

Avant-propos

Aujourd'hui, l'électronique peut être considérée comme une discipline résultant de manière indissociable des progrès théoriques réalisés au cours du XX^e siècle dans les domaines de la compréhension et de la modélisation des composants, circuits, signaux et systèmes, et des formidables avancées qui ont eu lieu dans le domaine de la technologie des circuits intégrés.

Cet ouvrage tente de surmonter la difficulté d'éparpillement des savoirs consécutive à cette évolution en regroupant les principes généraux qui sont à la base de tous les composants et systèmes électroniques et les méthodes d'analyse et de synthèse nécessaires pour détailler et comprendre le fonctionnement de ces éléments et sous-ensembles. L'ouvrage est divisé en trois volumes. Chaque volume est conçu selon une idée directrice principale déclinée ensuite dans les différents concepts qui en découlent.

Ainsi, le volume 1, *Composants électroniques et fonctions élémentaires*, décrit la physique des composants à semi-conducteur et ses conséquences, c'est-à-dire les relations entre les grandeurs électriques caractéristiques et les fonctions électroniques élémentaires réalisables avec ces composants. Le volume 2, *Signaux et systèmes à temps continu*, traite des systèmes à temps continu, d'abord par une approche générale dans le premier chapitre, puis avec le sujet très riche des quadripôles dans le second chapitre. Le volume 3 est titré *Signaux et systèmes à temps discret et à niveaux quantifiés*. Les premiers, appelés aussi « systèmes échantillonnés », qui peuvent être analogiques ou numériques, sont étudiés dans le premier chapitre tandis que les seconds, qui sont des systèmes de conversion, font l'objet du second chapitre.

Chaque chapitre est assorti d'exercices avec des corrigés détaillés, qui ont deux objectifs :

- d'une part, ils permettent d'illustrer les principes généraux donnés dans le cours, en proposant de nouveaux montages d'application et en montrant comment on met en œuvre la théorie pour évaluer leurs propriétés ;

- d'autre part, ce sont des prolongements du cours qui illustrent des circuits déjà succinctement décrits, mais pour lesquels les propriétés détaillées n'ont pas été étudiées.

Le premier volume est accessible aux étudiants possédant la culture scientifique correspondant aux deux premières années d'université et permet d'acquérir les connaissances attendues en électronique en troisième année de licence en France, tandis que le niveau requis pour aborder le contenu des deux autres volumes devrait plutôt être celui de la première année de master ou du cursus d'une école d'ingénieur.

En résumé, l'électronique, telle qu'elle est présentée dans cet ouvrage, est une science de l'ingénieur qui étudie la modélisation des composants et des systèmes à partir de leurs propriétés physiques jusqu'à la mise en évidence de leurs fonctions, permettant la transformation des signaux électriques et le traitement des informations. Les différentes entités et leurs propriétés sont présentées de manière synthétique de façon à tracer des lignes directrices autour desquelles elles peuvent être regroupées, afin d'éviter éparpillement et redondance. Les représentations des signaux sont développées de manière équilibrée, ce qui implique que l'aspect spectral est mis à sa juste place. Un autre choix aurait été obsolète et à contre-courant de l'évolution moderne de cette science, à l'heure où une grande partie des problèmes de l'électronique se traitent d'abord à partir de critères relatifs à la réponse en fréquence, à la bande passante et à la modification du spectre des signaux. Ceci ne doit en rien reléguer l'application des lois de l'électrocinétique au second plan, car c'est une première étape obligée, l'électronique restant fondamentalement adossée aux circuits électriques. Les notions relatives aux circuits radiofréquence (RF) ne font pas l'objet d'un traitement séparé mais pourront être trouvées au gré des divers chapitres. La synthèse des circuits logiques relevant de l'électronique numérique et de l'informatique industrielle, la partie traitée est restreinte aux fonctions logiques utiles à la numération binaire et au séquençage élémentaire. L'auteur espère avoir contribué ainsi à apporter une base étendue pour l'analyse, la modélisation et la synthèse de la plupart des circuits actifs et passifs de l'électronique, constituant un point de départ solide pour aborder la conception et la simulation des circuits intégrés.

Introduction

Ce volume 3 traite des signaux et systèmes pour lesquels l'une des variables ou quantités mises en jeu est discrète ou quantifiée. Ceci conduit à distinguer deux chapitres, le premier concernant le cas du temps discret et le deuxième celui des niveaux discrets (ou quantifiés). Les circuits électroniques et les applications mises en œuvre sont de nature analogique, numérique ou mixte, et certaines utilisent les deux types de discrétisation. Comme dans le volume 2 [MUR 19b], il est fondamental de détailler les signaux et leurs propriétés ainsi que les circuits élémentaires qui transforment ces signaux avant de considérer les fonctions réalisées par des montages plus complexes, que l'on nomme systèmes.

Le chapitre 1 débute par l'étude des signaux à temps discret, obtenus par échantillonnage à partir de signaux à temps continu, d'abord au moyen de l'échantillonnage idéal, puis par échantillonnage réel ou par interpolation. L'usage de la transformée de Fourier (TF) est indispensable et permet de démontrer, d'une part les équivalences entre une variable discrète dans un domaine et la nature périodique de la grandeur dépendant de la variable duale dans l'autre domaine, et d'autre part le théorème fondamental qui détermine la possibilité de conserver (ou non) toute l'information contenue dans un signal lorsque l'on passe du temps continu au temps discret, appelé théorème d'échantillonnage ou théorème de Shannon. Les circuits analogiques de base sont décrits. Les autres transformées, pertinentes pour les cas où la discrétisation s'applique dans les deux domaines, temporel et fréquentiel, sont également indiquées car ce sont celles qui sont utilisées en pratique. Vient ensuite l'étude de la mesure du décalage et du déphasage entre signaux périodiques par un circuit comportant des fonctions élémentaires analogiques et logiques qui est maintenant très largement utilisé. Comme cette mesure ne s'effectue qu'une seule fois par période, le décalage et le déphasage mesurés deviennent des grandeurs discrètes. Cependant, dans beaucoup de cas, l'approximation consistant à considérer que l'on reste dans le domaine du temps continu, obtenue par interpolation et avec l'hypothèse de la stationnarité conservée, permet de détailler le fonctionnement de

la boucle à verrouillage de phase analogique et les stratégies de correction de ce système bouclé. Cette approximation permet aussi de faire le lien entre phase et fréquence, très utile pour les applications traitées ensuite. La boucle à verrouillage de phase a connu un développement excessivement important depuis les années 1970 car elle a permis des transformations de signaux et de leurs propriétés très difficiles ou impossibles à réaliser sans elle dans les domaines de l'instrumentation, de l'informatique et des communications (hertziennes, filaires, etc.) destinées au convoyage de l'information. Les fonctions principales, regroupées sous le vocable « synthèse de fréquence », sont décrites. Les boucles à verrouillage de phase numériques sont également détaillées.

La dernière partie du chapitre 1 est dévolue aux systèmes échantillonnés, et en 1^{er} lieu à la transformée en z (TZ), qui permet de les analyser, comme la transformée de Laplace (TL) permettait de le faire dans le cas des systèmes à temps continu. Les propriétés de la TZ sont soigneusement présentées afin de fournir tous les outils qui serviront dans la fin de ce chapitre et au chapitre suivant, parmi lesquelles la nouvelle signification du plan de la variable complexe z . L'étude des circuits à capacités commutées est ensuite abordée de manière didactique, car elle repose sur les principes de l'électrostatique qui sont simples mais non nécessairement familiers au lecteur lorsqu'ils sont appliqués aux réseaux de condensateurs. Ces circuits ont connu un important développement à cause de la possibilité de les intégrer naturellement en technologie CMOS et ils constituent les briques de base pour le filtrage échantillonné analogique et pour la conversion numérique-analogique ou analogique-numérique moderne. Cette partie se poursuit logiquement par l'étude des deux types de filtres échantillonnés (« IIR », à réponse impulsionnelle infinie et « FIR », à réponse impulsionnelle finie) et de leurs propriétés ainsi que des approximations nécessaires à la représentation des fonctions de transfert dans le domaine fréquentiel. La notion de transmittance dans le plan de la variable z est développée pour toutes les fonctions élémentaires utiles pour construire ces filtres. Les méthodes de synthèse de ces filtres sont brièvement décrites afin d'introduire le lecteur à l'usage des fonctions disponibles dans les logiciels MATLAB ou SciLab. Il faut souligner d'une part que les filtres FIR permettent d'accéder à des propriétés inaccessibles aux filtres IIR et analogiques, et d'autre part que tous les traitements et analyses reposant sur la TZ s'appliquent sans qu'il soit nécessaire de préciser si la technologie employée pour la mise en œuvre est analogique ou numérique. Dans le 1^{er} cas, ce sont les circuits à capacités commutées étudiés précédemment qui sont utilisés tandis que le principe de base des fonctions numériques nécessaires pour le 2^e cas est décrit pour clore cette partie. Finalement, on montre la puissance de l'analyse en variables d'état dans le domaine du temps discret et dans le plan de la variable z pour les systèmes échantillonnés. Elle donne en effet accès de manière directe à une modélisation mathématique de ces systèmes contenant leurs paramètres fondamentaux, à savoir les pôles de la transmittance dans le plan de la variable z . De plus, elle permet, à condition de faire effectuer le calcul des échantillons successifs par un moyen

informatique, de s'affranchir de toutes les approximations utilisées précédemment. Cette modélisation ouvre la voie au calcul exact de la réponse temporelle échantillonnée dans les cas de systèmes non linéaires et/ou subissant des variations de fréquence suffisamment fortes pour que certains paramètres de leur caractéristique de transfert en dépendent, ce qui est le cas dans les boucles à verrouillage de phase.

Dans le chapitre 2, on envisage les principes et les réalisations des systèmes traitant des niveaux de signal quantifiés, comme c'est le cas pour les convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique. La grandeur numérique est un nombre codé sur n bits dans le système binaire. La quantification d'un signal induit certaines dégradations, dont la première est le bruit de quantification, qui est présenté et analysé. Les autres imperfections, assimilables à des erreurs perturbant le signal original après sa conversion, sont reliées ensuite aux caractéristiques de ces convertisseurs. La conversion numérique-analogique est détaillée à travers les différents principes qui peuvent être mis en œuvre, d'une part avec les réseaux à échelles de résistances, historiquement les premiers à avoir été utilisés, et d'autre part avec les circuits à capacités commutées, bien adaptés à la technologie CMOS. La conversion inverse est ensuite présentée avec ses différents principes possibles, qui ont tous en commun d'élaborer une approximation de la grandeur analogique sous une forme numérisée puis reconvertie et comparée à la grandeur initiale, de plus en plus précise au cours des étapes successives de la conversion. Il s'agit donc de systèmes bouclés. D'une manière générale, la complexité des systèmes augmente si l'on veut réduire le temps de conversion, et la qualité du comparateur analogique (ou des comparateurs analogiques) détermine pour une part très importante la précision de la conversion.

On traite finalement les conversions « sigma-delta » ou « delta-sigma », qui sont les plus récentes. Dans son principe élémentaire, la conversion « delta-sigma » dérive de la conversion utilisant une rampe de tension et un comptage, et s'appréhende facilement. Cependant, lorsque l'on désire augmenter les performances de ce type de convertisseur, on est confronté d'une part à une sophistication importante de la modélisation, en particulier pour optimiser le rapport signal sur bruit, et d'autre part à des problèmes de stabilité de la boucle car l'on doit augmenter l'ordre du ou des filtres au-delà de 2. Pour résoudre ces problèmes, beaucoup de notions présentées dans le chapitre 1 sont utilisées. Le cœur de ce type de convertisseur est constitué par le modulateur, un système bouclé qui traite les signaux avec un nombre de bits nettement plus faible que le nombre initial ou final, désiré ou imposé, mais à un rythme beaucoup plus rapide que celui de l'entrée ou de la sortie. Les opérations réalisées par le modulateur entraînent une perte de résolution qui sera récupérée par la suite par le filtre décimateur, et un déplacement du spectre de bruit vers les hautes fréquences où il sera plus facilement filtré. Le modulateur d'ordre 1 est examiné en 1^{er} lieu puis on généralise aux modulateurs d'ordre plus élevé, ce qui permet d'établir les fonctions de transfert pour le signal et pour le bruit de

quantification. Plusieurs types de modulateur stable sont examinés. Le rôle et la façon de construire le filtre décimateur sont discutés et cette analyse permet de proposer un dimensionnement des différentes fréquences à utiliser. Finalement, le principe et la réalisation du convertisseur « delta-sigma » numérique-analogique sont présentés. Bien qu'en théorie il se déduise du convertisseur analogique-numérique en intervertissant les fonctions numériques et les fonctions analogiques, il est préférable de le décrire en faisant suivre la conversion de résolution et de rythme numériques par la conversion numérique-analogique finale et le filtrage associé, ce qui est conforme à la réalisation pratique.

L'ensemble de ce volume présente donc les signaux et les systèmes à temps discret et à niveaux quantifiés, les transformations de ces signaux en signaux à temps continu ou à niveaux continus et les transformations inverses, les circuits analogiques, numériques ou mixtes, efficaces pour réaliser ces opérations et les modèles permettant de calculer, prévoir, et dimensionner les réponses de ces systèmes. Des exercices corrigés sont joints dans le but de traiter des cas spécifiques incomplètement détaillés dans le cours afin de l'illustrer et de le compléter, et de montrer les méthodes adaptées à la résolution des problèmes posés.