



LeWave Expert 9000, ici en photo, ainsi que les modèles NRO 9000 et SDA 10G, font partie de la gamme des "Near Real-Time Oscilloscopes" de LeCroy, qui constituent en quelque sorte une passerelle entre les oscilloscopes numériques temps réel classiques et les oscilloscopes à échantillonnage.

INSTRUMENTATION

Le mode CIS dope l'oscilloscope à échantillonnage

▼ Pour l'étude des signaux répétitifs, les oscilloscopes à échantillonnage offrent souvent plus de bande passante que les modèles temps réel. Problème : leur utilisation en mode séquentiel leur confère une très lente vitesse d'acquisition. Et leur profondeur mémoire est faible, ce qui empêche l'étude de longs trains de bits. Les NRO (pour oscilloscopes presque temps réel) rééquilibrent la balance. Avec leur mode d'échantillonnage cohérent entrelacé, ils offrent des performances bien meilleures en bande passante et profondeur mémoire, et atteignent jusqu'à 100 GHz de bande passante.

Puisque tous leurs épisodes se répètent et sont à peu de choses près identiques, on peut suivre certains feuillets américains en n'en regardant que quelques minutes de temps en temps. C'est sur ce principe que fonctionnent les oscilloscopes numériques dits "à échantillonnage". C'est une différence

fondamentale avec les modèles dits "temps réel", qui réalisent eux aussi un échantillonnage du signal d'entrée, mais en prenant des échantillons très rapprochés les uns des autres, plusieurs par période du signal (au moins deux, d'après le théorème de Shannon). Pour reprendre la métaphore télévisuelle, c'est un peu comme si on avait affaire à un thriller, où il ne faut pas perdre un instant, sous peine de ne plus rien comprendre. Les oscilloscopes "à échantillonnage" ne prennent qu'un seul échantillon par période du signal,

mais jamais au même endroit sur la période du signal, et ils rassemblent ensuite ces différents échantillons pour reconstituer le signal global. Cela ne marche qu'à la condition expresse que le signal soit répétitif et qu'il ait une faible gigue (instabilité temporelle). La restriction de l'usage des oscilloscopes à échantillonnage aux seuls signaux répétitifs est un handicap. Mais comme ils peuvent travailler sur des signaux ayant des fréquences beaucoup plus élevées que ceux mesurés par leurs homologues "temps réel", ils se révèlent sans rivaux dans certaines applications. Plusieurs facteurs expliquent ces différences de bande passante.

Échantillonnage contre temps réel

Les étages d'entrée des oscilloscopes "temps réel" comprennent des amplificateurs et des atténuateurs, placés en amont du convertisseur analogique-numérique (CAN). Le flot de données binaires est ensuite enregistré par l'oscilloscope. Les atténuateurs et amplificateurs, de par leurs caractéristiques physiques (il y a toujours des condensateurs parasites qui traînent), limitent la bande passante du système.

Sur les oscilloscopes à échantillonnage, il n'y a pas d'amplificateur ou d'atténuateur en entrée, et donc pas de limitation de la bande passante d'entrée. De plus, comme la numérisation des instants successifs se fait à une fréquence plus lente, il est possible de

travailler à des résolutions plus élevées, disons 14 bits, comparativement aux 8 bits du convertisseur d'un oscilloscope "temps réel" classique. Le rapport signal sur bruit est d'environ 84 dB, soit bien meilleur que les presque 50 dB obtenus avec un oscilloscope "temps réel".

Cela dit, il existe plusieurs techniques d'échantillonnage.

Le mode séquentiel. C'est le mode le plus répandu. La gestion du trigger y est assez différente de celle des oscilloscopes "temps réel". En effet, il n'est pas possible ici de définir des seuils ou des conditions de déclenchement sur le signal d'entrée. L'explication tient au fait qu'il se passe un laps de temps entre la détection de la condition de déclenchement et la numérisation proprement dite. Disons, typiquement, 20 ns. Ce n'est pas grand-chose dans l'absolu mais c'est énorme dans le contexte d'une acquisition sur des signaux à fréquence très élevée, de plusieurs dizaines de gigahertz. Si on déclenche par exemple au passage au zéro du signal, le point effectivement acquis par l'oscilloscope pourra se trouver en plein milieu de la sinusoïde (pour fixer les idées, la période d'un signal de 50 GHz est de 20 ns...). Pour que le point acquis corresponde bien au point désiré, il faudrait prévoir une ligne à retard de 20 ns. Mais c'est techniquement pratiquement irréalisable, compte tenu des fréquences auxquelles on travaille et de l'en-

L'essentiel

- ▶ Les oscilloscopes à échantillonnage ont une meilleure bande passante que celle des modèles temps réel.
- ▶ Le mode d'échantillonnage entrelacé cohérent (CIS) augmente les capacités des appareils à échantillonnage en profondeur mémoire et vitesse d'échantillonnage. Ces oscilloscopes sont appelés NRO (Near Real-time Oscilloscopes).
- ▶ Le point central est un sur-échantillonnage cohérent, rendu possible par une manipulation sur l'horloge du signal à mesurer.
- ▶ Les NRO intègrent des fonctions mathématiques avancées, comme la FFT, et sont capables d'afficher un diagramme de l'œil et un train de bits.

Oscilloscopes temps réel ou à échantillonnage, des possibilités différentes

	Oscilloscope à échantillonnage en mode CIS	Oscilloscope temps réel
Contraintes sur le signal	Signal répétitif et invariant dans le temps	Acquisition mono-coup
Mode de déclenchement	Pas de possibilité de placer un seuil de déclenchement sur le signal à mesurer	Utilisation de seuils de déclenchement sur le signal à mesurer, post et pre-trigger
Fréquence d'échantillonnage réelle	10 Méch/s*	40 Géch/s
Profondeur mémoire	Jusqu'à 512 Mpoints en mode CIS**	100 Mpoints
Bande passante	100 GHz sur 50 ohms	15 GHz avec DSP
Fréquence d'échantillonnage équivalente	Supérieure à 1 THz	40 GHz maximum multiplexé
Conversion analogique-numérique	Sur 14 bits	Sur 8 bits
Rapport signal/bruit	84 dB	46 dB

* 250 KHz avec un mode séquentiel classique
 ** 100 Kpoints avec un modèle à mode séquentiel classique

combremment que présenterait une telle ligne à retard.

Pour ces raisons, il faut que le dispositif à analyser ait une sortie de déclenchement, cadencée à la même période que celle du signal étudié, et que cette sortie soit reliée à l'entrée de l'oscilloscope.

Sur les oscilloscopes à échantillonnage, le niveau à mesurer est maintenu à son niveau par un échantillonneur/bloqueur, qui permet au convertisseur de "prendre son temps" pour effectuer une numérisation de précision. Une fois le premier échantillon acquis, l'oscilloscope laisse passer une période complète du signal (de durée T) et patiente encore un court temps Δt avant d'acquérir le point suivant. Ce Δt correspond au pas temporel de l'appareil, typiquement de l'ordre de 200 femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Les mises en mémoire se poursuivent de cette

manière, donnant un tableau de tension pour des instants séparés d'un temps $(T + \Delta t)$. Typiquement, on acquiert autant de points que le permet la profondeur mémoire de l'appareil. Dans la mémoire, les points sont ordonnés : si dans un emplacement mémoire est contenue la tension correspondant au temps T1, les deux tensions qui l'encadrent correspondront aux tensions des temps $[T1 - (T + \Delta t)]$ et $[T1 + (T + \Delta t)]$.

Une fois la mémoire remplie, le logiciel reconstruit aisément le signal.

La vitesse d'échantillonnage est faible : un seul point est prélevé par période, ou par pattern répétitif. Dans le cas d'un long pattern contenant de nombreux bits, ou lorsque le débit est faible, le processus d'acquisition pour obtenir une forme d'onde complète est très long et peut parfois atteindre plusieurs secondes. A cause du décalage Δt , la vitesse d'échantillonnage V_e

est de :

$$V_e = \frac{N}{L \cdot T_b \cdot (N+1)}$$

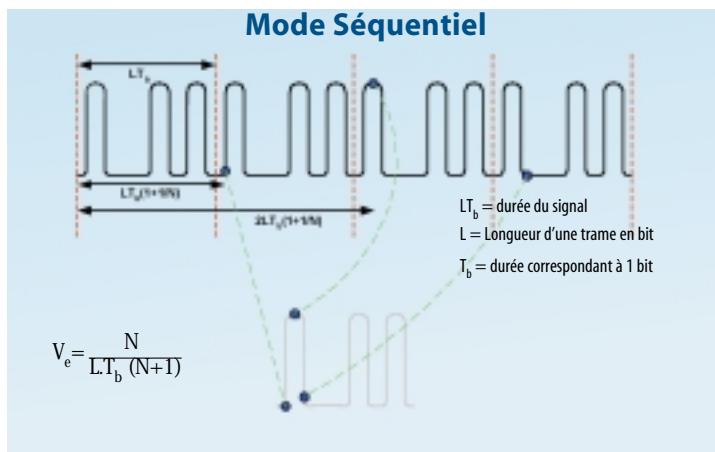
où N est le nombre d'échantillons, L la longueur du pattern en nombre de bits et T_b la durée correspondant à 1 bit. Cette vitesse V_e est très légèrement inférieure à $1/LT_b$ quand N est grand.

En mode séquentiel, les performances des oscilloscopes à échantillonnage oscillent entre 20 et 70 GHz en bande passante et seulement 200 Kéch/s en vitesse d'acquisition. Ce qui est peu comparé aux 40 Géch/s des oscilloscopes temps réel. Le mode CIS rééquilibre la balance entre les deux familles d'appareils de table.

Démêler les points entrelacés

Le mode Coherent Interleaving Sampling (CIS). Déposé par LeCroy, il apporte de nouvelles fonctionnalités et confère plus de puissance aux appareils qui l'utilisent et que nous appelleront NRO, pour "oscilloscope presque temps réel" (near real time oscilloscope). Ce mode nécessite une configuration : avant le lancement de l'acquisition, l'opérateur doit rentrer manuellement dans l'appareil la vitesse du train de bits à analyser, la vitesse de l'horloge ainsi que la longueur d'un pattern. Par exemple un pattern pseudo-aléatoire PRBS₇ aura une longueur de 127 bits ($2^7 - 1$) et c'est cette taille qui doit être renseignée. Dans la méthode CIS, l'horloge d'échantillonnage est obtenue grâce à une boucle à verrouillage de phase (PLL), qui retarde et verrouille celui-ci par rapport au signal du déclenchement. Cette technique permet d'avoir un instrument de meilleure précision puisqu'il ne fait pas appel à un générateur interne de retard. D'autre part, la PLL élimine par filtrage la gigue du trigger.

Pour l'échantillonnage lui-même, l'idée prin-



Dans le mode séquentiel classique, on prélève un point par période. Pour réaliser l'acquisition du point suivant, il faut attendre une période plus un court temps Δt , afin de pouvoir balayer le signal.

cipale est d'accroître sa vitesse. La technique CIS y contribue en maintenant plus ou moins constante la vitesse d'échantillonnage, tout en prenant en compte la longueur du pattern.

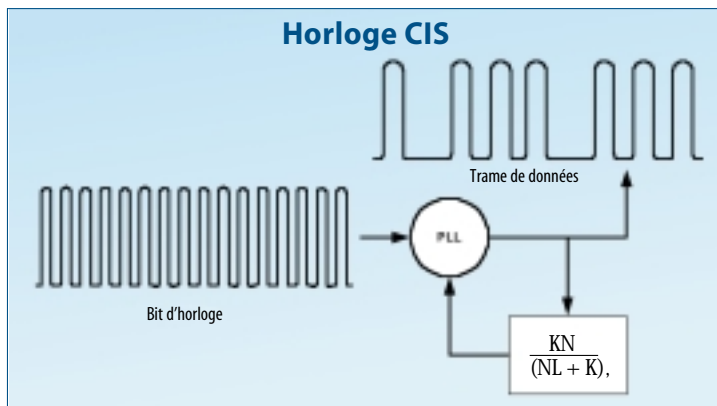
Le taux constant de 10 Méch/s est obtenu en découpant la séquence de bits en sous-intervalles. Une acquisition de points sera effectuée dans chaque sous-intervalle, ou

segment. Ce qui signifie que pour un signal découpé en K segments, il y aura K acquisitions de points : la vitesse d'échantillonnage V_e est forcément augmentée par cette sorte de suréchantillonnage. Cela se traduit par la formule suivante :

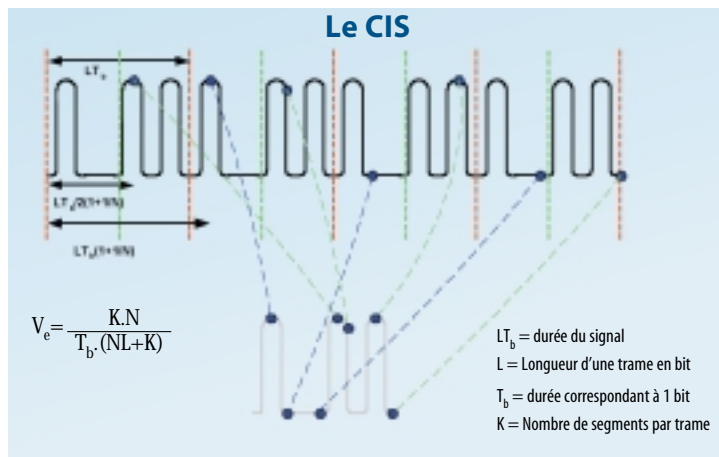
$$V_e = \frac{K.N}{T_b.(NL+K)}$$

Dès lors, il est possible en jouant sur le facteur K de maintenir V_e à 10 Méch/s, quelle que soit la longueur du pattern ou le débit du signal.

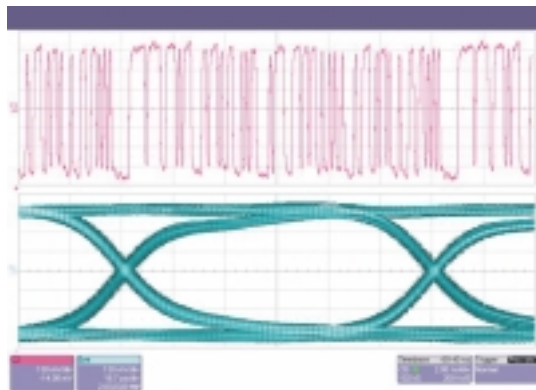
La notion d'entrelacement vient du fait que les tensions mémorisées dans l'appareil ne sont plus rangées dans l'ordre croissant, mais l'on a K échantillons pour la première période, puis K échantillons légèrement décalés pour la seconde et ainsi de suite. Pour visualiser le signal, il est nécessaire que l'oscilloscope opère une reconstruction logicielle, en remettant chaque point à sa place.



En mode CIS, on fait passer le bit horloge du signal à travers une PLL. Puis on lui applique un facteur de correction, modulable grâce au coefficient K . Ce qui donne une horloge cohérente, mais beaucoup plus rapide.



Voilà comment le logiciel reconstitue le signal à partir des points prélevés et entrelacés. Ici, la période du signal a été découpée en 2 sous-intervalles. Il y a donc deux échantillons numérisés par période. Pour les longs patterns, le gain en vitesse est considérable.



En utilisant le mode d'échantillonnage CIS, on peut visualiser le diagramme de l'œil, mais aussi le pattern correspondant. Des fonctions FFT sont disponibles pour l'étude dans le domaine fréquentiel.

Gain en vitesse et profondeur mémoire

Les NRO ont des performances accrues par rapport aux oscilloscopes à échantillonnage traditionnels. Avec des entrées électriques ou optiques, la bande passante varie désormais de 20 à 100 GHz au lieu des 20 à 70 GHz. La profondeur d'acquisition a été grandement améliorée. Jusqu'ici, 4 Kpoints étaient disponibles. En mode CIS et avec un module optionnel il est désormais possible de mémoriser jusqu'à 512 Mpoints. De quoi visualiser entièrement de longs patterns. D'ailleurs, si en mode séquentiel on n'obtient à l'écran qu'un diagramme de l'œil lors de l'étude d'un train de bits, en mode CIS on est à même d'observer le pattern et le diagramme de l'œil.

Mais c'est surtout la multiplication par 50 de la vitesse d'échantillonnage qui améliore le dispositif. La recherche d'erreurs, par exemple lors d'un test BERT qui se fait souvent sur 10^{12} bits, est donc plus précise puisque le système acquiert plus de points, et plus vite. Les patterns PRBS₂₅ peuvent être analysés.

Les NRO sont également susceptibles de fonctionner en mode séquentiel à la vitesse de 1 Méch/s, tout en bénéficiant des améliorations quant à la gigue.

Ceux qui peuvent en tirer profit appartiennent au monde du télécom, avec l'Ultra Wide Band. Ou alors font de la caractérisation de semi-conducteurs ou d'horloges à haute-vitesse. L'étude des transferts de données sur bus série haute vitesse est également une des cibles visées par les constructeurs de NRO.

Cet article est tiré de documentations de LeCroy et notamment d'un article de Mike Lauterbach et Mike Schmecker.

LeCroy