
Commande d'un actionneur électrique par communication sans fil Zigbee

Jean-François Llibre, Beñat Arruti Gesalaga, Yoan Clouet

IUT Toulouse II Blagnac

LATTIS

1 Place Georges Brassens - BP 60073 - 31703 Blagnac Cedex

llibre@iut-blagnac.fr

Section de rattachement : 63

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. Nous présentons ici un asservissement de position en sans fil d'un moteur à courant continu. La consigne élaborée au niveau d'un PC distant est envoyée via un module Zigbee à un autre module Zigbee, qui lui relié au moteur à commander, renvoie la mesure de la position. La commande numérique mise en œuvre doit être suffisamment robuste et la période d'échantillonnage judicieusement choisie pour s'affranchir des contraintes imposées par la communication hertzienne. Nous utilisons dans la commande, un prédicteur estimateur à base de filtre de Kalman. Ce dernier substitue, au retour de l'information réelle éventuellement perdue ou retardée (en l'occurrence ici la position du moteur), une information anticipée adéquate. Nous assurons ainsi par ce biais la stabilité de l'asservissement numérique en boucle fermée de ce moteur piloté par des modules Zigbee.

MOTS-CLÉS : actionneur électrique, asservissement, filtre de Kalman, communication sans fil, technologie zigbee.

1. Introduction

Habituellement, la régulation en vitesse ou en position d'un actionneur électrique s'effectue via des liaisons filaires. Si pour des contraintes d'exploitation, les consignes et les informations de mouvement ne peuvent transiter par des fils, alors on peut envisager des communications hertziennes entre l'organe de commande (par exemple un micro-ordinateur PC) et le système à commander (par exemple un moteur à courant continu). Ainsi, pour des applications nécessitant du suivi de trajectoires, ce mode de commande peut être utilisé. Cependant, les communications hertziennes peuvent induire des retards variables et des pertes d'informations dans la transmission, dus à

l'environnement ou aux interférences extérieures. Ces contraintes ont une influence directe sur la stabilité du système (Tipsuwan et al. 2003).

L'objet de l'étude est un asservissement en position d'un moteur à courant continu où la transmission radio entre le PC et l'alimentation de l'actionneur s'effectue via des modules Zigbee, basés sur la norme IEEE 802.15.4. Après avoir présenté le système à commander et les modules Zigbee utilisés, nous identifierons le système afin d'en déduire un modèle. A partir de ce dernier, nous pourrions élaborer le prédictif estimateur à base de filtre de Kalman à implanter dans le PC qui permettra d'élaborer une estimation de la sortie position du moteur en cas de perte d'information. Pour finir, nous présenterons les résultats de simulations et les mesures expérimentales qui valident ce principe de commande.

2. Présentation du système

2.1. L'actionneur à commander

L'actionneur que nous allons asservir en position est le moteur à courant continu à aimants permanents de la maquette pédagogique MV-451 de chez Alecop. Ce moteur entraîne via un réducteur de rapport 30, deux roues codeuses et une dynamo tachymétrique. Associé au réducteur, un capteur potentiométrique analogique donne l'indication de position angulaire. Pour commander et alimenter le moteur, la maquette Alecop dispose de modules correcteurs analogiques proportionnel et/ou intégral et un module d'alimentation (hacheur MLI) appelé « driver ».

2.2. Les modules communicants Zigbee

La technologie Zigbee utilisée ici s'appuie sur la norme IEEE 802.15.4 pour les couches physiques et liaisons. Cette technologie est idéale pour la communication entre des capteurs et des actionneurs dans des systèmes embarqués et est caractérisée par une portée de quelques dizaines de mètres, un débit faible (max. 250 kbit/s) et une faible consommation énergétique (Van den Bossche et al. 2010).

Nous utiliserons dans notre application, la topologie peer to peer et le mode non coordonné. Ainsi, un module Zigbee est relié à un micro ordinateur de type portable via une liaison série USB (cf. figure 1). La consigne de position angulaire est envoyée au second module Zigbee distant, qui lui est relié au moteur à courant continu (MCC) à asservir en position via le driver. L'information de position angulaire réelle est alors

transmise par le module Zigbee distant au premier module relié au PC assurant ainsi la boucle d'asservissement.

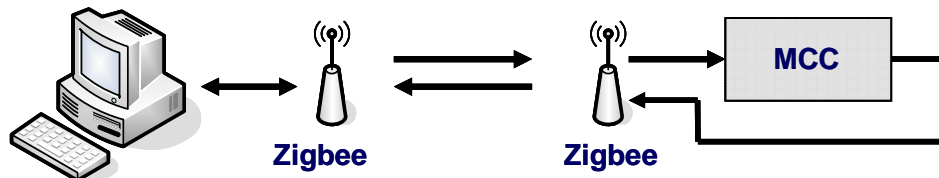


Figure 1 . Schéma de principe de l'asservissement en sans fil avec les modules Zigbee

Les modules Zigbee utilisés sont des modules 13213-SRB de Freescale, certifiés IEEE 802.15.4 et travaillant à 2,4 GHz. Ils sont alimentés par deux piles de 1,5V type LR6 ce qui les rend intéressant pour des applications embarquées.

3. Identification du système, établissement du modèle

3.1. Caractéristiques du système à commander

Le système à commander comprend le hacheur (driver), le moteur, le capteur de position angulaire et le correcteur analogique. Le driver peut être modélisé par la fonction de transfert : $K_H \cdot e^{-\tau \cdot p}$. Pour simplifier la mise en équation d'état on négligera le retard τ . Le correcteur analogique utilisé pour l'asservissement de position sera le correcteur proportionnel de gain K_C . Il est à noter que la maquette est alimentée en ± 15 V et que les correcteurs analogiques saturent à partir de ± 7 V. Le capteur de vitesse est une dynamo tachymétrique de coefficient 7 mV/tr.mn^{-1} . Le capteur de position angulaire (capteur potentiométrique) donne une tension proportionnelle à la position angulaire : 10 V pour 360° . Le moteur à courant continu à aimants permanent a les caractéristiques suivantes : tension d'alimentation maximale ± 10 V, courant nominal 0,6 A et vitesse nominale 1200 tr.mn^{-1} .

3.2. Asservissement de position en boucle fermée en filaire

Suite à un essai en boucle ouverte, on a pu modéliser l'ensemble moteur et capteur par une fonction de transfert du 1^{er} ordre avec le gain $K_m = 0,94$ et la constante de temps $T_m = 116 \text{ ms}$ pour le moteur et le gain $K = 0,83$ pour le capteur analogique. La figure 2

représente le schéma bloc de l'asservissement en position en boucle fermée (BF) avec le correcteur proportionnel K_C et l'accumulateur H de la maquette. Le segment de droite en pointillé indique la zone où on « coupe les fils » pour faire la commande en sans fil par l'intermédiaire des modules Zigbee (cf. §4.1). S_Ω est la sortie tension de la dynamo tachymétrique image de la vitesse et S_θ la sortie tension du capteur analogique.

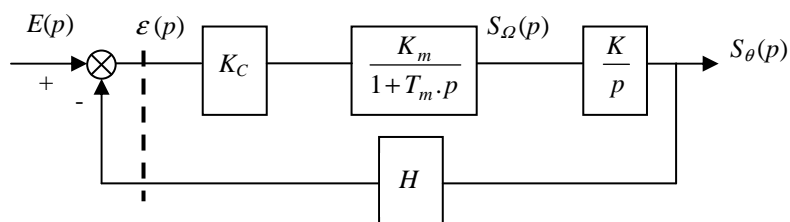


Figure 2 . Schéma bloc de la BF en position

La figure 3 représente la réponse en position à un échelon de consigne pour un correcteur réglé de manière à assurer un compromis vitesse de la réponse et stabilité. Pour ce faire on a réglé K_C à 10 et H à 1.

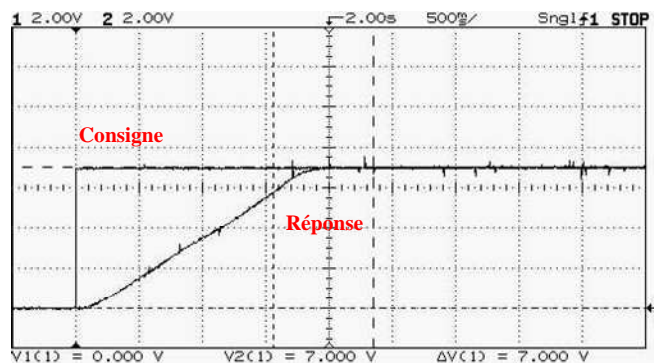


Figure 3 . Réponse à une consigne échelon de 250° (7 V)

Bien que la réponse n'ait pas l'allure de celle d'un système du 1^{er} ordre, on peut estimer la constante de temps à environ 1,2 s. Cette dernière, suffisamment lente, nous laisse supposer que l'asservissement en sans fil du système est réalisable.

3.3. Passage aux équations d'état

A partir du schéma bloc de la figure 2, on en déduit les équations d'état dans l'espace discret [1] qui régissent les évolutions du système. On choisit comme variable d'état $X = (S_\theta, S_\omega)^\top$ qui correspond aux variables physiques « position » et « vitesse ».

$$X_{k+1} = A.X_k + B.E_k = \begin{pmatrix} 1 & KT_e \\ -\frac{HK_C K_m T_e}{T_m} & 1 - \frac{T_e}{T_m} \end{pmatrix} X_k + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_C K_m T_e}{T_m} \end{pmatrix} E_k \quad [1]$$

$$Y_k = C.X_k = (1 \ 0)X_k$$

4. Principe de la commande en sans fil

4.1. Principe de l'estimateur-prédicteur

Afin d'assurer la robustesse de l'asservissement en sans fil, nous mettons en place un estimateur prédictif à base d'un filtre de Kalman. Ce dernier permettra de s'affranchir des éventuels retards ou pertes d'informations. Nous utiliserons le correcteur analogique du système afin de comparer les deux commandes avec et sans fil. La figure 4 montre le principe de commande en sans fil mis en place.

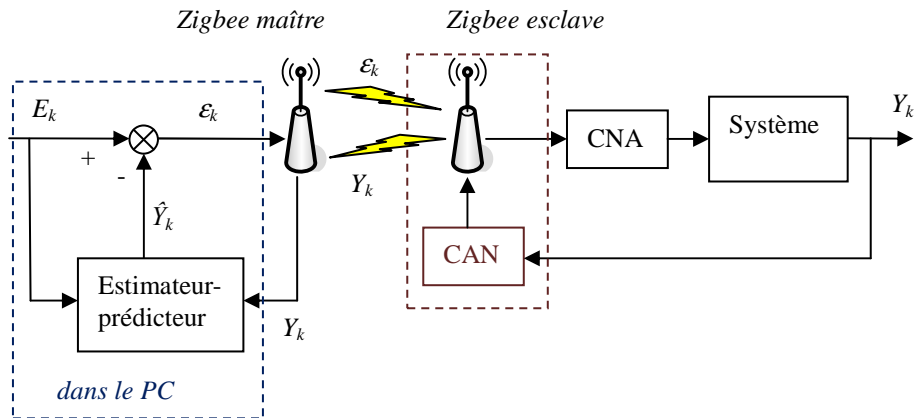


Figure 4 . Schéma bloc du système à commander en sans fil

Le module Zigbee côté PC est appelé Zigbee maître. Il envoie la consigne, en fait le signal d'erreur ε_k et reçoit le signal de sortie du système Y_k qui est la sortie position $S_{\theta k}$.

issue du capteur potentiométrique. Le module Zigbee côté système est lui appelé Zigbee esclave. Pour ce dernier, on utilise le CAN incorporé pour numériser l'information de position. L'erreur ε_k reçue est égale à la consigne E_k moins l'estimation \hat{Y}_k de la sortie position. Le système correspond à l'ensemble : correcteur, driver, moteur à courant continu et capteur potentiométrique ; soit tous les blocs de la figure 2.

Le programme à implanter dans le PC, doit effectuer l'estimation de la sortie position \hat{Y}_k dans le cas où la mesure Y_k est soit perdue, soit entachée d'une erreur, soit n'est pas reçue à l'instant « k ». Pour ce faire, on utilisera le filtre de Kalman où la mise en œuvre se fait en deux étapes (Alazard 2005).

La première étape est une étape de prédiction. A l'instant k , on connaît l'état et on prédit l'état à l'instant $k + 1$ en utilisant le modèle donné en [1] :

$$\hat{X}(k+1/k) = A.\hat{X}(k/k) + B.E(k) \quad [2]$$

On calcule le signal d'erreur ε_{k+1} à envoyer :

$$\varepsilon(k+1) = E(k+1) - \hat{Y}(k+1) = E(k+1) - C.\hat{X}(k+1/k) \quad [3]$$

La deuxième étape est une étape de recalage. A l'instant $k + 1$, on recale la prédiction avec l'innovation (mise à jour de l'estimée par la nouvelle mesure) via le gain du filtre K_f que l'on a déterminé avec le logiciel Matlab (cf. § 4.2) :

$$\hat{X}(k+1/k+1) = \hat{X}(k+1/k) + K_f [Y(k+1) - C.\hat{X}(k+1/k)] \quad [4]$$

Pour donner plus de confiance au modèle ou aux mesures, il est nécessaire d'estimer les covariances des bruits Q et R qui seront fixées par simulation (cf. § 4.2).

4.2. Simulation de l'asservissement de position en sans fil

La période d'échantillonnage est un paramètre important à fixer pour les simulations et pour la commande réelle du système. On doit la choisir au moins dix fois plus petite que celle du système asservi en boucle fermée, soit inférieure à 120 ms.

Pour simuler cette commande, on a utilisé le logiciel Matlab. Le bloc système de la figure 4 est simulé par les matrices d'état A' , B' , C' données en [5]¹.

$$X_{k+1} = A'.X_k + B'.\varepsilon_k = \begin{pmatrix} 1 & K.T_e \\ 0 & 1 - \frac{T_e}{T_m} \end{pmatrix} X_k + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K.C.K_m.KT_e}{T_m} \end{pmatrix} \varepsilon_k \quad [5]$$

$$Y_k = C'.X_k = (1 \quad 0)X_k$$

¹. Ces matrices correspondent aux blocs de K_C à H de la figure 2 entre les pointillés.

Après plusieurs simulations (en tenant compte de la saturation du correcteur), la période d'échantillonnage optimale a été obtenue pour $T_e = 30$ ms. Au niveau du filtre de Kalman, on a donné plus d'importance au modèle mathématique issu de l'identification du système qu'aux mesures. Pour ce faire, on a ajusté les covariances des erreurs telles que Q et R soient faibles. La figure 5, présente la sortie position simulée du système (étoiles) ainsi que la sortie estimée par le filtre (ronds). La robustesse de la commande est testée par des pertes d'informations fixées toutes les 10 périodes d'échantillonnage. On peut constater que le filtre de Kalman corrige correctement et permet d'assurer l'asservissement.

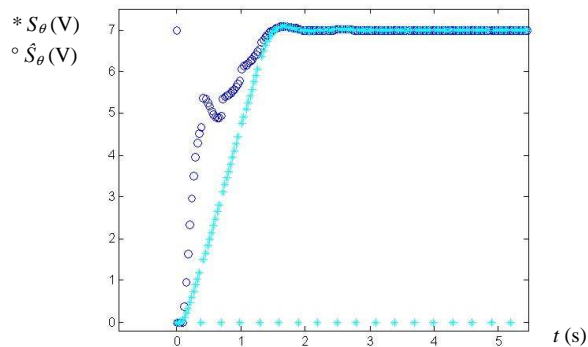


Figure 5 . Simulation du système avec $T_e = 30$ ms, $Q=2$ et $R=1$ et perte d'informations toutes les $10T_e$ pour une consigne de 7V soit 250°

4.3. Considération sur la période d'échantillonnage

Le port série du PC qui est relié au module maître est configuré à 57600 bauds ($278 \mu\text{s}$ pour les 2 octets à envoyer), vitesse maximale compatible entre le PC et le module. Les modules Zigbee communiquent entre eux à 250kbit/s (soit $96 \mu\text{s}$ pour les 3 octets à envoyer : deux octets de données et un octet d'en tête). Le module Zigbee maître attend pendant 1 ms un accusé de réception (ACK). S'il ne le reçoit pas, il peut réémettre de la même manière 4 fois (5 émissions consécutives programmées). Au maximum, le temps de transmission du PC vers le système est donc d'environ 5 ms. La consigne reçue par radio est convertie par un CNA (AD545 d'Analog Device, temps de conversion de 200 ns), puis est prise en compte par le système (correcteur analogique, driver, moteur et capteur potentiométrique), puis est convertie par le CAN incorporé au module Zigbee esclave (temps de conversion de $15 \mu\text{s}$). La sortie position du système numérisée est alors envoyée du module esclave vers le module maître. Le temps de retour est donc aussi d'environ 5 ms (5 émissions possibles si pas d'ACK reçue) à majorer de 1 à 2 ms (temps au niveau du système). Nous obtenons donc une boucle de transmission des informations de maximum 12 ms que l'on peut majorer de 10 ms si on tient compte des temps de calcul du PC et des accès au port série de celui-ci. La période

d'échantillonnage doit donc être comprise entre 22 ms et 120 ms, et le choix effectué dans la simulation de 30 ms sera donc expérimenté (cf. §4.2).

5. Expérimentation de la commande en sans fil

Nous avons effectué un programme en C à l'aide de Dev-C++ qui gère le port USB du PC pour la communication avec le module Zigbee maître. Il traite aussi les informations pour calculer la commande à envoyer par l'utilisation du filtre de Kalman décrit précédemment. La figure 6 présente un essai pour une consigne de 5 V correspondant à 175° avec les signaux affichés issus du module Zigbee maître (pour le retour de S_θ mesuré).

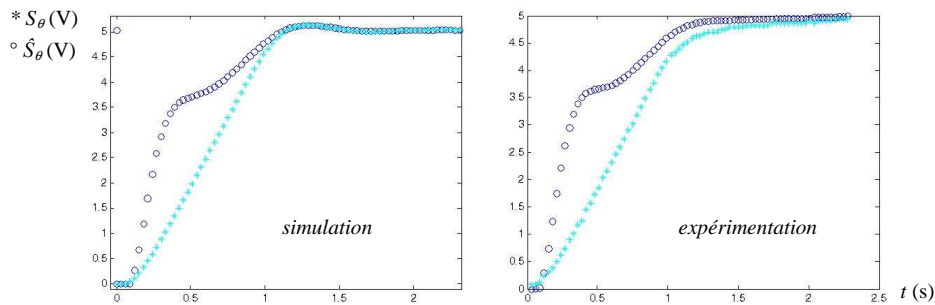


Figure 6 . Sorties estimées (ronds) et réelles (étoiles) en simulation et expérimentation pour une consigne de 5 V soit 175°

La figure 7 montre un autre essai pour une consigne de 4,5 V soit 160° avec les signaux pris au niveau du système par l'intermédiaire d'un oscilloscope.

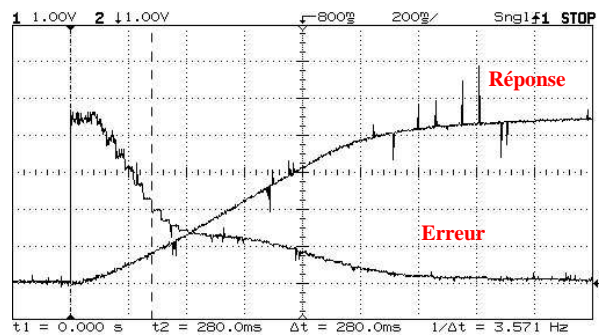


Figure 7 . Signal d'erreur et sortie position réelle pour une consigne de 4,5 V soit 160°

Les frottements de la maquette non pris en compte dans la modélisation, conduit au niveau des courbes expérimentales à ce que la valeur finale de la position est atteinte sans dépassement. Au vu des figures 8 et 9, on peut constater que l'asservissement en position du moteur via des modules Zigbee par l'utilisation d'un filtre de Kalman fonctionne correctement. On peut ainsi les comparer à l'asservissement filaire de la figure 3.

6. Conclusion

L'asservissement en sans fil, via des modules Zigbee, mis en œuvre a permis grâce à l'emploi d'un prédictor-estimateur à base d'un filtre de Kalman d'en assurer la stabilité. Nous avons ainsi mis en évidence la robustesse de l'asservissement en position d'un moteur à courant continu. La constante de temps du système était assez lente (environ 120 ms) et la période d'échantillonnage choisie était de 30 ms. On peut envisager sur le même principe, l'asservissement en vitesse du moteur. Pour ce faire, il faudrait diminuer la période d'échantillonnage à la valeur minimale trouvée, soit environ 10 ms, et par le même temps augmenter la vitesse de la communication série entre le PC et le module Zigbee et limiter le nombre de retransmissions entre les modules en cas de perte d'informations.

Une autre étape, consisterait à s'affranchir du correcteur analogique de la maquette. Nous avons expérimentés une commande avec un correcteur entièrement numérique qui a donné satisfaction. Au niveau simulation, nous avons également testé une commande par placement de pôles avec un observateur et un estimateur ainsi qu'une commande LQG associé à un filtre de Kalman qui cependant semblaient moins intéressantes au niveau rapidité que celles présentées ici.

Bibliographie

Alazard D., Introduction au filtre de Kalman, notes de cours Supaero, janvier 2005.

Tipsuwan Y., Chow M-Y., « *Control methodologies in networked control systems* », Control Engineering Practice, vol. 11, Elsevier, 2003, p. 1099-1111

Van den Bossche A., Val T., Campo E., « *Un système de communication radio adapté à la robotique mobile coopérante basé sur IEEE 802.15.4 / ZigBee* », JESA : Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 1-2010, Lavoisier, janvier 2010.