

L'OPTIQUE HYPERFRÉQUENCE : un défi perpétuel

Mehdi ALOUINI

Institut Foton, Université de
Rennes1/CNRS, 35042 Rennes
mehdi.alouini@univ-rennes1.fr

D'une science que l'on pouvait qualifier de confidentielle il y a trente ans, car s'adressant principalement aux besoins de la défense comme le radar et la guerre électronique, l'optique hyperfréquence s'est démocratisée ces dernières années. Elle s'invite désormais dans la plupart des nouveaux systèmes électroniques haute fréquence, les télécommunications optiques cohérentes et la métrologie temps-fréquence par exemple.

L'optique hyperfréquence relie le monde des micro-ondes à celui de la photonique. De manière générale, elle s'attache, au travers de fonctions optiques, à lever des verrous technologiques dans le domaine micro-onde et/ou à réaliser des fonctions micro-ondes évoluées inaccessibles directement dans le domaine purement hyperfréquence [1]. Notons que les premiers systèmes SAR (*synthetic aperture radar*) employaient déjà, dès les années 60, l'holographie optique pour reconstruire les images [2].

Des signaux analogiques à haute fréquence

L'optique hyperfréquence repose sur la manipulation de signaux analogiques à haute fréquence que l'on cherche à générer, à distribuer ou à traiter. Ceci la distingue des télécommunications optiques dans lesquelles les signaux manipulés sont généralement numériques. Les contraintes associées à ce caractère analogique sont dracونيennes. On se retrouve en effet à manipuler des signaux dans le domaine optique avec des exigences qui sont celles de l'électronique en termes de pureté spectrale, de linéarité et de bruit d'amplitude. Malgré cette difficulté, l'optique hyperfréquence a toujours fait l'objet d'une recherche soutenue, car manipuler les signaux hyperfréquences dans le domaine analogique est inévitable.

Pour mieux fixer les idées, prenons l'exemple d'un radar fonctionnant à 10 GHz et présentant un rapport signal-sur-bruit (plus couramment appelé dynamique en optique hyperfréquence pour éviter toute confusion avec le rapport signal-sur-bruit de la porteuse optique) de 160 dB, *i.e.* 10^{16} . Une telle dynamique est essentielle pour détecter le signal rétrodiffusé par une cible distante et en mesurer l'origine et le décalage Doppler. Numériser un signal à cette fréquence avec une dynamique aussi élevée nécessiterait un codage sur 54 bits et donc un débit de 1080 Gbit/s. Sachant que l'antenne d'un radar moderne est constituée d'un millier de dipôles rayonnants, transporter individuellement les signaux détectés dans une liaison télécom optique nécessiterait un débit de 1080 Tbit/s. Cet exemple, parmi d'autres, montre l'importance de manipuler directement les signaux analogiques tels quels.

Dans la pratique, la référence micro-onde du radar, ou oscillateur local (OL), est envoyée vers les dipôles de l'antenne dans une liaison optique hyperfréquence constituée, dans le cas le plus simple, d'un laser, d'une fibre optique et d'une photodiode. Cet OL, qui confère à l'onde émise par le radar sa pureté spectrale, est aussi utilisé à la réception pour démoduler l'onde rétrodiffusée par la cible. Le signal obtenu se trouvant à

basse fréquence (quelques MHz), il peut être numérisé et redescendu de l'antenne via une liaison optique numérique, *i.e.* similaire à celles utilisées en télécommunications optiques. La *figure 1* illustre très schématiquement un exemple d'intégration de liaisons optiques dans un radar sol de nouvelle génération.

La liaison optique hyperfréquence : une brique élémentaire chargée de challenges scientifiques

La conversion du signal hyperfréquence dans le domaine optique ouvre des possibilités hors de portée des systèmes entièrement micro-ondes. La mise en réseau de grands radio-télescopes tels que l'ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) est sans doute l'exemple le plus connu. Alors qu'un câble hyperfréquence présente des pertes de quelques dB par mètre, une fibre optique n'en présente que quelques dixièmes par kilomètre. Ainsi les pertes de conversion électriques/optiques au niveau du laser et de la photodiode sont rapidement compensées après quelques dizaines de mètres de propagation [3]. On ne pourrait pas imaginer relier entre elles deux antennes distantes de quelques km sans l'emploi de liaisons optiques hyperfréquences pour transmettre, *a minima*, l'OL permettant de

New Shack-Hartmann wavefront sensor for Short-Wave Infrared



Wavelength range
0.9 - 1.7 μm

Absolute accuracy
 $\lambda/100$

Acquisition
Up to 99 Hz

Compact and versatile

Contact us for more details:
contact@imagine-optic.com
or +33 1 64 86 15 60

démoduler le signal reçu par les deux antennes. Cette possibilité a ouvert la voie à la goniométrie ultra-résolue en angle mais aussi à la réalisation de balises hyperfréquences de moins d'un mètre cube simulant la propagation d'ondes radar sur des centaines de kilomètres. Les oscillateurs optoélectroniques sont un autre exemple dans lequel l'utilisation d'une liaison optique de plusieurs kilomètres de long confère au résonateur une pureté spectrale bien meilleure que celle des oscillateurs purement électriques [4].

Le développement des liaisons optiques-hyperfréquences requiert des lasers ou des modulateurs capables de transformer le signal hyperfréquence en modulation optique sans en dégrader les qualités d'amplitude et de phase. Pour cela, on a recours à des lasers dont le bruit d'intensité relatif (RIN) est inférieur à -150 dB/Hz sur des plages spectrales de plusieurs GHz. Ces lasers doivent aussi fournir suffisamment de puissance pour que le rapport signal-sur-bruit

soit compatible avec la dynamique recherchée [5]. Finalement ils doivent idéalement pouvoir être modulés directement à haute fréquence (une vingtaine de GHz) tout en assurant une très bonne linéarité et peu de bruit de phase additif. À plus haute fréquence, lorsque la modulation directe n'est plus envisageable, on a recours à des modulateurs externes qui, de nouveau, doivent assurer une bonne linéarité. Ces contraintes, qui sont draconiennes, ont suscité et suscitent encore des efforts de recherche importants que ce soit en physique des lasers, matériaux, guides d'ondes ou semiconducteurs. Les défis à relever sont tels qu'il est souvent nécessaire de revenir à des considérations scientifiques très amont.

La figure 2 illustre un exemple d'études récentes débouchant sur une nouvelle classe de lasers, dits à *buffer reservoir*, dont le bruit d'intensité relatif est limité au bruit de grenaille sur une large plage spectrale. Cette propriété est obtenue en

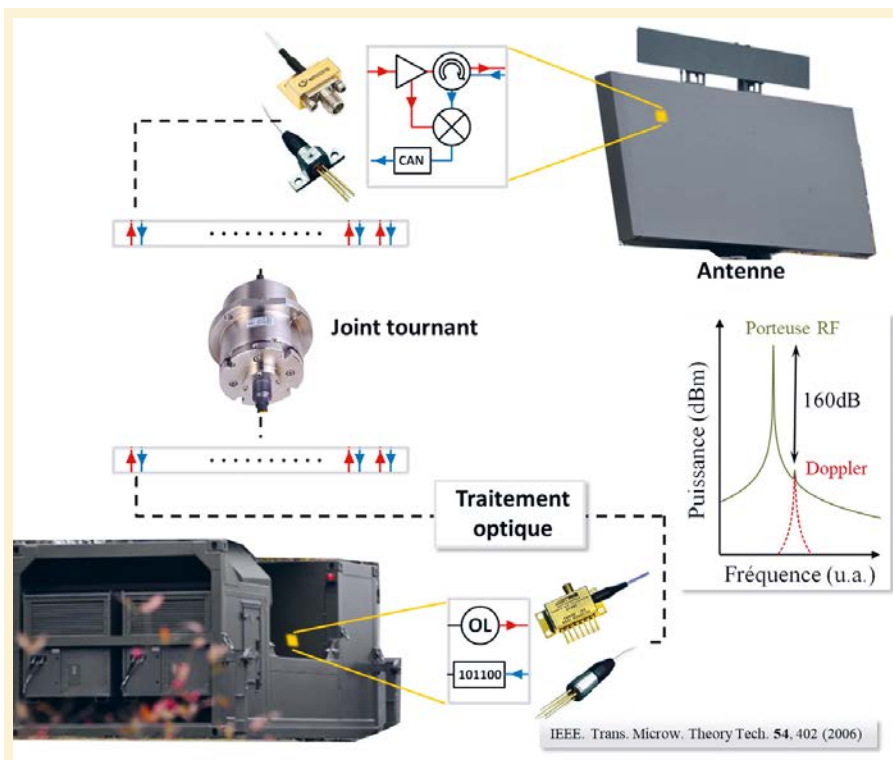


Figure 1. Exemple d'implantation des liaisons optiques-hyperfréquences dans un radar. L'oscillateur local est distribué optiquement vers le réseau d'émetteurs. Les signaux en réception sont démodulés, numérisés puis descendus vers la station de traitement. L'ensemble des liaisons sont multiplexées en longueur d'onde avant la traversée du joint tournant.

Des systèmes sans dispersion

Les très faibles pertes de propagation et les débits élevés sont souvent présentés comme les atouts majeurs de l'optique. La faible dispersion est sans nul doute une caractéristique fondamentale pour le déport de signaux hyperfréquences par voie optique. Cette propriété joue aussi un rôle essentiel dans le traitement du signal hyperfréquence. En effet, les guides hyperfréquences, et les composants hyperfréquences de manière générale, présentent une dispersion dont les effets sont perceptibles sur quelques fractions de GHz, *i.e.* dès lors que l'étendue spectrale du signal atteint quelques pourcents de sa fréquence moyenne. La dispersion implique que la phase d'une composante spectrale après propagation dépend de la fréquence de cette composante spectrale. Transporter ou traiter l'information hyperfréquence par voie optique permet de s'affranchir de ce problème. En effet, la dispersion qui entre en compte devient celle de la fibre et des composants optiques utilisés. Dans le domaine optique cette dispersion est perceptible sur des plages spectrales de plusieurs nanomètres, *i.e.* plusieurs THz dans le domaine fréquentiel. Ainsi un signal hyperfréquence sur porteuse optique subira quasiment le même retard quelle que soit la fréquence de modulation.

Il est à noter que l'optique permet de réaliser des systèmes à dispersion rigoureusement nulle. En effet, pour le déport sur de longues distances, les techniques de compensations de dispersion, bien connues en télécommunications optiques, peuvent être utilisées. À l'inverse, certaines liaisons courtes, ou certains modules de mise en forme ou de traitement du signal hyperfréquence, reposent sur des architectures dans lesquelles la lumière se propage en espace libre : encore un atout de l'optique. La propriété de dispersion, ou plutôt de non-dispersion, qui permet de réaliser des « retards vrais » est

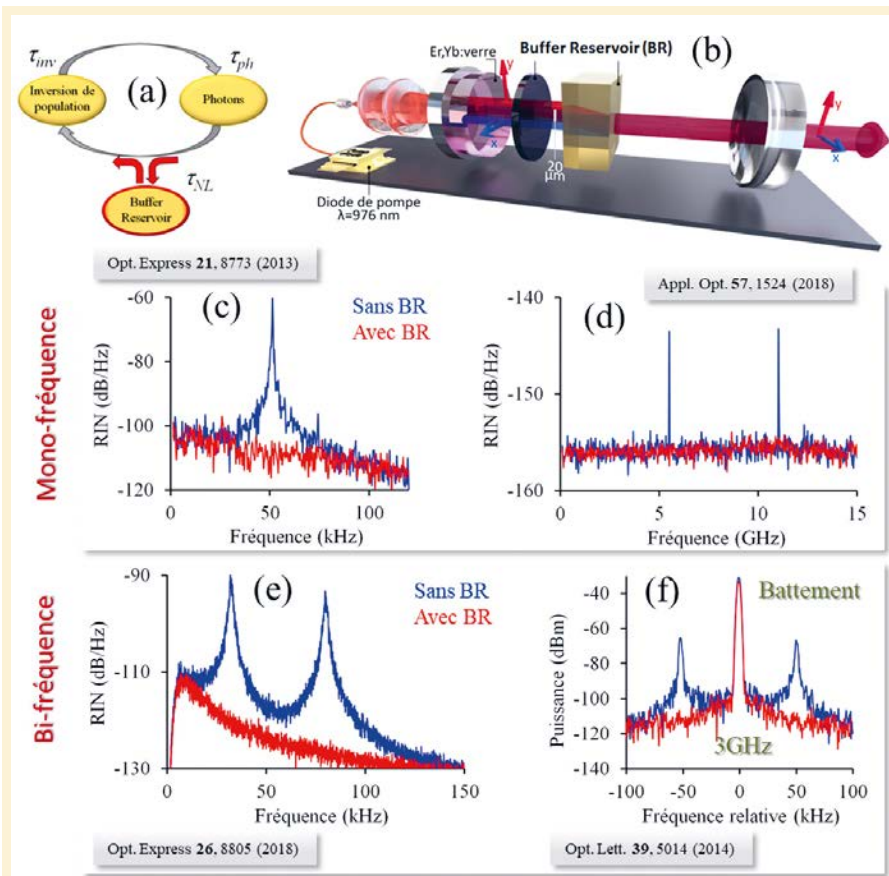


Figure 2. (a) Principe du buffer reservoir. (b) Laser faible bruit à buffer reservoir. Spectre de bruit d'intensité relative (c) à basse fréquence : oscillations de relaxation, (d) à haute fréquence : battements signal / spontané amplifié (e) pour un laser bifréquence DFL : résonances en phase et en antiphase. (f) Spectre électrique du battement bifréquence autour de la porteuse à 3 GHz.

brisant l'interaction résonante entre l'inversion de population et la durée de vie des photons dans le laser, interaction à l'origine de l'excès de bruit [6]. L'effet *buffer reservoir* est dans la pratique réalisé en insérant un mécanisme de pertes non linéaires de très faible section efficace et de courte durée de vie, de telle sorte que les caractéristiques statiques du laser (puissance et seuil) restent inchangées tandis que ses caractéristiques dynamiques sont profondément bouleversées. Le *buffer reservoir* agit à l'image d'un vase d'expansion qui viendrait autoréguler les fluctuations d'intensité sur une bande passante de plusieurs dizaines de GHz, ce qui est inimaginable avec des asservissements électroniques. Cette technique a aussi été étendue aux lasers bifréquences dont nous verrons l'utilité un peu plus loin.

Dans une liaison optique hyperfréquence, les mêmes contraintes de bruit et de linéarité existent au niveau de la réception. Les photodiodes doivent présenter de larges bandes passantes, une excellente linéarité, peu de conversion du bruit d'amplitude en bruit de phase, et cela pour des puissances incidentes de plusieurs dizaines de mW. La fibre qui peut paraître comme un composant passif est aussi à manier avec précaution. Effet Rayleigh, effet Brillouin, dispersion, mélange à quatre ondes sont autant d'effets à considérer de près car ils impliquent une dégradation du bruit de phase du signal hyperfréquence transporté. *A contrario*, la plupart des effets cités sont exploités avantageusement pour le traitement du signal hyperfréquence sur porteuse optique.

exploitée dans la plupart des fonctions optiques-hyperfréquences. Elle permet, par exemple, de réaliser des fonctions de filtrage programmables [7] ou encore des fonctions de pointé achromatique de faisceaux radars (figure 3).

Afin d'illustrer cette dernière application, rappelons que les antennes modernes sont constituées d'un réseau de dipôles rayonnants émettant à la même fréquence. Le rayonnement émis est la superposition cohérente d'ondelettes donnant lieu, en champ lointain, à un lobe d'émission plus ou moins pincé selon le nombre de dipôles rayonnants. Quand ces dipôles sont en phase, le lobe principal est normal au plan de l'antenne. Il est cependant possible d'appliquer une loi de phase pour changer le pointé de l'antenne sans avoir à l'orienter mécaniquement. Cette loi de phase n'est valable que pour une fréquence bien déterminée, tout changement de fréquence se traduisant par un

dépointé. Réaliser des retards vrais plutôt que des déphasages permet de résoudre cette difficulté. Il serait illusoire de vouloir ici présenter l'ensemble des techniques pour y parvenir. Néanmoins, il est de nouveau important de souligner que ces développements ont suscité des travaux de recherche très amont touchant à différents pans de la physique, allant de l'optique guidée aux membranes à cristaux photoniques actifs en passant par la physique des semiconducteurs.

La figure 3 illustre un exemple d'étude visant à induire les retards avec de la lumière lente et rapide. Afin de répondre aux contraintes de bande passante, de compacité et de parallélisme, le mécanisme mis en jeu ici repose sur les oscillations cohérentes de population (CPO) dans des amplificateurs optiques à semiconducteurs (SOA). L'amplificateur est utilisé en régime de saturation de telle sorte que le signal optique modulé imprime une modulation du gain. Cette modulation de

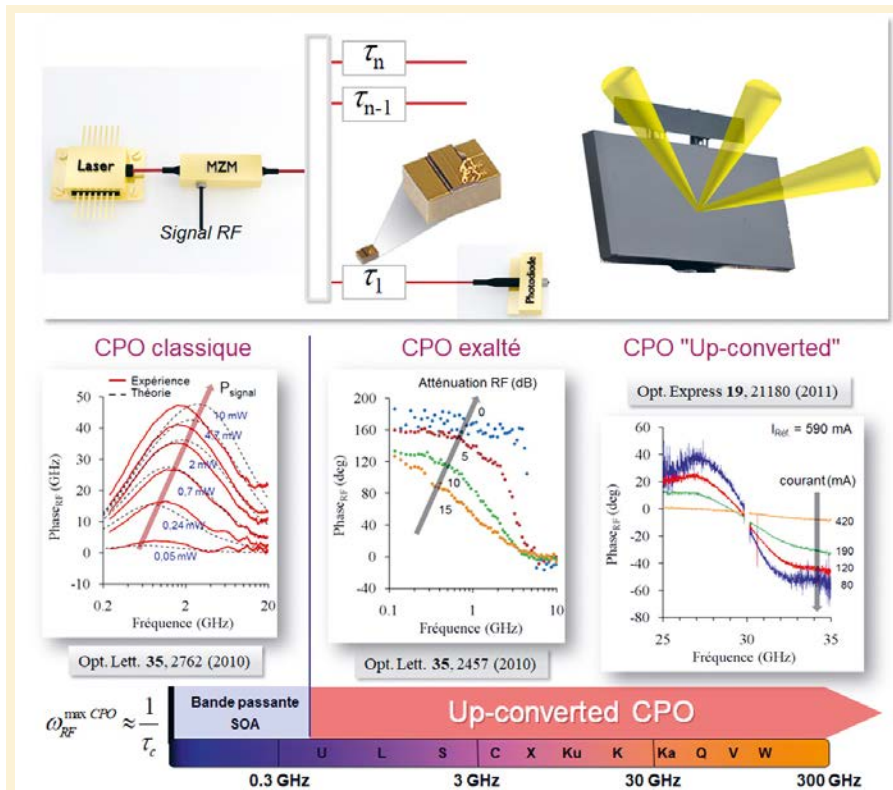


Figure 3. En haut : génération de retards par lumière lente pour la commande de pointé d'une antenne réseau. Le retard est obtenu par oscillations cohérentes de population (CPO) dans un amplificateur optique à semiconducteur SOA. En bas : spectres du déphasage hyperfréquence pour trois modalités de CPO.

New

ANALYSEUR D'ÉCRAN

KONICA MINOLTA

Adapté aux contrôles des écrans LED, LCD OLED HDR ...

Photométrie
Colorimétrie - Radiométrie

ANALYSEUR D'ÉCRAN CA-410

Luminance, chrominance, température de couleur, gamma, balance de blanc...

ScienTec c'est aussi, la distribution de :

- Luxmètres
- Photomètres
- Chromamètres
- Luminancemètres
- Vidéocolorimètres
- Photogoniomètres
- Spectroradiomètres
- Sources de référence...

Précision de mesure de la chromaticité optimisée

- Large plage de luminance : 0.001 à 5 000 cd/m²
- Plus rapide pour les applications en production
- Utilisation avec ou sans PC
- Multi-sondes

info@scientec.fr - 01 64 53 27 00 - www.scientec.fr

gain induit sur le signal amplifié un retard de groupe qui se manifeste par un déphasage hyperfréquence dont l'amplitude est ajustable en agissant sur le courant d'injection du SOA ou sur la puissance d'entrée moyenne de l'onde optique. Ces travaux ont permis d'obtenir de la lumière lente et rapide à des fréquences GHz, *i.e.* bien au-delà des fréquences de quelques kHz obtenues dans les premières démonstrations de principe [8]. De plus les limitations intrinsèques de l'effet CPO en termes d'excursion du déphasage et de fréquence de fonctionnement ont été franchies en démontrant deux nouveaux principes physiques : (i) le CPO exalté où l'on vient accompagner le CPO classique par un CPO induit au travers du courant d'injection du semiconducteur, et (ii) le CPO *up-converted* où l'on réalise dans le même SOA la fonction de CPO et la conversion de fréquence par modulation croisée de gain [9]. Cette dernière technique permet désormais d'envisager des systèmes basés sur la lumière lente et rapide opérant à n'importe quelle fréquence de modulation.

Extension à l'optique millimétrique et THz

Par essence, l'optique-hyperfréquence crée un pont entre le spectre optique et le spectre micro-ondes. Les ondes millimétriques (mm) et THz (quelques dizaines de μm) étant situées entre ces deux régions spectrales, elles bénéficient naturellement des développements menés en optique hyperfréquence [10]. En effet, pour réaliser une modulation hyperfréquence sur porteuse optique, deux alternatives sont possibles : moduler rapidement une seule fréquence optique, ou bien faire battre deux fréquences optiques. La deuxième alternative est plus délicate à mettre en œuvre. Cependant, elle reste de loin la plus performante. En effet, dans ce cas, le signal de battement généré est parfaitement sinusoïdal avec un taux de modulation de 100 %. De plus, il n'a pas de limite en termes de bande passante. Les lasers bifréquences (DFL) sont à cet égard très intéressants car ils offrent

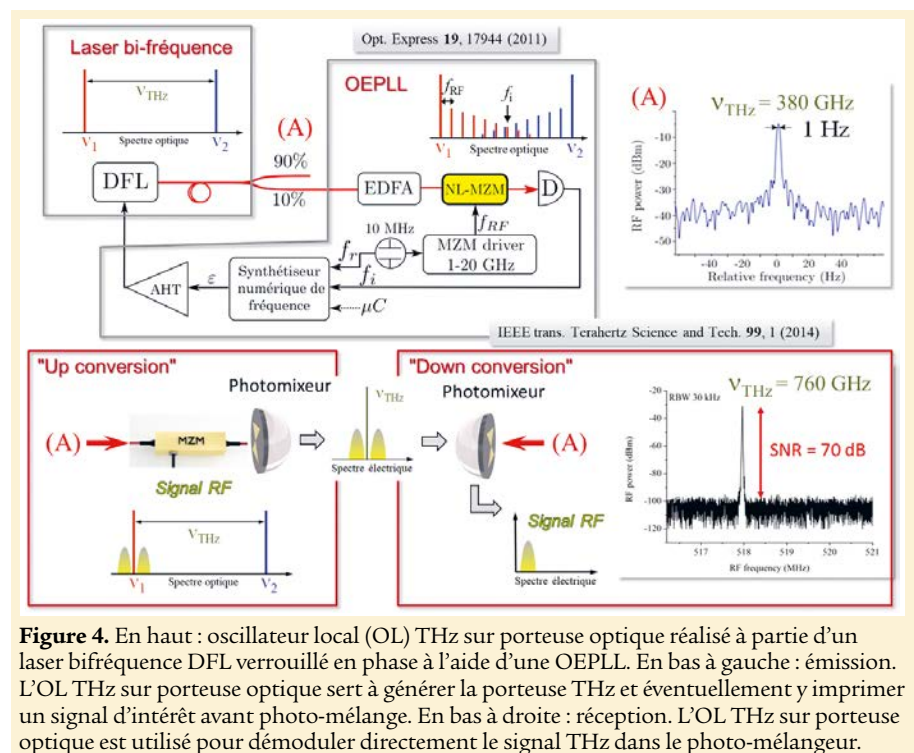


Figure 4. En haut : oscillateur local (OL) THz sur porteuse optique réalisé à partir d'un laser bifréquence DFL verrouillé en phase à l'aide d'une OEPLL. En bas à gauche : émission. L'OL THz sur porteuse optique sert à générer la porteuse THz et éventuellement y imprimer un signal d'intérêt avant photo-mélange. En bas à droite : réception. L'OL THz sur porteuse optique est utilisé pour démoduler directement le signal THz dans le photo-mélangeur.

intrinsèquement un battement de bonne pureté spectrale, les deux oscillateurs optiques se partageant la même cavité laser. Il devient alors aisé de les verrouiller en phase de manière à conférer au battement la pureté spectrale d'un OL hyperfréquence [11].

Bien que cette technique ait fait ses preuves dans le domaine hyperfréquence, calquer la pureté spectrale d'un OL hyperfréquence dans les domaines mm et THz est resté jusqu'à récemment une gageure. La *figure 4* illustre la façon dont on y parvient aujourd'hui à l'aide d'une OEPLL (*optoelectronic phase locked loop*). Le laser bifréquence mis en œuvre est un laser dont le battement est accordable continûment du GHz au THz. Le battement, qui a une largeur à mi-hauteur de 30 kHz, est affiné spectralement à moins du Hz. Pour cela, une partie du faisceau laser est prélevée puis modulée à l'aide d'un modulateur dont la fonction de transfert est très non-linéaire. On crée ainsi de part et d'autre des deux longueurs d'onde un peigne de fréquence dont l'entrelacement fournit un battement dans le domaine hyperfréquence. Ce battement, qui porte le bruit de phase du battement THz, est ensuite comparé à un OL hyperfréquence, puis

le signal d'erreur est réinjecté dans le laser bifréquence pour en contrôler une des deux fréquences. Ainsi, il est possible de stabiliser le battement THz sans avoir eu recours à la moindre électronique THz [12]. Une fois asservi, le laser constitue un OL THz sur porteuse optique, et utilisé à la fois à l'émission et à la réception THz (voir *figure 4*).

Outre la génération d'un battement THz spectralement pur et accordable, l'optique offre de nouveau un formidable levier puisqu'il devient possible d'imprimer n'importe quel signal sur une des deux longueurs d'onde du DFL avant de convertir l'ensemble dans un photomélangeur rayonnant dans le THz. Le photomélangeur est aussi utilisé à la réception. L'OL THz sur porteuse optique joue là encore un rôle essentiel puisqu'il permet de démoduler directement le signal THz incident (voir *figure 4*). Cette technique a été une véritable percée scientifique en optique-hyperfréquence. Elle est désormais exploitée en métrologie temps-fréquence [13]. Elle ouvre en outre la voie à la détection hétérodyne à température ambiante et à la spectroscopie haute résolution dans les domaines millimétrique et THz.

Conclusion

Loin de fournir au lecteur une vision exhaustive des développements touchant à l'optique hyperfréquence, cet article tente au travers de quelques exemples de donner un aperçu des enjeux et contraintes liés à l'introduction de l'optique dans les systèmes hyperfréquences. L'optique hyperfréquence s'alimente continuellement des progrès réalisés dans divers domaines de la physique avec des retombées indirectes en communications cohérentes, en manipulation d'atomes, en métrologie temps-fréquence, en analyse spectrale hyperfréquence et optique, en spectroscopie à double peigne (*dual comb spectroscopy*) et en lidar/radar. L'optique hyperfréquence, qui cherche perpétuellement à repousser les limites des composants, des fonctions et des sous-systèmes hyperfréquences, est ainsi devenue un formidable terrain de jeu scientifique et technologique pour des générations de chercheurs et d'ingénieurs de développement.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] *Microwave Photonics: Devices and Applications*, edited by S. Iezekiel, John Wiley & Sons, 2009
- [2] Optical data processing, *Topics in Applied Physics* vol. **23**, edited by D. Casasent, Springer-Verlag, 1978
- [3] *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links*, edited by W.S.C. Chang, Cambridge University Press, 2007
- [4] L. Maleki, The optoelectronic oscillator, *Nature Photonics* **5**, 728 (2011)
- [5] G. Baili et al., Ultra-low noise and high power VECSEL for high dynamic range and broadband RF/optical links, *J. Lightwave Technol.* **32**, 3489 (2014)
- [6] A. El Amili, G. Loas, L. Pouget, M. Alouini, Buffer reservoir approach for cancellation of laser resonant noises, *Opt. Lett.* **39**, 5014 (2014)
- [7] J. Capmany, D. Novak, Microwave photonics combines two worlds, *Nature Photonics* **1**, 319 (2007)
- [8] M.S. Bigelow, N.N. Lepeshkin, R.W. Boyd, Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 113903 (2003)
- [9] P. Berger, J. Bourderionnet, D. Dolfi, F. Bretenaker, M. Alouini, Slow and Fast Light in Semiconductor Optical Amplifiers for Microwave Photonics Applications, in *Advances in optical amplifiers*, Chap. 9, Intech, 2011
- [10] M. Alouini et al., Bridging the gap between THz and microwave photonics through optoelectronic generation of interleaved combs, *Microwave Photonics*, 350 (2014)
- [11] M. Alouini, B. Benazet, M. Vallet, M. Brunel, P. Di Bin, F. Bretenaker, A. Le Floch, P. Thony, Offset phase locking of Er:Yb:Glass laser eigenstates for radio-frequency photonics applications, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13**, 367 (2001)
- [12] A. Rolland, G. Loas, M. Brunel, L. Frein, M. Vallet, M. Alouini, Non-linear optoelectronic phase-locked loop for stabilization of opto-millimeter waves: towards a narrow linewidth tunable THz source, *Opt. Express* **19**, 17944 (2011)
- [13] J. Li, X. Yi, H. Lee, S.A. Diddams, K.J. Vahala, Electro-optical frequency division and stable microwave synthesis, *Science* **345**, 309 (2014)

La recherche prend du temps.

Pas les commandes de matériel.



Des milliers de produits en stock et une livraison en 2 jours GRATUITE*

Equiper votre labo ou vos installations de recherche doit être rapide et efficace. Chez MKS, nous avons compris cela. C'est pourquoi nous augmentons considérablement nos stocks, nous vous proposons une nouvelle expérience d'achat en ligne simplifiée et la livraison en 2 jours GRATUITE*.

L'achat de produits Newport pour votre labo vient de gagner beaucoup en facilité et en rapidité.

— Un CHOIX plus rapide — Trouvez plus vite avec la recherche améliorée et des filtres

— Une LIVRAISON plus rapide — Livraison en 2 jours GRATUITE* sur tous vos produits Newport préférés

— Des RÉSULTATS plus rapide — L'excellente qualité des produits et de notre support technique vous ouvre la voie du succès

Soyez réactifs avec Newport. Il n'y a pas de temps à perdre. Visitez www.newport.com dès aujourd'hui.

* Pour plus de détails et les conditions, consultez www.newport.com/free2day. S'applique uniquement aux commandes passées et livrées en Amérique du Nord et en Europe.



Pour plus d'informations sur notre marque Newport, visitez www.newport.com.



Un choix, une livraison et des résultats plus rapides.