Numériseur ou oscilloscope pour mesures large bande : pourquoi s'en soucier ?

Auteurs : Sheri DeTomasi et Jean-Luc Lehmann, Keysight Technologies, Inc.

Nous vivons une période d'évolution technologique majeure. Dans les communications sans fil, les applications émergentes font désormais appel à des largeurs de bande plus importantes, ainsi que des fréquences plus élevées, des schémas de modulation plus denses, des voies multiples et davantage de données à gérer. Pour mesurer les signaux à large bande, les ingénieurs se servent généralement d'oscilloscopes et de numériseurs exploitant la technologie ADC (ou convertisseur A/N) pour l'acquisition des formes d'onde. Dans certains cas, ces instruments sont interchangeables et utilisés indifféremment pour l'analyse des formes d'onde. Toutefois, et malgré leurs nombreux points communs, il est important de comprendre que ces deux types d'appareils sont sensiblement différents et optimisés chacun pour différents types d'applications. Par exemple, les oscilloscopes présentent ordinairement un large panneau d'affichage frontal et un clavier qui permet de rapidement visualiser les formes d'onde à variation temporelle. Certains fabricants d'instruments proposent des oscilloscopes en tant que numériseurs ou des numériseurs en tant qu'oscilloscopes. Une certaine confusion peut en résulter. Cet article décrit les principales caractéristiques à prendre en compte avant de choisir un numériseur ou un oscilloscope pour votre prochaine solution de mesures à large bande.

Voici quelques caractéristiques clés à prendre en compte lors de la conception de votre solution de test large bande :

Tableau 1. Caractéristiques clés à prendre en compte pour les mesures à large bande

Caractéristique clé		
Résolution et plage dynamique	Synchronisation entre 2 voies	Mesure et analyse
Taux d'échantillonnage et bande passante instantanée	Cadence de rafraîchissement des signaux	Accès FPGA
Mémoire d'acquisition (temps d'enregistrement)	Flux de données	Fonctions mathématiques
Nombre de voies	Déclenchement	Sondage

Examinons de plus près certains de ces éléments clés.

- **Résolution et plage dynamique.** Numériseurs et oscilloscopes utilisent tous deux des convertisseurs ADC pour l'acquisition des données des formes d'onde. L'ADC échantillonne les tensions en entrée et génère une représentation binaire des niveaux de tension. Le Nombre de bits effectifs (ENOB) est une bonne mesure de la plage dynamique. Ce nombre correspond à la résolution effective des bits lorsque l'on tient compte du bruit et de la distorsion. Il reflète avec précision le bruit de large bande présent dans les mesures de fréquence ou de domaine temporel.

ENOB = (SINAD – 1,76) / 6,02

- Le SINAD (Signal-to-Noise and Distortion Ratio, ou rapport signal sur bruit avec distorsion), est une mesure de la qualité du signal. La résolution de l'ADC a bien une incidence sur ce rapport, mais d'autres facteurs interviennent également.

Exemple :

- L'acquisition en 8 bits divise une plage d'entrée de 10 Vpp par 2^8= 256 niveaux de 39 mV chacun.
- Une résolution de 10 bits multiplie par 4 le nombre de niveaux, tandis qu'une résolution de 16 bits le multiplie par 256 (152 uV pour 10 Vpp).

Les oscilloscopes utilisent généralement des ADC avec une résolution de 8 bits pour les acquisitions sur les très grandes largeurs de bande. Pour améliorer le chiffre ENOB, il est possible d'ajouter diverses techniques de filtrage dans l'oscilloscope. Par exemple, l'oscilloscope Keysight InfiniiVision, dont la fréquence d'échantillonnage est de 2,5 GS/sec dans un ADC 8 bits, a un mode haute résolution qui lui permet d'améliorer la résolution et d'augmenter le rapport ENOB à 12 bits avec une réduction de bande passante. La résolution de l'oscilloscope est idéale pour visualiser les mesures de domaine temporel sur les très larges bandes passantes.

Les numériseurs implémentent habituellement des convertisseurs ADC 12 ou 14 bits et proposent aussi des techniques qui permettent d'augmenter la résolution sur une bande passante réduite. Ils donnent ordinairement de meilleurs ENOB ou améliorent la résolution sur des bandes passantes plus limitées. Lorsque l'application implique une analyse spectrale ou comprend des signaux dynamiques (composants haute et basse tension), par exemple une forme d'onde modulée, un rapport ENOB supérieur améliore la résolution et réduit le plancher de bruit (ou le rapport SFDR, Spurious Free Dynamic Range ou plage dynamique sans parasite). Alors qu'un oscilloscope de 8 bits peut donner un SFDR de 45 dB, un numériseur doté d'une résolution supérieure combiné avec un bon rapport SFDR est capable de déceler davantage de détails lors de l'analyse des données. Par exemple, un numériseur 10 bits peut atteindre 57 dB et un numériseur 12 bits 65 dB.

- **Bande passante en entrée et taux d'échantillonnage**. Il est important de choisir un numériseur ou un oscilloscope doté de suffisamment de bande passante pour capturer avec précision le composant de plus haute fréquence dans votre signal. Le théorème d'échantillonnage de Nyquist énonce que, pour un système d'échantillonnage, la fréquence de Nyquist Fn est égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage fs. L'énergie du signal au-dessus de la fréquence de Nyquist se combine au taux d'échantillonnage de l'ADC, tandis que les produits se replient au-dessus du signal ciblé au niveau de la bande de base, ce qui empêche toute acquisition précise du signal (distorsion de repliement). Pour être sûr que l'énergie du signal ne dépasse pas la

fréquence effective de Nyquist, on utilise généralement des filtres pour limiter la bande passante en entrée.

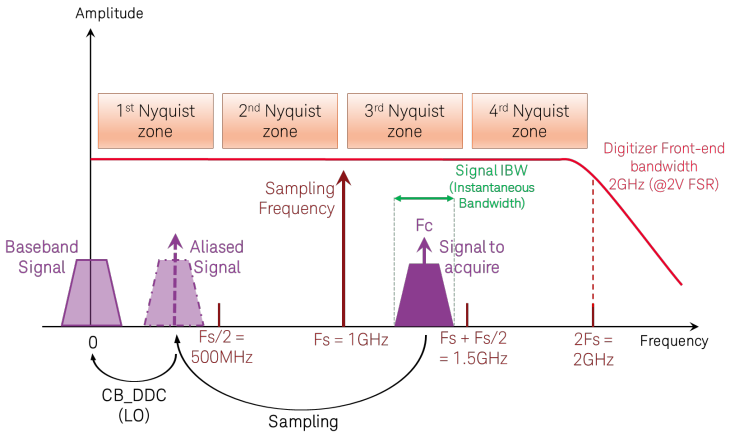


Figure 1. Bandes passantes en entrée et fréquences d'échantillonnage

Dans les oscilloscopes, le taux d'échantillonnage maximal spécifié (fs) est environ 2,5 à 3 fois supérieur à la bande passante en temps réel. Un filtre de reconstruction de la forme d'onde peut ainsi reproduire avec précision la forme d'onde d'un signal de vitesse supérieure avec une bonne résolution.

Dans les numériseurs, vous pouvez envisager de sélectionner une bande passante supérieure à la moitié du taux d'échantillonnage (fn). Pour capturer les fréquences supérieures à Fs/2, le sous-échantillonnage est parfois combiné à un filtre spécial en entrée. Par exemple, les numériseurs Keysight M9203A et M9703B prennent en charge une bande passante de 2 GHz avec une fréquence d'échantillonnage d'horloge sur l'ADC de 1,6 GS/s, ce qui autorise une conversion descendante directe à l'aide du sous-échantillonnage.

Dans les numériseurs de résolution supérieure, il est important de tenir compte du bruit global ajouté au fur et à mesure que la bande passante augmente. Le conditionnement supplémentaire du signal ajoute un circuit susceptible d'affecter le SFDR. C'est pour cette raison que les numériseurs maintiennent un couplage en alternatif (AC) ou en continu (DC) avec fonctions de gamme pleine échelle (SFR) limitées pour assurer la plus faible distorsion et la plus grande plage dynamique (et le meilleur SFDR) possibles.

Les oscilloscopes permettent de sélectionner différents FSR et un couplage AC/DC. Pour la visualisation, un SFDR de 45 dB est adéquat. Les bandes passantes plus larges ont également moins d'impact, car le bruit ajouté est imperceptible avec une résolution de 8 bits.

- **Mémoire d'acquisition et flux**. Veillez à ce que la mémoire d'acquisition soit suffisante pour capturer vos signaux les plus complexes avec une fenêtre temporelle d'observation appropriée. Pour ce faire, tenez compte de l'application et du volume de données à collecter. La mémoire d'acquisition est habituellement spécifiée en MSa ou en GSa dans les numériseurs et en Mpts dans les oscilloscopes. Il s'agit-là de la mémoire embarquée propre à chaque ADC.

  Intervalle temporel = Mémoire d'acquisition / Taux d'échantillonnage

  Certaines applications d'enregistrement exigent des périodes d'acquisition trop longues pour pouvoir stocker toutes les données dans la mémoire embarquée. Dans ce cas, un flux (diffusion en continu) non embarqué permet d'acquérir les données à transferer dans un périphérique de stockage externe pour post-traitement. Nombre de numériseurs modulaires se révèlent idéaux pour les applications qui diffusent des flux de données, puisqu'ils sont directement connectés à un bus PCIe haut débit.

  Plusieurs techniques, notamment le déclenchement avancé, la segmentation et la conversion descendante numérique (DDC), permettent de réduire la quantité de mémoire embarquée requise pour les acquisitions.

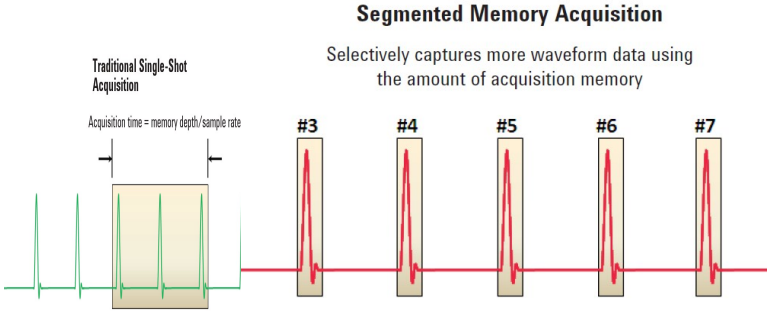


Figure 2. Acquisition traditionnelle et par mémoire segmentée

Les oscilloscopes et les numériseurs prennent généralement tous en charge les techniques de mémoire segmentée. Lorsque la mémoire est segmentée, il est possible d'utiliser le déclenchement pour capturer la forme d'onde du signal de façon sélective et réduire ainsi la quantité de mémoire nécessaire pour l'acquisition.

Les numériseurs font appel à des techniques de sélection de données, telles que la suppression des zéros, qui ne conserve que le signal pertinent supérieur à un seuil spécifié. Pour optimiser la mémoire disponible, ils utilisent également la mise en paquets des données et l'arrondissement. Des techniques de réduction des données en temps réel sont également utilisées, comme la conversion descendante numérique (digital down conversion, DDC). Pour effectuer la transposition en fréquence et la décimation (sous-échantillonnage) des données, le DDC opère directement au niveau des données dans l'ADC. Le concept de base est illustré en figure 3. Les

données IQ complexes sont collectées pour autoriser la transposition de la fréquence centrale jusqu'à 0 Hz. Le filtrage et la décimation des données permettent ensuite d'éliminer les composants de fréquence indésirable et de réduire le volume de données requis. La conversion DDC se révèle précieuse pour analyser une petite partie de spectre au sein d'une acquisition large bande. Elle réduit non seulement la quantité de mémoire nécessaire, mais atténue également le bruit à large bande intégré et améliore le rapport signal/bruit (SNR, Signal to Noise Ratio) global.

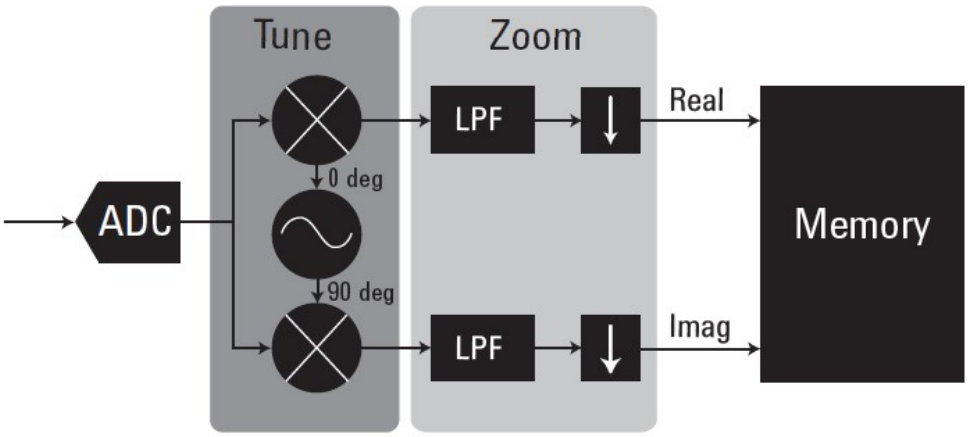


Figure 3. Schéma de fonctionnement de la conversion DDC

- **Cadence de rafraîchissement des signaux.** Dans les oscilloscopes, des cadences élevées de rafraîchissement des signaux permettent de voir les événements et problèmes imprévus. Lorsqu'un événement aléatoire est identifié, il est alors possible d'ajuster le déclenchement amélioré de l'oscilloscope pour le capturer.

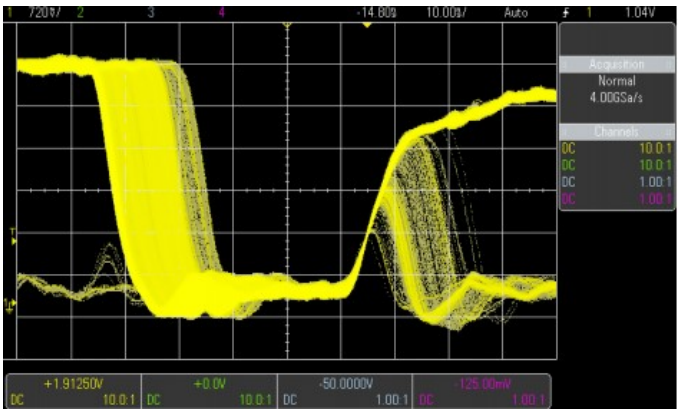


Figure 4. Les oscilloscopes fournissent des cadences de rafraîchissement supérieures à 1 000 000 de signaux/seconde qui permettent d'identifier visuellement les événements et problèmes imprévus.

Selon l'application, il est parfois nécessaire de minimiser le temps mort entre les acquisitions. Les numériseurs haut débit utilisent des techniques qui permettent de le réduire au minimum, par exemple l'acquisition et lecture en simultané (ou mode SAR).

- **Déclenchement.** Le déclenchement permet de synchroniser l'acquisition des signaux. Il peut être simple, par exemple indiquer uniquement le moment où doit commencer l'acquisition, ou plus complexe, avec un déclenchement en présence d'un certain schéma, d'une rafale, voire propre au protocole série. En général, les oscilloscopes prennent en charge de nombreux types de déclenchement distincts (front déclencheur, largeur d'impulsion, schéma, temps de montée/chute, Nième rafale, petit dernier, configuration/maintien, etc.). Certains, comme l'oscilloscope InfiniiVision, prennent également en charge le déclenchement propre au protocole série pour les bus série tels que CAN, FlexRay, I2C, LIN, MIL-STD1553, URAT, etc.

  Les numériseurs prennent généralement en charge les types de déclenchement ATE, tels que les déclenchements sur front et/ou niveau, qui indiquent quand commencer l'enregistrement de l'acquisition. L'acquisition de données avant et après le déclenchement est prise en charge par la plupart des numériseurs. Dans les systèmes ATE ou les systèmes embarqués plus importants, assurez-vous de tenir compte du temps de réarmement des déclencheurs et de veiller à ce que tous se déclenchent simultanément sur tous les instruments et toutes les voies. Grâce à l'interpolateur de temps de déclenchement (trigger time interpolator, TTI), le positionnement du déclencheur peut être très précis (jusqu'à quelques ps) dans le numériseur. Par exemple, la précision du modèle M9703B est de 15 ps. Il est également possible d'ajouter une détection de déclencheur spécifique pour la détection en temps réel avec les architectures FPGA ouvertes.

- **Mesures et analyses.** Les oscilloscopes sont conçus spécialement pour faciliter l'utilisation et accélérer les mesures. Ils sont dotés d'une vaste gamme d'outils de mesure et d'analyse, directement intégrés à l'équipement et accessibles via le panneau frontal sur les instruments de laboratoire ou via le panneau logiciel sur les instruments modulaires. Cela les rend idéaux pour le large éventail de tests habituellement réalisés pendant la conception et l'optimisation. Comme ces mesures sont effectuées dans l'équipement, l'acquisition des résultats est rapide et accélère la mesure, que ce soit en environnement de laboratoire ou en environnement ATE. Le tableau suivant présente les outils d'analyse mathématique, de transformation de Fourier rapide (FFT) et de protocole série, disponibles avec les oscilloscopes de la gamme InfiniiVision.

  Tableau 2. Outils de mesure et d'analyse embarqués, disponibles avec les oscilloscopes Keysight PXIe M924xA

Mathématique		Analyse série[1]	Autres opérations
– Additionner, soustraire – Multiplier, diviser – Différencier, intégrer – Meilleures FFT avec fenêtre – Ax + B – Carré, racine carrée – Valeur absolue – Logarithme décimal – Logarithme naturel	– Exponentielle – Exponentielle en base 10 – Filtre passe-bas – Filtre passe-haut – Valeur moyenne – Lissage, Enveloppe – Grossir – Mémorisation des maximums et minimums – Tendance des mesures – Diagramme du bus logique	– I^2C – RS232/422/485/UART – CAN – LIN – MIL-STD1553 – ARINC429 – SENT – CXPI – NFC	– FFT (transformées de Fourier rapides, magnitude, phase) – Bande passante occupée – ACPR – THD - DVM 3 chiffres – Compteur – 8 chiffres * Fréquence * Période * Totalisateur – 20MHz WaveGen * Sinus, carré, rampe * Impulsion, synchronisation * ex montée/descente + autres * AM/FM/FSK

D'autre part, les numériseurs s'appuient sur des logiciels pour PC pour effectuer l'analyse. Certains peuvent accéder au circuit intégré prédiffusé programmable (Field Programmable Gate Array, FPGA) embarqué et permettent d'ajouter dans l'instrument du code personnalisé, des filtres, des corrections ou des schémas de réduction des données. Certains permettent d'effectuer des calculs mathématiques avec le résultat ou d'inclure une table de conversion pour le modifier. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'implémenter votre propre fonction personnalisée dans l'instrument pour exécuter une analyse particulière. La personnalisation du circuit FPGA de l'instrument permet d'y ajouter des fonctions supplémentaires, de réduire les coûts et les délais de développement, ou encore d'accélérer les mesures. Elle permet également d'effectuer des calculs, de telle façon que vous obtenez directement les valeurs recherchées, en même temps que vous diminuez le volume de données à gérer.

1

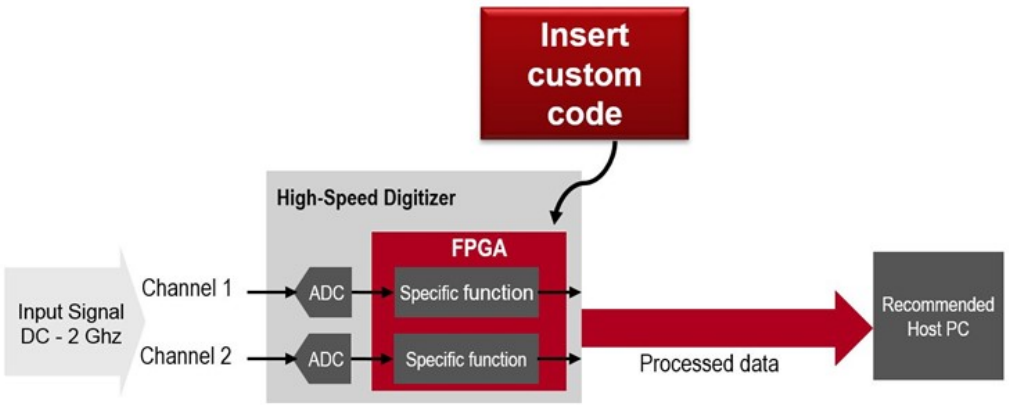


Figure 5. Insérer du code personnalisé dans le circuit FPGA d'un instrument permet d'accélérer les mesures et les tests ou de limiter les données requises.

Les oscilloscopes comme les numériseurs peuvent aussi exploiter d'autres outils logiciels et d'analyse, de type application, pour traiter le signal acquis. Les logiciels MathWorks ou Keysight 89600 VSA sont par exemple couramment utilisés pour les analyses de modulation complexes.

- **Sondage et tension en entrée.** Le sondage peut se révéler essentiel pour pouvoir accéder au signal recherché. Bien qu'important, il peut toutefois introduire une certaine complexité, en particulier si l'on tient compte de la capacité de charge à des fréquences plus élevées, à une plus forte tension ou à un courant plus intense. Pour mesurer les fréquences plus élevées, il est préférable d'utiliser des sondes actives. Les oscilloscopes offrent habituellement diverses options de sondage, notamment des sondes passives, des sondes actives pour tension et courant, des sondes haute tension, des sondes différentielles et des sondes optiques. Ces sondes sont conçues pour correspondre à l'impédance en entrée de l'oscilloscope. Avec la sonde appropriée, l'oscilloscope peut prendre en charge des entrées de tension ou de courant supérieures.

  Les numériseurs n'incluent généralement pas de solution de sonde adéquate et, dans la plupart des cas, ne prennent en charge qu'une impédance de 50 ohms en entrée pour atténuer les effets d'un circuit supplémentaire sur le trajet du signal. Par ailleurs, les numériseurs sont habituellement embarqués dans un plus grand système, dans lequel la connexion au signal est permanente.

Résumé

Si les oscilloscopes comme les numériseurs utilisent des ADC pour les mesures large bande, ils sont chacun optimisés pour des types distincts d'application et d'utilisation.

Les oscilloscopes sont parfaits pour visualiser les très grandes largeurs de bande. Ils se caractérisent par des cadences de rafraîchissement de la forme d'onde très élevées, qui permettent de déceler et d'identifier les événements ou problèmes inconnus dans les signaux. Le déclenchement avancé autorise la réduction à zéro lors d'événements spécifiques pour analyse complémentaire, ou un déclenchement pour le test des bus série à haut débit. Les divers types de sondes pour oscilloscope permettent d'afficher les signaux à différents points d'une conception, en conditionnant le signal et ainsi gérer les hautes tensions, intensités et fréquences. Voici quelques applications classiques pour les oscilloscopes :

- Débogage et optimisation d'une conception. Un oscilloscope permet d'afficher les détails du signal, avec une cadence de rafraîchissement de la forme d'onde extrêmement rapide qui révèle par exemple les défauts et les anomalies, et permet de se focaliser sur un aspect bien spécifique d'un design grâce au rôle des sondes.
- La capture des rares erreurs de communication est essentielle pour le décodage des protocoles série. Elle peut s'effectuer via un oscilloscope assurant le déclenchement et le décodage du protocole série.
- Caractérisation et validation des performances d'entrée et sortie numériques et intégration des technologies COTS, notamment CAN, DDR, DisplayPort, PCIe, NFC et autres

Les numériseurs à large bande sont préférables lorsque la fidélité du signal est importante. Ils présentent généralement une résolution et une plage dynamique supérieures, et davantage de profondeur de mémoire pour capturer les signaux ensuite transférés vers un ordinateur via des bus PCIe à plusieurs voies pour post-traitement. La diffusion en continu (flux) est parfois utilisée lorsque l'acquisition porte sur de gros volumes de données. Les systèmes ATE et les applications d'analyse du signal multivoies haute densité tirent généralement pleinement parti des numériseurs dotés de technologies de conversion analogique/numérique à haute résolution (ADC). Voici quelques applications classiques des numériseurs :

- Le numériseur (à une ou plusieurs voies) se révèle idéal pour surveiller les signaux électriques et déterminer les propriétés physiques d'un événement. Il est généralement utilisé pour les tests de stimuli/réponse. Il est possible d'enregistrer les caractéristiques du signal à certains moments pour analyser ensuite ce qui s'est produit avant et après l'événement.
- Le calibrage des antennes multicanaux au travers de mesures de magnitude et de phase entre les canaux, et de leur comparaison, permet d'assurer une différence de phase minime entre les canaux. Les numériseurs multivoies servent à acquérir rapidement des mesures de magnitude et de phase entre voies pour comparaison.
- Les numériseurs multivoies à haut débit sont utilisés pour l'acquisition de signal pour le sondage MIMO. Une fois échantillonnés, soit les signaux sont traités par un FPGA embarqué, soit les signaux I et Q sont transmis à un périphérique de stockage externe pour post-traitement et création des données de réponse impulsionnelle du canal (channel impulse response, CIR) dans une application de sondage MIMO des voies 5G mmWave.

Pour obtenir des informations détaillées et découvrir les avantages et inconvénients découlant du choix d'un oscilloscope ou d'un numériseur pour les acquisitions de signaux à large bande, consultez la note d'application www.keysight.com/find/wideband-appnotes.