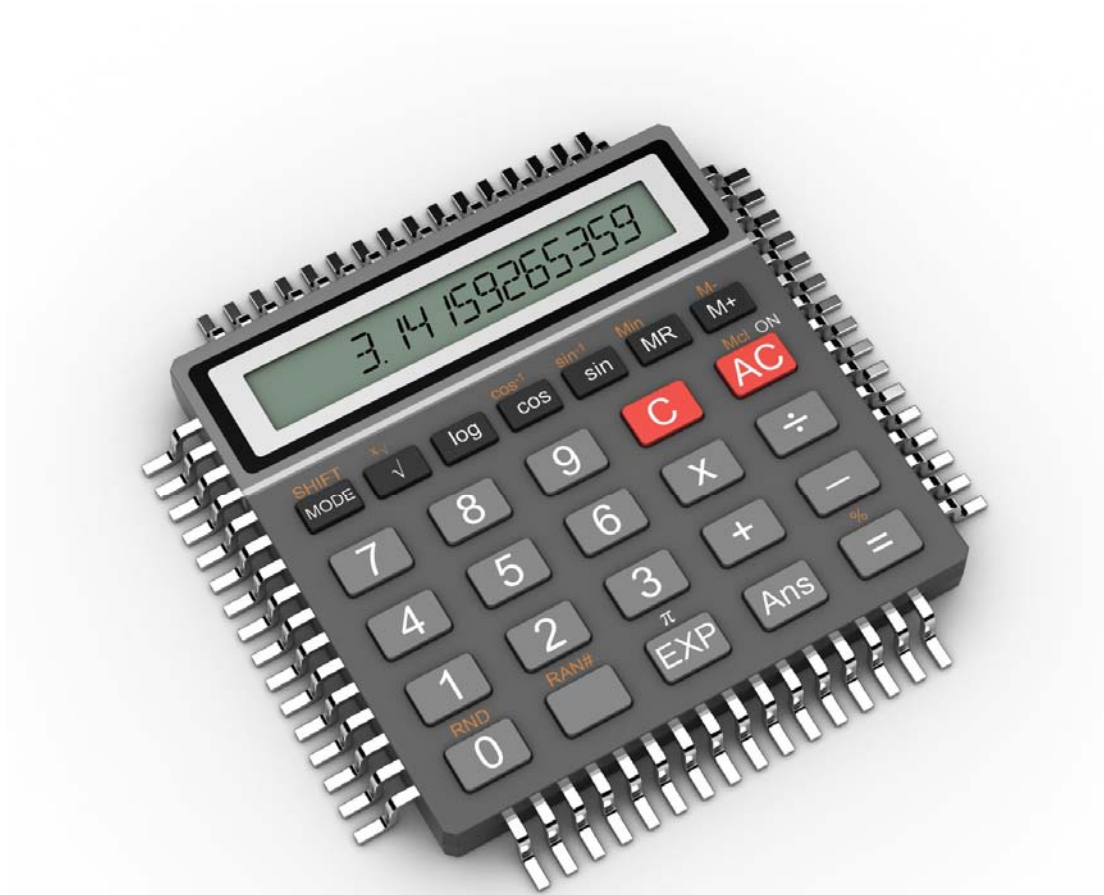


Comment profiter de l'unité à virgule flottante des microcontrôleurs embarqués

Par Haakon Skar, Directeur de marketing AVR chez Atmel



En se dotant de fonctions mathématiques en virgule flottante, les microcontrôleurs élargissent fortement leur espace de conception. La performance d'une unité à virgule flottante (FPU) peut être mise à profit pour augmenter l'étendue et la précision de calculs mathématiques, accélérer les traitements pour satisfaire des contraintes temps réel, ou encore accélérer des routines pour que le système reste plus longtemps en veille, ce qui économise de l'énergie et étend la durée de vie de la batterie.

Les nombres en virgule flottante

Les nombres en virgule flottante sont appelés ainsi car, dans leur représentation sous la forme décimale $A \times 10^B$, la virgule dans la partie A

(« mantisse » ou « significant ») est libre de flotter ; vous pouvez la placer n'importe où pour les besoins de vos calculs, et ajuster l'exposant B en conséquence. $1,234 \times 10^6$ est ainsi identique à 1234×10^3 . Dans la pratique, pour représenter les nombres et surtout les stocker, la virgule est placée le plus souvent après le premier chiffre non nul.

Pour l'ingénieur travaillant avec des représentations numériques de signaux du monde réel comme les signaux audio haute qualité, une grande part de l'intérêt des mathématiques à virgule flottante vient non pas tellement de la liberté de placer la virgule décimale n'importe où, mais plutôt de l'étendue de l'intervalle de nombres qu'il est possible de représenter. Dans la notation IEEE 754, qui est le standard le plus employé en informatique et en traitement du signal, un nombre dit « de simple précision » peut prendre une valeur située dans la plage décimale de -10^{39} à $+10^{39}$ environ. La notation en virgule flottante est un sujet complet en lui-même, et une recherche à travers le web sur ce point, ou sur IEEE 754, rapporterait plus d'information que n'en souhaitent en général les non mathématiciens, sur la gestion des nombres binaires, le cas des nombres spéciaux comme zéro, et les distinctions entre arithmétique à virgule flottante, à virgule fixe et entière. Une chose est sûre : où que se situe le nombre dans l'intervalle de valeurs, le format binaire simple précision utilise une mantisse de quelque 23 bits de résolution, ce qui l'adapte bien à du contenu du type signal audio 24 bits (**figure 1**).

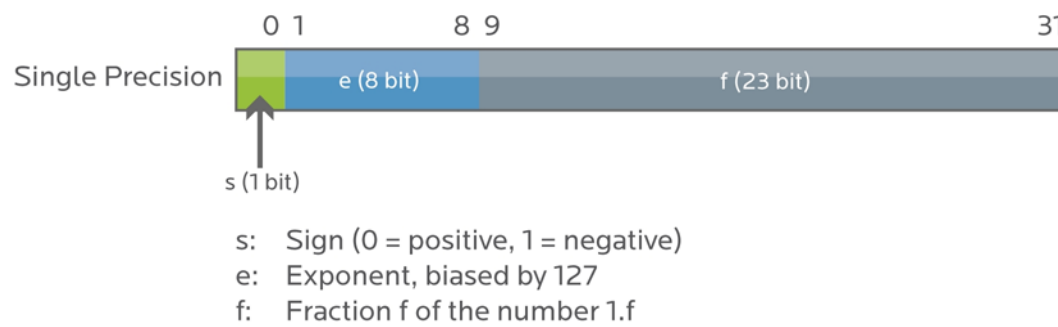


Figure 1 :

En simple précision (32 bits), la mantisse occupe 23 bits.

Simple précision

s : signe (0 = positif, 1= négatif).

e : exposant, décalé de 127.

f : fraction f du nombre 1,f.

Maintenir la fidélité du signal

Les problèmes fondamentaux rencontrés le concepteur d'une chaîne de traitement de signal audio n'ont pas changé en passant du domaine analogique au domaine numérique. Les signaux audio présentent de larges plages dynamiques, et ces plages contiennent à leurs deux extrémités – du signal de plus faible amplitude au signal de plus forte amplitude – une information critique pour la fidélité de la reproduction, ne souffrant d'aucun compromis. Tout au long de son chemin (**figure 2**), le signal audio peut être filtré, mélangé, et son niveau peut être décalé ou amplifié lors de nombreuses étapes de traitement. En conception analogique, le concepteur devait continuellement surveiller les niveaux des signaux pour les maintenir au-dessus du bruit de fond tout en évitant que les pics ne s'approchent trop près des limites des amplificateurs ; il risquait toujours de perdre de l'information en incluant du bruit dans les niveaux bas, ou en écrêtant les pics.

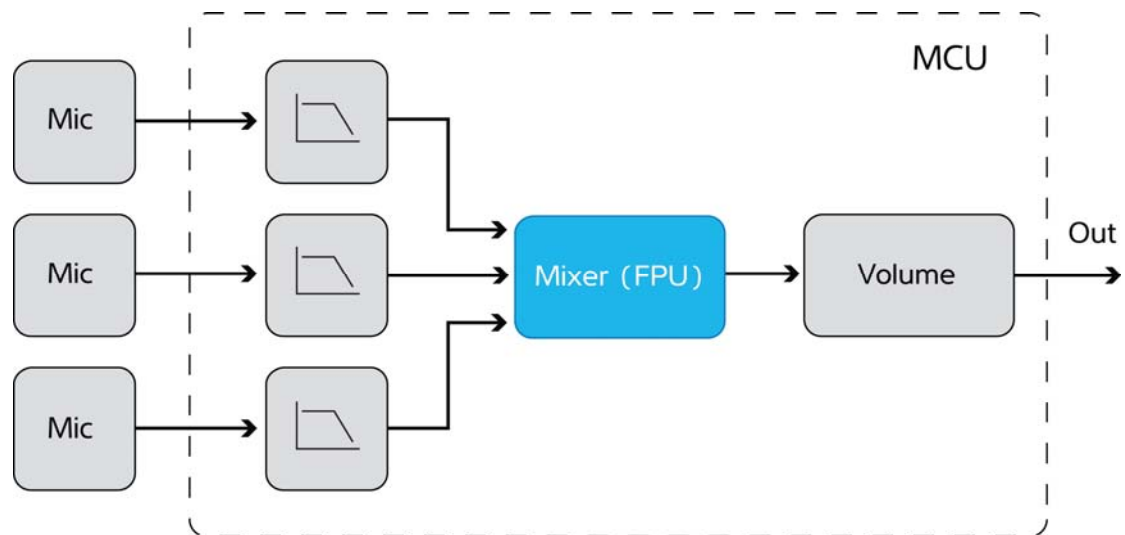


Figure 2 :

Bloc diagramme d'une chaîne de traitement de signal audio avec FPU.

La situation est similaire dans le domaine numérique. Si l'ingénieur ne veut pas perdre d'information suite à un débordement ou à une troncature, il doit maintenir les valeurs du contenu dans l'intervalle de nombres représentables. Les nombreuses étapes de traitement du signal, en particulier le filtrage, impliquent une succession d'opérations mathématiques dont en particulier la multiplication, susceptibles de déplacer fortement la valeur absolue des données dans la plage de nombres représentables. Lorsque cette plage est limitée, il faut veiller à ce que la fenêtre glissante des valeurs relatives qui, dans le cas de contenu audio, s'étend du signal du niveau le plus bas au signal du niveau le plus haut, reste dans les limites : c'est-à-dire, en langage analogique, au-dessus du bruit de fond et en dessous du rail de tension. Classiquement, les systèmes de traitement de signal utilisant une unité arithmétique à virgule flottante sont beaucoup plus coûteux que leurs homologues à virgule fixe. L'usage le plus fréquent est de développer une première version du projet en environnement à virgule flottante, ce qui permet aux valeurs numériques d'occuper librement le vaste espace numérique disponible. Puis, lorsque les algorithmes fonctionnent conformément à la spécification, le prototype est converti en matériel à

virgule fixe de plus faible coût. Le processus consiste pour une bonne part à inspecter les valeurs numériques que le produit en fonctionnement génère tout au long de la chaîne de traitement de signal, et à introduire des fonctions de mise à l'échelle aux points appropriés de manière à maintenir les valeurs dans la plage des nombres représentables (**figure 3**). Inversement, les chefs de projet peuvent choisir de développer sur une cible matérielle plus chère pour raccourcir le processus de développement et réduire son coût.

La taille des FPU diminue grâce aux procédés technologiques

Les deux approches décrites ci-dessus se fondent sur l'hypothèse que les coprocesseurs à virgule flottante occupent de grandes surfaces de silicium, ce qui rend les produits plus chers. Cependant, avec les technologies de fabrication actuelles, ce n'est plus nécessairement vrai. Il est désormais possible de coupler sur une puce économiquement viable un cœur microprocesseur 32 bits – de la classe de ceux des microcontrôleurs de moyen de gamme – avec une unité à virgule flottante totalement conforme à la norme IEEE754. C'est le cas par exemple des microcontrôleurs AVR UC3 d'Atmel, qui offrent déjà un traitement de signal performant avec leur support d'arithmétique à virgule fixe et d'arithmétique entière. En s'enrichissant d'une unité à virgule flottante de simple précision, ils offrent de nombreuses nouvelles options aux concepteurs.

Tout d'abord, sur la base des remarques précédentes sur les systèmes à virgule flottante, ils se libèrent de nombreux détails de conception concernant les plages de nombres et les mises à échelle. A travers les étapes de traitement successives, étant donné la très large plage disponible, il est possible d'autoriser la valeur du signal à prendre (jusqu'à un certain point) toutes les valeurs absolues nécessaires ; l'information essentielle – la dynamique du signal – sera toujours contenue dans la mantisse de précision 24 bits représentant la fraction du nombre à virgule flottante. Il n'est plus nécessaire de veiller constamment aux mises à échelle pour maintenir les valeurs dans leurs limites (**figure 3**).

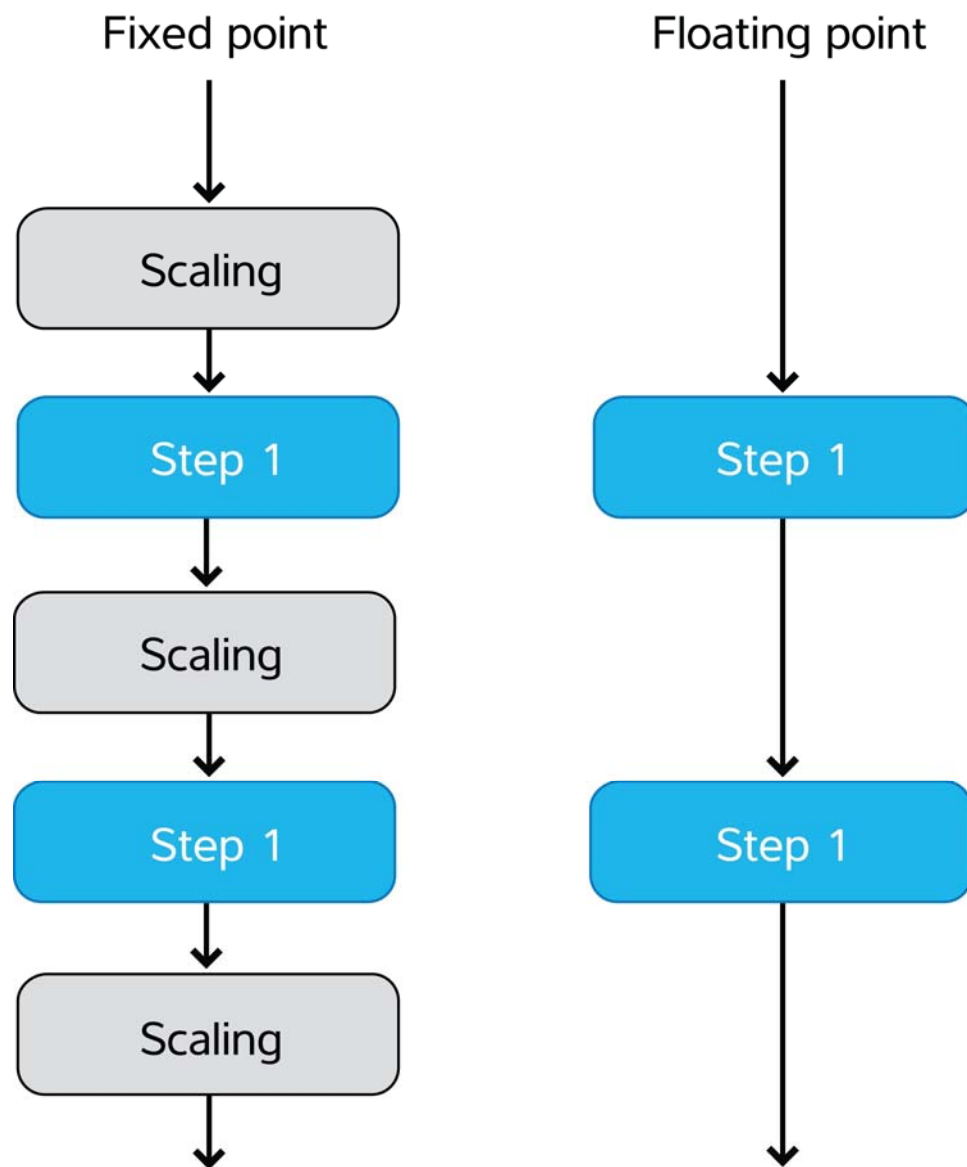


Figure 3 :

Les mathématiques à virgule flottante offrent une plage dynamique plus large et éliminent les mises à échelle intermédiaires entre étapes de calcul.

Virgule fixe	Virgule flottante
Mise à échelle	
Etape 1	Etape 1
Mise à échelle	
Etape 2	Etape 2
Mise à échelle	

Cependant, les bénéfices de l'intégration d'un FPU sur un microcontrôleur vont au-delà de la simple liberté de conception ; il faut y ajouter un gain notable en vitesse de calcul ; par exemple le FPU exécute en quelques cycles d'horloge des multiplications et divisions de haute précision qui exigent plusieurs dizaines de cycles avec un cœur non amélioré. Dans les microcontrôleurs AVR UC3, le FPU exécute la plupart des instructions virgule flottante 32 bits en un cycle, et un « MAC » (multiplication suivie d'une addition) 32 bits en deux cycles, à comparer aux 30 à 50 cycles nécessaires pour la même opération sans FPU. Cette vitesse de calcul peut servir à augmenter le nombre de traitements DSP exécutés par un microcontrôleur, ou à réduire la puissance consommée pour un traitement donné.

MCU + FPU : un couple qui élargit l'espace de conception

De nombreux systèmes à mission critique soumis à des contraintes de traitement temps réel peuvent tirer profit de cette capacité d'exécuter des calculs de haute précision en quelques cycles CPU. En automobile, le groupe motopropulseur est particulièrement visé : l'unité de contrôle moteur doit traiter des entrées de capteurs de très larges plages dynamiques, et le temps disponible pour chaque cycle de calcul dépend entièrement de la rotation du moteur. Des contraintes similaires sont appliquées aux systèmes comme l'ABS (freinage anti-blocage) ou la suspension active. Dans les systèmes de contrôle de moteur électrique de précision, la capacité à traiter de larges plages de valeurs est également précieuse car les algorithmes exigent l'application séquentielle de nombreuses transformations complexes, sans perte de données par troncature et, une fois de plus, le temps attribué au calcul est déterminé par la période de rotation du moteur. Dans ces cas, les bénéfices de l'unité FPU sont à la fois sa rapidité et sa précision. Le traitement de signal par FFT (transformée de Fourier rapide) est un problème bien connu de nombreux ingénieurs pour être efficacement traité par les unités à virgule flottante. Dans un tout autre domaine, celui des systèmes graphiques et d'édition, la qualité visuelle des résultats dépend de calculs géométriques précis pour la gradation des textures graphiques et des polices

de caractères. Les contraintes temps réel sont peut-être moins sévères ici, mais la performance et la capacité de traitement du système dépend directement de la faculté des FPU à exécuter de nombreux calculs en peu de cycles. Tous ces secteurs sont des utilisateurs traditionnels des unités à virgule flottante, mais ce n'est pas le cas, en général, des concepteurs travaillant avec des cœurs de microcontrôleurs.

La disponibilité de fonctions arithmétiques en virgule flottante dans cette classe de processeurs modifie la donne (et les critères de choix des composants) pour de nombreux types de projets, en particulier pour les composants audio grand public. La chaîne de traitement du signal audio tire des bénéfices spectaculaires d'une architecture à virgule flottante. Dans de nombreux cas (probablement dans la majorité), la source du signal est représentée numériquement et pourra être convertie dans le format voulu en quelques cycles. Au bout de la chaîne de traitement du signal, le signal audio est renvoyé dans le monde réel analogique ; après sa normalisation (une opération mono cycle), un convertisseur numérique / analogique reprendra les fractions représentées dans la mantisse, qui contiennent toutes les données dont il a besoin. Quelles qu'aient été les déviations du signal à travers toute la plage de représentation des nombres en virgule flottante, elles sont simplement éliminées ; l'exposant ne sert pas et la précision maximum aura été maintenue tout au long du processus.

Les concepteurs travaillant avec des systèmes d'acquisition et de traitement du signal dans d'autres domaines, comme l'industrie ou l'instrumentation médicale, ont également besoin de multiples étapes de traitement sur des données de large plage dynamique ; l'intégration d'un cœur MCU à usage général avec un FPU modifiera aussi leurs perspectives. Auparavant, insérer des traitements en virgule flottante dans un chemin de signal impliquait inévitablement de coupler un microprocesseur ou un microcontrôleur avec un DSP dédié, avec des implications de coût, de taille et de consommation. L'option consistant à implémenter tout le projet sur un DSP était écartée dans la plupart des cas, car un DSP ne pouvait gérer les fonctions de contrôle nécessaires au projet.

Conclusion

Les marchés habituellement associés avec les microcontrôleurs, en général dominés par des considérations d'interfaçage avec les signaux et événements extérieurs, de coût et de consommation énergétique, n'avaient auparavant guère accédé aux fonctions mathématiques en virgule flottante. Le terme de FPU lui-même a toujours fait penser à des systèmes complexes, de haut de gamme et souvent basés sur des DSP. A présent, les progrès technologiques mettent les FPU à la portée d'un plus large choix de projets, et les ingénieurs peuvent pleinement bénéficier de la précision de calcul, de la large plage dynamique et de la simplicité de codage que leur apporte l'arithmétique à virgule flottante.