

INSTRUMENTATION ÉLECTRONIQUE

Quelle sonde différentielle pour l'analyseur logique ?

Les signaux numériques présents sur les cartes ont des débits de plus en plus élevés, ce qui pose le problème de la qualité de la transmission du signal et, à partir de là, de l'intégrité du signal transmis. Pour diminuer les risques, les concepteurs font appel à des techniques de transmission différentielle. Les constructeurs d'analyseurs logiques proposent des sondes différentielles pour faciliter la validation de ces systèmes. Les principes fondamentaux du transport de signaux utilisés pour la conception de systèmes différentiels haute vitesse ont été adoptés pour la conception des sondes différentielles. Compris et appliqués dès les premiers stades de la conception, ces principes permettent de tirer le meilleur parti des fonctions de test intégrées des analyseurs logiques, de produire des systèmes numériques robustes et de raccourcir les délais de mise sur le marché.

Au cours des dix dernières années, la vitesse des signaux numériques a enregistré une progression exponentielle. Pour la communauté des ingénieurs de conception, ce surcroît de performance pose avec plus d'acuité le problème de l'intégrité du signal. Afin de pouvoir répondre aux exigences futures en débits de données, les ingénieurs font désormais appel à des méthodologies évoluées d'acheminement du signal. L'une d'elles, la transmission différentielle, se répand largement dans l'industrie. Face à ces évolutions, le secteur du test et mesure met à la disposition des ingénieurs un ensemble d'équipements de validation basés sur les mesures différentielles : les équipements de test courants (analyseurs logiques, oscilloscopes et analyseurs de réseau) intègrent tous une fonction de mesu-

re différentielle. Dans une transmission différentielle, le signal est envoyé de l'émetteur au récepteur sur deux lignes, l'une correspondant à la valeur "vraie" (A) du signal et l'autre à la valeur "complémentaire" (B). Le récepteur compare les deux signaux puis détermine le niveau logique voulu (c'est-à-dire A-B). Les trois principaux avantages qui lui sont inhérents

sont le doublement de l'amplitude ("swing") du signal, la réjection du mode commun et une réserve de courant de retour.

En finir avec certaines idées reçues

Il est essentiel de rompre avec certaines idées reçues relatives à la conception de systèmes différentiels.

Première fausse bonne idée : égaliser les longueurs des parcours. En routage de circuits imprimés, par exemple, certains concepteurs croient à tort qu'il est nécessaire de faire correspondre la longueur physique des deux branches (A et B) de la paire différentielle, en prévoyant une boucle sur la branche la plus courte de façon à ce que sa longueur soit identique à la longueur de la branche la plus longue. Ceci a pour effet de diminuer la réjection du mode commun. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer un bruit injecté sur les deux branches, juste en amont de la branche comportant la boucle (prévue pour égaliser les longueurs). Au point où il est injecté, le bruit est de mode commun (puisque il est simultanément sur les deux branches) et il se propage parallèlement sur les deux branches. Mais au niveau de la boucle présente sur l'une des branches, le parcours est plus long et, à la sortie de cette boucle, le bruit présent sur cette branche présente donc un retard par rapport au bruit qui se propage sur l'autre branche. Le bruit se présente alors sous la forme de deux discontinuités différentielles séparées et il n'est donc plus en mode commun (il n'est pas annulé au niveau du récepteur, qui travaille sur le signal A-B).

La meilleure solution à ce problème consiste à insé-

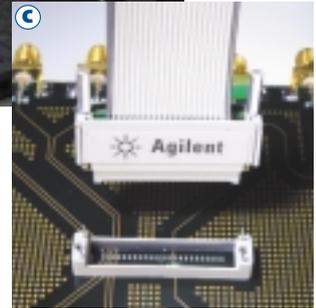
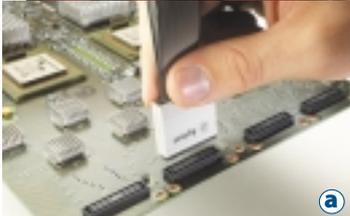
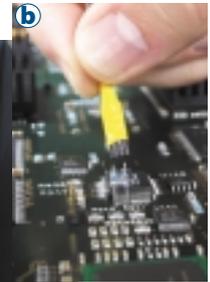
rer un nombre égal de virages à droite et à gauche sur le trajet. On maintient ainsi l'alignement du point de croisement de la paire différentielle et le couplage différentiel à l'intérieur de la paire. Dans une paire différentielle à couplage élevé, les deux branches de la paire "voient" le même bruit et le transportent donc en mode commun.

Lorsque l'on cherche à aligner les points de croisement d'une paire différentielle, il faut également prendre en compte le couplage interne à la paire différentielle. Si celle-ci présente un couplage élevé, cela signifie qu'une part importante de la charge de commutation est délivrée par l'autre branche de la paire. Autrement dit, lorsque la branche "vraie" de la paire commute au niveau haut, elle doit se charger. Dans le même temps, la branche "complément" commute au niveau bas et doit se décharger. La branche "vraie" reçoit donc de la branche "complément" une forte proportion de la charge dont elle a besoin. Ce couplage symbiotique signifie que, pour commuter, l'une des branches de la paire a besoin de la commutation de l'autre branche. Par conséquent, quand une paire différentielle est routée dans un angle, la longueur physique supplémentaire présente sur la trace extérieure ne correspond pas directement au retard temporel inséré. D'un point de vue conceptuel, la trace extérieure ralentit le front d'onde de la trace intérieure. À l'inverse, la trace intérieure accélère ou tire le front d'onde de la trace extérieure. La force de couplage de la paire différentielle détermine l'ampleur de ce phénomène.

Deuxième fausse bonne idée : annuler les discontinuités différentielles. Selon une autre (mauvaise) idée reçue, toute discontinuité dif-

L'essentiel

- ▶ Les signaux numériques présents sur les cartes sont le plus souvent transmis sous forme différentielle
- ▶ Des écueils doivent être évités lors de la conception
- ▶ Malgré la transmission différentielle, le bruit peut rester présent, voire être amplifié
- ▶ Il est essentiel de connaître ce qui se passe lorsque l'on effectue des mesures à l'aide d'un analyseur logique équipé d'une sonde différentielle



Les sondes différentielles d'analyseurs logiques se présentent sous différentes formes : sonde classique (a), sonde à fils volants (b) et sonde "sans connecteur" (c). Leur utilisation suppose une connaissance très précise de ce que l'on veut mesurer.

férentielle doit être annulée. Lorsque le concepteur rencontre une discontinuité sur une branche d'une paire différentielle, il la compense souvent par l'insertion d'une discontinuité sur l'autre branche. Il fait en effet le raisonnement que si cette discontinuité existe sur les deux branches, le récepteur l'éliminera au moment d'effectuer la décision logique A-B. Mais en réalité, ce n'est pas comme ça que les choses se passent et la discontinuité est en fait doublée en raison des ondes incidentes A et B qui présentent des dv/dt de polarités opposées : au niveau du signal résultant A-B, on a donc une amplification des parasites.

Considérons une discontinuité capacitive sur une paire différentielle dans un système terminé par une charge. Les deux branches de la paire présentent une discontinuité, entraînant une réflexion. Celle-ci se réfléchit ensuite sur le driver à faible impédance et apparaît sur le récepteur un certain temps après le front initial.

La branche "vraie" de la paire est réfléchi négativement par la capacité et elle est ensuite réfléchi par le driver à faible impédance, avec une amplitude presque égale à -100%. Le résultat net est une discontinuité positive parvenant au récepteur un certain temps après le front initial.

Quant à la branche "complément", l'onde émise dans la ligne de transmission depuis le driver présente dans le même temps une amplitude négative $-dv/dt$. Cela signifie que toutes les réflexions générées par la capacité sont de polarité opposée à celle de la branche "vraie". Le résultat net est une discontinuité négative parvenant au récepteur un certain temps après le front initial.

Lorsque le récepteur effectue son opération A-B, les deux discontinuités des deux branches de la paire se superposent pour donner une discontinuité encore plus forte sur la sortie du récepteur.

Pour éviter ce problème, la meilleure méthode consiste à éviter les discontinuités. Si cela n'est pas possible, il convient d'évaluer chaque discontinuité pour garantir que la discontinuité finale au niveau du récepteur ne met pas le système en péril.

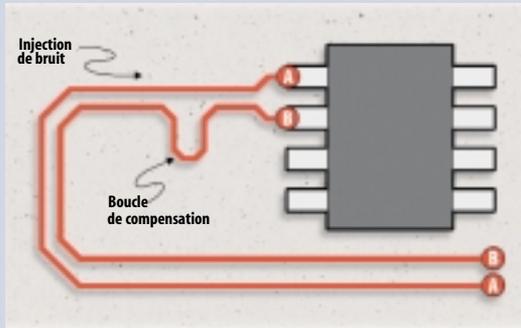
Troisième idée reçue : le rejet intégral du bruit de mode commun. La gamme d'entrée de mode commun du récepteur n'est pas toujours considérée à sa juste valeur. On pense parfois que le bruit de mode commun est intégralement rejeté. C'est vrai tant que la tension nette n'est pas supérieure à la gamme d'entrée de mode commun du récepteur. Toute tension supérieure à cette gam-

me est écrétée. Un problème se pose donc si une branche de la paire différentielle présente un bruit de mode commun écrété et l'autre, un bruit non écrété. Le bruit qui en résulte n'est pas considéré comme étant de mode commun par le récepteur différentiel, et celui-ci ne le rejette donc pas. Prenons l'exemple suivant. Un récepteur PECL différentiel a une gamme d'entrée de mode commun (CMIR, common-mode input range) comprise entre 0,3V et 3,0V. Les signaux d'entrée sont centrés sur 2,0Vcc et ont une amplitude de 800 mVcc (l'amplitude varie donc entre 1,6V et 2,4V). Chaque branche présente un pic de bruit de mode commun de 750 mV, et la tension nette de la branche "complément" de la paire ($2,4V + 750\text{ mV} = 3,15V$) se trouve donc hors de la gamme CMIR du récepteur (limitée à 3Vcc) : le signal est écrété. Il s'ensuit une différence entre les pics de bruit de chaque ligne. Lorsque le récepteur effectue A-B, le bruit n'est donc pas annulé il en résulte une discontinuité différentielle.

Tous ces aspects et erreurs de conception doivent être bien compris avant toute conception et mise sur le marché d'un système de transmission différentielle.

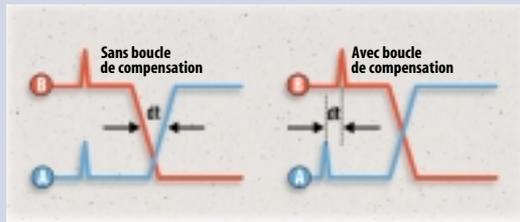
L'inconvénient d'égaliser les longueurs des parcours

Insertion d'une boucle de compensation



Insertion d'une boucle sur la branche B de façon à ce que sa longueur soit égale à celle de la branche A.

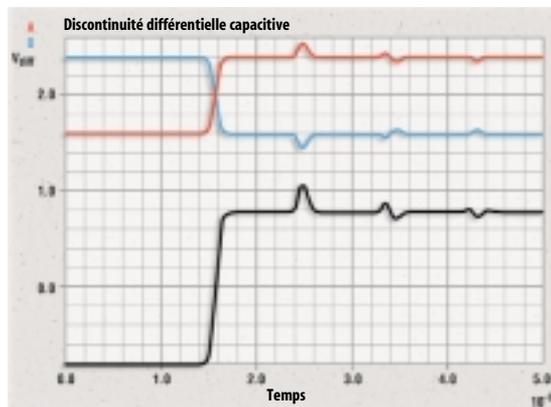
Impact de l'injection d'un bruit



Ces schémas montrent ce que donne l'injection d'un bruit de mode commun (représenté sous forme d'un pic) sur les deux branches A et B, juste en amont de la boucle de compensation (voir schéma en haut). La boucle de compensation présente sur la branche B introduit un retard de propagation et le pic de bruit de la branche B arrive au niveau du récepteur avec un retard par rapport au pic de bruit de la branche A (schéma de droite). On n'a donc pas de réjection de bruit de mode commun et au contraire une discontinuité différentielle.

Pour s'assurer l'intégrité de la transmission de signaux numériques à débits élevés, de plus en plus de concepteurs utilisent une conception différentielle : le signal "vrai" est transmis sur le fil A et son "complément" sur le fil B. Le signal pris en compte par le récepteur est le signal A-B. Le fait d'égaliser les longueurs des deux branches peut avoir des effets pervers, comme on le voit ici.

Effet d'une discontinuité différentielle



Une idée répandue (à tort) est que les systèmes à transmission différentielle, en prenant uniquement en compte le signal A-B, annihilent automatiquement les distortions présentes sur chacun des signaux. En fait, c'est faux, comme on le voit ici pour un couplage capacitif. Les parasites (les pics, que l'on distingue bien sur les traces A et B du schéma du haut) varient en effet avec des polarités inverses l'un par rapport à l'autre, et lorsque le récepteur fait la différence A-B, les parasites, au lieu de s'annuler, s'additionnent (schéma du bas).

Utilisation des sondes différentielles pour analyseur logique

L'acheminement des signaux numériques s'orientant de plus en plus vers la transmission différentielle, les constructeurs d'analyseurs logiques proposent des sondes différentielles pour faciliter le développement des applications utilisant ce type de transmission. De même qu'il est essentiel de bien comprendre les principes de base de la transmission différentielle pour réussir la conception de son système, il est important de connaître les sondes différentielles pour analyseur logique afin d'obtenir des mesures de qualité.

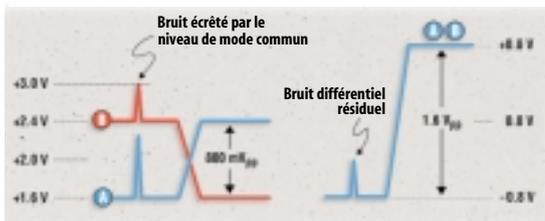
L'analyseur logique vu comme un récepteur différentiel. Il convient en tout premier lieu de prendre en compte le fait que la sonde agit comme un récepteur différentiel, c'est-à-dire qu'elle effectue la même opération A-B que le récepteur cible. Elle est soumise aux mêmes contraintes de conception que celles évoquées pour les systèmes à transmission différentielle. Idéalement, la sonde doit observer le même signal que le récepteur différentiel. Cela signifie spécifiquement que le bruit de mode commun ou la différence de phase sur la paire doit être identique à la pointe de la sonde et au récepteur. On garantit ainsi que la mesure lue reflète avec précision ce qui se passe effectivement dans le système différentiel.

Localisation de la sonde. Le positionnement de la sonde est la deuxième considération importante. En effet, le bruit observé par le récepteur comme étant de mode commun peut apparaître à l'analyseur logique comme étant un bruit différentiel.

Imaginons qu'un bruit est injecté sur les deux lignes de la paire différentielle, à proximité du récepteur. Ce dernier observe le bruit qui progresse sur A et B et le rejette au moment de la décision logique (A-B).

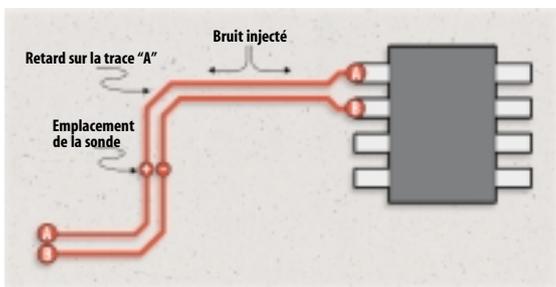
Maintenant, considérez le bruit transitant en sens inverse, tel qu'il apparaît à la pointe de la sonde (placée en amont du point d'injection du bruit). Lorsqu'il effectue un "virage", le bruit de la branche la plus longue (par exemple la branche "vraie", A) est retardé par rapport au bruit se propageant sur la branche la plus courte (la branche "complément", B). Le bruit se présente donc sous la forme de deux discontinuités différentielles séparées, qui ne sont pas rejetées par l'analyseur. Dans ce cas, l'analyseur logique observe un signal non représentatif de celui qui est perçu par le récepteur cible. Lorsque le bruit de mode commun n'est pas observé comme étant un bruit différentiel, la solution consiste à sonder le système directement au niveau du récepteur ou, dans le cas d'une paire différentielle à couplage lâche, en

Bruit différentiel résiduel dû à une tension de mode commun insuffisante



On voit ici l'impact du bruit sur la tension d'entrée de mode commun (CMIR). Les entrées du récepteur présenté ici acceptent des signaux compris entre 1,6V et 3V. Les signaux d'entrée sont centrés sur 2,0Vcc et ont une amplitude de 800 mVcc (l'amplitude varie donc entre 1,6V et 2,4V). Chaque branche présente un pic de bruit de mode commun de 750 mV et la tension nette de la branche "complément" (B) de la paire ($2,4V + 750 mV = 3,15V$) se trouve donc hors de la gamme CMIR du récepteur (limitée à 3Vcc) : le signal est écrêté. Il n'y a pas de problème par contre pour le bruit de la branche A, qui est intégralement transmis. Il s'ensuit une différence entre les pics de bruit de chaque ligne. Lorsque le récepteur effectue A-B, le bruit n'est pas complètement annihilé et il en résulte une discontinuité différentielle (schéma de droite).

Mauvaise localisation de la prise de mesure



On voit ici l'impact de l'emplacement de la sonde de l'analyseur logique. La sonde, du fait des différences de longueurs des branches A et B (et des variations de délais de propagation qui en résultent), ne voit pas la même chose que le récepteur. En particulier, elle voit un bruit différentiel alors que le récepteur ne le voit pas (du fait qu'il fait la différence A-B et qu'entre le niveau d'injection du bruit et le récepteur, les deux branches ont la même longueur et qu'il n'y a donc pas de différence de temps de propagation).

un point où le bruit traverse un nombre égal de virages à droite et à gauche.

Architecture de mode commun-différentielle. Une troisième considération à prendre en compte est l'architecture de mode commun-différentielle de la sonde. L'analyseur logique est composé de deux amplificateurs unipolaires référencés à la masse. L'un d'eux reçoit le signal de la branche "vraie" (A), l'autre le signal de la branche "complément" (B). Les signaux de sortie de ces amplificateurs attaquent ensuite un amplificateur différentiel qui effectue la différence (A-B). Cette architecture est utilisée en raison des limitations d'implantation d'un récepteur entièrement différentiel.

C'est un point important à comprendre car il faut prendre en compte la gamme d'entrée de mode commun de la sonde. Dans une architecture entièrement différentielle, la sonde n'est pas en mesure de faire la distinction entre l'amplitude d'un signal 1 volt centré sur 0 volt et

celle d'un signal 1 volt centré sur 100 volts. Dans les deux cas, les résultats nets sont égaux à $\Delta V = A-B = 2$ volts. Cependant, l'amplitude du signal doit être comprise dans la gamme d'entrée de mode commun des deux récepteurs unipolaires pour être observée par l'amplificateur différentiel du 2^{ème} étage. Cet aspect est important car il arrive que le CMIR a été pris en compte dans la conception des récepteurs du système, mais pas au niveau de la sonde de l'analyseur logique.

Suppression de la composante de mode commun. Pour les sondes d'analyseur logique, une autre considération concerne le fait que la composante de mode commun de la paire différentielle dans le signal n'est pas présente dans le signal que voit l'analyseur. Cela signifie que lorsque l'on utilise des outils d'intégrité du signal comme Eye Scan d'Agilent Technologies, le signal analogique affiché est centré sur 0V. En effet, la composante de mode

Montage pour effectuer une mesure différentielle

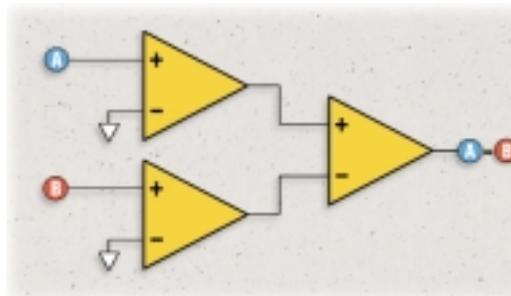
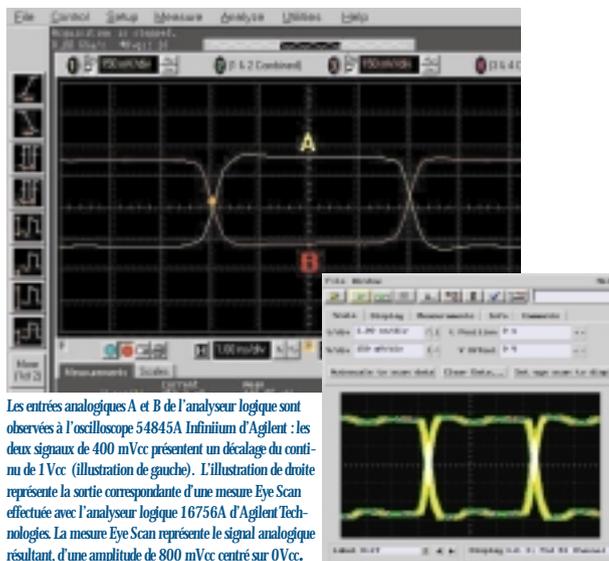


Schéma classique d'une mesure différentielle. Celui-ci est préféré à l'utilisation d'un amplificateur différentiel direct, parce que beaucoup plus simple à réaliser en pratique.



Les entrées analogiques A et B de l'analyseur logique sont observées à l'oscilloscope 54845A Infiniium d'Agilent : les deux signaux de 400 mVcc présentent un décalage du continu de 1Vcc (illustration de gauche). L'illustration de droite représente la sortie correspondante d'une mesure Eye Scan effectuée avec l'analyseur logique 16756A d'Agilent Technologies. La mesure Eye Scan représente le signal analogique résultant, d'une amplitude de 800 mVcc centré sur 0Vcc.

commun (ou décalage du continu) a été supprimée lors de l'opération différentielle A-B.

Les différents types de sondes. Les sondes d'analyseur logique sont disponibles en trois facteurs de forme différents : à fils volants, à connecteur, et à effleurement (technique "softtouch", sans connecteur). Les sondes à connecteur et sans connecteur sont destinées aux ingénieurs qui intègrent l'aspect testabilité lors de la conception de la carte. Les sondes à fils volants sont traditionnellement réservées aux ingénieurs qui observent des signaux ne comportant pas de points de test pré-intégrés et peuvent néanmoins capturer des signaux jusqu'à 1,5 Gb/s. Les sondes d'analyseur logique existent aussi en versions différentielles.

Brock LaMeris
Ingénieur de conception
Agilent Technologies