

Les défis inhérents à l'usage des capteurs capacitifs : vue d'ensemble

Par Martin Jaiser ingénieur d'applications spécialiste des applications automobiles chez ams AG

La mesure capacitive est une technologie attractive: comparé à d'autres technologies, un capteur capacitif est facile à comprendre, relativement simple et bon marché à fabriquer. En configurant seulement deux paramètres physiques – les dimensions des plaques et les caractéristiques du diélectrique - le concepteur peut obtenir un signal mesurable.

Les grandeurs mesurables à l'aide de la technologie capacitive sont la pression, l'humidité, la proximité et l'accélération. Dans les véhicules, les capteurs de niveau d'essence, de pluie et d'occupation des sièges utilisent également le principe capacitif. Et, bien sûr, il est aujourd'hui impossible d'imaginer un appareil grand public sophistiqué sans écran tactile capacitif.

Malheureusement, malgré toute la popularité de ces capteurs, leur utilisation pose de nombreux problèmes que le concepteur doit résoudre.

- Les capteurs capacitifs sont perturbés par les variations de température et les interférences électromagnétiques
- Leur fonctionnement peut être dégradé ou faussé par les perturbations environnementales comme l'humidité ou les contaminations telles que la poussière ou la saleté
- Lorsque l'application requiert une mesure relativement précise des changements de capacité, leur mise en œuvre n'est pas aisée.

Cet article passe en revue les différentes façons de réaliser un capteur capacitif, en indiquant leurs avantages et inconvénients. Puis, il présente deux nouveaux principes proposés par Ams et compare leurs fonctionnements avec ceux des méthodes traditionnelles.

1. Modes traditionnels pour mesurer la capacité

1.1 Principes basés sur le temps:

La méthode de loin la plus utilisée actuellement est de mesurer le rapport temps/fréquence. Généralement, la capacité à mesurer est utilisée dans un circuit oscillateur dont la variation de fréquence est convertie en mesure de capacité. Autre alternative, mesurer le temps de charge ou de décharge de la capacité au travers d'une impédance de valeur connue.

Une méthode simple pour mesurer les capacités de l'ordre du pF est de mesurer la constante de temps en se servant d'une impédance connue. Les constantes de temps se situent dans une plage de quelques μ s, si l'on considère que l'utilisateur évite d'utiliser une résistance à haute impédance bruitée. Mesurer précisément de si faibles constantes de temps exige l'utilisation d'horloges au GHz. Et si on utilise plutôt un circuit PLL, celui-ci devra avoir une très faible gigue, ce qui est extrêmement onéreux.

L'alternative à la méthode avec impédance est l'utilisation d'un oscillateur (voir Figure 1): cette méthode peut être mise en œuvre simplement avec des composants bon marché; mais elle souffre de sources d'erreurs multiples, car elle est sensible non seulement aux variations de température, mais aussi de tension d'alimentation.

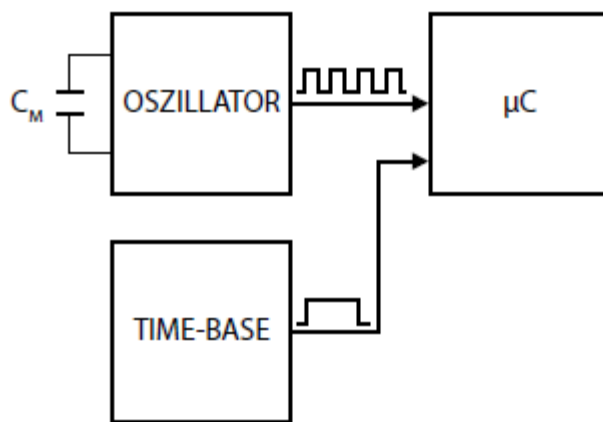


Fig. 1: le principe de mesure de capacité basé sur le temps

1.2 Méthode de l'équilibrage de charge:

Le principe de la méthode d'équilibrage de charge est de transférer la charge d'un gros condensateur chargé à plein vers le condensateur de valeur inconnue. Ensuite, le calcul de la charge résiduelle du condensateur connu révèle la magnitude du condensateur inconnu (voir Figure 2).

Pour faire simple, cela consiste à charger le condensateur connu, puis de transférer simplement la charge en le connectant au condensateur inconnu par un commutateur. Cela semble très simple, mais « le diable réside dans les détails ».

Tout d'abord, le commutateur doit présenter une capacité d'entrée de valeur bien plus faible que celle de la capacité à mesurer. Lorsque l'on doit mesurer des capacités de l'ordre du pF, l'implémentation de ce type de commutateur n'est pas une mince affaire. De plus, cette capacité d'entrée se doit d'être très stable quelle que soit la température.

Deuxièmement, l'impédance de l'amplificateur utilisé pour mesurer l'état de charge doit être très élevée: même un amplificateur avec une impédance supérieure à $1\text{ G}\Omega$ serait une source supplémentaire d'erreurs. De telles valeurs d'impédance seraient possibles en laboratoire, mais sur le terrain, soumis à la poussière et à l'humidité pendant potentiellement plusieurs années de fonctionnement, l'existence d'un amplificateur avec de telles caractéristiques est peu probable.

Une exception doit être mentionnée: à l'échelle nanométrique, les accéléromètres MEMS utilisent le principe d'équilibrage de capacité pour atteindre une très grande précision des mesures.

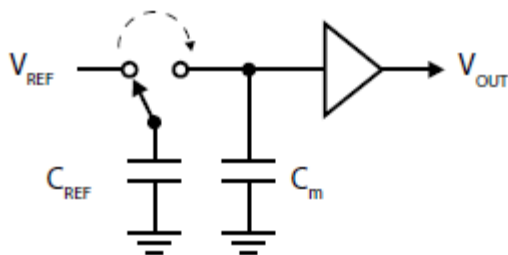


Fig. 2: circuit simplifié pour implémenter la méthode d'équilibrage de charge

1.3 Circuits en pont :

Cette méthode utilise un circuit très proche du fameux pont de Wheatstone. Comme dans le pont de Wheatstone, elle utilise la comparaison de deux diviseurs de tension: une branche connue, et une branche incluant la capacitance à mesurer (voir Figure 3). La différence des deux tensions centrales est amplifiée et digitalisée. Le pont étant alimenté par une tension alternative de fréquence appropriée.

Cette méthode est rarement mise en œuvre sur circuit imprimé, car elle nécessite l'utilisation de trois condensateurs identiques offrant une très faible dispersion de valeur, ce qui rend le procédé très onéreux à mettre en pratique.

Néanmoins, son implémentation dans un circuit intégré est beaucoup plus aisée. Des capacités de l'ordre du pF y sont courantes et n'ont pas besoin d'une grande précision: si la proportion doit être connue précisément, la valeur absolue quant-à-elle, n'a besoin d'être connue qu'une seule fois, et il n'est pas nécessaire de la régler à une valeur spécifique.

De plus, les capacités « on-chip » possèdent des caractéristiques de températures similaires, ainsi les mesures de capacité resteront stables quelle que soit la température.

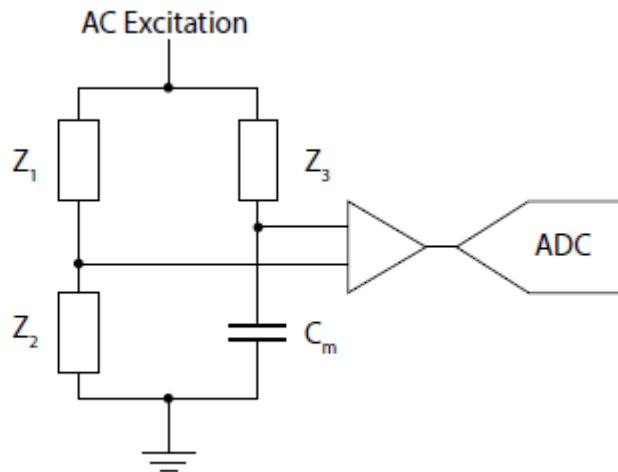


Fig 3: utilisation d'un pont de type Wheastone pour mesurer une capacité

2.0 Nouvelles méthodes de mesure

2.1 Le convertisseur CDC ou Capacitance-to-Digital Converter :

Techniquement parlant, le terme « Capacitance-to-Digital Converter » (CDC) s'applique à n'importe quel convertisseur utilisant un circuit modifié d'équilibrage de charge ou à entrée commutée. En pratique, seuls les convertisseurs sigma-delta sont appelés CDC.

Le CDC est l'inverse du circuit habituel d'équilibrage de charge. Dans un circuit d'équilibrage de charge, l'étage d'entrée est normalement constitué de deux capacités connues (généralement de valeurs identiques) et d'une tension de référence connue. L'objectif étant de mesurer la deuxième tension, qui est inconnue.

A l'inverse, le CDC utilise deux tensions connues (généralement identiques) et une capacitance de référence pour mesurer la valeur de la seconde capacitance à mesurer (voir Figure 4).

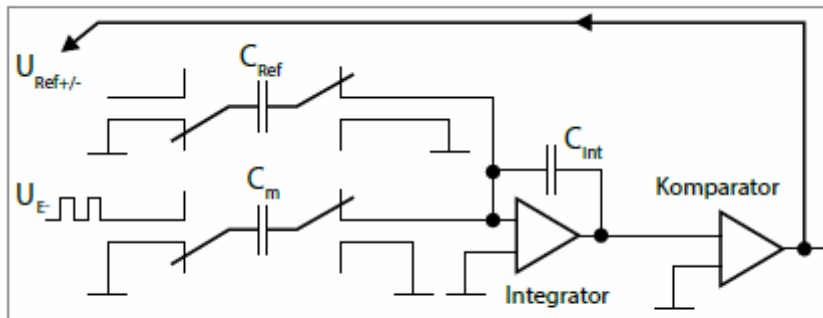


Fig. 4: la structure d'entrée d'un CDC

Commençons par l'explication du circuit à l'étage d'entrée de l'intégrateur. C'est à ce niveau que les valeurs de charge sont comparées. Afin que le circuit puisse mesurer les variations de capacité, l'entrée du comparateur doit être normalement nulle. Ceci implique que le comparateur doit commuter la tension de référence dans la partie supérieure du circuit aussi souvent que nécessaire pour compenser la valeur de charge dans la partie inférieure du circuit.

Plus cette opération sera effectuée souvent, plus la valeur de la capacité à mesurer sera élevée. (Cette explication simple ne prend pas en compte la complexité de la théorie du signal et des filtres sous-jacente au fonctionnement d'un convertisseur sigma-delta.)

Ce circuit bénéficie de la résolution et la précision élevées du convertisseur sigma-delta, en combinaison à une vitesse relativement faible. Puisque la capacitance mesurée est connectée à la masse virtuelle de l'entrée de l'intégrateur, il n'est pas nécessaire de prendre en compte d'éventuelles capacités parasites liées à la masse. Les interférences provenant de l'extérieur du composant peuvent être, la plupart du temps, supprimés par les filtres numériques intégrés aux convertisseurs sigma-delta. De plus, la capacité de référence peut habituellement être fabriquée pour avoir un gradient de température similaire à celui de la capacité mesurée. Dans de nombreux cas, le CDC est capable de fournir des mesures précises, exemptes de distorsions ou d'erreurs.

Il existe cependant un problème avec le CDC : il ne permet pas de détecter les circuits parallèles de faibles impédances qui peuvent apparaître au cours du temps, causées par les perturbations environnementales telles que l'humidité et la poussière. Ces facteurs parasites faussent les mesures en déchargeant la capacitance lors de la mesure, induisant qu'une portion de la charge n'atteint pas l'intégrateur, avec pour résultat une capacitance mesurée plus faible que ce qu'elle n'est réellement.

2.2 La méthode PICO-CAP



Dans le sud-ouest de l'Allemagne, près de la ville de Karlsruhe, se trouve la société acam Messelektronik, une filiale du fabricant de capteurs et semiconducteurs ams (Unterpremstätten, Autriche, www.ams.com). Acam s'est spécialisée dans les convertisseurs « time-to-digital » ultra précis, fonctionnant avec un oscillateur en anneau conçu à partir d'un nombre impair d'inverseurs numériques. La plus petite constante de temps mesurable de cet oscillateur en anneau est le délai d'un seul de ces inverseurs, permettant ainsi au composant de fonctionner à des fréquences d'environ 10 GHz. (Ces commutations haute fréquence sur la puce ne remontent jamais au niveau de la carte où elles pourraient causer de sérieux problèmes CEM)

Avec le convertisseur « time-to-digital » d'acam, la mesure de faibles capacitances de l'ordre du pF revient simplement à mesurer le temps de décharge, selon une méthode dénommée PICO-CAP. Afin de compenser toute variation de température ou de process, l'utilisateur peut comparer le temps de décharge mesuré avec le temps de décharge d'une capacité conçue avec le même procédé que la capacité mesurée. Les deux mesures utiliseront l'horloge interne de la puce, et ce procédé éliminera les problèmes dus aux variations de température.

La méthode PICO-CAP offre également d'autres avantages. Elle peut détecter facilement si la capacité mesurée est vraiment connectée ou s'il y a un circuit ouvert ou un court-circuit, puisque sa charge se fait via une forte impédance lors de la phase de chargement (voir Figure 5). La phase finale est effectuée en utilisant l'impédance de mesure. Si l'on regarde la courbe de charge, on voit que le système peut détecter un court-circuit, un circuit ouvert ou la capacité à mesurer.

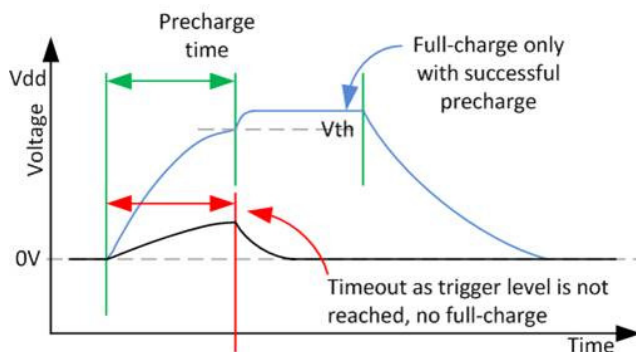


Fig. 5: how the PICO-CAP method charges a capacitance

Afin d'éliminer les effets de distorsion des capacités parasites, PICO-CAP fournit également une méthode pour détecter et mesurer leur amplitude. Des commutateurs internes permettent d'accéder à ces parasites, commutant la capacité de mesure dans un ordre spécifique, en mode simple terminaison ou différentiel à la terre et à l'alimentation (voir Figure 6).

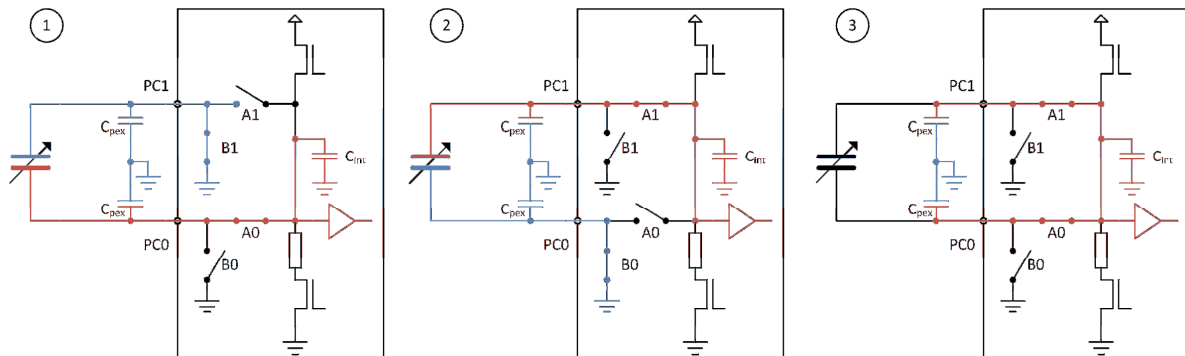


Fig. 6: des commutateurs internes permettent de détecter et compenser les capacités parasites

La méthode PICO-CAP est rapide, offre haute résolution et précision, et est relativement simple à mettre en œuvre. Cela dit, il peut y avoir des problèmes avec les grandes capacités, car le convertisseur « time-to-digital » peut capturer des signaux indésirables de grande amplitude. L'élément principal est un comparateur, qui s'il est saturé n'a aucun filtre lui permettant d'extraire le signal réel. Ceci implique que des conductances parallèles indésirables ne peuvent être détectées et mesurées. Heureusement, il existe un principe qui donne la possibilité de résoudre ce problème: la méthode de démodulation de fréquence.

2.3 La méthode de démodulation de fréquence:

De nombreuses applications sont soumises à un taux d'interférences considérable provenant de sources externes. Les capteurs capacitifs, comme décrits ci-dessus, sont extrêmement sensibles à ces perturbations. La raison en est que la plaque d'un condensateur a tendance à se comporter comme une antenne pour les sources d'interférence. Dans certaines applications, comme la mesure d'occupation de siège, la capacité mesurée est relativement faible, alors que la surface où sont localisées les électrodes est grande. De plus, ces capteurs sont soumis à des facteurs environnementaux qui n'affectent pas la capacité elle-même, mais qui créent une conductance parasite affectant la charge et la décharge de la capacitance. La plupart des méthodes de mesure souffrent d'erreurs lorsque cela se produit.

Pour résoudre ces problèmes, ams a mis au point une méthode qui fera l'objet d'une nouvelle famille de produits standards. La méthode peut déjà être évaluée grâce à des puces de test disponibles.

La puce génère une fréquence appliquée, via un amplificateur, à la capacitance à mesurer. Le courant est mesuré et restreint à une bande très étroite grâce à un filtre passe-bande de haute performance (voir Figure 7). Ce filtrage garantit que seules les gammes de fréquence proches de la fréquence du signal d'excitation sont mesurées ; toutes les fréquences interférentes des autres bandes sont tout simplement ignorées.

Après filtrage du signal à mesurer, un démodulateur synchrone sépare les composantes en phase et en quadrature (I et Q). Ainsi, le résultat final envoyé vers l'ADC sera en phase avec la tension

(résistive) et en quadrature (capacitive). Par conséquent, non seulement la mesure capacitive ne sera pas perturbée par la capacitance parasite, mais la valeur de cette dernière sera connue. En conséquence, cette valeur pourra être utilisée pour certaines applications spéciales.

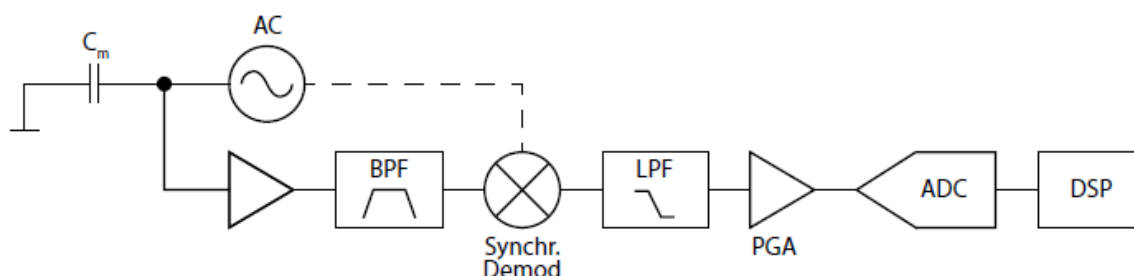


Fig. 7: block diagram de la méthode de démodulation de fréquence

La méthode de démodulation de fréquence d'ams supprime toute conductance indésirable, et la rend véritablement mesurable. De surcroît, soit les fréquences interférentes peuvent être éliminées, soit la fréquence de mesure peut être ajustée pour éviter les interférences sur la bande de fréquence utilisée. Enfin, la puce d'ams est dotée d'une broche séparée pour piloter un éventuel blindage du câble connecté à la capacitance. En l'excitant avec le signal de mesure, la puce d'ams peut annuler l'effet de capacité du câble d'alimentation.

Cette nouvelle méthode développée par ams supprime les sources intempestives externes de capacité avec une grande efficacité: des expériences avec des volants, dans lesquels un capteur capacitif est utilisé pour détecter la proximité des mains du conducteur, ne furent en rien affectées par les impulsions de courant commuté (jusqu'à 10A) alimentant les électrodes de chauffage.

Cette méthode permet de mesurer de faibles capacités avec une extrême précision, tout en garantissant une grande immunité aux interférences externes auxquelles les gros capteurs capacitifs sont intrinsèquement vulnérables.

Résumé

Les capteurs capacitifs sont largement utilisés dans l'industrie électronique: Ils sont peu onéreux à fabriquer, faciles à comprendre et leur intégration ne pose aucun problème particuliers. Cela dit, des difficultés peuvent survenir lorsque des mesures précises de variation de la capacité sont nécessaires, puisque les valeurs de capacité du capteur sont généralement faibles, de l'ordre du pF.

Fournir des résultats précis, fiables et stables durant des années de fonctionnement sur le terrain demande une bonne compréhension de la nature des capteurs et des méthodes disponibles pour mesurer les capacités.



Cet article décrit et compare six méthodes, certaines déjà largement adoptées et d'autres développées récemment. Il explique les avantages et inconvénients de différents principes et explique les problèmes liés à chacun d'entre eux et comment les résoudre. Il présente également des conseils sur la réalisation de mesures directes, et donne des recommandations sur les phénomènes parasites et autres sources de distorsion potentielles.

Biographie

Martin Jaiser est diplômé en ingénierie électronique de l'université de Karlsruhe. Il a ensuite occupé divers postes en ventes et ingénierie d'applications chez Analog Devices, Rambus et Elmos. Depuis 2012, il travaille en tant qu'ingénieur d'applications spécialiste des applications automobiles chez ams AG, et plus particulièrement les capteurs de position, inductifs et capacitifs ainsi que la technologie NFC.