

Examen Transmission de l'Information

Ordinateurs, téléphones (portables) et communication interdits, supports papiers autorisés.

1. Quelles sont les trois grandeurs qui caractérisent un signal radiofréquence et sur lesquelles une information peut être transmise ?

Amplitude, fréquence, phase

2. Quel est le mode de modulation le plus simple à démoduler ? Justifier en expliquant la méthode mise en œuvre dans sa version analogique, et dans sa version numérique échantillonnée en temps discret.

AM : pont de diode en redresseur et condensateur, ou valeur absolue et filtre passe-bas

3. Un signal radiofréquence émis en onde continue (CW) à 433,5 MHz est échantillonné à 2 Méchantillons/seconde complexes après transposition en bande de base par un oscillateur local à 434,0 MHz. L'enregistrement dure 2 ms : quel est l'indice du pic observé dans la transformée de Fourier discrète lors de l'affichage du spectre ? Représenter schématiquement le spectre en quantifiant l'axe des abscisses.

$2 \cdot 10^6 / 2000 = 1000$ points pour 2 MHz = 2 kHz/point et -500 kHz = -250.

4. Quelle est la fréquence de coupure d'un filtre passe bas nécessaire à éviter le repliement de composantes spectrales indésirables lors d'une décimation d'un facteur D d'un signal de puissance P échantillonné à f_s ? Quel est le débit de sortie après application de cette opération de traitement ? Quelle est l'excursion du spectre résultant ?

coupure à $f_s / (2D)$ pour avoir un débit de f_s / D s'étendant entre $\pm f_s / D$

5. Un détecteur $\{I, Q\}$ fournit deux signaux en quadrature qui forment naturellement un complexe. Comment s'exprime le module (amplitude) ? La phase ?

$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$ et $\varphi = \text{atan}(Q/I)$

6. Quel composant analogique permet de sommer la fréquence de deux oscillateurs ?

mélangeur : $\exp(j\omega_1 t) \cdot \exp(j\omega_2 t) = \exp(j(\omega_1 + \omega_2)t)$

7. Quel traitement numérique de signaux échantillonnés en temps discret permet de sommer la fréquence d'un oscillateur numérique avec le signal d'un oscillateur échantillonné par un convertisseur analogique-numérique radiofréquence ? Comment exprimer l'oscillateur local f_0 échantillonné à fréquence f_s pendant une durée T dans le formalisme de Matlab, GNU/Octave ou Python ?

multiplication par $t=[0:T-1]/f_s; lo=\exp(j*2*pi*f_0*t);$

8. Un émetteur dans la bande commerciale FM transmettant une puissance de 100 mW à 100 MHz se trouve à 10 km du récepteur mobile qu'est une voiture se déplaçant à 36 km/h. On justifiera ci-dessous tous les développements numériques, la solution n'étant que secondaire face au raisonnement :

- (a) Exprimer la puissance émise en dBm.

100 mW = 20 dBm.

- (b) Quelle est la puissance reçue par le véhicule en supposant que les deux antennes émettrice et réceptrice sont isotropes ? On rappelle que $20 \log_{10}(c/(4\pi)) = -147,56$ dB.

Friis: pertes de $20 \log_{10}(10^4) + 20 \log_{10}(10^8) - 147,56 = 80 + 160 - 147,56 \simeq 240 - 147 = 93$ dB qu'on soustrait à 20 dBm donc -73 dBm.

- (c) Quantifier l'impact du mouvement du véhicule récepteur par rapport à l'émetteur ? Est-ce que l'impact est significatif ?

Doppler : $v = 36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$ et $df = f \times v/c = 100/300 \times 10 = 1000/300 = 3 \text{ Hz}$ négligeable face à la bande passante du signal.

- (d) Quel est le circuit analogique de démodulation d'un signal émis en modulation de fréquence ?

PLL

- (e) Quel est l'impact du mouvement du véhicule sur la sortie de ce circuit ?
offset sur la tension de sortie puisque PLL est convertisseur fréquence-tension
- (f) Quel est l'impact du résultat sus-cité sur la sortie audio-fréquence de la musique démodulée ?
aucun puisque le haut-parleur se comporte comme filtre passe-haut
- (g) Le signal est émis dans une bande spectrale de 100 kHz. Comment se compare la puissance du signal reçu au plancher de bruit thermique ? On rappelle que $10 \times \log_{10}(k_B T) = -174$ dBm/Hz à $T = 300$ K avec $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzmann.
plancher de bruit = $-174 + 10 \log_{10}(10^5) = -124$ dBm qui est plus de 50 dB sous le signal.

9. Dans l'exemple ci-dessus, l'antenne sur le toit métallique du véhicule récepteur fait 50 cm de longueur. Est-ce une longueur judicieuse ? Justifier.

300/100=3 m de longueur d'onde et le quart d'onde du monopole est 75 cm donc non, l'antenne est mal taillée pour cette fréquence.

10. Supposons qu'un signal échantillonné à 2 Méchantillons/s présente deux composantes spectrales dominantes, une à 100 kHz que nous désirons conserver et l'autre à 110 kHz que nous désirons rejeter. Combien de coefficients d'un filtre à réponse impulsionnelle finie faut-il pour répondre aux exigences de ce gabarit ? Ce résultat est-il acceptable pour la puissance de calcul d'un ordinateur personnel moderne ?

10 kHz de transition donc 2000/10=200 coefficients.

11. Dans sa note d'application pour Linear Technology, Richard Markell présente dans "*Take the Mystery Out of the Switched-Capacitor Filter: The System Designer's Filter Compendium*" (Note d'Application 40 de Mars 1990) deux constructions d'un circuit actif visant à proposer un filtre passe bas de fréquence de coupure $1/(2\pi RC)$. Les deux photographies sont

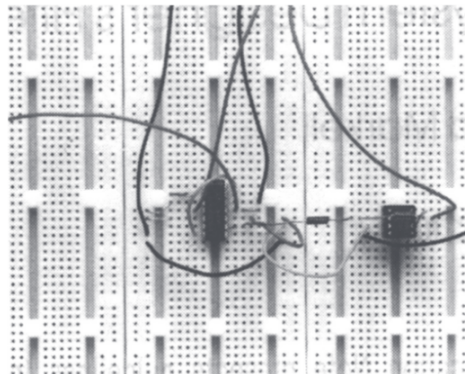


Figure 3. Improperly Constructed "Poor" Switched-Capacitor Filter Breadboard

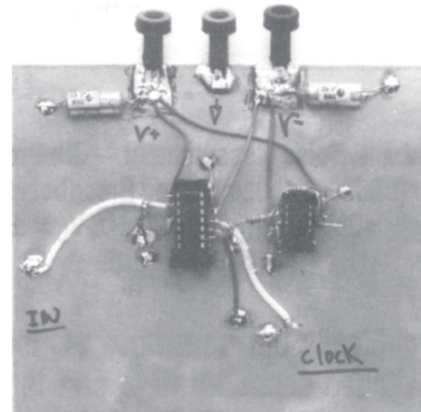


Figure 5. Properly Constructed "Good" Switched-Capacitor Filter Breadboard

- (a) Argumenter quantitativement pourquoi le circuit de gauche est inexploitable avec des signaux radiofréquences que nous pourrions considérer comme transmis à 100 MHz, pour des pistes sur la plaque Labdec de 1 cm de long, séparées les unes des autres de 1 mm et avec une piste qui fait 1 mm de profondeur. On pourra considérer que le plastique est de permittivité relative de 4. On rappelle que la permittivité du vide est 8,9 pF/m. Dans tous les cas on pourra considérer que l'impédance caractéristique d'entrée des composants actifs est de l'ordre de 10 kΩ.

$C = \epsilon_r \epsilon_0 \times S/d$ avec $S = 10^{-2} \times 10^{-3}$ et $d = 10^{-3}$ donc il reste $C = 8,9 \times 4 \times 10^{-2} \simeq 10 \times 4 \times 10^{-2} = 0,4$ pF. L'impédance à 100 MHz est $1/(C\omega)$ soit l'inverse de $0,4 \cdot 10^{-12} \times 2\pi \cdot 10^8 \simeq 2\pi \times 0,4 \times 10^{-4} \simeq 2,5 \cdot 10^{-4}$ donc $10^4/2,5 = 4000$ Ω. Cette valeur est de l'ordre de l'impédance d'entrée des composants actifs et aura un impact significatif (pont diviseur de tensions).

- (b) Qu'en est-il avec un signal audiofréquence à 10 kHz ?

- (c) Pourquoi le montage de droite avec les pattes des composants en l'air ("dead bug") est bien meilleur pour les applications radiofréquences que le montage de gauche s'appuyant sur une plaque Labdec ? Argumenter.

la fréquence est 10^4 fois plus faible donc l'impédance 10^4 fois plus élevée et négligeable devant l'impédance d'entrée des composants.

Pour résumer, $C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \times S/d = 8,9 \text{ pF/m} \times 4 \times 10^{-2} \times 10^{-3}/10^{-3} = 0,36 \text{ pF}$ et $C \cdot 2\pi \cdot f = 0,36 \cdot 10^{-12} \times 2\pi \times 10^8 = 0,36 \times 6,28 \times 10^{-4} \Rightarrow Z_C = 10^4/2,5 = 4000 \Omega$ donc $4000 \Omega \ll 10 \text{ k}\Omega$ et la plaque Labdec domine l'impédance du circuit. À 10 kHz, on divise f par 10^4 et l'impédance est $4 \text{ M}\Omega$, nettement plus grand que l'impédance des composants, donc sans impact sur le comportement du circuit.

12. Quelle(s) opération(s) mathématique(s) numérique(s) permet(tent) de s'affranchir de la modulation BPSK afin de retrouver la porteuse et ainsi comparer le signal reçu avec cette référence pour en déduire le signal transmis ?

mise au carré (ou $\arctan(Q/I)$)

13. Un oscillateur à 12,345 MHz présente une sensibilité en température de 5 ppm/K. Cet oscillateur cadence un récepteur de station dans la bande FM centrée sur 100 MHz par multiplication de fréquence par boucle à verrouillage de phase. La température du véhicule dans lequel est installée la radio augmente de 30 K. Quelle est la dérive de fréquence induite et quel est son impact sur la réception d'une station FM commerciale (WBFM) ? Détailler le calcul qui permet d'arriver aux conclusions.

La multiplication par PLL ne fait que déplacer la fréquence mais la sensibilité relative df/f reste la même donc à 100 MHz, $df = 500 \text{ Hz/K}$. Lorsque la température augmente de 30 K, la fréquence varie de 15 kHz, bien moins que la largeur spectrale d'une station FM et la démodulation compensera cet écart de fréquence de l'oscillateur de réception par rapport à l'oscillateur local qui a servi à émettre le signal.

14. Même question que ci-dessus mais cette fois avec une station radio-amateur en FM en bande étroite (NBFM) qui ne fait que 5 kHz de largeur.

Cette fois la dérive thermique est significative et il faudra suivre la station en corrigeant manuellement la fréquence de l'oscillateur local.