

SEMI-CONDUCTEURS

Analyser les signaux numériques rapides avec le diagramme de l'œil

Quand les signaux numériques haut débit dépassent plusieurs Gbit/s, les diagrammes de l'œil constituent un outil simple permettant d'évaluer rapidement et précisément la qualité du signal et les performances du système.

Le diagramme de l'œil est une méthode pour représenter et analyser un signal numérique haut débit. Il permet de visualiser et de déterminer rapidement les principaux facteurs de qualité électrique du signal. Le diagramme de l'œil est construit à partir d'une forme d'onde numérique en superposant les courbes correspondant à chaque bit sur un même graphe avec l'amplitude du signal en Y (axe vertical) et le temps en X (axe horizontal). En répétant l'opération sur un grand nombre d'échantillons de signal, le graphe obtenu fournit les statistiques moyennes du signal et présente l'aspect d'un œil. L'ouverture de l'œil correspond à une période



On Semiconductor

JEREMY CORREALE (ON SEMICONDUCTOR)

Jeremy Correale est ingénieur marketing pour les produits destinés à l'automobile chez On Semiconductor. Il est diplômé en ingénierie de l'Université d'Etat de l'Arizona, et affecté dans la région de Phoenix.

de 1 bit et constitue la largeur UI (*Unit Interval*, ou intervalle unitaire) du diagramme œil. Un signal numérique idéal, avec des fronts montants et descendants bien raides et une amplitude constante, aura l'aspect de la figure 1.

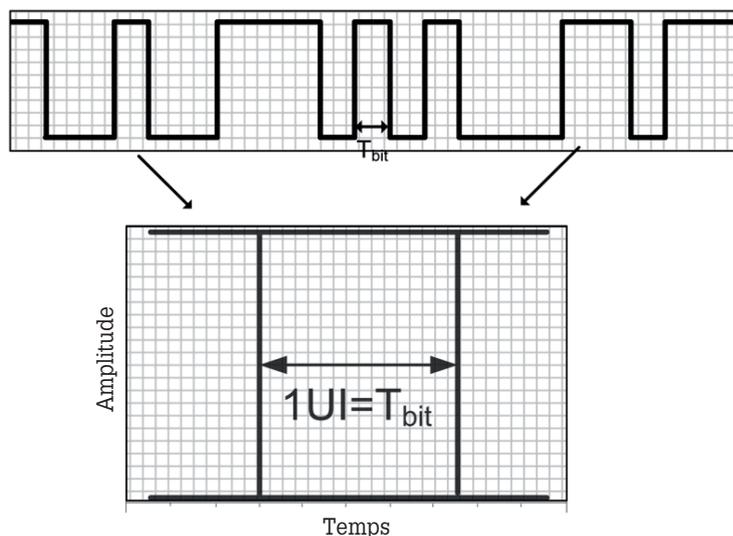
Évidemment, ce diagramme de l'œil idéal offre peu d'informations supplémentaires

au-delà de l'affichage de la forme d'onde dans le domaine temporel. Les signaux numériques haut débit du monde réel souffrent d'altérations sensibles, notamment d'atténuation, de bruit, d'interférences, etc. Le diagramme d'un signal numérique haut débit typique est illustré en figure 2. Remarquez comme le diagramme a la forme d'un œil.

Signalisation numérique rapide

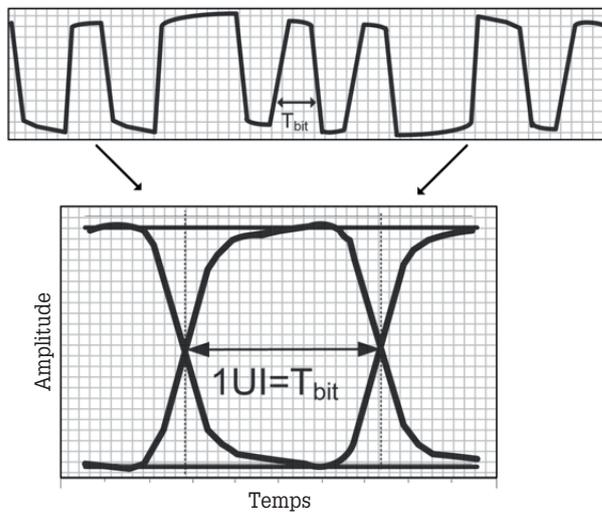
Un signal numérique est la transmission de données en bande de base, sur une connexion câblée. Ces données sont habituellement modulées ou codées selon le protocole de communication prévu pour l'interface utilisée. Le type de codage de bande de base (généralement appelé codage ligne) choisi pour une norme optimise les performances en fonction des caractéristiques électriques des données et du médium de transport. Les anciennes normes numériques haut débit telles que USB 1.1/2.0 utilisent une forme de non-retour à zéro (NRZ) pour le codage de données, avec une impulsion haute (positive) représentant un niveau logique 1, et une impulsion basse (négative) représentant un niveau logique 0. En contrôlant le format des données (bits supplémentaires, etc.) pour équilibrer les quantités de 1 et de 0, les formes d'onde NRZ peuvent être équilibrées au niveau DC, de façon à limiter le contenu DC du signal. Ceci permet au signal d'être couplé au niveau capacitif (ou AC) et aussi de fournir des tensions en mode com-

Figure 1.- Diagramme de l'œil idéal d'un signal numérique haut débit



Ce diagramme est celui d'un signal idéal avec des fronts montants et descendants verticaux et une amplitude constante.

Figure 2.- Diagramme de l'œil de signal numérique typique



Les signaux numériques « réels » souffrent d'altérations – atténuation, bruit, interférences – qui se reflètent dans le diagramme de l'œil.

mun, ou bien de combiner une alimentation DC au signal sur le même câble.

Le codage bande de base à signalisation RTZ n'est en général pas utilisé avec les interfaces numériques haut débit parce qu'il est trop gourmand au niveau largeur de bande, du fait de son déséquilibre DC intrinsèque, qui rajoute un contenu DC significatif.

En plus de contrôler le contenu DC et la bande passante, le formatage de données permet aussi la restauration d'horloge dans le cas de signaux haut débit. Pour une restauration d'horloge fiable au niveau du récepteur, le nombre maximum de 1 ou de 0 consécutifs doit être inférieur à une valeur raisonnable, puisque l'horloge du signal est restaurée à partir des transitions présentes dans la séquence reçue. Une méthode classique pour borner le nombre de 1 et de 0 d'une séquence signal est d'utiliser un codage 8b/10b. 8b/10b est un code ligne qui transforme les symboles 8 bits en symboles 10 bits pour assurer l'équilibrage DC de la forme d'onde, et pour fournir suffisamment de changements d'état pour permettre une bonne restauration d'horloge.

Une fois le codage réalisé, le signal est envoyé sur un canal physique. Le signal encodé peut être envoyé directement sur une ligne de transmission, ou décalé en tension et mis sous forme d'impulsions pour réduire sa bande passante, améliorer ses performances EMI/RFI (*Electro Magnetic Interference/Radio Frequency Interference*, ou parasites électromagné-

tiques / radiofréquences), ou répondre aux impératifs d'interfaçage système. La signalisation LVDS (*Low Voltage Differential Signaling*, ou signalisation différentielle basse tension) est une norme d'interface courante pour signaux numériques haut débit. En présentant une amplitude de signal relativement faible et un couplage étroit des champs électriques et magnétiques entre les deux lignes différentielles, la signalisation LVDS réduit sen-

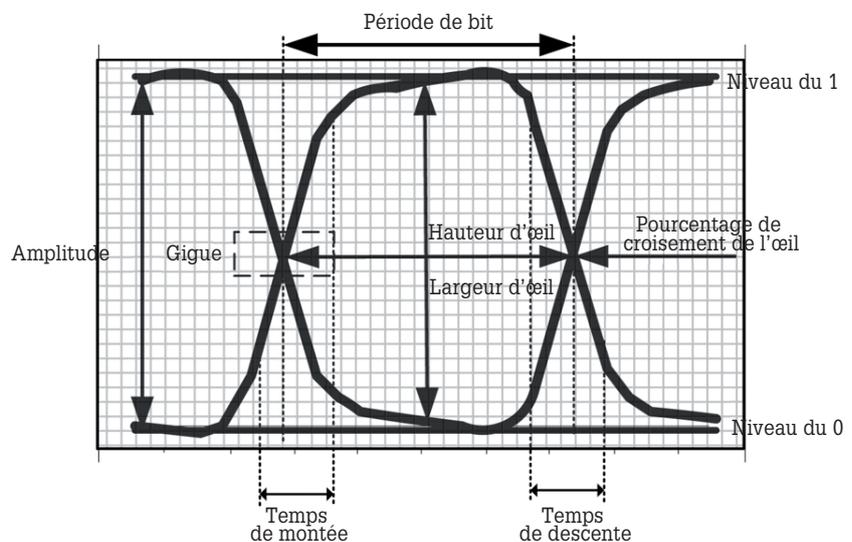
siblement le bruit électromagnétique rayonné et les pertes de puissance par conduction.

Bases du diagramme de l'œil

Comme indiqué précédemment, le diagramme de l'œil est une représentation de signal numérique haut débit qui permet de visualiser et de connaître rapidement les principaux paramètres de qualité électrique d'un signal. Les spécifications de signaux de données haut débit évoquées dans la section précédente font partie des principaux paramètres qui peuvent être mesurés grâce aux diagrammes de l'œil. Les diagrammes de l'œil servent à caractériser les sources de signal ou les émetteurs haut débit (le test de récepteur nécessite en général de tester le taux d'erreurs de bits). Un générateur d'impulsions est nécessaire pour produire une séquence binaire aléatoire, puisque le diagramme est une moyenne statistique de plusieurs milliers voire plusieurs millions d'échantillons d'un signal. La séquence nécessaire pour une certaine norme de données est définie par le protocole, et c'est généralement une séquence pseudo-aléatoire de plusieurs centaines voire plusieurs milliers de bits. Un oscilloscope à échantillonnage rapide d'une bande passante typique de 10 à 25 GHz est utilisé pour capturer toutes les caractéristiques du signal. Grâce au mode persistance de l'oscilloscope, des millions de formes d'onde dans le domaine temporel peuvent être affichées en superposition.

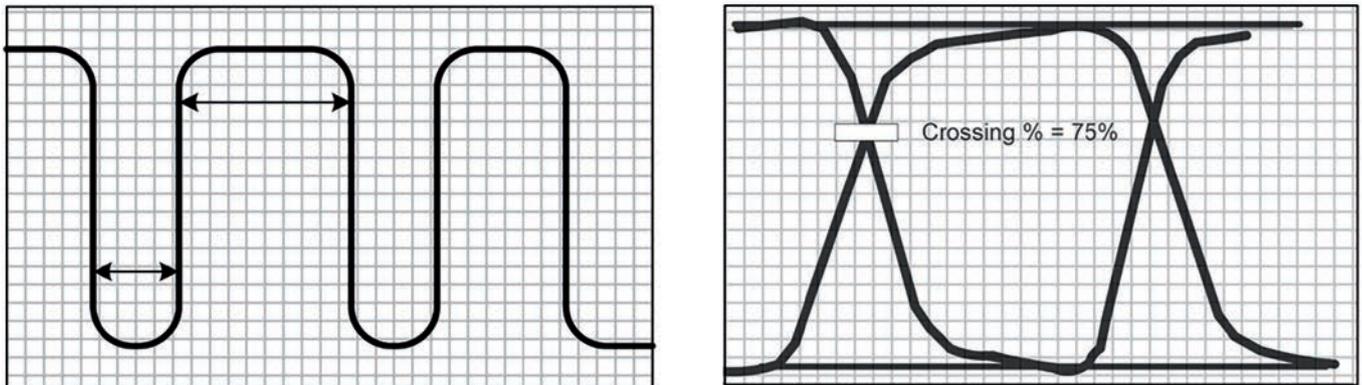
Un diagramme de l'œil représentatif est

Figure 3.- Mesures typiques du diagramme de l'œil



Ces mesures sont des moyennes statistiques d'échantillons du signal.

Figure 4.- Forme d'onde et diagramme de l'œil pour un pourcentage de croisement de 75 %



Le pourcentage de croisement de l'œil mesure les distorsions d'amplitude des niveaux de 0 et de 1.

montré en figure 3, avec certaines des mesures typiques qui peuvent être réalisées sur le diagramme.

Tous les résultats de mesures sont des moyennes statistiques d'échantillons du signal au point considéré. Les mesures sont définies comme suit :

Niveau 1 : le niveau 1 du diagramme est la valeur moyenne d'un 1 logique. La valeur calculée du niveau 1 est la valeur moyenne de l'histogramme de tous les échantillons de données capturés à l'intérieur des 20 % médians (entre 40 % et 60 %) de la période de l'œil.

Niveau 0 : le niveau 0 du diagramme est la valeur moyenne d'un 0 logique. Le

niveau 0 est calculé à partir d'échantillons de la même région (40 % à 60 %) de la zone support basse au cours de la période de l'œil.

Amplitude d'œil : l'amplitude d'œil est la différence entre les niveaux 1 et 0. Les circuits logiques du récepteur de données déterminent si le bit de donnée reçu est un « 0 » ou un « 1 » en se basant sur l'amplitude d'œil.

Hauteur d'œil : la hauteur d'œil est une mesure de l'ouverture verticale du diagramme. La valeur idéale d'ouverture d'œil est égale à l'amplitude d'œil. Lors d'une mesure réelle de diagramme de l'œil, le bruit présent provoque la fermeture par-

tielle de l'œil. Par conséquent, la hauteur de l'œil indique la fermeture partielle de l'œil sous l'effet du bruit. Le rapport signal-bruit du signal de données haut débit est aussi indiqué par l'importance de la fermeture de l'œil.

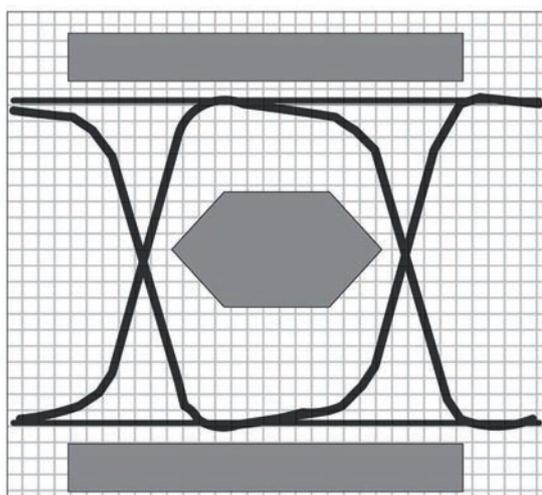
Pourcentage de croisement de l'œil : le niveau de croisement est la valeur moyenne d'une fenêtre d'histogramme étroite centrée sur le point de croisement du diagramme. Le pourcentage de croisement de l'œil est régi par l'équation suivante :

$$\% \text{ de croisement de l'œil} = 100 \times \frac{(\text{niveau de croisement} - \text{niveau 0})}{(\text{niveau 1} - \text{niveau 0})}$$

Le pourcentage de croisement de l'œil indique le niveau de distorsion du rapport cyclique, ou des problèmes de symétrie des impulsions du signal de données haut débit. La figure 4 montre un exemple de signal avec une dissymétrie d'impulsion (à gauche) et le diagramme correspondant avec un pourcentage de croisement de 75 % (à droite). Le pourcentage de croisement de l'œil est un paramètre précieux pour mesurer les distorsions d'amplitude provoquées par la différence de durée des niveaux 1 et 0. Cela indique aussi des problèmes de symétrie d'impulsions utiles au diagnostic. Lorsque le pourcentage de croisement dévie de l'idéal de 50 %, l'œil se ferme et la qualité électrique du signal est dégradée.

Temps-bit : le temps-bit correspond à l'ouverture horizontale du diagramme de l'œil d'un croisement à l'autre, et se mesure en général en picosecondes pour un signal numérique haut débit (200 ps pour 5 Gbit/s). Le débit est l'inverse du temps-bit (1/période bit). Le temps-bit est

Figure 5.- Diagramme de l'œil avec masque de conformité



Le masque de conformité comprend des bornes de temps et d'amplitude et permet de vérifier rapidement la qualité du signal.

en général appelé UI (*Unit Interval*, ou intervalle unitaire) en parlant du diagramme de l'œil. L'intérêt d'utiliser l'UI plutôt que des secondes sur l'axe horizontal est qu'il s'agit d'une unité normalisée, qui permet de comparer plusieurs diagrammes correspondant à différents débits.

Largeur de l'œil : la largeur d'œil mesure l'ouverture horizontale du diagramme de l'œil. Elle correspond au temps séparant les deux moyennes statistiques des points de croisement de l'œil.

Temps de montée : le temps de montée est le temps moyen nécessaire au signal de données pour gravir la pente montante du diagramme. La mesure se fait typiquement entre les niveaux 20 % et 80 %, ou 10 % et 90 % de la pente.

Temps de descente : le temps de descente est le temps moyen nécessaire au signal de données pour descendre la pente descendante du diagramme. La mesure se fait typiquement entre les niveaux 20 % et 80 %, ou 10 % et 90 % de la pente.

Gigue : la gigue est l'écart de temps par rapport à la synchronisation idéale d'un bit de données et c'est l'une des caractéristiques les plus importantes d'un signal de données haut débit. Pour calculer la gigue,

on mesure les écarts de temps des transitions montantes et descendantes du diagramme au niveau des points de croisement. Les fluctuations peuvent être aléatoires et/ou déterministes. L'histogramme temporel des écarts est analysé pour déterminer le niveau de gigue. La gigue « crête à crête » est la plus grande largeur de l'histogramme, comprenant tous les points de mesure. La gigue « efficace » ou RMS (*Root Mean Square*) est l'écart-type de l'histogramme. L'unité de mesure de gigue d'un signal numérique haut débit est normalement la picoseconde.

Mesures différentielles et diagnostics

Les signaux différentiels offrent une immunité au bruit supérieure et une meilleure intégrité du signal, qui sont précieuses pour la transmission et la distribution des signaux haut débit. Les techniques de mesure des diagrammes œil impliquent des opérations mathématiques permettant de visualiser les signaux séparément ou par paire. Sur un oscilloscope rapide moderne, les mesures de courbes d'œil et d'impulsions peuvent être effectuées séparément (Canal 1 et Canal 2) ou en appliquant des opérateurs arithmétiques

(Canal 1 – Canal 2, Canal 1 + Canal 2). En examinant et en superposant les mesures effectuées séparément ou de manière combinée, on peut évaluer les effets différentiels et mode commun, comme le skew (biais) lié au déséquilibre en mode commun ou au bruit.

La qualité d'un signal numérique haut débit peut rapidement être évaluée en superposant un masque de conformité sur l'œil. Un masque typique comprend des bornes de temps et d'amplitude. Un diagramme de l'œil avec masques de conformité est montré en figure 5. Les régions du masque sont définies comme suit :

- Région supérieure : valeur maximum prévue. Les tensions au-delà de cette valeur sont en défaut.
- Région centrale : dimension et forme du diagramme œil comme défini par la norme d'interface pour le signal numérique haut débit.
- Région inférieure : valeur minimum prévue. Les tensions en deçà de cette valeur sont en défaut.

Les zones grisées représentent les zones « interdites ». Pour passer le test de conformité au masque, la sortie de l'émetteur ne doit présenter aucun point dans les zones « interdites ».

toMachine & Objets connectés

11^{ème} édition

Design, Conception, Réalisation, MtoM et Objets Communicants

Designing a connected world

Nouveau lieu

23 et 24 mars 2016

PARIS EXPO
PORTE DE VERSAILLES

EXPOSITION - CONFÉRENCES - ATELIERS

En parallèle

Platinum Sponsors



www.Embedded-MtoM.com



@salonMtoM