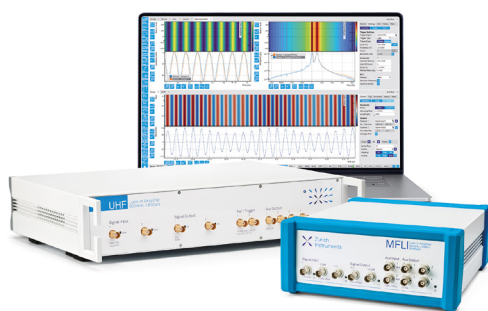


ACHETER UNE DÉTECTION SYNCHRONE POUR UN TRAITEMENT DU SIGNAL EN TEMPS-RÉEL

Romain STOMP*, Olivier FAIST

Zurich Instruments AG, Zurich, Suisse

*romain.stomp@zhinst.com



La mesure par détection synchrone (ou lock-in amplifier en anglais), est la technique idéale pour améliorer le rapport signal-sur-bruit (SNR). Combiné à un traitement numérique des données, c'est tout un environnement d'analyse temps-fréquence qui permet à l'utilisateur d'optimiser sa mesure jusqu'à y inclure des mélanges hétérodynes ou des boucles d'asservissement rapide.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312956>

En photonique, la plupart des mesures se font au moyen de capteurs électro-optiques qui permettent de convertir l'information transmise par la lumière en signal électrique. Avec un traitement numérique des données, il est possible d'extraire l'information désirée d'un signal optique qui serait autrement noyé dans le bruit. Contrairement à un simple oscilloscope ou une carte de numérisation faisant l'objet d'un traitement à posteriori, la mesure par détection synchrone est cohérente par rapport à une excitation périodique, ce qui

permet d'extraire à la fois l'amplitude (ou magnitude) et la phase du signal en temps réel. La modulation de l'excitation, à partir de modulateurs électro-optiques (EOM, AOM) par exemple ou tout simplement des hacheurs mécaniques (chopper), sert en même temps de référence à la détection. La mesure issue d'une détection synchrone permet ainsi de rejeter toute source de bruit qui serait asynchrone avec la fréquence de référence.

De nos jours, les meilleurs instruments sur le marché offrent une réserve dynamique de 120 dB [1], ce qui signifie qu'ils sont capables de mesurer avec précision un signal en

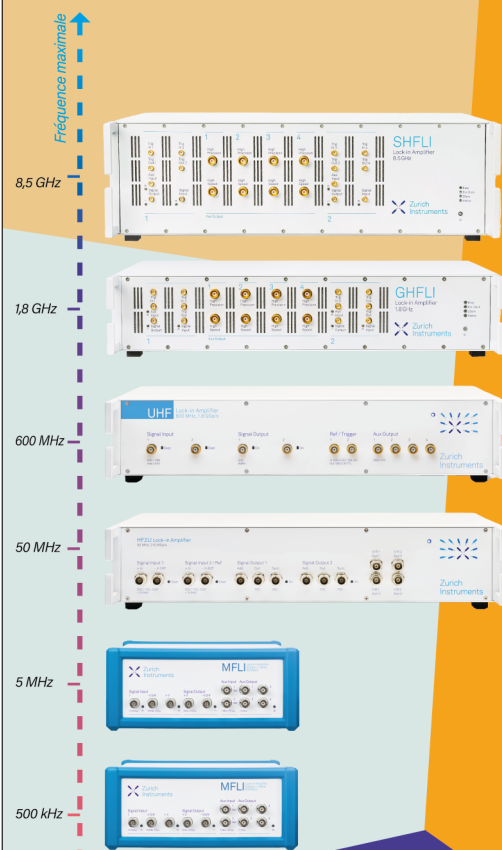
présence d'un bruit dont l'amplitude est jusqu'à un million de fois supérieure à celle du signal d'intérêt.

PRINCIPES DE LA DÉTECTION SYNCHRONE

La mesure synchrone consiste à multiplier le signal d'entrée avec un signal de référence, ce qui revient à faire un mélange homodyne (à la même fréquence entre l'entrée et la référence) ou hétérodyne (fréquence différente), pour ensuite passer le résultat à travers un filtre passe-bas, configurable par l'utilisateur en termes d'ordre du filtre et fréquence de coupure (ou bande passante). Cette étape de démodulation en plus d'extraire

MESURE DE SIGNAUX FAIBLES : DéTECTION SYNCHRONE ULTRAS PERFORMANTES

- ▲ Mesures de DC à 8.5GHz (suivant les modèles)
- ▲ Précision en courant et en tension
- ▲ Mesures rapides avec un faible niveau de bruit
- ▲ Entrées/sorties auxiliaires reconfigurables
- ▲ L'interface incluant modes Scope, Sweeper, Analyseur de spectres...
- ▲ Options Boxcar, MultiFréquence, PID, PLL ...



l'information sur l'amplitude est sensible à la phase et permet d'isoler le signal à la fréquence d'intérêt parmi toutes les autres composantes fréquentielles.

Le signal de référence peut être généré par l'appareil lui-même, ou donné comme référence depuis une source externe. La référence est habituellement une fonction sinusoïdale, mais peut aussi prendre d'autres formes d'ondes. La démodulation avec une onde sinusoïdale pure permet d'extraire la fréquence fondamentale (ou l'une de ses harmoniques) du signal d'entrée. En revanche, un signal de référence rectangulaire permet lui d'extraire de l'information contenue dans les harmoniques supérieures impaires. Comme illustré sur la figure 2 (a), la réponse du dispositif test (DUT) ayant une forme $V_s(t)$ ainsi que le signal de référence $V_r(t)$ sont utilisés par la détection synchrone pour déterminer l'amplitude R et la phase Θ . C'est en réalité un étage de démodulation faisant appel à deux références, en phase (0°) et en quadrature (90°), comme illustré sur la figure 2 (b). Le signal d'entrée est divisé en deux pour passer à travers deux mélangeurs différents. En sortie, le signal passe à travers des filtres passe-bas, ce qui laisse deux composantes X et Y , en phase et en quadrature par rapport à la référence. A partir de X et Y il est facile de dériver l'amplitude R et la phase Θ par une transformation de coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires à l'aide de la relation suivante :

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

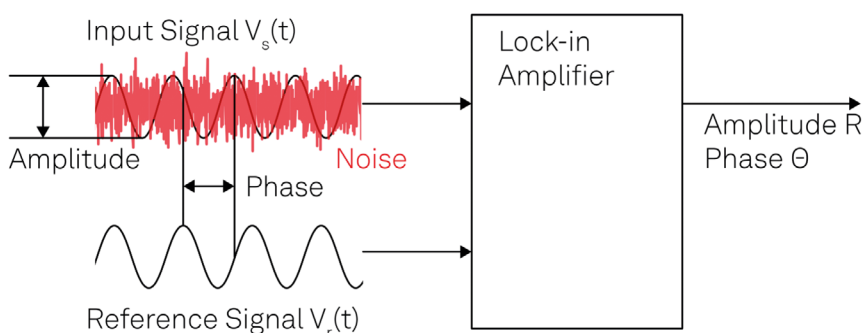
$$\theta = \text{atan2}(Y, X)$$

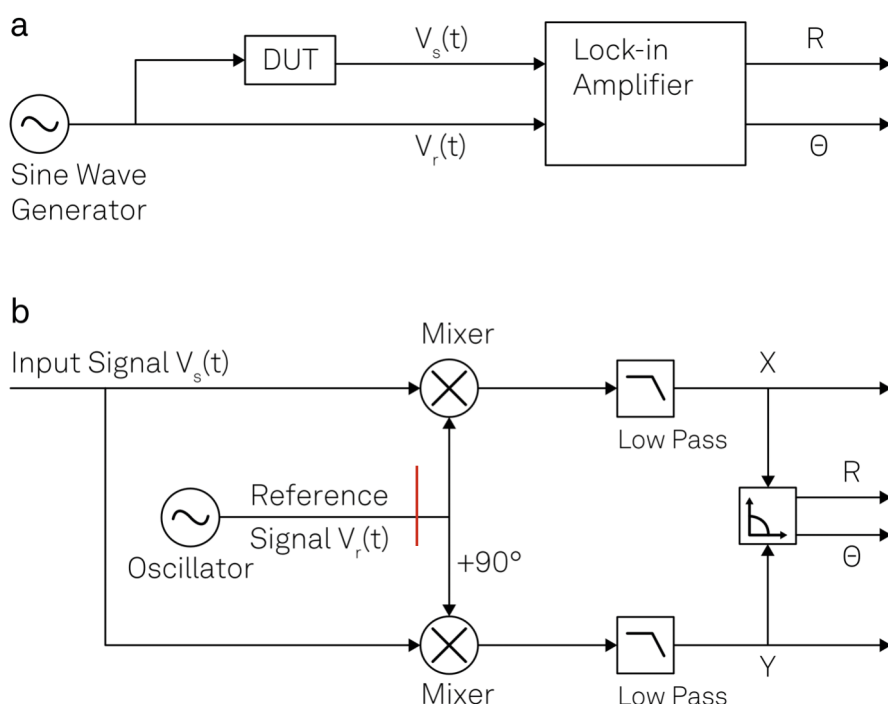
SOURCES DE BRUIT ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES

Le bruit est omniprésent dans les signaux analogiques dont les sources sont multiples. Certains bruits sont fondamentaux, par exemple le bruit de Johnson-Nyquist (thermique), le bruit de grenaille (shot noise) et le bruit de scintillement (flicker noise), tandis que d'autres sont dus à l'instrumentation, comme par exemple les boucles de masse notamment à 50-60 Hz, les interférences électromagnétiques ou certains artefacts de mesures. L'amplitude de ce bruit en tension, notée $V_n(t)$, est spécifiée par son écart-type. Dans le domaine fréquentiel, ce bruit s'exprime sous forme d'une densité spectrale de puissance $|v_n(\omega)|^2$ en unités de V^2/Hz , ou par $|v_n(\omega)|$ en unités de $V/\sqrt{\text{Hz}}$.

Les différentes sources de bruits ont différentes dépendances en fréquences. Il est donc possible de choisir ingénieusement la fréquence de modulation pour effectuer ces mesures dans une bande de fréquence dont le niveau de bruit est au plus bas. Ceci est souvent le cas aux plus hautes fréquences, dans cette partie du spectre principalement dominée par le bruit blanc, tel qu'indiqué sur la figure 3. En d'autres termes, la densité de bruit est moins élevée, pour peu que les perturbations liées aux interférences électromagnétiques radio soient évitées. Pendant longtemps, les détections synchrones étaient limitées à quelques centaines de kHz de modulation de référence. Il est désormais possible de moduler à plusieurs centaines de

Figure 1. Une détection synchrone permet de mesurer l'amplitude et la phase d'un signal par rapport à un signal de référence, même si le signal est entièrement noyé dans le bruit.





MHz, par exemple pour se caler sur le taux de répétition d'un laser pulsé ou même au GHz pour des mesures sur centre NV ou toute autre transition micro-onde.

En plus de cette fréquence de modulation, deux autres paramètres influencent la qualité de la mesure ou le rapport signal-sur-bruit (SNR) : la bande-passante de démodulation et l'ordre du filtre. Ces valeurs déterminent en effet la faculté à rejeter le bruit en dehors de cette bande passante de mesure (BW). Inversement une bande passante plus large permet de faire des mesures plus rapides, ce qui s'exprime comme constante de temps $\tau = 1/(2\pi BW)$. La largeur de bande est donnée à la fréquence de coupure à -3dB et la pente de décroissance dépend de l'ordre de filtre, typiquement de 1 à 8 pour une pente de plus en plus raide.

Pour finir, une autre façon d'optimiser ces mesures consiste à intégrer les signaux démodulés de la détection synchrone dans un schéma plus complet incluant par exemple une compensation de la dérive, d'une cavité résonnante ou l'asservissement de la fréquence du laser. Cette boucle d'asservissement à l'aide de contrôleur

Figure 2. (a) Schéma de mesure « synchrone ». Un générateur de fonction pilote le dispositif (DUT) et sert aussi de référence. La réponse du DUT est dirigée vers la détection synchrone qui fournit l'amplitude et la phase par rapport à la référence. (b) Schéma de la partie « lock-in amplifieur » : l'entrée est multipliée par la référence ainsi qu'une version déphasée de 90° . Les sorties du mélangeur sont filtrées pour rejeter le bruit et la composante à 2ω puis converties en coordonnées polaires.

de gains PID (pour Proportional - Integral - Derivative), bénéficie comme entrée d'un signal déjà filtré, ce qui permet de plus facilement garder la consigne dans une bande passante donnée. L'intégration de nombreux outils d'analyse temps-fréquence, du balayage de tous les paramètres internes, de boucles d'asservissement et bien plus encore rend les détections synchrones modernes adéquates à repousser les limites de la détection dans les domaines des nanotechnologies, de la nano-optique ou de la spectroscopie résolue en temps.

APPLICATIONS EN PHOTONIQUE

Spectroscopie classique

La plupart des mesures de spectroscopie optique nécessitent une amélioration du rapport signal sur bruit (SNR) pour atteindre des résolutions en énergie toujours plus fine. Un meilleur SNR permet aussi de faire des mesures plus rapides comme par exemple lors d'imagerie Raman, tel qu'illustré sur le Figure 5 pour des mesures avec ou sans détection synchrone. La mesure synchrone permet en effet d'améliorer le contraste de faibles variations du signal modulé par rapport à une lumière en arrière-plan beaucoup plus forte. En plus de la variation

DES DÉTECTIONS SYNCHRONES DE DC À 8.5GHZ

L'analyse de signaux périodiques au moyen de détection synchrone est une méthode établie dans de nombreux domaines de la physique en général et de la photonique en particulier. Longtemps relayé à des mesures basse fréquence, ce marché a beaucoup évolué avec une première solution à 50MHz puis 600MHz dès 2013. Il est désormais possible de couvrir la gamme entière entre le courant continu et 8.5GHz, et même inclure une détection boxcar - combinée avec la détection synchrone dans un système de démodulation tandem. L'approche tout numérique offre en outre la possibilité de mélanger de multiples fréquences en entrée et en sortie et inclure toute une suite d'outils d'analyses temps-fréquence tels qu'un Scope/FFT, analyseur de spectre, asservissement PID, générateur de fonction arbitraire, balayage de tous les paramètres internes, module d'acquisition des données numériques, etc...

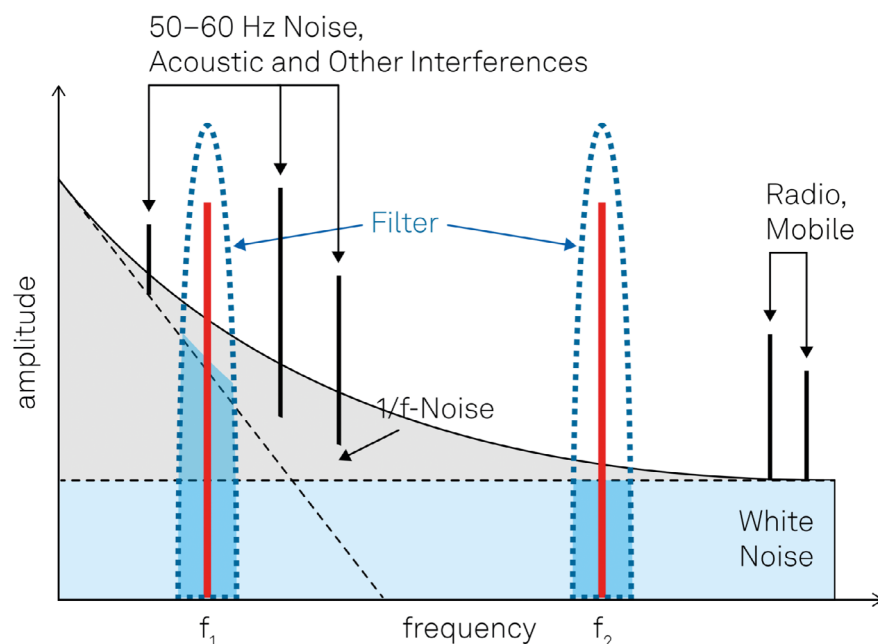


Figure 3. Spectre de bruit typique. Pour des mesures moins bruitées, la fréquence de modulation doit être choisie dans une région dont le bruit de fond est faible, en évitant certains pics discrets d'interférences. Dans cet exemple, f_2 donne de meilleurs résultats que f_1 pour une bande de filtre identique, car elle est située dans une région de bruit blanc, loin du bruit en $1/f$.

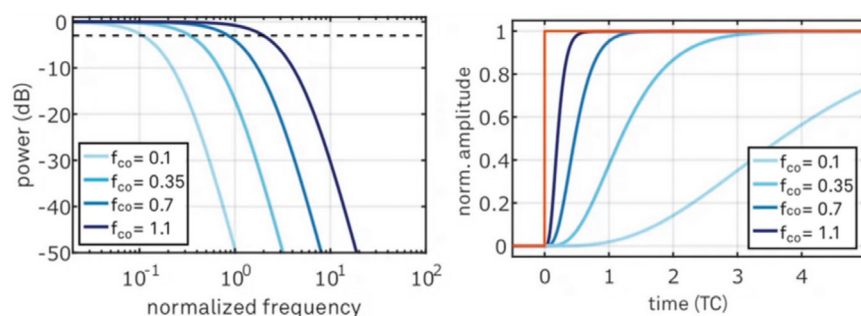
d'intensité de la lumière incidente, le signal en sortie d'une détection synchrone permet aussi de mesurer le décalage en longueur d'onde lié à la phase.

Spectroscopie pompe-sonde

La spectroscopie pompe-sonde est une technique utilisée pour étudier les interactions dans un échantillon. Dans cette méthode, un premier laser, appelé « pompe » excite les échantillons, tandis qu'un second laser, dit "sonde," mesure les

changements induits par cette excitation. La détection synchrone améliore la sensibilité de la détection en synchronisant la mesure avec la fréquence de modulation du signal [3, 4]. En filtrant les bruits non-corrélés, cette technique permet de détecter des variations infimes dans le signal optique. Il est possible de séparer la pompe de la sonde soit temporellement, en envoyant deux impulsions, soit en fréquence, en introduisant deux hacheurs à des fréquences différentes.

Figure 4. Réponse en fréquence (à gauche) et en temps (à droite) des filtres passe-bas pour différentes bande-passantes ayant une fréquence de coupure f_{co} à -3 dB et normalisée en unité de constante de temps $1/\tau$.



Ultra-cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

By
**Robin Kaiser,
Michèle Leduc,
Hélène Perrin**

Preface By
Alain Aspect

Current Natural Sciences

QUANTUM INFORMATION

Robin KAISER, Michèle LEDUC and Hélène PERRIN, Eds

Ultra-Cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

Preface by Alain Aspect

edp sciences

The field of cold atoms was born forty years ago and today remains a theme regularly awarded Nobel Prizes and at the forefront of physics research. This book presents the most recent developments and traces the exceptional growth of this field over the last years.

Also available in e-book format

**For sale on
laboutique.edpsciences.fr**

ISBN : 978-2-7598-2745-9

168 illustrated pages

Price : 95 €



Prix Roberval



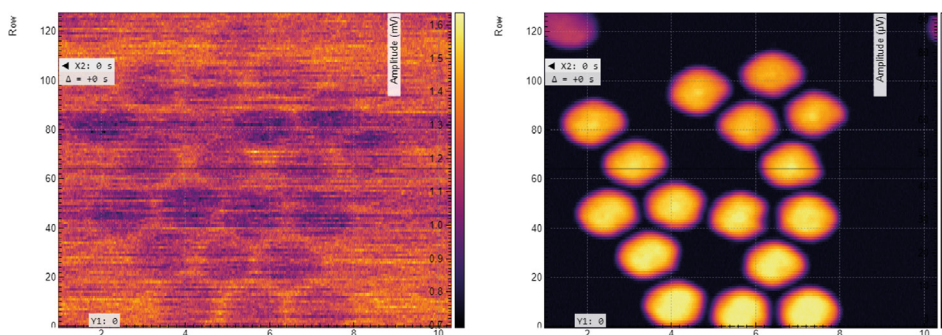


Figure 5. Mesures Raman (Stimulated Raman Scattering) de billes de Polystyrène (PS) sur un substrat de PMMA. À gauche, image obtenue à partir d'une simple numérisation du signal et à droite, le signal en sortie d'une détection synchrone modulée à quelques MHz. Echelle échantillon : $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ voir référence [2]

Caractérisation laser et asservissements

La détection synchrone permet de caractériser les lasers en analysant leur fonction de transfert. Pour la stabilisation, une modulation est introduite devant une cavité et démodulée à la sortie [5]. L'asservissement de cette démodulation assure une stabilité optimale du laser, ce qui est critique dans les applications telles que la spectroscopie ou la communication optique.

Nano-optique et champ proche

Toutes les mesures optiques sont intrinsèquement limitées par la diffraction en termes de résolution spatiale. Pour améliorer cette résolution, non plus de quelques microns mais à l'échelle nanométrique, il est nécessaire de créer une nano-cavité optique entre une pointe diffusante et un échantillon dont les effets non-linéaires sont exaltés. Ce type de configuration apparenté à une mesure AFM (Atomic Force Microscopy) et aussi appelé Scanning Near-Field Microscopy (SNOM), bénéficie de nombreuses possibilités de modulation et démodulation à plusieurs harmoniques ou des techniques de régulation concernant le contrôle de la nano-cavité [6].

CONCLUSION

Une détection synchrone représente un outil précieux pour quiconque cherchant à optimiser ses mesures dans un environnement où le rapport signal sur bruit est particulièrement dégradé. Dans le domaine de la photonique, ces atouts permettent de servir de nombreuses applications ou de

plus en plus rapides pour un même niveau de bruit.

- **Applications polyvalentes :** Idéal pour une variété d'expériences, telles que la spectroscopie optique, y compris résolues en temps ou modulées optiquement, la mesure des caractéristiques des lasers, et l'étude des propriétés des matériaux optiques.
- **Contrôle et interfaçage :** Les modèles lock-in entièrement numériques incluent des interfaces intuitives, y compris leurs API (Application Programming Interface) en Python, Matlab ou LabVIEW, facilitant l'optimisation des paramètres, l'automatisation de la mesure et la mise en place de protocoles de mesure avancée, y compris avec des instruments tiers.
- **Analyse Temps-Fréquence :** les diverses techniques de multiplication et de filtrage synchronisées avec une source de référence permettent d'extraire toutes les informations temps-fréquence pertinentes et ainsi de mieux comprendre comment améliorer son montage expérimental pour une bande d'analyse donnée. ●

RÉFÉRENCES

- [1] Zurich Instruments MFLI. <https://www.zhinst.com/products/mfli-lock-in-amplifier>. Accessed: 2024-08-23
- [2] Fimpel *et al.* Appl. Phys. Lett. **112**, 161101 (2018)
- [3] Schumacher *et al.* PNAS **117**, 19773 (2020)
- [4] Lo *et al.* Opt. Lett. **38**, 1265 (2013)
- [5] Klenner *et al.* Opt. Express **21**, 24770 (2013)
- [6] Bechtel *et al.* PNAS **111**, 7191 (2014)

FOURNISSEUR	SITE INTERNET	REVENDEUR FRANÇAIS
Intermodulation Products	www.intermod.pro	Non
Liquid Instruments	www.liquidinstruments.com	PHOT'Innov
Signal recovery	www.ameteksi.com	HTDS
Stanford Research Systems	www.thinksrs.com	Acal BFi France, Optoprim
Zurich Instruments	www.zhinst.com	OPTON Laser International