La technologie BAW de TI garantit une gigue ultra faible sur les signaux d'horloge des réseaux à grande vitesse

Marques déposées
Toutes les autres marques déposées mentionnées ici appartiennent aux titulaires des droits de propriété afférents.

Les dispositifs de synchronisation basés sur des boucles à asservissement de phase numériques (DPLL, *Digital Phase-Locked Loop*) sont des composants essentiels des réseaux de communication. Ils génèrent des signaux d'horloge précis et les transmettent aux différents sous-systèmes à partir des signaux transmis par le réseau. Le schéma simplifié de la Figure 1 montre comment ils sont utilisés dans les cartes de synchronisation et de ligne des équipements de communication classiques, tels que les routeurs et les commutateurs. Conformément aux normes applicables, notamment l'ITU-T G.8262, les dispositifs de synchronisation de réseau détectent les signaux d'horloge invalides en entrée, filtrent les dérapages et assurent des fonctions de commutation et de maintien du signal sans perturbations. Les signaux d'horloge à faible bruit de phase sont générés à partir d'une boucle à asservissement de phase analogique (APLL, *Analog Phase-Locked Loop*) associée à un oscillateur de référence à quartz externe (XO), compensé en température (TCXO) ou thermostaté (OCXO).

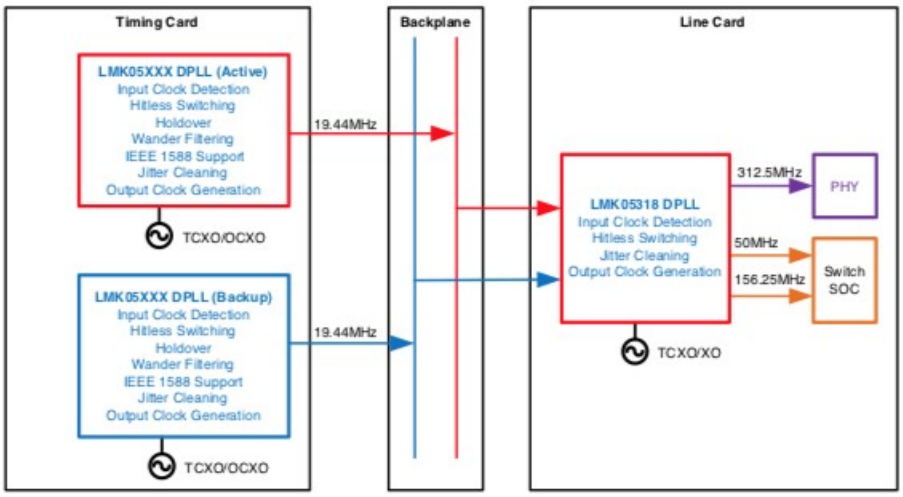


Figure 1. Simplified diagram for network synchronizers used in communication equipment timing cards and line cards.

Figure 1. Schéma simplifié des dispositifs de synchronisation de réseaux utilisés dans les cartes de synchronisation et de ligne des équipements de communication.

L'une des principales spécifications des dispositifs de synchronisation de réseau porte sur la gigue efficace de l'horloge en sortie, qui s'intègre à une bande de fréquence donnée fixée par différentes normes. Cette valeur de gigue requise est de plus en plus contraignante afin de satisfaire aux exigences strictes en termes de rapport signal sur bruit (S/B) et de taux d'erreur binaire, tout en maintenant une marge confortable d'évolution sur la conception – car la croissance fulgurante des données ne cesse de faire augmenter le débit de transmission sur les réseaux de communication. Ainsi, lorsqu'un réseau passe de 100 Gbit/s (gigabits par seconde) à 400 Gbit/s, les concepteurs ont besoin que la gigue totale efficace en sortie des générateurs d'horloge dédiés à la synchronisation entre 12 kHz et 20 MHz (notée TJrms_12kHz_20Mhz, raies parasites comprises) ne dépasse pas 150 fs. Pour plus de simplicité, dans le présent document, les valeurs de gigue totale efficace du signal d'horloge en sortie seront toujours données pour une bande passante entre 12 kHz et 20 MHz, et les raies parasites seront toujours comprises.

Généralement, un circuit de synchronisation de réseau à la pointe de la technologie génère le signal d'horloge grâce à un oscillateur de type VCO LC haute fréquence intégré. Le bruit de phase de ce VCO est limité par le facteur de qualité de son circuit LC, généralement compris entre 20 et 30 après optimisation. Si le VCO LC est associé à une boucle PLL à bande passante très étroite (100 Hz, p. ex.), la gigue efficace sur le signal d'horloge en sortie peut atteindre plusieurs centaines de fs, voire davantage, principalement en raison du bruit de phase de l'oscillateur. Il est alors impossible de respecter la limite de 150 fs.

Afin d'améliorer les performances de gigue efficace, les concepteurs ont la possibilité d'augmenter la bande passante de la boucle APLL, atténuant ainsi le bruit de phase du VCO à proximité de la porteuse. Cependant, en raison de la nature analogique de la boucle APLL à diviseur de fréquence fractionnaire par N, le bruit de phase dans la bande inhérent à ladite boucle est limité par les imperfections analogiques et peut être affecté par les variations d'application, de tension et de température (PVT) ainsi que par les effets de diaphonie. Le bruit de phase de l'oscillateur à quartz de référence est également limité. Par conséquent, augmenter la bande passante de la boucle APLL au-delà d'une certaine plage de fréquence peut entraîner une situation dans laquelle le bruit de phase dans la bande de la boucle et celui de l'oscillateur à quartz de référence deviennent les principaux facteurs de la gigue totale efficace, ce qui empêche de la réduire. De surcroît, une telle augmentation dégrade les performances de filtrage des raies parasites générées par le diviseur fractionnaire par N ; par suite, le bruit de quantification peut amoindrir les performances de gigue totale efficace.

Avec un XO haute fréquence (48 MHz, par exemple) à faible bruit, la bande passante optimale de la boucle PLL pour minimiser la gigue efficace correspondrait à quelques centaines de kHz, voire davantage, sur les circuits de synchronisation de réseau dotés d'un VCO LC. Cela correspond, *a minima*, à une gigue efficace totale maximale autour de 150 fs. Voilà pourquoi les dispositifs de synchronisation de réseau classiques basés sur des VCO LC deviennent aujourd'hui un obstacle à l'amélioration des performances des réseaux de communication à 400 Gbit/s et de leurs futurs successeurs à plus haute vitesse.

Autre inconvénient : ils nécessitent d'être associé à un oscillateur de référence à quartz haute fréquence à faible bruit pour optimiser la gigue totale efficace. Afin de respecter les exigences de précision concernant le maintien du signal sur certains systèmes, par exemple la valeur de ± 4.6 ppm fixée par l'ITU-T G.8262 pour le Sync E, on préférera utiliser un TCXO ou un OCXO plutôt qu'un XO classique non compensé. Cependant, il est difficile de trouver des TCXO et des OCXO haute fréquence à faible bruit fiables, et ils sont généralement coûteux. Les concepteurs de systèmes doivent donc faire des compromis sur les performances de bruit de phase et de gigue, de précision de maintien du signal, ou bien sur le coût total de la solution.

Pour résoudre ce problème épineux, ils peuvent utiliser le générateur d'horloge LMK05318, un circuit doté de la technologie à ondes acoustiques de volume (BAW, *Bulk Acoustic Wave*). Ce dispositif utilise un résonateur BAW à facteur Q élevé, intégré dans le même boîtier que la puce en silicium, afin de former un oscillateur contrôlé en tension de type VCBO (*Voltage-Controlled BAW Oscillator*) intégré à très faible bruit. Comme illustré ci-après, le bruit de phase à proximité de la porteuse (entre 1 kHz et 100 kHz env.) d'un VCBO est 10 à 20 dB plus bas que celui d'un VCO LC à la pointe de la technologie. La technologie BAW innovante réduit considérablement le bruit de phase et la gigue efficace de l'horloge en sortie, passant ainsi en deçà du seuil maximal exigeant de 150 fs, avec une marge confortable. Elle respecte donc largement les exigences fixées pour les réseaux à 400 Gbit/s, et ouvre la voie à des vitesses de transmission supérieures pour l'avenir. De plus, cette solution affiche un coût total réduit, puisqu'elle ne nécessite plus d'oscillateur TCXO ou OCXO haute fréquence à faible bruit.

2 L'oscillateur contrôlé en tension à très faible bruit basé sur la technologie BAW

Les résonateurs BAW, compacts et présentant des fréquences de fonctionnement élevées (jusqu'à quelques GHz), sont utilisés depuis plusieurs années dans les applications mobiles, notamment les

filtres RF front-end des émetteurs-récepteurs sans fil. Ces résonateurs sont constitués d'une fine couche de matériau piézoélectrique et fonctionnent comme des résonateurs à quartz. Comme le montre la Figure 2, la lame de matériau piézoélectrique est intercalée entre deux électrodes en métal et plusieurs réflecteurs acoustiques afin de confiner l'énergie mécanique. Il en résulte un résonateur de type LC très stable, à facteur Q élevé.

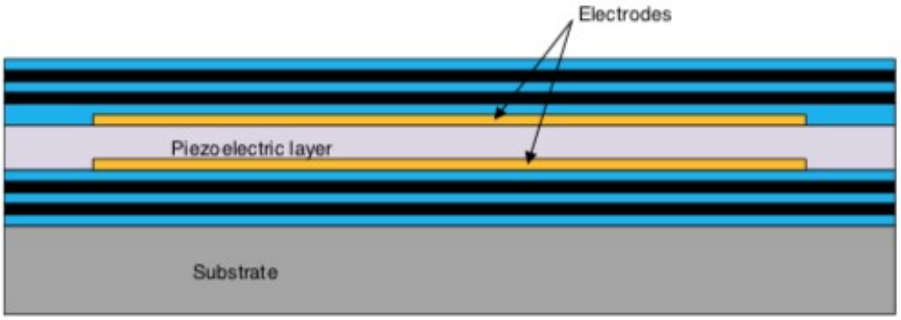


Figure 2. Basic structure of a Bulk Acoustic Wave (BAW) resonator.

Figure 2. Structure de base d'un résonateur à ondes acoustiques de volume (BAW)

Un résonateur BAW peut être représenté sous la forme d'un schéma électrique équivalent de Butterworth-Van Dyke (MBVD) modifié, illustré par la Figure 3. À l'instar d'un résonateur à quartz classique, il présente une fréquence de résonance parallèle *fp* et une fréquence de résonance série *fs*.

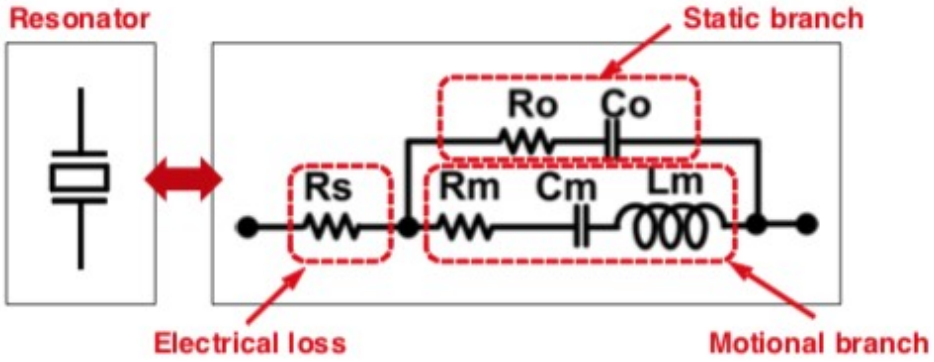


Figure 3. Modèle de Butterworth-Van Dyke (MBVD) modifié – Schéma électrique équivalent d'un résonateur BAW

Au fil de nombreuses années de recherche et de développement impliquant diverses équipes fonctionnelles, TI a perfectionné la conception de son résonateur BAW haute fréquence à facteur Q élevé, tout en résolvant la problématique de l'intégration dans le boîtier du circuit en silicium. Typiquement, un résonateur BAW utilisé sur un VCBO 2,5 GHz présente un facteur de qualité de 1 200.

La gigue totale efficace d'un oscillateur VCBO 2,5 GHz basé sur la technologie BAW innovante de TI est de 33 fs environ pour une fréquence de sortie de 1,25 GHz (voir Figure 4). La Figure 5 et le Tableau 1 comparent les performances de bruit de phase du VCBO 2,5 GHz du LMK05318 à celles du VCO LC de pointe du LMX2582 (normalisé à 2,5 GHz). Sur le VCBO 2,5 GHz, le bruit de phase à proximité de la porteuse (entre 1 kHz et 100 kHz env.) est 10 à 20 dB plus bas que sur un VCO LC à la pointe de la technologie - preuve indiscutable de la supériorité des performances du VCBO en matière de bruit de phase et de gigue. Basés sur cette technologie, les dispositifs de synchronisation de réseau à très faible gigue tels que le LMK05318 sont conçus pour satisfaire aux exigences élevées des réseaux de communication haute vitesse, notamment à 400 Gbit/s.

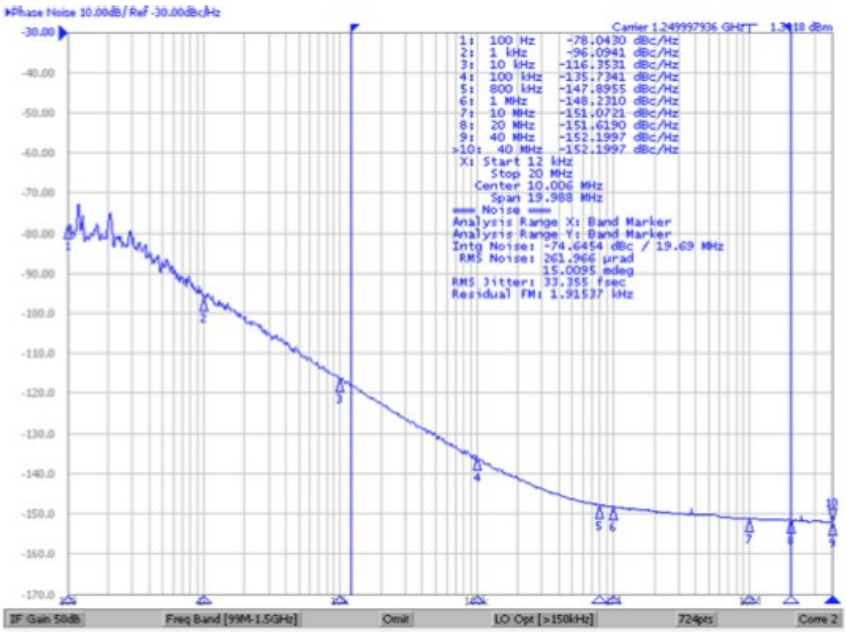


Figure 4. Typical 2.5GHz VCBO phase noise (measured at a carrier frequency of 1.25GHz). The total rms jitter is around 33fs.

Figure 4. Bruit de phase type d'un VCBO 2,5 GHz type (mesuré à une fréquence de porteuse de 1,25 GHz). La gigue totale efficace est de 33 fs environ.

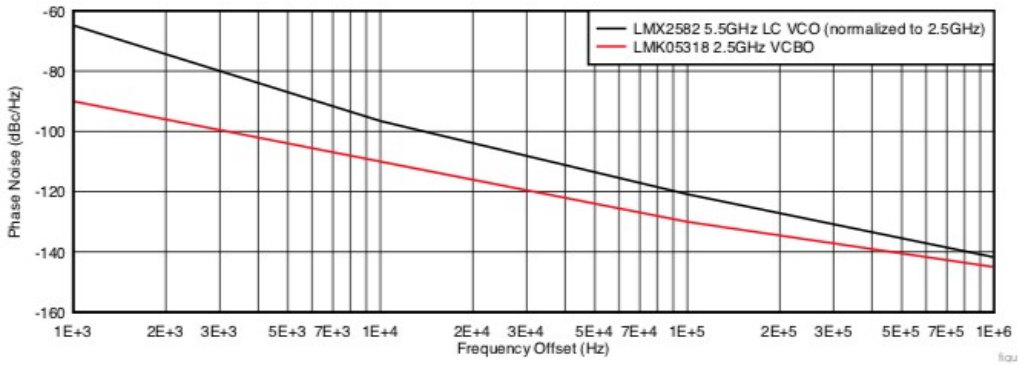


Figure 5. Compare phase noise performance of LMK05318 2.5GHz VCBO with the state-of-art LC VCO of LMX2582 (normalized to 2.5GHz)

Figure 5. Comparaison des performances de bruit de phase du VCBO 2,5 GHz du LMK05318 par rapport au VCO LC à la pointe de la technologie du LMX2582 (normalisé à 2,5 GHz)

Table 1. Compare phase noise performance of LMK05318 2.5GHz VCBO with the state-of-art LC VCO of LMX2582 (normalized to 2.5GHz) .

Offset Frequency (Hz)	LMX2582 5.5GHz LC VCO (normalized to 2.5GHz) (dBc/Hz)	LMK05318 2.5GHz VCBO (dBc/Hz)	Improvement (dB)
1k	-64.8	-90	25.2
10k	-96.5	-110	13.5
100k	-120.8	-130	9.2
1M	-141.7	-145	3.3

Tableau 1. Comparaison des performances de bruit de phase du VCBO 2,5 GHz du LMK05318 par rapport au VCO LC à la pointe de la technologie du LMX2582 (normalisé à 2,5 GHz).

3 Architecture de la puce du générateur d'horloge à très faible gigue LMK05318 dédié à la synchronisation de réseau

Le LMK05318 est le tout premier dispositif de synchronisation de réseau du marché à utiliser un résonateur BAW haute fréquence à facteur Q élevé, intégré dans le boîtier QFN standard du circuit imprimé en silicium, pour former un VCBO capable de générer un signal d'horloge à très faible gigue. La Figure 6 représente le schéma fonctionnel de la puce du LMK05318.

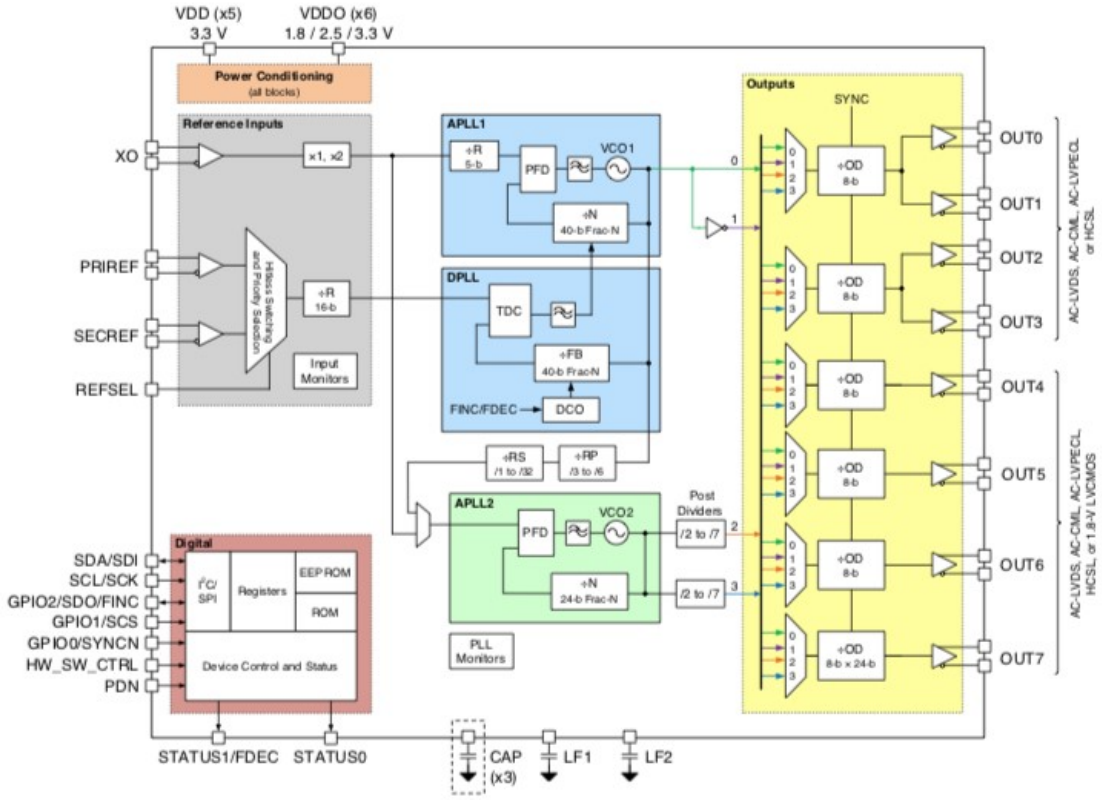


Figure 6. LMK05318 simplified chip level block diagram.

Figure 6. Schéma fonctionnel simplifié de la puce du LMK05318.

Le LMK05318 est doté d'une boucle DPLL entièrement programmable qui détecte et surveille les signaux d'horloge en entrée, filtre les dérapages et la gigue, et assure les meilleures performances de commutation et de maintien du signal sans perturbations du secteur. Il peut fonctionner en mode normal avec la DPLL activée, en mode de maintien du signal lorsque les signaux d'horloge en entrée sont désactivés, ou en mode libre. Il est conforme aux diverses normes sur les systèmes de communication, notamment l'ITU-T G.8262. Différentes fonctionnalités, telles qu'une puce mémoire EEPROM ou un régulateur à faible tension de déchet, facilitent sa configuration et son utilisation. Reportez-vous à la fiche technique du LMK05318 pour découvrir d'autres fonctions utiles.
L'oscillateur VCO1 de la boucle APLL1 est un VCBO 2,5 GHz. Les signaux d'horloge en sortie générés par la boucle APLL1 présentent les meilleures performances de gigue efficace et de bruit de phase du marché. Comme l'indique la Figure 7 ci-après, la gigue totale efficace type en sortie approche les 47 fs.

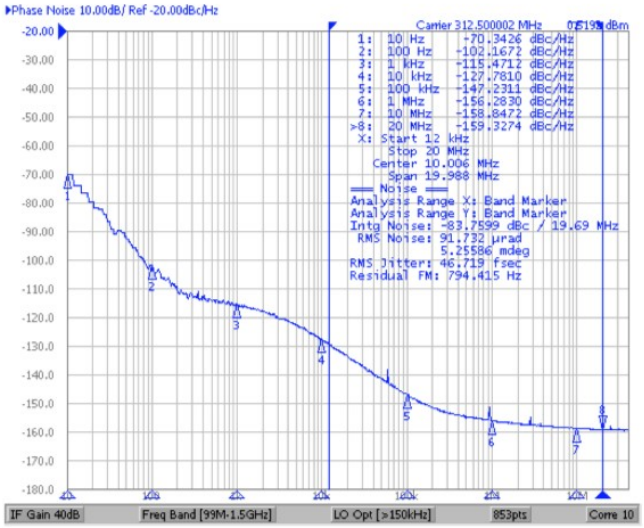


Figure 7. Typical DPLL/APLL1 312.5Mhz output phase noise. TJrms_12_20Mhz is around 47fs.

Figure 7. Bruit de phase en sortie d'une DPLL/APLL1 type à 312,5 Mhz, avec TJrms_12_20Mhz = 47 fs environ.

La boucle APLL2 dotée d'un oscillateur VCO LC 5,5 à 6,25 GHz peut être utilisée pour générer les signaux d'horloge que l'oscillateur VCBO 2,5 GHz ne peut produire directement. Sa gigue totale efficace pour une fréquence de 155,52 MHz en sortie est de 118 fs.

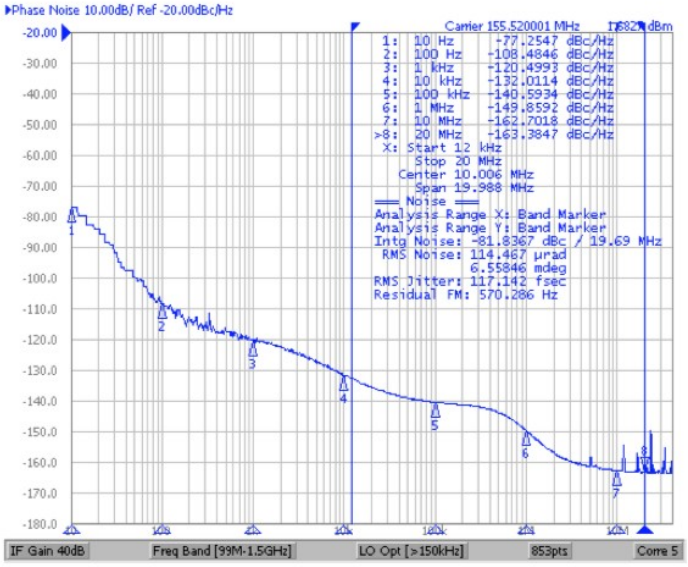


Figure 8. Typical APLL2 155.52Mhz output phase noise. FVCO2=5598.72Mhz, APLL2 FPD=2500Mhz/18=138.8…Mhz. TJrms_12_20Mhz is around 118fs.

Figure 8. Bruit de phase en sortie d'une APLL2 type 155,52 Mhz FVCO2=5598,72 Mhz, APLL2 FPD=2 500 Mhz/18=138,8…Mhz, avec TJrms_12_20Mhz = 118 fs environ.

Les autres avantages de la solution LMK05318 associée à un oscillateur de type VCBO sont résumés dans le Tableau 2 et exposés ci-après.

4 De meilleures performances de bruit de phase au milieu de la bande (entre 10 kHz et 1 MHz)

Comme le montre la Figure 9, le bruit de phase au milieu de la bande (entre 10 kHz et 1 MHz) du LMK05318 est bien meilleur que celui de solutions classiques basées sur un oscillateur VCO LC, car il est essentiellement dominé par le bruit de phase à proximité de la porteuse du VCBO, et qu'on n'observe aucune bosse liée à la boucle APLL1 à large bande. C'est un avantage considérable pour les stations de base de type macro-cellules sans fil, et autres systèmes présentant des exigences strictes de bruit de phase au milieu de la bande à certains décalages de fréquence (par exemple, le bruit de phase d'un GPS mobile à un décalage de 800 kHz, etc.).

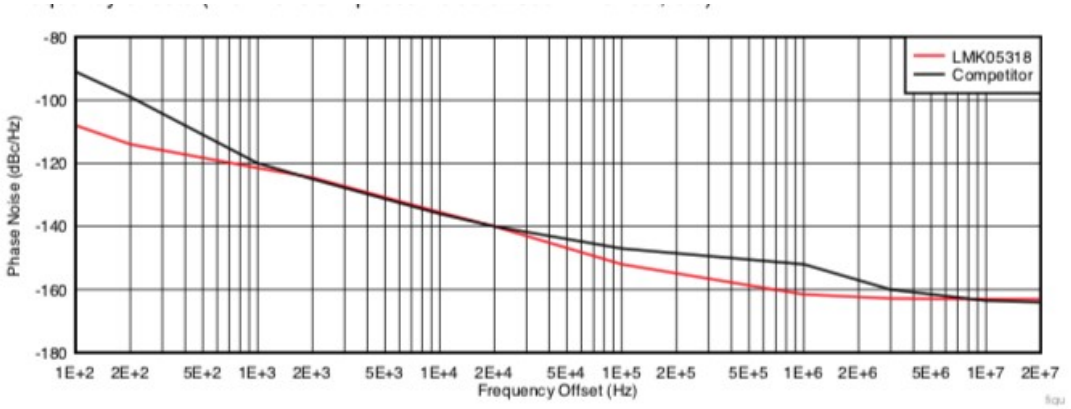


Figure 9. CLKout phase noise comparison of LMK05318 with conventional LC VCO based network synchronizers from competition.

Figure 9. Comparaison entre le bruit de phase de l'horloge en sortie du LMK05318 et celui d'un dispositif de synchronisation de réseau conventionnel concurrent basé sur un VCO LC.

5 Possibilité d'utiliser un oscillateur TCXO, OCXO ou XO basse fréquence pour réduire le coût total de la solution

Grâce à l'oscillateur VCBO à très faible bruit, comme on le constate sur la Figure 7, la gigue du générateur d'horloge LMK05318 est maintenue à un niveau très faible sur une boucle APLL1 présentant une largeur de bande de quelques kHz ; cela implique que le bruit de phase de l'oscillateur externe de type XO, TCXO ou OCXO a un impact moindre sur la gigue totale efficace. Il est possible d'utiliser un oscillateur basse fréquence (entre 10 et 20 MHz) de type TCXO, OCXO ou XO sur le LMK05318, sans incidence significative sur la gigue totale efficace, afin de réduire le coût global de la solution.

À titre de comparaison, la solution classique nécessite des oscillateurs externes TCXO, OCXO ou XO haute fréquence (50 MHz env.) à faible bruit de phase, généralement plus coûteux.

6 Des performances de bruit de phase et de gigue totale efficace plus fiables

Le fait que la gigue totale efficace de l'horloge en sortie du LMK05318 est moins sensible aux variations d'application, de tension et de température (PVT) s'explique de plusieurs manières. Premièrement, elle tient principalement au bruit de phase du VCBO, et n'est pas affectée par le bruit de phase dans la bande de fréquence de la boucle APLL ou encore par celui d'un oscillateur externe de type TCXO, OCXO ou XO. À titre de comparaison, sur les solutions classiques utilisant une APLL à large bande avec un VCO LC, la gigue totale efficace y est sensible. Il est à noter que le bruit de phase dans la bande de la boucle APLL à diviseur de fréquence fractionnaire est sensible aux non-linéarités des modulations, de sorte qu'il peut varier considérablement en fonction des variations PVT.

Deuxièmement, sur une solution classique, la large bande passante de la boucle APLL (plusieurs centaines de kHz au minimum) complique le filtrage des raies parasites générées par le diviseur fractionnaire et du bruit de quantification de la boucle. À l'inverse, sur le LMK05318, doté d'une boucle APLL à bande étroite (quelques kHz), les raies parasites et le bruit de quantification peuvent facilement être éliminés, ce qui réduit le bruit de phase et la gigue de l'horloge en sortie.

Table 2. Benefits of LMK05318 Network Synchronizer with a 2.5GHz VCBO when compared with conventional solution with an LC VCO

Factors	Network Synchronizer Based VCBO	Network Synchronizer Based LC VCO
APLL FPD frequency	Low FPD can be used (a few MHz or lower) and still achieve good rms jitter	High FPD (about 50 MHz or higher) is required to achieve good rns jitter
APLL loop bandwidth for optimum total rms jitter (12 kHz to 20 MHz)	Narrow (below a few kHz)	Wide (above a few hundred kHz)
Mid-band phase noise	Superior mid-band phase noise (10 kHz to ~1 MHz)	Worse mid-band phase noise due to noise contribution of wideband APLL
Max total rms jitter (12 kHz to 20 MHz)	100 fs or less	150 fs or higher
APLL in-band phase noise variation over PVT	Total rms jitter is less sensitive to APLL in-band phase noise over PVT	Total rms jitter is sensitive to APLL in-band phase noise over PVT
APLL fractional spurs and quantization noise over PVT	Lower APLL fractional spurs and quantization noise due to more filtering of narrowband APLL	Worse APLL fractional spurs and quantization noise due to less filtering of wideband APLL
Cost of reference crystal oscillator	Can use normal low-frequency TCXO/OCXO/XO to reduce overal solution cost	Need expensive low-noise high-frequency TCXO/OCXO/XO to achieve good rms jitter

Tableau 2. Avantages du dispositif de synchronisation de réseau LMK05318 associé à un VCBO 2,5 GHz par rapport à une solution conventionnelle dotée d'un VCO LC

7 Conclusions

À mesure que les transmissions de données s'accélèrent sur les réseaux de communication, il est de plus en plus difficile pour les dispositifs de synchronisation de réseau conventionnels basés sur des VCO LC de respecter la gigue requise pour le signal d'horloge. La nouvelle solution LMK05318, basée sur la technologie innovante des ondes acoustiques de volume (BAW), a été conçue pour améliorer considérablement les performances d'atténuation du bruit de phase et de la gigue efficace. Le résonateur BAW est fabriqué selon un processus de type CMOS, et intégré avec la puce en silicium dans un boîtier QFN standard. Sur le VCBO 2,5 GHz, le bruit de phase à proximité de la porteuse (entre 1 kHz et 100 kHz env.) est 10 à 20 dB plus bas que sur un VCO LC à la pointe de la technologie - preuve indiscutable de la supériorité des performances du VCBO en matière de bruit de phase et de gigue. La gigue totale efficace est de 33 fs pour une fréquence en sortie de 1 250 MHz, et de 47 fs pour une fréquence en sortie de 312,5 MHz. Au maximum, elle est inférieure à 100 fs, soit bien en deçà des spécifications strictes applicables aux réseaux de communication haute vitesse à 400 Gbit/s. Contrairement aux dispositifs conventionnels basés sur un VCO LC, il est possible d'utiliser un TCXO ou un OXCO classique, à fréquence plus faible et au prix plus abordable, avec le LMK05318 ; le coût total de la solution s'en trouve réduit. Les autres avantages du LMK05318 associé à un VCBO de 2,5 GHz sont résumés dans le Tableau 2.

8 Informations complémentaires

Pour en savoir plus, consultez la documentation de TI sur le dispositif de synchronisation de réseau à très faible gigue (référence SNAS771).