



NICE du 20 au 24 MAI 1985

TECHNIQUE DE FILTRAGE NUMERIQUE QUASI-CONTINU,
AVANTAGES ET LIMITATIONS.

Pierre-André Farine, Fausto Pellandini

Institut de microtechnique, Université de Neuchâtel, Maladière 71, 2007 Neuchâtel, Suisse

RESUME

Les filtres numériques quasi-continus sont caractérisés par une représentation de l'information sous forme binaire et par un traitement du signal qui s'effectue de manière quasi-continue dans le temps. Différents types de signaux binaires, numériques parallèles et impulsionnels sériels, y sont présents. Les signaux numériques sont pondérés et transformés par des multiplieurs à taux programmable dans des suites d'impulsions binaires modulées en densité et sont ensuite intégrés dans de simples compteurs. La représentation quasi-continue de l'information créée par cette modulation d'impulsions en densité et le libre mouvement des signaux binaires dans les boucles de contre-réaction du système justifie le nom donné à ces structures.

Afin de décrire le comportement de ces filtres, le modèle paramétrique d'une cellule de base en boucle ouverte est établi; cette cellule est composée d'un compteur réversible et de deux multiplieurs à taux programmable. La forme fermée de cette unité de base réalise des filtres récursifs qui peuvent être analysés par simulation sur ordinateur. Une interpolation analytique ainsi qu'une linéarisation des relations paramétriques fournit une approximation analogique et linéaire du comportement de ces systèmes.

Le filtre numérique quasi-continu réalise l'équivalent d'une structure numérique à récursion double, dans laquelle les mémoires ne sont pas simplement effacées à chaque période, mais utilisées comme termes additionnels de la somme qui produit la nouvelle valeur à mémoriser. La structure quasi-continue utilise une arithmétique basée sur un format de coefficient à virgule flottante particulier.

Comme dans les filtres à récursion double, les effets de quantification des coefficients des filtres quasi-continus sont beaucoup plus faibles que dans les filtres numériques conventionnels, en particulier pour des filtres très sélectifs. L'absence de multiplieurs numériques parallèles ou séquentiels dans ces systèmes permet de réaliser une économie de matériel (comparativement aux structures numériques connues) pour des filtres de sélectivité élevée. Lorsque le signal d'entrée se trouve déjà sous forme binaire fréquentielle (modulation d'impulsions fournie par certains types de capteurs), le délicat problème de la conversion analogique numérique est éliminé.

Parmi les limitations de ces systèmes, notons le domaine de travail réservé aux basses fréquences, l'impossibilité de multiplexer les signaux dans le temps, ainsi que l'apparition d'effets non-linéaires.

SUMMARY

The quasi-continuous digital filters are characterized by a representation of the information of the binary form and by a signal processing which is performed in time in a quasi-continuous way. Several kinds of binary, parallel and serial signals are present. The digital signals are transformed by rate multipliers in binary pulses modulated in density and are then integrated in simple counters. The quasi-continuous representation of the information created by this pulse density modulation and the free motion of the binary signals in the feedback loops of the system justify the name given to these structures.

In order to describe the behaviour of these filters, the parametric model of an open-loop cell is established; this cell consists in an up-down counter and two rate multipliers. The closed form of the same basic cell performs recursive filtering which can be analyzed by computer simulation. An analytic interpolation and a linearization of the parametric relations gives an analogue and linear approximation of the behaviour of these systems.

The quasi-continuous digital filter realizes the equivalent of a double recursive digital structure, in which the stored variables are not simply erased at each period but used as additional terms of the addition producing the new value to be stored. The quasi-continuous structure uses an arithmetic based on a particular floating coefficient format.

As with the double recursive digital filters, the coefficients quantization effects of the quasi-continuous digital filters are much lower than in the classical digital filters, particularly for very selective filters. The absence of parallel or sequential multipliers in these systems permits to minimize hardware (with respect to other known digital structures) for filters having a very high sampling to cut-off frequency ratio. When the input signal is already in the serial binary form (pulse density modulation), the delicate problem of the analogue to digital conversion is eliminated. This arises when the input signal comes directly from a specialized sensor or from a voltage to frequency converter.

Among the limitations of these quasi-continuous systems, we mention a working domain limited to low frequencies, the quasi-continuous representation and the free motion of the variables which hinder from the time multiplexing of the signals, and the appearing of non-linear effects.



TECHNIQUE DE FILTRAGE NUMERIQUE QUASI-CONTINU, AVANTAGES ET LIMITATIONS.

P.-A. Farine, F. Pellandini, Université de Neuchâtel, Suisse.

1. INTRODUCTION.

Les filtres numériques quasi-continus (FNQC) peuvent être classifiés dans le domaine des filtres numériques unidimensionnels travaillant en temps réel. Ils sont principalement caractérisés par une représentation de l'information sous forme binaire et par un traitement du signal qui s'effectue de manière quasi-continue dans le temps. Il résulte un traitement de l'information aucunement relié au rythme imposé par une fréquence d'échantillonnage, comme cela est par contre le cas dans tous les filtres numériques conventionnels. Dans cette introduction, nous présentons les différents types de signaux binaires présents et le matériel employé.

Les Figs. 1 et 2 montrent deux structures différentes de filtres numériques quasi-continus de deuxième ordre déduites d'une structure de filtre du type ordinateur analogique. La réalisation des filtres numériques quasi-continus nécessite un matériel logique simple: des multiplieurs à taux programmable utilisés pour pondérer les signaux avec les coefficients du filtre, et des compteurs réversibles avec lesquels on effectue les opérations d'addition et d'intégration.

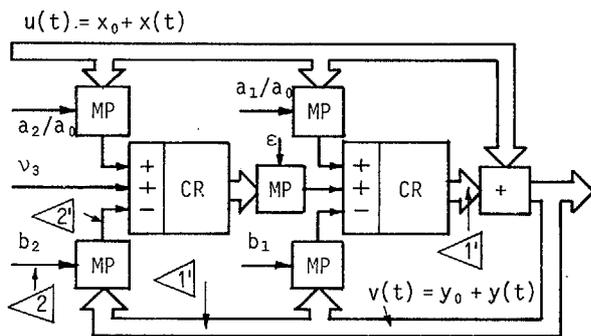


Fig. 1. Filtrage numérique quasi-continu, 1ère forme.

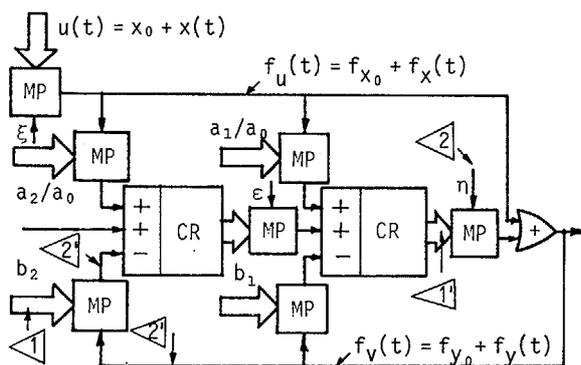


Fig. 2. Filtrage numérique quasi-continu, 2ème forme.

Mis à part les multiplieurs programmables (MP) et les compteurs réversibles (CR), la structure de la Fig. 1 utilise un additionneur complet numérique, alors que dans la Fig. 2 cette addition est obtenue avec une simple porte OU. L'entrée des filtres quasi-continus provient soit d'un convertisseur analogique-numérique, comme dans la Fig. 1, ou d'un convertisseur tension-fréquence, comme dans la Fig. 2.

Plusieurs types de signaux, tous de nature binaire, sont distingués selon leur appartenance à la catégorie des signaux numériques (1 et 1') ou des impulsions binaires (2 et 2') (dans les deux premières figures, ces signaux sont indiqués spécialement):

1 Signaux binaires représentant des nombres fixes

(coefficients de filtrage),

1' signaux binaires représentant des nombres avec des bits en parallèle et changeant de façon asynchrone dans le temps,

2 impulsions binaires périodiques représentant des fréquences fixes (en tant que coefficients de filtrage),

2' impulsions binaires ayant une densité temporelle variable et résultant de la modulation de nombres binaires avec soit des impulsions binaires périodiques (comme à la Fig. 1), soit des impulsions binaires avec une densité temporelle variable (selon la Fig. 2).

La nature binaire de tous ces signaux, qui représentent finalement toujours des nombres, justifie le nom de filtre numérique assigné à ces systèmes.

Le terme quasi-continu provient, d'une part, de la présence d'impulsions binaires ayant une densité temporelle variable qui représente l'information de façon presque continue et, d'autre part, du libre mouvement des valeurs du compteur dans les boucles de contre-réaction du système. Ces valeurs changent de façon asynchrone par l'absence de mémoires de synchronisation travaillant au rythme d'une fréquence d'échantillonnage. La dénomination quasi-continue est plus significative dans la structure présentée à la Fig. 2 dans laquelle les signaux de contre-réaction sont des impulsions binaires avec densité temporelle variable.

Remarquons que les variables internes des circuits quasi-continus, qui sont modulées en fréquence (modulation d'impulsions en densité), doivent toujours être définies positives. Afin de respecter cette condition, les filtres numériques quasi-continus travaillent avec des variables d'état, d'entrée et de sortie décalées dans le domaine positif.

2. MODELE PARAMETRIQUE D'UNE CELLULE QUASI-CONTINUE ET SIMULATION DU COMPORTEMENT DES FILTRES QUASI-CONTINUS.

L'étude générale du comportement des filtres numériques quasi-continus [6, 7] peut être effectuée sur l'unité de deuxième ordre décrite dans la Fig. 1. Le fonctionnement de ces unités peut être caractérisé à l'aide d'un modèle paramétrique construit à partir de l'analyse de la cellule de base décrite par la Fig. 3.

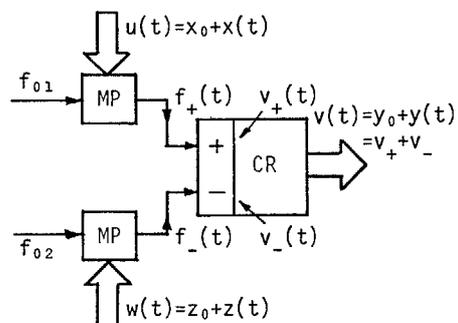


Fig. 3. Cellule de base quasi-continue avec un compteur réversible et deux multiplieurs programmables.

Dans cette cellule se trouvent deux multiplieurs programmables (MP) et un compteur réversible (CR). Le modèle suivant des multiplieurs programmables est adopté: le signal d'entrée, numérique mais continu dans le temps, est échantillonné chaque fois qu'une impulsion est produite à la sortie du multiplieur programmable;

TECHNIQUE DE FILTRAGE NUMERIQUE QUASI-CONTINU. AVANTAGES ET LIMITATIONS.

P.-A. Farine, F. Pellandini, Université de Neuchâtel, Suisse.

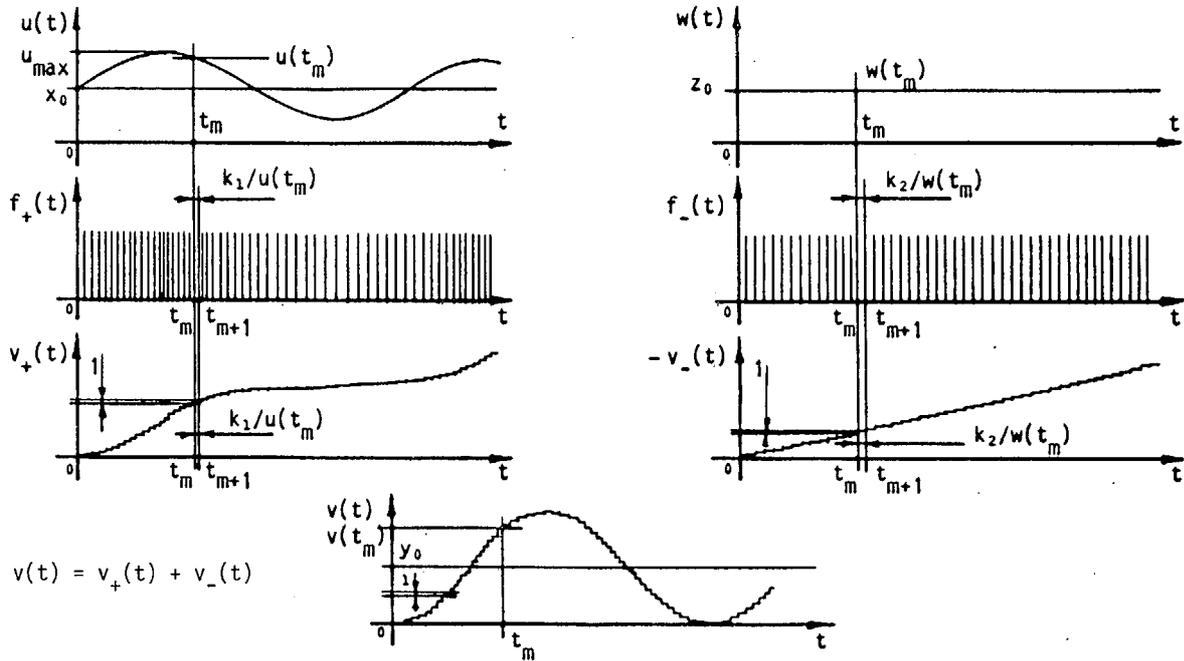


Fig. 4. Forme des signaux dans la cellule de base de la Fig. 3, $x(t) = a \sin \omega_0 t$ et $z(t) = 0$.

la période entre deux impulsions est inversement proportionnelle à l'amplitude de l'échantillon. L'amplitude du signal d'entrée est ainsi transformée dans une modulation d'impulsions en densité et ces impulsions sont ensuite additionnées dans le compteur. A la Fig. 4, un cas particulier (signaux d'entrée $x(t) = a \sin \omega_0 t$ et $z(t) = 0$) a été illustré à travers la cellule de base, depuis les entrées jusqu'à la sortie. Le signal de sortie est considéré comme la somme de deux signaux fictifs, $v_+(t)$ et $v_-(t)$, respectivement les contributions des entrées avant (+) et arrière (-) du compteur.

L'intégration numérique réalisée par la cellule de base apparaît à la Fig. 4. L'information d'entrée (numérique, parallèle et asynchrone) est pondérée et transformée sous forme sérielle (modulation d'impulsions en densité); les impulsions produites sont alors additionnées dans le compteur où l'information se retrouve sous forme numérique parallèle. Le signal numérique $v(t)$, de longueur de mot limitée, change à n'importe quel instant de manière asynchrone, avec des pas d'amplitude de valeur égale à l'unité.

MODELE PARAMETRIQUE:

Considérons les temps t_n et t_{n-1} auxquels respectivement les n-ièmes et (n-1)-ièmes impulsions sont produites par le premier multiplieur programmable. La période Δt_n entre ces deux temps est inversement proportionnelle à la valeur d'entrée $u(t_{n-1})$:

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1} = \frac{k_1}{u(t_{n-1})}, \quad k_1 = \frac{u_{max}}{f_{01}} \quad (1)$$

Une expression analogue à (1), avec une indexation l, peut être donnée pour la séquence de périodes produite par le deuxième multiplieur à taux programmable dont l'entrée est $w(t_{l-1})$:

$$\Delta t_l = t_l - t_{l-1} = \frac{k_2}{w(t_{l-1})}, \quad k_2 = \frac{w_{max}}{f_{02}} \quad (2)$$

Les fréquences f_{01} et f_{02} sont les fréquences maximales présentes dans les multiplieurs programmables. Elles servent à moduler et à pondérer les signaux et agissent comme des coefficients. Les signaux de sortie des multiplieurs programmables peuvent être décrits avec des sommes de distribution delta; leur intégration numérique par le compteur réversible fournit des

signaux en escalier caractérisés par les relations paramétriques suivantes:

$$\begin{aligned} v_+(t_n) &= n + v_{+0}, & t_n &= \sum_{m=1}^{n-1} \frac{k_1}{u(t_m)} \\ v_-(t_l) &= l + v_{-0}, & t_l &= \sum_{k=1}^{l-1} \frac{k_2}{w(t_k)} \end{aligned} \quad (3)$$

Afin d'éviter une dérive (qui impliquerait un dépassement de capacité du compteur), le nombre d'impulsions sur les deux entrées avant et arrière doit être identique sur de grands intervalles de temps; cette condition est valable en particulier lorsque les signaux $x(t)$ et $z(t)$ sont nuls. Elle se traduit ainsi par une relation sur les périodes moyennes entre les impulsions aux entrées du compteur:

$$\overline{\Delta t_n} = \overline{\Delta t_l} \quad \text{d'où:} \quad \frac{k_1}{x_0} = \frac{k_2}{z_0} \quad (4)$$

Les relations paramétriques (3) permettent de déterminer les différents instants auxquels les valeurs $v_+(t)$ et $v_-(t)$ changent, et de décrire le comportement exact d'une cellule de base du traitement numérique quasi-continu. La simulation sur ordinateur des filtres numériques quasi-continus peut alors être faite de manière exacte en combinant les relations paramétriques des différentes cellules présentées, compte tenu des contre-réactions imposées par la structure du filtre. Le programme de simulation est divisé en trois parties principales: entrée des paramètres, simulation et analyse des résultats. Ainsi, nous obtenons les réponses temporelles du système aux excitations particulières, ou par analyse de Fourier une image du comportement en fréquence. L'analyse de Fourier, par transformée de Fourier rapide (TFR), permet de déterminer les limites de linéarité de la structure quasi-continue comme une fonction de l'amplitude et de la fréquence des signaux à filtrer. Il s'agit des effets non-linéaires dus à l'échantillonnage irrégulier, à la modulation d'impulsions en densité produits sur les multiplieurs programmables et à l'intégration numérique produite par le compteur réversible.

Un procédé analytique (basé sur l'interpolation des relations paramétriques, leur développement en série et



TECHNIQUE DE FILTRAGE NUMERIQUE QUASI-CONTINU. AVANTAGES ET LIMITATIONS.

P.-A. Farine, F. Pellandini, Université de Neuchâtel, Suisse.

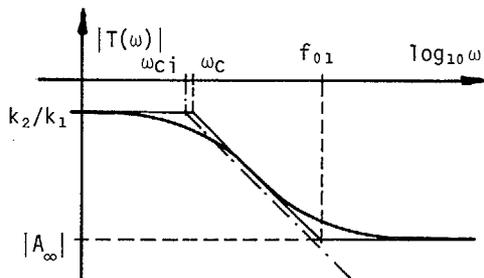
l'application de la méthode des approximations succes- sives) fournit une description analogique du comporte- ment de la cellule de base du traitement numérique quasi-continu. Cette approximation linéaire inclut en particulier les premiers effets de perturbation dus à la modulation d'impulsions en densité et à l'intégra- tion numérique. La cellule quasi-continue introduit une transmission directe atténuée entre l'entrée et la sortie. L'importance relative de cette transmission directe dépend du rapport entre les fréquences du signal d'entrée et les fréquences de référence f_{01} et f_{02} ; elle diminue lorsque ce rapport devient plus petit.

Le modèle analogique linéarisé du comportement de la cellule de base peut être appliqué à l'analyse des filtres numériques quasi-continus. On obtient alors un modèle analogique approché de leur comportement. Dans le cas d'un filtre quasi-continu passe-bas de premier ordre, l'approximation analogique obtenue par linéari- sation fournit la fonction de transfert $T_{LP}(s)$ donnée par la formule (5). (Ce filtre quasi-continu peut être obtenu en utilisant la cellule de base de la Fig. 3 et en appliquant une contre-réaction qui conduit le sig- nal de sortie $v(t)$ à se substituer au signal d'entrée $w(t)$).

$$T_{LP}(s) = \frac{f_{01}/u_{max} - s/2x_0}{s(1-1/2y_0) + f_{02}/v_{max}} \quad (5)$$

$$\omega_c = \frac{f_{02}}{v_{max}(1-1/2y_0)}, \quad |A_{\infty}| = \frac{1}{2x_0(1-1/2y_0)}$$

Par rapport aux caractéristiques idéales d'un fil- tre passe-bas, la fréquence de coupure ω_c est modifiée par un paramètre dépendant de la longueur F de mot des variables et l'atténuation maximale $|A_{\infty}|$ est limitée pour des fréquences très élevées. Ces modifications du comportement sont la conséquence de la transmission directe que nous avons évoquée entre l'entrée et la sortie dans la cellule de base; la Fig. 5 présente l'amplitude de la fonction de transfert du filtre passe-bas obtenu avec ce modèle analogique linéarisé.



ω_c : fréquence de coupure circulaire selon (5).
 ω_{c_i} : fréq. de coupure circ. d'un passe-bas idéal.

Fig. 5. Amplitude en fonction de la fréquence de la fonction de transfert $T_{LP}(s)$ (5) et cas idéal.

3. COMPARAISON ENTRE FILTRES NUMERIQUE CONVENTIONNELS ET QUASI-CONTINUS.

Le comportement des filtres numériques caractérisés par un traitement quasi-continu des signaux, leurs propriétés arithmétiques par comparaison avec les fil- tres numériques conventionnels sont examinés dans ce paragraphe.

Parmi la grande variété de topologies de filtres numériques [1], la structure de filtre à récursion double représentée à la Fig. 6 est celle dont le comporte- ment s'apparente le mieux avec le filtre numéri- que quasi-continu. Cette structure à récursion double

[2] permet la réalisation avantageuse de filtres sé- lectifs avec une longueur de mot des coefficients rela- tivement courte si une représentation en arithmétique à virgule flottante est adoptée. Par filtres sélectifs, on entend ici des filtres dans lesquels le rapport entre la fréquence d'échantillonnage f_s et celle de coupure f_c est très grande. Dans un tel cas, les coefficients de la structure à récursion double tendent vers zéro et peuvent être représentés par une longueur de mot réduite (uniquement les bits significatifs) lorsqu'une repré- sentation en virgule flottante est utilisée.

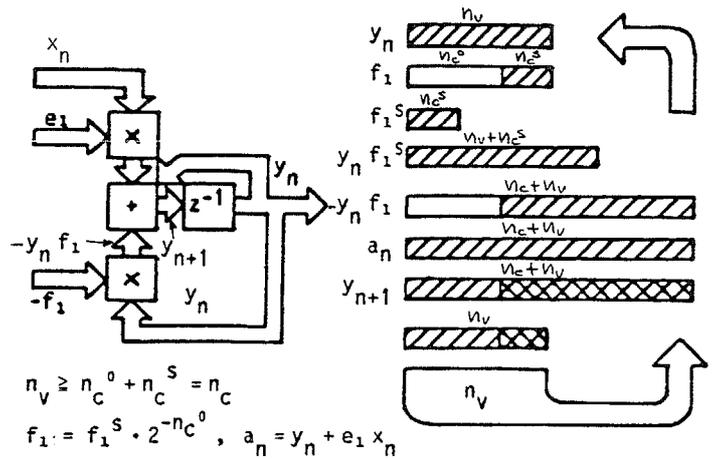


Fig. 6. Filtre numérique à récursion double avec arithmétique à virgule flottante.

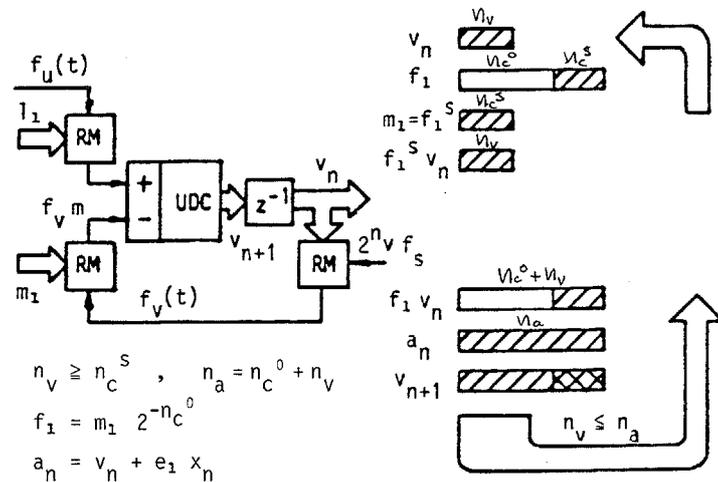


Fig. 7. Filtre numérique à arithmétique incrémentale et équivalent numérique de ce qui se passe dans ce système.

Dans le filtre à récursion double à virgule flottante de la Fig. 6, la longueur de mot de la variable d'en- trée du multiplicateur (notée n_v) doit être plus grande ou égale à la longueur de mot des coefficients (notée $n_c = n_c^0 + n_c^S$, somme des bits nuls n_c^0 et des bits signi- ficatifs n_c^S). On veut en effet que le dernier bit des coefficients puisse encore contribuer directement, à chaque période d'échantillonnage, au niveau du bit de poids le plus faible qui est repris, depuis le somma- teur, dans la boucle de contre-réaction. La multiplica- tion de la variable y_n par le coefficient f_1 est effec- tuée avec la partie significative de ce coefficient f_1^S (bits non nuls) donnant un produit de $(n_c + n_c^S)$ bits. Une conversion à un format à virgule fixe précède l'addition, notée y_{n+1} . Finalement, seuls n_v bits sont

TECHNIQUE DE FILTRAGE NUMERIQUE QUASI-CONTINU. AVANTAGES ET LIMITATIONS.

P.-A. Farine, F. Pellandini, Université de Neuchâtel, Suisse.

transférés à travers la contre-réaction sur l'entrée du multiplieur à taux programmable.

Le filtre numérique à arithmétique incrémentale de la Fig. 7 représente une réalisation alternative équivalente du filtre à récursion double à virgule flottante de la Fig. 6 lorsque l'opération de multiplication est effectuée de manière complète et exacte, soit avec 2^{2n_v} impulsions d'horloge. Les impulsions binaires issues des multiplieurs programmables sont additionnées dans des compteurs réversibles; ces deux types d'éléments remplacent les multiplieurs et les additionneurs des structurés numériques classiques.

Il est possible de montrer [5, 7] que le filtre numérique quasi-continu réalise, avec une arithmétique incrémentale et selon le même schéma de la Fig. 7, l'équivalent d'un filtre numérique à récursion double utilisant un format de coefficient à virgule flottante particulier, et où l'élément de maintien est supprimé.

Dans le filtre numérique à arithmétique incrémentale de la Fig. 7, la fréquence d'horloge du multiplieur programmable doit être au minimum égale à 2^{n_v} fois la fréquence d'échantillonnage f_s afin que le bit le moins significatif du coefficient puisse encore agir sur le bit le plus significatif de la variable v_n . Après la multiplication, les impulsions sont introduites dans le compteur réversible dont la longueur de mot dépend du décalage assigné au produit par la partie de bits nuls (de longueur n_c^0) du coefficient f_1 . L'équivalent numérique de ce qui se passe dans ce système est indiqué dans la partie droite de la Fig. 7. Les différences entre les Figs. 6 et 7 portent d'une part au niveau de l'addition (double et simple précision), et d'autre part sur la longueur de mot n_v des variables d'état y_n et v_n utilisées pour la contre-réaction et la longueur de mot n_a de la variable a_n au niveau de l'addition.

Lorsque le filtre est très sélectif (cas représenté dans la Fig. 7 avec $n_c^0 > n_s$), c'est-à-dire si le rapport fréquence d'échantillonnage et de coupure $r = f_s / f_c$ dépasse une valeur critique r_c , le choix de n_v égal à n_c^0 fait que la partie du compteur qui change durant une période d'échantillonnage ne concerne pas la partie de la variable qui est utilisée en contre-réaction. Dans un tel cas, le blocage des variables internes avec un élément de retard (z^{-1}) peut être supprimé sans conséquence et le filtre à arithmétique incrémentale se transforme en un filtre numérique quasi-continu. Dans des cas de filtres moins sélectifs, le déblocage des variables internes provoque un changement des caractéristiques de filtrage qui peuvent être compensées par une modification adéquate des coefficients [7]. La fréquence d'horloge minimum ($f_s \cdot 2^{n_v}$, $n_v = n_s$) doit être augmentée seulement lorsque les effets de quantification des variables d'état deviennent trop importants. On choisira alors $n_v > n_c$.

4. AVANTAGES DES FILTRES NUMERIQUE QUASI-CONTINUS.

Un système de filtrage numérique se compose en général (Fig. 8) du filtre numérique proprement dit, complété par des interfaces d'entrée et de sortie. L'interface analogique-numérique à l'entrée est composée d'un filtre passe-bas qui effectue un prétraitement analogique destiné à éviter un recouvrement des spectres lors de l'échantillonnage, suivi du convertisseur analogique-numérique travaillant à la fréquence d'échantillonnage f_s . Une conversion numérique-analogique et un filtre de lissage sont encore présents en sortie lorsque l'information traitée doit être remise sous une forme analogique. Ces interfaces d'entrée et de sortie de complexité non négligeable

sont nécessaires soit à un filtre numérique conventionnel, soit à un filtre numérique quasi-continu réalisé d'après la première forme présentée à la Fig. 1.

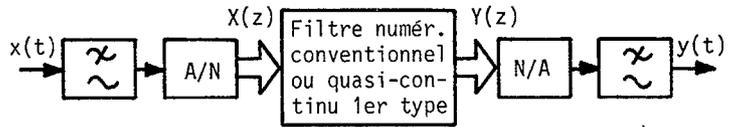


Fig. 8. Traitement numérique d'un signal analogique avec un filtre numérique classique ou un filtre quasi-continu de 1ère forme (Fig. 1).

Les filtres numériques quasi-continus, réalisés d'après la deuxième forme présentée à la Fig. 2, offrent par contre la possibilité d'utiliser des interfaces d'entrée et de sortie particulières, moins complexes et de réalisation plus simple (Fig. 9).

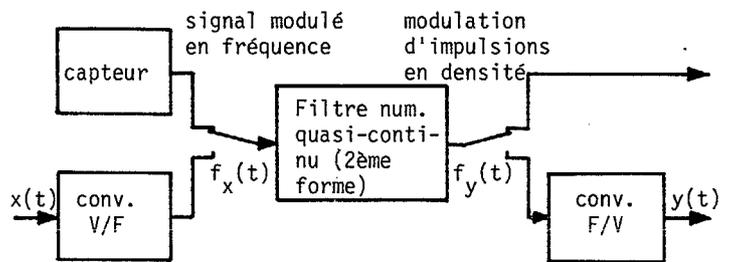


Fig. 9. Principe du traitement par un filtre numérique quasi-continu de 2ème forme d'un signal modulé en fréquence.

Un convertisseur tension-fréquence du type esquissé à la Fig. 10 transforme avantageusement le signal analogique d'entrée dans une succession d'impulsions binaires dont la densité temporelle est proportionnelle aux amplitudes analysées. Aucun filtrage préliminaire ne s'avère en général nécessaire avant cette conversion.

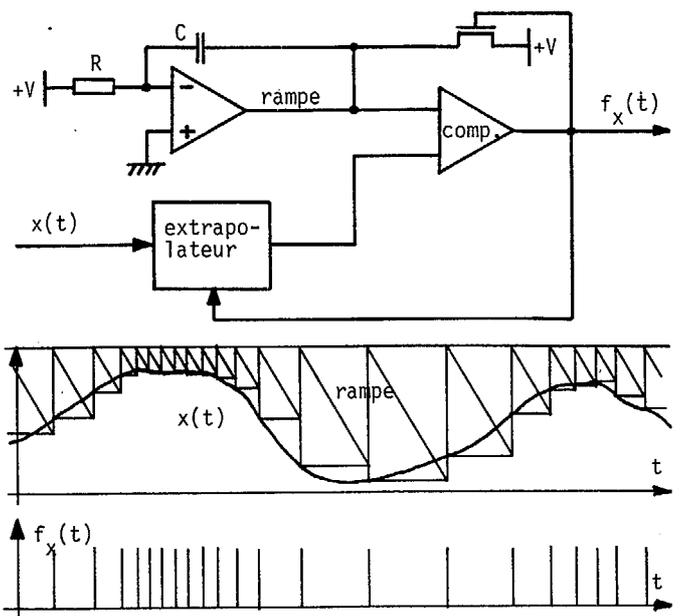


Fig. 10. Principe de la conversion tension-fréquence (signal analogique d'entrée $x(t)$ et signal de sortie sous forme d'impulsions $f_x(t)$).

Lorsque le signal traité doit apparaître sous forme analogique, un convertisseur fréquence-tension du type proposé à la Fig. 11 peut être utilisé. La conversion



TECHNIQUE DE FILTRAGE NUMERIQUE QUASI-CONTINU. AVANTAGES ET LIMITATIONS.

P.-A. Farine, F. Pellandini, Université de Neuchâtel, Suisse.

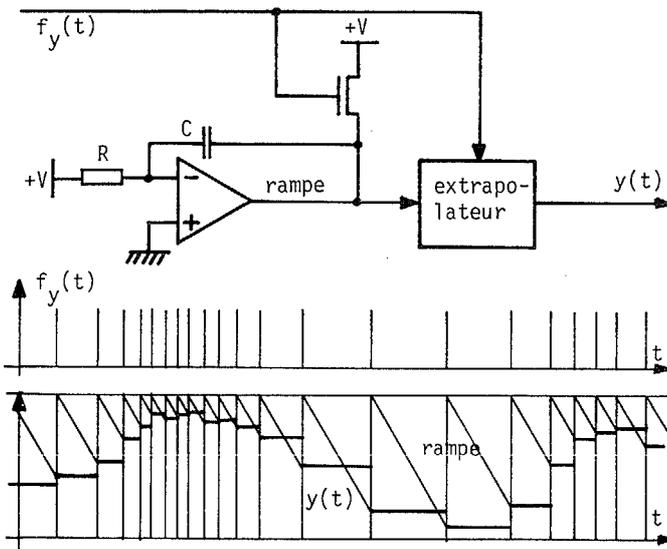


Fig. 11. Principe de conversion fréquence-tension.

tension-fréquence dont nous pouvons avoir recours dans la technique des filtres numériques quasi-continus réalisés d'après la deuxième forme de la Fig. 2, apporte une grande simplification de réalisation comparative-ment à la conversion analogique-numérique utilisée dans le filtrage numérique conventionnel. Cet avantage est encore plus marqué lorsque l'information contenue dans le signal d'entrée à traiter se trouve déjà sous la forme d'une modulation de fréquence. C'est le cas par exemple pour l'information fournie par des capteurs de température [3] ou de pression à quartz ou par d'autres capteurs dans lesquels la grandeur physique sensible à la mesure sert à modifier la fréquence d'un oscillateur [4]. Dans un tel cas, le convertisseur tension-fréquence devient simplement superflu; le filtre numérique quasi-continu peut être directement branché sur le capteur.

La conversion fréquence-tension n'est pas toujours nécessaire à la sortie du filtre quasi-continu de 2ème forme. En effet, lorsque le filtre n'est pas un passe-haut, l'information traitée est directement disponible sous forme numérique dans le dernier compteur qui représente alors la variable de sortie du filtre.

En ce qui concerne la complexité du filtre quasi-continu sans circuits d'interface, on peut affirmer que la structure quasi-continue offrent des perspectives favorables de coût d'intégration dues à l'absence de multiplieurs numériques parallèles ou séquentiels conçus avec des circuits arithmétiques. Le degré de complexité du filtre quasi-continu reste comparable avec celui des filtres numériques conventionnels, même dans le cas où un multiplexage de temps, utilisable seulement par le filtre conventionnel, permet de répartir les coûts de réalisation des circuits arithmétiques sur différentes unités de filtrage.

Dans le paragraphe 3, il a été remarqué que le filtre quasi-continu réalise l'équivalent simple précision d'une structure de filtre à récursion double travaillant en virgule flottante. Comme celui-ci, il possède donc aux abords du point $z = +1$ du plan complexe des effets de quantification des coefficients plus faibles que ceux d'un filtre numérique conventionnel à récursion simple. C'est donc pour des filtres très sélectifs (fréquence de coupure très petite par rapport aux composantes spectrales contenues dans le signal à filtrer) que le filtre numérique quasi-continu offre les meilleurs résultats quant au rapport performance-complexité.

5. LIMITATIONS DANS LES FILTRES QUASI-CONTINUS.

Le domaine de travail des filtres numériques quasi-continus reste limité aux basses fréquences (≤ 10 kHz). En effet, la fréquence de coupure du filtre est reliée à la fréquence d'horloge maximale (limitée à quelques dizaines de MHz par la technologie, présente dans les multiplieurs programmables) par deux facteurs: le premier dépend de la sélectivité du filtre (2^{n_c} , avec n_c nombre de bits nuls) et le second a une valeur minimale fixée par la précision de la définition des caractéristiques du filtrage (2^{n_v} , avec $n_v \geq n_s$, n_s est la longueur de mot significative des coefficients, selon le paragraphe 3 et [7]).

La réalisation d'un multiplexage temporel visant une meilleure utilisation du matériel (compteurs réversibles et multiplieurs programmables) n'est pratiquement pas possible à cause de la représentation quasi-continue des signaux qui caractérise ces filtres et de la libre circulation des variables dans les boucles de contre-réaction.

Des phénomènes non-linéaires peuvent perturber le bon fonctionnement des filtres numériques quasi-continus. Ils sont dus d'une part à l'échantillonnage irrégulier du signal d'entrée effectué par la conversion tension-fréquence, d'autre part à la modulation d'impulsions en densité créée par les multiplieurs programmables. Ces phénomènes peuvent toutefois être maîtrisés avec un choix correct des paramètres (choix de la fréquence maximale d'horloge des multiplieurs programmables en fonction de la largeur de bande du signal et de sa dynamique).

REMERCIEMENTS.

Ce travail a été effectué avec l'appui financier du Comité pour l'encouragement des recherches scientifiques (CERS, projet n° 1106) à Berne et d'ASULAB S.A. à Neuchâtel (Suisse). Les auteurs remercient M. Maurice Bellanger pour ses commentaires très utiles en tant que membre du jury de la thèse traitant ce sujet, présentée à l'Université de Neuchâtel [7].

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] M. Bellanger, *Traitement numérique du signal*, Masson, Paris, 1984.
- [2] R.C. Agarwal and C.S. Burrus, "New Recursive Digital Filter Structures Having Very Low Sensitivity and Roundoff Noise", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol CAS-22, pp. 921-927, Dec. 1975.
- [3] W. Zingg et C.E. Leuenberger, "Senseur de température à quartz résonnant", Applications des senseurs en microtechnique, Université de Neuchâtel, Institut de microtechnique, Suisse, Janvier 1985.
- [4] F. Rudolf, "A micromechanical capacitive accelerometer with a two point inertial-mass suspension", *Sensors and actuators*, n°4, 1983, pp. 191-198.
- [5] P.-A. Farine and F. Pellandini, "Digital filters characterized by quasi-continuous signal processing", *IASTED - MECO' 83 Symposium*, Athens, Greece, August 1983.
- [6] P.-A. Farine and F. Pellandini, "On the behaviour of quasi-continuous digital filters", *International Conference on Digital Signal Processing*, September 1984, Florence, Italy.
- [7] P.-A. Farine, *Filtrage numérique caractérisé par un traitement quasi-continu des signaux*, Thèse, Faculté des Sciences, Université de Neuchâtel, Suisse, à paraître au printemps 1985.