

Etude d'une boucle de phase numérique et insertion dans une chaine de communications de base

Mastères Systèmes de Communications Spatiales

2013-2014

1 Introduction

L'objectif de ces deux séances de TP est de simuler sous Matlab le fonctionnement d'une boucle à verrouillage de phase numérique et de l'insérer dans une chaine de communication de base (sans codage canal).

2 Etude d'une boucle de phase numérique de type NDA

2.1 Etude en boucle ouverte

- Ouvrir le fichier PLL_QPSK_BO_NDA_incomplet.m
- Compléter l'expression du signal reçu et celle de la sortie du détecteur
- Tracer la caractéristique du détecteur (courbe en S) pour une erreur de phase comprise entre -180° et 180°
- Que peut-on dire à propos de l'ambiguïté de phase ? Quelle solution peut-on envisager ?

2.2 Etude en boucle fermée

Dimensionnement de la boucle

Pour une boucle du deuxième ordre, le calcul des coefficients A et B est illustré par le programme AB.m

Acquisition

- Ouvrir le fichier `PLL_QPSK_NDA_incomplet.m`
- Compléter l'expression de la sortie du détecteur
- Tracer la réponse à un saut de **phase** de 10° pour $E_b/N_0 = 100 \text{ dB}$ et $E_b/N_0 = 7 \text{ dB}$. Tester plusieurs valeurs de la bande de bruit afin d'observer son influence.
- Tracer la réponse à un saut de **fréquence** $\Delta f/R_s = 1\%$ pour $E_b/N_0 = 100 \text{ dB}$ et $E_b/N_0 = 7 \text{ dB}$.

Poursuite

- Tracer la gigue de phase en fonction de la bande de bruit dans la boucle : utiliser le fichier `PLL_QPSK_jitter_NDA.m`. On prendra $E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$.
- Tracer la gigue de phase en fonction du rapport signal à bruit E_b/N_0 : utiliser le fichier `PLL_QPSK_NDA_EbNo.m`. On prendra $BLT = 10^{-2.5}$.
- Les courbes observées sont elles conformes à la théorie? (cf annexe)

3 Insertion dans la chaine de communications numériques de base

3.1 Chaîne de base

On utilisera le modulateur mis en place dans le projet de communications numériques. On générera une suite de symboles QPSK équiprobables et indépendants, c_k , conformément à la constellation du standard DVB-S (figure 1).

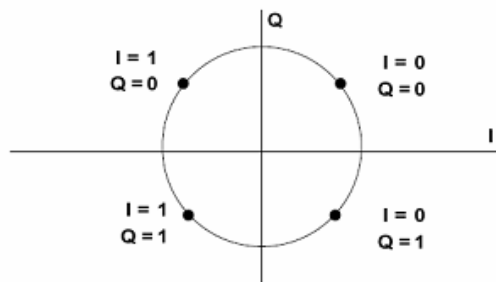


FIGURE 1 – Constellation QPSK du DVB-S

En utilisant la fonction " kron " de matlab, on générera la suite d'impulsions de Dirac correspondante $\sum_k c_k \delta(t - kT_s)$. La période symbole T_s sera composée de N échantillons : $T_s = NT_e$, T_e étant la période d'échantillonnage et N le nombre d'échantillons par symbole.

On mettra en forme en utilisant un filtre en racine de cosinus surélevé de roll off 0.35 (norme DVB-S) et de réponse impulsionnelle notée $h(t)$. La synthèse de $h(t)$ pourra être effectuée en utilisant par exemple la fonction *rcosfir()* de matlab.

On ajoutera un canal AWGN (canal satellite fixe, voie aller) à la chaîne de transmission précédente. On pourra utiliser plusieurs puissances de bruit que l'on calculera en fonction de E_b/N_0 , le rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur. La variance du bruit à appliquer sur les voies en phase et quadrature du bruit complexe $n_e(t)$ s'écrit de la manière suivante :

$$\sigma_{n_I}^2 = \sigma_{n_Q}^2 = \frac{\sum_n |h(n)|^2 \sigma_c^2}{2E_s/N_0}, \quad (1)$$

où σ_c^2 représente la variance des symboles c_k , $h(n)$ la réponse impulsionnelle numérique du filtre de mise en forme et E_s/N_0 le rapport signal à bruit par symbole à l'entrée du récepteur.

On placera en réception un filtre permettant de respecter le critère de Nyquist, l'échantillonneur (on choisira l'instant optimal d'échantillonnage en faisant attention de prendre en compte les retards introduits par les filtres de la chaîne de transmission), et l'organe de décision (détecteurs à seuil sur les voies réelles et imaginaires). On pourra calculer le taux d'erreur binaire afin de vérifier qu'il est conforme à la théorie.

3.2 Intégration de la boucle de phase

Compléter la chaîne de transmission précédente en introduisant une erreur de synchronisation de porteuse. En repartant des programmes en boucle fermée, intégrer le dispositif de correction de la phase à la chaîne de réception. Evaluer l'impact de la synchronisation sur les performances de la chaîne de bout en bout.

Annexe : fonctionnement de la boucle de phase

Structure d'une boucle de synchronisation

La structure d'une boucle de phase est représentée sur la figure suivante :

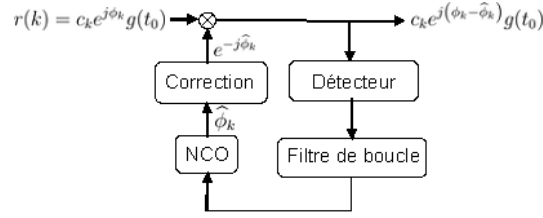


FIGURE 2 – Boucle de phase

- $r(k)$ désigne un échantillon du signal reçu en sortie du filtre adapté, correspondant à un symbole d'information c_k .
- Φ_k représente l'erreur de phase à estimer pour le symbole reçu $r(k)$, et $\hat{\Phi}_k$ désigne le paramètre estimé dans la boucle, pour ce même symbole. On notera par la suite $\varepsilon = \Phi - \hat{\Phi}$ l'erreur résiduelle après correction.
- Pour une boucle de phase de type NDA (non data aided) et avec la constellation QPSK illustrée sur la figure 1, l'expression du détecteur d'erreur est la suivante :

$$u_{NDA}(k) = -\text{Im} \left[\left(r(k) e^{-j\hat{\Phi}} \right)^4 \right]$$

Dans le cas idéal, la sortie du détecteur est proportionnelle à l'erreur résiduelle ε sur le paramètre, après correction du signal reçu : $u(\varepsilon) = G\varepsilon$ où G est appelé gain du détecteur. En pratique, la réponse du détecteur ne peut généralement être considérée comme linéaire que lorsque l'erreur résiduelle est faible (ce qui est effectivement le cas ici, après convergence de la boucle). *Le gain du détecteur correspond alors à la pente à l'origine de sa caractéristique en boucle ouverte.*

- Le choix du filtre détermine le comportement de la boucle. Il est généralement choisi d'ordre 1 ou 2 ; sa fonction de transfert s'écrit alors sous la forme $F(z) = A + \frac{B}{1-z^{-1}}$, où $B = 0$ si le filtre est du premier ordre. Le calcul des coefficients A et B est détaillé plus bas pour une boucle d'ordre 2.
- Le NCO (Numerically Controlled Oscillator) permet la mise à jour de l'estimée du paramètre $\hat{\Phi}$ à chaque itération de la boucle. Dans une boucle

numérique, il consiste en un simple filtre intégrateur : $N(z) = \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}}$.

Bande de bruit

La bande de bruit dans la boucle est un paramètre important, car il mesure la largeur de bande de la réponse en fréquence de la boucle fermée, qui se comporte comme un filtre passe-bas sur le paramètre à estimer Φ . Dans une boucle de phase, et en présence de bruit Gaussien, la gigue σ_ε^2 , c'est à dire la variance de l'erreur résiduelle ε , est proportionnelle au rapport $\frac{B_l T_s}{E_s/N_0}$, où E_s/N_0 est le rapport signal à bruit dans le canal de transmission :

$$\sigma_\varepsilon^2 \propto \frac{B_l T_s}{E_s/N_0} \quad (2)$$

Le coefficient de proportionnalité est égal à 1 dans le cas d'une porteuse non modulée. Sinon, il peut être déterminé par simulations. On calcule généralement les paramètres du filtre de boucle en fonction de la bande de bruit souhaitée. La relation entre la bande de bruit et les paramètres du filtre est étudiée ci-dessous.

Paramètres du filtre de boucle

Le dimensionnement de la boucle s'effectue par l'intermédiaire des paramètres du filtre A et B . Leurs valeurs sont calculées en fonction de $B_l T_s$, c'est à dire la bande de bruit de la boucle. Pour la boucle d'ordre 2 décrite ci-dessus, on montre que les paramètres du filtre de boucle vérifient les relations suivantes :

$$AG = \frac{16\zeta^2 B_l T (1 + 4\zeta^2 - 4B_l T)}{(1 + 4\zeta^2)(1 + 4\zeta^2 - 8\zeta^2 B_l T)} \quad (3)$$

$$BG = \frac{64\zeta^2 (B_l T)^2}{(1 + 4\zeta^2)(1 + 4\zeta^2 - 8\zeta^2 B_l T)} \quad (4)$$

- ζ est un paramètre appelé facteur d'amortissement, qui détermine le comportement de la boucle : plus ce paramètre est grand, plus la boucle sera stable, mais plus elle mettra de temps à converger. On considérera ici $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$.
- Une fois ζ fixé et le gain du détecteur G estimé par une simulation en boucle ouverte, on détermine donc les paramètres A et B du filtre de boucle en fonction de la bande de bruit souhaitée, à partir des expressions précédentes. Les figures suivantes illustrent la relation entre la bande de

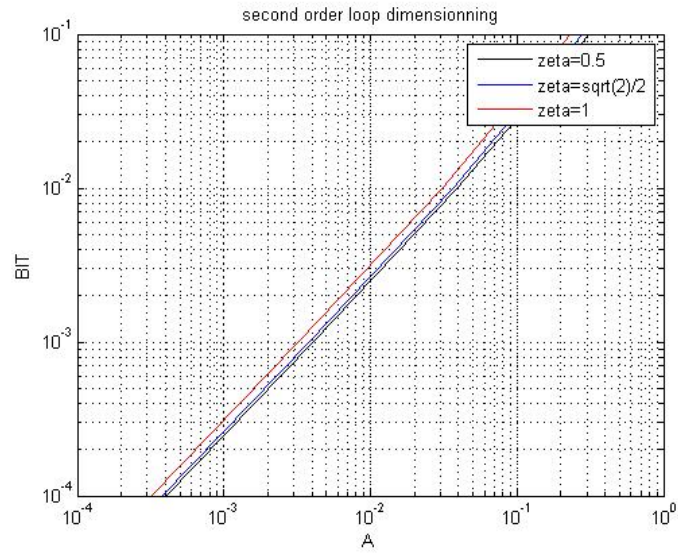


FIGURE 3 – Détermination du paramètre A

bruit et les paramètres A et B , pour un détecteur de gain unitaire $G = 1$.

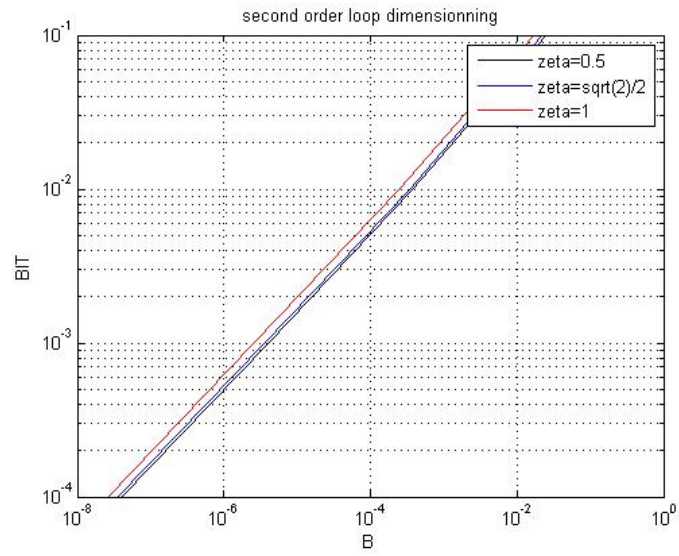


FIGURE 4 – Détermination du paramètre B