

Architectures numériques parallèles et successives pour la suppression de *spurs* multiples dans un terminal radio fréquence multi-standard et performances théoriques

Robin GERZAGUET^{1,2}, Laurent ROS¹, Fabrice BELVÈZE², Jean-Marc BROSSIER¹

¹Gipsa-Lab

11 rue des mathématiques, BP 46, 38402 Saint-Martin D'Herès, France

²ST-Ericsson

12 rue Jules Horowitz, 38000 Grenoble, France

robin.gerzaguete@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, laurent.ros@gipsa-lab.grenoble-inp.fr
fabrice.belveze@stericsson.com, jean-marc.brossier@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé – Le thème de ce papier concerne la comparaison d'architectures numériques pour l'annulation de plusieurs *spurs*, pollutions internes qui surviennent dans les terminaux Radio fréquence (RF). Les *spurs* sont des fuites issues des horloges internes d'un terminal RF. Ce sont des brouilleurs harmoniques qui entraînent une pollution du signal de réception. Plusieurs *spurs* pouvant tomber dans une bande de signal d'intérêt, on se propose ici d'étudier deux architectures numériques actives pour la suppression de ces multiples *spurs*: une structure parallèle et une structure successive, basées sur des blocs dédiés à l'annulation d'une seule *spur* mis à jour par un algorithme du gradient stochastique (LMS) utilisant une référence. On montre dans cet article que ces deux architectures ont des performances asymptotiques très voisines, avec un léger avantage pour la structure parallèle en terme de complexité.

Abstract – This paper deals with the comparison of two architectures dedicated to the cancellation of several spurs. Spurs are internal polluters which occur in a Radio-Frequency transceiver. They are characterized by pure tones due to leakages of harmonics of working frequencies. As several spurs can appear into the signal bandwidth, we focus here on two digital active architectures dedicated to multiple spurs cancellation: a successive architecture and a parallel one. Each of them are based on one spur cancellation blocks. These blocks use a Least Mean Square (LMS) algorithm with a reference of the polluter. We show that these two architectures have similar asymptotic performance with less complexity for the parallel structure.

1 Introduction

Depuis quelques années, les architectures matérielles dédiées aux communications sans fil ont profondément évoluées. Le besoin croissant en débit et en nouveaux services (data, vidéos, streaming,...) a impliqué la réunion plusieurs standards de communication au sein d'une même puce Radio-Fréquence (RF), rendant ces systèmes multi-standards. Ainsi les *System On chip* (SoC) actuels supportent le plus souvent plusieurs standards cellulaires (GSM, 3G, LTE,...) ainsi que des standards de réseau sans fil (WIFI, Bluetooth, NFC, ...). Cependant, cette multiplicité de standards supportés n'est pas sans conséquences. Les contraintes de *design* sont accrues du fait de la proximité des composants, de la complexité des sous-systèmes, du coût global et de l'efficacité énergétique que doivent vérifier les architectures mobiles [11, 8].

Un terminal RF multi-standard dispose de plusieurs horloges de fonctionnement, du fait de la multiplicité des fréquences de travail. Ces horloges sont composées d'harmoniques, et du fait de la proximité entre les composants, ces dernières sont susceptibles de fuir. Ces fuites, appelées les *spurs*, sont des brouilleurs

harmoniques qui peuvent se localiser dans la bande de fréquence d'un signal utile. Elles sont alors ramenées en bande de base dans l'étape de démodulation, et elles polluent le signal de réception, entraînant une perte de performance [12, 10].

Les stratégies communément utilisées pour la compensation de ces *spurs* sont de deux types : les compensations passives et les compensations actives. Les compensations passives sont principalement basées sur des stratégies analogiques. Ainsi, une première stratégie consiste à dimensionner les fréquences de travail de manière à ce que les harmoniques ne tombent pas dans les bandes de signal utile [7] (*Frequency Plan*). Une autre stratégie consiste à utiliser des horloges à fréquences variables, de manière à étaler la *spur* et limiter l'impact sur les performances [5, 3] (*clock Spreading*). Cependant ces stratégies entraînent des contraintes de *design* non négligeables, et sont rendues plus contraignantes dans le cadre des architectures multi-standards, où les bandes de signal et les harmoniques sont accrues en nombre. De fait, certaines stratégies sont actives, c'est à dire qu'elles utilisent des filtres sélectifs en fréquence [14, 9, 2], puisque les fréquences de ses *spurs* sont connues (et

situées à des multiples des fréquences d'horloges) [6].

On s'intéresse ici à l'annulation de plusieurs *spurs* qui polluent un signal utile. A partir d'un bloc dédié à l'annulation d'une seule *spur*, basé sur un algorithme du gradient stochastique (LMS) utilisant une référence ([1]), on envisage deux structures possibles dédiées à l'annulation de plusieurs *spurs* : une structure successive et une structure parallèle. Dans les deux cas, on calcule les performances théoriques en régime asymptotique. Ces résultats montrent que les deux structures présentent des performances tout à fait analogues, rendant la structure parallèle plus intéressante, du fait de la réduction de la complexité.

2 Problématique & algorithme initial

On considère un signal utile blanc et centré $x_0(n)$, de variance $\sigma_{x_0}^2$, et bruité par un bruit blanc additif Gaussien $b(n)$ de variance σ_b^2 . Ce signal est pollué par P *spurs*, qui sont des fréquences pures de pulsations connues, (et exprimées comme des multiples des fréquences d'horloges) [6]. Le signal discret complexe dans l'étage de réception Radio-Fréquence (RF) s'exprime en bande de base comme étant :

$$d(n) = x_0(n) + b(n) + \sum_{i=1}^P s_i(n) = x(n) + \sum_{i=1}^P A_i \cdot e^{j(\omega_i n + \phi_i)}, \quad (1)$$

où n correspond à l'indice temporel, $x(n) = x_0(n) + b(n)$ au signal utile bruité, qui est blanc, centré et de variance σ_x^2 , A_i représente l'amplitude de la i^{eme} *spur*, et ϕ_i sa phase. Seules les pulsations ω_i sont connues. On génère P références, de même pulsations que les P *spurs*, mais de phases et d'amplitudes quelconques :

$$u_i(n) = B_i e^{j(\omega_i n + \phi_i^R)}, \quad i = 1 \dots P$$

Pour chacune des *spurs*, on va utiliser une structure de réduction de *spur* basée sur l'algorithme du gradient stochastique [1] (cf figure 1). Il consiste à générer une estimée de la spur, $\hat{s}(n)$, en multipliant la référence $u(n)$ par un coefficient complexe scalaire $w(n)$, et de soustraire cette estimation à l'observation courante $d(n)$. Le coefficient $w(n)$ est alors mis à jour en utilisant une rétroaction sur la sortie.

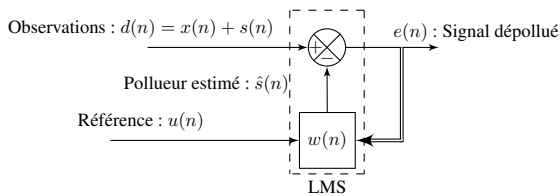


FIGURE 1 – Structure de l'algorithme LMS (1 bloc).

L'algorithme utilisé est l'algorithme LMS (*Least Mean Square*) complexe [13] :

$$\begin{aligned} \hat{s}(n) &= w(n) \cdot u(n) \\ e(n) &= d(n) - \hat{s}(n) \\ w(n+1) &= w(n) + \mu u^*(n) e(n), \end{aligned} \quad (2)$$

où μ est le pas de l'algorithme et $e(n)$ la sortie du bloc. On montre que le Rapport Signal plus Bruit sur Interférence (RSI) d'une telle structure vaut [4] :

$$RSI_b = -dB_{10} \left(\frac{E[|e(n) - x(n)|^2]}{E[|x(n)|^2]} \right) = -dB_{10} \left(\frac{\mu B^2}{2 - \mu B^2} \right), \quad (3)$$

où $dB_{10}(\cdot) = 10 \cdot \log(\cdot)$.

A partir de ce bloc, on va dériver deux architectures dédiées à l'annulation de P *spurs*.

3 Structure Successive : SIC-LMS

La première structure (cf fig.2) consiste à utiliser de manière successive les blocs définis par (2) (SIC pour *Successive Interference Cancellation*).

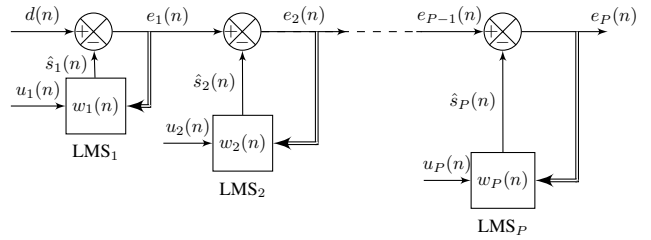


FIGURE 2 – Structure du SIC-LMS

Dans cette structure, pour les blocs 2 à P , l'entrée de l'algorithme est la sortie du bloc précédent. En utilisant le résultat de (3), en considérant que tous les blocs ont le même pas d'adaptation μ , on montre en utilisant une démonstration par récurrence qu'une telle structure a pour performance asymptotique :

$$RSI_{SIC-LMS}^P = -dB_{10} \left(\frac{\sum_{\alpha=1}^P \mu^\alpha \cdot 2^{P-\alpha} \cdot (-1)^{\alpha-1} \cdot C_\alpha^P}{\prod_{\alpha=1}^P (2 - \mu B_\alpha^2)} \right), \quad (4)$$

où C_α^P est la somme des produits croisés de taille α , défini par :

$$C_0^P = 1, \quad C_1^P = \sum_{i=1}^P B_i^2, \quad C_2^P = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1, j \neq i}^P B_i^2 \cdot B_j^2 \quad (5)$$

On remarque que (4) est fonction de l'ensemble des paramètres du problème, mais que les P *spurs* peuvent être traitées dans n'importe quel ordre. Ordonner les blocs par valeur de pulsation ou par amplitude (ne change pas l'expression théorique du RSI asymptotique).

4 Structure Parallèle : PIC-LMS

Les *spurs* sont de fréquences différentes, et on se propose d'utiliser la non corrélation temporelle de celles-ci. Ceci signifie que l'on peut traiter les blocs indépendamment les uns les autres, et que l'on peut donc le faire simultanément. On peut

de fait paralléliser la structure comme montré sur la figure 3. La résultante filtrée $y(n)$ est alors la somme des résultantes des blocs, et on utilise la sortie globale de la structure $e(n)$ pour former le signal d'erreur qui sera commune à tous les blocs, contrairement à l'architecture précédente.

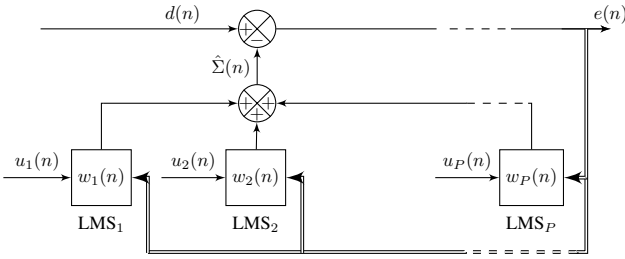


FIGURE 3 – Structure du PIC-LMS

L'algorithme associée à la structure PIC-LMS (PIC pour *Parallel Interference Cancellation*) est le suivant :

$$\hat{\Sigma}(n) = \sum_{i=1}^P w_i(n)u_i(n) \quad (6)$$

$$e(n) = d(n) - \hat{\Sigma}(n) \quad (7)$$

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu u_i^*(n) \cdot e(n) \quad \forall i = 1 \dots P, \quad (8)$$

où μ est le même pas pour tous les blocs. On montre que le RSI asymptotique peut se calculer de manière exacte comme étant :

$$RSI_{PIC-LMS}^P = -dB_{10} \left(\frac{\mu \sum_{i=1}^P B_i^2}{2 - \mu \sum_{i=1}^P B_i^2} \right) \quad (9)$$

L'expression du RSI est fonction des paramètres du problème, et on retrouve encore (3) dans le cadre d'une seule *spur*.

5 Simulations : Performances

On réalise une simulation monte-carlo pour les deux structures et pour un nombre de *spurs* variant de 2 à 5 (pour 1 *spur*, les deux systèmes se ramenant à (2)). Pour ces simulations, une entrée blanche est considérée, et on ajoute P *spurs* de RSI initial 10dB. Dans un premier temps, on représente sur la figure 4 les performances de la structure SIC-LMS, et on remarque que la courbe obtenue par simulation corrobore la théorie définie dans (4). L'augmentation du nombre de *spurs* diminue la performance globale de la structure du fait de l'ajout des erreurs d'estimation de chacun des blocs dédiés à l'annulation d'une *spur*.

Sur la figure 5, on représente les performances de la structure PIC-LMS en fonction du pas pour un nombre différents de *spurs*. On peut faire les mêmes commentaires que pour le SIC-LMS, à savoir que la théorie définie dans (9) est validée, et que l'augmentation du nombre de *spurs* diminue les performances globales de l'algorithme.

On compare alors les performances des deux structures sur la figure 6, au niveau des équations théoriques définies en (4) pour

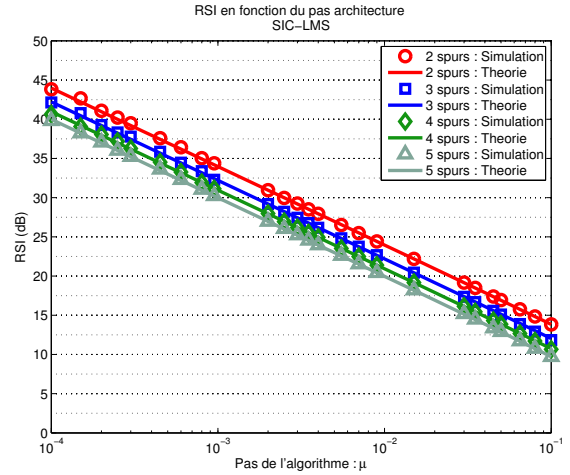


FIGURE 4 – Performance de la structure SIC-LMS en fonction du pas pour un nombre différent de *spurs* en entrée du système comparée à la valeur théorique via (4).

la structure successive et (9) pour la structure parallèle dans le cadre de 4 *spurs*. On valide donc bien l'analogie entre les deux structures puisque les performances sont tout à fait équivalentes (mais néanmoins, les performance ne sont pas strictement les mêmes, ce qui empêche d'égaliser (4) avec (9)).

6 Complexité

La structure parallèle, du fait de la réutilisation du même signal de sortie pour tous les blocs, à une plus faible complexité que la structure successive, comme le montre la table 1 qui compare le nombre d'opérations pour les deux structures¹. On remarque que le nombre d'opérations est le même (puisque les deux structures sont basées sur les mêmes blocs), mais que le nombre de variables est légèrement plus faible pour la structure PIC-LMS. De fait cette structure est un peu plus adaptée pour la compensation de multiples *spurs*.

	Additions	Multiplications	Variables
SIC-LMS	$8 \cdot P$	$12 \cdot P$	$1 + 10 \cdot P$
PIC-LMS	$8 \cdot P$	$12 \cdot P$	$3 + 8 \cdot P$

TABLE 1 – Comparaison de la complexité des deux structures pour P *spurs* (opérations réelles).

7 Conclusion

Dans ce papier on a comparé les performances asymptotiques de deux structures dédiées à l'annulation de multiples *spurs*. Les *spurs* sont des harmoniques des horloges de fonctionnement qui fuient dans un signal Radio Fréquence. On s'est

1. Après séparation de l'algorithme complexe en partie réelle et partie imaginaire.

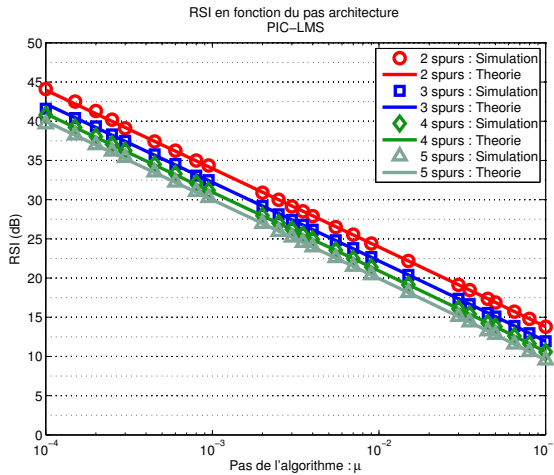


FIGURE 5 – Performance de la structure PIC-LMS en fonction du pas pour un nombre différent de *spurs* en entrée du système comparée à la valeur théorique via (9).

intéressé à une méthode active d'annulation basée sur un algorithme LMS exploitant la connaissance de la fréquence de la *spur*. A partir d'un bloc dédié à l'annulation d'une *spur*, on a dérivé une structure successive et une structure parallèle pour la compensation de plusieurs brouilleurs harmoniques. Dans les deux cas, on a calculé de manière analytique le rapport signal sur interférence pour un nombre quelconque de *spurs*. Ces résultats montrent que les deux structures présentent des performances tout à fait analogues, rendant la structure parallèle un peu plus intéressante, du fait de la réduction de la complexité.

Références

- [1] R Gerzaguet, L Ros & al. Performances d'un suppresseur numérique adaptatif de *spurs* dans un terminal radio-fréquence multistandard en présence d'imperfections sur la référence. In *24eme colloque Gretsisi*, 2013.
- [2] S. Gunturi and J. Balakrishnan. Mitigation of narrow-band interference in differentially modulated communication systems. In *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009. ICASSP 2009. IEEE International Conference on*, pages 2549–2552, april 2009.
- [3] K.B. Hardin, J.T. Fessler & al. A study of the interference potential of spread spectrum clock generation techniques. In *Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record., 1995 IEEE International Symposium on*, pages 624–629, aug 1995.
- [4] S.S. Haykin. *Adaptive filter theory*. Prentice-Hall information and system sciences series. Prentice Hall, 1996.
- [5] Sheng-Feng Ho and Hong-Yi Huang. A wideband programmable spread-spectrum clock generator. In *Asian Solid-State Circuits Conference, 2005*, pages 521–524, nov. 2005.

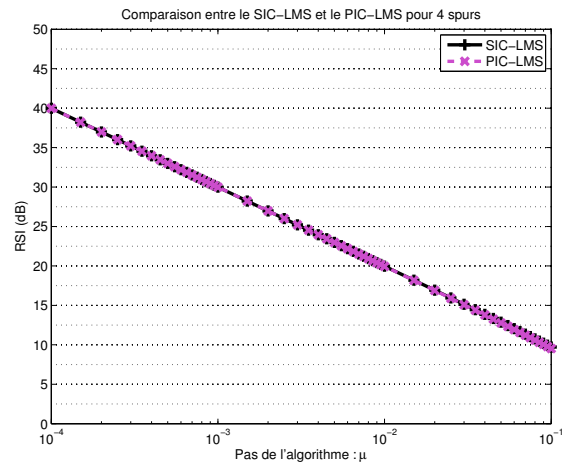


FIGURE 6 – Comparaison entre les deux architectures (SIC-LMS et PIC-LMS) pour 4 *spurs* polluantes, validant l'analogie en performance entre les deux structures.

- [6] S. Kousai, K. Agawa & al. Low frequency spurs of vco due to noise propagation from digital i/o's and their effects on performance of bluetooth soc. In *Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2005. Digest of Papers. 2005 IEEE*, pages 589–592, june 2005.
- [7] C. Mishra, A. Valdes-Garcia & al. Frequency planning and synthesizer architectures for multiband ofdm uwb radios. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 53(12):3744–3756, dec. 2005.
- [8] A. Rusu and M. Ismail. Design challenges of wireless mobile radios. In *Signals, Circuits and Systems, 2007. ISSCS 2007. International Symposium on*, volume 1, pages 1–4, july 2007.
- [9] C. Samori, M. Zanusso & al. Multipath adaptive cancellation of divider non-linearity in fractional-n pll's. In *Circuits and Systems (ISCAS), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 418–421, may 2011.
- [10] Shang-Kee Ting and A.H. Sayed. Digital suppression of spurious pll tones in a/d converters. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 59(11):5275–5288, nov. 2011.
- [11] P. Vainikainen, J. Holopainen & al. More than 20 antenna elements in future mobile phones, threat or opportunity? In *Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on*, pages 2940–2943, march 2009.
- [12] K. Waheed, R. Bogdan Staszewski & al. Injection spurs due to reference frequency retiming by a channel dependent clock at the adpll rf output and its mitigation. In *Circuits and Systems, 2007. ISCAS 2007. IEEE International Symposium on*, pages 3291–3294, may 2007.
- [13] B. Widrow, J. McCool & al. The complex lms algorithm. *Proceedings of the IEEE*, 63(4):719–720, april 1975.
- [14] P. Zahradnik, M. Vlcek & al. Dc-notch fir filters for zero-if receivers. In *Networking, 2007. ICN '07. Sixth International Conference on*, pages 68–68, 2007.