

Dimensionnement d'un CAN par Adéquation de sa Dynamique pour la Réception de Plusieurs Signaux

Baptiste LAPORTE-FAURET^{1,2}, Guillaume FERRÉ¹, Dominique DALLET¹, Bryce MINGER³, Loïc FUCHÉ²

¹Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400, Talence, France

²Thales, 110 Avenue du Maréchal Leclerc, 49300 Cholet, France

³Thales, 4 Avenue des Louvresses, 92230 Gennevilliers, France

prenom.nom@{¹ims-bordeaux.fr, ^{2,3}thalesgroup.com}

Résumé – Cet article aborde la question de la dynamique d'un Convertisseur Analogique Numérique (CAN) lors de la réception simultanée de deux signaux. Nous montrons qu'il est possible d'acquérir un signal intra-quantum grâce à la contribution d'un signal de plus forte puissance qui lui fait traverser les niveaux de quantification. Une nouvelle façon de dimensionner un CAN est ainsi proposée, confirmée par l'étude de la démodulation de signaux intra-quantum ainsi que par un processus expérimental avec des radios logicielles..

Abstract – This paper discusses the dynamic range of an Analog to Digital Converter (ADC) when two signals are simultaneously received. We show that an intra-quantum signal can be acquired with the contribution of a stronger signal which makes it cross the quantum levels. Thus, a new ADC sizing metric is proposed, confirmed by the correct demodulation of intra-quantum signals and an experimental setup with Software Defined Radios.

1 Introduction

Les communications des systèmes IoT, notamment ceux opérant à longues portées dans des bandes libres d'utilisation, constituent aujourd'hui un véritable défi pour la numérisation. Nous devons en effet être capable d'acquérir simultanément de nombreux signaux dans une large dynamique de puissance. Ceci est la conséquence de la distance entre les émetteurs et récepteurs, le fading ou encore la coexistence dans la même bande de fréquences de différents standards de communications.

Dans ce processus, les performances des Convertisseurs Analogiques Numériques (CAN) sont essentielles afin de correctement numériser les signaux reçus sans perte d'information. Cependant, si l'on considère un signal fort reçu simultanément avec un signal faible, ce dernier peut être perdu d'après la définition théorique de la dynamique du CAN [1]. En effet, la dynamique correspond au ratio entre la valeur la plus grande et la plus faible qu'un CAN peut mesurer. On entend par signal fort et signal faible des signaux dont les amplitudes et donc puissances sont resp. fortes et faibles.

Cette définition est établie pour un signal seul mais n'est pas forcément respectée lors de la réception simultanée de plusieurs signaux. Dans ce cas de figure, nous proposons une nouvelle approche pour définir la résolution d'un CAN nécessaire afin de numériser une certaine dynamique de puissance. Cette approche est par ailleurs plus adaptée que celle proposée en [2] où la résolution nécessaire est surévaluée.

Nous souhaitons donc montrer que cette définition théorique de la dynamique peut être dépassée en étudiant les cas où un CAN idéal est parcouru par :

1. Un signal faible,

2. Un signal fort et un signal faible

Pour ce faire, la dynamique est analysée au travers de simulations à partir de signaux mono-ton, modulés puis d'un point de vue expérimental afin de proposer un nouveau dimensionnement des CAN.

Cet article est donc organisé comme suit. La section 2 rappelle la définition théorique de la dynamique et propose une nouvelle limite adaptée à la réception simultanée de plusieurs signaux en considérant des signaux mono-ton. La section 3 valide ce nouveau dimensionnement en comparant des taux d'erreur binaire (TEB) issus de signaux de communications numériques. Enfin, la section 4 apporte une validation expérimentale avec des radios logicielles et la section 5 présente une conclusion et une ouverture à ce travail.

2 Numérisation de signaux mono-ton

Cette section rappelle la définition théorique de la dynamique d'un CAN et propose une nouvelle limite prenant en compte la réception simultanée de deux signaux.

2.1 Réception d'un signal seul

Avant de considérer la réception de plusieurs signaux, il est important de bien définir la résolution nécessaire d'un CAN pour numériser correctement un signal analogique seul. En effet, l'étape de quantification peut entraîner la perte d'un signal faible si ce dernier se situe entre deux niveaux de quantum espacés du pas de quantification q .

La dynamique est une métrique permettant de dimensionner la résolution nécessaire pour quantifier un certain rapport de puissance. Elle est définie comme le rapport entre la pleine

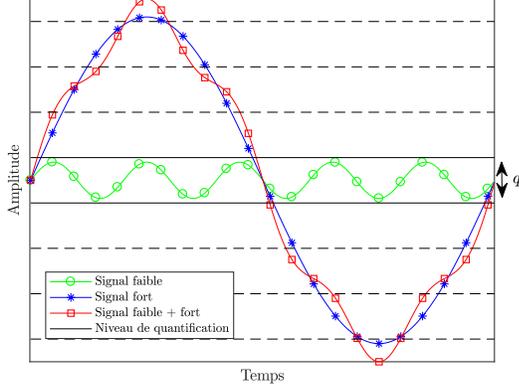


FIGURE 1 – Signal faible porté par un signal fort lui permettant de traverser le niveau de quantum avant numérisation

échelle PE et le pas de quantification [1] :

$$(DR)_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{PE}{q} \right) = 6.02 \times res \quad (1)$$

Avec res , la résolution en bits du CAN et $q = \frac{PE}{2^{res}}$. On peut ainsi déduire la résolution nécessaire pour une dynamique donnée.

Cependant, cette définition n'est pas adaptée à la réception simultanée de différents signaux avec un certain rapport de puissances comme expliqué par la suite.

2.2 Réception simultanée de plusieurs signaux

Lors du processus de quantification, il est possible qu'un signal intra-quantum ne soit pas perdu si un signal de plus forte puissance lui permet de traverser les niveaux de quantum. Ce phénomène que nous qualifions de portage peut être observé sur la figure 1. On peut remarquer que le signal faible seul va disparaître après le CAN contrairement à la somme de ce dernier avec un signal de plus forte puissance. En effet, l'information fréquentielle du signal faible est contenue dans la somme des deux signaux.

Il est donc possible d'observer des signaux possédant une dynamique supérieure à la définition théorique dans le cas de la réception simultanée de deux signaux. Si on définit un ensemble de points \mathcal{M} , cela revient à respecter la condition suivante :

$$x_s(kT_e) + x_w(kT_e) > \frac{q}{2} \quad (2)$$

Avec T_e le temps d'échantillonnage du CAN et $k \in \mathcal{M}$. $x_s(kT_e)$ représente le signal fort numérisé et $x_w(kT_e)$ le signal intra-quantum.

Cet article se concentre sur le portage d'un signal faible par un signal de plus forte puissance mais d'autres moyens comme l'ajout d'un bruit thermique peuvent être utilisés. Dès lors, la réception d'un signal est limitée par le bruit de quantification introduit par le CAN et ne dépend plus du niveau de quantum.

Dans ce contexte, nous montrons qu'il est possible de définir une nouvelle métrique pour le dimensionnement d'un CAN.

2.3 Nouvelle métrique proposée pour le dimensionnement d'un CAN

Nous souhaitons étudier, d'un point de vue analyse spectrale, le bruit de quantification qui est le nouveau facteur limitant.

Si l'on considère un signal sinusoïdal parcourant la PE du CAN, le plancher de bruit moyen, noté $(B_m)_{dBFS}$, est défini comme le rapport signal à bruit théorique par rapport à la PE plus un gain de traitement. Ainsi, comme explicité en [3], l'expression du bruit moyen dépend du nombre de points N de l'algorithme FFT comme exprimé en (3).

$$(B_m)_{dBFS} = -6.02 \times res - 10 \log_{10}(N - 3) + 1.24 \quad (3)$$

Néanmoins, pour connaître la valeur minimale du signal faible pouvant être détectée, la variance de l'estimateur doit être déterminée. Comme expliqué dans [4, 5], la variance du périodogramme est égale à σ_w^4 avec $\sigma_w = \frac{q}{\sqrt{12N}}$. En effet, comme détaillé en [6], le processus de quantification peut être modélisé comme l'addition d'un bruit blanc pour un signal d'entrée proche de la pleine échelle et un CAN idéal.

Cette variance doit en outre être normalisée par B_m puisque nous travaillons par rapport à la pleine échelle. Ainsi, nous obtenons en (4) une nouvelle limite notée DR_p pour le signal faible pouvant être reçu lorsque celui-ci est reçu simultanément avec un signal de plus forte puissance.

$$(DR_p)_{dBFS} = (B_m)_{dBFS} - 10 \log_{10} \left(\frac{\left(\frac{q^2}{12N} \right)^2}{B_m^2} \right) \quad (4)$$

Cette limite n'est pas absolue mais nous permet de mieux dimensionner le CAN puisque dans le cas de la réception simultanée de 2 signaux et pour une dynamique donnée, la résolution nécessaire est inférieure à celle attendue théoriquement. Ce phénomène de portage est par la suite validé par des simulations en considérant des signaux de communications numériques.

3 Numérisation de signaux de communications numériques

Dans cette section, nous souhaitons vérifier que la réception simultanée de deux signaux permet bien de dépasser la dynamique théorique au travers de résultats de simulation en considérant des signaux de communications numériques.

3.1 Système considéré

On note $a_k = I_k + jQ_k$ avec $k \in [0, K - 1]$ une séquence de symboles indépendants et identiquement distribués, T_s le temps symbole et $g(t)$ un filtre de mise en forme demi Nyquist. Ainsi, la version discrète au temps d'échantillonnage du CAN T_e , avec $T_e \ll T_s$, de l'enveloppe complexe du signal émis peut s'exprimer comme suit :

$$s_l(nT_e) = \sum_{k=0}^{K-1} a_k g(nT_e - kT_s) \quad (5)$$

Par la suite, on note $s_{l_w}(nT_e)$ l'enveloppe du signal faible et $s_{l_s}(nT_e)$ celle du signal fort. On modélise également le bruit thermique par un bruit blanc gaussien discret additif $n_l(nT_e) \sim \mathcal{N}_C(0, \sigma_n^2)$. Ainsi, si l'on considère que le récepteur est capable de numériser une bande de fréquences contenant à la fois le signal fort et le signal faible, le signal en bande de base numérisé par le CAN peut s'écrire :

$$y(nT_e) = x_w(nT_e) + x_s(nT_e) + n_l(nT_e) \quad (6)$$

En considérant que les signaux sont synchronisés et que le canal est non sélectif en fréquence, $x_w(nT_e)$ et $x_s(nT_e)$ resp. le signal faible et fort numérisé s'écrivent :

$$x_w(nT_e) = A_w s_{l_w}(nT_e) e^{j2\pi f_w nT_e} \quad (7)$$

$$x_s(nT_e) = A_s s_{l_s}(nT_e) e^{j2\pi f_s nT_e} \quad (8)$$

Avec f_w et f_s resp. la fréquence porteuse en bande de base du signal faible et fort et A_w et A_s leur amplitude telle que $A_w < A_s$ pour notre analyse.

L'amplitude du signal fort est choisie proche de la pleine échelle mais de telle manière que le CAN ne soit jamais saturé. Celle du signal faible est déterminée selon un rapport de puissance noté PR défini tel que :

$$(PR)_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{PE}{A_w} \right) \quad (9)$$

Le signal faible est ensuite démodulé afin d'effectuer d'obtenir des courbes de TEB présentées par la suite.

3.2 Résultats et interprétations

Nous représentons des courbes de TEB du signal faible pour une modulation QPSK et un filtre en racine de cosinus surélevé. Un modèle linéaire de CAN permet de simuler l'étape de quantification qui nous intéresse.

La figure 2 représente l'évolution du TEB pour différentes valeurs de PR en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_0}$ pour un signal faible seul. Lorsque la valeur de PR est en deçà de la dynamique théorique, i.e. 72 dB pour un CAN de 12-bit, la courbe de TEB est proche de la limite théorique pour une modulation QPSK définie comme $P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$. Cette évolution du TEB commence à se détériorer lorsque la limite théorique de 72 dB est dépassée. Il est cependant intéressant de noter que le bruit thermique considéré permet de dépasser légèrement cette limite. En effet, cette addition permet dans une certaine mesure au signal faible de dépasser le niveau de quantum. C'est aussi pour cette raison que le TEB augmente pour des PR de 76 dB, 78 dB et 80 dB : A fort $\frac{E_b}{N_0}$, le bruit thermique n'est plus en mesure de porter le signal faible et sa démodulation devient impossible comme en témoigne la courbe correspondant à un PR de 90 dB. Ces résultats permettent néanmoins de confirmer la limite théorique pour un signal seul.

Nous voulons maintenant vérifier que la réception simultanée de deux signaux permet d'améliorer la démodulation du signal faible. À ce fin, la figure 3 représente l'évolution du TEB pour un signal faible porté. On peut voir qu'un TEB de 10^{-4}

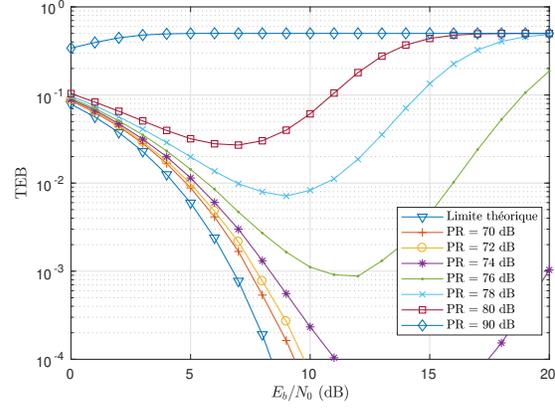


FIGURE 2 – TEB du signal faible seul pour une modulation QPSK, un CAN de 12-bit et différents PR

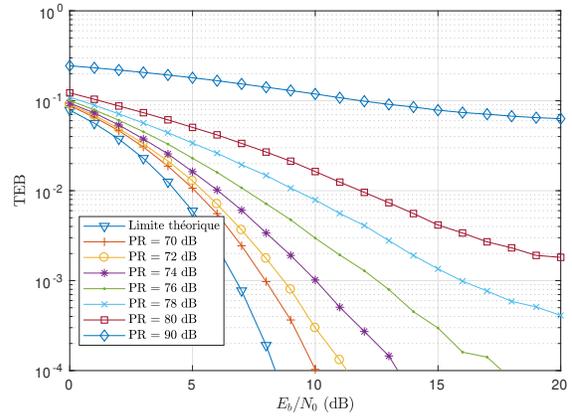


FIGURE 3 – TEB du signal faible porté pour une modulation QPSK, un CAN de 12-bit et différents PR

peut être atteint pour un PR = 76 dB contrairement à ce observé en figure 2. En effet, la démodulation du signal faible est améliorée à fort $\frac{E_b}{N_0}$ puisqu'ici le bruit thermique ne joue pas de rôle de porteur mais seulement de perturbateur.

Ces résultats sont donc cohérents avec l'explication précédente qui indique que le signal porté n'est plus limité par le quantum et donc la limite théorique de la dynamique. Ces résultats avec des signaux de communications numériques tendent à montrer que ce phénomène de portage peut être appliqué à des cas concrets.

4 Numérisation par radios logicielles

Une autre façon de valider ces résultats est de procéder à des expérimentations avec des radios logicielles comme détaillé dans cette section.

Toutes les expérimentations ont été menées avec des radios logicielles de type Universal Software Radio Peripheral (USRP) [7] en considérant une somme de deux signaux mono-ton de puissances et fréquences distinctes.

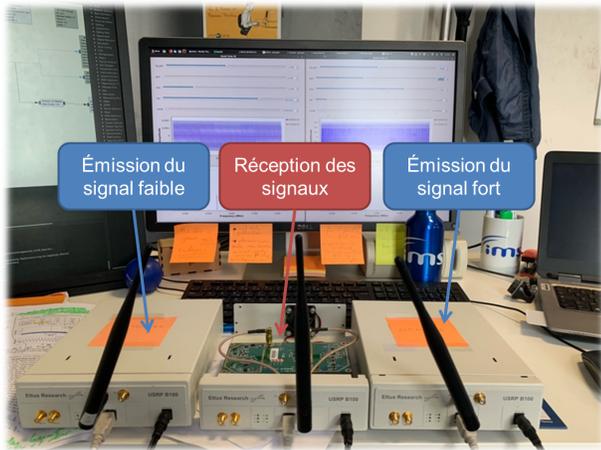


FIGURE 4 – Banc de test avec trois radios USRP : deux émetteurs pour les signaux faibles et forts et un récepteur

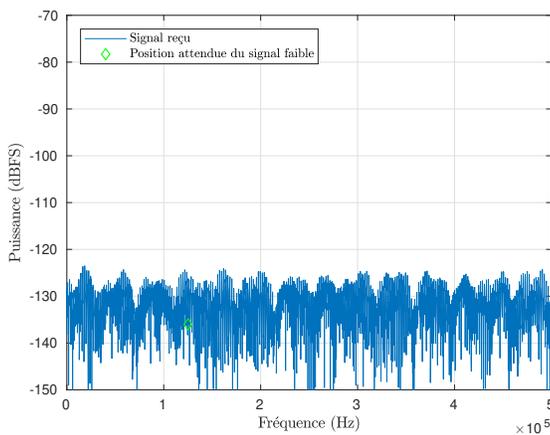


FIGURE 5 – Spectre du signal intra-quantum seul

La figure 4 présente le dispositif expérimental avec les deux radios d'émissions et celle de réception. Les échantillons sont récupérés afin de tracer une représentation spectrale et observer ainsi visuellement le phénomène de portage.

Les spectres sont obtenus à partir de $N = 4096$ points FFT et le signal faible est fixé à -92 dBFS. Cette valeur est obtenue en observant quand le signal faible disparaît soudainement ce qui signifie que sa disparition correspond bien à une perte intra-quantum et non pas à un mélange avec le bruit de quantification comme visible sur la figure 5. On remarque que le bruit n'est pas blanc. Ce phénomène est cohérent puisque l'approximation du bruit de quantification par un bruit blanc ne peut plus être effectuée selon [6] lorsque un signal seul et faible est numérisé.

En revanche, on observe sur la figure 6 que lorsque un signal de plus forte amplitude est émis, le signal faible apparaît et l'approximation du bruit de quantification par un bruit blanc peut de nouveau être effectuée. Ce résultat montre bien l'impact du signal fort sur la réception du signal faible et valide le principe exposé dans ce papier. Par ailleurs, ces

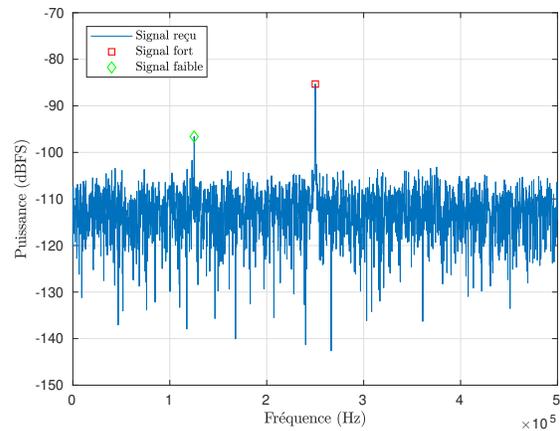


FIGURE 6 – Spectre du signal faible reçu avec un signal de plus forte amplitude

résultats expérimentaux sont cohérents avec ceux obtenus théoriquement à partir de l'équation (4) et détaillés en [3].

5 Conclusion

Nous avons proposé une nouvelle façon d'estimer la résolution nécessaire d'un CAN lors de la réception de plusieurs signaux avec un rapport de puissance important. Ce cas de figure est de plus en plus présent pour les communications IoT et ce dépassement de la limite théorique de la dynamique a été validé au travers de simulations prenant en compte des signaux de communications numériques ainsi que par une approche expérimentale. Ainsi, il ne s'agit pas d'une méthode de caractérisation mais de dimensionnement d'un CAN.

De nouveaux moyens de portage de signal pourraient être étudiés comme le bruit thermique dont les effets ont été brièvement présentés. De plus, cette meilleure estimation de la résolution ne résout pas le problème de la perte de signaux à cause des faibles dynamiques des CAN de manière générale.

Références

- [1] D. Van Ess. Algorithm - logarithmic signal companding - not just a good idea - it is μ -law. AN2095, December 2013.
- [2] M. Vallérian, G. Villemaud, B. Miscopein, T. Risset, and F. Hutu. Sdr for srd : Adc specifications for reconfigurable gateways in urban sensor networks. In *2014 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pages 178–180, Jan 2014.
- [3] B. Laporte-Fauret, G. Ferré, D. Dallet, B. Minger, and L. Fuché. ADC Resolution for Simultaneous Reception of Two Signals with High Dynamic Range. In *2018 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, pages 729–732, Dec 2018.
- [4] C.W. Therrien. *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*. Number vol. 1 in Prentice-Hall signal processing series. Prentice Hall, 1992.
- [5] Petre Stoica and Randolph L Moses. *Introduction to spectral analysis*, volume 1. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 1997.
- [6] R. M. Gray. Quantization noise spectra. *IEEE Transactions on Information Theory*, 36(6) :1220–1244, Nov 1990.
- [7] Ettus Knowledge Base. B100 — Ettus Knowledge Base, 2016. <https://kb.ettus.com/index.php?title=B100&oldid=2983>.