

MINI-PROJET - CONCEPTION DU FILTRE DE SORTIE D'UN AMPLIFICATEUR NUMERIQUE

Introduction

Les audiophiles savent bien qu'un amplificateur n'en est pas un autre. Les bons amplis audio sont caractérisés par une *classe* (le plus souvent A ou B), qui correspond à divers critères de qualité. Le principal de ces critères est le *taux de distorsion harmonique*, qui caractérise la linéarité de l'amplificateur : un ampli imparfaitement linéaire auquel on présente un signal parfaitement sinusoïdal génère des harmoniques.

Tout récemment on a vu apparaître des amplis dits « numériques », auxquels on a associé la classe D, et qui présentent de très bonnes caractéristiques de linéarité (pour plus d'information voir Putzeys, 2003).

Le but de ce projet est de comprendre le fonctionnement de principe d'un amplificateur audio numérique de classe D basé sur la modulation PWM et d'en simuler le fonctionnement de base sous Matlab (Section 1), et de concevoir le filtre analogique final (Section 2).

1 Principe de fonctionnement

Le schéma de principe d'un ampli de classe D est donné à la Fig. 1.

Dans un ampli classique, le signal analogique (ici supposé être une sinusoïde, pour simplifier) est amplifié par deux transistors (ou, en pratique par des circuits plus complexes assimilables à des transistors), en charge respectivement des flancs positifs et négatifs de l'entrée. Chaque transistor fournit un courant de sortie proportionnel à son courant de base. Le problème majeur est celui de l'action plus ou moins coordonnée de ces transistors : au passage par zéro, le premier doit « s'éteindre » et laisser « s'allumer » l'autre. En pratique, la coordination parfaite est très difficile à assumer, ce qui provoque une distorsion de la forme d'onde et fait donc apparaître des harmoniques.

Dans un ampli numérique de classe D, le signal d'entrée de tout d'abord utilisé pour moduler la largeur d'un train d'impulsions rectangulaires (PWM : pulse Width Modulation). Cette opération transforme ainsi immédiatement le signal continu d'entrée, un signal à discret à 2 valeurs : +V et -V. L'amplification est

alors réalisée à l'aide de deux transistors en charge des tensions $V+$ et $V-$ respectivement. La zone de transition n'existe plus : lorsqu'un transistor fonctionne, on est certain que l'autre est bloqué, et réciproquement. Il reste évidemment, après amplification à reconstituer la sinusoïde cachée dans le signal PWM. Cette dernière opération se fait par filtrage du signal PWM.

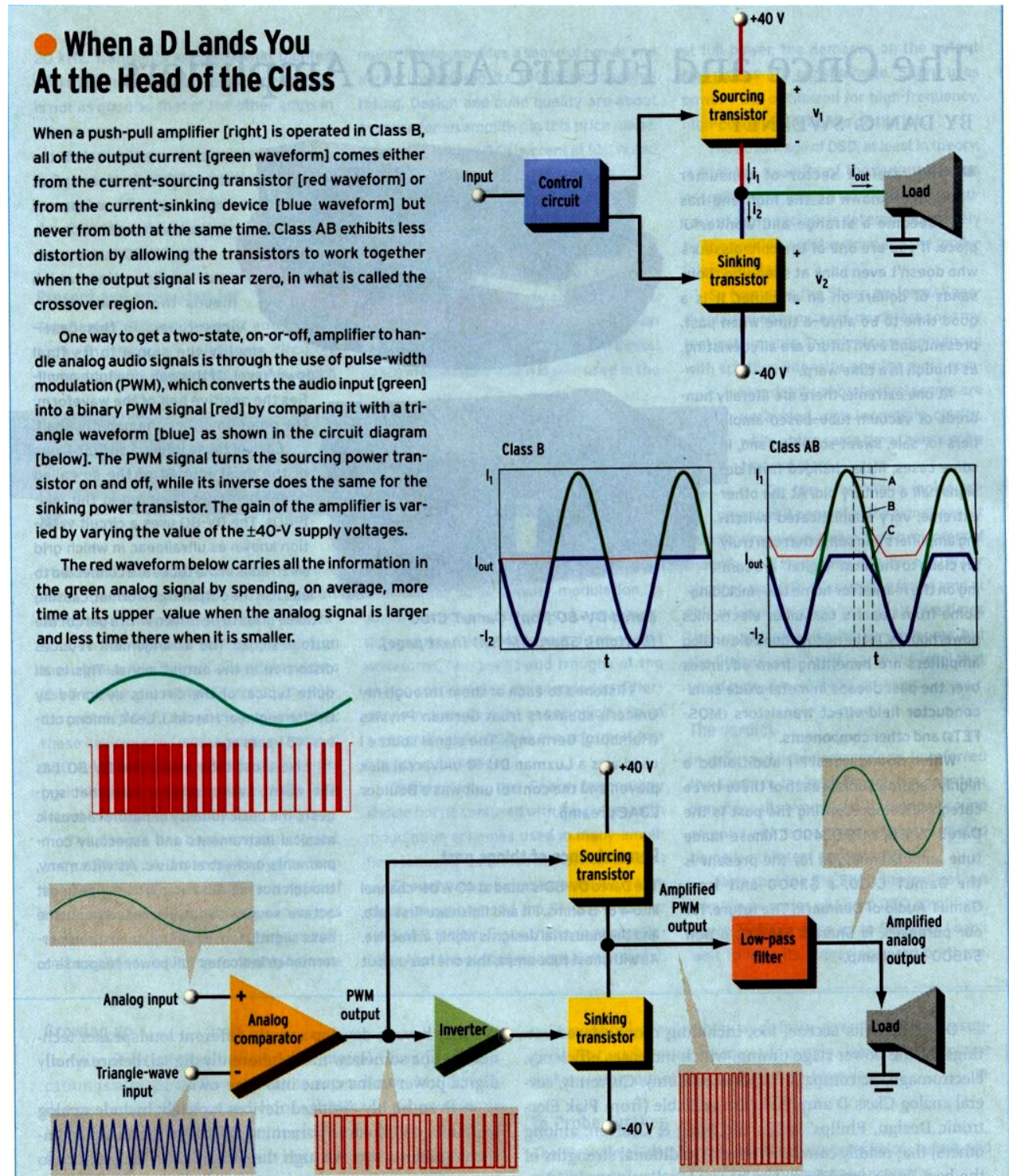


Fig. 1 Schéma de principe d'un ampli audio de classe D (d'après Putzeys, 2003)

1.1 Modulation PWM

La modulation PWM peut être réalisée par simple comparaison entre le signal d'entrée et un signal triangulaire.

1. Vérifiez-le conceptuellement sur une graphique simple.
2. Quelle est (qualitativement) l'influence de la fréquence du signal triangulaire sur le résultat ?
3. Quelle est (qualitativement) l'influence de l'amplitude du signal triangulaire sur le résultat ?
4. Créez (avec l'aide de Matlab) un signal PWM obtenu par comparaison de 5ms d'une onde triangulaire de fréquence égale à 20000 Hz avec une sinusoïde à 1000 Hz. On choisira une fréquence d'échantillonnage F_e de 1000000 Hz, afin d'avoir une représentation assez fidèle du signal modulé.
5. Que se passe-t-il si on diminue la fréquence d'échantillonnage ?
6. En dessous de quelle fréquence d'échantillonnage est-on certain que la suite d'échantillons ne donnera plus une image fidèle du signal PWM ?

1.2 Réponse d'un circuit non-linéaire en régime périodique – Taux de distorsion harmonique

Un système non-linéaire est (entre autres choses) caractérisé par le fait que, lorsqu'on lui soumet un signal $x_{TO}(t)$ sinusoïdal pur en entrée, le signal de sortie $y_{TO}(t)$ contient des composantes à des fréquences harmoniques de la fréquence du signal d'entrée ($f_i = i f_0$), créées par le système. Ces harmoniques additionnelles résultent de la *distorsion* du signal d'entrée.

Le *taux global de distorsion harmonique* est une grandeur permettant de caractériser la linéarité ou la non-linéarité d'un système. Il est défini par le rapport entre la valeur efficace du signal de sortie dont on a éliminé le fondamental et la valeur efficace du signal de sortie complet :

$$TDH = \frac{\sqrt{\left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} |Y_k|^2 \right) - (|Y_1|^2 + |Y_{-1}|^2)}}{\sqrt{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |Y_k|^2}} = \sqrt{1 - \frac{(|Y_1|^2 + |Y_{-1}|^2)}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |Y_k|^2}} < 1$$

Exemple

Si on introduit un signal $x(t) = \cos(\omega_0 t)$ à l'entrée d'un système non-linéaire très simple caractérisé par la relation $y(t) = x(t) + x^2(t)$, il vient immédiatement (Fig. 2) :

$$y(t) = \cos(\omega_0 t) + \cos^2(\omega_0 t) = 1/2 + \cos(\omega_0 t) + \cos(2\omega_0 t)/2$$

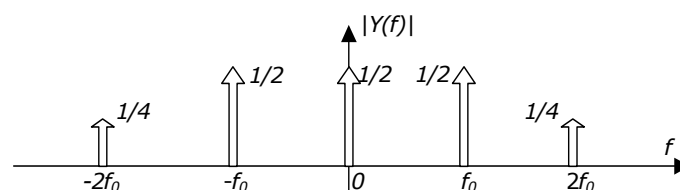


Fig. 2 Transformée de Fourier du signal de sortie $y(t)$

On en déduit que le taux de distorsion harmonique du système est de :

$$TDH = \sqrt{1 - \frac{1/4 + 1/4}{1/4 + 1/4 + 1/4 + 1/16 + 1/16}} = \sqrt{\frac{6}{14}}$$

1.3 Amplification

7. En supposant que les transistors amplificateurs commutent très rapidement, simuler l'amplification du signal précédent par 100
8. Utilisez la fonction freqz (calcul de Transformée de Fourier Discrète) pour visualiser la transformée de Fourier du signal PWM après amplification.

Le signal utilisé ici étant échantillonné, sa transformée de Fourier discrète (calculée par freqz) entre $f=0$ et $f=Fe/2$ (Fig. 3) ne donne une bonne image de la transformée de Fourier du signal analogique sous-jacent que si le théorème de Shannon est respecté. On a en effet (chap 7 du cours, eq (7.41)):

$$F^+(f) = F(f) * \left[\frac{1}{T_e} \delta_{f_e}(f) \right] = \frac{1}{T_e} \sum_{k=-\infty}^{\infty} F(f - kf_e)$$

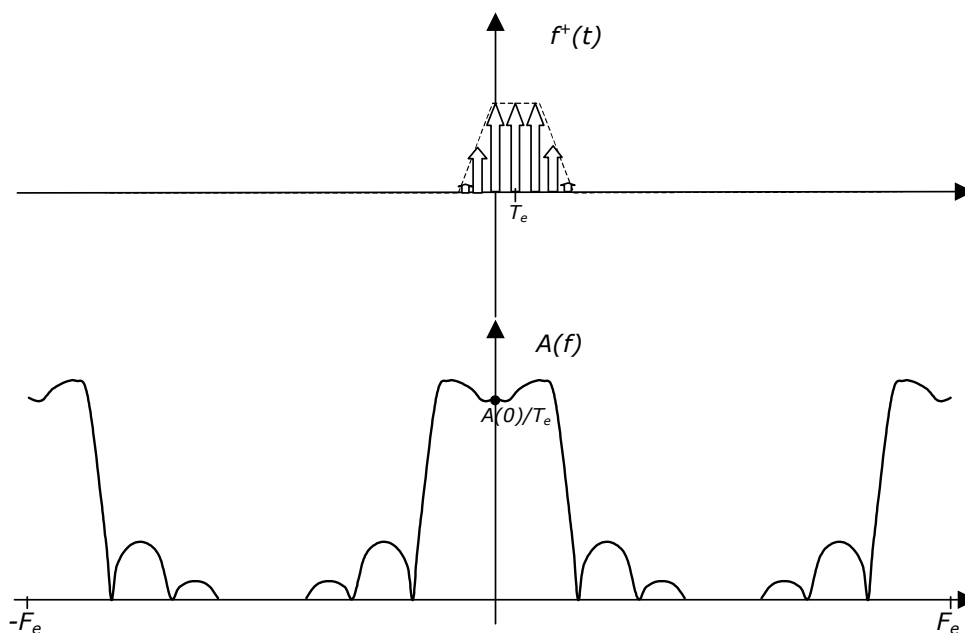


Fig. 3 Signal échantillonné et sa transformée de Fourier discrète

9. La condition de non-recouvrement condition semble-t-elle respectée ici ?
10. Retrouve-t-on le signal de départ (amplifié) dans la transformée du signal PWM (amplifié) ?

1.4 Filtrage

11. Quel type de filtre permettrait de retrouver la sinusoïde de départ, et quelles en seraient les spécifications ?
12. Que peut-on dire du TDH du modulateur PWM pour la sinusoïde considérée plus haut ?

13. Quel serait l'ordre de grandeur du TDH de l'ampli complet (avec filtrage final) ?

2 Conception du filtre de sortie

Il s'agit maintenant de réaliser l'approximation et la synthèse du filtre de sortie dont on a imposé les spécifications à la section précédente. On utilisera la technologie RCAO¹

14. A l'aide de Matlab, réaliser l'approximation analytique du filtre (pour les approximations de Butterworth, Chebychev I, et Cauer). Pour chaque type, donner le degré du filtre qui en résulte, et la transmittance opérationnelle correspondante.²
15. Pour chaque type d'approximation, visualiser les positions des pôles et zéros ainsi que la réponse en fréquence; vérifier que ces réponses en fréquence vérifient bien les spécifications.
16. En fonction de ces résultats, faire un choix sur l'approximation à retenir.
17. Réaliser la synthèse du filtre retenu, en cascade de cellules du second degré RCAO (groupement pôles-zéros ; répartition de la constante K ; choix des cellules ; calcul des éléments de chaque cellule)
18. Vérifier la réponse en fréquence de chaque cellule isolément, sous Electronics Workbench, ainsi que la réponse en fréquence globale du filtre.
19. Pour la cellule la plus sélective, mesurer, sous Electronics Workbench, la sensibilité de ω_p à une variation des valeurs des éléments R ou C dont ω_p dépend. Cette valeur correspond-elle bien à la valeur théorique ?
20. Modifier le circuit pour n'utiliser que des composants normalisés (voir datasheets en annexe). Choisir les valeurs de ces composants de façon à modifier le moins possible la réponse en fréquence. Le filtre vérifie-t-il toujours les spécifications ? Si pas, donner les meilleures spécifications obtenues.
21. Réaliser le générateur PWM à l'aide d'Electronics Workbench (dans les mêmes conditions que pour la simulation réalisée sous Matlab), et passez ce signal à travers le filtre que vous avez conçu. Le signal de sortie ressemble-t-il bien à la sinusoïde de départ ?
22. Estimer le prix du filtre (composants uniquement) si on le réalise à la pièce.

Bibliographie

Putzeys, Bruno, 2003. Digital Audio's final frontier, *IEEE Spectrum*, March 2003, pp. 35-39.

Simulation (1-10)

¹ Ceci est un exercice d'école : vu les niveaux de tension en sortie de l'ampli, les amplis op classiques vont vite saturer. En pratique, on utiliserait des composants d'électronique de puissance.

² En pratique, pour éviter de rendre les points suivants trop fastidieux, on reverra éventuellement les spécifications pour ne pas dépasser un ordre 5 dans le meilleur des cas.

6 LABORATOIRES DE TRAITEMENT DU SIGNAL

```
%Class D amp simulation
%T. Dutoit 2003

tri=(cumsum(square(0.0000000001+2*pi*20000*(0:1/1000000:0.005)))/12.5-1);
% 5 ms of 20000Hz triangle sampled at 1 Mhz

sig=cos(2*pi*1000*(0:1/1000000:0.005));
% 5 ms of 1000Hz sine sampled at 1 Mhz

pwm=(sig>tri)*2-1;
plot(pwm);

%amplification
pwm=pwm*100;

figure(2)
freqz(pwm,1)
```

T. Dutoit, avril 2003.