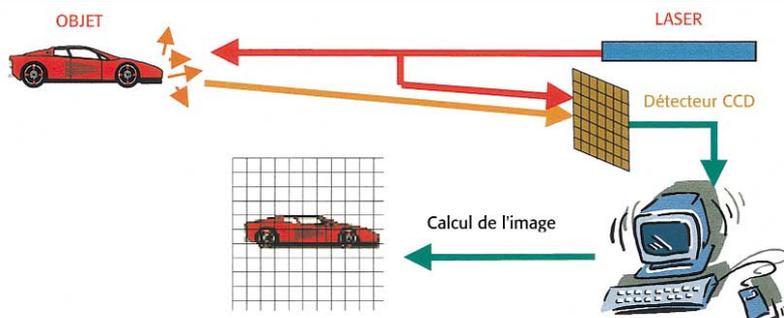
s'effectue à l'aide de transformées de Fourier. Il est donc possible de simuler la propagation du front d'onde mesuré. La fonction de lentille nécessaire à une formation d'image est simulée en ajoutant au front d'onde une fonction de phase quadratique circulaire définissant la distance de focalisation. L'image peut donc être calculée à n'importe quelle distance et une découpe en profondeur de la scène est possible, donnant une information 3D de celle-ci. Outre cette grande souplesse d'utilisation, simuler la lentille offre également l'avantage d'avoir une optique parfaite. Et, si un système optique réel s'avère

L'holographie électronique, un outil souple et de faible coût

Depuis l'apparition de l'holographie, les hologrammes sont enregistrés sur des films photosensibles, puis développés, et enfin restitués optiquement. Ce procédé est long et la manipulation délicate, ce qui a rendu l'holographie impopulaire dans le milieu industriel. Aujourd'hui, on préfère utiliser un détecteur CCD au détriment de la plaque photographique. L'acquisition est simple, peu encombrante, très peu coûteuse, ne nécessite pas de développement, est par conséquent rapide, avec une mesure quantifiée de l'hologramme, une restitution numérique, et un stockage à durée de vie infinie. Ce concept d'enregistrement a été imaginé évidemment dès les débuts de l'holographie, mais c'est seulement aujourd'hui que les technologies du silicium bas coût (détecteurs, calculateurs) permettent un réel développement de cette technique. La croissance spectaculaire des puissances de calcul met à la portée des opticiens des outils de travail très puissants, tels que les simulations et le traitement d'image. La tendance est aujourd'hui aux systèmes intelligents alliant optique et traitement numérique.

Un autre avantage de l'holographie électronique est la possibilité de se passer de lentille pour obtenir une image, leur formation pouvant s'effectuer par calcul. Et, si une optique, est nécessaire, il est possible de calibrer ses aberrations et de les corriger *a posteriori*, ce qui permet l'utilisation d'optiques bas de gamme. Par conséquent, un système d'imagerie limité par la diffraction bas coût est maintenant à la portée de tous, avec les avantages (et les inconvénients) de l'imagerie cohérente.

Principe de l'holographie électronique : l'hologramme est enregistré sur le détecteur CCD. La restitution est effectuée par calcul. L'opération consiste principalement en une transformée de Fourier.



indispensable, il est possible de le calibrer une fois pour toutes, et de corriger ses aberrations *a posteriori*. Là encore, le calcul assouplit le système. De plus, cette méthode tire profit de l'augmentation constante des performances des processeurs. Dans notre cas, un simple PC est utilisé pour l'acquisition et le traitement.

Des premiers résultats encourageants

Un banc d'holographie électronique monté actuellement au laboratoire central de recherche de Thalès permet d'étudier expérimentalement un système d'imagerie holographique à synthèse d'ouverture. Le système d'observation, qui consiste en un banc d'holographie électronique, est monté sur une platine de translation (*figure 2*).

Les résultats sont encourageants, puisque les premières images (*figure 3*) superrésolues sont obtenues en environnement de laboratoire avec du matériel à faible coût (laser HeNe 10 mW, caméra CCD, lentille, piezo) à une distance de 150 cm (au lieu de 100 km...). La pupille est synthétisée dans une seule direction à l'aide d'une platine de translation. La taille de la pupille synthétisée est égale au déplacement total du banc. Des pupilles de 10 cm ont été ainsi obtenues, ce qui représente un pixel de 6 microns à 1,5 mètre. La qualité de la reconstruction est sans cesse améliorée. Nous avons bon espoir d'obtenir très bientôt des pupilles limitées par la diffraction.

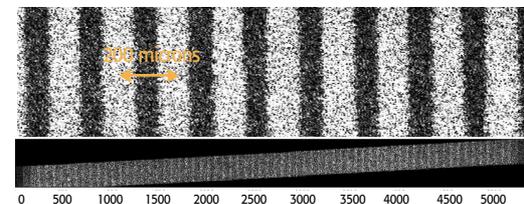


Figure 3 : Résultat expérimental.

Dessus : détail d'une mire de pas 200 microns à 1,5 m de distance obtenue par synthèse d'ouverture. Le pixel a pour taille 6 microns. Dessous : la pupille synthétique correspondante fait à peu près 10 cm.

Perspectives et applications

Si, pour Thalès, l'objectif est l'étude d'un système d'observation militaire air-sol de type SAR optique, les technologies nécessaires à son aboutissement ne sont pas encore prêtes et, si la faisabilité d'un tel système est prouvée théoriquement, il n'est pas réaliste de voir cette technologie appliquée avant un certain nombre d'années. En attendant, certaines applications à court terme sont envisagées.

Par exemple, la synthèse d'ouverture peut donner lieu à un nouveau type de microscopie à grande ouverture numérique à distance. En effet, les microscopes classiques à grande ouverture sont onéreux et ont un tirage très réduit, ce qui rend parfois impossible l'observation des objets

ayant un certain relief, comme les MEMS très en vogue en ce moment. La synthèse d'ouverture active permettrait d'atteindre la même ouverture, mais à distance, et pour un faible coût.

Plus généralement, les applications liées à l'holographie électronique sont multiples. La plus spectaculaire est l'interférométrie de speckle, qui permet de visualiser dans une fenêtre temporelle de grandeur quelconque les déformations d'un objet à une échelle bien inférieure à la longueur d'onde (voir encadré ci-dessous).

Contrôler les déformations thermiques d'une puce électronique en temps réel, ou la propagation des ondes de surface acoustiques est possible grâce à cette technique, qui n'est certes pas nouvelle, mais qui prend son essor aujourd'hui grâce au développement de l'informatique.

D'autres applications liées aux techniques de reconnaissance de figure de speckle (point clé de la synthèse d'ouverture), et qui touchent un grand nombre d'industriels, sont envisagées, comme le positionnement très précis des objets dans l'espace sans contact. Cette solution devrait intéresser les industriels de la robotique, et touche également le contrôle industriel au sens large.

Renaud Binet,
Thalès/LCR, Domaine de Corbeville,
Groupe Optronique et Visualisation,
91404 ORSAY CEDEX
E-mail : renaud.binet@
lcr.thomson-csf.com

L'imagerie cohérente

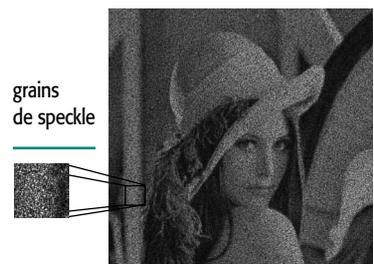
Les images obtenues avec une source cohérente telle qu'un laser ou les radars utilisés pour les SAR sont très différentes des images classiques. Elles sont à première vue fortement bruitées et difficilement interprétables à l'œil. Ce bruit est appelé *speckle* (tavelure), et est le résultat des multiples interférences entre les ondes diffusées par les points de la scène ayant des phases statistiquement décorréliées. En optique, le speckle est donc une signature de la rugosité de la scène à l'échelle de la longueur d'onde.

Pour certains, le speckle est considéré comme un bruit et ils consacrent leurs efforts à le réduire par des techniques de traitement d'image. Pour d'autres, le speckle ouvre des portes vers des applications difficiles, voire impossibles à effectuer en imagerie classique. Par exemple, le speckle est une répartition de lumière très contrastée dans les plus hautes fréquences spatiales de l'instrument d'observation, et ce quel que soit l'albédo de l'objet, ce qui permet de détecter et mesurer très précisément les mouvements des surfaces "blanches" ou uniformes, ce qui est impossible en imagerie classique. Le speckle permet également de caractériser les surfaces en termes de rugosité. Il présente également des avantages intéressants en termes de sécurité, puisqu'on peut difficilement reproduire un objet diffusant quelconque ayant la même figure de speckle, c'est-à-dire le même état de surface (ou de volume) à l'échelle de la longueur d'onde, mais tout le monde peut "lire" l'objet diffusant. Finalement, l'imagerie cohérente permet l'enregistrement de la scène sous forme d'hologramme. Puisque la phase de chaque point de la scène est observée, il est alors possible d'effectuer des opérations non courantes en optique incohérente, comme la synthèse d'ouverture en temps différé, ou d'observer l'évolution de la phase d'un objet dans le temps, par exemple en visualisant les déformations et les vibrations de celui-ci à une échelle inférieure à la longueur d'onde (voir images ci-contre).

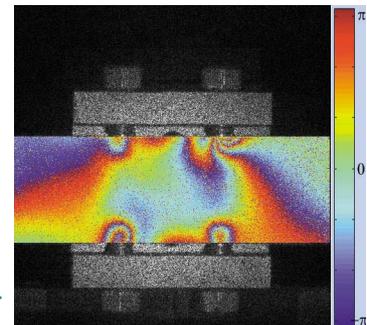
Léna en imagerie incohérente



Léna en imagerie cohérente



Déformation d'une gomme soumise à la pression de quatre vis. Sur la gomme, on visualise en fausses couleurs la différence de phase de deux hologrammes. L'échelle est donnée en radian. La déformation est de 316 nm pour 2π radians. Pour plus de clarté, seule l'intensité du support de la gomme est présentée.



Modes de vibration d'un haut-parleur soumis à une excitation de 8 kHz. Cette image est obtenue avec un seul hologramme. Le temps d'acquisition est ici de 320 ms. Les zones claires correspondent à des zones de bonne cohérence temporelle (elles ne vibrent pas). C'est le contraire pour les zones sombres.

